İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ ENERJİ ENSTİTÜSÜ

PAKETLENMİŞ GÖZENEKLİ BİR YATAKTA DUYULUR ISIL ENERJİ DEPOLAMANIN SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tayfun ERKINACI

Enerji Bilim ve Teknoloji Anabilim Dalı

Enerji Bilim ve Teknoloji Programı

HAZİRAN 2017

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ ENERJİ ENSTİTÜSÜ

PAKETLENMİŞ GÖZENEKLİ BİR YATAKTA DUYULUR ISIL ENERJİ DEPOLAMANIN SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tayfun Erkınacı
(301141028)

Enerji Bilim ve Teknoloji Anabilim Dalı

Enerji Bilim ve Teknoloji Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Filiz BAYTAŞ

İTÜ, Enerji Enstitüsü'nün 301141028 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Tayfun ERKINACI, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "PAKETLENMİŞ GÖZENEKLİ BİR YATAKTA DUYULUR ISIL ENERJİ DEPOLAMANIN SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ
" başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı :	**Prof. Dr. Filiz BAYTAŞ** İstanbul Teknik Üniversitesi	.....
Jüri Üyeleri :	**Prof. Dr. Üner ÇOLAK** İstanbul Teknik Üniversitesi	.....
	Prof. Dr. Hasan HEPERKAN İstanbul Aydın Üniversitesi	.....

Teslim Tarihi : 12 Mayıs 2017
Savunma Tarihi : 7 Haziran 2017

ÖNSÖZ

Enerji, evrenin en temel unsurlarından biridir ve toplumlar için vazgeçilmezdir. Tüm yaşamsal ve endüstriyel faaliyetler enerjiye gereksinim duyar. Ülkelerin enerji talepleri sanayileşme, kalkınma, şehirleşme, teknolojinin yaygınlaşması, refah ve nüfus artışına bağlı olarak hızla değişim göstermektedir. Enerjinin, sürekli ve güvenli olarak arz edilmesinin yanı sıra düşük maliyetli olarak arz edilmesi de büyük önem taşımaktadır. Enerji fiyatlarının sürekli artması, fosil yakıtların belli bir süre sonra bitecek ve üretiminin oldukça pahalı olması alternatif enerji kaynaklarından yüksek verimle faydanılmasını zorunlu kılmaktadır. Bu tez çalışması kapsamında; birincil ve ikincil enerji kaynakları arasında ana bağlantı noktası olan, enerji arz ve talebi arasındaki dengeyi sağlayan ısıl enerji depolama sisteminin tasarımı ve analizi gerçekleştirilmiştir.

Yüksek Lisans Tez çalışmam süresince bana yol gösteren tez danışmanım ve hocam Sayın Prof. Dr. Filiz Baytaş'a, ilgi ve yardımlarından dolayı teşekkürlerimi sunarım.

Mayıs 2017

Tayfun Erkınacı
(Makine Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ ..... **v**
İÇINDEKILER ..... **vii**
KISALTMALAR ..... **ix**
SEMBOLLER ..... **xi**
ÇİZELGE LİSTESİ ..... **xiii**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **xv**
ÖZET ..... **xvii**
SUMMARY ..... **xix**
1. GİRİŞ **1**
1.1 Tezin Amacı 1
1.2 Literatür Araştırması 2
1.3 Hipotez 4
2. GÖZENEKLİ ORTAMLARDA AKIŞ VE KORUNUM DENKLEMLERİ **5**
2.1 Gözenekli Ortamların Özellikleri 5
2.2 Gözenekli Ortamda Temel Denklemler 6
2.2.1 Darcy yasası 7
2.2.2 Ergün denklemi 8
2.2.3 Brinkman denklemi 9
2.3 Gözenekli Ortamlar İçin Korunum Denklemleri 9
2.3.1 Kütle süreklilik denklemi 9
2.3.2 Momentum denklemi 10
2.3.3 Hacim ortalanmış enerji denklemi 10
3. ENERJİ DEPOLAMA TEKNOLOJİLERİ **13**
3.1 Mekanik Enerji Depolama 13
3.2 Kimyasal Enerji Depolama 14
3.3 Elektrostatik Enerji Depolama 14
3.4 Manyetik Enerji Depolama 15
3.5 Biyolojik Enerji Depolama 15
3.6 Isıl Enerji Depolama 15
3.6.1 Duyulur ısı depolama 18
3.6.2 Gizli ısı depolama 20
3.6.3 Isıl-kimyasal enerji depolama 20
3.7 Isıl enerji depolama sistemi seçim ölçütleri 21
3.8 Yoğunlaştırılmış Güneş Enerjisi Teknolojilerine Genel Bakış 22
3.8.1 Parabolik Oluk Yoğunlaştırıcılı Sistemler 22
3.8.2 Frensel Aynalı Yoğunlaştırıcılar 23
3.8.3 Parabolik Çanak Sistemi 23
3.8.4 Güneş Kulesi 23
3.8.5 Parabolik Çanak Sistemi 23
3.8.6 Güneş Kulesi 24
4. PAKETLENMİŞ GÖZENEKLİ YATAKTA DUYULUR ISIL ENERJİ DEPOLAMA **25**

4.1 Matematik Model 25
4.2 Korunum Denklemleri 28
4.3 Sayısal Yöntem 29
4.4 ANSYS Fluent Programı Aracılığıyla Sayısal Çözümün Gerçekleştirilmesi 30
4.5 Çelik Bilyelerden Oluşan Gözenekli Kanalda Isıl Enerji Depolama 32
4.5.1 Doğrulama Çalışması 32
4.5.2 Çeşitli gözeneklilik değerleri için 0,4 [kg/m²s] debide ısıl enerji depolama: Şarj aşaması 36
4.5.3 Çeşitli gözeneklilik değerleri için 0,3 [kg/m²s] debide ısıl enerji depolama: Şarj aşaması 40
4.5.4 Çeşitli gözeneklilik değerleri için 0,2 [kg/m²s] debide ısıl enerji depolama: – şarj 43
4.5.5 Debi 0,4 [kg/m²s] ve çeşitli gözeneklilik değerlerinde deşarjın incelenmesi 48
4.5.6 Debi 0,3 [kg/m²s] ve çeşitli gözeneklilik değerlerinde deşarjın incelenmesi 51
4.5.7 Debi 0,2 [kg/m²s] ve çeşitli gözeneklilik değerlerinde deşarjın incelenmesi 54
5. FARKLI DEPOLAMA MALZEMELERİNDEN OLUŞAN GÖZENEKLİ KANALDA ISIL ENERJİ DEPOLAMANIN KARŞILAŞTIRILMASI 59
5.1 Çelik, kaya (rock) ve cordierite bilyelerden oluşan gözenekli yatakta ısıl enerji depolama - şarj 59
6. SONUÇLAR 63
KAYNAKLAR 65
EKLER 69
ÖZGEÇMİŞ 77

KISALTMALAR

IRENA **:** International Renewable Energy Agency
TES **:** Termal Energy Storage
TTH **:** Temsili Temel Hacim
UDF **:** User Definition Function
YGE **:** Yoğunlaştırılmış Güneş Enerjisi
YEGM **:** Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü

SEMBOLLER

a_{sf}	: Arayüzey alan yoğunluğu
C	: Sürüklenme katsayısı
C_{ap}	: Akışkan öz ısısı
C_f	: Atalet katsayısı
C_E	: Ergün sürüklenme katsayısı
C_{eff}	: Efektif ısı kapasitesi
C_p	: Isı kapasitesi
C_{vs}	: Hacimsel ısı kapasitesi
d_P	: Parçacık çapı
h_{sf}	: Fazlar arası taşınımla ısı geçişi katsayısı
K	: Geçirgenlik
k	: Isıl iletkenlik
k_a	: Akışkanın ısıl iletkenliği
k_k	: Katının ısıl iletkenliği
g	: Yer çekimi ivmesi
P	: Basınç
r	: Dikey eksen
Re_p	: Parçacık Reynolds sayısı
S	: Entropi
Q	: Isı
$Q_{depolanan}$	: Depolanan enerji
q_{mol}	: Molar ısı enerji
q'''	: Isı kaynağı
T	: Sıcaklık
T^*	: Erime sıcaklığı
T_{am}	: Çevre sıcaklığı
t	: Zaman
u_p	: Yatay hız bileşeni
V	: Hacim
V_a	: Akışkanın hacmi
V_k	: Katının hacmi
v_f	: Akışkanın hızı
v_p	: Dikey hız bileşeni
z	: yükseklik
ε	: Gözeneklilik
β	: Akışkanın niceliği
β^*	: Mikroskobik boyutta yerel nicelik
β_a	: Akışkan fazı niceliği
ρ	: Yoğunluk
ρ_{eff}	: Efektif yoğunluk
ρ_f	: Akışkanın yoğunluğu

ρ_s : Katının yoğunluğu
ρ_x : Yoğunluk
σ : Isı depolama sığaları oranı
α_{et} : Etkin ısıl yayılım katsayısı
μ : Dinamik viskozite
μ_e : Efektif viskozite

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 4.1 : Depolama malzemelerini termofiziksel özellikleri. ……..…….....27
Çizelge 4.2 : Çeşitli gözeneklilik değerlerinde ve 0,4 kg/m2s debide depolanan ısı miktarları açısından (Andreozzi ve diğ., 2009) ve tez çalışmasının karşılaştırılması (0 – 7200 s)……..…….....34
Çizelge 4.3 : Çeşitli gözeneklilik değerlerinde ve 0,4 kg/m2s debide depolanan ısı miktarları açısından (Andreozzi ve diğ., 2009) ve tez çalışmasının karşılaştırılması (10800 – 14400 s). ……..…….....34
Çizelge 4.4 : Çeşitli gözeneklilik değerlerinde ve 0,4 kg/m2s debide depolanan ısı miktarları açısından (Andreozzi ve diğ., 2009) ve tez çalışmasının karşılaştırılması (18000 – 21600 s). ……..…….....35
Çizelge 4.5 : Çeşitli gözeneklilik değerlerinde ve 0,4 kg/m^{2}s debide depolanan ısı miktarları. …….…….....38
Çizelge 4.6 : Çeşitli gözeneklilik değerlerinde ve 0,3 kg/m^{2}s debide depolanan ısı miktarları. …….....42
Çizelge 4.7 : Çeşitli gözeneklilik değerlerinde ve 0,2 kg/m^{2}s debide depolanan ısı miktarları. …….…….....45
Çizelge 4.8 : Çeşitli gözeneklilik değerlerinde ve 0,4 kg/m^{2}s debide sistemde kalan ısı miktarları. …….…….....49
Çizelge 4.9 : Çeşitli gözeneklilik değerlerinde ve 0,3 kg/m^{2}s debide sistemde kalan ısı miktarları. ……..…….....52
Çizelge 4.10 : Çeşitli gözeneklilik değerlerinde ve 0,2 kg/m^{2}s debide sistemde kalan ısı miktarları. …….....……..….....55
Çizelge B.1 : Çeşitli gözeneklilik değerlerinde ve 0,4 kg/m^{2}s debide depolanan ısı miktarları açısından farklı zaman aralıklarında çelik, kaya (rock) ve cordierite depolama malzemelerinin karşılaştırılması. 72
Çizelge B.2 : Çeşitli gözeneklilik değerlerinde ve 0,2 kg/m^{2}s debide depolanan ısı miktarları açısından farklı zaman aralıklarında çelik, kaya (rock) ve cordierite depolama malzemelerinin karşılaştırılması. ……..…74

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Temsili Temel Hacmin Tanımlanması (Jambhekar, 2011) …….....7
Şekil 3.1 : Isıl enerji depolamanın sınıflandırılması.…….…….....17
Şekil 3.2 : Isıl enerji depolamanın enerji malzemelerine göre sınıflandırılması.……..……..…….....18
Şekil 3.3 : Yoğunlaştırılmış Güneş Enerjisi Teknolojileri a) Parabolik Oluk, b) Frensel aynalı, c) Parabolik Çanak, d) Güneş Kulesi (Livatyalı, 2011)...24
Şekil 4.1 : Havanın 1 atm ve 10 atm'de termofiziksel özelliklerinin sistem çalışma sıcaklığı aralığında (1073 – 1473 K) değişimi a) yoğunluk, b) öz ısı, c)termal iletkenlik, d) dinamik viskozite.……26
Şekil 4.2 : Sistem geometrisi……..……..…….....27
Şekil 4.3 : 0,4 kg/m^{2}s debide deşarj hali için çelik bilyelerle oluşturulan gözenekli kanalda ısıl depolama için bir karşılaştırma a) (Andreozi v.d., 2009), b) Tez çalışması……...…….....33
Şekil 4.4 : Çeşitli gözeneklilik değerlerinde 0,4 kg/m^{2}s debide şarj hali için ısıl enerji depolama.……..….....36
Şekil 4.5 : Isı depolama sırasında 0,4 kg/m^{2}s debi ve gözeneklilik 0,2 için gözenekli yatak boyunca sıcaklık dağılımları (0–25200 s).….....39
Şekil 4.6 : Isı depolama sırasında 0,4 kg/m^{2}s debi ve gözeneklilik 0,4 için gözenekli yatak boyunca sıcaklık dağılımları (0–25200 s).……..39
Şekil 4.7 : Isı depolama sırasında 0,4 kg/m^{2}s debi ve gözeneklilik 0,6 için gözenekli yatak boyunca sıcaklık dağılımları (0–25200 s).…….....40
Şekil 4.8 : Çeşitli gözeneklilik değerlerinde, 0,3 kg/m^{2}s debide şarj hali için ısıl enerji depolama.……..…….....41
Şekil 4.9 : Isı depolama sırasında 0,3 kg/m^{2}s debi ve gözeneklilik 0,2 için gözenekli yatak boyunca sıcaklık dağılımları (0–25200 s)…….…….....43
Şekil 4.10 : Isı depolama sırasında 0,3 kg/m^{2}s debi ve gözeneklilik 0,4 için gözenekli yatak boyunca sıcaklık dağılımları (0–25200 s)…….…….....43
Şekil 4.11 : Isı depolama sırasında 0,3 kg/m^{2}s debi ve gözeneklilik 0,6 için gözenekli yatak boyunca sıcaklık dağılımları (0–25200 s)…….…….....44
Şekil 4.12 : Çeşitli gözeneklilik değerlerinde, 0,2 kg/m^{2}s debide şarj hali için ısıl enerji depolama …….…….....46
Şekil 4.13 : Isı depolama sırasında 0,2 kg/m^{2}s debi ve gözeneklilik 0,2 için gözenekli yatak boyunca sıcaklık dağılımları (0–25200 s)……..….....46
Şekil 4.14 : Isı depolama sırasında 0,2 kg/m^{2}s debi ve gözeneklilik 0,4 için gözenekli yatak boyunca sıcaklık dağılımları (0–25200 s)……..….....47
Şekil 4.15 : Isı depolama sırasında 0,2 kg/m^{2}s debi ve gözeneklilik 0,6 için gözenekli yatak boyunca sıcaklık dağılımları (0–25200 s)……..….....47
Şekil 4.16 : 0,4 kg/m2 s debide deşarj hali için depolanan ısı miktarları …….....48
Şekil 4.17 : Deşarj sırasında 0,4 kg/m^{2}s debi ve gözeneklilik 0,2 için gözenekli yatak boyunca sıcaklık dağılımları (0–25200 s) ……....50

Şekil 4.18 : Deşarj sırasında 0,4 kg/m^{2}s debi ve gözeneklilik 0,4 için gözenekli yatak boyunca sıcaklık dağılımları (0–25200 s).....50
Şekil 4.19 : Deşarj sırasında 0,4 kg/m^{2}s debi ve gözeneklilik 0,6 için gözenekli yatak boyunca sıcaklık dağılımları (0–25200 s).....51
Şekil 4.20 : 0,3 kg/m^{2}s debide deşarj hali için tez çalışmasının makale ile karşılaştırılması.....51
Şekil 4.21 : Deşarj sırasında 0,3 kg/m^{2}s debi ve gözeneklilik 0,2 için gözenekli yatak boyunca sıcaklık dağılımları (0–25200 s).....53
Şekil 4.22 : Deşarj sırasında 0,3 kg/m^{2}s debi ve gözeneklilik 0,4 için gözenekli yatak boyunca sıcaklık dağılımları (0–25200 s).....53
Şekil 4.23 : Deşarj sırasında 0,3 kg/m^{2}s debi ve gözeneklilik 0,6 için gözenekli yatak boyunca sıcaklık dağılımları (0–25200 s).....54
Şekil 4.24 : 0.2 kg/m^{2}s debide deşarj hali için tez çalışmasının makale ile karşılaştırılması……..……54
Şekil 4.25 : Deşarj sırasında 0,2 kg/m^{2}s debi ve gözeneklilik 0,2 için gözenekli yatak boyunca sıcaklık dağılımları (0–28800 s).....56
Şekil 4.26 : Deşarj sırasında 0,2 kg/m^{2}s debi ve gözeneklilik 0,4 için gözenekli yatak boyunca sıcaklık dağılımları (0–28800 s).....56
Şekil 4.27 : Deşarj sırasında 0,2 kg/m^{2}s debi ve gözeneklilik 0,6 için gözenekli yatak boyunca sıcaklık dağılımları (0–28800 s).....57
Şekil 5.1 : 0,4 kg/m2s debide şarj hali için farklı depolama malzemelerinin karşılaştırılması. a) Çelik, b) Kaya (Rock) ve c) Cordierite……...60
Şekil 5.2 : 0,2 kg/m2s debide şarj hali için farklı depolama malzemelerinin karşılaştırılması. a) Çelik, b) Kaya (Rock) ve c) Cordierite……...61
Şekil A.1 : Gözeneklilik 0.6 değeri için katı matris ve akışkan arasındaki ısı taşınım katsayısı…….....70

PAKETLENMİŞ GÖZENEKLİ BİR YATAKTA DUYULUR ISIL ENERJİ DEPOLAMANIN SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ

ÖZET

Isıl enerji duyulur ısı, gizli ısı ve kimyasal enerji olarak termal enerji depolama sistemlerinde (TES) depolanabilmektedir. Duyulur ısı formunda enerji depolamada enerji malzemenin fazında değişiklik olmadan katı ve sıvı ısıtılarak ve soğutularak depolanabilir ve sistemden çekilebilir. Paketlenmiş yatakta duyulur ısıl enerji depolama sistemleri, paketlenmiş katı malzeme ve boşluktaki akışkandan oluşmaktadır. Enerji gözenekli ortamda depolanmaktadır. Gözenekli ortamın türü ve gözeneklilik değeri paketlenmiş yatak ısıl enerji depolama sistemleri için çok önemlidir.

Bu tez çalışmasında paketlenmiş yatakta duyulur ısıl enerji depolama sistemi sayısal olarak analiz edilmiştir. Paketlenmiş yatak teknolojisinin kullanıldığı gözenekli ortam, ısı transferi akışkanı olarak havadan ve ısıl enerji depolama malzemesi olarak çelik, cordierite ve kaya parçasından oluşan bilyelerden oluşmaktadır. Bu malzemeler yüksek sıcaklıkta ısıl depolama için uygundur. Korunum denklemleri ANSYS Fluent programı kullanılarak çözülmüştür. Gözenekli ortamda ısı transferi için ısıl dengede olmayan sistem kullanılmıştır. Analizler zamana bağlı olarak gerçekleştirilmiştir. Akışkanın ısıl fiziksel özellikleri sıcaklığa bağlı değişirken, katının ısıl fiziksel özellikleri sabit kabul edilmiştir. Sonuçlarda çeşitli malzemelerin, debinin ve gözenekliliğin depolanan enerji miktarı ve depolama süresine üzerindeki etkisi verilmiştir.

Paketlenmiş yatak teknolojisinin kullanıldığı depolama sistemi geometrisi silindirik olarak düşünülmüştür ve analiz yapılırken zamandan tasarruf etmek için sistem 2 boyutlu simetrik olarak modellenmiştir. Depolama sisteminin çapı 0,6 m ve uzunluğu 1 m'dir. Depolama sistemi atmosferik şartlarda analiz edilmiştir. Sistem çalışma sıcaklığında basıncın havanın yoğunluğu üzerinde etkisi çok olurken, ısı kapasitesi üzerindeki etkisi azdır ve havanın ısıl iletkenliği ve dinamik viskozitesi üzerinde etkisi ihmal edilecek düzeyde azdır.

Bu tez çalışmasında; ısıl enerji depolama sisteminin ilk şarj ve deşarj durumları incelenmiştir. Şarj aşamasında hava sisteme 1473 K'de giriş yaparken sistem başlangıç koşulu sıcaklığı 1073 K'dir. Deşarj aşamasında ise tam tersidir. Çevreyle olan ısı kaybı ihmal edilmiştir.

Sayısal analizler 3 farklı debi ve 7 farklı gözeneklilik değerinde gerçekleştirilmiştir. Momentum denkleminin çözümü için Brinkman-Forchheimer-Darcy denklemi kullanılmıştır ve gözenekli ortamın ısıl dengede olmadığı kabul edilmiştir. Akışkanın sıkıştırılamaz olduğu kabul edilmiş ve zamana bağlı çözüm gerçekleştirilmiştir. Akış kanal içerisinde tam gelişmiş akış özelliği göstermektedir. Geçirgenlik ve ataletsel katsayılar paketlenmiş gözenekli yatak düzenine göre hesaplanmıştır.

Analizler ANSYS Fluent programı aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. Dolgulu yatak teknolojisinin kullanıldığı ısıl enerji depolama sistemi için giriş kısmı için mass flow inlet sınır şartı kullanılırken çıkış kısmı için tam gelişmiş akış koşulunu elde etmek için outflow sınır şartı kullanılmıştır. Duvarlar için ise kaymama sınır şartı uygulanmıştır. Duvar sınır şartı yalıtılmış olarak düşünülürken giriş kısmında havanın şarj ve deşarj aşamaları için sırasıyla 1473 ve 1073 K'de ve sabit hızda girdiği kabul edilmiştir. Başlangıçta depolama sisteminin sıcaklığı şarj aşaması için 1073 K deşarj aşaması içinse 1473 K olarak düşünülmüştür.

Her gözeneklilik değerinde ısıl enerji depolama sistemi doygunluğa ulaşmıştır. Çalışmada, küçük gözeneklilik değerlerinde sistemde büyük gözeneklilik değerlerine göre daha fazla enerji depolandığı gözlemlenmiştir. Çünkü gözeneklilik değeri küçüldükçe ısıl kapasite artmaktadır. 3 farklı depolama malzemesi kullanılmıştır. Malzemelerin ısı kapasiteleri, ısıl iletkenlikleri ve katı yoğunlukları farklıdır. Malzemeler arasında çelik bilyelerden oluşan gözenekli yatakta en çok enerji depolanırken, sonuçlar kaya parçası ve cordierite malzemelerden oluşan yatakların enerji depolamalarının birbirlerine yakın ama çeliğe göre daha az olduğunu göstermiştir. Depolama malzemesinin en önemli özelliği hacimsel ısı kapasitesidir. Malzemenin ısıl iletkenliği depolanan enerji miktarı üzerine etkisi ise çok azdır. Analizi yapılan gözeneklilik değerleri için, akışkanın debisinin artmasının depolanan enerji miktarına etkisi olmazken sistemin ısıl doygunluğa ulaşma süresi kısalmıştır. Bunun nedeni debi arttığında katı matris ve akışkan arasında gerçekleşen taşınımla ısı transferinin artmasıdır.

NUMERICAL INVESTIGATION OF SENSIBLE THERMAL ENERGY STORAGE IN A PACKED POROUS BED

SUMMARY

Thermal energy is stored as sensible heat, latent heat or chemical energy in thermal energy storage systems (TES). Energy is stored or extracted by heating or cooling a liquid or a solid without phase changing in a sensible heat storage system. TES in packed beds is receiving increased attention as a necessary component for efficient implementation of concentrated solar power. A sensible packed bed thermal energy storage sysytem consists of porous media as packed solid material and fluid in voids. The type of porous medium and porosity are important for packed bed thermal storage systems.

A sensible packed bed thermal energy storage system is numerically investigated in this study. The packed bed porous system has air as heat transfer fluid and solid spheres as thermal storage material. Steel, cordierite and rock spheres are used as solid part of porous medium. These materials are convenient for thermal energy storage at high temperature. The governing equations are solved by using the commercial ANSYS fluent software. The local thermal non-equilibrium model (LTNE) is used for heat transfer in the porous medium. The problem is analyzed in transient time. The fluid thermo-physical properties are temperature dependent, the solid's properties assumed as constant. The results showed that the kind of material, the porosity of the packed bed, and the mass flow rate effect on the thermal energy storage and the storage time.

The packed bed storage system geometry considered in the investigation is a 2D axisymmetric cylindrical tank whose diameter is 0.60 m and height is 1.0 m. Packed bed configuration with sphere is considered for porous media. Rock, steel and cordierite are used as solid storage material and air as heat transfer fluid. This storage system operates at atmospheric pressure (P= 1.013 bars). Pressure has a strong effect on the air density, and a minor effect on the heat capacity. In addition, it has no effect on the thermal conductivity and the dynamic viscosity of dry air. As a result, according to working conditions of storage system for fluid thermophysical properties as a function of temperature were carried out.

In this study first charging and discharging cycle of thermal energy storage system is examined. While in the charging case air enters the system at 1473 K and the initial temperature of packed bed TES system is equal 1073 K, for discharging case air enters the system 1073 K and the initial temperature of packed bed system is equal to 1473 K. Heat loses with the external environment is neglected.

Numerical simulations are carried out seven porosity values and three different solid materials. Results are given in terms of stored thermal energy as a function of time. Brinkman-Forchheimer-extended Darcy model is used for momentum equation and the porous medium is assumed to be in local thermal non-equilibrium with the fluid.

In addition, it is assumed that the fluid is incompressible and the flow is unsteady. Heat transfers by radiation and heat losses to the surrounding are neglected. The flow is fully developed in the channel. In addition, the permeability K and inertia coefficient C of porous media are calculated for packed bed configuration.

The results from numerical simulations have been obtained using the commercial ANSYS fluent software. A 2D-axialsymmetric option is enabled to simulate the storage system. The geometry of high temperature sensible heat storage system is cylindrical. While the fluid thermo-physical properties are temperature dependent, the solid's properties assumed as constant. The governing equations are solved for incompressible laminar flow and fully developed forced convection in transient regime. Because of solid and fluid phases have significantly different heat capacities and thermal conductivities, the local thermal non-equilibrium model (LTNE) is used to model heat transfer in the porous medium.

For thermal energy storage system, with packed bed configuration, mass flow inlet boundary conditions are used at inlet section. Outflow boundary conditions are used at the outlet section to obtain fully developed flow and no-slip boundary conditions are used for wall. While walls considered adiabatic, inlet section temperature is assigned 1473 K. The initial temperature of solid zone and fluid is assumed to be equal to 1073 K.

The SIMPLE algorithm is used to couple pressure and velocity. The convergence criterion is 10^{-3} for the residual of continuity equation and velocity component and it is 10^{-6} for the residuals of the energy. A second order upwind scheme is used for spatial discretization of the convective fluxes as well as the transient one with a first-order implicit formulation. Presto is selected as pressure interpolation scheme.

A grid dependence analysis is accomplished for mass flow rate G=0.4 kg/m^{2}s, inlet fluid temperature T_{inlet}= 1473 K and porosity ε=0.6. Five meshes are considered: 20x60, 40x120, 80x240, 160x480, and 320x960. Volumetric fluid average temperature is monitored. Among results, the mesh 160x480 is used. For time step the Courant- Friadrichs – Lewy (CFL) number provides a guide for choosing a time step in an implicit solution. This is a minimum requirement for explicit solution, but it can be restrictive because it causes too time step as the mesh size decreases. Since the implicit solution is steady for all time steps, this condition can be relaxed to a converged solution instead. In addition, dependence analysis was carried out for different time steps and 5 s time step was chosen.

Numerical solutions are carried out for the mass flow rate values of 0.2, 0.3 and 0.4 kg/m^{2}s with seven porosity values. The charging phase is completed when the initial temperature of the system becomes equal to inlet fluid temperature, which is 1473 K. The discharging phase is opposite of charging phase. Results are presented in terms of stored energy profiles for steel, cordierite and rock spheres.

As a result, the stored thermal energy reaches steady state conditions for each porosity value. Steady state condition indicates the thermal saturation of the tank. In addition, the trends show that the stored energy is higher for the lower porosity values since thermal capacity increases. Three different materials, which are steel, cordierite and rock are compared as storage material. They are different in respect to heat capacity, thermal conductivity and solid density. Among the materials, steel has the highest volumetric heat capacity while rock and cordierite have lower value. The most important property of the storage material is the volumetric heat capacity whereas the thermal conductivity of the solid only has a small effect on the stored

energy. So, the maximum heat stored is achieved in the packed bed with steel spheres, the stored energy of cordierite and rock spheres are in close values.

For assigned porosity values when the mass flow rate increases the stored energy values were not change but the porosity value increases the stored energy decreases in the packed bed at the same charge and discharge cycle. For all storage material, thermal energy stored reaches almost maximum value after 3 hours. Increasing mass flow rate is no effect on the amount of stored energy while storage time decreases due to more efficient convective heat transfer between the fluid and solid matrix.

1. GİRİŞ

1.1 Tezin Amacı

Isıl enerji, enerji zincirinde birincil ve ikincil enerji kaynakları arasında ana bağlantı noktasıdır ve gelecekteki düşük emisyon hedefleri için öncü bir rol oynamaktadır (Ge ve diğ., 2014). Isıl enerji depolama sistemlerinde, depolama ortamı ısıtılarak veya soğutularak enerji depolanmakta ve daha sonra ısıtma, soğutma ve güç üretimi uygulamalarında kullanılmaktadır. Bu uygulamalarda ortalama enerjinin yarısı ısıl enerji şeklinde tüketilmektedir. Bu yüzden ısıl enerji depolama sistemleri günlük, haftalık ve sezonluk bazda enerji arz ve talebi arasındaki dengeyi sağlaması açısından önemli bir teknolojidir. Isıl enerji depolama sistemleri, enerji talebinin en yoğun olduğu zamanda talebi karşılaması, enerji tüketimini düşürmesi, CO_2 emisyonlarını ve maliyetleri azaltması açısından önem arz eden sistemlerdir. Ayrıca bu sistemler, yenilenebilir enerjiyi ısıl enerji formuna dönüştürerek ve depolayarak yenilenebilir enerjinin kullanımının artmasına katkı sağlamaktadır. Isıl enerji depolama sistemleri yoğunlaştırılmış güneş enerjisi teknolojileri ile birlikte elektriğin depolanmasında önemli yer tutmaktadır. Yoğunlaştırılmış güneş enerjisi santrallerinde, güneş enerjisi elektrik üretimi için kullanılmakta ve güneş ışığı olmasa bile elektrik üretilebilmesine olanak sağlamaktadır (IRENA, 2013).

Isıl enerji depolama duyulur ısı ve gizli ısı depolama şeklinde gerçekleştirilmektedir. Gizli ısı depolama sistemlerinde, maddenin faz değişimi söz konusudur. Duyulur ısı depolamada ise bir katının veya akışkanın faz değişimi olmaksızın ısıtılması ile ısıl enerji depolanmaktadır. Isı depolanan katı ızgara ve boşluklarında ısı transferi akışkanı bulunan gözenekli ortamların kullanıldığı ısıl enerji depolama sistemleri üzerine yapılan çalışmalar son dönemlerde büyük bir ivme kazanmıştır. Isıl enerji depolama sistemlerinde ısı transferi işlemini geliştirmek için gözenekli malzemeler kullanılmaktadır. Gözenekli malzemeler, hafif olmaları ve ısı transferi için özgül yüzey alanını arttırmalarından dolayı tercih edilmektedir. Aynı zamanda gözenekli

malzemeler yüksek sıcaklıkta ısı depolama uygulamaları için elverişlidir (Fernandes vd., 2012).

Bu yüksek lisans tez çalışmasında, çeşitli gözenekli malzemelerden oluşan paketlenmiş gözenekli bir yatakta duyulur ısı depolama üzerine sayısal bir çalışma gerçekleştirilecektir. Gözenekli ortam çelik, cordierite ve kaya bilyelerden oluşmaktadır. Isıl enerji depolama sistemlerinde şarj ve deşarj kısmı incelenecektir. Çalışmada gözenekli malzemenin, gözenekliliğin ve debinin depolanan ısıl enerji miktarı ve süresine etkisi araştırılacaktır.

1.2 Literatür Araştırması

Tükenmekte olan geleneksel yakıtlar göz önüne alındığında alternatif enerji kaynaklarına duyulan ihtiyacın giderek arttığı söylenebilir. En çok ihtiyaç duyulan teknoloji ise enerji depolama teknolojileridir. Bu teknoloji enerjinin depolanıp ileride ihtiyaç duyulması halinde kullanılabilmesine olanak sağlamaktadır. Lefebvre ve Tezel (2017) çalışmalarında enerji depolamada kullanılan farklı teknolojilere genel bir bakış sunmaktadır.

Duyulur ısı depolama için literatürde yer alan deneysel ve sayısal çalışmalarda, çeşitli gözenekli ortamlar kullanılmaktadır. Andreozzi ve diğ. (2012) yüksek sıcaklık ısıl enerji depolama sistemi bileşenlerini sayısal olarak analiz etmişlerdir. Çalışmada, depolama için seramik küre ve köpük olmak üzere iki farklı yapıda gözenekli ortam kullanılmıştır. Sistem geometrisi silindirik olarak düşünülürken akışkan ve katı yapının ısıl fiziksel özelikleri sıcaklıktan bağımsız olarak kabul edilmiştir. Isıl dengede olmayan sistemde zamana bağlı olarak korunum denklemlerini çözmek için ANSYS Fluent programı kullanılmıştır. Çalışmada gözenekliliğin ve debinin ısıl enerji depolama miktarı ve süresi üzerindeki etkisi verilmiştir.

Cascetta ve diğ. (2016), içinde alüminyum küreler bulunan karbon çelik tankta duyulur ısıl enerji depolama sisteminin sayısal analizini gerçekleştirmişler ve deneysel sonuçlar ile karşılaştırmışlardır. Isı transferi akışkanı olarak hava kullanılmıştır. Gözeneklilik değeri yatak boyunca değiştiği ve akışkanın ısıl fiziksel özelliklerinin sıcaklıkla değiştiği kabul edilmiştir, akış sıkıştırılamaz türbülans akıştır. Şarj ve deşarj halleri araştırılmıştır. Sayısal analizde ANSYS Fluent programı kullanılmıştır ve sonuçlar deneysel çalışmanın sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Erregueragui ve diğ. (2016) çalışmalarında çift fazlı duyulur ısı formunda güneş enerji depolama ve dolgulu yatak teknolojisini araştırmışlardır. Depolama malzemesi olarak kuvarsit, ısı transfer akışkanı olarak ise palmiye yağı kullanılmıştır. Çalışmada palmiye yağı iki farklı sentetik yağ ile karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak palmiye yağının ısı transferi akışkanı olarak 300 ℃'nin altındaki sistemlerde etkili bir şekilde kullanılabileceği görülmüştür.

Tükenmekte olan geleneksel yakıtlar göz önüne alındığında alternatif enerji kaynaklarına duyulan ihtiyacın giderek arttığı söylenebilir. En çok ihtiyaç duyulan teknoloji ise enerji depolama teknolojileridir. Bu teknoloji enerjinin depolanıp ileride ihtiyaç duyulması halinde kullanılabilmesine olanak sağlamaktadır. Lefebvre ve Tezel (2017) çalışmalarında enerji depolamada kullanılan farklı teknolojilere genel bir bakış sunmaktadır.

Enerji depolamada katı ortamın kullanıldığı duyulur ısı depolama teknolojisi uygulamaları en ekonomik çözümdür, fakat depolama ortamının türüne bağlıdır. Khare ve diğ. (2013) çalışmalarında malzeme seçimi ile ilgili yazılım paketi oluşturmuşlardır. Alümina, silikon karbür, yüksek sıcaklıktaki beton, grafit, dökme demir ve çelik 500-750 ℃ arasında duyulur ısı depolama teknolojileri uygulamalarında kullanılan en uygun malzemelerdir.

Yoğunlaştırılmış güneş enerjisi teknolojileri uygulamalarında, dolgulu yatak ısıl enerji depolama teknolojileri son zamanlarda dikkatleri üzerine çekmiştir. Alümina katı depolama malzemesi olarak, havanın ısı transferi akışkanı olarak kullanıldığı bir çalışma Anderson ve diğ. (2015)'e aittir. Model sıcaklığın hızlı değiştiği tabakalardaki davranışı iyi bir şekilde tahmin etmiştir. Silindirik dolgulu yatakta depolama malzemesi olarak alüminanın kullanıldığı sistemde 2 debi değerinde analiz gerçekleştirilmiştir. Doğru bir şekilde modelleme yapmak için sıcaklığa bağlı ısıl fiziksel özellikler kullanılmıştır. Çalışmada, yüksek sıcaklık ısıl enerji depolama sistemlerinde sıcaklığa bağlı ısıl fiziksel özelliklerin kullanılmasının önemli olduğu ve Biot numarasının sistemin ısıl dengede olup olmadığının anlaşılması için kullanılan bir parametre olduğu sonucuna varılmıştır.

Zanganeh ve diğ. (2015) çalışmalarında zamana bağlı 2 fazlı ısı transferi modelini yüksek sıcaklık dolgulu yatak teknolojisinin kullanıldığı termoklin ısıl enerji depolama sisteminde işlevsel ve tasarım parametrelerinin performans üzerine etkisini

değerlendirmek için kullanmışlardır. Isıl enerji depolama malzemesi olarak kaya küreler kullanılırken ısı transferi akışkanı olarak havayı kullanmışlardır. Performans parametreleri olarak ısı kaybı, pompa gücü, deşarj çıkış sıcaklığı ve depolama verimliliğini incelemişlerdir. 7,2 gigawatt güçte ısıl enerji depolama sisteminin tasarımı yapılmıştır. Sonuçlar, ilk şarjın diğer çevrimleri etkilediği ve sistemin performansı üzerinde çok fazla etkili olduğunu göstermiştir. Tank çap-yükseklik oranı ve kaya parçası çapı düşürülerek deşarj aşamasında sıcaklık düşüşü azaltılmıştır fakat kaya kürelerin çapının düşmesiyle birlikte basınç düşüşü ve pompa gücü artırmıştır. Sistemde verim %95' in üzerinde olmuştur.

Cascetta ve diğ. (2015) diğer çalışmalarında dolgulu yatak teknolojisinin kullanıldığı termal enerji depolama sistemini deneysel olarak incelemişlerdir. Katı malzeme depolama ortamı olarak kullanılırken hava ısı transferi akışkanı olarak kullanılmıştır. Test düzeneği içerisine rastgele koyulmuş alümina tanecikler bulunduran karbon çeliği tankı dolgulu yatakta ısı transferinin incelenmesine olanak sağlamaktadır. Çalışmanın amacı tekrar eden şarj ve deşarj çevrimlerinde işletme şartlarının ve fiziksel parametrelerin termoklin oluşumu ve özellikle sistemin termal davranışları üzerine olan etkisini incelemektir. Yüksek şarj verimliliği, düşük debi değerlerinde, yüksek hava sıcaklığında ve yüksek tank boy-çap oranında yakalanmıştır. Sürekli işletme şartlarında metal duvarın etkisi azalmıştır.

1.3 Hipotez

Duyulur ısıl enerji depolama için gözenekli ortam kullanılabilir ve ısıl enerji depolamayı etkileyen faktörler Hesaplanabilir Akışkanlar Dinamiği (HAD) ile incelenebilir.

2. GÖZENEKLİ ORTAMLARDA AKIŞ VE KORUNUM DENKLEMLERİ

2.1 Gözenekli Ortamların Özellikleri

Bir malzemeye gözenekli ortam denilebilmesi için aşağıdaki özelliklere sahip olması gereklidir: a) Malzemenin kendi boyutları ile karşılaştırıldığında içerisinde çok küçük ve birbiri ile irtibatlı boşluklar içermesi gerekmektedir. b) Akışkan malzemenin bir ucundan girip diğer ucundan çıkmalıdır. Doğal bir gözenekli ortam içerisinde bulunan boşlukların büyüklüğü ve şekli düzensizdir. Gözenekli ortamın tüm makroskopik özellikleri bu düzensizlikten etkilenmektedir. Sonuç olarak, makroskobik gözenek yapısı değişkenleri gözeneklilik malzemenin ortalama özelliklerini temsil etmektedir. Gözenek yapısı değişkenlerine gözeneklilik, geçirgenlik ve akış yatağı örnek olarak verilebilir. Akış yatağı yapısı ve gözeneklilik gözenekli ortamın özellikleri iken geçirgenlik gözenekli ortamın kütle geçiş özelliğini temsil etmektedir (Baytaş, 2006).

Gözenekli ortam birbirleri ile temas halinde boşluklar ve katı matristen oluşmaktadır. Gözeneklilik, ε , Denklem (2.1)'de verildiği gibi malzeme içindeki toplam boşluk hacminin malzemenin toplam hacmine oranı olarak ifade edilir. Denklem 2.1'de V_a katı içindeki boşluk hacmini ifade ederken, V_k katı matrisin hacmini göstermektedir. Gözenekliliğin mikroskobik olarak ölçülmesi veya farklı malzeme bileşenlerinden oluşan bir ortamda gözenek dağılımının bulunması çok zordur. Gerçek gözeneklilik ölçümü, gama ışınlarının malzeme içerisinden geçerken zayıflamasının tespiti ile gerçekleştirilebilir. Gözeneklilik gözenekli bir malzemenin temel özelliğidir, bu nedenle malzemenin tüm fiziksel özellikleri gözeneklilik değerinden etkilenir.

$$\varepsilon = \frac{V_a}{V_a + V_k} \tag{2.1}$$

2.2 Gözenekli Ortamda Temel Denklemler

Gözenekli ortam içerisinde mikroskobik seviyede ısı ve akış problemlerinin çözümü ve tanımlanmasının zorluğu nedeni ile makroskobik seviyede çözüm yapılır.Böylece ölçülebilir, sürekli ve değişken nicelikler belirlenebilir ayrıca sınır değer problemleri gözenekli ortam için de çözülebilir hale gelir. Sonuç olarak, katı bir ızgara ve ızgara boşluklarında yer alan akışkandan oluşan gözenekli ortam bir sürekli ortam olarak kabul edilerek Şekil 2.1'de gösterildiği gibi Temsili Temel Hacim (TTH) tanımı yapılır. Temsili temel hacim, tüm gözenekli ortamın özelliklerini temsil etmeli ama sistemin boyutlarına göre çok küçük olmalıdır. Ancak temsili temel hacmin boyutu gözenek boyutundan da büyük olmalıdır. Böylece, hacim ortalaması alınabilir ve gözenekli ortam içerisinde her bir TTH hız, yoğunluk, sıcaklık ve basınç gibi alan değişkenleri temsil edebilir. Diferansiyel kütle, momentum ve enerji korunum denklemlerinin, göz önüne alınan sürekli ortamda yazılabilmesi için alan değişkenlerinin ortalama değerlerinin tanımlanması gerekir. Bu durumda gözenekli ortamın ölçülebilir özellikleri TTH kavramına dayanan sürekli ortam özellikleri olur. Sonuç olarak, sürekli ortam veya makroskobik korunum denklemleri mikroskobik korunum denklemlerinin alan veya hacim ortalamaları alınarak bulunur (Baytaş, 2006).

Bu durumda akışkanın niceliği β ise basınç, hız, yoğunluk gibi onun bütün TTH'ler üzerinden hacim ortalaması aşağıdaki denklem ile açıklanır.

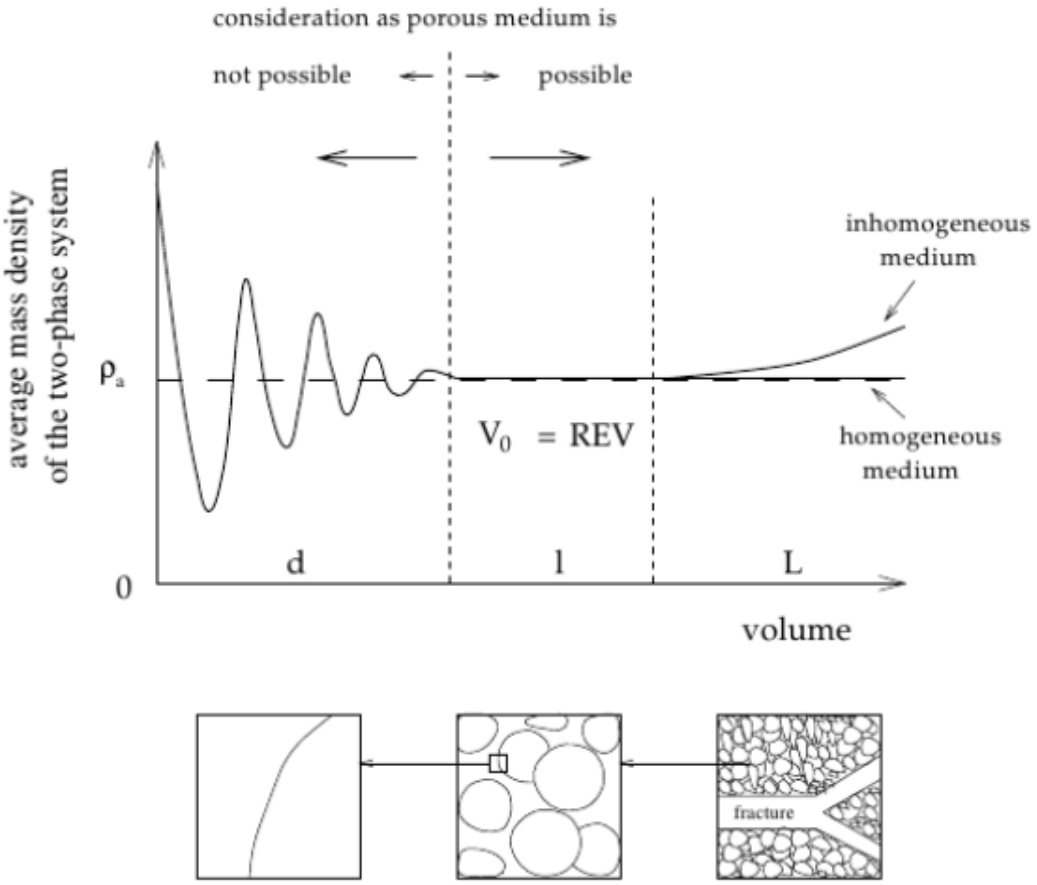
$$\beta = \frac{1}{V}\int_{V} \beta^{*} dV \tag{2.2}$$

Denklemdeki V Temsili Temel Hacmi, β^{*} ise mikroskobik boyutta yerel niceliği temsil etmektedir. Akışkan fazı için nicelik $\langle \beta_a \rangle$ aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$\beta_a = \frac{1}{V_a}\int_{V_a} \beta^{*} dV \tag{2.3}$$

Burada V_a akışkanın TTH içerisindeki hacmini temsil eder, sonuç olarak akışkana ait nicelik için Dupuit-Forcheimer bağıntısı olarak ifade edilen aşağıdaki bağıntı yazılabilir (Baytaş, 2006).

$$\beta = \varepsilon \beta_a \tag{2.4}$$



Şekil 2.1 : Temsili Temel Hacmin Tanımlanması (Jambhekar, 2011).

2.2.1 Darcy yasası

Gözenekli ortam ile ilgili ilk çalışma, Fransız bilim adamı Henry Darcy tarafından gerçekleştirilmiştir. Darcy, Dijon kentine temiz su getirme projesi kapsamında, suyun kum dolu bir sütunda süzülmesini deneysel olarak incelemiştir. Sonuçlar gözenekli ortam bulunan bir sütunda akışkan hızı ile sütunun alt ve üst kısımları arasındaki basınç farkının doğru orantılı olduğunu göstermiştir. Darcy yasası aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\upsilon_f = -\frac{K}{\mu}\left(\nabla p + \rho_f g \nabla z\right) \tag{2.5}$$

v_f Darcy hızı olarak bilinmektedir. K geçirgenliği, μ dinamik viskoziteyi, $\nabla\langle p\rangle$ ise akışkanın içindeki basınç değişim vektörünü temsil etmektedir (Jambhekar, 2011).

Darcy yasası sıkıştırılamaz Newtonian akışlar için geçerlidir. Reynolds sayısının büyüklük derecesi birden küçüktür yani akış hızı çok düşük değerdedir ve akış tek yönlüdür. Ampirik bağıntıdır ve akışkan yüksek hızda akıyorsa akışı modelleyemez. Denklemde viskoz etkiler yer almamaktadır. En önemlisi katı sınırlar göz önüne alındığında sınırın sürtünme etkisini göstermez. Bu nedenle, Darcy denklemini geliştirmek ve diğer akış modelleri için de geçerli kılmak için çalışmalar yapılmıştır.

2.2.2 Ergün denklemi

Akış hızı arttıkça, akış doğrusal olmayan sürüklenmelerin etkisi ile doğrusallıktan uzaklaşır. Doğrusal olmayan akışı modellemek için Darcy denklemi Forchheimer tarafından geliştirilmiştir. Forcheeimer 1901 yılında 'Wasserbewegun Durch Boden' adlı çalışmasında mikroskobik atalet etkisi göstermek için ikinci dereceden hız terimi eklemiştir.

$$\Delta p = \frac{-\mu}{K} v - C_f K^{-1/2} \rho_a |v| v \qquad (2.6)$$

Denklem (2.6)'da C_f boyutsuz biçim sürüklenme katsayısıdır. Gözenekli ortamın doğal yapısına bağlı olarak yani taneciklerin büyüklüğüne göre değişik değerler almaktadır (Jambhekar, 2011).

Ergün ve Orning (1949) yüksek hızlarda akış için deneysel çalışma sonucu bir denklem ortaya çıkarmışlardır. Denklem sonra daha kullanışlı bir hale getirilerek Hazen-Dupuit-Darcy denklemi adı ile kullanılmıştır.

$$-\nabla p + \rho_a g = \frac{\mu}{K} v + \rho_a C v^2 \qquad (2.7)$$

Denklem 2.7'de K gözenekli ortamın geçirgenliğini temsil ederken C biçim sürüklenme katsayısını temsil etmektedir. Daha sonra Ergün Forchheimer denklemindeki biçim sürüklenme katsayısını deneysel olarak açıklamıştır.

$$C_f = \frac{C_E}{\sqrt{K}} \tag{2.8}$$

$$C_E = \frac{1.75}{\left(150\varepsilon^3\right)^{1/2}} \tag{2.9}$$

$$K = \frac{{d_p}^2 \varepsilon^3}{150\left(1-\varepsilon\right)^2} \tag{2.10}$$

Denklem 2.10'da görülen d_P deneyde gözenekli ortamı oluşturan küreciklerin çapıdır.

2.2.3 Brinkman denklemi

Darcy denkleminde viskoz difüzyon etkisi görülmemektedir. Bunu gidermek için Brinkman Darcy denklemini aşağıdaki gibi düzenlemiştir.

$$-\nabla P_a + \rho_a g_x = \frac{\mu}{K} v - \mu_e \nabla^2 v \tag{2.11}$$

Denklemde μ_e gözenekli ortamdaki akışkanın etkin viskozitesini temsil etmektedir ve Bear ve Bachmat tarafından aşağıdaki gibi ifade edilmiştir.

$$\mu_e = \frac{\mu}{\varepsilon}\lambda \tag{2.12}$$

2.3 Gözenekli Ortamda Korunum Denklemleri

2.3.1 Kütle süreklilik denklemi

Gözenekli ortamlarda akış için hacim ortalanmış kütle süreklilik denklemi aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\varepsilon \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla . \rho v = 0 \tag{2.13}$$

ρ yoğunluğu temsil ederken v akışkanın içinde toplam hacim üzerinden ortalama hızı göstermektedir.

2.3.2 Momentum denklemi

Temsili Temel Hacim üzerinden ortalama alınarak Navier-Stokes denklemi gözenekli ortam için aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\rho_a \left\{ \frac{1}{\varepsilon}\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{\varepsilon^2}(v.\nabla)v \right\} = -\nabla P_a + \mu_e \nabla^2(v) - \frac{\mu}{k}v - C\rho|v|v + \rho_a g \tag{2.14}$$

Bağıntıdaki ilk terim yerel ivmelenmeyi, ikinci terim atalet terimlerini, üçüncü terim gözenekli ortam içerisinde akışkanın basınç değişimini, dördüncü terim viskoz kuvvetleri, beşinci terim Darcy akışı etkisi ile viskoz sürüklenme kuvvetini, altıncı terim şekil sürüklenme kuvvetini ve son terim ise gövde kuvvetlerini göstermektedir.

2.3.3 Hacim ortalanmış enerji denklemi

Mikroskobik enerji denklemi gözenekli olmayan ortam için aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\frac{\partial\left(\rho_a c_{af} T\right)}{\partial t} + \nabla.\left(\rho_a c_{ap} vT\right) = \nabla.\left(k_a \nabla T\right) \tag{2.15}$$

ρ_a akışkanın özkütlesini, c_{ap} sabit basınçta öz ısısını ve k_a iletim katsayısını temsil etmektedir. Mikroskobik enerji denkleminin Şekil 2.1'de gösterilen Temsili Temel Hacim üzerinden bağıntı 2.2, 2.3 ve 2.4 yardımıyla integrali alınırsa içerisinde sıkıştırılamaz akışkan bulunan gözenekli ortam için hacim ortalanmış enerji denklemleri aşağıdaki gibi ifade edilir (Baytaş, 2015).

$$\rho_a c_{ap} \left\{ \frac{\partial(\varepsilon T_a)}{\partial t} + v.\nabla T_a \right\} = \nabla.\left\{ k_a \nabla \varepsilon T_a \right\} + h\left(T_k - T_a\right) + \varepsilon q_a''' \tag{2.16}$$

$$(1-\varepsilon)\left(\rho_k c_{pk}\right)\frac{\partial T_k}{\partial t} = \nabla.\left\{ k_k \nabla(1-\varepsilon)T \right\} + h\left(T_a - T_k\right) + (1-\varepsilon) q_k''' \tag{2.17}$$

Denklem 2.16 ve 2.17 gözenekli ortam içerisinde akışkan ve katı faz için hacim ortalanmış enerji denklemlerini göstermektedir. Denklem 2.16 ve 2.17'nin sağ tarafındaki ikinci terimler Temsili Temel Hacim içerisinde akışkan ve katı fazların sıcaklıklarının farklı olmasından dolayı fazlar arasında taşınım ile ısı geçişini

modellemektedir. Katı ve sıvının sıcaklıklarının farklı olması fazların ısıl dengede olmadığını gösterir ve bu sistemlere ısıl dengede olmayan sistemler denir. Ek olarak, son terimler ise katı ve sıvı faz içindeki ısı üretimidir.

Çoğu sistemde fazlar arası sıcaklık farkı ihmal edilebilir ve akış hızı düşük olabilir. Bu durumda fazlar ısıl dengede kabul edilerek, $\langle T_a \rangle = \langle T_k \rangle = \langle T \rangle$ katı ve sıvı faz için yazılan enerji denklemleri alt alta toplanarak ısıl denge hali için denklem aşağıdaki gibi yazılır (Baytaş, 2006).

$$\sigma \frac{\partial T}{\partial t} + v.\nabla T = \nabla.\{\alpha_{et} \nabla T\} + q''' / \left(\rho c_p\right)_a \tag{2.18}$$

Denklemdeki σ akışkana doymuş gözenekli ortamdaki ısı depolama sığaları oranını göstermektedir ve aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\sigma = \frac{\varepsilon\left(\rho c_p\right)_a + \left(1-\varepsilon\right)\left(\rho c\right)_k}{\left(\rho c\right)_a} \tag{2.19}$$

$$\alpha_{et} = \frac{\varepsilon k_a + \left(1-\varepsilon\right) k_k}{\left(\rho c\right)_a} \tag{2.20}$$

3. ENERJİ DEPOLAMA TEKNOLOJİLERİ

Yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı güçlü bir şekilde depolama teknolojilerinin verimliliğine bağlıdır. Bu yüzden çoğu yenilenebilir enerji teknolojilerinin uygulamaları için odak noktası enerji depolama teknolojileridir. Enerji depolama teknolojilerini uygulanabilir, ekonomik olarak rekabetçi ve güvenilir sistemler yapmak için sistem ve malzemelerin geliştirilmesi gerekmektedir. Gelişme sağlandığında yenilenebilir enerji kaynakları tam potansiyellerine ulaşacaklardır. Enerji depolama sistemlerinin faydaları:

- Enerji maliyetinin azalması
- Başlangıç ve bakım maliyetlerinin azalması
- Ekipmanların boyutlarının küçülmesi
- Fosil yakıtların korunması
- Enerji güvenliğinin yükselmesi
- Çevresel emisyonların azalması

Mekanik, kimyasal, elektrostatik, manyetik, biyolojik ve ısıl olmak üzere çeşitli enerji depolama teknolojileri bulunmaktadır. Enerji depolama teknolojileri depolama sıklığına göre uzun vadeli ve kısa vadeli olarak ikiye ayrılabilir. (Lefebvre ve diğ. 2017).

3.1 Mekanik Enerji Depolama

Bir malzemeye uygulanan kuvvet sonucu oluşan enerjiyi depolamada kullanılan iki sistem vardır. Bunlardan birincisi potansiyel enerjideki değişimi içerirken diğeri kütlenin hareketi sonucu değişimi yani kinetik enerji değişimini içermektedir. Bu iki enerji birbirlerine dönüştürülebildiği gibi ısı enerjisine veya işe de dönüştürülebilir (Huggins 2010). Mekanik enerji depolama teknolojileri Volan depolama, sıkıştırılmış hava enerji depolama (CAES) ve basınçlı su depolama olarak 3 ayrı başlığa ayrılabilir.

Volan, enerjiyi kinetik enerji formunda mekanik olarak depolayabilen ve bir eksende dönen kütle olarak tanımlanabilir. Volanı mekanik olarak hareket ettirebilmek ve döndürmek için bir enerjiye gereksinim vardır. Volan dönerken dönme hızına ve ataletine bağlı olarak belirli bir miktarda enerji depo etmektedir. Depolanmış bu enerji, gereksinim duyulduğunda volan yavaşlatılarak ve bu sayede mevcut kinetik enerjisinin istenilen kısmı jeneratör modunda çalışan bir elektrik motorunu tahrik etmekte kullanılarak elektrik enerjisine çevrilebilir (Karakan, 2017).

CAES sistemler ise enerjiyi sıkıştırılmış formda yeraltı mağaralarında saklayan sistemlerdir. Sıkıştırılmış hava enerji depolama sistemleri elektrik enerjisini, havayı yüksek basınç altında kaplara ileten kompresörleri hareket ettiren ve daha sonra türbin içerisinde basınçlandırılmış havayı enerji gereksinimi oluştuğunda tekrar kullanmamıza olanak sağlayan sistemlerdir. (Turan ve Yöetken, 2016).

Basınçlı su depolama sistemleri basit mekanik enerji depolama teknolojisidir. Enerji ihtiyacı az olduğunda örneğin gece su yüksek tepelerdeki veya dağlardaki su haznelerine iletir. Enerji ihtiyacı çok olduğunda ise su haznelerinden borular yardımıyla hidroelektrik jeneratörlere iletilir ve elektrik üretilir. (Lefebvre, 2017).

3.2 Kimyasal Enerji Depolama

Kimyasal enerji depolama teknolojisinde enerji kimyasal bileşiklerin oluşturduğu bağlarda depolanır ve ekzotermik reaksiyonlarla tekrar kazanılır. En çok kullanılan yöntemler ise hidrojen ve amonyak ile enerji depolama yöntemleridir. Hidrojen gazı elektroliz yoluyla sudan elde edilir. Gaz depolanabilir, taşınabilir ve yakılarak depoladığı enerji açığa çıkarılabilir. Yanma sonucu açığa çıkan egzoz sadece sudur. Günümüzde kullanılan hidrojenin büyük bölümü fosil yakıtlardan elde edilmektedir. Elektroliz yeni bir yöntemdir ve verimi %60 civarlarındadır (Kozak, 2012).

3.3 Elektrostatik Enerji Depolama

Elektrostatik enerji depolama teknolojileri uygulamalarında kapasitör ve süperkapasitörler kullanılmaktadır (Lefebvre, 2017). Kapasitör elektrosatik formda depolanan enerjiyi elektrik enerjisi olarak açığa çıkaran depolama teknolojileridir. Bu cihazlar yüzbinlerce şarj ve deşarj döngüsü yapabilmektedir. Süperkapasitör

kondansatör enerji depolama görevi dışında şebekenin güç kalitesinin iyileştirilmesine de olanak sağlamaktadır (Kocoman, 2013).

3.4 Manyetik Enerji Depolama

Süper iletken manyetik enerji depolama sistemleri halka şeklinde sarılmış süper iletken tellerden oluşan bir bobinden oluşur. Bobinin çapı 1000 metre çapında olabilir. Yerin altına kurulmuştur ve soğutma sistemi ile süper iletkenliğin sağlanacağı bir sıcaklık aralığında tutulur. Üretilen fazla elektrik bu bobine verilir ve her an kullanıma hazır olarak depolanır. Enerji, manyetik alan olarak depolanır. Depolanan enerji deşarj edilerek sisteme her an geri verilebilir. Çıkışta bir DC-AC dönüştürücü ile tekrar AC güç edilir (http:// elektrikport.com/teknik-kutuphane/ileri-enerji-depolama-teknolojileri/4293#ad-image-0).

3.5 Biyolojik Enerji Depolama

Biyolojik enerji depolama enzimler tarafından glikozun parçalanması yoluyla gerçekleştirilir. Parçalanma sonucu ortaya çıkan enerji bio-pil depolama sistemlerinde muhafaza edilebilir. Bu uygulamalarda glikoz enerji kaynağıdır ve bu nedenle sistemin kapasitesi glikoza bağlıdır. Genel glikoz kaynaklarına eski kağıtlar, soda, canlı organizmalar ve doğal şeker örnek olarak verilebilir. Malzeme proton ve elektronları üretmek için enzimler aracılığıyla dönüştürülür (Lefebvre, 2017).

3.6 Isıl Enerji Depolama

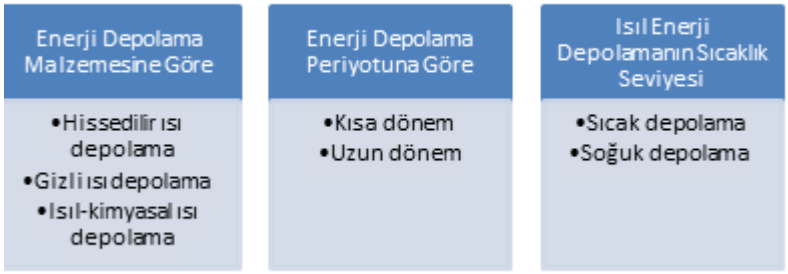
Isıl enerji depolama konusu günümüzde yoğun olarak araştırılmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarından gelen ısıl enerji arz ve talebi arasındaki boşluğu doldurması açısından enerji depolama konusu büyük önem arz etmektedir (Lefebvre, 2017). Isıl enerji depolama sistemleri ısıl enerjinin yüksek ve düşük sıcaklıkta geçici olarak depolanabildiği sistemler olarak tanımlanabilir (Ataer, 2006). Isıl enerji depolama sistemleri, kesikli enerjiye ihtiyaç duyulması halinde kullanılmak üzere enerjiyi depolayan sistemlerdir. Örneğin, güneş enerjisinin kullanılabilirliği güne ve sezona bağlı olarak değişmektedir. Bu yüzden güneş enerjisi gece ve kış aylarında kullanılmak üzere gündüz ve yaz aylarında depolanmaktadır (Lefebvre, 2017). Güneş verimli, temiz ve güvenli enerji kaynağı olmasına rağmen sunulan enerji günlük ve

yıllık dalgalanmalara maruz kalmaktadır. Bu enerji kaynağı kesikli enerji kaynağı olarak adlandırılmaktadır. Kesikli enerji kaynağının davranışı tahmin edilemediğinden dolayı kişisel ve endüstriyel enerji ihtiyacının karşılanması için güneş enerjisinin depolanması zorunluluğu ortaya çıkmaktadır (Ataer, 2006). Bu işlem az miktarda ısıl enerji kaybı ve depolanan enerjinin yüksek verimliliği ile gerçekleştirilmek zorundadır. Isıl enerji depolama üzerine yapılan araştırmalar mevcut enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürmek yerine ısı olarak kullanabilmek için yapılmaktadır. Uzun dönem ısı depolama yıl boyunca mevcut olan enerjinin etkin bir biçimde kullanımı için en önemli zorluklardan biridir (Lefebvre, 2017). Hissedilebilir ısı depolama, gizli ısı depolama ve ısıl-kimyasal olmak üzere 3 ana tip ısıl depolama sistemi bulunmaktadır (Ataer, 2006).

Isı talebi miktarı, üretilen ısı miktarı ile uyuşmuyorsa ısıl enerji depolamasının gerekli olduğu söylenebilir. Isıl enerji depolama sistemleri enerji tasarrufu yapmazlar. Bununla birlikte, enerji tasarrufu için enerji depolama uygulamaları daha verimli entegre enerji sistemlerinin kullanılmasını mümkün kılmaktadır. Isıl enerji depolama yenilenebilir enerji kaynaklarını daha verimli bir şekilde kullanmayı ve alan ısıtma ve soğutma için atık ısı kazanımını mümkün kılmaktadır (Socaciu, 2012). Isıl enerji depolama sistemleri temel olarak hissedilir ısı olarak akışkan sıvı ve katı, gizli ısı olarak eriyik ve buhar, kimyasal ısı olarak kimyasal bileşimlerine göre sınıflara ayrılabilir (Hahne, 2009). Şekil 3.1'de ısıl enerji depolama sistemlerinin sınıflandırılması görülmektedir.

Isıl enerji depolama sistemlerinde ısının karakteristik özelliği sıcaklığıdır. Isı yüksek sıcaklıktaki ısı ve düşük sıcaklıktaki ısı olarak iki gruba ayrılabilir. Isıl enerji depolama sistemlerinde düşük sıcaklıktaki ısı uygulamaları genellikle müstakil ve apartman uygulamaları için kullanılırken, yüksek sıcaklık ısı uygulamaları genellikle tüm güç proseslerinde ve kimya mühendisliğinde uygulama alanı bulmaktadır. Bu durumda iyi şekilde yalıtılmış tank kullanılmaktadır. Yüksek sıcaklık ve düşük sıcaklık ayrımı çok net olmamakla birlikte genellikle 100 ℃'nin altındaki sıcaklıklar düşük sıcaklık olarak kabul edilir (Hahne, 2009). Isıl enerji depolama sistemlerinin diğer ölçütü zamandır. Depolama süresi birkaç gün sürüyorsa kısa dönem aylarca sürüyor ise uzun dönem veya sezonluk depolama olarak adlandırılmaktadır. Depolama sistemlerinin en önemli karakteristiği kabul edilebilir kayıpla birlikte

enerjinin depolandığı süredir. Eğer güneş enerjisi hidrojen gibi yakıtlara dönüştürülecekse zaman kısıtlaması yoktur.



Şekil 3.1 : Isıl enerji depolamanın sınıflandırılması

Depolama sisteminin diğer en önemli karakteristiklerinden birisi ise hacimsel enerji kapasitesi veya başka bir deyişle birim hacim başına depolanan enerji miktarıdır. Bu nedenle iyi depolama sistemi uzun depolama zamanı ve depolanan birim enerji başına küçük hacime sahip olmalıdır. Eğer ısı kapasitesi küçük değilse, küçük hacime sahip yoğun malzemeler birim hacim başına büyük enerji kapasitelerine sahip olmaktadırlar (Ataer, 2006).

Isıl depolama sistemlerinin gelişmesi günlük hayata da etki etmiştir. Evleri sabit sıcaklıkta tutmak için ısıl depolama sistemleri kullanılır. Endüstriyel dönüşümün gerçekleşmesinden sonra ısıl depolama sistemleri enerji üretimi için kullanılmaya başlanmıştır. Günümüzde çeşitli ısıl depolama teknolojileri kullanılır hale gelmiştir. En büyük uygulama alanları konutlar olmuştur. Son zamanlarda ise buhar fazında veya sıcak su olarak kısa zamanda ısı depolamasının santrallerde kullanılması yaygınlaşmıştır. (Ataer, 2006).

Isıl enerji depolama sistemlerinin ilk yasa verimi depolama sisteminden çekilen enerjinin sistemde depolanan enerji miktarına oranı olarak tanımlanabilir.

$$\eta = \frac{mC\left(T - T_0\right)}{mC\left(T_\infty - T_0\right)} \qquad (3.1)$$

mC depolama ortamının ısı kapasiteini temsil etmektedir. T ve T_0 deşarj boyunca sistemdeki en büyük ve en küçük sıcaklığı temsil ederken T_∞ çevre sıcaklığını temsil etmektedir. Isı kaybı ihmal edilmiştir.

Isıl enerji depolama sistemlerini enerji depolama malzemesine göre sınıflandırılması Şekil 3.2'de verilmiştir.

Verimli depolama genellikle depolama malzemesine bağlıdır. Depolama malzemesinin aşağıda verilen özelliklere sahip olması gerekir (Hahne, 2009).

- Uzun servis ömrü, paslanmayan, zehirli olmayan, yanıcı olmayan, yüksek ısı depolama kapasitesine sahip.
- Yüksek ısıl yayınırlılığa sahip.
- Şarj ve deşarj çevrimlerinde, performansın ve depolama kapasitesinden kayıp olmaması.
- Düşük maliyet



Şekil 3.2 : Isıl enerji depolamanın enerji depolama malzemelerine göre sınıflandırılması

3.6.1 Duyulur ısı depolama

Duyulur formda ısı depolama sistemlerinde ısıl enerji malzemenin sıcaklığı değiştirilerek iç enerji olarak depolanır (Lefebvre, 2017). Sıvı veya katı ısıtılarak ve soğutularak depolanır veya çekilir (extraction). İşlem gerçekleşirken depolama malzemesinin fazında değişiklik olmaz. Bu sistemlerde sıvı olarak su, ısı transferi yağları, inorganik erimiş tuz; katı olarak ergimesi zor kaya parçaları, çakıl taşları gibi çeşitli depolama malzemeleri kullanılmaktadır. Katı malzemelerin kullanıldığı durumda malzeme değişik formlarda gözenekli ortamdan oluşturulabilir. Gözeneklerden akışkan geçerek depolama veya çekilme işlemi gerçekleşir (Ataer, 2006). Depolama sisteminin uygulanabilirliği kütle, ısı kapasitesi, malzeme kararlığı, malzeme maaliyeti, sıcaklık farkı ve sistem yalıtımına güçlü oranda bağlıdır. Duyulur ısı formunda depolama teknolojileri birçok alanda uygulama fırsatı

bulmaktadır. En önemli uygulamalarından birisi sıcak su depolamadır ve günümüzde evlerde sıcak su elde etmek için yaygın olarak kullanılmaktadır. Aynı zamanda birçok ısıl enerji depolama sistemi, ısı temas yüzey alanı büyük olduğu için duyulur formda çakıl taşları kullanılarak oluşturulmuştur. Metal ve grafit gibi ısıl yayılma gücü yüksek malzemeler enerjinin hızlı şarj ve deşarj olduğu sistemlerde kullanılırken, uzun dönem depolama için uygun değillerdir. Duyulur ısıl enerji depolama sistemlerinin maliyeti diğer sistemlere oranla azdır ve günümüzdeki en popüler enerji depolama sistemlerinden bir tanesidir. Elde edilen enerjinin miktarı malzemenin kütlesine ısı kapasitesine ve sıcaklık değişimine bağlıdır (Lefebvre, 2017).

Duyulur formda ısı depolama malzemenin sıcaklığında bir değişiklik olmadan gerçekleşen depolama türüdür. Depolanan ısı miktarı aşağıdaki gibi bulunur.

$$Q = m\int_{T_1}^{T_2} C_p\left(T\right)dT \qquad (3.2)$$

Burada, m kütleyi, C_p ise sabit basınçtaki ısı kapasitesini temsil etmektedir. T_1 ve T_2 ise depolama süresi boyunca en küçük ve en büyük sıcaklığı temsil etmektedir. Sıcaklık farkı (T_2 - T_1) sıcaklık salınımı olarak adlandırılmaktadır.

Sıcaklıktan bağımsız C_p için Denklem (3.2)

$$Q = mC_p\left(T_1 - T_2\right) \qquad (3.3)$$

Şeklinde yazılabilir. Q'nun birimi J'dür. Saf madde için birim mol başına ısı kapasitesi ortalama 3R (Dulong-Petile kuralı). R molar gaz sabitidir (R=8.31441 kJ/kmolK). Katıda depolanan molar ısıl enerji q_{mol} (kJ/kmolK)

$$q_{mol} \approx 3R.\Delta T$$

şeklinde ifade edilir. Molar kütle M (kg/kmol) ile birlikte birim kütle başına depolanan ısıl enerji (depolama kapasitesi kJ/kg)

$$q = C_p\Delta T = \frac{q_{mol}}{M} = 3R.\Delta T / M \qquad (3.4)$$

olarak elde edilir.

3.6.2 Gizli ısı depolama

Gizli ısı depolama sistemlerinde ısı sabit sıcaklıkta depolama malzemesinin fazında değişiklik yapılarak depolanır veya sistemden çekilir. Örneğin; depolama malzemesinin gaz fazından sıvı veya katı faza alınması. Malzeme enerjiyi alır ve sıcaklık erime sıcaklığının üzerine çıktığında erimeye başlar. Enerji depolama uygulamalarında düşük hacim değişimi gösterdikleri için, faz değişimi genellikle katı ve sıvı halleri arasında meydana gelir. Faz değişimine yüksek entalpi değişiminin eşlik etmesi ile birlikte enerji depolanması mümkün olmaktadır. Enerji faz değişimi olmazken korunur fazlar arası geçiş olurken depolanır veya sistemden çekilir. Isıl depolama için kullanılan birçok malzeme gizli ısı depolamada da kullanılabilir ve depolama kabiliyetleri duyulur ısı depolama malzemelerine göre 5–14 kez daha büyüktür. Bu nedenle daha küçük hacimlerde depolama mümkün olmaktadır. Faz değişim malzemelerinin seçimi, ergime ısısı ve faz değişiminin meydana geldiği sıcaklığa göre yapılır. Ergime ısısı malzemenin sıvı fazından katı fazına geçmesi için birim kütle başına çekilmesi gereken enerji miktarı olarak tanımlanabilir. Bu enerji miktarı aynı zamanda katı fazından sıvı fazına geçerken aldığı enerji miktarına eşittir. Buz, parafin, tuz, yağ asidi ve metaller faz değişim malzemelerine örnek olarak verilebilir. Faz değişim malzemeleri kimyasal yapılarına ve kullanıldıkları sıcaklığa bağlı olarak yüksek enerji yoğunluğuna sahip malzemelerdir. Faz değişim malzemelerinin avantajları yanında kimyasal düzensizlik, uzun dönem uygulamalarda ısıl belirsizlik davranışları, seyrelme etkisinden dolayı depolanan enerji miktarlarında düşüş ve yükselen maliyetler gibi dezavantajlara sahiptir (Lefebvre, 2017).

3.6.3 Isıl-kimyasal enerji depolama

Isıl-kimyasal tepkimeler, soğurma ve tutunma işlemlerini içermektedir, her iki işlemde de enerji elde edilmektedir. Kimyasal tepkimeler yüksek enerji yoğunluğu sağlamalarına karşın tepkimeyi kontrol etmek ve ısıyı serbest bırakmak için katalizöre ihtiyaç duymaktadırlar ve bu istenmeyen durumdur. Emme depolama sistemleri adsorption ve absorption aşamalarını içermektedir. Absorption süreci sıvı veya gazın diğer malzemeye girmesi ve malzemenin hacmini artırmasıdır. Depolama uygulamalarında soğurma işlemi genellikle gazın sıvı içerisine girmesidir. Tutunma işlemi ise gaz ve sıvının katı veya gözenekli malzemenin yüzeyine bağlanmasıdır.

Çoğu ısıl-kimyasal enerji depolama sistemleri diğer depolama sistemlerine göre yüksek enerji yoğunluğuna sahiptir. Enerji yoğunluğu malzemenin birim hacim başına açığa çıkardığı enerji miktarı olarak tanımlanabilir. Yüksek enerji yoğunluğuna sahip olan sistemlerde büyük miktarda enerji küçük hacimlerde depolanabilir ve ev uygulamaları için oldukça uygun sistemlerdir. Aynı zamanda ısıl kimyasal enerji depolama sistemlerinde enerji kimyasal formda depolandığı için depolama süresi boyunca değişikliğe uğramaz ve sezonluk (uzun dönem) uygulamalar için oldukça verimlidir. Isıl kimyasal enerji teorik olarak çevre sıcaklığına yakın sıcaklıklarda depolanabilmektedir (Lefebvre, 2017).

3.7 Isıl enerji depolama sistemi seçim ölçütleri

Depolama yöntemi ve tasarımına göre ısıl depolama sistemi seçim kriterleri aşağıda verilmiştir.

- Depolama süresi boyunca sıcaklık aralığı (Ataer, 2006). Sistem sıcaklık aralığı depolama hacmi malzemesinin yapısını bozmayacak sıcaklık aralığında olmalıdır. Sistemin çalışma sıcaklık aralığı sistemin uygulama alanına uygun olarak seçilmelidir. Ek olarak ısıl depolama türü de sistemin çalışma sıcaklığı aralığını belirlemektedir.
- Yüksek ısı kapasitesi depolanan enerji miktarına doğrudan etki etmektedir. Yüksek ısı kapasitesi binlerce çevrimden sonra uzun dönem kararlılık sağlamaktadır. Bu nedenle ısıl enerji depolama sistemlerinin yüksek ısı kapasitesine sahip olması istenir (Lefebvre, 2017). Aynı zamanda depolama sisteminin kapasitesi sistemin çalışma koşullarına etki etmektedir. Küçük depolama üniteleri yüksek ortalama sıcaklıklarda çalıştırılmaktadır. Bu büyük depolama ünitelerine kıyasla ısı transferi ekipmanlarının sayısını azaltmaktadır. Uygun kapasitedeki kısa dönem depolama üniteleri 2 veya 3 günlük periyotlarda dalgalanmalara sahiptir ve genellikle en ekonomik kullanım alanları ev uygulamalarıdır.
- Depolama sisteminde ısı kaybı minimum düzeyde tutulması gerekmektedir. Isı kayıpları özellikle uzun dönem depolama sistemlerinde büyük önem arz etmektedir.

- Şarj ve deşarj oranları. Sistemin şarj ve deşarj çevrim sayıları ve süreleri uygulama alanlarına göre farklılık göstermektedir. Günlük, haftalık ve dönemlik olarak ısıl enerji depolama uygulamaları mevcuttur.
- Depolama ünitesinin maliyeti. Bu maliyet depolama ünitesinin başlangıç maliyetini, depolama tankını, yalıtımını ve işletme maliyetlerini kapsamaktadır (Ataer, 2006).

3.8 Yoğunlaştırılmış Güneş Enerjisi Teknolojilerine Genel Bakış

Yoğunlaştırılmış ısıl güneş enerjisi santralleri yenilenebilir enerji kaynağını ısı ya da elektrik enerjisi kaynağı olarak kullanır (YEGM). Bu sistemler aynalar ve bu aynalara bağlı güneş izleme sistemleri aracılığıyla geniş bir alana düşen güneş ışınlarını tek bir küçük alana odaklar. Yoğunlaştırılmış güneş enerjisi teknolojisi güneş alıcısı içindeki akışkanı ısıtan yoğun güneş ışığının bulunduğu alana güneş ışığını odaklamak için aynaları kullanır. Daha sonra türbin ve jeneratör kullanılarak elektrik üretilir. Aynalar çeşitli şekillerde düzenlenebilir ancak hepsi güneş ışığını güneş alıcısına iletir (Renewable Energy Policy Network for the 21st, 2016). Parabolik oluk yoğunlaştırıcılı sistemler, Frensel Aynalı Yoğunlaştırıcılar, Parabolik Çanak Sistemi ve Güneş kulesi olmak üzere 4 ana tür yoğunlaştırılmış güneş enerjisi teknolojisi vardır.

3.8.1 Parabolik Oluk Yoğunlaştırıcılı Sistemler

Bir parabolik oluk kollektör, ışın demetlerini odak ekseni üzerinde konumlandırılmış alıcı borusu üzerinde yoğunlaştıran, doğrusal parabolik bir aynadan oluşur. Alıcı parabolik aynanın orta kısmının biraz üstüne yerleştirilmiş, içinde çevrim akışkanı bulunan bir borudur. Aynalar genelde kuzey-güney ekseninde yerleştirilir. Gündüz saatlerinde güneşi doğudan batıya izleyerek ışınımı alıcı üstünde, eksen boyunca odaklar ve boru içerisinde akmakta olan çalışma akışkanını 150 -350 ℃ sıcaklığa kadar ısıtır. Isıyı alan çevrim akışkanı güç üretimi için ısı kaynağı durumuna gelmiştir. Daha sonra, çalışma sıvısı üzerindeki ısı, çevrim suyuna aktarılır ve elde edilen su buharı türbini döndürür. Parabolik oluk kollektörler, alana paralel ve seri bağlı sıralar halinde yerleştirilir ve geniş alan üzerinde düşen güneş enerjisi merkezde toplanarak elektriğe dönüştürülür (Livatyalı, 2011).

3.8.2 Frensel Aynalı Yoğunlaştırıcılar

Yoğunlaştırılmış doğrusal Frensel yansıtıcılar**,** güneş ışığını parabolik aynalarla yansıtmak yerine çok sayıda ince ayna dizileri kullanarak içinde çevrim akışkanı dolaşan bir çift tüpe yansıtan yoğunlaştırılmış güneş enerjisi teknolojisidir. Bu sistemler düz aynaların ucuz olmasından ötürü parabolik aynaların kullanıldığı parabolik sistemlere göre daha az maliyetlidir. Parabolik sistemlere göre diğer avantajı da aynı büyüklükte alana daha çok yansıtıcı konularak daha fazla kullanılabilir güneş ışığı kullanılabilir. Bundan dolayı, Frensel yansıtıcılar geniş kapasiteye sahip olan ve daha gelişmiş santrallerde kullanılmaya başlanmıştır.

3.8.3 Parabolik Çanak Sistemi

Parabolik çanak sistemleri yansıtıcı, toplayıcı ve motordan oluşan ünitedir. Güneş enerjisi, çanak biçimli bir yüzey tarafından alıcı yüzey üzerine nokta şeklinde yoğunlaştırılır. Alıcı yüzey üzerinde toplanan enerji ya ısıl enerjiye dönüştürülüp doğrudan ısı enerji olarak kullanılır ya da bir motor içerisindeki çevrim akışkanına aktarılarak mekanik güce çevrilir. Soğukken sıkıştırılmış akışkan güneş enerjisi yardımıyla ısıtılır ve bir türbin veya silindir piston sisteminde genleşirken iş üretir. Bu mekanik güç jeneratör aracılığıyla elektriksel güce dönüştürülür. Çanak-motor sistemi güneşi iki eksende izler (Tabak, 2009).

3.8.4 Güneş Kulesi

Güneş kulesi denilen sistemler Güneş'i izleyen ve ışınımı yüksek bir kule üzerine yerleştirilmiş alıcı üzerine yansıtan çok sayıda aynadan oluşur. Alıcı içinden geçen çevrim akışkanı alıcı içinde 500–1000℃ ulaşır ve ısıyı kulenin hemen dibindeki güç merkezine taşır ve enerji dönüşümü buhar veya gaz türbini tarafından sağlanır. Yüksek maliyet nedeniyle henüz yaygınlık kazanamamış bu sistemlerde, hem verim daha yüksektir hemde güneş ışınımının zayıfladığı veya olmadığı saatlerde elektrik üretimi sağlamak üzere enerji (ısı) depolamak daha kolaydır.

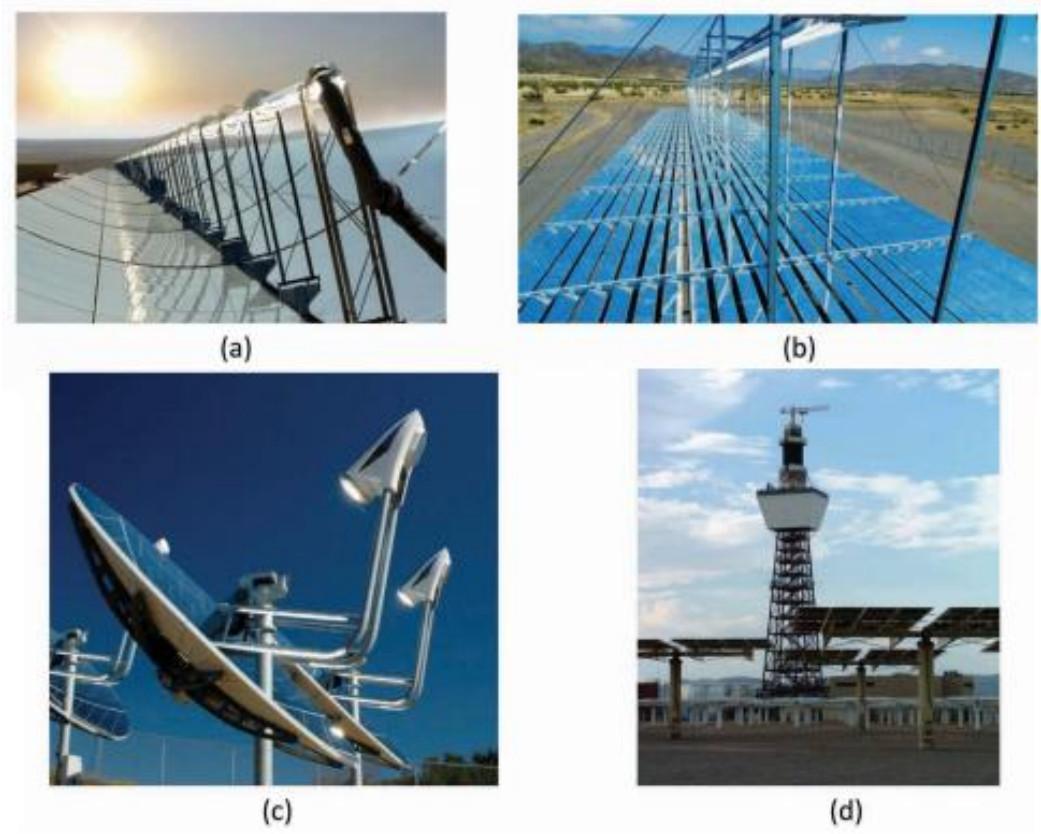
3.8.5 Parabolik Çanak Sistemi

Parabolik çanak sistemleri yansıtıcı, toplayıcı ve motordan oluşan ünitedir. Güneş enerjisi, çanak biçimli bir yüzey tarafından alıcı yüzey üzerine nokta şeklinde yoğunlaştırılır. Alıcı yüzey üzerinde toplanan enerji ya ısıl enerjiye dönüştürülüp

doğrudan ısı enerji olarak kullanılır veya bir motor içerisindeki çevrim akışkanına aktarılarak mekanik güce çevrilir. Soğukken sıkıştırılmış akışkan güneş enerjisi yardımıyla ısıtılır ve bir türbin veya silindir piston sisteminde genleşirken iş üretir. Bu mekanik güç jeneratör aracılığıyla elektriksel güce dönüştürülür. Çanak-motor sistemi güneşi iki eksende izler (Tabak, 2009).

3.8.6 Güneş Kulesi

Güneş kulesi denilen sistemler Güneş'i izleyen ve ışınımı yüksek bir kule üzerine yerleştirilmiş alıcı üzerine yansıtan çok sayıda aynadan (heliostat) oluşur. Alıcı içinden geçen çevrim akışkanı alıcı içinde 500–1000 ℃ ulaşır ve ısıyı kulenin hemen dibindeki güç merkezine taşır ve enerji dönüşümü buhar veya gaz türbini tarafından sağlanır. Yüksek maliyet nedeniyle henüz yaygınlık kazanamamış bu sistemlerde, hem verim daha yüksektir hem de güneş ışınımının zayıfladığı veya olmadığı saatlerde elektrik üretimi sağlamak üzere enerji (ısı) depolamak daha kolaydır (Livatyalı, 2011).



Şekil 3.3 : Yoğunlaştırılmış Güneş Enerjisi Teknolojileri a) Parabolik Oluk, b) Frensel aynalı, c) Parabolik Çanak, d) Güneş Kulesi (Livatyalı, 2011)

4. PAKETLENMİŞ GÖZENEKLİ YATAKTA DUYULUR ISIL ENERJİ DEPOLAMA

Bu yüksek lisans tez çalışmasında, paketlenmiş bir gözenekli yatakta duyulur ısıl enerji depolama ANSYS Fluent programı ile sayısal olarak incelenmiştir. Gözenekli yatak, çelik, kaya (rock) ve cordierite olmak üzere üç farklı malzemeden bilyelerle oluşturulmuştur ve bilyeler arasındaki boşluklarda ısı transferi akışkanı olarak hava bulunmaktadır. Çalışmada, önce çelik bilyelerle oluşturulan gözenekli yatak için literatürde bulunan bir çalışma ile karşılaştırma yapılmıştır. Daha sonra çelik bilyelerden oluşan gözenekli yatakta şarj ve deşarj aşamaları çeşitli debi ve gözeneklilik değerleri için incelenmiştir. Kaya ve cordierite bilyelerle oluşturulan gözenekli yatak ile ilgili sonuçlar çelik bilyeli yatak sonuçları ile karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

4.1 Matematik Model

Paketlenmiş gözenekli yatak ısıl enerji depolama sistemi geometrisi silindirik olarak seçilmiştir. Silindirik tankın çapı 0.60 m ve yüksekliği 1 m'dir. Analiz yaparken zamandan tasarruf etmek için sistem geometrisi 2 boyutlu ve simetrik olarak modellenmiştir. Isıl enerji depolama sistemi çelik, kaya (rock) ve cordierite bilyelerden oluşan paketlenmiş yatak teknolojisinin kullanıldığı gözenekli ortamdan oluşmaktadır. Çelik, kaya ve cordierite depolama malzemesi olarak kullanılırken hava ısı transferi akışkanı olarak kullanılmıştır. Depolama sistemi atmosfer basıncında (P = 1.013 bars) çalıştırılmıştır. Şekil 4.1'de 1 atm ve 10 atm basınçta ve depolama sisteminin çalışma sıcaklığı aralığında havanın ısıl fiziksel özellikleri çizdirilmiştir. Şekil 4.1(a)'dan görüleceği gibi, basıncın havanın yoğunluğu üzerinde etkisi fazladır, buna karşılık ısı kapasitesi, havanın termal iletkenliği ve dinamik viskozitesi üzerinde etkisi yok denecek kadar azdır (Anderson vd. 2015).

Katının ise ısıl fiziksel özelliklerinin sıcaklıktan bağımsız olduğu kabul edilmiştir . Tez çalışmasında sunulan sistemin çalışma şartları göz önüne alındığında sıkıştırılamaz ideal gaz kabulü yapılmış ve akışkanın ısıl fiziksel özelliklerinin

sıcaklığa göre değişimi için aşağıda verilen denklemler kullanılmıştır. Denklem 4.1'de ısı kapasitesinin sıcaklığa göre değişimini veren fonksiyon (http://ninova.itu.edu.tr/tr/dersler/ucak-uzay-fakultesi/965/uck-421/ekkaynaklar?g96162).

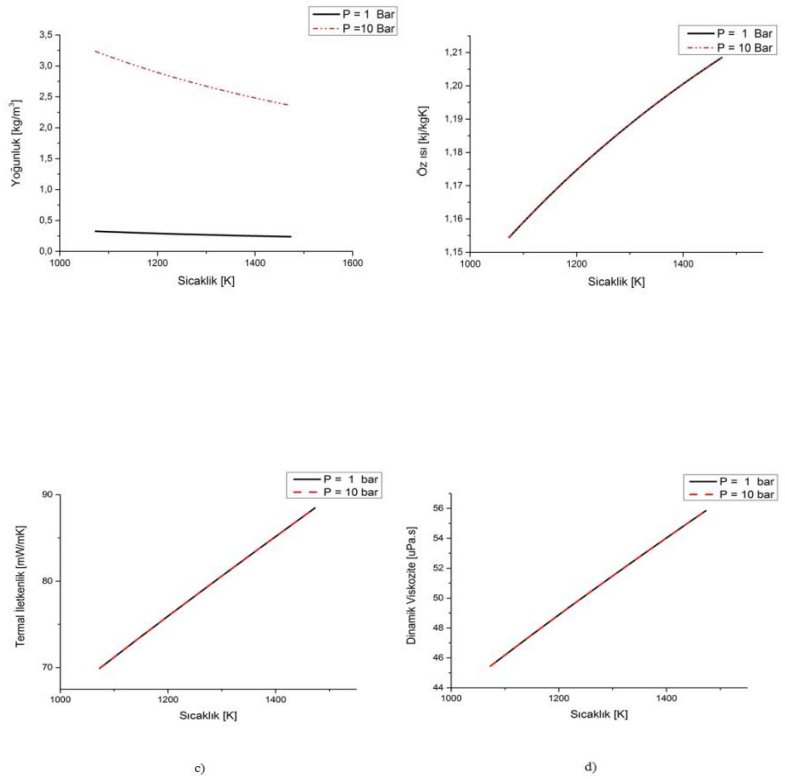
$$c_p = 1.9327\times10^{-10}T^4 - 7.9999\times10^{-7}T^3 + 1.1407\times10^{-3}T^2 - 4.4890\times10^{-1}T + 1.057\times10^{3} \quad (4.1)$$

Denklem 4.2'de dinamik viskozitenin sıcaklığa göre değişimini veren fonksiyon (Zografos vd., 1987),

$$\mu = 2.5914\times10^{-15}T^3 - 1.4346\times10^{-11}T^2 + 5.0523\times10^{-8}T + 4.1130\times10^{-6} \quad (4.2)$$

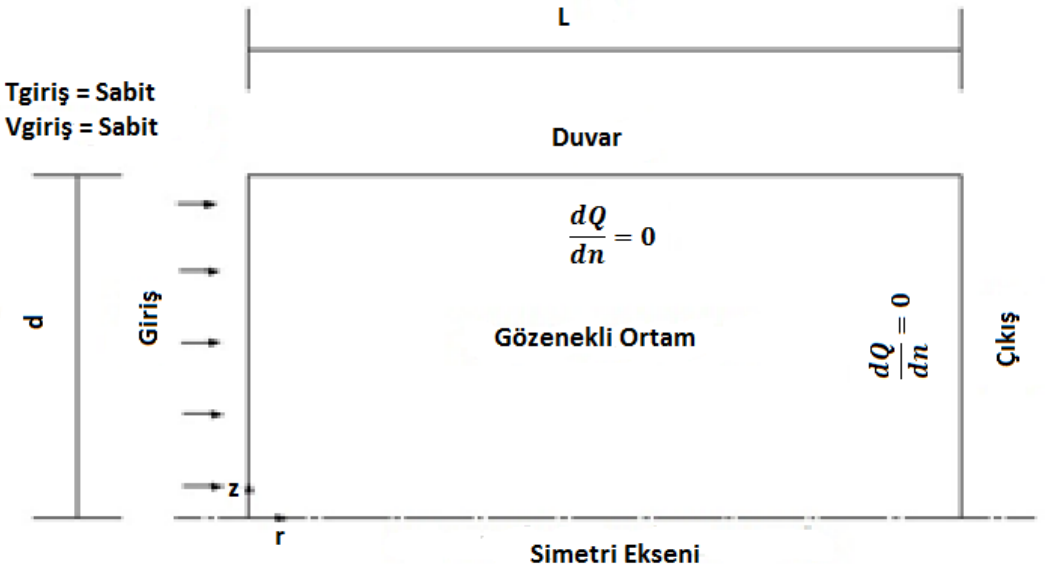
ve Denklem 4.3'de ısıl iletkenliğin sıcaklığa göre değişimini veren fonksiyon verilmiştir (http://bouteloup.pierre.free.fr/lica/phythe/don/air/air_k_plot.pdf).

$$k = 1.5207\times10^{-11}T^4 - 4.8574\times10^{-8}T^2 + 1.0184\times10^{-4} \quad (4.3)$$



Şekil 4.1 : Havanın 1 bar ve 10 bar'da termofiziksel özelliklerinin sistem çalışma sıcaklığı aralığında (1073-1473 K) değişimi a) yoğunluk, b) öz ısı, c) Isıl iletkenlik, d) dinamik viskozite

Sistem geometrisi ve depolama malzemelerinin ısıl fiziksel özellikleri Şekil 4.2 ve Çizelge 4.1'de verilmiştir.



Şekil 4.2: Sistem geometrisi

Çizelge 4.1 : Depolama malzemelerinin ısıl fiziksel özellikleri

Malzeme	c_{vs} [kJ/m^3 K]	ρ [kg/m^3]	k[W/mK]
Kaya (Hänchen vd., 2011)	2458	2560	0.48
Cordierite (A. Andreozzi vd., 2013)	900	2300	2.5
Çelik (Hänchen vd., 2011)	4454	7800	50

Bu çalışmada ısıl enerji depolama sisteminin şarj ve deşarj durumları incelenmiştir. Şarj durumunda hava sisteme 1473 K'de giriş yaparken, deşarj durumunda hava sisteme 1073 K'de giriş yapmaktadır. Şarj durumunda başlangıçta hava ve katı matrisin sıcaklığı 1073 K olduğu düşünülürken, deşarj durumunda başlangıç şartı olarak akışkan ve katı matrisin sıcaklığının 1473 K'e eşit olduğu farzedilmiştir. Dış çevreye olan ısı kaybı ve radyasyonla olan ısı transferi ihmal edilmiştir. ANSYS Fluent programında giriş sınır şartı olarak "kütle akış girişi" (mass flow inlet) tanımlanmış ve sabit debi ve sıcaklıkta havanın sisteme girdiği kabul edilmiştir. Çıkış sınır şartı olarak "dışarı akış" (outflow) tanımlanmıştır. Bu sınır şartı sistemin tam gelişmiş akış olarak modellenmesine olanak sağlamıştır. Depolama sisteminin duvarları için duvar sınır şartı tanımlanmış ve duvarlar yalıtımlı olarak kabul edilmiş ve sistemden dışarıya ısı kaybı ihmal edilmiştir. Sayısal analiz 3 farklı debide ve 6

gözeneklilik değeri için gerçekleştirilmiştir. Sonuçlarda depolanan ısıl enerji zamana bağlı olarak verilmiştir.

Sistemde depolanan enerji aşağıdaki denklemler aracılığıyla hesaplanmıştır.

$$Q_{depolanan} = \rho_{eff} c_{eff} \left[\int_V T dV - T_i V \right] \tag{4.4}$$

$$\rho_{eff} = \varepsilon \rho_f + (1-\varepsilon) \rho_s \tag{4.5}$$

$$c_{eff} = \varepsilon c_f + (1-\varepsilon) c_s \tag{4.6}$$

Burada $V = 0.283 m^3$ and $T_i = 1073 K$

4.2 Korunum Denklemleri

Momentum denklemi için Brinkman-Forchheimer-Darcy modeli kullanılmıştır. Gözenekli ortamda katı ve akışkan fazın ısıl dengede olmadığı kabul edilmiş ve gözenekli ortam için yerel ısıl dengede olmayan model kullanılmıştır. Sıkıştırılamaz ideal gaz yaklaşımı kabul edilmiştir ve çözüm zamana bağlı olarak gerçekleştirilmiştir. Radyasyon ile olan ısı transferi ve çevreye olan ısı kaybı ihmal edilmiştir. Yataktaki akış tam gelişmiştir. Gözenekli yatak ısıl depolama sistemi için korunum denklemleri aşağıda verilmiştir.

Kütle korunumu denklemi:

$$\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r v_p\right) + \frac{\partial u_p}{\partial z} = 0 \tag{4.7}$$

Momentum korunumu denklemleri:

$$\frac{\partial \varepsilon \rho_f u_p}{\partial t} + \varepsilon \rho_f v_p \frac{\partial u_p}{\partial r} + \varepsilon \rho_f u_p \frac{\partial u_p}{\partial z} = -\frac{\partial_p}{\partial z} + \varepsilon \mu \left(\frac{\partial^2 u_p}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial u_p}{\partial r} + \frac{\partial^2 u_p}{\partial z^2} \right) - \varepsilon^2 \frac{\mu}{K} u_p$$
$$-\varepsilon^3 \frac{C_2 \rho_f}{2} \sqrt{u_p{}^2 + v_p{}^2 u_p} \tag{4.8}$$

$$\frac{\partial \varepsilon \rho_f v_p}{\partial t} + \varepsilon \rho_f v_p \frac{\partial v_p}{\partial r} + \varepsilon \rho_f u_p \frac{\partial v_p}{\partial z} = -\frac{\partial_p}{\partial z} + \varepsilon \mu \left(\frac{\partial^2 v_p}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial v_p}{\partial r} + \frac{\partial^2 v_p}{\partial z^2} \right) - \varepsilon^2 \frac{\mu}{K} v_p - \varepsilon^3 \frac{C_2 \rho_f}{2} \sqrt{u_p{}^2 + v_p{}^2} v_p \quad (4.9)$$

Katı faz için enerji korunum denklemi

$$(1-\varepsilon)(\rho c)_s \frac{\partial T_s}{\partial t} = (1-\varepsilon) k_s \left(\frac{\partial T_s}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial T_s}{\partial r} + \frac{\partial T_s}{\partial z^2} \right) - h_{sf} a_{sf} \left(T_s - T_f \right) \quad (4.10)$$

Geçirgenlik ve atalet katsayıları aşağıdaki iki bağıntı aracılığıyla elde edilmiştir.

$$K = \frac{d_p{}^2 \varepsilon^3}{175(1-\varepsilon)^2}, C = \frac{1.75}{\sqrt{150}\varepsilon^{1.5}} \quad (4.11)$$

Denklem (4.8) ve (4.9)'daki $C_2 = 2CK^{-0.5}$ şeklindedir. Gözenekli ortam ve hava arasında gerçekleşen taşınımla ısı transferi katsayısı ve hacim başına ara yüz alanı aşağıdaki iki denklem aracılığıyla hesaplanmıştır (Andreozzi vd., 2012).

$$h_{sf} = \frac{k_f \left(2 + 1.1 Pr^{1/3} Re_p{}^{0.6} \right)}{d_p}; a_{sf} = \frac{6(1-\varepsilon)}{d_p} \quad (4.12)$$

$$Re_p = \frac{|v| d_p}{\nu} \quad (4.13)$$

Katsayılar (Andreozzi vd., 2012) makalesinde verilen gerçirgenlik değerleri kullanılarak hesaplanmıştır.

4.3 Sayısal Yöntem

Sayısal çözüm ANSYS Fluent programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yüksek sıcaklık ısıl enerji depolama sistemi geometrisi iki boyutlu silindirik olarak düşünülmüştür. Akışkanın (hava) ısıl fiziksel özellikleri sıcaklık ile değiştiği kabul edilirken katı matrisin ısıl fiziksel özellikleri sabit kabul edilmiştir. Sıkıştırılamaz ideal gaz kabulü yapılmıştır. Akış laminerdir ve tam gelişmiş zorlamalı taşınım zamana bağlı olarak çözülmüştür. Hava ve gözenekli ortam katı matris yapı farklı ısı

kapasitesi ve ısıl iletkenliğe sahiptir. Gözenekli ortamda ısı transferini modellemek için ısıl dengede olmayan sistem modeli (LTNE) kullanılmıştır.

Çözüm metodlarının seçiminde basınç-hız bileşimi için SIMPLE yöntemi seçilirken basınç için PRESTO çözüm yöntemi kullanılmıştır. Momentum ve enerji denklemlerinin çözümü için Second Order Upwind seçilmiştir. Yakınsama değerleri hız değişkenleri için 10^{-3}, enerji için ise 10^{-6} olarak seçilmiştir.

G = 0.4 kg/m^{2}s, $T_{giriş}$ = 1473 K, gözeneklilik 0.6 değeri için ızgara analiz çalışması gerçekleştirilmiştir. 20x60, 40x120, 80x240, 160x480, and 320x960 olarak 5 ızgara boyutu düşünülmüştür. Elde edilen sonuçlara göre 160x480 ızgara boyutunun kullanılmasının uygun olacağına karar verilmiştir. Zaman adımı seçimi için Courant-Friadrichs – Lewy (CFL) sayısı implicit çözümde iyi bir yaklaşım sağlamaktadır. Explicit çözüm yöntemi için ise bu sayı minimum gerekliliktir. Fakat ızgara boyutu küçüldüğünde çok küçük zaman adımı gereklidir. Implicit çözüm yönteminde tüm zaman adımlarında istikrarlı bir çözüm elde edilmektedir. Bu da yakınsamayı kolaylaştırmaktadır. Bu nedenle zaman adımı 5 s olarak seçilmiştir.

4.4 ANSYS Fluent Programı Aracılığıyla Sayısal Çözümün Gerçekleştirilmesi

Bu bölümde, sayısal analizde ANSYS Fluent programının kullanımı ile ilgili ayrıntılı bilgiler verilmiştir. Sistem geometrisi ANSYS Workbench geometri modülü kullanılarak oluşturulmuştur. Daha önce bahsedildiği üzere sistem geometrisi simetrik olarak modellenmiştir. Oluşturulan model daha sonra ANSYS Workbench Mesh modülüne aktarılarak sayısal çözümlemenin yapılabilmesi için ağ oluşturma işlemi yapılmıştır. Izgara metodu olarak Quadrilaterals seçilmiştir. Ağ yapısı oluşturulduktan sonra çözüm aşamasında sınır şartlarının verilebilmesi için isimlendirme ızgara kısmında yapılmıştır. İsimlendirmede giriş için inlet, çıkış için outlet, duvar için wall ve simetrik model oluşturduğumuz için eksen sınır şartı olarak axis yazılmıştır.

Ağ yapısı oluşturulduktan sonra 2ddp (2 dimensions, double precision) seçilerek setup bölümü başlatılır. Setup bölümünde çözüm parametreleri ayarlanır. General kısmında çözüm yöntemi olarak Pressure-Based, zamana bağlı çözüm yaptığımız için Transient seçilir ve simetrik model oluşturduğumuz için Axisymmetric seçilir. Model kısmında Energy seçeneği aktif hale getirilir. Çözüm modeli olarak aşağıda

Viscous-Laminar işaretlenir. Material kısmında akışkan ve katı yapının malzemeleri seçilir. Akışkan olarak hava seçilir. Malzeme özellikleri açılarak sıkıştırılamaz ideal gaz kabülü yaptığımız için Density kısmından incompressible-ideal-gas seçilir. Akışkan özelliklerin sıcaklığa bağlı olarak değiştiği kabulü yapıldığı için C_p, Thermal Conductivity ve Viscosity bölümlerinden constant yerine polynominal seçilerek daha önce verdiğimiz denklemlerinin katsayıları buraya yazılır.

Katı faz kısmı için depolama malzemesi seçilerek ısıl özellikleri yazılır. Gözenekli ortam modelinin oluşturulabilmesi için Cell Zone Conditions bölümünden surface_body kısmı açılarak Porous Zone kısmı aktif hale getirilir. Isıl dengede olmayan sistem modelleneceği için Heat Transfer Settings bölümünde Thermal Model olarak Non-Equilibrium seçeneği işeratlenir. Interfacial Area Density bölümünde daha önce hesapladığımız hacimsel alan değeri yazılır. Heat Transfer Coefficient kısmı için ise UDF tanımlanmıştır. Gözenekli ortam ve katı matris arasında gerçekleşen ısı transferi katsayısı zamana bağlı olarak değişmektedir. User Definition Function ile zamana bağlı olarak değişen bu özellikleri doğru bir şekilde modelleyebilmek için kod çalıştırılmıştır. UDF'nin eklenebilmesi için daha önce tanımlanması gerekmektedir. UDF'nin çalıştırılabilmesi için Visual Studio programı kullanılmış yazılan kod kaydedilerek Setup kısmında Define, User Defined, Functions, Compiled kısmından etkinleştirilmiştir. Daha sonra Porous Zone Heat Transfer Settings kısmından programa tanıtılmıştır.

Gözenekli ortam modeli ile ilgili olan daha önce hesapladığımız atalet, geçirgenlik katsayıları Viscous Resistance ve Inertieal Resistance kısmında yazılmıştır. Gözeneklilik değeri ise Porous sekmesine yazılmıştır. Darcy yasasına göre yazılan denklemde viskoz difüzyon etkisi görülmemektedir. Akış içindeki viskoz kuvvetlerin tanımlanması için Relative Viscosity kısmından Brinkman seçilir.

Boundary Conditions kısmında sınır şartları tanımlanmıştır. Termal dengede olmayan sistem modeli kullanıldığı için sınır şartı iki katına çıkmıştır. Akışkan tarafı için hava giriş şartı için inlet kısmından tip olarak mass-flow-inlet seçilir. Daha sonra inlet sekmesi açılarak debi ve sıcaklık değerleri girilir. Çıkış şartı için Outlet kısmından outflow seçilir. Outflow sınır şartı akışın tam gelişmiş akış olarak modellenmesine olanak sağlamaktadır. Daha sonra duvar için Wall sekmesinden çevreye olan ısı kaybı ihmal edildiği için Heat Flux değeri 0 olarak yazılır. Sınırda hız 0 olarak kabul edildiği için Shear Condition kısmından No Slip işaretlenir. Katı

matris sınır şartları olarak termal dengesizlik içeride bozulduğu için inlet:010 için akışkan giriş sıcaklığı ile aynı değer tanımlanmıştır. Çıkış ve duvar için (Ouetlet:011, wall:012) sekmeler açılarak adyabatik sınır koşulu Heat Flux 0 olarak girilmiştir.

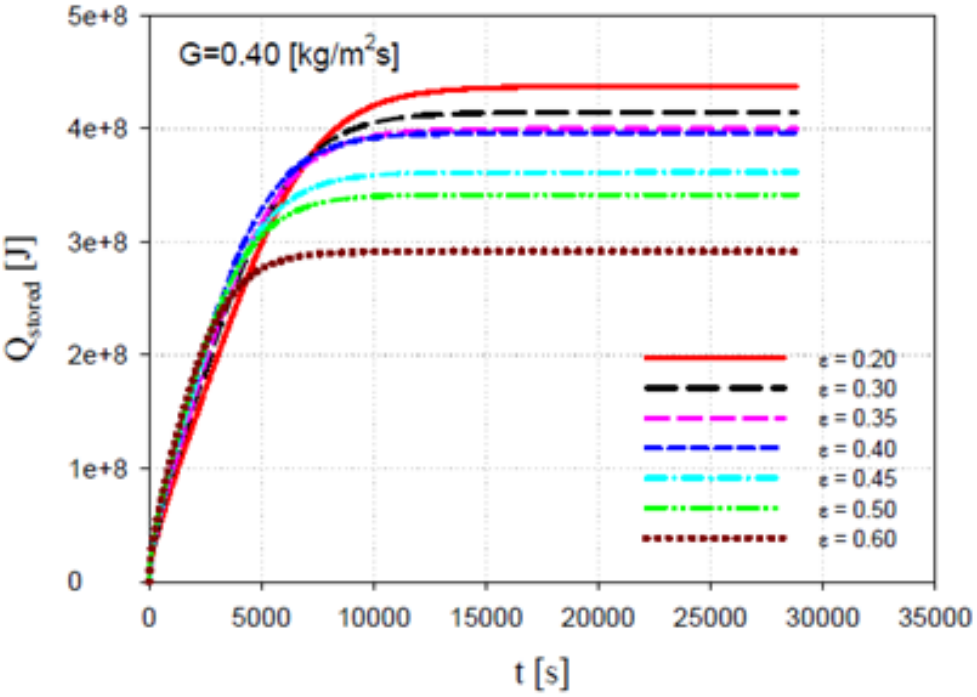
Solution Methods bölümünde daha önce belirttğimiz sayısal çözüm yöntemleri seçilir. Solution Controls bölümünde URF değerleri yer almaktadır. Yakınsamanın sağlanabilmesi için gözeneklilik 0.2 değerlerinde bu kısımdaki değerler değiştirilmiştir. Değerlerin değiştirilmesinin sonuca bir etkisi olmazken yakınsamanın süresini uzatmıştır. Monitors bölümünde Surface ve Volume Monitors sekmelerinden zamana bağlı çözüm gerçeleştirildiği için çözümün takip edilmesi ve sonuçların değerlendirilebilmesi için istenilen sonuçların not defterine kaydedilmesi sağlanmıştır. Residuals-Print, Plot sekmesinde yakınsama ölçütleri girilmiştir. Solution Initialization bölümünde çözümün başlatılması için giriş şartları seçilmiştir. Initialize butonuna tıkladıktan sonra Patch komutu kullanılarak başlangıçta katı matris yapının ve akışkanın istenilen başlangıç değerlerinde ayarlanması sağlanmıştır. Calculation Activities bölümünde sonuçların değerlendirilebilmesi için her zaman adımından değerlerin kaydedilmesi sağlanmıştır. Run Calculation bölümünde zaman adımı (Time Step Size) s olarak girilmiştir. Aynı zamanda toplam iterasyon sayısı ve her zaman adımında gerçekleştirilmesi istenen maksimum iterasyon sayısı girilmiştir. Son olarak Calculate butonu tıklanarak çözüm gerçekleştirilmiştir.

4.5 Çelik Bilyelerden Oluşan Gözenekli Kanalda Isıl Enerji Depolama

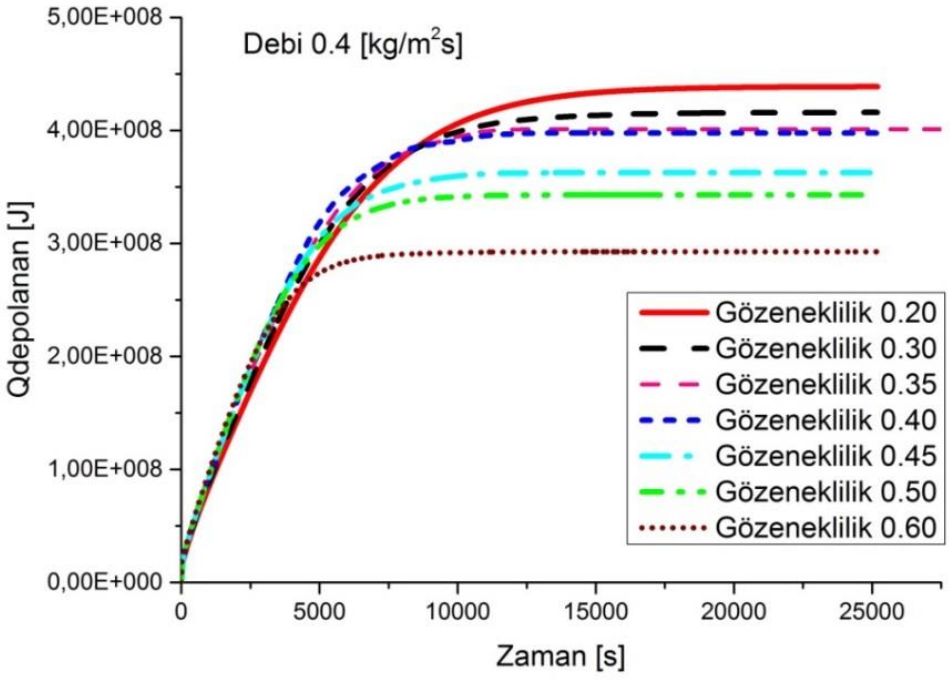
4.5.1 Doğrulama Çalışması

Tez çalışması kapsamında doğrulama çalışması gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar Andreozzi v.diğ, (2009)'un sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Makaledeki koşullarda ısı depolaması incelenmiştir. Şekil 4.3 (a) ve (b)'den ve Çizelge 4.2, Çizelge 4.3 ve Çizelge 4.4'den görüleceği gibi makale ve tez çalışması uyumludur.

Çizelge 4.2, 4.3 ve 4.4'de 7 farklı gözeneklilik değeri ve 8 saatlik simülasyon zamanında depolanan enerji miktarları kJ cinsinden verilmiştir. Çizelgelerde görüldüğü üzere farklı gözeneklilik değerleri ve süreleri için referans makale ve tez çalışmasında depolanan ısı miktarları arasındaki fark %7'nin altında kalmaktadır.



a)



b)

Şekil 4.3: 0.4 kg/m^{2}s debide şarj hali için çelik bilyelerle oluşturulan gözenekli kanalda ısıl depolama için bir karşılaştırma a) (Andreozzi v.d., 2009), b) Tez çalışması

Çizelge 4.2 : Çeşitli gözeneklilik değerlerinde ve 0,4 kg/m^{2}s debide depolanan ısı miktarları açısından (Andreozzi ve diğ, 2009) ve tez çalışmasının karşılaştırılması (0-7200 s).

Gözeneklilik	Qdepolanan [kJ] 3600 s	Qdepolanan (Andreozzi v.d., 2009) [kJ] 3600 s	Fark (%)	Qdepolanan [kJ] 7200 s	Qdepolanan (Andreozzi v.d., 2009) [kJ] 7200 s	Fark (%)
0.20	225468	228993	1,54	357636	376386	4,98
0.30	236811	248076	4,54	363078	376379	3,53
0.35	246649	255517	3,47	366300	371042	1,28
0.40	252740	270274	6,49	369237	374796	1,48
0.45	249766	262398	4,81	345105	347110	0,58
0.50	249815	263517	5,20	331826	332258	0,13
0.60	242150	250651	3,39	289021	288679	0,12

Çizelge 4.3 : Çeşitli gözeneklilik değerlerinde ve 0,4 kg/m^{2}s debide depolanan ısı miktarları açısından (Andreozzi ve diğ, 2009) ve tez çalışmasının karşılaştırılması (10800 – 14400 s).

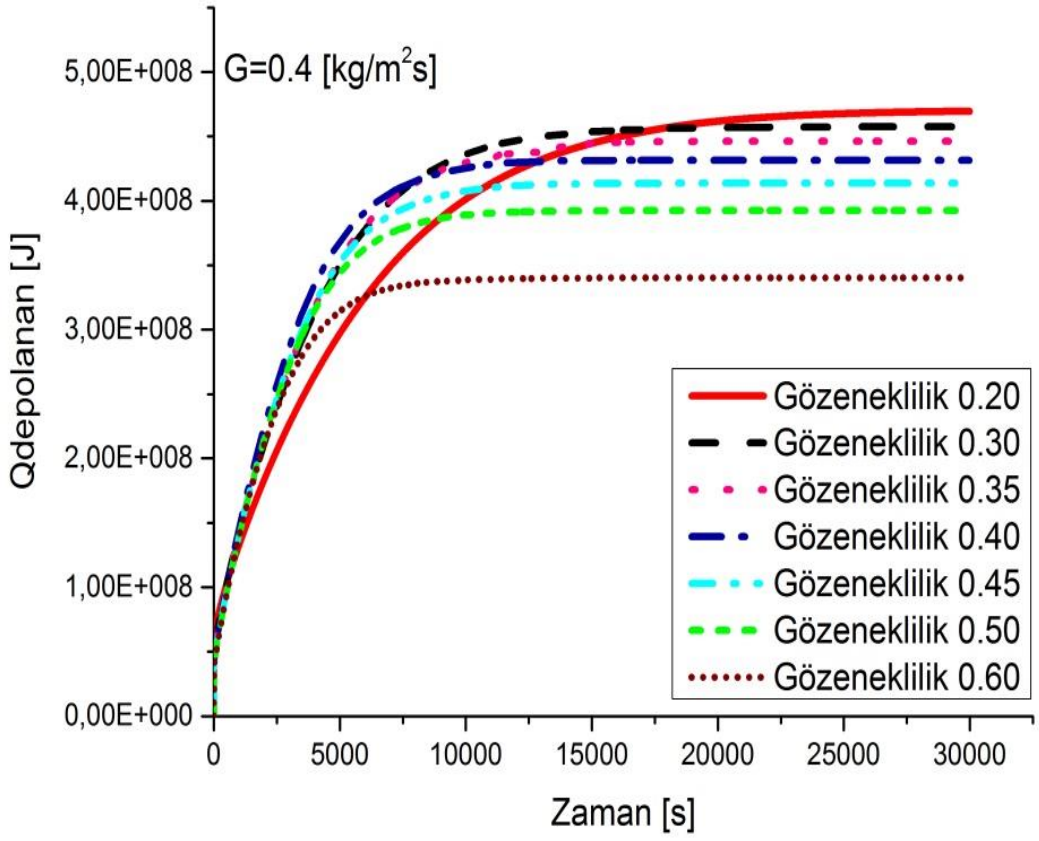
Gözeneklilik	Qdepolanan [kJ] 10800 s	Qdepolanan (Andreozzi v.d., 2009) [kJ] 10800 s	Fark (%)	Qdepolanan [kJ] 14400 s	Qdepolanan (Andreozzi v.d., 2009) [kJ] 14400 s	Fark (%)
0.20	413958	425931	2,81	432004	435473	0,80
0.30	403861	408565	1,15	412800	413761	0,23
0.35	398691	395671	0,76	401131	399281	0,46
0.40	394607	393724	0,22	397697	396128	0,40
0.45	361227	359920	0,36	362583	361273	0,36
0.50	342095	340914	0,35	342894	341730	0,34
0.60	292171	291539	0,22	292633	291716	0,31

Çizelge 4.4 : Çeşitli gözeneklilik değerlerinde ve 0,4 kg/m^{2}s debide depolanan ısı miktarları açısından (Andreozzi ve diğ, 2009) ve tez çalışmasının karşılaştırılması (18000 – 21600 s).

Gözeneklilik	Qdepolanan [kJ] 18000 s	Qdepolanan (Andreozzi v.d., 2009) [kJ] 18000 s	Fark (%)	Qdepolanan [kJ] 21600 s	Qdepolanan (Andreozzi v.d., 2009) [kJ] 21600 s	Fark (%)
0.20	437008	437005	0,00	438292	437213	0,25
0.30	415322	414430	0,22	415709	414505	0,29
0.35	401136	399736	0,35	401136	399787	0,34
0.40	397733	396377	0,00	397733	396399	0,25
0.45	362631	361405	0,22	362632	361416	0,29
0.50	342945	341794	0,35	342948	341799	0,34
0.60	292700	291725	0,43	292705	291725	0,56

4.5.2 Çeşitli gözeneklilik değerleri için 0,4 [kg/m^{2}s] debide ısıl enerji depolama: Şarj aşaması

Sayısal analiz 3 farklı debi değeri için gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.4'te 0,4 kg/m^{2}s debi ve yedi gözeneklilik değerinde çelik bilyelerden oluşan gözenekli kanal içinde zamana bağlı olarak depolanan enerji miktarları J cinsinden verilmiştir. Başlangıçta küçük gözeneklilik değerlerinde (0,2 ve 0,3) depolanan enerji miktarları az olurken zaman ilerledikçe bu eğilim tersine dönmüş ve gözeneklilik değeri küçüldükçe depolanan enerji miktarı artmıştır. Her gözeneklilik değerinde sistem denge haline ulaşmıştır. Sistem denge haline ulaştığında depolanan enerjinin miktarı gözeneklilik değeriyle ters orantılır. Bunun nedeni gözeneklilik değeri küçüldüğünde katı malzeme miktarı arttığı için ısıl kapasitenin artmasıdır.



Şekil 4.4: Çeşitli gözeneklilik değerlerinde 0,4 kg/m^{2}s debide şarj hali için ısıl enerji depolama

Depolanan enerji miktarları kJ olarak simülasyon zamanının ilk yedi saati için Çizelge 4.5'te verilmiştir. Çizelge 4.5'ten görüleceği gibi, büyük gözeneklilik değerlerinde sistemin doyması daha kısa sürede, küçük gözeneklilik değerlerinde ise daha uzun sürede gerçekleşmektedir. 7. saatin sonunda tüm gözeneklilik değerleri için sistemin tam doymuş olduğu gözönüne alınır ve her zaman aralığındaki depolanan enerji miktarı ile karşılaştırılırsa aşağıdaki gibi her zaman aralığında yatağın ısıl doyma yüzdesi hesaplanabilir.

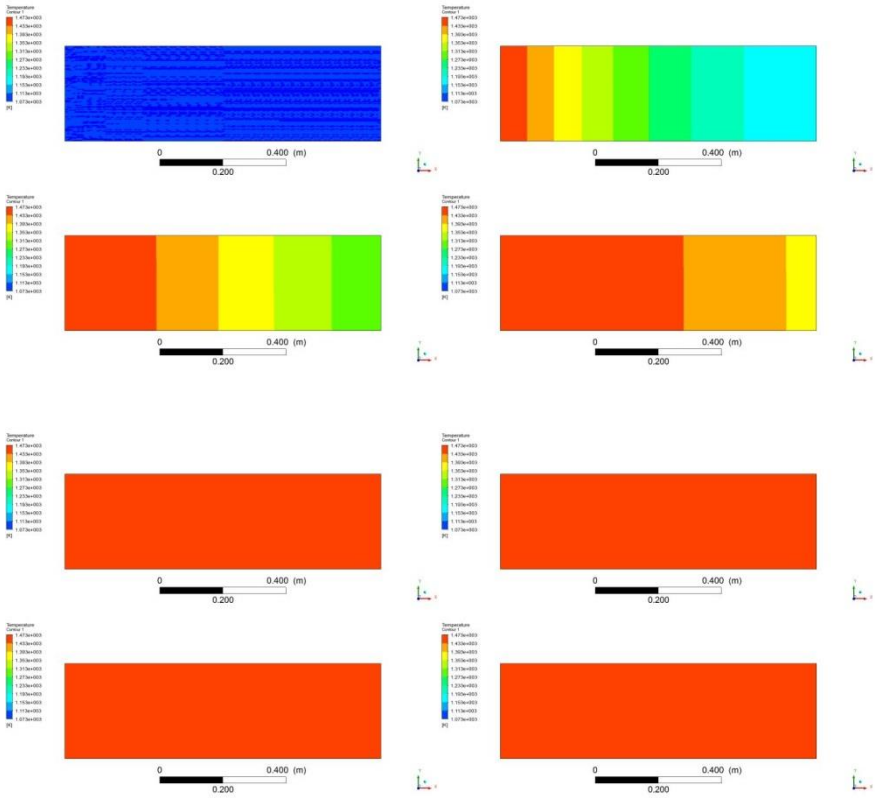
$$doygunluk\ yüzdesi = 1 - \frac{Q_{son} - Q_{mevcut}}{Q_{son}} \quad (\%)$$

Burada Q_{son} 25200 s (7 saat) sonunda depolanan enerjiyi, Q_{mevcut} herhangi bir zaman dilimindeki depolanan enerjiyi göstermektedir. Buna göre 1. saatin sonunda 0,6 gözeneklilik değeri için sistem yaklaşık %83, 0,2 gözeneklilik değeri için %60 kadar doygunluğa ulaşmaktadır. Çizelge 4.5'te, 3 saat sonra 0,2 gözeneklilik değeri hariç sistem diğer gözeneklilik değerlerinde hemen hemen doygunluğa ulaşmıştır.

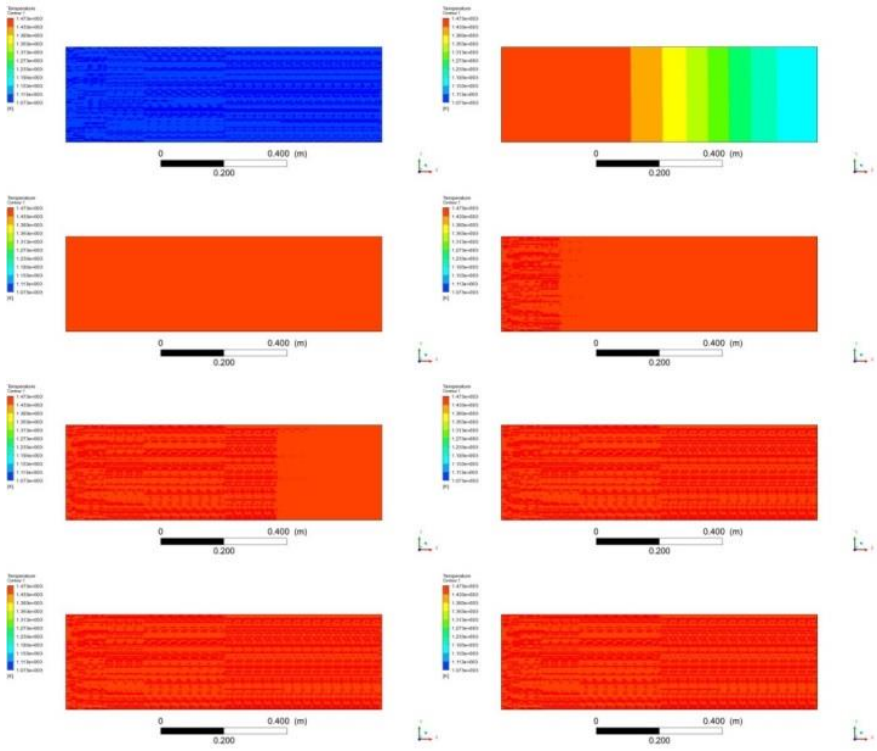
Şekil 4.5 – 4.7'de ısı depolama sırasında debi 0.4 kg/m^{2}s, gözeneklilik 0,2, 0,4 ve 0,6 değerleri için çelik kürelerden oluşan gözenekli yatakta yedi saat boyunca sıcaklık dağılımları verilmiştir. Her bir kontür 1 saatlik zaman dilimini temsil etmektedir ve ilk şekil ısıl depolama başlamadan önceki yani t=0 anındaki durumdur. Şekillerden görüldüğü üzere başlangıçta düşük ısıl ataletden dolayı 0,6 gözeneklilik değerinde yataktaki sıcaklık hızlı bir şekilde yükselmiş ve ısıl doygunluğa 0,4 ve 0,2 gözeneklilik değerlerine göre daha kısa bir sürede ulaşılmıştır.

Çizelge 4.5 : Çeşitli gözeneklilik değerlerinde ve 0,4 kg/m^{2}s debide depolanan ısı miktarları.

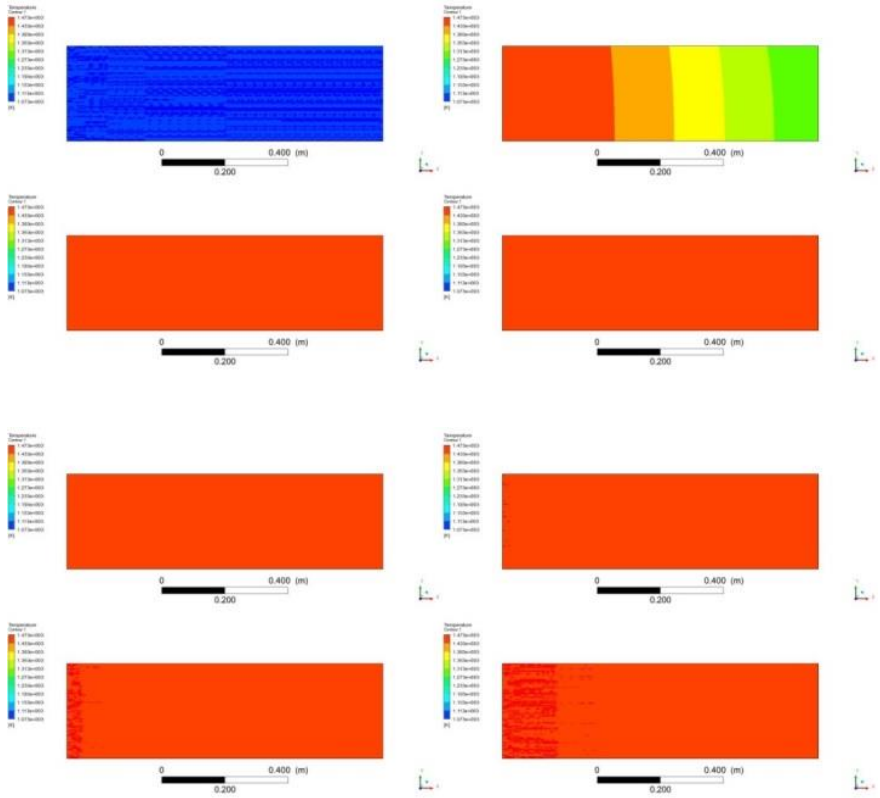
Gözeneklilik	$Q_{depolanan}$ [kJ] 3600 s	$Q_{depolanan}$ [kJ] 7200 s	$Q_{depolanan}$ [kJ] 10800 s	$Q_{depolanan}$ [kJ] 14400 s	$Q_{depolanan}$ [kJ] 18000 s	$Q_{depolanan}$ [kJ] 21600 s	$Q_{depolanan}$ [kJ] 25200 s
0.20	286097	389151	436788	457037	465641	468725	469813
0.30	296543	403272	441383	452672	456055	457090	457401
0.35	301111	403431	433491	443406	446011	446170	446179
0.40	317468	408425	427906	431185	431512	431543	431545
0.45	303873	391075	409991	413262	413596	413628	413631
0.50	300228	376694	390274	392165	392403	392432	392435
0.60	283064	333127	339076	340107	340303	340339	340346



Şekil 4.5: Isı depolama sırasında 0,4 kg/m^{2}s debi ve gözeneklilik 0,2 için gözenekli yatak boyunca sıcaklık dağılımları (0–25200 s).



Şekil 4.6: Isı depolama sırasında 0,4 kg/m^{2}s debi ve gözeneklilik 0,4 için gözenekli yatak boyunca sıcaklık dağılımları (0–25200 s).

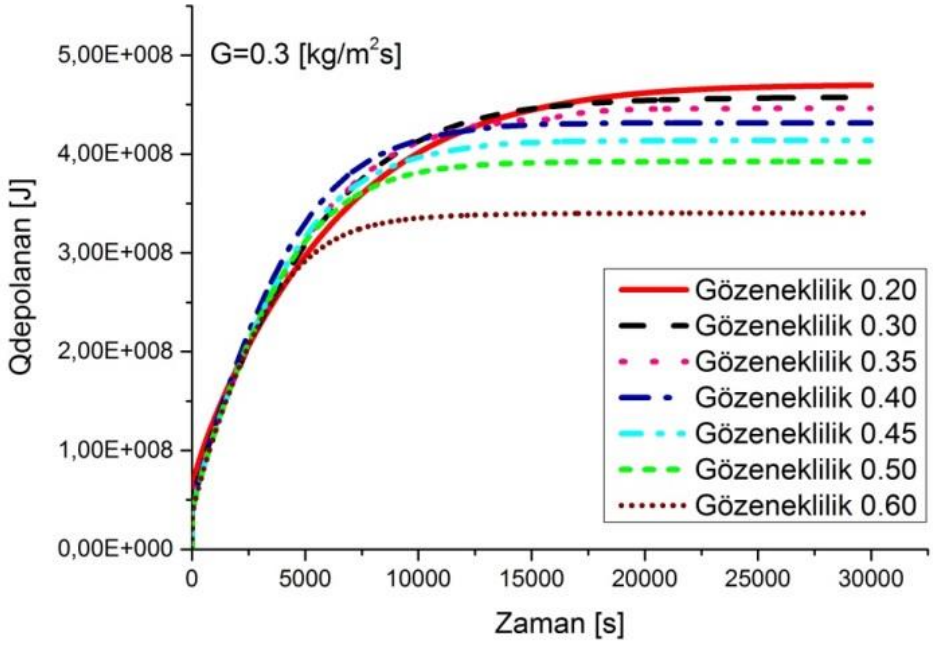


Şekil 4.7: Isı depolama sırasında 0,4 kg/m^{2}s debi ve gözeneklilik 0,6 için gözenekli yatak boyunca sıcaklık dağılımları (0–25200 s).

4.5.3 Çeşitli gözeneklilik değerleri için 0,3 [kg/m^{2}s] debide ısıl enerji depolama: Şarj aşaması

Şekil 4.8'de 0,3 kg/m^{2}s debide çelik bilyelerden oluşan gözenekli kanalda şarj hali için ısıl enerji depolama sonuçları verilmiştir. Debinin 0,4 kg/m^{2}s'den 0,3 kg/m^{2}s'ye düşmesi sonucu ısıl enerji depolamada görülen en büyük fark depolama sisteminin ısıl doygunluğa ulaşma süresi olmuştur. Gözeneklilik 0.6 değerinde sistem 10.000 s sonra ısıl doygunluğa ulaşırken, ilk durumda (0,4 kg/m^{2}s) 7500 s sonra dengeye ulaşmıştır. Sistemin ilk durumda daha erken ısıl doygunluğa ulaşmasının nedeni hava ve gözenekli ortam arasındaki taşınımla ısı transferinin daha yüksek olmasıdır. Çizelge 4.6'da görüldüğü üzere 0,40 gözeneklilik değerinde 2 saat sonra sistem yaklaşık %85 ısıl doygunluğa erişirken bir önceki durumda bu değer %94 olmuştur. Aynı zamanda Şekil 4.9-11'da ısı depolama sırasında debi 0,3 kg/m^{2}s, gözeneklilik 0,2, 0,4 ve 0,6 değerleri için çelik kürelerden oluşan gözenekli yatak boyunca sıcaklık dağılımları verilmiştir. Sıcaklık dağılımları incelendiğinde küçük gözeneklilik değerlerinde ısıl doygunluğa ulaşma süresi uzarken büyük gözeneklilik

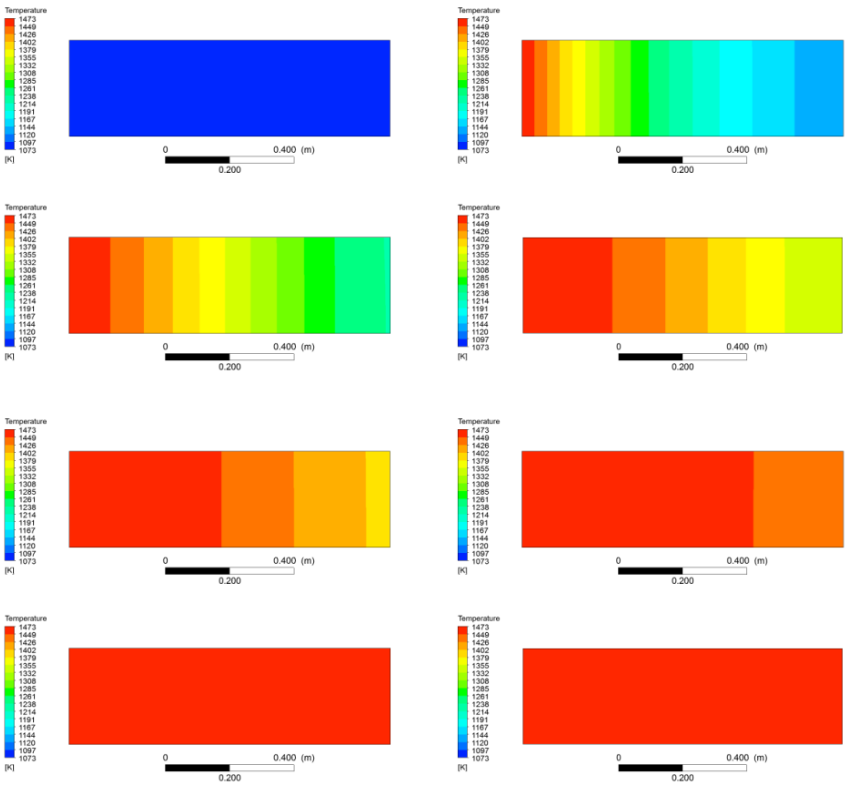
değerlerinde tam tersi gerçekleşmiştir. Bunun nedeni daha önce bahsedildiği üzere ısıl atalettir.



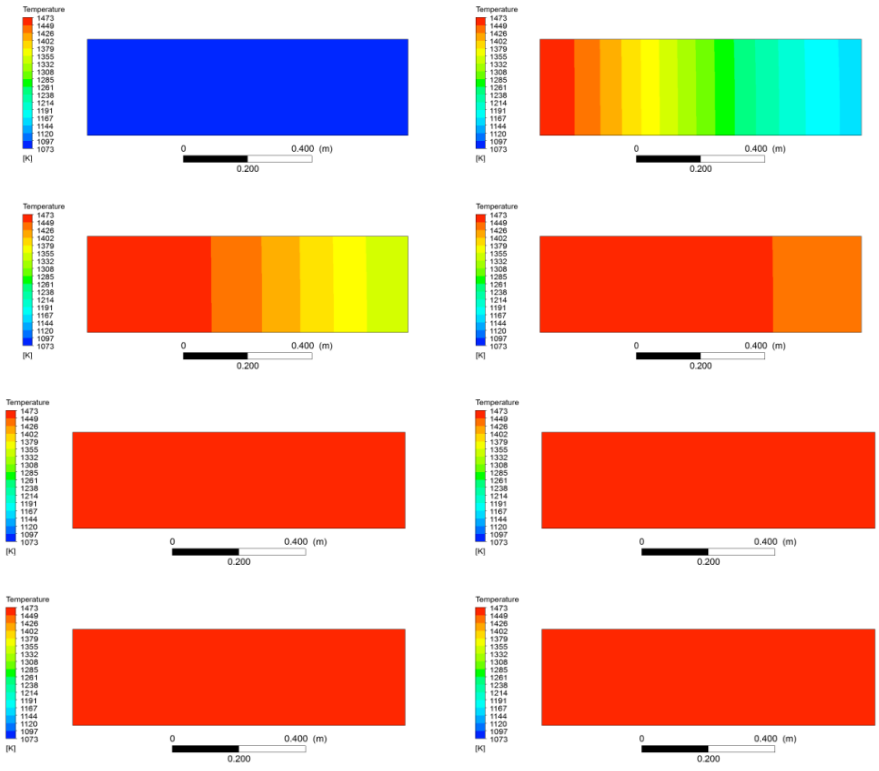
Şekil 4.8: Çeşitli gözeneklilik değerlerinde, 0,3 kg/m^{2}s debide şarj hali için ısıl enerji depolama

Çizelge 4.6 : Çeşitli gözeneklilik değerlerinde ve 0,3 kg/m^{2}s debide depolanan ısı miktarları.

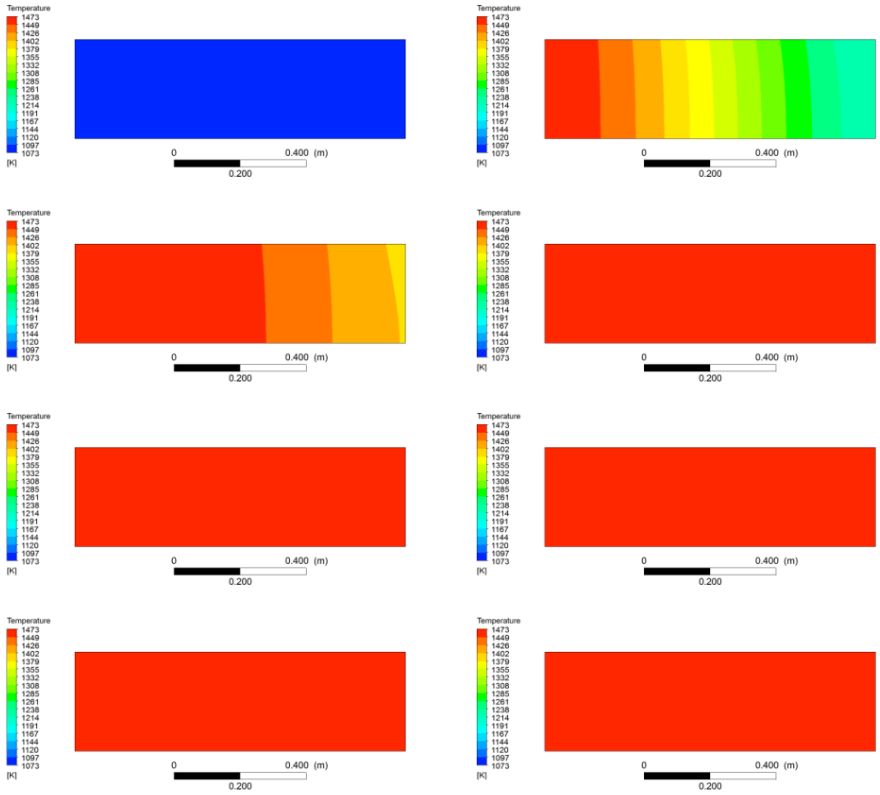
Gözeneklilik	$Q_{depolanan}$ [kJ] 3600 s	$Q_{depolanan}$ [kJ] 7200 s	$Q_{depolanan}$ [kJ] 10800 s	$Q_{depolanan}$ [kJ] 14400 s	$Q_{depolanan}$ [kJ] 18000 s	$Q_{depolanan}$ [kJ] 21600 s	$Q_{depolanan}$ [kJ] 25200 s
0.20	250510	353497	411253	441426	456793	464383	467757
0.30	255989	368198	421666	443936	452066	455366	456681
0.35	259195	371502	418367	433825	443336	445854	446143
0.40	275406	384267	418540	429020	431130	431479	431535
0.45	263820	367862	400889	411104	413207	413562	413620
0.50	262150	357240	384578	390821	392117	392374	392424
0.60	252704	322727	336527	339296	340066	340273	340328



Şekil 4.9: Isı depolama sırasında 0,3 kg/m^{2}s debi ve gözeneklilik 0,2 için gözenekli yatak boyunca sıcaklık dağılımları (0–25200 s).



Şekil 4.10: Isı depolama sırasında 0,3 kg/m^{2}s debi ve gözeneklilik 0,4 için gözenekli yatak boyunca sıcaklık dağılımları (0–25200 s).



Şekil 4.11: Isı depolama sırasında 0,3 kg/m^{2}s debi ve gözeneklilik 0,6 için gözenekli yatak boyunca sıcaklık dağılımları (0–25200 s).

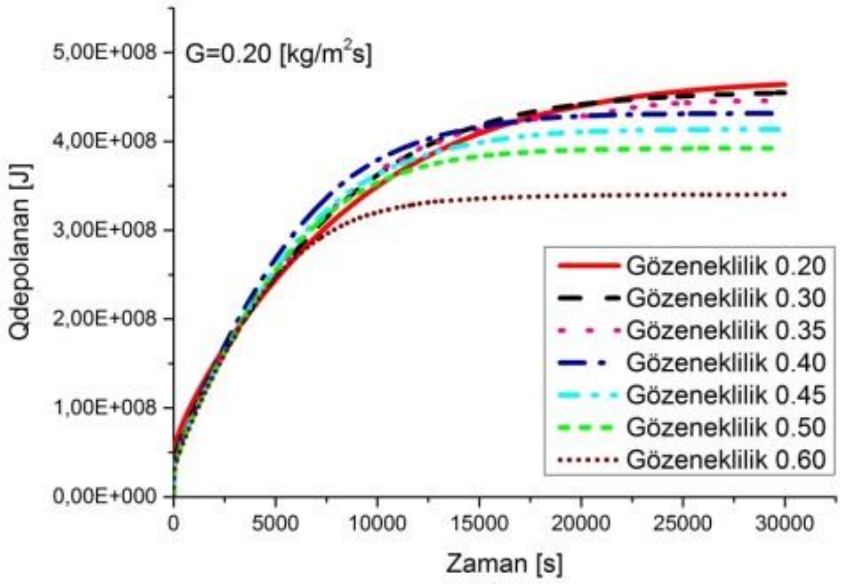
4.5.4 Çeşitli gözeneklilik değerleri için 0,2 [kg/m2s] debide ısıl enerji depolama: – şarj

Şekil 4.12'de depolanan enerji miktarları zamana bağlı olarak 0,2 kg/m^{2}s debi 7 gözeneklilik değeri için verilmiştir. Önceki durumlarda da gözlendiği gibi küçük gözeneklilik değerlerinde sistemin ısıl doygunluğa ulaşma süresi uzarken artan ısıl kapasite ile birlikte depolanan enerji miktarları da fazla olmaktadır. Debinin 0,2 kg/m^{2}s'ye düşmesi ile birlikte depolama sisteminin ısıl dengeye ulaşma sürelerinde artış gözlenmiştir.

Çizelge 4.7'de ise farklı gözeneklilik değerleri için depolanan enerji miktarları analiz süresinin farklı anlarında verilmiştir. 0,2 gözeneklilikte sistem 2 saat sonra 297.365 kJ ile %64 doygunluğuna ulaşırken 0,4 gözeneklilik değerinde %74 (216. 829 kJ) ve 0,6 gözeneklilik değerinde %85 (339.436 kJ) olmuştur. Önceki analizler ile kıyaslama yapmak gerekirse 0,3 gözeneklilik değeri için 0,2 kg/m^{2}s debide sistem 2 saat sonra %67 doygunluğa ulaşmıştır. Bu değer 0,3 kg/m^{2}s ve 0,4 kg/m^{2}s debide sırasıyla %80 ve %88 olmuştur.

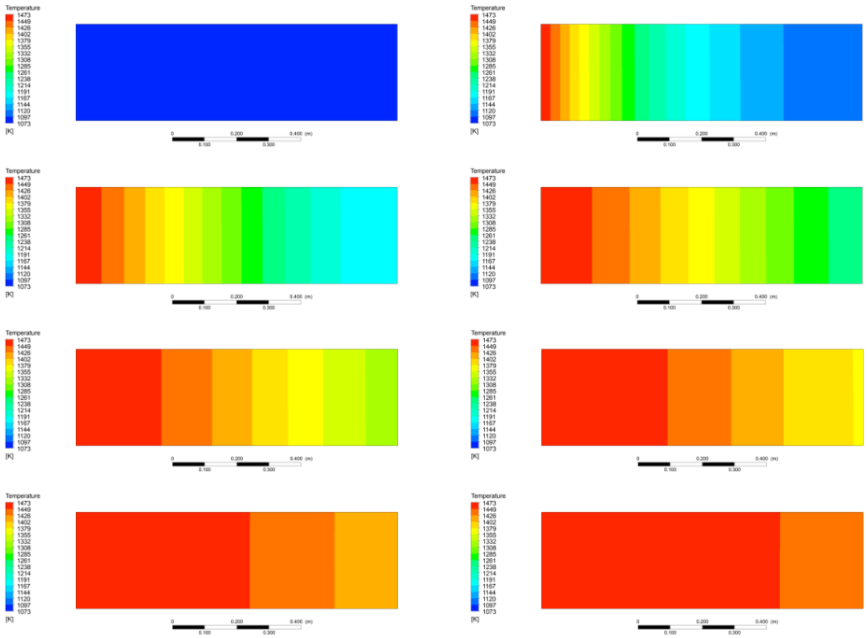
Çizelge 4.7 : Çeşitli gözeneklilik değerlerinde ve 0,2 kg/m^{2}s debide depolanan ısı miktarları.

Gözeneklilik	$Q_{depolanan}$ [kJ] 3600 s	$Q_{depolanan}$ [kJ] 7200 s	$Q_{depolanan}$ [kJ] 10800 s	$Q_{depolanan}$ [kJ] 18000 s	$Q_{depolanan}$ [kJ] 21600 s	$Q_{depolanan}$ [kJ] 25200 s
0.20	203934	297635	361730	430018	446410	456839
0.30	203104	307341	374466	434943	445486	451111
0.35	204347	310813	376307	426300	434374	443429
0.40	216829	330087	388049	425660	429807	431040
0.45	207917	316005	371484	407798	411887	413117
0.50	206624	310763	361236	388709	391201	392032
0.60	203340	291448	324681	338076	339436	339985

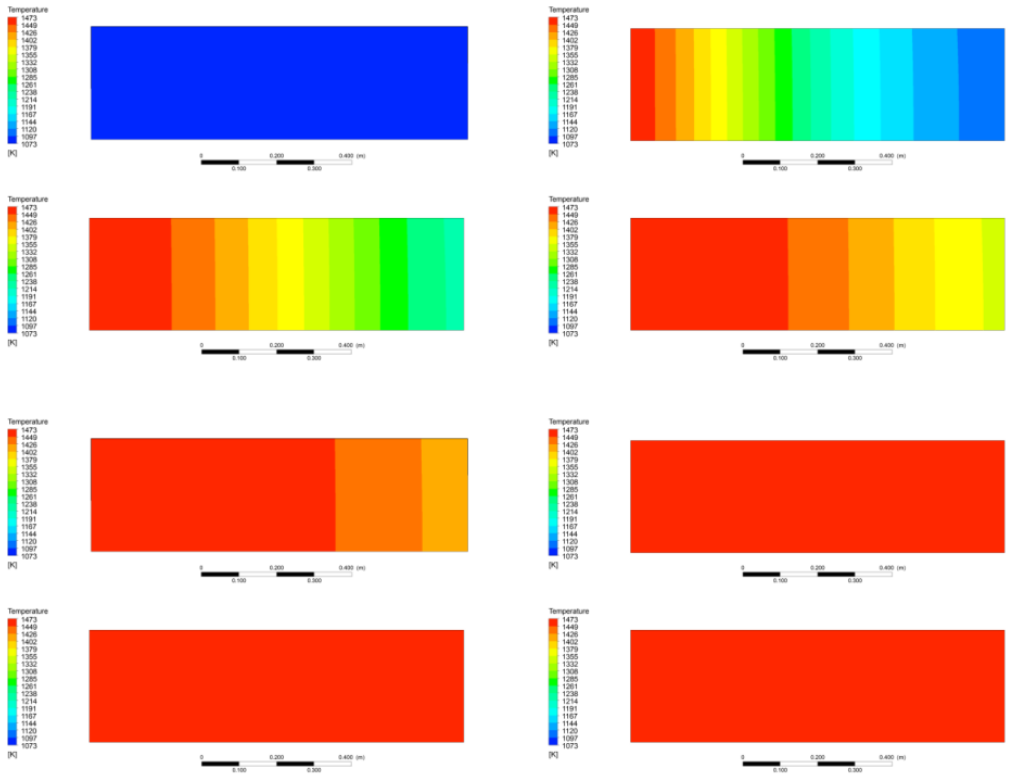


Şekil 4.12: Çeşitli gözeneklilik değerlerinde, 0,2 kg/m^{2}s debide şarj hali için ısıl enerji depolama.

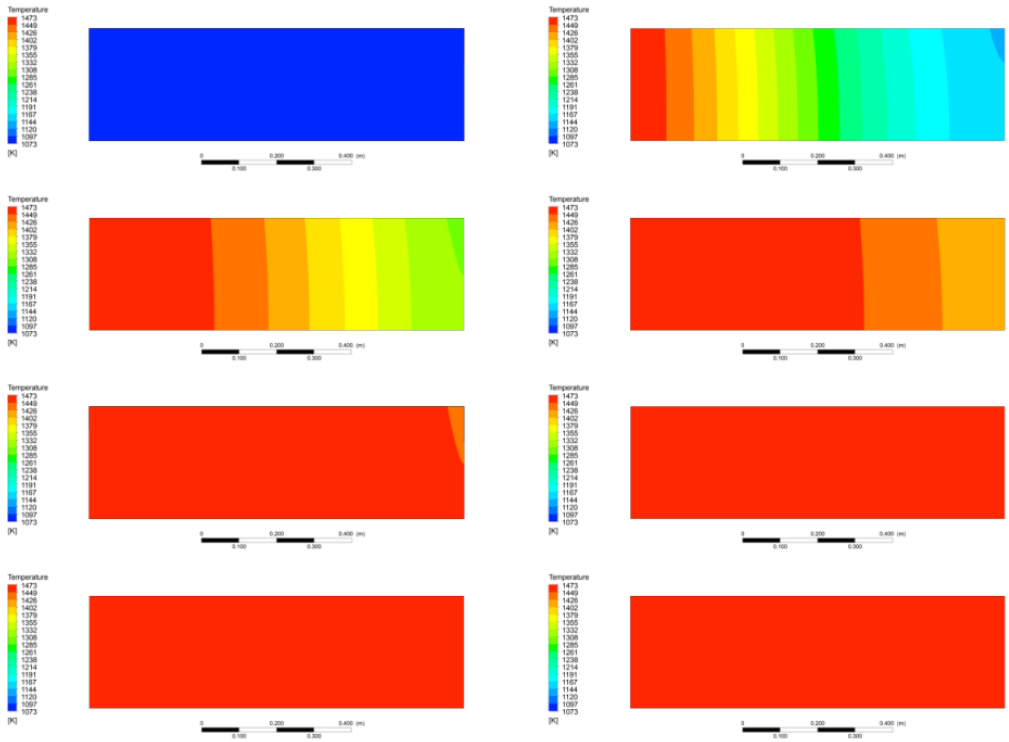
Şekil 4.13-15 arasında ise ısıl depolama sırasında gözenekli yatak içerisindeki sıcaklık dağılımı verilmiştir. Yaklaşık olarak gözeneklilik 0,6 değeri için sistem 4 saat sonra dengeye ulaşırken 0,4 gözeneklilikte 5 saat sonra dengeye ulaşmıştır. Gözeneklilik 0,2 değeri için sistem 7 saat sonra bile tam dengeye ulaşamamıştır.



Şekil 4.13: Isı depolama sırasında 0,2 kg/m^{2}s debi ve gözeneklilik 0,2 için gözenekli yatak boyunca sıcaklık dağılımları (0–25200 s).



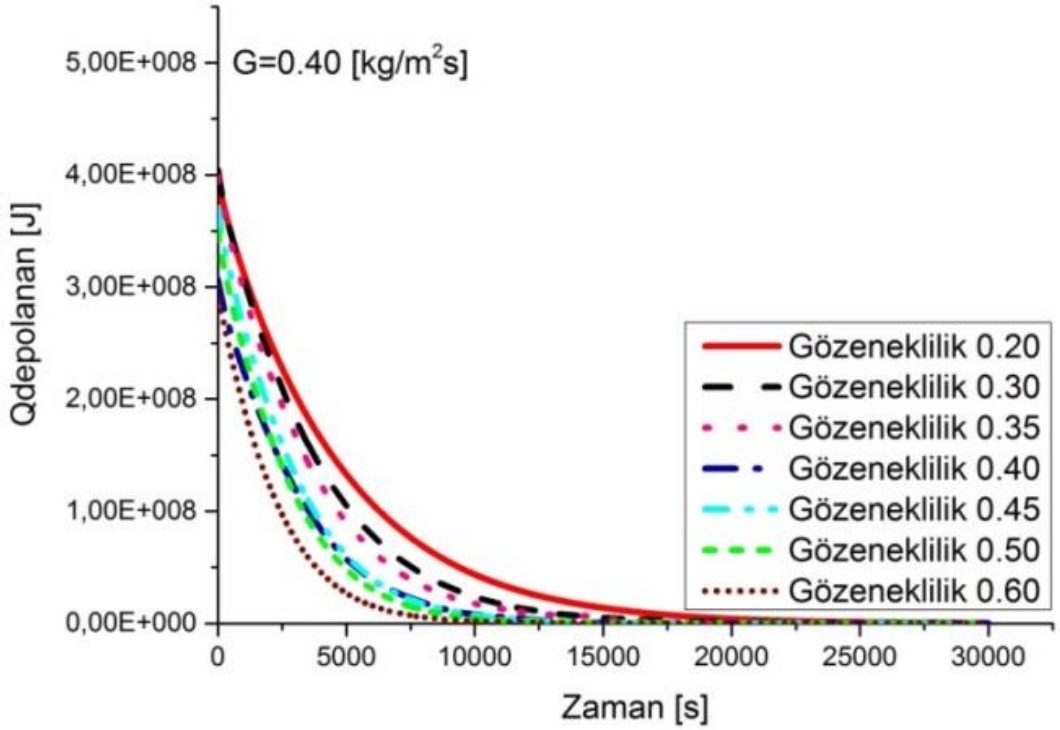
Şekil 4.14: Isı depolama sırasında 0,2 kg/m^{2}s debi ve gözeneklilik 0,4 için gözenekli yatak boyunca sıcaklık dağılımları (0–25200 s).



Şekil 4.15: Isı depolama sırasında 0,2 kg/m^{2}s debi ve gözeneklilik 0,6 için gözenekli yatak boyunca sıcaklık dağılımları (0–25200 s).

4.5.5 Debi 0,4 [kg/m^{2}s] ve çeşitli gözeneklilik değerlerinde deşarjın incelenmesi

Şekil 4.16'da 0,4 kg/m^{2}s debide çelik bilyelerden oluşan gözenekli kanal içerisinde deşarj hali için depolanan enerji miktarı 6 gözeneklilik değeri için kJ cinsinden verilmiştir. Bütün gözeneklilik değerlerinde sistem deşarj olarak enerjisini soğuk akışkana aktarmıştır. Grafik incelendiğinde deşarj ve şarj eğiliminin benzer olduğu görülmektedir. Gözeneklilik değeri arttıkça düşük ısıl ataletten dolayı sistem enerjisini akışkana daha hızlı transfer edebilmiştir.



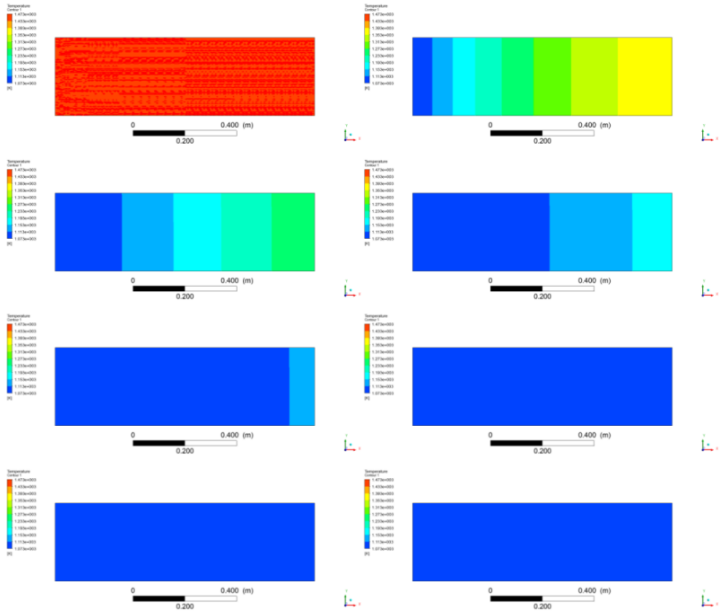
Şekil 4.16: 0,4 kg/m^2 s debide deşarj hali için sistemden çekilen ısı miktarları

Çizelge 4.8'da deşarj durumunda simulasyon zamanının 7 saati için farklı zaman dilimlerinde sistemde kalan enerji miktarları verilmiştir. 2 saat sonra 0,2 gözeneklilik değerinde sistem %79 deşarj olurken, 0,4 ve 0,6 gözeneklilik değerlerinde bu oran sırasıyla %91 ve %97'dir. Şekil 4.17-19'da 0,2, 0,4 ve 0,6 gözeneklilik değerleri için gözenekli yatak boyunca sıcaklık dağılımları verilmektedir.

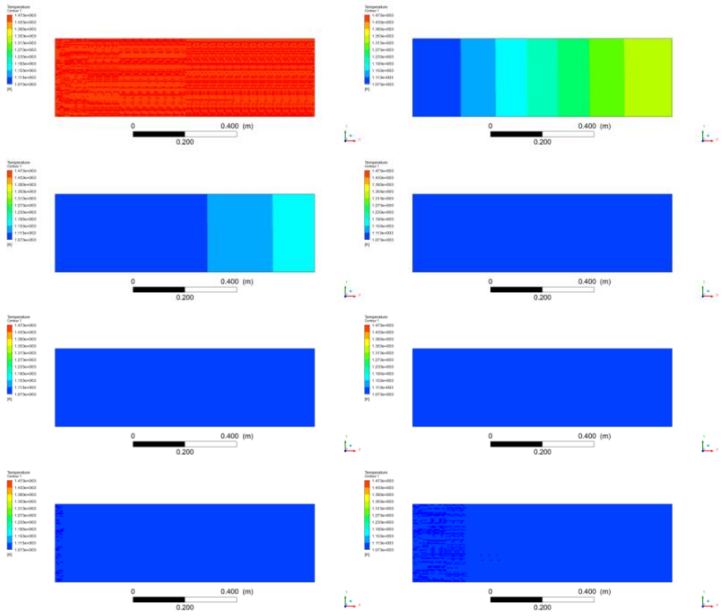
Çizelge 4.8 : Çeşitli gözeneklilik değerlerinde ve 0,4 kg/m^{2}s debide sistemde kalan ısı miktarları.

Gözeneklilik	Q_{kalan} [kJ] 3600 s	Q_{kalan} [kJ] 7200 s	Q_{kalan} [kJ] 10800 s	Q_{kalan} [kJ] 14400 s	Q_{kalan} [kJ] 18000 s	Q_{kalan} [kJ] 21600 s	Q_{kalan} [kJ] 25200 s
0.20	179933	81966	36349	15847	6538	2578	1011
0.30	155882	55391	18443	6079	2114	726	247
0.35	139440	43347	13647	6392	543	44	3,50
0.40	97625	25105	6082	842	78	7,09	0,63
0.45	105913	24013	5320	721	91	11	1,40
0.50	89096	17581	3028	487	75	11	1,71
0.60	56250	8379	1603	371	84	18	4

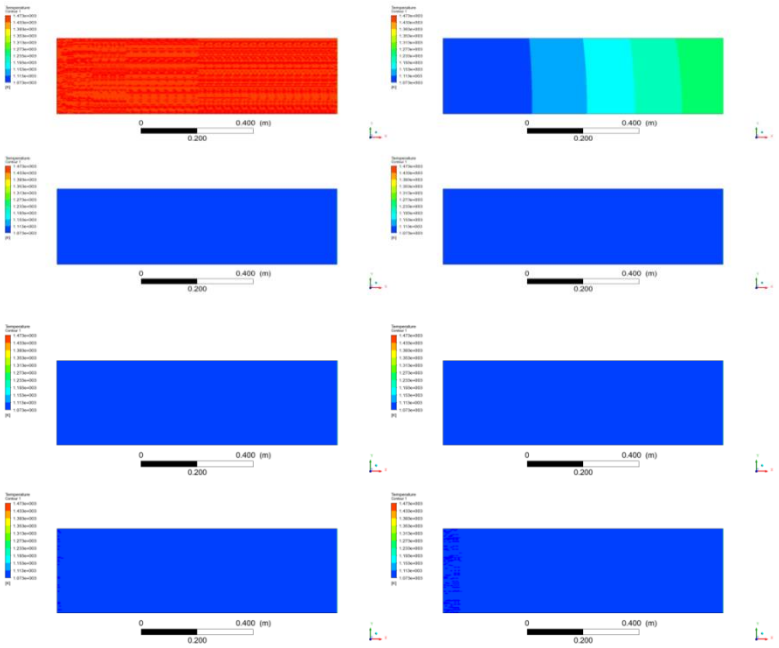
Her sıcaklık dağılımı 1 saatlik zaman dilimini göstermektedir. Sıcaklık dağılımları incelendiğinde gözeneklilik değerlerinin deşarj sürelerine etkisi daha net alaşılmaktadır. Gözeneklilik 0,2 değerinde sistem yaklaşık olarak 5. saatten sonra deşarj olurken, 0,4 gözeneklilik değerinde 3 saat sonra ve 0,6 gözeneklilik değerinde 2 saat sonra enerjisini aktararak tamamen deşarj olmuştur.



Şekil 4.17: Deşarj sırasında 0,4 kg/m^{2}s debi ve gözeneklilik 0,2 için gözenekli yatak boyunca sıcaklık dağılımları (0–25200 s).



Şekil 4.18: Deşarj sırasında 0,4 kg/m^{2}s debi ve gözeneklilik 0,4 için gözenekli yatak boyunca sıcaklık dağılımları (0–25200 s).

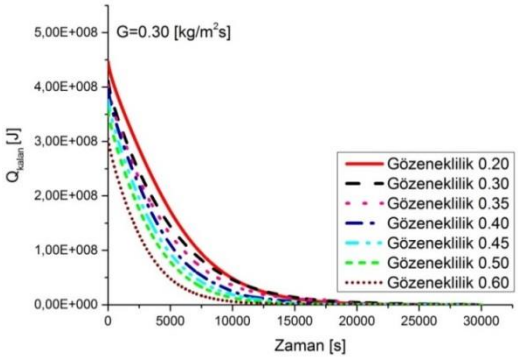


Şekil 4.19: Deşarj sırasında 0,4 kg/m^{2}s debi ve gözeneklilik 0,6 için gözenekli yatak boyunca sıcaklık dağılımları (0–25200 s).

4.5.6 Debi 0,3 [kg/m^{2}s] ve çeşitli gözeneklilik değerlerinde deşarjın incelenmesi

Şekil 4.20'de 0,3 kg/m^{2}s debide çelik bilyelerden oluşan gözenekli kanal içerisinde deşarj hali için depolanan enerji miktarı 7 gözeneklilik değeri için kJ cinsinden verilmiştir. Debi 0,3 kg/m^{2}s'de sistemin deşarj eğrisi 0,4 kg/m^{2}s'e benzemektedir. Debinin azalmasıyla sistemde görülen en büyük değişiklik deşarj süresidir. Debi 0,4 kg/m^{2}s'den 0,3 kg/m^{2}s'ye düştüğünde gözenekli ortam ve hava arasında gerçekleşen taşınımla ısı transferinin azalmasından dolayı deşarj süreleri artmıştır.

Çizelge 4.9'da deşarj durumunda simulasyon zamanının 7 saati için farklı zaman dilimlerinde sistemde kalan enerji miktarları verilmiştir.

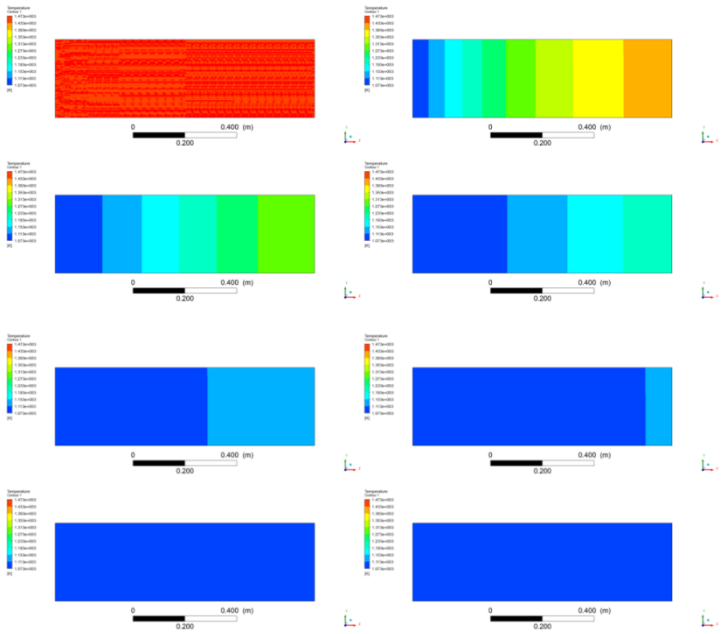


Şekil 4.20: 0,3 kg/m^{2}s debide deşarj hali için sistemden çekilen ısı miktarları.

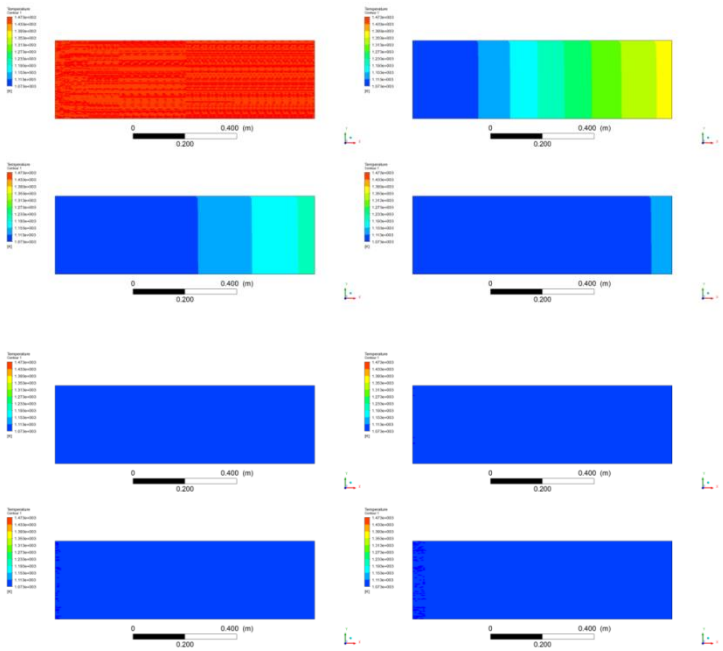
Çizelge 4.9 : Çeşitli gözeneklilik değerlerinde ve 0,3 kg/m^{2}s debide sistemde kalan ısı miktarları.

Gözeneklilik	Q_{kalan} [kJ] 3600 s	Q_{kalan} [kJ] 7200 s	Q_{kalan} [kJ] 10800 s	Q_{kalan} [kJ] 14400 s	Q_{kalan} [kJ] 18000 s	Q_{kalan} [kJ] 21600 s	Q_{kalan} [kJ] 25200 s
0.20	232197	102097	38760	13518	4199	1224	350
0.30	195293	88536	38050	15855	6783	2976	1298
0.35	180599	74612	28993	12911	6439	948	136
0.40	164225	58288	18528	7031	1165	186	29
0,45	143651	46681	14503	3898	807	163	32
0,50	125209	36624	9572	2363	564	132	30
0,60	84797	19314	4356	1389	437	135	41

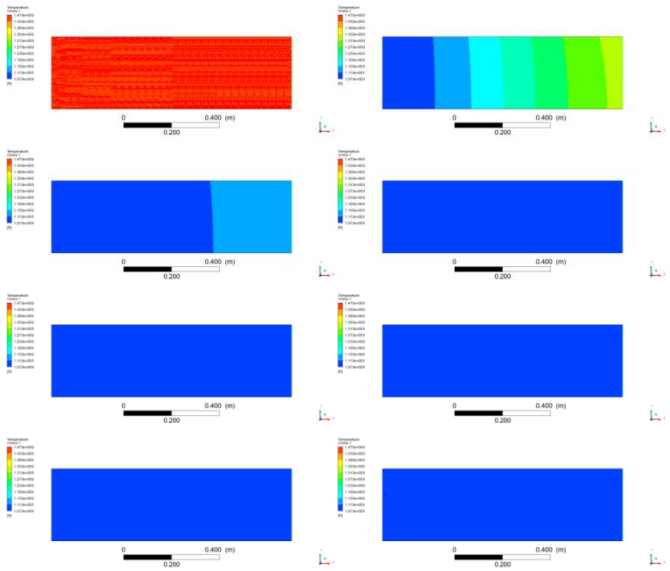
Şekil 4.21-23'de üç gözeneklilik değerinde çelik bilyelerden oluşan gözenekli yatak boyunca sıcaklık dağılımları verilmiştir. Şekiller incelendiğinde 0,2 gözeneklilik değerinde sistem 7 saat sonra tamamen deşarj haline gelirken, 0,4 gözeneklilik değerinde 4 saat sonra ve 0,6 gözeneklilik değerinde ise 3 saat sonra tam deşarj olmuştur.



Şekil 4.21: Deşarj sırasında 0,3 kg/m^{2}s debi ve gözeneklilik 0,2 için gözenekli yatak boyunca sıcaklık dağılımları (0–25200 s).



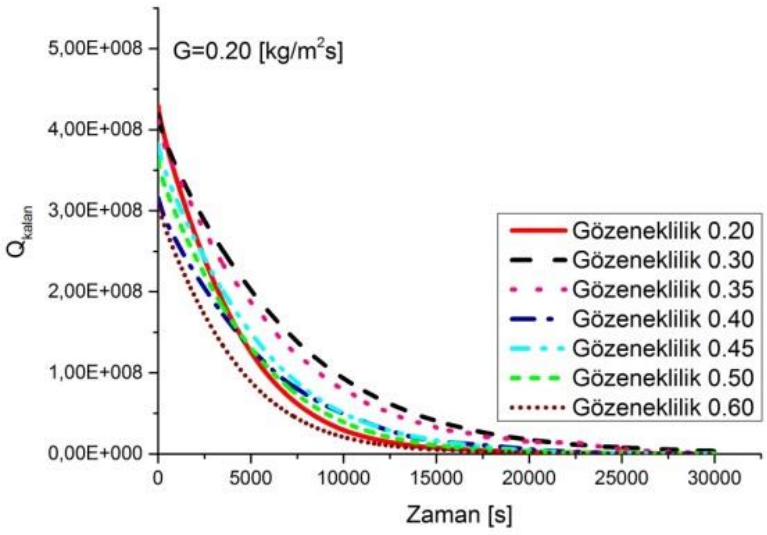
Şekil 4.22: Deşarj sırasında 0,3 kg/m^{2}s debi ve gözeneklilik 0,4 için gözenekli yatak boyunca sıcaklık dağılımları (0–25200 s).



Şekil 4.23: Deşarj sırasında 0,3 kg/m^{2}s debi ve gözeneklilik 0,6 için gözenekli yatak boyunca sıcaklık dağılımları (0–25200 s).

4.5.7 Debi 0,2 [kg/m^{2}s] ve çeşitli gözeneklilik değerlerinde deşarjın incelenmesi

Şekil 4.24'te 0,2 kg/m^{2}s debide çelik bilyelerden oluşan gözenekli kanal içerisinde deşarj hali için depolanan enerji miktarı 6 gözeneklilik değeri için kJ cinsinden verilmiştir. Debinin 0,3 kg/m^{2}s'den 0,2 kg/m^{2}s'ye düşmesiyle sistem görülen en büyük değişiklik deşarj süresinin uzamasıdır. Şekil 4.24 incelendiğinde gözeneklilik 0,4 değerinde sistem 5 saat sonra tamamen şarj olurken bu değer 0,3 kg/m^{2}s'de 4 saat ve 0,4 kg/m^{2}s'de ise 3 saattir.



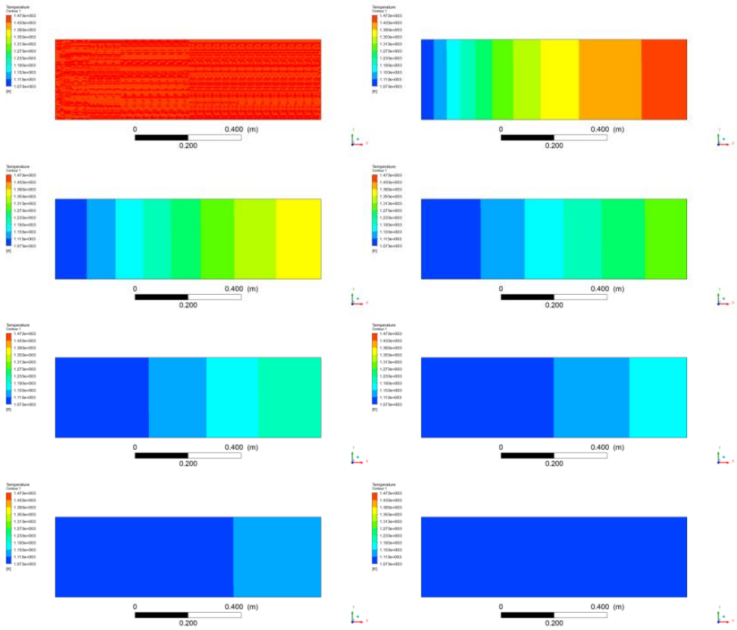
Şekil 4.24: 0.2 kg/m^{2}s debide deşarj hali için sistemden çekilen ısı miktarları.

Çizelge 4.10’da deşarj durumunda simulasyon zamanının 7 saati için farklı zaman dilimlerinde sistemde kalan enerji miktarları verilmiştir. Şekil 4.24 ve Çizelge 4.10 incelendiğinde gözeneklilik 0,3 değerinde sistem %65 deşarj olurken gözeneklilik 0,4 değerinde %73 ve gözeneklilik 0,6 değerinde %84 deşarj olmuştur.

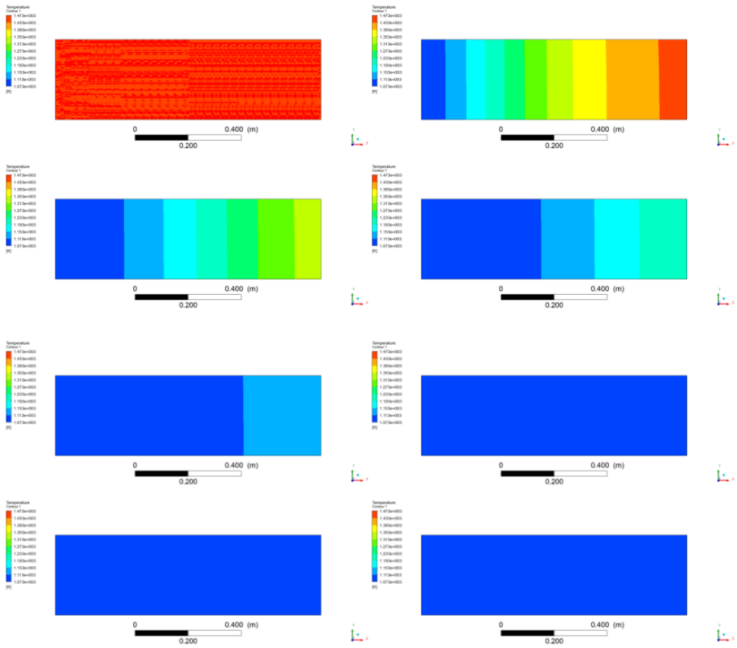
Çizelge 4.10 : Çeşitli gözeneklilik değerlerinde ve 0,2 kg/m^{2}s debide sistemde kalan ısı miktarları.

Gözeneklilik	Q_{kalan} [kJ] 3600 s	Q_{kalan} [kJ] 7200 s	Q_{kalan} [kJ] 10800 s	Q_{kalan} [kJ] 14400 s	Q_{kalan} [kJ] 18000 s	Q_{kalan} [kJ] 21600 s	Q_{kalan} [kJ] 25200 s
0.20	182643	67516	23353	8388	3778	1684	745
0.30	247204	145092	81751	45010	24459	13417	7609
0.35	230157	128265	68950	36833	20310	14038	5607
0.40	168977	84969	42269	17924	9807	3238	942
0.45	197028	93714	41888	18751	7774	2652	894
0,50	177519	78564	32023	12468	4741	1776	659
0.60	130003	47771	16499	5926	2670	1191	527

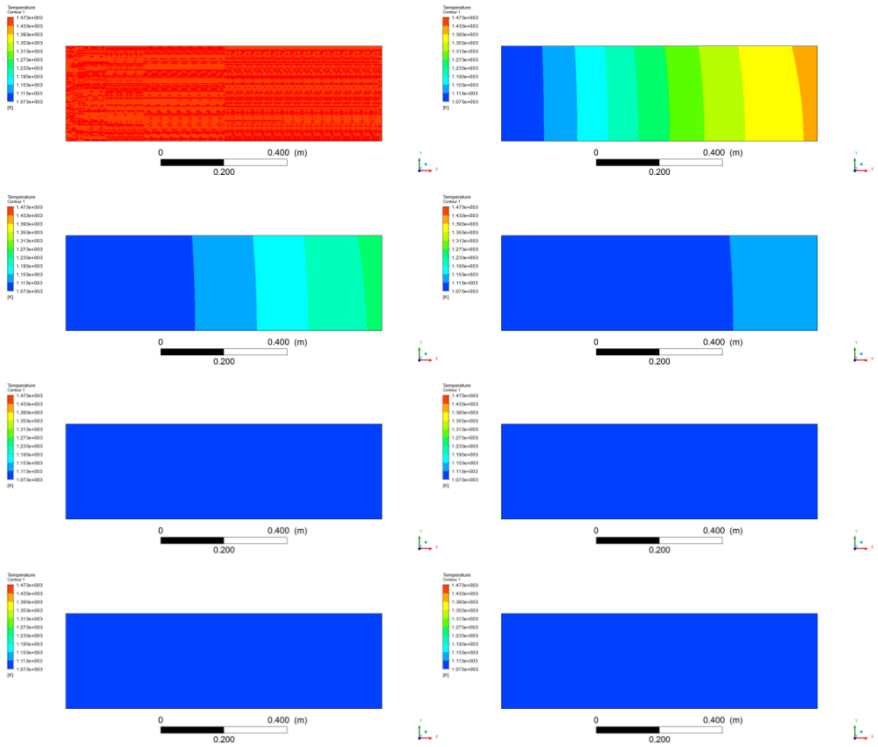
Şekil 4.25-27'de üç gözeneklilik değerinde çelik bilyelerden oluşan gözenekli yatak boyunca sıcaklık dağılımları verilmiştir. 0,2 gözeneklilik değerinde sistem 7 saat sonra tamamen deşarj olurken bu değer 0,4 gözeneklilik değerinde 5 saat ve 0,6 gözeneklilik değerinde 4 saat olmuştur.



Şekil 4.25: Deşarj sırasında 0,2 kg/m^{2}s debi ve gözeneklilik 0,2 için gözenekli yatak boyunca sıcaklık dağılımları (0–25200 s).



Şekil 4.26: Deşarj sırasında 0,2 kg/m2s debi ve gözeneklilik 0,4 için gözenekli yatak boyunca sıcaklık dağılımları (0–25200 s).



Şekil 4.27: Deşarj sırasında 0,2 kg/m^{2}s debi ve gözeneklilik 0,6 için gözenekli yatak boyunca sıcaklık dağılımları (0–25200 s).

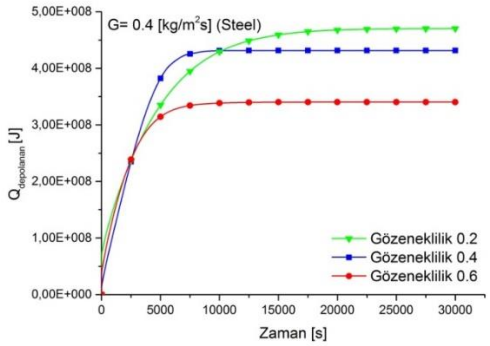
5. FARKLI DEPOLAMA MALZEMELERİNDEN OLUŞAN GÖZENEKLİ KANALDA ISIL ENERJİ DEPOLAMASININ KARŞILAŞTIRILMASI

5.1 Çelik, kaya (rock) ve cordierite bilyelerden oluşan gözenekli yatakta ısıl enerji depolama - şarj

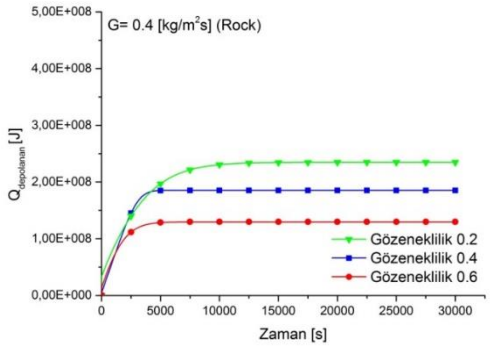
Bu bölümde farklı depolama malzemeleri için yüksek sıcaklık ısıl enerji depolama sistemleri incelenmiştir. Depolama sistemi çelik, kaya (rock) ve cordierite ($2MgO\text{-}2Al_2O_3\text{-}5SiO_2$) bilyelerden oluşmaktadır. Sonuçlar farklı debi ve gözeneklilik değerlerinde verilmiştir. Şekil 5.1'de 0,4 kg/m^{2}s debide sonuçlar verilirken Şekil 5.2'de 0,2 kg/m^{2}s debide sonuçlar verilmiştir. Aynı zamanda 0,2, 0,4 ve 0,6 gözeneklilik değerleri kullanılmıştır. Her durumda ısıl enerji depolama sistemi denge haline ulaşmıştır. Bu sistemin ısıl doygunluğa ulaştığını göstermektedir. Küçük gözeneklilik değerlerinde sistemde daha fazla ısıl enerji depolandığı görülmüştür. Bunun nedeni ısıl kapasitenin artmasıdır. Şekil 5.2'de ise 0,2 kg/m^{2}s debide sonuçlar verilmiştir. Eğilimin debi 0,4 kg/m^{2}s'ye göre benzer olduğu görülmektedir. Debinin azalması depolanan enerji miktarı üzerine etki etmezken ısıl doygunluğa ulaşma süresi artmıştır.

Çizelge 4.1'de çelik, kaya (rock) ve cordierite malzemelerin ısıl fiziksel özellikleri verilmişti. Malzemeler arasında çelik en yüksek hacimsel ısı kapasitesine (4454 kJ/m^{3}K) sahiptir. Kaya (rock) ve cordierite malzemelerin hacimsel ısı kapasiteleri daha düşüktür ve sırasıyla 2548 ve 900'dür. Isıl enerji depolama sistemlerindeki en önemli parametre hacimsel ısı kapasitesiyken ısıl iletkenlik çok az etkilidir. Grafikler incelendiğinde en fazla enerji çelik bilyelerden oluşan gözenekli yatakta depolanırken, kaya (rock) ve cordierite bilyelerden oluşan sistemlerde depolanan enerji miktarı birbirine yakındır ve çelik bilyelerden oluşan sisteme göre azdır. Şekil 5.1 ve 5.2 incelendiğinde ısıl yayınım oranı diğer malzemelere göre büyük lan çelik Debi arttığında depolanan enerji miktarı tüm depolama malzemeleri için değişmezken, hava ve gözenekli ortam arasındaki taşınımla ısı transferinin artmasından dolayı ısıl doygunluğa ulaşma süresi azalmıştır. Gözeneklilik değerleri

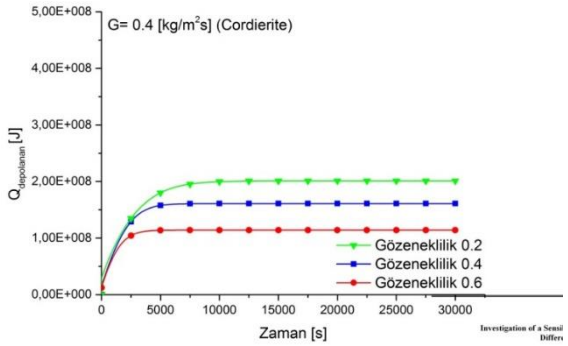
incelendiğinde, tüm depolama malzemeleri için gözeneklilik değeri arttığında depolanan enerji miktarının azaldığı görülmüştür. Bunun nedeni yatak gözenekliliğinin yüksek olmasının ısıl enerji depolama sistemlerinde sistemin sıcaklığının hızlı bir şekilde yükselmesine ve ısıl kapasite azalmasına yol açmasıdır.



a)

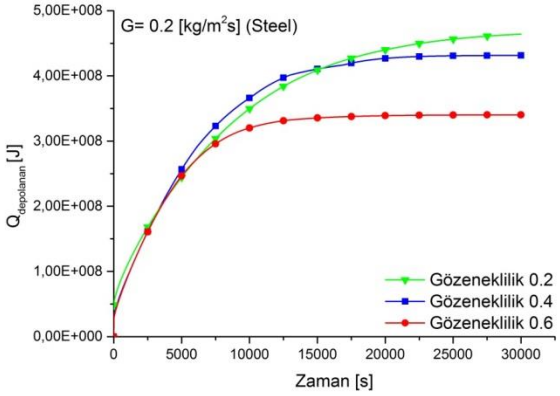


b)

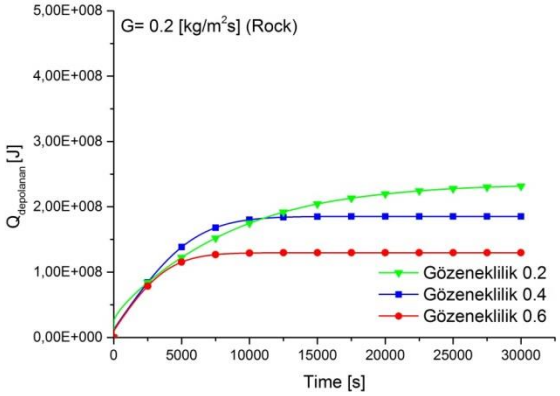


c)

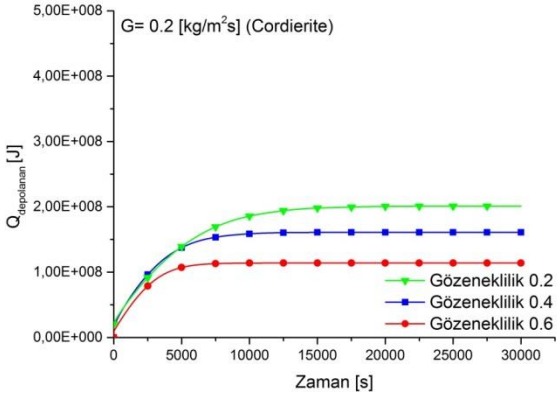
Şekil 5.1 : 0,4 kg/m^{2}s debide şarj hali için farklı depolama malzemelerinin karşılaştırılması. a) Çelik, b) Kaya (Rock) ve c) Cordierite, (Erkınacı, 2017)



a)



b)



c)

Şekil 5.2 : 0,2 kg/m^{2}s debide şarj hali için farklı depolama malzemelerinin karşılaştırılması. a) Çelik, b) Kaya (Rock) ve c) Cordierite, (Erkınacı, 2017)

Çizelge B.1 ve B.2'de çelik, cordierite ve kaya depolama malzemelerinden oluşan gözenekli yatakta farklı debi ve gözeneklilik değerlerinde depolanan enerji miktarları simülasyon zamanının farklı dilimlerinde verilmiştir. Bütün depolama malzemeleri için 6 saatlik simülasyon zamanı seçilmiştir. Çizelge B.1'den görüleceği gibi 6 saatin sonunda, gözeneklilik 0,4 için en fazla enerji çelik bilyelerden oluşan gözenekli yatakta depolanırken (468725 kJ), kaya (rock) ve cordierite bilyelerden oluşan sistemde depolanan enerji miktarları sırasıyla 185318 kJ ve 160873 kJ'dür. Debi 0,4 kg/m^2s'den 0,2 kg/m^2s'ye düşünce, Çizelge B.2'den görüleceği gibi 0,4 gözeneklikte depolanan enerji miktarları, çelik için 429017 kJ, cordierite için 160872 kJ ve kaya için 185317 kJ değerlerindedir. Tüm depolama malzemeleri için debinin değişmesi enerji depolama miktarında büyük değişikliğe yol açmamaktadır.

6. SONUÇLAR

Gözenekli bir yatakta duyulur ısıl enerji depolama, güneş enerjisi sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yüksek lisans tez çalışmasında, silindirik bir kanalda paketlenmiş çeşitli malzemelerden yapılmış bilyelerin katı fazı, havanın akışkan fazını oluşturduğu gözenekli yatakta ısıl enerji depolama sayısal olarak incelenmiştir. Kullanılan katı malzemeler, çelik, kaya ve cordierite bilyelerdir ve bu malzemeler yüksek sıcaklıkta enerji depolama malzemesi olarak kullanılmaktadır. Öncelikle çelik bilyelerden oluşan gözenekli ortamda şarj ve deşarj aşamaları, farklı debi ve gözeneklilik değerleri için incelenmiştir. Şarj hali için sonuçlar, gözenekliliğin büyük değerlerinde sistemin daha erken ısıl doygunluğa ulaştığını göstermektedir. Ancak depolanan enerji miktarı küçük gözenekli sistemde daha fazladır. Küçük gözenekliliğe sahip bir ortamda katı malzeme yani depolama malzemesi daha fazladır, bu nedenle depolama daha geç olmakta ama daha fazla enerji depolamak mümkün olmaktadır.

Sisteme sıcak havanın giriş debisi, sistemde depolanan enerji açısından büyük bir etki yaratmamaktadır. Debi değerinin artması veya azalması depolanan enerji miktarlarında ihmal edilebilir değişiklikler meydana getirmektedir. Ancak gözenekli yatak sistemine giren havanın debisinin artması taşınımla ısı transferini arttırdığı için ısıl doygunluğa ulaşılan süre daha kısa olmaktadır.

Deşarj aşamasında yani gözenekli yatakta depolanan enerjinin sistemden çekilmesi aşamasında, gözenekliliğin etkisi şarj haline benzer şekildedir. Küçük gözenekliliğe sahip olan sistemden ısının çekilmesi daha uzun süre almaktadır ve simülasyon zamanının sonunda sistemde kalan ısı miktarı daha fazla olmaktadır.

Çalışmada çeliğin yanısıra yüksek sıcaklıkta depolama olanağı veren cordierite ve kayadan oluşan bilyelerle yine ısı transferi akışkanı olarak havanın kullanıldığı iki ayrı depolama sistemi çelik ile karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Tüm ısıl depolama malzemeleri için sisteme giren havanın sıcaklığı ve gözenekli yatakta başlangıç sıcaklığı aynıdır. Debi ve gözenekliliğin etkisi beklendiği gibi tüm ısı

depolama malzemeleri için aynıdır, zira bu faktörler sistemin fiziksel yapısı ve akış yapısı ile ilgilidir, malzemenin cinsinin değişmesi sonuçları değiştirmez.

Söz konusu malzemeler içerisinde çelik en yüksek ısı kapasitesi, ısıl iletkenlik ve yoğunluğa sahip olan malzemedir. Seramik bir malzeme olan cordierite, kayaya göre daha düşük ısı kapasitesine daha yüksek ısıl iletkenliğe sahiptir. Sonuç olarak, çelik diğer iki malzemeye göre sistemde daha fazla ısıl enerji depolanmasını sağlamaktadır. Cordierite ve kaya birbirlerine yakın değerlerde enerji depolamaktadırlar ama kaya içeren sistemde bir miktar daha fazla enerji depolanabilmektedir. Ucuz olması nedeni ile de cordierite yerine kayanın ısıl depolama için kullanılması tercih edilebilir.

KAYNAKLAR

Andreozzi, A., Buonomo, B., Manca, O., Mesolella, P., Tamburrino, S. (2012). Numerical investigation on sensible thermal energy storage with porous media for high temperature solar systems. 6th European Thermal Sciences Conference (Eurotherm 2012), *Journal of Physics*: *Conference Series*, 395, (pp. 1-8). DOI:10.1088/1742-6596/395/1/012150.

Anderson, R., Bates, L., Johnson, E., Morris, J. F. (2015). Packed bed thermal energy storage: A simplified experimentally validated model. *Journal of Energy Storage*, 4, 14-23.

Andreozzi, A., Buonomo, B., Manca, O., Nardini S., Tamburrino, S. (2013). Heat transfer behaviors of thermal energy storages for high temperature solar systems. *Industrial and Technological Aplications of Transport in Porous Materials, Advanced Structured Materials 36*, 119-139. DOI: 10.1007/978-3-642-37469-2_5.

Andreozzi, A., Buonomo, B., Manca, O., Mesolella, P., Tamburrino, S. (2009). Numerical investigation of sensible thermal energy storage in high temperature solar system. Computational Methods and Experimental Measurements XIV, WIT Transactions on Modelling and Simulations, Vol 48, 461-472. DOI:10.2495/CMEM090421

Ataer, E., O. (2006). Storage of thermal energy in energy storage systems.*In Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS)*, Developed under the Auspices of the UNESCO. Retrieved April 15, 2017, from http://eolss.net/ebooks/sample%20chapters/c08/e3-14-02-00.pdf

Baytaş, A. C. (2006). Gözenekli ortamlarda taşınım olayı. *itü dergisi*, 4, 1, 3-13.

Cascetta, M., Cau, G., Puddu, P., Serra, F. (2016). A comparison between CFD simulation and experimental investigation of packed-bed thermal energy storage system. *Applied Thermal Engineering*, 98, 1263-1272.

Cascetta, M., Cau, G., Puddu, P., Serra, F. (2015). Experimental investigation of a packed bed thermal energy storage system. *33rd UIT (Italian Union of Thermo-fluid-dynamics) Heat Transfer Conference. Journal of Physics*: Conference Series, 655, (pp 1-9). 10.1088/1742-6596/655/1/012018.

Erkınacı T., Baytaş F. (2017). CFD Investigation of a Sensible Packed Bed Thermal Energy Storage System with Different Porous Materials, 2nd AIGE/IEETA International Conference and 11th AIGE 2017 Conference "Energy Conversion Management, Recovery, Saving, Storage and Renewable Systems ", June 12-13, 2017, Genoa (Italy)

Erregueragui, Z. N. B. (2016). Packed-bed Thermal Energy Storage Analysis: Quartzite and Palm-Oil Performance. *10th International Renewable Energy Storage Conference*,(pp.370-379). Germany: Düsseldorf, March 15-17.

Fernandes, D., Pitie F., Cáceres G., Baeyens J. (2012). Thermal energy storage: "How previous findings determine current research priorities". *Energy,* 39, 246-257.

Ge, Z., Li, Y., Li, D., Sun, Z., Jin, Y., Liu, C., Li, C., Leng, G., Ding, Y. (2014). Thermal energy storage: Challenges and the role of particle technology. *Particuology*, 15, 2-8.

Hahne, E. (2009). Storage of Sensible Heat. *Energy Storage System.* Retrieved April 20, 2017, from http:// eolss.net/sample-chapters/c08/e3-14-02-01.pdf

Hänchen, M., Brückner, S., Steinfeld, A. (2011). High-temperature thermal storage using a packed bed of rocks - Heat transfer analysis and experimental validation. *Applied Thermal Engineering, 31*, 1798-1806.

Huggins, A. R. (2010). *Energy Storage Fundamentals, Materials and Applications.*Standford, CA.

IRENA & IEA-ETSAP (2013). *Thermal Energy Storage Technology Brief.*

Jambhekar, V. A. (2011, Kasım 26). Forchheimer Porous-media Flow Models - Numerical Investigation and Comparison with Experimental Data (Master's Thesis). Retrieved from http://hydrosys.uni stuttgart.de/intitut/hydroys/publikationen/paper/2012JambhekarMaster.pdf

Karakan A., Yönetken., A. (2017). Rüzgar ve Güneş Enerji Santrallerinde Enerji Depolama Yöntemleri. Erişim 28 Nisan 2017. http://3eelectrotech.com.tr/arsiv/yazi/130-ruzgar-ve-gunes-enerji-sarntrallerinde-enerji-depolama-yontemleri.

Khare, S., Dell'Amico, M., Knight, C., McGarry, S. (2013). Selection of materials for high temperature sensible energy storage. *Solar Energy Materials & Solar Cells,* 115, 114-122.

Kocoman, B. (2013). Akıllı Şebekeler ve Mikro Şebekelerde Enerji Depolama Teknolojileri. *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 2, (1), 119-127.

Kozak, M. Ş. K. (2012). Enerji Depolama Yöntemleri. *SDU International Journal of Technologic Sciences*, Volume 4, 17-29.

Lefebvre, D., & Tezel, F. H. (2017). A review of energy storage technologies with a focus on adsorption thermal energy storage processes for heating applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 67, 116-125.

Livatyalı, H. D. B. (2011). Güneş'ten Elektrik Üretmenin Termal Yolu: Yoğunlaştırılmış Güneş Enerjisi. *Mühendis ve Makina*, 53,16-20.

Renewable Energy Policy Network for the 21st. (2016). *Renewables Global Status Report.* Paris: REN21.

Socaciu, L. G. (2012). Thermal Energy Storage: an Overvıew. *Applied Mathematics and Mechanics,* Volume 55, 785-794.

Tabak, C., Dinçer, H., Karayazı, K., Arslan, E., Yıldız, H. M. (2009). Yoğunlaştırıcı Güneş Enerjisi Sistemleri İle Elektrik Enerjisi Üretimi. *III.Enerji Verimliliği ve Kalitesi Sempozyomu Bildirileri*. Türkiye: Kocaeli

Turan, D., Yönetken A. (2016). Enerji Depolama Sistemlerinin Araştırılması ve Analizi. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 16, 113-121.

Zanganeh, G., Pedretti, A., Haselbacher, A., Steinfeld, A. (2015). Design of packed bed thermal energy storage systems for high-temperature industrial process heat. *Applied Energy*, 137, 812–822.

Zografos, A. I., Martin, W.A., Sunderland, J. E. (1987). Equations of properties as a function of temperature for seven fluids, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 61, no. 2, pp. 177-187, 1987.

Url-1 <http://www.elektrikport.com/teknik-kutuphane/ileri-enerji-depolama-teknolojileri/4293#ad-image-0>, erişim tarihi 03.05.2017

Url-2 < https://www.slideshare.net/asertseminar/flywheel-energy-storage-system >, erişim tarihi 22.04.2017

Url-3 < http://www.bouteloup.pierre.free.fr/lica/phythe/don/air/air_k_plot.pdf >, erişim tarihi 10.04.2017

Url-4 < http://www.eie.gov.tr/teknoloji/CSP_gun_enj_sant.aspx >, erişim tarihi 10.04.2017

Url-5 < http://www.ninova.itu.edu.tr/tr/dersler/ucak-uzay-fakultesi/965/uck-421/ekkaynaklar?g96162>, erişim tarihi 03.04.2017

EKLER

EK A: ANSYS Fluent UDF aracılığıyla katı matris ve akışkan arasındaki ısı taşınım katsayısı kodları.
EKB: 0,2 kg/m^{2}s ve 0,4 kg/m^{2}s debide depolanan ısı miktarları açısından çelik, kaya (rock) ve cordierite depolama malzemelerinin karşılaştırılması.

EK A: ANSYS Fluent UDF aracılığıyla katı matris ve akışkan arasındaki ısı taşınım katsayısı kodları.

```
#include "udf.h"

DEFINE_PROFILE(htf_coef_porosity_06,t,i)
{
cell_t c;
real Nu,Re,Pr;
real dens, visc; /*Fluid*/
real cond, cp; /* Fluid*/
real d_p;
real por;/*Porosity of the bed*/
d_p=0.034721253;
por=0.6;

begin_c_loop(c,t)
{
dens = C_R(c,t); /*Density of fluid*/
visc = C_MU_L(c,t); /*Viscosity fluid*/
cond = C_K_L(c,t); /*Conductivity fluid*/
cp = C_CP(c,t); /*Specific heat fluid*/
Re = ND_MAG(C_U(c,t),C_V(c,t),C_W(c,t))*d_p*dens*por/visc ;
/*Reynolds number has been calculated based on pore velocity*/
Pr = cp*visc/cond ;
Nu = 2.+ 1.1 * pow(Re,0.6) * pow(Pr,1./3.);
F_PROFILE(c,t,i) = Nu*cond/d_p ;
}
end_c_loop(c,t)
}
```

Gözeneklilik 0.6 değeri için katı matris ve akışkan arasındaki ısı taşınım katsayısı

Katı matris ve akışkan arasında gerçekleşen ısı transferi modellemek için kullanılan UDF yukarıda verilmiştir. 6 gözeneklilik değeri için 6 UDF kullanılmıştır. Farklı gözeneklilik değerleri için değişen tek değer koddaki gözeneklilik değeridir. Bu yüzden birtanesi eklenmiştir.

EK B: 0,2 kg/m^{2}s ve 0,4 kg/m^{2}s debide depolanan ısı miktarları açısından çelik, kaya (rock) ve cordierite depolama malzemelerinin karşılaştırılması.

Çizelge B.1: 0,4 kg/m^{2}s debide depolanan ısı miktarları açısından çelik, kaya (rock) ve cordierite depolama malzemelerinin karşılaştırılması.

	$Q_{depolanan}$	[kJ]	3600 s	$Q_{depolanan}$	[kJ]	7200 s	$Q_{depolanan}$	[kJ]	10800 s
Gözeneklilik	Çelik	Kaya (Rock)	Cordierite	Çelik	Kaya (Rock)	Cordierite	Çelik	Kaya (Rock)	Cordierite
0.20	286096	170160	159895	389150	219625	194198	436787	231917	199981
0.40	312429	177154	148196	424005	185304	160507	431399	185318	160873
0.60	283063	123678	111560	333127	129575	113978	339076	129680	114015

Çizelge B.1 (devam): 0,4 kg/m^{2}s debide depolanan ısı miktarları açısından çelik, kaya (rock) ve cordierite depolama malzemelerinin karşılaştırılması.

	$Q_{depolanan}$	[kJ]	14400 s	$Q_{depolanan}$	[kJ]	18000 s	$Q_{depolanan}$	[kJ]	21600 s
Gözeneklilik	Çelik	Kaya (Rock)	Cordierite	Çelik	Kaya (Rock)	Cordierite	Çelik	Kaya (Rock)	Cordierite
0.20	457037	234318	200927	465640	234783	200974	468725	234821	200976
0.40	431536	185318	160873	431544	185318	160873	431545	185318	160873
0.60	340106	129684	114015	340303	129684	114015	340339	129684	114015

Çizelge B.2: 0,2 kg/m^{2}s debide depolanan ısı miktarları açısından çelik, kaya (rock) ve cordierite depolama malzemelerinin karşılaştırılması.

	$Q_{depolanan}$	[kJ]	3600 s	$Q_{depolanan}$	[kJ]	7200 s	$Q_{depolanan}$	[kJ]	10800 s
Gözeneklilik	Çelik	Kaya (Rock)	Cordierite	Çelik	Kaya (Rock)	Cordierite	Çelik	Kaya (Rock)	Cordierite
0.20	203934	102162	114692	297634	148905	166287	361730	180821	188937
0.40	206337	110876	118370	316687	165566	152287	377677	181963	159530
0.60	203340	98986	95686	291448	126139	112767	324681	129406	113907

Çizelge B.2 (devam): 0.2 kg/m^{2}s debide depolanan ısı miktarları açısından çelik, kaya (rock) ve cordierite depolama malzemelerinin karşılaştırılması.

	$Q_{depolanan}$	[kJ]	14400 s	$Q_{depolanan}$	[kJ]	18000 s	$Q_{depolanan}$	[kJ]	21600 s
Gözeneklilik	Çelik	Kaya (Rock)	Cordierite	Çelik	Kaya (Rock)	Cordierite	Çelik	Kaya (Rock)	Cordierite
0.20	403625	201658	197473	430017	214774	199836	446410	222916	200802
0.40	408134	184889	160742	421658	185295	160861	429017	185317	160872
0.60	334772	129649	114005	338076	129681	114015	339436	129684	114016

ÖZGEÇMİŞ



AD-SOYAD : Tayfun Erkınacı

DOĞUM TARİHİ VE YERİ : 23.01.1991 Kahramanmaraş

E-POSTA : tayfunn@live.com

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans :** 2014, Marmara Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- İdealab A.Ş.'nde araştırma ve geliştirme mühendisi olarak çalışmalarına devam etmektedir.

YÜKSEK LİSANS TEZİNDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- Erkınacı T., Baytaş F., 2017. CFD Investigation of a Sensible Packed Bed Thermal Energy Storage System with Different Porous Materials, 2nd AIGE/IIETA International Conference and 11th AIGE 2017 Conference on "Energy Conversion, Management, Recovery, Saving, Storage and Renewableystems", June 12 – 13, 2017, Genoa (Italy). (Tam metin üzerinden sözlü sunum için kabul edilmiştir).