İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ ENERJİ ENSTİTÜSÜ

KONSANTRE GÜNEŞ ENERJİSİ SİSTEMLERİ İÇİN TERMOKLİN TERMAL ENERJİ DEPOLAMA SİSTEM ANALİZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Asım Ongun HENGİRMEN

Enerji Bilim ve Teknoloji Anabilim Dalı

Enerji Bilim ve Teknoloji Programı

HAZİRAN 2018

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ ENERJİ ENSTİTÜSÜ

KONSANTRE GÜNEŞ ENERJİSİ SİSTEMLERİ İÇİN TERMOKLİN TERMAL ENERJİ DEPOLAMA SİSTEM ANALİZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Asım Ongun HENGİRMEN
(301151002)

Enerji Bilim ve Teknoloji Anabilim Dalı

Enerji Bilim ve Teknoloji Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Üner ÇOLAK

HAZİRAN 2018

İTÜ, Enerji Enstitüsü'nün 301151002 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Asım Ongun HENGİRMEN, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "KONSANTRE GÜNEŞ ENERJİSİ SİSTEMLERİ İÇİN TERMOKLİN TERMAL ENERJİ DEPOLAMA SİSTEM ANALİZİ" başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı :	**Prof. Dr. Üner ÇOLAK** İstanbul Teknik Üniversitesi	.....
Jüri Üyeleri :	**Dr. Öğr. Üyesi Coşkun FIRAT** İstanbul Teknik Üniversitesi	.....
	Dr. Öğr. Üyesi Barış YILMAZ Marmara Üniversitesi	.....

Teslim Tarihi : 04 Mayıs 2018
Savunma Tarihi : 08 Haziran 2018

Her konuda her zaman destek olan aileme,

ÖNSÖZ

Çalışmalarım sırasında yardımlarını esirgemeyen, değerli vaktini ayıran saygıdeğer tez danışmanım Prof. Dr. Üner ÇOLAK'a teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Beni çalışmalarımda cesaretlendiren, motivasyonumu yüksek tutmamı sağlayan ve tecrübelerini benimle paylaşarak doğru kararlar almamda etkin rol oynayan, her konudaki sabır ve anlayışlarından, hiçbir zaman esirgemedikleri maddi manevi desteklerinden dolayı annem Hülya HENGİRMEN'e ve babam Mehmet Oğuz HENGİRMEN'e saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak, bu tez çalışmasının ortaya çıkmasında bilgi ve tecrübelerini benden esirgemeyen Sayın Prof. Dr. Mazhar ÜNSAL'a, Tevfik Eren HALAÇ'a ve İsmail Sercan İNCE'ye teşekkürlerimi sunarım.

Mayıs 2018

Asım Ongun HENGİRMEN
Makina Mühendisi

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ…….....vii
İÇİNDEKİLER ix
KISALTMALAR xi
SEMBOLLER xiii
ÇİZELGE LİSTESİ.....xv
ŞEKİL LİSTESİ.....xvii
ÖZET…….....xix
SUMMARY… xxi
1. GİRİŞ……. 1
2. KONSANTRE GÜNEŞ KOLEKTÖRÜ SİSTEMLERİ 3
2.1 Kule Sistemler (Güneş Kulesi).....4
2.2 Parabolik Oluk Sistemler 5
2.3 Doğrusal Fresnel Sistemler 6
2.4 Parabolik Çanak Sistemler 6
3. ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMLERİ.....9
3.1 Termal Enerji Depolama (TED).....10
3.1.1 Duyulur ısı depolama.....11
3.1.2 Gizli ısı depolama 11
3.1.3 Termokimyasal enerji depolama.....12
3.2 Ergimiş Tuz Depolama Sistemleri 13
3.2.1 Çift tanklı ergimiş tuz enerji depolama sistemleri 14
3.2.2 Tek tanklı ergimiş tuz enerji depolama sistemleri 14
3.3 KGE Santralleri İçin Enerji Depolama Sistemleri 17
4. KULE TİPİ KGE İÇİN TERMOKLİN TED SİSTEMİ 21
4.1 Tank Özellikleri ve Tank İçerisindeki Boşluk Oranının Belirlenmesi.....25
4.2 Tank İçerisinde Depolanabilecek Enerji Hesabı 26
4.3 İki Fazlı Tank İçin Boyutsuz Sayılar Ve Denklemler.....27
4.4 Şarj Döngüsünün Çözümü 31
4.5 Deşarj Döngüsünün Çözümü 33
4.6 Çözüm Yöntemi ve Uygulaması 34
4.7 Çözüm Sonucu Elde Edilen Grafikler.....35
4.8 Parametre Değişiklikleri ve Depolama Sistemine Etkileri.....36
4.8.1 Boşluk oranı (Ɛ) 37
4.8.2 Farklı akışkanların kullanılması.....38
4.8.3 Farklı duyulur ısı depolama katılarının kullanılması 39
5. SONUÇ VE DEĞERLENDİRMELER.....41
KAYNAKLAR 43
ÖZGEÇMİŞ….....47

KISALTMALAR

EN **:** Erime Noktası
FDM **:** Faz Değiştiren Malzeme
KGE **:** Konsantre Güneş Enerjisi
TED **:** Termal Enerji Depolama

SEMBOLLER

A	**:** Taban alanı (m^2)
c_p	**:** Özgül ısı kapasitesi (J/kgK**)**
D	**:** Tank çapı (m)
G	**:** Kütlesel hız (kg/m^2s)
h	**:** Konveksiyonel ısı transfer katsayısı (W/m^2K)
h_v	**:** Hacimsel ısı transfer katsayısı (W/m^3C)
i	**:** Konum
j	**:** Zaman
k	**:** Isı iletim katsayısı (W/mK)
L	**:** Tank uzunluğu (m)
$\dot{m}$	**:** Kütlesel debi (kg/s)
M	**:** Node sayısı (Tankı bölgelere ayırma)
N	**:** İncelenen zaman aralığı (sn)
Nu	**:** Nusselt sayısı
NTU	**:** Boyutsuz transfer birimi sayısı
P_1	**:** Boyutsuz şarj süresi
P_2	**:** Boyutsuz deşarj süresi
Pr	**:** Prandl sayısı
R	**:** Hacimsel ısı kapasitesi oranı
Re	**:** Reynold sayısı
T	**:** Sıcaklık(K)
TH	**:** Akışkanın tank içerisindeki en yüksek sıcaklığı (K)
TL	**:** Akışkanın tank içerisindeki en düşük sıcaklığı (K)
μ	**:** Viskozite (kg/m*s)
α	**:** Şekil Faktörü
ρ	**:** Yoğunluk (kg/m^3)
θ	**:** Boyutsuz sıcaklık
ε	**:** Porozivite, Boşluk Oranı
Δz	**:** Konum için birim aralık
$\Delta\tau 1$	**:** Şarj için birim aralık
$\Delta\tau 2$	**:** Deşarj için birim aralık

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 3.1: Bazı duyulur ısı depolama malzemelerinin fiziksel özellikleri 12
Çizelge 4.1: Kullanılan malzemelerin termal özellikleri 22
Çizelge 4.2: Çeşitli malzemeler için boşluk oranı değerleri 26
Çizelge 4.3: Karşılaştırılan malzemelerin termal özellikleri 38
Çizelge 4.4: Karşılaştırılan malzemelerin termal özellikleri 40

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1: Kule tipi konsantre güneş enerjisi santrali 4
Şekil 2.2: Parabolik oluk tipindeki Andasol Enerji Santrali, İspanya 5
Şekil 2.3: Lineer Fresnel tipi KGE 6
Şekil 2.4: Maricopa santralindeki parabolik çanak tipi kollektör 7
Şekil 3.1: Enerji depolama çeşitleri 9
Şekil 3.2: Çift tanklı direkt ve dolaylı enerji depolama sisteminin şematik gösterimi 14
Şekil 3.3: Çift tanklı direkt termal depolama sistemi 15
Şekil 3.4: Tek tanklı direkt termal depolama sistemi 15
Şekil 3.5: Yüzer izolasyon bölmeli termal enerji depolama sistemi 16
Şekil 3.6: Farklı tabakalaşmaya sahip ama aynı miktarda enerji depolanmış özdeş . 17
Şekil 3.7: Tamamen karıştırılmış ve karıştırılmayıp tabakalaşmış durumlarda güneş enerjisinden yararlanma oranı - akış miktarı grafiği 17
Şekil 4.1: Farklı tuzlar için termoklin kalınlıkları 23
Şekil 4.2: Farklı dolgu malzemeleri için termoklin kalınlıkları 23
Şekil 4.3: Çeşitli ısı depolama malzemeleri için sıcaklık-zaman grafiği 24
Şekil 4.4: Çeşitli ısı depolama malzemeleri için sıcaklık-konum grafiği 24
Şekil 4.5: Tek tanklı iki fazlı termoklin enerji depolama tankının şarj ve deşarj sırasında akış yönleri 25
Şekil 4.6: Şarj döngüsü için tankın, zamana ve konuma bağlı olarak noktalara ayrılması 31
Şekil 4.7: Deşarj döngüsü için tankın, zamana ve konuma bağlı olarak noktalara ayrılması 34
Şekil 4.8: Karakteristik yöntemden oluşan çözüm matrisinin diyagramı 35
Şekil 4.9: Şarj döngüsü içerisindeki termoklin konumunu gözlemleyebilmek için belirli zamanlardaki sıcaklık konum grafiği 36
Şekil 4.10: Deşarj döngüsünde tank içerisindeki termoklin konumunu gözlemleyebilmek için belirli zamanlardaki sıcaklık konum grafiği 37
Şekil 4.11: Farklı boşluk oranlarında termoklin davaranışı 38
Şekil 4.12: Farklı akışkanların aynı süre ve şartlarda termoklin bölgelerinin konumları. 39
Şekil 4.13: Farklı katıların aynı süre ve şartlarda termoklin konumları. 40

KONSANTRE GÜNEŞ ENERJİSİ SİSTEMLERİ İÇİN TERMOKLİN TERMAL ENERJİ DEPOLAMA SİSTEM ANALİZİ

ÖZET

Konsantre güneş enerjisi (KGE) sistemleri yenilenebilir enerji kaynakları arasında gelecek vaadeden çözümler arasında gösterilen ve yenilikçi teknolojileri bünyesinde barındıran sistemlerdir. Günümüzde güneşten yararlanmada fotovoltaik sistemler kadar yaygın ve uygun maliyetli olmasalar da dünyanın farklı coğrafyalarında bir çok farklı uygulama mevcuttur. Dünyada güncel olarak yapılan akademik projeler incelendiğinde, desteklenenen Ar-Ge konularına bakıldığında, yeni geliştirilen ve yapım aşamasındaki konsantre güneş enerjisi projeleri de göz önüne alındığında, bu teknolojilerin önümüzdeki yıllarda daha da yaygınlaşacağı ve potansiyelini yansıtmaya başlayacağı aşikardır. Bu çalışma kapsamında ele alınan konsantre güneş enerjisi teknolojilerinden kule tipi konsantre güneş enerjisi teknolojisi bir çok farklı avantajıyla diğer KGE teknolojilerine göre bir adım daha öne çıkmaktadır.

Enerjinin depolanabilmesi yine günümüzün güncel problemlerinden bir tanesidir. Tüm dünyanın yoğun olarak üzerinde çalıştığı ve mevcut teknolojileri daha da geliştirmeye çalıştığı enerji depolama teknolojileri iki ana başlığa ayrılmaktadır. Bu çalışma da yaygın olarak bilinen akü teknolojileri değil, diğer depolama yöntemi olan ve büyük kapasitelerde depolamaya imkan tanıyan termal enerji depolama sistemleri üzerinde durulmuştur. Termal enerji depolama (TED) teknolojileri hakkında gerekli bilgiler çalışmanın ilgili kısmında verilmiştir. Termal enerji depolama sistemleri ile büyük kapasitelerde enerji depolanabilmesi hem güneş enerjisi sistemlerinin sadece güneşin olduğu zamanlara bağlı kalmadan gün boyu üretim yapılabilmesine olanak sağlamakta, hem de gün içerisinde bulutlanma gibi üretimi aksatabilecek kısa süreli operasyonel aksamaları ortadan kaldırmaktadır. Ayrıca bu iyileştirmeler sayesinde sistem ömrü uzamakta ve üretilen elektriğin kalitesi de artmaktadır.

Gelecek vaadeden bu iki yeni ve güncel teknolojinin tanıtılarak ele alındığı ve aynı sistem içerisinde birleştirildiği bu çalışmada, mevcut bir kule tipi konsantre güneş enerjisi santraline kurulabilecek tek tanklı, iki fazlı (akışkan malzeme ve dolgu malzemesi) bir termal depolama sistemi göz önüne alınmıştır. Çalışmanın ana kısmı olan 4. Kısımda bir boyutlu (1D) termal enerji depolama sistemi, Schumann denklemlerinin boyutsuz sayılar yardımıyla ayrıklaştırılması yapılmış ve geliştirilen modelin MATLAB programı yardımıyla nümerik sonuçları elde edilmiştir. Depolama sistemi çeşitli parametre değişiklikleri yapılarak incelenmiş ve sonuçlar değerlendirmeler ve sonuçlar başlığı altında yorumlanmıştır.

THERMOCLINE THERMAL ENERGY STORAGE SYSTEM ANALYSIS FOR CONCENTRATED SOLAR POWER SYSTEMS

SUMMARY

Concentrated solar energy systems are shown as one of the promising technologies among the renewable energy systems. Even though concentrated systems are not common and as cost efficient as photovoltaic systems; there are many different applications of this system all over the world. When the current academic projects and supported R&D topics around the world are reviewed, and also considering the newly developed concentrated solar energy systems, it is in evidence that the applications of that kind of systems will become more widespread.

In this paper few CSP Technologies introducing shortly in the second part; Parabolic trough, parabolic dish, fresnel and tower. Tower-type concentrated solar system steps forward among the all types with its several advantages. Within the scope of this thesis the descripton of tower-type solar systems are given and then the main topic, which is thermal energy storage method is explained in detail.

Energy storage, which is one of today's biggest issues and attempted to develop by whole world, is divided into two. The first one is battery technologies that is commonly known.The other one, also the main subject of this thesis is thermal energy storage. Thermal energy storage system enables to store the energy in large capacities. In this way, it would be possible to produce electrical energy not only in daylight but all day long. And it also eliminate the short-term barriers of producing energy such as clouding so the life-span of system would be increased and the produced energy would be more quality.

In the scope of this thesis, these two promising current and new technologies are introduced individually and they are combined in the same system. A thermal storage system with one tank and two phase that could be installed in an existing tower-type concentrated solar power plant is considered and the Schumann equations are discretized by method of dimensionless numbers to analyse temperature distribution unidimentional in the tank. Last of all, the equations are solved, and the graphs are obtained by MATLAB to compare results. Then the results are interpreted.

With this thesis, it is aimed to develop a model that provides quick and sufficient accuracy results with a simplified approach that can be utilized in the design phase of single-tank thermocline energy storage systems. Literature studies in this direction have shown that one-dimensional (1D) models can be solved more easily than two (2D) and three-dimensional (3D) models. Fast and high accuracy solutions are obtained in previous studies.

The options for fluid and solid storage materials to be used in the storage system have been investigated in detail and the materials used in existing similar systems and the new materials which are that have not yet been used in the systems but are promising for the future applications are also examined within the scope of the study.

As a result of the evaluations made, it was decided that the system should be sensible heat energy storage system. It is planned to use solid storage material as well as heat transfer fluid in order to reduce system cost. In this context, molten salt (HITEC) was selected as a fluid and Cofalit was selected as a storage filler.

When determining the model, the main purpose is to observe the temperature distribution in the tank and determine the time required for charge-discharge of the tank. After these times can be determined, the plant will be operate more optimally. Another study in this thesis is calculation of tank storage capacity. Fluid phase and solid phase materials calculated separately than collected together for determine to the designed tank store capacity. Whereafter the calculation of capacity of the storage system, it was determined in related part of this study.

The mathematical equations studied on the solution within the thesis are the equations developed by Schumann, in which both the solid phase and the fluid phase can be calculated. The simultaneous solution of these two equations is quite difficult. Due to this difficulty, the equations have been tried to be reduced to a single differential equation, which is dependent on the dimensionless time expression. The unique dimensionless numbers determined in this study. While solving of the equations were reduced by the differential equations, the dimensionless transfer unit number (NTU) method used by John A. Duffie which is already explained in his book "Solar Engineering of Thermal Processes" was used.

Once the equations are discretized, the MATLAB program is used to solve the charge and discharge cycles. The equations obtained in the 4.4 Charge Cycle solution and 4.5 Decharge Cycle solution titles are added to the main code when variables are defined after the program has been defined. The initial conditions and the boundary conditions are also included in the same program. By running the program, the temperature time distribution graphs for the charge cylcle for the tank (Figure 4.9) and temperature time distribution graphs for the discharge cycle (Figure 4.10) have been successfully obtained. According to these graphs, the single tank thermocline energy storage system designed for the study is charging in approximately 8 hours; this energy stored in the same way can be used for approximately 8 hours as all losses are neglected.

Another part of this study is observing and interpreting the effects of parameter changes on the storage system. In this context, different heat transfer fluids have been compared and determine which fluid will be more advantageous for the system. It has been observed that liquid sodium is the most advantageous fluid among the comparative fluids. Another parameter for comparison is storage materials, which is to be observed for the storage system. Within this scope, different storage materials with potential for use have been identified and compared. Third, the effect of the solid-liquid ratio in the tank on the performance of the storage system was tried to be understood. This system is needed in order to determine optimum working conditions while system design is being done. As a result of comparison, it was observed that the thermocline region becomes thinner as the molten salt ratio increases in the storage system consisting of molten salt - cofalite. This result will be different when different thermal properties are used.

This thesis was prepared with the aim of becoming a basis for the future studies. The designed model is a model with a practical approach that yields fast and has a limited error margin. In future works, the number of dimensions of the model can be increased, neglected heat exchanges (inside the tank and its surroundings) and other losses can

be taken into consideration. In this study, the variables determined in the acceptance can be included in the model by making detailed calculations.

1. GİRİŞ

Enerji, stratejik öneminden dolayı uluslarası ilişkileri belirleyen en önemli konuların başında gelmektedir. Küreselleşmenin son yüzyılda hız kazanmasıyla kıtaların, ülkelerin arasındaki mesafeler ve diğer engeller zamanla ortadan kalkmış, bu engellerin yerini ülkeler arası kurulan ilişki köprüleri almıştır. Kurulan bu köprülerden bir tanesi de enerji köprüsü olmuş ve bu önemli köprü politikalara, ticarete, bilime ve sanayiye hep yön vermiştir.

1950'lerin sonlarına doğru sanayileşmenin hız kazanması, binek araçların ucuzlayarak çoğu insan tarafından kullanılmaya başlaması, teknolojik gelişmelerin günlük hayata etki etmesi gibi gelişmeler ile dünyanın enerji tüketimi o günden günümüze kadar katlanarak artagelmiştir. Hatta ülkelerin enerji tüketimi, gelişmişlik seviyeleri kıyaslanırken ana faktörlerden birisi haline gelmiştir.

Bulunduğumuz yüzyıl içerisinde internet, bilgisayar ve elektronik sektörlerindeki teknolojik gelişmelerin etkisi ile üretim ve tüketim dünyanın hiçbir döneminde olmadığı kadar artmıştır. Gelişmiş ülkeler arasında kıyasıya bir üretim ekonomisi kurulmuş ve dünyanın bir ucunda üretilen ürünler dünyanın diğer ucuna rahatlıkla pazarlanmaya başlamıştır. Mevcut yeni düzende ihtiyaç duyulan enerji miktarı her gün artmaya devam etmektedir.

Yukarıda bahsedilen nedenlerden dolayı enerji tüketimin hızla artması ile artan enerji ihtiyacını karşılamak için santraller kurulmaya başlanmış ancak 2000'li yıllara kadar olan mevcut yaygın teknolojiler fosil yakıtlı santraller ve hidroelektrik santraller üzerine olduğu için ağırlıkla bu tip santraller inşa edilmiştir. Sanayi tesislerininden ve enerji santrallerinden çıkan ve atmosfere verilen gazlar zamanla doğal dengeyi bozmaya başlamış ve 1950'lerden sonra özellikle de 1970'li yıllarda toplantı ve konferanslarda küresel ısınma adıyla gündeme getirilmeye başlanmıştır. Bu toplantılardan dünya çapında düzenlenen ilki Dünya Meteoroloji Örgütü (WMO)'nün düzenlediği Dünya İklim Konferansı olmuştur. 1994 yılında yürürlüğe giren BM İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi atmosferdeki sera gazı birikimlerini, iklim sistemi

üzerindeki tehlikeli insan kaynaklı etkiyi önleyecek bir düzeyde durdurmayı hedefleyerek imzalanmıştır. Bu toplantıları taraf olan ülkelerin sera gazı salınımlarını azaltma zorunluluğu olan Kyoto protokolü takip etmiştir. Kyoto protokolü 1997 yılında kabul edilmiş ve 2005 yılında yürürlüğe girmiştir. Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi kapsamında 2016 yılında yürürlüğe giren Paris İklim Anlaşması, 195 üye ülkenin imzasıyla dünya tarihinin kabul görmüş en geniş anlaşmasıdır [1].

Fosil yakıtların yanması sonucu ortaya çıkan CO_2 gazı küresel ısınmaya neden olan atmosferdeki gazlardan bir tanesidir. CO_2 gazının yoğunluğu sanayi devrimi öncesi ortalama milyonda 280 parça iken, bu oran günümüzde 400 ppm civarlarında seyretmektedir. 400 ppm, CO_2 seviyesinin tehlikeli boyutlara ulaştığını gösteren temsili bir değer olarak kabul edilmektedir. 2018 yılının Nisan ayında Hawaii'deki Mauna Loa gözlemevinden alınan veriye göre bu değer 410.31 ppm olarak kaydedilmiştir [2]. Bu oranın 400ppm'in üzerinde olması, yaşanabilir bir dünya için bir şeyler yapılması gerektiğinin en büyük göstergesidir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı bu emisyonu azaltabilecek yollardan bir tanesidir.

Tüm bu yaşanan gelişmelerin ardından oluşmaya başlayan bilinç, teknolojinin de günden güne gelişmesiyle yenilenebilir enerji sistemleri üzerine yapılan çalışmaları hızlandırmıştır. Hızla yaygınlaşan hidroelektrik, rüzgar ,güneş gibi yenilenebilir enerji kaynakları, 2016 yılı sonunda dünya genelinde 800 GW kurulu güce yaklaşmış ve 2022 yılında da bu üç kaynağa dayalı kurulu gücün yaklaşık 1000 GW mertebelerine ulaşması hedeflenmektedir [3]. Yenilenebilir enerji diyince akla gelen bu üç kaynağın yanı sıra biyokütle enerjisi ve jeotermal enerji de belirli coğrafyalarda yaygın olarak kullanılmaktadır.

2. KONSANTRE GÜNEŞ KOLEKTÖRÜ SİSTEMLERİ

Güneş enerjisinden yararlanma dendiğinde genellikle akıllara fotovoltaik paneller gelmektedir. Fotovoltaik teknolojisi, yüzeye gelen güneş ışığını doğrudan elektriğe çeviren ve silisyum gibi yarı iletken maddelerin kullanıldığı sistemlerdir. Güneşten bir diğer yararlanma yöntemi de termal yöntemlerdir. Güneş ışınımı bakımından ülkemiz dünyada önemli bir jeopolitik konuma sahiptir. Özellikle güney ve güneydoğu bölgeleri güneş kollektörleriyle su ısıtarak, güneşten termal olarak yaygın bir şekilde yararlanmaktadır. Güneşten termal olarak yararlanmanın bir diğer yöntemi de yoğunlaştırılmış güneş enerjisi sistemleri vasıtasıyla güneşten gelen ışınları belirli bir hedefe (noktasal/çizgisel ya da alansal) odaklamak ve termal ısıyı yoğunlaştırmaktır. Konsantre güneş enerjisi sistemlerinde ortak olarak yansıtıcı aynalar (ya da lensler) ve bir veya birden çok eksende güneş takip sistemleri bulunur. Bu sistemlerde kullanılabilecek akışkanlar termal yağlar, ergimiş tuzlar gibi özel akışkanlar olabileceği gibi istenilen basınç ve sıcaklığa bağlı olarak su da kullanılabilmektedir. Güneşten gelen ve yansıtıcı aynalardan yansıyarak hedef noktasına ulaşan güneş ışınları enerjilerini sistem akışkanına aktarırlar. Sistemlerin amacı genellikle direkt ya da dolaylı olarak buhar üretimi gerçekleştirmektir. Buhar, endüstrinin ham maddesidir ve bir çok proseste buhara ihtiyaç duyulmaktadır. Ayrıca elde edilen buhardan buhar türbini aracılığıyla elektrik üretiminde de yararlanılabilmektedir.

Güneş ışınları dünyaya her zaman ulaşsa da dünyanın kendi ekseni etrafında yaptığı dönüş hareketinden dolayı belirli bir bölgesi bu ışınları alarak gündüzü yaşarken, belirli bir bölgesi bu ışınları alamayarak geceyi yaşar. Yani güneş enerjisi için gün boyu değişkenlik gösteren ve zamana bağlı bir enerji kaynağıdır diyebiliriz. Eğer güneş enerjisi dünya enerji ihtiyacının önemli bir kısmını karşılayacaksa, bu enerjinin depolanabilmesi gerekmektedir. Konsantre güneş enerjisi sitemleri yenilenebilir enerji kaynakları arasında yüksek potansiyele sahip ve gelecek vaadeden teknolojilerin başında gelmektedir. Bu sistemlere enerjinin ısı olarak depolandığı depolama sistemleri entegre edilebilmesi, sürekli bir şekilde elektrik üretimini mümkün kılmaktadır. Konsantre güneş enerjisi sistemlerinden yaygın olarak kullanılan dört

tanesi; parabolik oluk kollektörler, doğrusal fresnel yansıtıcıları, güneş kulesi (merkezi alıcılı sistemler) ve parabolik çanak teknolojileridir.

2.1 Kule Sistemler (Güneş Kulesi)

Kule tipi konsantre güneş enerjisi (KGE) santrallerinin temel bileşenleri; sahaya belirli bir matematiksel model hesaplaması sonucu yerleştirilmiş heliostat adı verilen geniş yüzeyli aynalar, bu aynaları anlık yüksek hassasiyetli kontrol eden yazılımlara sahip takip sistemi ve bir kule üzerine konumlandırılan güneş alıcısıdır. Ayrıca sistemin kurulma amacına bağlı olarak ısı değiştiricisi, degazör, sirkülasyon pompaları,borular, izolasyon malzemeleri, saf su hazırlama ünitesi ve buhar türbini de bulunabilir. Heliostatlar gün boyu güneşi takip ederek güneşten gelen ışınları, sistemin odak noktası olan kule üzerindeki alıcıya yansıtırlar. Güneşten gelen ve çeşitli kayıplara (gölgeleme kaybı, bloklama kaybı, optik kayıplar, kosinüs kayıpları vb.) uğrayan ışınlar kule üzerindeki güneş alıcısında enerjisini alıcı içerisinde dolaşan akışkana transfer ederler. Kule teknolojisinin güneşi yoğunlatırma oranı yaklaşık olarak 1000 kattır ve bu sistemler 1000 °C kadar sıcaklıklarda çalışabilir [4]. Şekil 2.1'de Greenway CSP şirketine ait Türkiye'nin Mersin ilindeki kule tipi KGE santrali gösterilmektedir. Bu santral 510 adet heliostata, 50 metre yükseliğinde bir kuleye ve 4 Mwth kurulu güce sahiptir. Mersin santrali Türkiye'deki tek kule tipi santraldir [5].



Şekil 2.1: Kule tipi konsantre güneş enerjisi santrali [5].

2.2 Parabolik Oluk Sistemler

Parabolik oluk tipi, en yaygın KGE teknolojisidir. Parabolik oluklu sistemler geometri olarak parabol şeklinde hazırlanan reflektör ayna sistemi ve bu parabolün odak noktası boyunca yerleştirilen boru sisteminden oluşur. Sistem tek eksenli olarak güneşi kuzeyden güneye doğru hareket ederek takip eder. Boru sistemi, ışınları daha iyi absorbe edebilmesi için koyu renkli seçilir. Sistemde akışkan olarak genellikle termal yağlar kullanılır.

Sistem, güneşten gelen ışınların parabolün odak çizgisindeki borunun içerisinden geçirilen termal yağı ısıtması prensibiyle çalışır. 400-500°C'lere kadar ısınabilen akışkan termal yağ, ısı değiştiricileri vasıtasıyla buhar eldesinde kullanılır [6]. Oluşan buhar daha sonra ihtiyaca göre endüstriyel bir proseste veya buhar türbini vasıtasıyla elektrik üretiminde kullanılabilir.

Bu teknolojiyi kullanan dünyadaki ticari tesislere örnek olarak Şekil 2.2'de gösterilen İspanya'daki Andasol enerji santrali ve Amerika Birleşik Devletlerinin Nevada eyaletindeki Solar One santralleri verilebilir.



Şekil 2.2: Parabolik oluk tipindeki Andasol Enerji Santrali, İspanya [7].

2.3 Doğrusal Fresnel Sistemler

Fresnel tipi sistemler çalışma prensibi olarak bir düzleme yerleştirilen düzlemsel aynaların geometrik olarak sistemin ortasında belirli bir yükseklikten geçen borulara odaklanmasıyla oluşur. Parabolik oluk teknolojisine benzer çalışan bu teknolojinin en büyük farkı; kullanılan aynaların geometri olarak düzlemsel olmalarıdır. Aynaların düzlemsel olmalarından dolayı çizgisel odaklama yapmaları ve güneşi tek eksende takip ettikleri için verimi diğer tiplere göre daha düşüktür. Şekil 2.3'de lineer tipte bir Fresnel KGE görülmektedir.



Şekil 2.3: Lineer Fresnel tipi KGE [8].

2.4 Parabolik Çanak Sistemler

Parabolik çanak tipi sistemler güneşten gelen ışınları parabolun odak noktasına yoğunlaştıran küçük aynalardan oluşur. Küçük aynalardan oluşan bu sistem çanak şeklindedir. Güneşten gelen ışınları iki eksende güneşi takip ederek sistemin odağına yerleştirilmiş stirling motoru üzerine yoğunlaştırır. Stirling motorunun çalışma prensibi ısı enerjisini mekanik enerjiye çevirmesine dayanmaktadır. Parabolik çanak sistemler yatırım maliyeti olarak yüksek oldukları için, verim olarak avantajlı bir teknoloji olsa da çok tercih edilmemektedir. Şekil 2.4'deki santral Amerika Birleşik devletlerinin Arizona eyaletindeki 1.5 MW kurulu gücündeki Maricopa Santraline aittir.



Şekil 2.4: Maricopa santralindeki parabolik çanak tipi kollektör [9].

3. ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMLERİ

Enerji, çok çeşitli şekillerde depolanabilmektedir. Doğada bulunan ve binlerce yıl önce yaşamış canlıların bünyesindeki karbonların dönüşmüş hali olan fosil yakıtlar enerjinin depolandığı yöntemlerden bir tanesi olarak söylenebilir. Güneş enerjisi de doğada bitkilerin bünyesinde fotosentez sonucu oluşturulan organik bileşikler içerisinde depolanmakta ve biyokütle enerjisi olarak adlandırılmaktadır. Enerji tanklarda ve çeşitli sistemlerde ısı olarak, bataryalarda elektrokimyasal olarak, pompaj depolamalı hidroelektrik santrallerde potansiyel enerji olarak, volan, çark, piston gibi sistemlerde de kinetik enerji olarak depolanabilir [10]. Enerjinin depolanması bilim dünyasının ilgisini her zaman çekmiş ve çalışma konuları içerisindeki popülerliğini her zaman korumuştur. Yenilenebilir enerji kaynaklarından güneş ve rüzgar gibi sürekli üretim sağlayamayan kaynaklar için enerji depolama kritik öneme sahiptir. Ayırca elektrik üretimi ile tüketimi arasındaki farklar, gün içerisindeki arz-talep değişimi, şebekedeki elektriğin kalitesi gibi faktörlerin iyileştirilebilmesi amaçlarının da yukarıdaki nedenlere eklenmesiyle enerji depolaması üzerine yapılan çalışmalar son yıllarda hız kazanmıştır. Enerji depolama yöntemleri Şekil 3.1'de şema olarak da gösterildiği üzere mekanik, termal, kimyasal, biyolojik ve manyetik olarak sınıflandırılabilir [11]. Bu çalışmada duyulur ısı termal enerji depolaması üzerinde durulacağı için aşağıdaki başlıkta termal enerji depolama yöntemleri daha ayrıntılı olarak ele alınmıştır.

Enerji Depolama Yöntemleri				
Mekanik Enerji Depolama	Kimyasal Enerji Depolama	Biyolojik Enerji Depolama	Manyetik Enerji Depolama	Termal Enerji Depolama
• Pompaj Depolamalı • Sıkıştırılmış Hava Depolama • Volanlar	• Elektrokimyasal Piller • Organik Moleküler Depolama			• Duyulur Isı Depolama • Gizli Isı Depolama • Termokimyasal Depolama

Şekil 3.1: Enerji depolama çeşitleri [11].

Güneş santrallerindeki kesintili üretim ve düşük kapasite faktörünün ortadan kalkması, termal enerji depolama sistemlerinin gelişmesine ve yaygınlaşmasına bağlıdır. Yani, TED sistemlerinin amaçlarından bir tanesi de santrallerin kapasite faktörünün artmasıyla 24 saate kadar üretim yapabilmesini, kaynak olarak güvenilirliklerinin artmasına ve en önemlisi de yıllık üretimlerinin artmasıyla yatırım geri dönüş sürelerinin kısalmasını sağlayarak bu tip sistemlerin uygulanabilir olmasını sağlamaktır.

3.1 Termal Enerji Depolama (TED)

Güneş enerjisi santrallerindeki enerji depolama sistemlerini pasif ve aktif olarak ikiye ayırabiliriz. Aktif sistemleri de doğrudan (direkt) ve dolaylı (indirekt) sistemler olarak ayrı iki başlık altında sınıflandırabiliriz [12]. Doğrudan tipte, depolama ortamı ile sistem içerisinde tamamen aynı ısı transfer akışkanı kullanılırken, dolaylı yöntemde depolama ortamı içerisinde ısıyı depolamak için ikinci bir akışkan kullanılır. Yani sistemde kullanılan akışkan ile enerji depolama için kullanılan akışkan farklıdır ve ısı transferi, bu iki akışkan arasında gerçekleşir. Pasif depolama sistemlerinde ise ısı depolama akışkanına ek olarak ısıyı depolamak için katı bir dolgu malzemesi de kullanılır. Akışkan, depolama ortamından yükleme ve boşaltma aşamaları sırasında geçerken ısı transferi ile ısısını vererek ya da alarak depolama ortamından ayrılır.

Isı transfer akışkanı olarak termal yağ veya ergimiş tuz gibi özel akışkanların seçilmesinin yüksek maliyetlerinin yanı sıra operasyonel riskleri ve zorlukları da vardır. Örneğin, ergimiş tuzlar yüksek donma sıcaklığına (120-220 °C) sahiptir ve yeterli ısı kaynağı akışkana sağlanamadığında tuz donar. Ergimiş tuz donduğunda tekrar eritilip akışkan hale getirilse bile bu tuz termal özelliklerini kaybetmektedir. Böyle durumlarda sistemdeki boru ve bazı ekipmanların değişmesi bile gerekebilir. Bu da yüksek bakım ve işletme maliyetleri anlamına gelmektedir. Yağlar ise yanıcı ve aşındırıcıdır ve termal stabiliteleri nedeniyle çalışma sıcaklığı yaklaşık 400 °C'ye kadar olan sistemlerde kullanılabilir ve termal yağların donma noktası yaklaşık 10 °C'dir [13]. KGE santrallerinin 500 °C üzerine rahatlıkla çıkabilmeleri bu termal yağların kullanımını riskli hale getirmektedir. Termal enerji depolama sistemlerini duyulur ısı depolama, gizli ısı depolama ve termokimyasal enerji depolama olarak üç başlığa ayırabiliriz [14].

3.1.1 Duyulur ısı depolama

Duyulur ısı depolamada malzemenin sıcaklığındaki değişim sonucu ortaya çıkan enerjisinden yararlanılır. Depolanan enerji (Q), malzemenin kütlesine (m), özgül ısısına (C) ve ne kadarlık bir sıcaklık değişimine (ΔT) uğradığına bağlıdır ve bu denklem (3.1) aşağıdaki şekilde ifade edilir;

$$Q = m \cdot C \cdot \Delta T \tag{3.1}$$

İyi bir depolama malzemesinin; yüksek ısıl kapasiteye, depolama boyutları açısından uygun yoğunluğa ve yüksek ısı taşınım katsayısına sahip olması gerekir. En yaygın duyulur ısı depolama malzemeleri su, organik yağlar, kayalar, seramikler ve ergimiş tuzlardır [15]. Aşağıdaki Çizelge 3.1'de bazı ısı depolama malzemeleri ve fiziksel özellikleri verilmiştir [16].

3.1.2 Gizli ısı depolama

Gizli ısı depolamada istenilen sıcaklık aralığında faz değiştiren yüksek ısıl iletkenlikli malzemeler kullanılır ve faz değişimi sırasında ortaya çıkan gizli ısıdan yararlanılır. Bir malzeme faz değiştirmek için yüksek miktarlarda ısıya ihtiyaç duyar. Faz değiştirdiğinde aldığı bu ısıyı içerisinde depolamış olur. Faz değiştiren malzemenin (FDM) ne kadar fazla ısı depolama yeteneği varsa o madde gizli ısı enerji depolamada o kadar iyidir. Depolanan ısı kullanılacağı zaman maddenin bozunmadan tersinir bir değişimle kullanılabilmesi gerekmektedir ve malzemenin kararlı bir kimyasal yapıya da sahip olması gerekir. Ayrıca faz değişimi sırasında hacimsel genişlemesinin de çok olmaması istenilen özelliklerdendir. Malzeme seçiminde maliyet performans optimizasyonu yapılmalı, eğer özellikle belirli bir malzemenin kullanılması gerekmiyorsa pahalı malzeme seçiminden kaçınılmalıdır. Çizelge 3.1'de potansiyel depolama malzemeleri ve özellikleri listelenmiştir.

İnorganik FDM'lere tuz hidratları ve klatrat hidratları örnek olarak verilebilir. İnorganik FDM' lerin avantajları; yüksek ergime ısısı, iyi termal iletkenlik, ucuz ve yanıcı olmamaları dezavantajları ise korozif olmaları, aşırı soğuma göstermeleri, faz bozulması ve hidrat sayısında azalma şeklinde listelenebilir [17].

Organik FDM'lere parafinler ve yağ asitlerini örnek gösterebiliriz. Organik FDM' lerin avantajları; kimyasal yönden kararlı, az veya hiç aşırı soğuma göstermemesi, korozif ve toksik olmamaları, yüksek ergime ısısı ve düşük buhar basıncı

göstermeleridir. Dezavantajları ise düşük termal iletkenlik, faz değişimi sırasında büyük hacim değişimi ve yanıcı olmaları şeklinde özetleyebiliriz [17]**.**

Çizelge 3.1: Bazı duyulur ısı depolama malzemelerinin fiziksel özellikleri [16].

Depolama Malzemesi	Sıcaklık Aralığı, (˚C)	Yoğunluk (kg/m³)	Öz Isı (J/kg K)	Enerji Yoğunluğu (KwH/m³ K)	Termal İletkenlik (W/m K)
Su	0-100	1000	4190	1.16	0,63
%50-etilen %50 glikol-su	0-100	1075	3480	0.98	-
Therminol 66®	-9-343	750	2100	0.44	0,106
Ergimiş tuz (%50$NaNO_3$-%50KNO_3)	220-540	1733	1550	0.75	0.57
Ergimiş tuz (%53KNO_3/%40$NaNO_3$/%7$NaNO_3$)	142-540	1680	1560	0.72	0.61
Sıvı sodyum	100-760	750	1260	0.26	67.5
Dökme demir	e.n.1150-1300 ˚C	7200	540	1.08	42
Alüminyum	e.n. 660	2700	920	0.69	200
Kaya	-	1600	880	0.39	-

3.1.3 Termokimyasal enerji depolama

Isı enerjisi bileşiğin içerisinde kimyasal bağ enerjisi olarak depolanır. Depolanan enerji kullanılmak istendiğinde tersinir tepkimeyle tekrar açığa çıkarılır. Termal enerji depolama sistemleri için bir ısı kaynağının olması gerekmektedir. Bu ısının kaynağı güneş ya da jeotermal gibi doğal bir kaynak olabileceği gibi bir tesisin atık ısısı da olabilir.

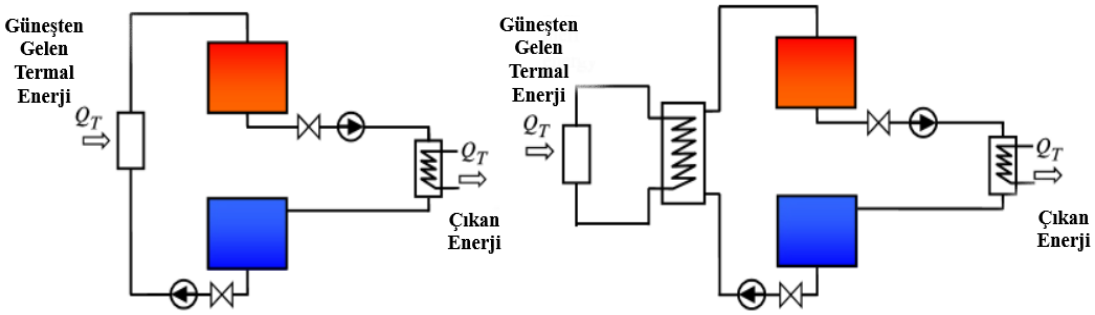
3.2 Ergimiş Tuz Depolama Sistemleri

KGE santralleri uygulamalarında genellikle ergimiş tuz olarak nitrat tuzlarının karışımları kullanılır. en yaygın kullanılanı %60 $NaNO_3$ - %40 KNO_3 karışımına sahip ergimiş tuzdur ancak KNO_3-$NaNO_2$-$NaNO_3$-$Ca(NO_3)_2$ içeren tuzlar da bulunmakta ve kullanılmaktadır. Özel bileşime sahip tuz geliştiren firmalara bir kaç örnek vermek gerekirse; Coastal Chemical Co., L.L.C., Durferrit ASD, HTS firmaları verilebilir. Çift tanklı ergimiş tuz enerji depolama sistemleri günümüzde ticari olarak termal güneş enerjisi santrallerinde kullanılmaktadır. Ergimiş tuz depolama sistemleri yeni inşaa edilecek KGE santrallerinde dizayn aşamasında projelere dahil edilmelidir. Bazı mevcut santrallerde depolama sistemi, santralde kullanılan akışkana ve projenin hali hazırda uygulanmış durumuna göre sonradan da eklenebilir. Tek tanklı sistemler ise şuanda labovatuar ölçeğinde çalışılmakta ve ticarileştirilmeye çalışılmaktadır. Küçük ölçekli, dolgu yataklı, tek tanklı termoklin ergimiş tuz depolama sistemi Ulusal Sandia Labavatuarlarında başarıyla geliştirilmiş ve sistemin çalıştığı kanıtlanmıştır [18]. Ergimiş tuzun direkt olarak ısı transfer akışkanı olarak kullanılmasının sistem için çeşitli avantajları vardır. Bu avantajların başlıcaları; daha verimli olması, yüksek sıcaklıklarda çalışabilmesi, sistem kurulum ve işletme maliyetlerin azalması olarak sayılabilir. Ergimiş tuz depolama sistemlerinde akış debisinin düşük olması da termoklin enerji depolama için istenen bir durumdur.

Tanklarda ucuz dolgu malzemeleri kullanarak sistem için istenen termal özellikler sağlanırsa, sistemde kullanılan ergimiş tuz miktarı ciddi miktarlarda azaltabilir ve sistem maliyetlerinde ciddi maliyet düşümleri başarılabilir. Dolgu malzemeli sistemlerde genellikle çakıl taşı ve akışkan olarakta hava kullanılır. Dolgu malzemeleri ile enerji depolama diğer sistemler ile karşılaştırıldığında ekonomik yönden daha avantajlıdır. Ayrıca çift tank yerine aynı kapasitedeki tek tanklı termoklin sistemlerin tercih edilmesi, %20 ile %37 arasında daha uygun maliyetlerle sistemin kurulmasına olanak sağlar [19]. Tank içerisinde ısı transferi dolgu malzemesi ile iş akışkanı arasında ve dolgu malzemesinin birbiri ile temas ettiği noktalardan gerçekleşir. Dolgu malzemesinin birbirine temas eden noktalarından olan iletimle ısı geçişinin az olması için, temas yüzey alanın küçük olması istenir. Tank içerisine bir mikser yerleştirilerek karıştırılması, termoklin kalınlığını arttırır. Şarj veya deşarj sırasında tank içerisinin karıştırılması, ortalama sıcaklığı düşüreceği için sistemin veriminin düşmesine neden olacaktır.

3.2.1 Çift tanklı ergimiş tuz enerji depolama sistemleri

Çift tanklı sistemler için ergimiş tuz depolama sistemleri, konsantre güneş enerjisi (KGE) santrallerinde ticari olarak hali hazırda kullanılan sistemlerdir. Çift tanklı sistemlerde, bir tank soğuk iken diğer tank sıcak halde ergimiş tuzu muhafaza eder. Şekil 3.2'deki sistemde direkt ve dolaylı tip depolama sistemleri gösterilmektedir. Direkt sistemlerde güneşten gelen termal enerji direkt sistem akışkanına aktarılmakta ve bu akışkan kırmızı renk ile gösterilen sıcak tank içerisinde depolanmaktadır. Daha sonra sıcak tanktan çıkan akışkan enerjisini bir eşanjör vasıtasıyla aktarmakta ve mavi renkteki soğuk tanka dönmektedir. Dolaylı tip depolamada ise Şekil 3.2 de sağ tarafta gösterildiği üzere güneşten gelen termal enerji önce soldaki döngünün akışkanını ısıtmakta, daha sonra ısınan bu akışkan, enerjisini bir ısı değiştiricisi vasıtasıyla sağdaki döngünün akışkanına aktarmaktadır. Isınan akışkan sıcak tank içerisinde depolanır. Bu enerjinin kullanılması gerektiğinde tanktan çıkarak direkt sistemdeki gibi önce eşanjör vasıtasıyla enerjisini aktarır ve soğuk tanka döner.



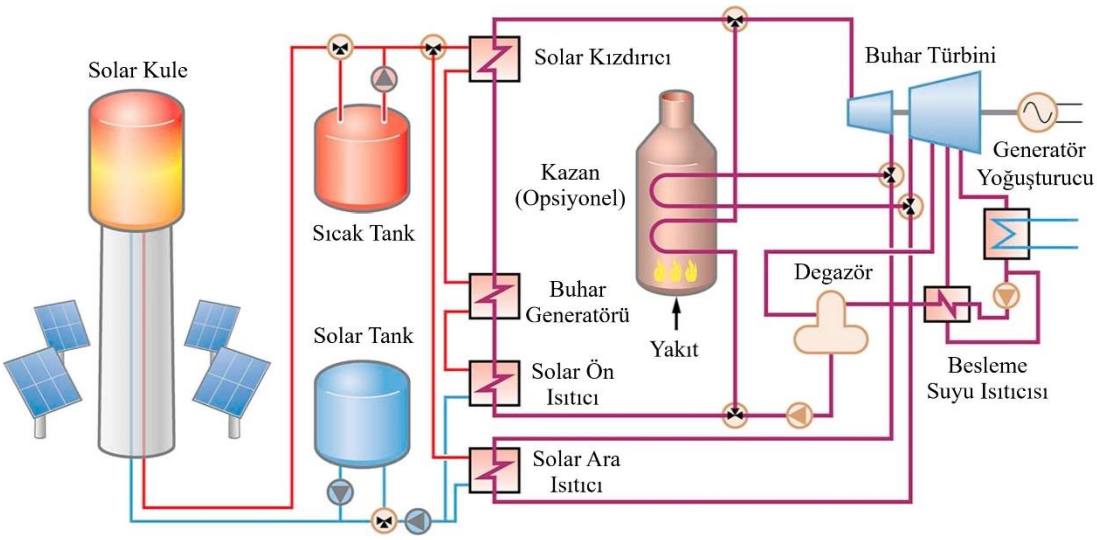
Şekil 3.2: Çift tanklı direkt ve dolaylı enerji depolama sisteminin şematik gösterimi [20].

Çift tanklı enerji depolama sisteminin kule tipi KGE santralinde kullanımı Şekil 3.3'de gösterilmiştir. Kızgın buhar, buhar türbinine girerek türbinin kanatlarını döndürür. Türbinden sonra yoğuşturucuda su fazına dönen buhar ön ısıtmadan geçerek tekrar buhar generatörüne döner ve bu döngü böyle devam eder.

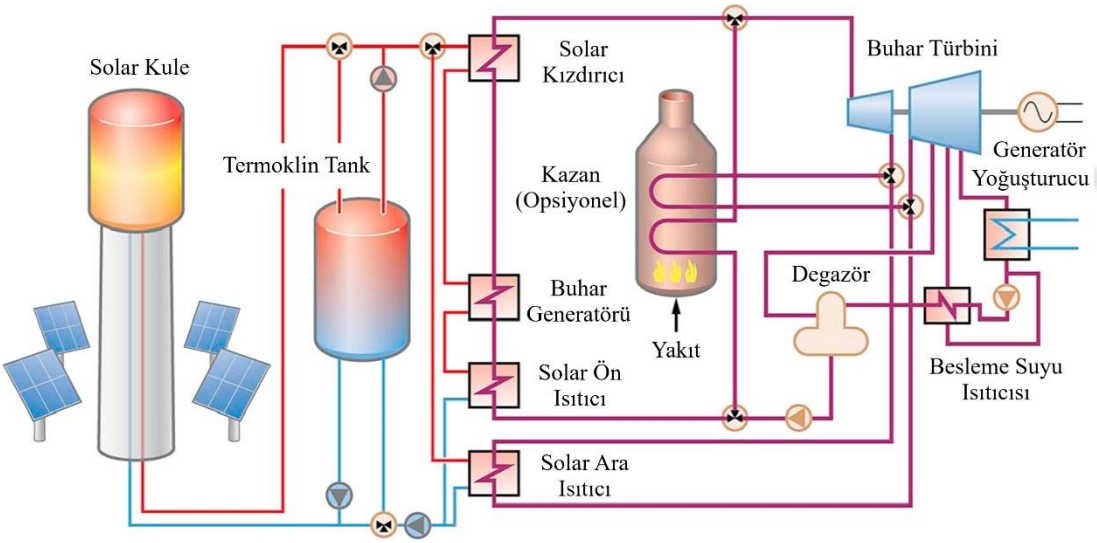
3.2.2 Tek tanklı ergimiş tuz enerji depolama sistemleri

Çift tanklı sistemlerin kurulum ve işletme maliyetlerinin fazla olması nedeniyle tek tanklı depolama sistemleri üzerine yapılan çalışmalar artmıştır. Maliyet düşürme çalışmaları kapsamında geliştirilen tek tanklı sistemlerle sistem maliyeti neredeyse yarıya düşürülmüştür. Depolama sisteminin maliyetini azaltmak için son yıllarda, yüksek termal kapasiteye sahip katı dolgu malzemesi ile dolu tek tanklı TES sistemleri

önerilmektedir. Tek tank termokline sahip bir depolama sistemi, iki depolama tanklı sisteme göre yaklaşık %35 daha ucuzdur. [22]. Şekil 3.4'te solar kule tipi bir KGE santralinden elektrik üretildiği sistem gösterilmiştir. Sistemde tek tanklı termoklin enerji depolama sistemi mevcuttur.



Şekil 3.3: Çift tanklı direkt termal depolama sistemi [21].



Şekil 3.4: Tek tanklı direkt termal depolama sistemi [21].

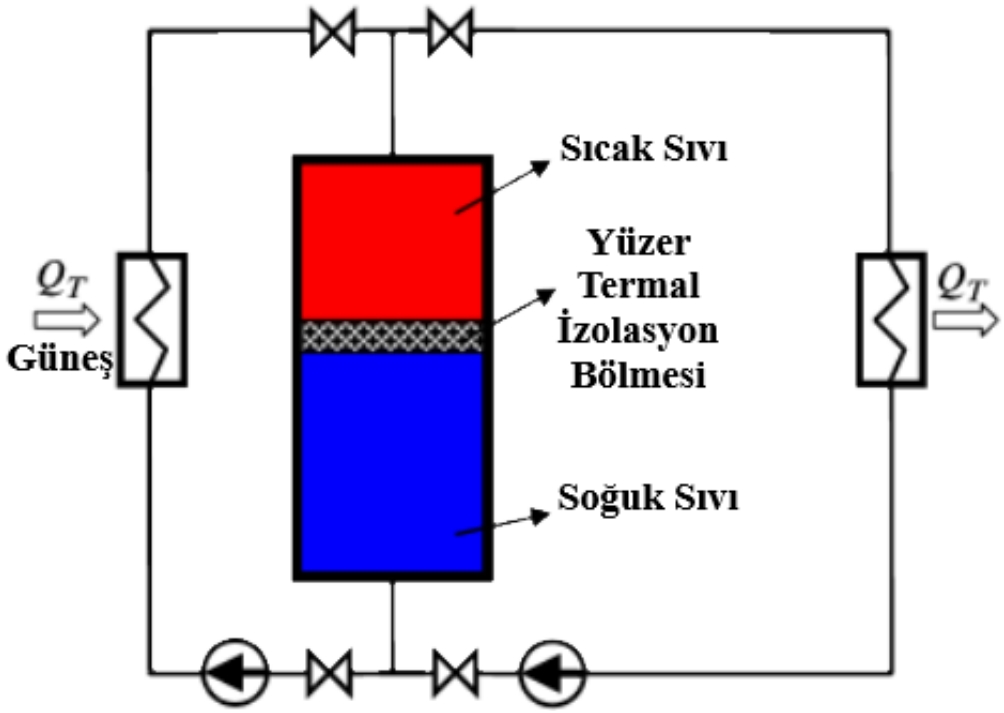
Tek tanklı depolama sistemlerinde sıcak ve soğuk bölge arasında Şekil 3.5'teki gibi yüzer bir izolasyon tabakası olabileceği gibi sıcak ve soğuk bölgenin karışmasıyla ortaya çıkan ara sıcaklıkta termoklin diye adlandırılan bölge oluşumu da olabilir. Bu bölgenin kalınlığı sabit bir kalınlıkta olmamakta ve değişmektedir.

Şekil 3.7'da tek tanklı sistemlerde tank içine karıştırıcı eklenmesinin güneşten yararlanma oranına etkisi Hollands ve Lightstone'nun sıcak su için yaptığı çalışmada

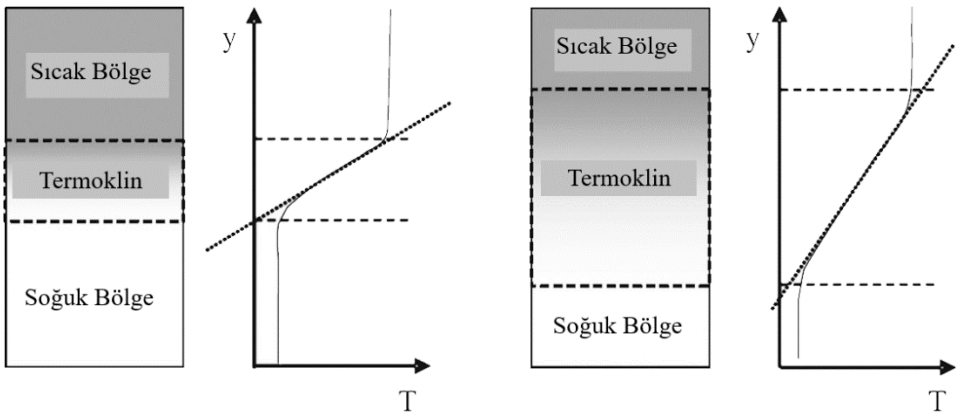
incelenmiş ve karıştırılmamış durumda sistemin daha verimli çalıştığı ortaya konmuştur [23]. Bunun sebebi katman katman depolanmış enerjinin karıştırılmış duruma göre kullanılacağı zaman önce en sıcak bölgenin kullanılmasından dolayıdır. Tam tersi durum olan şarj durumunda ise önce kollektöre karışmış sıvının ortalama sıcaklıktaki akışkanın yerine en soğuk kısmın yollanmasıdır. Çünkü daha yüksek sıcaklıklarda akışkan yollanması durumunda kolektörden olan ısı kaybı artar.

Enerji depolama sisteminde katmanlaşma, sistemde kullanılan akışkana, dolgu malzemesine, şarj-deşarj hızına ve sıcaklığa bağlıdır. İki özdeş tankta aynı miktarda enerji depolansa bile, katmanlaşmaya neden olan değişkenlerden dolayı tabakaların kalınlıkları farklı olabilir. Sıcaklık açısından geçiş bölgesi yani termoklin bölgesinin geniş olması, tank içerisindeki ortalama sıcaklıktaki bölgenin genişlemesi anlamına geldiği için istenen bir durum değildir.

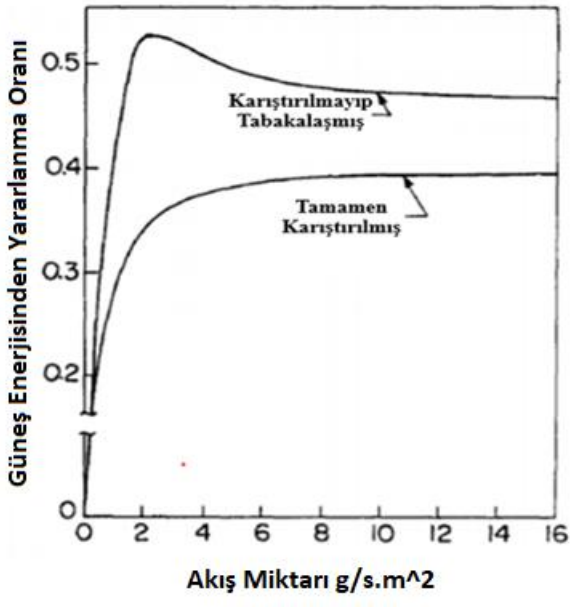
Şekil 3.6'da iki özdeş tank ve içerisindeki katmanların dağılımının (konum-sıcaklık) grafikleri yanlarında verilmiştir. Termoklin bölgenin genişliği; kullanılan depolama malzemelerine, sistemin çalışma debisine, sıcaklığına, tank içerisindeki faz sayısına ve bu fazların tank içerisindeki oranına bağlıdır.



Şekil 3.5: Yüzer izolasyon bölmeli termal enerji depolama sistemi [24].



Şekil 3.6: Farklı tabakalaşmaya sahip ama aynı miktarda enerji depolanmış özdeş iki tank [25].



Şekil 3.7: Tamamen karıştırılmış ve karıştırılmayıp tabakalaşmış durumlarda güneş enerjisinden yararlanma oranı - akış miktarı grafiği [23].

3.3 KGE Santralleri İçin Enerji Depolama Sistemleri

Günümüzün ticari KGE santrallerinin çalışma sıcaklıkları, kullanılan malzemelerin termofiziksel özellikleri göz önünde bulundurulduğunda genellikle 150 ile 550 °C arasındadır. Konsantre güneş enerjisi santrallerinde enerji depolama sistemi kurularak;

- Kısa süreli bulut geçişlerinde
- Gün boyu pik seviyede üretim yapılmak istendiğinde
- Güneş battıktan sonra ve güneş doğmadan önce üretim yapılmak istendiğinde
- Güneş ışınımının elektrik üretimi için yeterli olmadığı günlerde

- Mevsimlik enerji depolama için kullanılabilir.

Bu sistemler bileşen olarak, güneş kollektörü, depolama tankı, sistem kontrol elemanları, borular, boru aksamları ve bağlantı ekipmanlarından oluşur. Ayrıca ihtiyaca göre akışa destek amacıyla pompa ya da istenilen sıcaklık değerlerine ulaşılabilmesi için fosil yakıtla çalışan bir kazan veya başka bir enerji kaynağı ile takviye yapılabilecek sistemler de eklenebilir. Depolama sistemi tasarlanırken ihtiyaç olan sıcaklık değeri, sistem içerisinde oluşacak kayıplar da hesaba katılarak belirlenmelidir. Sahanın enerji hesaplamaları, depolanabilecek enerjiyi ve sistemin ulaşabileceği maksimum sıcaklığı belirleyeceği için büyük öneme sahiptir. Depolama malzemesinin tasarım sıcaklıklığında bozulmaması ve termal özelliklerini kaybetmiyor olması da seçilen malzemenin uygunluğunun göstergesi olduğu için aynı derecede öneme sahiptir. Eğer sistemde su gibi ısı depolama için depolama sisteminde direkt kullanılabilen bir akışkan kullanılıyorsa, kollektörden alınan enerjinin depolama malzemesine geçiş yapacağı ısı eşanjörü ihtiyacı ortadan kalkar. Böyle direkt sistem içerisinde kullanılabilecek akışkanlara örnek vermek gerekirse; su-glikol karışımı, termal yağlar ve ergimiş tuzlar verilebilir.

Erime noktası 222 °C olan ergimiş nitrat tuzu (% 50 $NaNO_3$ - % 50 KNO_3), Albuquerque, New Mexico eyaletinde yapılan bir deneyde depolama ve ısı transfer akışkanı olarak kullanılmıştır. Bu deney, enerji depolama sisteminden güç üretilen ilk ticari deney olarak tarihe geçmiştir [26]. Ayrıca, Kaliforniya, Barstow'daki 10 MW kurulu gücündeki Solar Two güneş santrali, güneş enerjisini depolamak için ergimiş nitrat tuzunu kullanmak üzere tasarlanmıştır [27]. Bir depolama sisteminin tasarlanması ve seçimi bir çok farklı parametreye bağlıdır. Yılmazoğlu, bu parametrelerden en önemlilerini şöyle listelemiştir [28];

a. Birim hacimdeki depolama kapasitesi

b. Çalışma sıcaklığı

c. Depolama ünitesi içinde sıcaklık katmanlaşması

d. Isının depolama ya da çekilmesi sırasındaki güç tüketimi

e. Depolama hacminin dış malzemesinin seçimi

f. Depolama hacminde ısıl kayıpların önlenmesi

g. Maliyet

Ayrıca alan müsaitliği, uzun süreli şarj-deşarj döngüsünün stabilitesi, korozivite gibi değişkenler de sistem verimini etkileyen parametrelerdir. Güneş enerjisi depolama sistemlerinde genellikle hava, termal yağlar, ergimiş tuzlar vb. gaz ve sıvı fazdaki bir çok akışkan özelliklerine göre sistemlerde kullanılabilmektedir**.** Depolama sistemi tasarımında performans maliyet optimizasyonu ayrıntılı olarak yapıldıktan sonra sistem bileşenlerinin seçimi gerçekleştirilmelidir. Depolama sisteminde bütün sistem bileşenleri birbirine bağlıdır. Bileşenlerden birinin yanlış seçimi ya da yetersiz kalması durumunda tüm depolama sistemi bundan etkilenecek ve verimi düşecektir.

4. KULE TİPİ KGE İÇİN TERMOKLİN TED SİSTEMİ

Dolgu yataklı depolama sistemleri genellikle deneysel çalışmaların sonuçlarına dayanan modeller kullanılarak tasarlanır. Bu modeller, depolama malzemesi ve ısı transfer akışkanı için momentum ve enerji ile ilgili denklemleri dikkate alır. Modelin sonuçları, geçici sıcaklık ve hız verilerinin yanı sıra, verimlilik ve döngüsel davranış gibi performans özelliklerini de sağlar [16]. Bir enerji depolama sistemi tasarlanırken gerekli kapasite belirlendikten sonra depolama malzemesinin belirlenmesi daha sonra da depolamanın yapılacağı tankın ve şarj-deşarj döngüsü için ısı eşanjörünün dizaynının yapılması gerekmektedir. Bu tez çalışması kapsamında kule tipi konsantre güneş enerjisi santralinde kullanılabilecek, çalışma şartları buna göre belirlenmiş, tank tasarım kriterlerine göre boyutlandırılmış, tek tanklı termoklin enerji depolama sistemi için denklemler boyutsuzlaştırılarak ayrıklaştırılmış ve daha sonra MATLAB programı yardımı ile nümerik olarak çözülmüştür. Daha sonra çeşitli parametre değişiklikleri ve senaryolar grafikler yardımıyla yorumlanarak çalışma tamamlanmıştır.

Enerji depolama sistemlerinde kullanılabilecek malzemelerle ilgili bugüne kadar bir çok çalışma yapılmıştır. Metamorfik kayaçlar, magmatik kayaçlar, kuvarzit kayaçlar termal özelliklerine göre potansiyel malzemelerdir. Demir çelik sektörünün atık bir malzemesi olan asbest ucuz ve kolay temin edilebilmesinden dolayı incelenmiş ve iyi bir enerji depolama malzemesi olduğu yapılan çalışmalarla ortaya çıkmıştır [29]. Kullanılacak dolgu malzemesinin doğru bir şekilde seçilmesi, hem direkt sistem kurulum maliyetini etkilediği için hem de uzun vadede bakım maliyetlerini arttırabileceği için önem arz etmektedir. Tank içerisinde dolgu malzemesi olarak Inertam firmasının ucuz ve kolay temin edilebilen asbestos malzemesini çeşitli işlemlerden geçirerek ürettiği COFALIT® olarak adlandırılan ürünü seçilmiştir. Kofalit avantajlı termal özelliklerinin yanı sıra kolay bulunabilen ucuz bir malzemedir. Ayrıca Chang'ın yaptığı çalışmaya göre Kofalit, termoklin enerji depolama için en ideal malzemedir. Bunun nedeni hacimsel ısı kapasitesinin kuvarzit kayaya göre

%29.31 daha yüksek olması ve en geniş termoklin kalınlığından sadece %9.09 daha kalın olmasıdır [30].

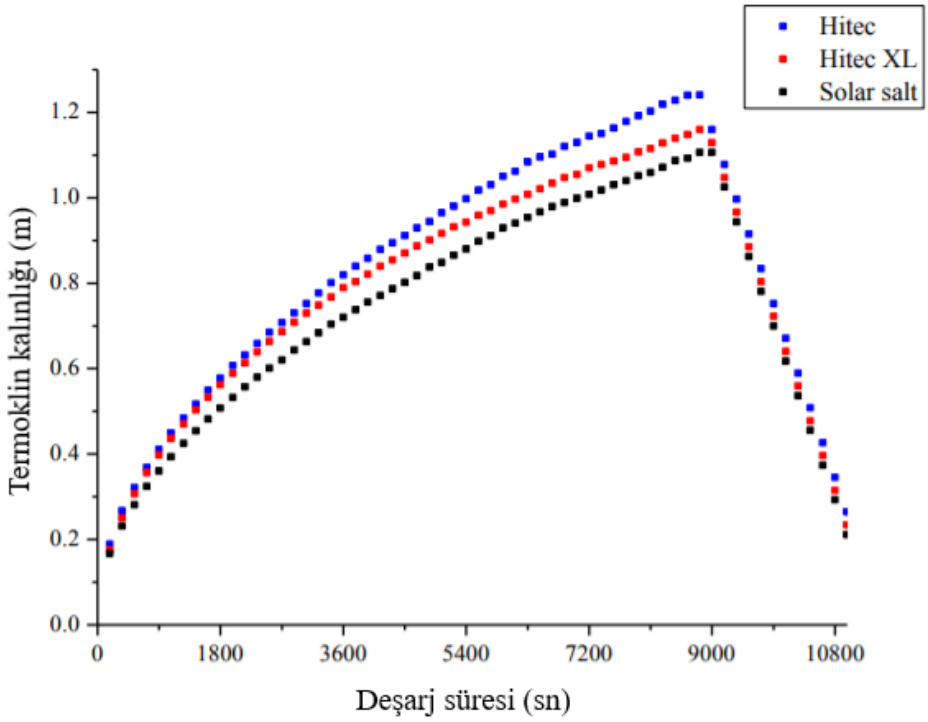
Ergimiş tuz olarak ise genel olarak nitrat tuzları ve karışımları kullanılmaktadır. Bu çalışmada sistem içerisinde dolaşacak olan akışkan olarak Coastal Chemical Co., L.L.C. firmasının HITEC™ ergimiş tuzu seçilmiştir. Bu tuz, sodyum nitrit ($NaNO_2$), sodyum nitrat ($NaNO_3$) ve potasyum nitrat (KNO_3) tuzlarının karışımından oluşmaktadır. Ergimiş tuzun ve dolgu malzemesinin gerekli termal özellikleri Çizelge 4.1'de verilmiştir.

Çizelge 4.1: Kullanılan malzemelerin termal özellikleri [30].

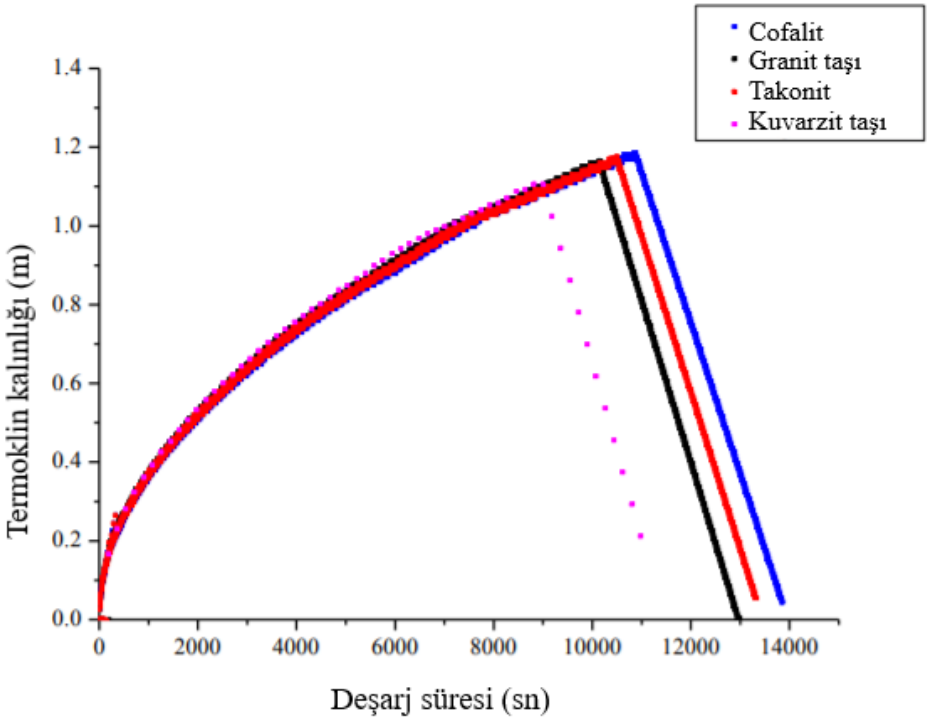
Malzeme	Yoğunluk (kg/m^3)	Özgül Isı Kapasitesi (J/kg K)	Isı İletim Katsayısı (W/m K)
HITEC	1790	1560	0.33
Kofalit	3120	860	2.7

Çeşitli ergimiş tuzlar ve dolgu malzemeleri üzerine deneysel çalışmalar yapan Z.S Chang ve arkadaşlarının yaptığı çalışmalar sonucu elde ettiği eğriler Şekil 4.1 ve Şekil 4.2'de verilmiştir. Bu grafiklerden Şekil 4.1'de karşılaştırılan üç termal tuzun özellikleri birbirine yakın olsa da güneş vasıtasıyla elde edilen tuzun (solar salt) termoklin bölgesi kalınlığının daha ince olduğu gözlemlenmiştir. Chang'e göre güneş vasıtasıyla elde edilen tuz (solar salt), termoklin enerji depolama sistemleri için kullanılabilecek en uygun çalışma akışkanıdır [30]. Bu çalışmada ayrıca dolgu malzemelerinden potansiyel vaadeden dört tanesi termoklin kalınlıklarına göre incelenmiş ve Şekil 4.2'de gösterilmiştir.

Şekil 4.3 ve Şekil 4.4'de gösterilen Chang'in çalışmasındaki grafiklerde ise güneş vasıtasıyla elde edilen tuzun (solar salt) seçilmesinden sonra çeşitli ısı depolama malzemeleri ile birlikte testler yapılmış ve deşarj süresinin en uzun Kofalit malzemesi ile birlikte yapılan testte olduğu gözlemlenmiştir. Aslında bu beklenen bir sonuçtur. Çünkü çalışılan malzemeler arasında en yüksek ısıl kapasiteye sahip malzeme Kofalittir ve ısıl kapasitesi büyük olan malzeme daha fazla enerji depolayabilmektedir.

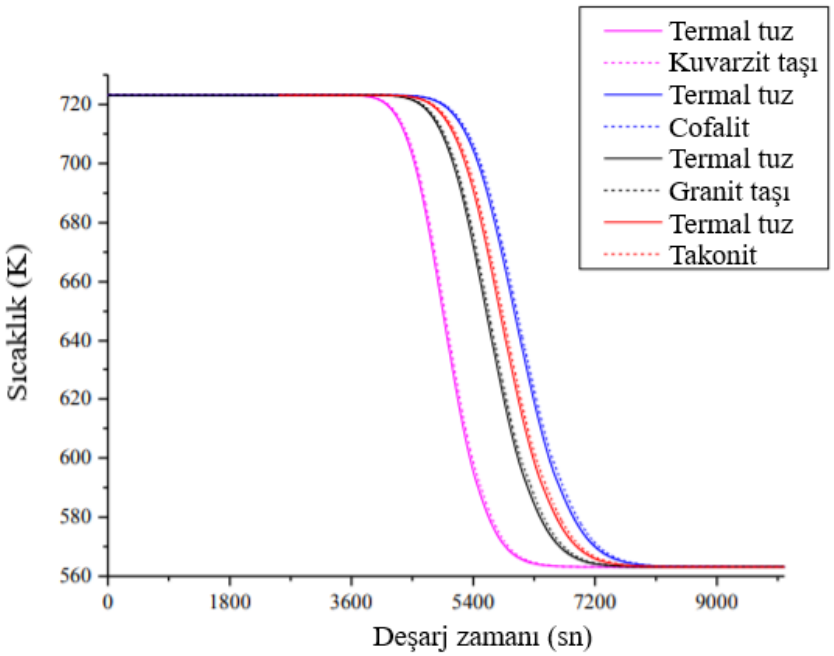


Şekil 4.1: Farklı tuzlar için termoklin kalınlıkları [30].

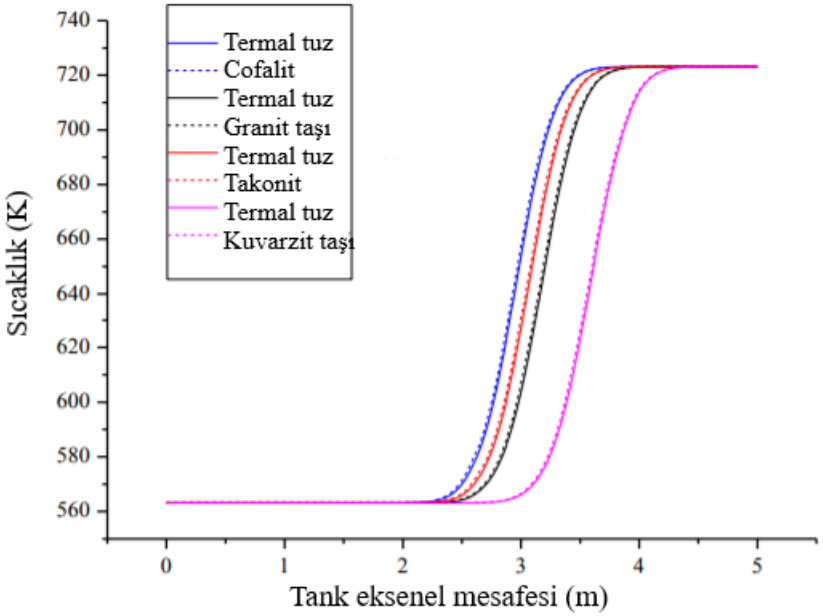


Şekil 4.2: Farklı dolgu malzemeleri için termoklin kalınlıkları [30].

Ayrıca bu grafik, akışkan ve katı arasındaki sıcaklık farkının daha büyük termal iletkenliğe sahip katı malzemeler kullanıldığında daha az olduğunu göstermektedir [30].



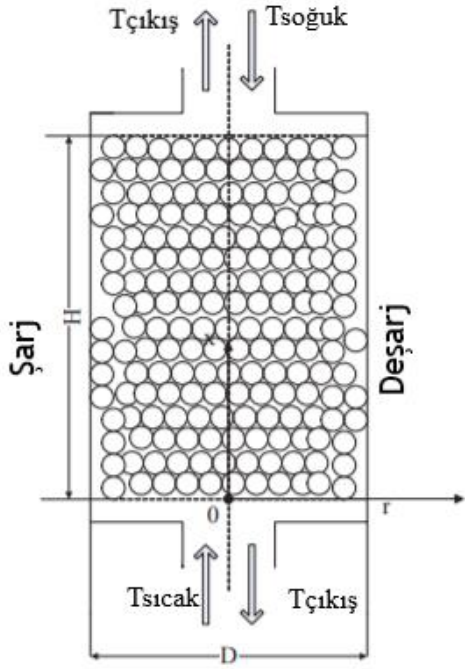
Şekil 4.3: Çeşitli ısı depolama malzemeleri için sıcaklık-zaman grafiği [30].



Şekil 4.4: Çeşitli ısı depolama malzemeleri için sıcaklık-konum grafiği [30].

Termal enerji depolama ile ilgili hem teoritik hem de deneysel olarak bir çok çalışma yapılmıştır. Doğru ve hassas bir yaklaşımla depolama tankının modellenebilmesi için sistemler bir boyutlu, iki boyutlu ve üç boyutlu olarak incelenmiş, tank içerisinde bulunan malzeme sayısına göre fazlar ayrı ayrı tanımlanarak modellemelere dahil edilmiştir. Ayrıca termoklin depolama sistemlerinde, tank içerisindeki sıcaklık dağılımının ve tabakalaşmanın sistem verimliliği üzerinde büyük etkisi olduğu için

zamana ve tank içerisindeki konuma bağlı olarak tankın davranışları gözlemlenmeye çalışılmıştır. Yapılan çalışmalar incelendiğinde, oluşturulan bir boyutlu ve iki fazlı (1D-2P) modellerin hem hızlı sonuç elde edilmesi bakımından hem de yeterli doğruluk ve ayrıntıda sonuç vermesi bakımından yeterli olduğuna karar verilmiştir. Sistemin sürekli bir döngü içerisinde çalışmasından ötürü tankın içerisine her an akışkan giriş çıkışı olmaktadır. Bu akışkan sirkülasyonu; şarj sırasında tankın üstünden soğuk akışkanın çıkıp alt taraftan ısı depolamış sıcak akışkanın girmesi şeklinde gerçekleşir. Tam tersi durumda yani deşarj sırasında ise enerjiinin depolandığı akışkan tankın alt tarafından çıkar, ısı değiştiricisinde enerjisini sistem akışkanına aktararak tankın üst tarafından tanka giriş yapmaktadır. Depolama tankı ve bu döngünün akış yönleri Şekil 4.5'deki çizim yardımıyla daha kolay anlaşılabilmektedir.



Şekil 4.5: Tek tanklı iki fazlı termoklin enerji depolama tankının şarj ve deşarj sırasında akış yönleri [30].

4.1 Tank Özellikleri ve Tank İçerisindeki Boşluk Oranının Belirlenmesi

D <5 m'ye sahip tanklar için H / D oranı 1.5 ile 4 arasında olmalıdır [31]. Bu çalışmada malzeme olarak beton seçilen tank H / D oranı aralığında olması için 5 metre boyunda, 3 metre çapında seçilmiştir. Geometrik olarak ise silindir şekline sahiptir.

Boşluk oranı (ε); tank içerisindeki katı fazda bulunan dolgu malzemesi ve sıvı fazda bulunan ısı transfer akışkanı arasındaki oranı temsil eder. Goswami Yogi'nin yaptığı

çalışmada çeşitli malzemeler için değerler aşağıdaki Çizelge 4.2'de verilmiştir. Bu çalışmada da ufalanmış granüler Kofalit parçaları olduğu için boşluk oranı değeri (ε) 0.45 olarak kabul edilmiştir.

Çizelge 4.2: Çeşitli malzemeler için boşluk oranı değerleri [16].

Partikül Tipi	Tank İçerisindeki Dağılımı	Ortalama Boşluk Oranı(ε)
Küresel	Dört köşeli salkım	0,3
Küresel	Dik eksenli örüt	0,4
Küresel	Kübik	0,48
Küresel	Rasgele	0,36-0,43
Ufalanmış Taş	Granüler	0,44-0,45
Küresel	Çok serbest, rasgele	0,46-0,47
Küresel	Dökme, rasgele	0,37-0,39
Küresel	Kapalı, rasgele	0,36-0,38

4.2 Tank İçerisinde Depolanabilecek Enerji Hesabı

Depolama tankı boyut olarak 3 metre çapa ve 5 metre yüksekliğe sahiptir. Çalışmada 0,45 olarak kabul edilen boşluk oranının (ε) anlamı depolama tankının hacimsel olarak %45'inin ergimiş tuzdan %55'inin ise Kofalit'ten oluştuğunu belirtmektir. Tank içerisinde depolanabilecek enerji aşağıda hesaplanmıştır.

Toplam tank hacmi;

$$V_{tank} = \pi * r^2 * h \tag{4.1}$$

Ergimiş tuzun hacmi;

$$V_{tuz} = V_{tank} * \varepsilon \tag{4.2}$$

Kofalit'in hacmi;

$$V_{cofalit} = V_{tank} * (1 - \varepsilon) \tag{4.3}$$

Depolanabilecek maksimum enerjiyi tuzda ve Kofalit'te depolanan enerjileri ayrı ayrı toplayarak hesaplayabiliriz;

$$Q_{tank} = Q_{tuz} + Q_{Cofalit} \tag{4.4}$$

Tuzda depolanan enerji;

$$Q_{tuz} = m_{tuz} * C_{tuz} * \Delta T \tag{4.5}$$

Kofalit'te depolanan enerji;

$$Q_{Cofalit} = m_{Cofalit} * C_{Cofalit} * \Delta T \tag{4.6}$$

Denklem (4.4)'ten depolanabilecek toplam enerji 8200 kWh olarak hesaplanır (1 kJ = 0.000278 kwh).

4.3 İki Fazlı Tank İçin Boyutsuz Sayılar Ve Denklemler

Akışkan ve dolgu malzemesi ile ilgili yapılan çalışmalarla nümerik çözüm için denklemler geliştirilmeye çalışılmıştır. Bunlardan ilki 1929 yılında Schumann tarafından geliştirilmiştir. Schumann'ın kendi adıyla anılan bu denklemler hala kullanılmakta ve hemen hemen bu konudaki bütün çalışmaların temelini oluşturmaktadır [32]. Bu tip denklemleri çözmek için temel olarak sonlu farklar yöntemi veya boyutsuz sayılar olmak üzere iki yöntem kullanılmaktadır. Bu çalışmada boyutsuz sayılar oluşturularak diferansiyel denklemler çözülmüştür. Çalışmada kullanılan Schumann denklemlerinin ifadesi şarj döngüsü için [32];

Sıvı (Ergimiş tuz) için;

$$\left(\rho \times c_p\right)_{sıvı} \times \varepsilon \times \frac{\partial T_{sıvı}}{\partial t} = -\frac{(\dot{m} \times C_P)_{sıvı}}{A} \times \frac{\partial T_{sıvı}}{\partial x} + h_v(T_{katı} - T_{sıvı}) \tag{4.7}$$

Katı (Kofalit) için;

$$\left(\rho \times c_p\right)_{katı} \times (1-\varepsilon) \times \frac{\partial T_{katı}}{\partial t} = h_v(T_{sıvı} - T_{katı}) \tag{4.8}$$

Boyutsuz NTU sayısı aşağıdaki gibi tanımlanır [33];

$$NTU = \frac{h_v \times A \times L}{(\dot{m} \times C_P)_{sıvı}} \tag{4.9}$$

Boyutsuz uzunluk terimi;

$$Z = \frac{X}{L} \tag{4.10}$$

Sıvı denklemi (4.7)'de ∂x yerine $L * \partial z$ yazılır;

$$\left(\rho \times c_p\right)_{sıvı} \times \varepsilon \times \frac{\partial T_{sıvı}}{\partial t} = -\frac{(\dot{m} \times C_P)_{sıvı}}{A \times L} \times \frac{\partial T_{sıvı}}{\partial z} + h_v(T_{katı} - T_{sıvı}) \tag{4.11}$$

Her taraf $(A * L)/((\dot{m} \times C_P)_{sıvı}$ ile çarpılır;

$$\frac{\left(\rho \times c_p\right)_{sıvı} \times \varepsilon \times A \times L}{(\dot{m} \times C_P)_{sıvı}} \times \frac{\partial T_{sıvı}}{\partial t} = -\frac{\partial T_{sıvı}}{\partial z} + NTU(T_{katı} - T_{sıvı}) \tag{4.12}$$

Sıcaklık için boyutsuz $\theta_{sıvı}$ ve $\theta_{katı}$'yı tanımlanır;

$$\theta_{sıvı} = \frac{T_{sıvı} - T_{soğuk}}{T_{sıcak} - T_{soğuk}} \tag{4.13}$$

$$\theta_{katı} = \frac{T_{katı} - T_{soğuk}}{T_{sıcak} - T_{soğuk}} \tag{4.14}$$

Sıvı ve katı denklemleri (4.7) ve (4.8) için sıcaklıklar boyutsuz yazılır;

Sıvı (Ergimiş tuz);

$$\frac{\left(\rho \times c_p\right)_{sıvı} \times \varepsilon \times A \times L}{(\dot{m} \times C_P)_{sıvı}} \times \frac{\partial \theta_{sıvı}}{\partial t} = -\frac{\partial \theta_{sıvı}}{\partial z} + NTU(\theta_{katı} - \theta_{sıvı}) \tag{4.15}$$

Katı (Kofalit):

$$\left(\rho \times c_p\right)_{katı} \times (1-\varepsilon) \times \frac{\partial \theta_{katı}}{\partial t} = h_v(\theta_{sıvı} - \theta_{katı}) \tag{4.16}$$

Boyutsuz şarj terimi;

$$\tau_1 = \frac{t}{t_1} \tag{4.17}$$

Boyutsuz deşarj terimi;

$$\tau_2 = \frac{t}{t_2} \tag{4.18}$$

Zamana bağlı değişkenleri (t) şarj için boyutsuz (τ_1) yazarsak;

$$\frac{(\rho \times c_p)_{sıvı} \times \varepsilon \times A \times L}{(\dot{m} \times C_P)_{sıvı} \times t_1} \times \frac{\partial \theta_{sıvı}}{\partial \tau_1} = -\frac{\partial \theta_{sıvı}}{\partial z} + NTU(\theta_{katı} - \theta_{sıvı}) \tag{4.19}$$

İki tarafı da düzenlersek denklem (5.19) aşağıdaki hali alır;

$$\frac{A \times L \times (\rho \times c_p)_{sıvı} \times (1-\varepsilon)}{(\dot{m} \times C_P)_{sıvı} \times t_1} \times \frac{\partial \theta_{katı}}{\partial \tau_1} = -\frac{(\theta_{sıvı} - \theta_{katı}) \times h_v \times A \times L}{(\dot{m} \times C_P)_{sıvı}} \tag{4.20}$$

Boyutsuz şarj süresi terimi aşağıdaki şekilde tanımlanır;

$$P_1 = \frac{t_1 \times (\dot{m} \times C_P)_{sıvı}}{A \times L \times (\rho \times c_p)_{sıvı}} \tag{4.21}$$

Boyutsuz deşarj süresi terimi aşağıdaki şekilde tanımlanır;

$$P_2 = \frac{t_2 \times (\dot{m} \times C_P)_{sıvı}}{A \times L \times (\rho \times c_p)_{sıvı}} \tag{4.22}$$

Boyutsuz hacimsel ısı kapasitesi oranı aşağıdaki şekilde tanımlanır;

$$R = \frac{(\rho \times c_p)_{katı}}{(\rho \times c_p)_{sıvı}} \tag{4.23}$$

Boyutsuz sayıların ana denkleme eklenmesiyle şarj denklemleri aşağıdaki son halini alır;

Sıvı denklemi (4.7) (Ergimiş tuz) için;

$$\frac{\varepsilon}{P_1} \times \frac{\partial \theta_{sıvı}}{\partial \tau_1} = -\frac{\partial \theta_{sıvı}}{\partial z} + NTU(\theta_{katı} - \theta_{sıvı}) \tag{4.24}$$

Katı denklemi (4.8) (Kofalit) için;

$$\frac{R \times (1-\varepsilon)}{P_1} \times \frac{\partial \theta_{katı}}{\partial \tau_1} = NTU(\theta_{sıvı} - \theta_{katı}) \tag{4.25}$$

Tank içerisindeki iki faz, şarj döngüsü için ayrı ayrı ele alınarak denklem (4.24) ve (4.25)'deki şekilde boyutsuz hale getirilmiştir. Aynı işlemler deşarj döngüsü içinde yapılırsa Schumann denklemi;

Sıvı (Ergimiş tuz) için;

$$\frac{\varepsilon}{P_2} \times \frac{\partial \theta_{sıvı}}{\partial \tau_2} = -\frac{\partial \theta_{sıvı}}{\partial z} + NTU(\theta_{katı} - \theta_{sıvı}) \tag{4.26}$$

Katı (Kofalit) için de aşağıdaki şekilde yazılabilir;

$$\frac{R \times (1-\varepsilon)}{P_2} \times \frac{\partial \theta_{katı}}{\partial \tau_2} = NTU(\theta_{sıvı} - \theta_{katı}) \tag{4.27}$$

Denklemler içerisindeki ifadeler aşağıdaki formüller aracılığıyla hesaplanır.

Hacimsel ısı transfer katsayısı;

$$h_v = \frac{6 \times h \times (1-\varepsilon) \times \alpha}{D_{cofalit}} \tag{4.28}$$

Isı transfer katsayısı;

$$h = \frac{Nu \times k_{ort}}{D_{cofalit}} \tag{4.29}$$

Nusselt sayısı;

$$Nu = 2 + 1{,}1 \times \left((Re^{0{,}6}) \times (Pr^{0{,}33})\right) \tag{4.30}$$

Reynold sayısı;

$$Re = \frac{G \times D_{cofalit}}{\mu} \tag{4.31}$$

Kütlesel hız;

$$G = \frac{\dot{m}}{A} \tag{4.32}$$

Tankın taban alanı;

$$A = \frac{\pi \times D^2}{4} \tag{4.33}$$

Viskozite;

$$\mu = \begin{pmatrix} 22{,}714 - 0{,}12 \times T_{ort} + (2{,}281 \times 10^{-4}) \times {T_{ort}}^2 \\ -(1{,}474 \times 10^{-7}) \times {T_{ort}}^3 \end{pmatrix} \times 10^{-3} \tag{4.34}$$

Prandtl Sayısı;

$$Pr = \frac{C_{p_{tuz}} \times \mu}{k_{ort}} \tag{4.35}$$

Ortalama sıcaklık (°C);

$$T_{ort} = \frac{TL + TH}{2} - 273 \tag{4.36}$$

Efektif ısı iletim katsayısı;

$$k_{ort} = (\varepsilon \times k_{tuz}) + \left((1 - \varepsilon) \times k_{cofalit}\right) \tag{4.37}$$

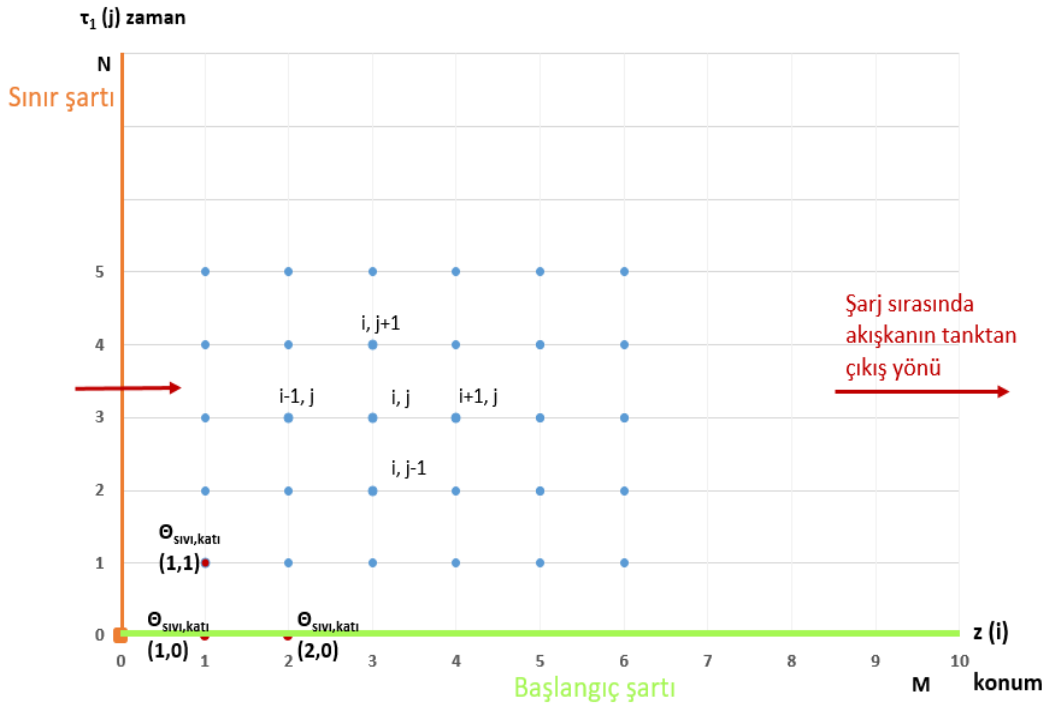
Hacimsel ısı kapasitesi;

$$(\rho \times C_p)_{ort} = \varepsilon \times (\rho \times C_p)_{tuz} + (1 - \varepsilon) \times (\rho \times C_p)_{cofalit} \tag{4.38}$$

4.4 Şarj Döngüsünün Çözümü

Şarj döngüsüne başlarken tankın soğuk olduğu kabul edilmektedir. Yani başlangıçta tank içerisindeki sıcaklık dağılımı üniform ve her noktası T_L=558 °K'dir.

Şekil 4.6'da şarj döngüsünde $\theta_{katı}(i,j)$ ve $\theta_{sıvı}(i,j)$ tank içerisinde hesaplanacak noktayı sıvı faz ve katı faz için ayrı ayrı temsil etmektedir. N toplam süreyi saniye cinsinden, M sayısı ise tankın kaç bölgeye ayrılarak inceleneceğinin sayısını temsil etmektedir.



Şekil 4.6: Şarj döngüsü için tankın, zamana ve konuma bağlı olarak noktalara ayrılması.

Çalışmada tankı 100 eşit bölgeye ayrılarak incelenmiş (M=100), şarj süresi olarakta 8 saate karşılık gelen 28800 saniye seçilmiştir (N=28800). Şarj döngüsünde her bir zaman aralığı için $\Delta\tau_1$, birim konum ifadesi de Δz olarak ifade edilirse;

$$\Delta\tau_1 = \frac{1}{N} \tag{4.39}$$

$$\Delta z = \frac{1}{M} \tag{4.40}$$

Sıvı için, şarj denklemi (4.24) Upwind Scheme yöntemi uygulayarak i'ye ve j'ye bağlı ifade edilerek ayrıklaştırılmış denklemin son hali aşağıdaki gibi olur;

$$\frac{\varepsilon}{P_1} \times \frac{\theta_{sıvı}(i,j+1) - \theta_{sıvı}(i,j)}{\Delta\tau_1} = -\frac{\theta_{sıvı}(i,j) - \theta_{sıvı}(i-1,j)}{\Delta z} + NTU\left(\theta_{katı}(i,j) - \theta_{sıvı}(i,j)\right) \tag{4.41}$$

Başlangıç koşulları:

$$\theta_{sıvı}(i,0) = 1 \qquad 1 \le i \le M$$

$$\theta_{katı}(i,0) = 1 \qquad 1 \le i \le M$$

Sınır koşulları ise:

$$\theta_{sıvı}(0,j) = 0 \qquad 0 \le j \le N$$

$$\theta_{katı}(0,j) = 0 \qquad 0 \le j \le N$$

Şarj döngüsü sırasında katı faz için denklem (4.25)'in ayrıklaştırılmış son hali ise bu şekilde olacaktır;

$$\frac{R \times (1-\varepsilon)}{P_1} \times \frac{\theta_{katı}(i,j+1) - \theta_{katı}(i,j)}{\Delta\tau_1} = NTU\left(\theta_{sıvı}(i,j) - \theta_{katı}(i,j)\right) \tag{4.42}$$

Denklem 4.25'deki boyutsuz şarj süresi de düzenlenirse denklem 4.43 elde edilir;

$$P_1 = \frac{t_1 \times h_v}{NTU \times \left(\rho \times c_p\right)_{sıvı}} \tag{4.43}$$

Yukarıda tanımlanan boyutsuz sayılar ve diğer denklemler MATLAB programıyla hesaplanmıştır. Hesaplandıktan sonra yine aynı program yardımıyla tank içerisindeki noktalar adım adım Şekil 4.6'daki şekilde hesaplanır. Tüm noktalar hesaplandıktan sonra ortaya çıkan sonuçlara bağlı grafikler gelecek kısımda paylaşılmıştır.

4.5 Deşarj Döngüsünün Çözümü

Deşarj döngüsüne başlarken tankın soğuk olduğu kabul edilmiştir. Yani tank içerisindeki sıcaklık dağılımı başta üniform ve T_L=873 °K'dir. Şekil 4.7'de deşarj döngüsünde $\theta_{katı}(i,j)$ ve $\theta_{sıvı}(i,j)$ tank içerisinde hesaplanacak noktayı sıvı faz ve katı faz için ayrı ayrı temsil etmektedir. N toplam süreyi saniye cinsinden, M sayısı ise tankın kaç bölgeye ayrılarak inceleneceğinin sayısını temsil etmektedir. Çalışmada tankı 100 eşit bölgeye ayrılarak incelenmiş (M=100), deşarj süresi olarakta 8 saate karşılık gelen 28800 saniye seçilmiştir (N=28800). Deşarj döngüsünde her bir zaman aralığı için $\Delta\tau_2$, birim konum ifadesi de Δz olarak ifade edilirse;

$$\Delta\tau_2 = \frac{1}{N} \tag{4.44}$$

$$\Delta z = \frac{1}{M} \tag{4.45}$$

Sıvı faz için Upwind Scheme yöntemine göre sonlu farklar çözümüne yönelik ifade edilmiş denklem;

$$\frac{\varepsilon}{P_2} \times \frac{\partial\theta_{sıvı}}{\partial\tau_2} = \frac{\theta_{sıvı}(i+1,j) - \theta_{sıvı}(i,j)}{\Delta z} + NTU\big(\theta_{katı}(i,j) - \theta_{sıvı}(i,j)\big) \tag{4.46}$$

Sıvı faz ve katı faz için denklemleri açarak yazarsak;

Sıvı (ergimiş tuz) için deşarj denklemi;

$$\frac{\varepsilon}{P_2} \times \frac{\theta_{sıvı}(i,j+1) - \theta_{sıvı}(i,j)}{\Delta\tau_2} = \frac{\theta_{sıvı}(i+1,j) - \theta_{sıvı}(i,j)}{\Delta z} + NTU\big(\theta_{katı}(i,j) - \theta_{sıvı}(i,j)\big) \tag{4.47}$$

Katı (Kofalit) faz için deşarj denklemi aşağıdaki şekildedir;

$$\frac{R \times (1-\varepsilon)}{P_2} \times \frac{\theta_{katı}(i,j+1) - \theta_{katı}(i,j)}{\Delta\tau_2} = NTU\big(\theta_{sıvı}(i,j) - \theta_{katı}(i,j)\big) \tag{4.48}$$

Başlangıç koşulları:

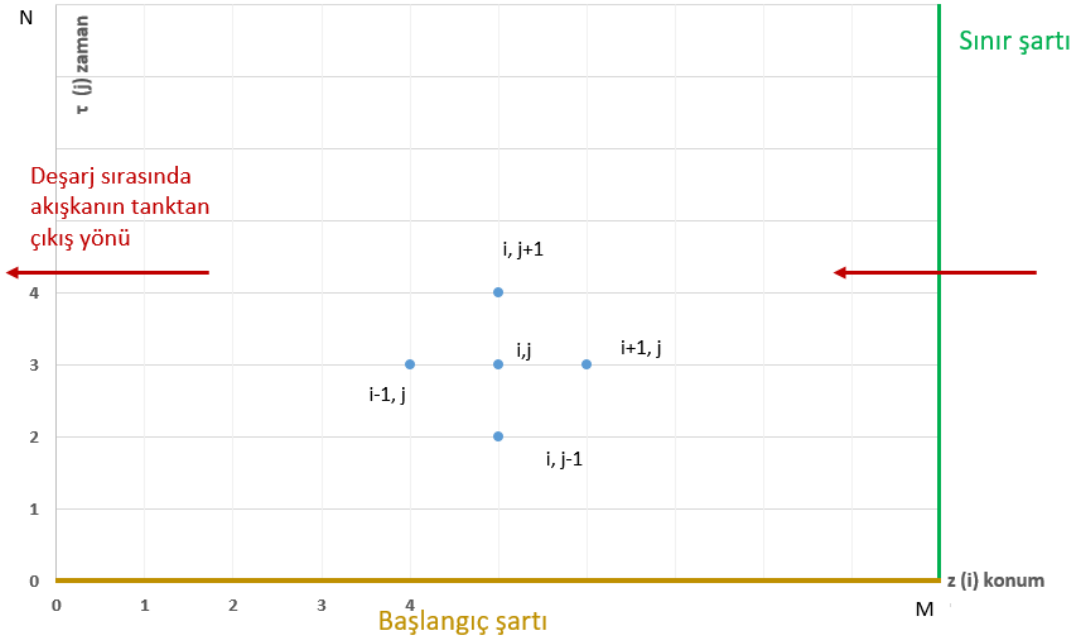
$$\theta_{sıvı}(M-i,0) = 0 \qquad 0 \le i \le M-1$$

$$\theta_{katı}(M-i,0) = 0 \qquad 0 \le i \le M-1$$

Sınır koşulları:

$$\theta_{sıvı}(0,j) = 1 \qquad 0 \le j \le N$$

$$\theta_{katı}(0,j) = 1 \qquad 0 \le j \le N$$



Şekil 4.7: Deşarj döngüsü için tankın, zamana ve konuma bağlı olarak noktalara ayrılması.

Sıvı faz için denklem (4.47) başlangıç koşuluna göre yazılırsa;

$$\frac{\varepsilon}{P_2} \times \frac{\theta_{sıvı}(i,1) - \theta_{sıvı}(i,0)}{\Delta\tau_2} = -\frac{\theta_{sıvı}(i+1,0) - \theta_{sıvı}(i,0)}{\Delta z} + NTU\left(\theta_{katı}(i,0) - \theta_{sıvı}(i,0)\right) \qquad (4.49)$$

Katı faz için denklem (4.48) başlangıç koşullarına göre yazılırsa;

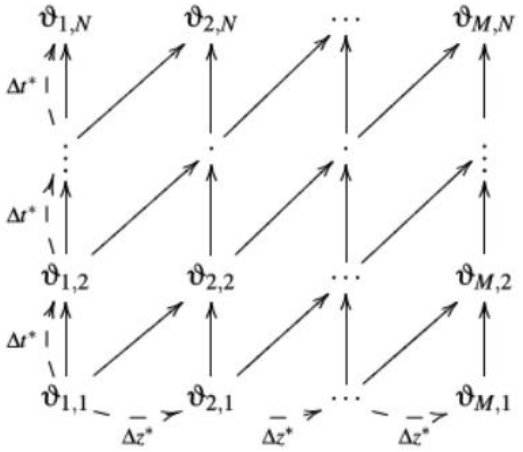
$$\frac{R \times (1-\varepsilon)}{P_2} \times \frac{\theta_{katı}(i,1) - \theta_{katı}(i,0)}{\Delta\tau_2} = NTU\left(\theta_{sıvı}(i,0) - \theta_{katı}(i,0)\right) \qquad (4.50)$$

olarak elde edilir.

4.6 Çözüm Yöntemi ve Uygulaması

MATLAB programına değişkenler ve denklemler tanımlanarak çözüme başlanır. Daha sonra tank şarj döngüsü için belirlenen sınır ve başlangıç koşulları programa tanımlanır. Boyutsuz sayılar yardımıyla numerik olarak çözebilecek hale gelen denklemler, belirlenen υ(i,j+1) başlangıç noktasını hesaplayabilmesi için bir önceki

noktanın tanımlı olması gerekmektedir. Çözüme başlanacak noktalar; yani başlangıç koşulları belirli olduğu için çözüm hatasız ve sorunsuz şekilde gerçekleştirilir. Aşağıdaki Şekil 4.8'de çözüm matrisinin adım adım nasıl ilerlediği gösterilmiştir. Matris çözümü υ(M,N) noktasının hesaplanmasıyla tamamlanmış olur.



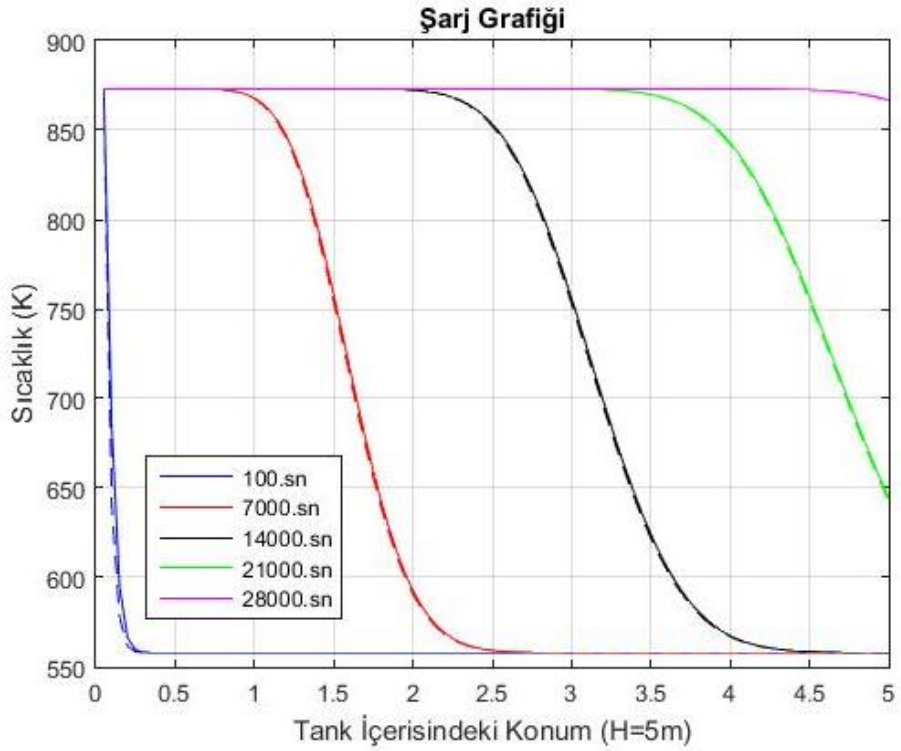
Şekil 4.8: Karakteristik yöntemden oluşan çözüm matrisinin diyagramı [34].

4.7 Çözüm Sonucu Elde Edilen Grafikler

Çalışma süresi olarak güneş santrali çalışma saatlerine uygun olan ve depolama yapılabilecek süre 8 saat, saniye cinsinden yaklaşık olarak 28000 saniye seçilmiştir. Sistem şarj döngüsü içerisindeyken 100. saniye (Mavi renk), 7000. saniye (Kırmızı renk), 14000. saniye (Siyah renk), 21000. saniye (Yeşil renk) ve 28000. saniye (Mor renk)'lerdeki tank içerisindeki termoklin bölgesinin konumu incelendiğinde Şekil 4.9 grafiği elde edilmiştir. Şekil 4.9'daki bu şarj döngüsü grafiğinde düz çizgiler kullanılan akışkan olan HITEC ergimiş tuzunu, kesikli çizgiler ise dolgu malzemesi olarak seçilen Kofalit'i temsil etmektedir. Şekil 4.9'daki grafikten de anlaşılacağı üzere tanka giren ergimiş tuzun sıcaklığını gün boyu sabit ve 873 K olarak kabul ettiğimizde 8 saatin sonunda tankın tamamına yakınının sıcak duruma geldiğini gözlemlemiş bulunmaktayız.

Termoklin konumunun deşarj döngüsünde zamanla nasıl davrandığını gözlemleyebilmek için gerekli denklemler MATLAB'de çözüldükten sonra elde edilen grafik Şekil 4.10'de gösterilmiştir.

Dikkat edilmesi gereken şarj döngüsünde tanka girişin konumun sıfır olduğu yerden yani tankın alt tarafından (Şekil 4.10'un sol tarafı) olduğu, deşarj döngüsünde ise konumun 5m olduğu yerden yani tankın üst tarafından (Şekil 4.10'un sağ tarafı) olmasıdır.

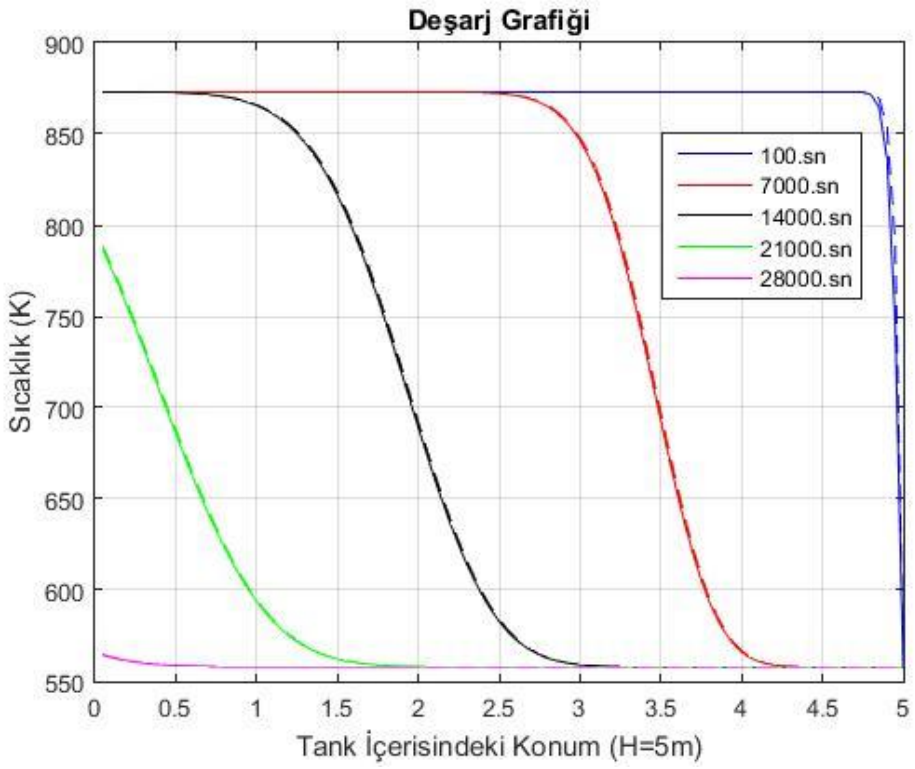


Şekil 4.9: Şarj döngüsü içerisindeki termoklin konumunu gözlemleyebilmek için belirli zamanlardaki sıcaklık konum grafiği.

Şekil 4.10'daki deşarj grafiğinde tankın sağ tarafından soğuk akışkan girişi olduğu için eğri zamanla sola doğru yani dikey tank yerleşiminde termoklin bölgesi yukarı doğru kaymaktadır. Şekil 4.10'da mavi çizgi 100. saniyedeki konumu, kırmızı çizgi 7000. saniyeyi, siyah çizgi 14000. saniyeyi, yeşil çizgi 21000. saniyeyi, mor renk ise 28000. saniyeyi ifade etmektedir. Şekil 4.10'da da görüldüğü üzere 8. Saatin sonunda tank çok küçük bir kısım hariç soğuk durumdadır.

4.8 Parametre Değişiklikleri ve Depolama Sistemine Etkileri

Bu başlık altında depolama tankına etki eden parametreler ayrı ayrı başlıklar altında açıklanmıştır. Açıklanan bu değişkenler için optimum olanlar karşılaştırma yöntemiyle belirlenmeye çalışılmıştır.

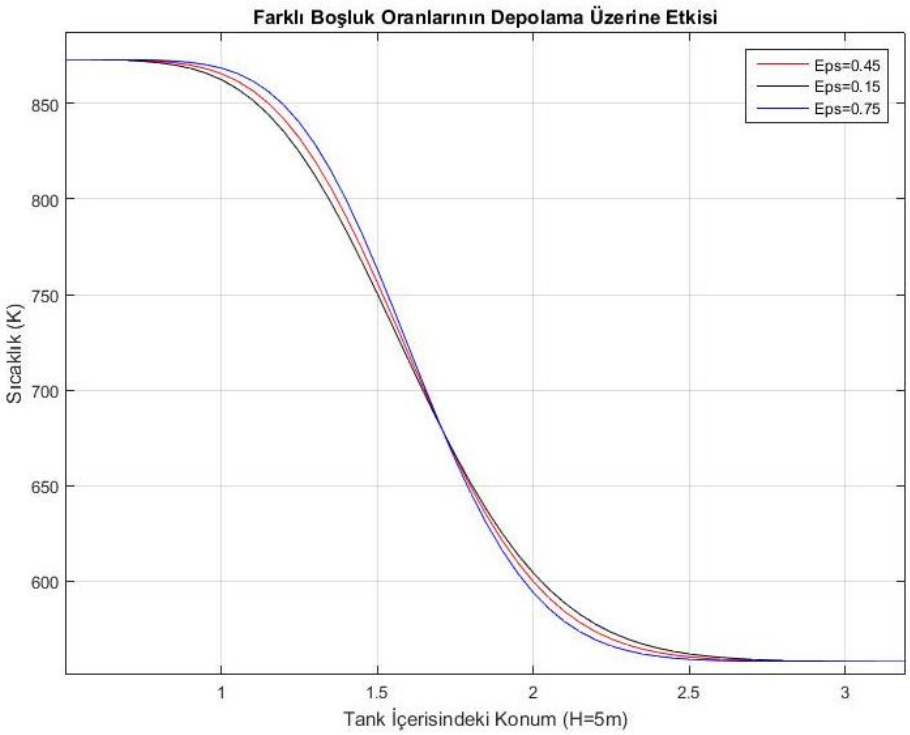


Şekil 4.10: Deşarj döngüsünde tank içerisindeki termoklin konumunu gözlemleyebilmek için belirli zamanlardaki sıcaklık konum grafiği**.**

4.8.1 Boşluk oranı (Ɛ)

Çalışmada tank içerisindeki sıvı-katı oranının termoklin bölgesine etkisi incelenmiştir. Matlab modeli içerisinde hali hazırda belirlenen Ɛ=0.45 değerinin yanı sıra sırasıyla Ɛ=0.15 ve Ɛ=0.75 değerleri için de denklemler çözülmüş ve Şekil 4.11 elde edilmiştir. Grafikler incelendiğinde boşluk oranı (Ɛ) değerinin en büyük olduğu değerin (mavi renkli eğrinin) eğiminin en fazla olduğu görülmektedir. Bu sonuç, Ɛ değeri arttıkça yani tank içerisindeki tuz oranı arttıkça termoklin bölgesinin kalınlığının azaldığı anlamına gelmektedir. Termoklin bölgenin sıcaklığı ortalama bir sıcaklık olduğu için geniş olması istenmemektedir. Ara sıcaklık değerlerinde depolama sistemi kullanıldığında akışkanla sistem arasındaki ısı geçişinin, katmanlanmış duruma göre daha az olmasına neden olacağı için (sıcaklık farkı (ΔT) az olacağı için) sistemin düşük verimle çalışmasına neden olacaktır.

Gerçek uygulamada bu kadar farklı boşluk oranlarının birbirine bu kadar yakın sonuç eğrileri vermesi beklenmemektedir. Teorik çalışmada eğrilerin birbirine bu kadar yakın çıkmasının nedeni kullanılan ergimiş tuzun ve dolgu malzemesinin Cp'lerinin birbirine yakın olmasıdır.



Şekil 4.11: Farklı boşluk oranlarında termoklin davaranışı.

4.8.2 Farklı akışkanların kullanılması

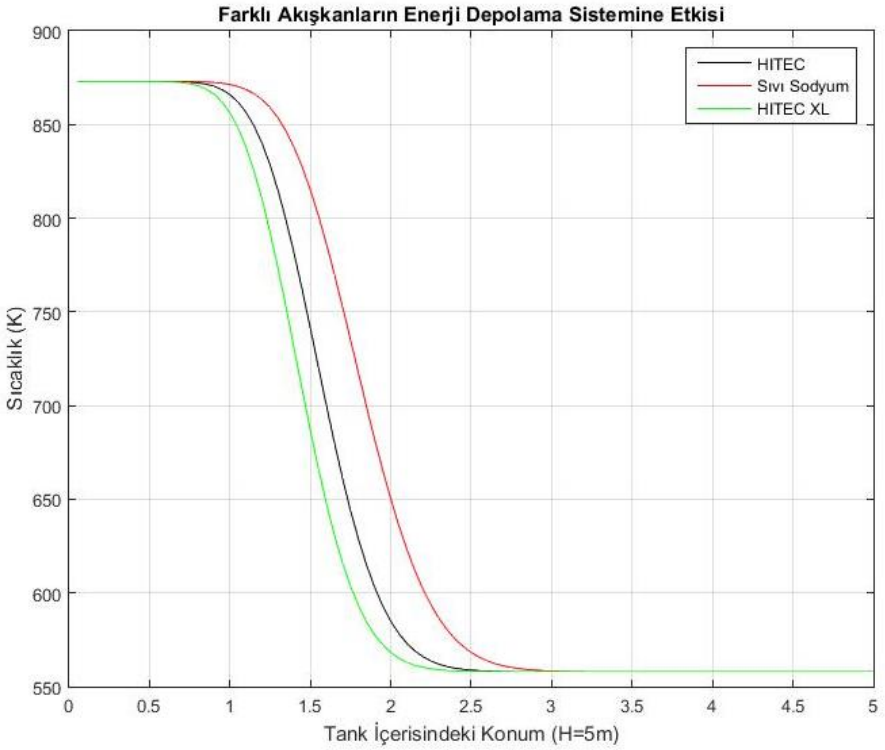
Bu çalışmada önceki kısımda belirtildiği üzere akışkan olarak %40 $NaNO_2$, %53KNO_3 ve %7 $NaNO_3$ karışım oranına sahip HITEC ergimiş tuz kullanılmıştır. Bu tuza alternatif olarak yine aynı firmanın geliştirdiği bir tuz olan HITEC XL veya sıvı sodyum kullanılsaydı tank içerisindeki termoklin bölgesinde nasıl bir değişim olduğu incelenmiştir. Akışkanlara ait termal özellikler Çizelge 4.3'te verilmiştir.

Çizelge 4.3: Karşılaştırılan malzemelerin termal özellikleri [16].

Malzeme	ρ(kg/m^3)	Cp(J/kg K)	k(W/m K)
HITEC	1790	1560	0.33
HITEC XL	1990	1445	0.52
Sıvı Sodyum	750	1260	67.5

Şekil 4.12'de siyah renk HITEC'i, yeşil renk HITEC XL ergimiş tuzunu, kırmızı renk ise sıvı sodyumu temsil etmektedir. Sıvı sodyumda termoklin bölgesi biraz daha geniştir ve tek tanklı depolama sistemlerinde istenilmeyen bir durumdur. Sistemde

akışkan olarak sıvı sodyum kullanılması durumunda aynı süre zarfı sonunda (7000 sn.) sıcak bölgenin daha büyük bir alan kapladığı, termoklin bölgesinin de HITEC XL ergimiş tuzunun kullanıldığı duruma göre biraz daha geniş bir bölgede olmasına rağmen yaklaşık 2 metre daha aşağıda olduğu gözlemlenmiştir. Toplam tank boyunun 5 metre olduğu da göz önüne alınırsa, en iyi akışkanın sıvı sodyum olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 4.12: Farklı akışkanların aynı süre ve şartlarda termoklin bölgelerinin konumları.

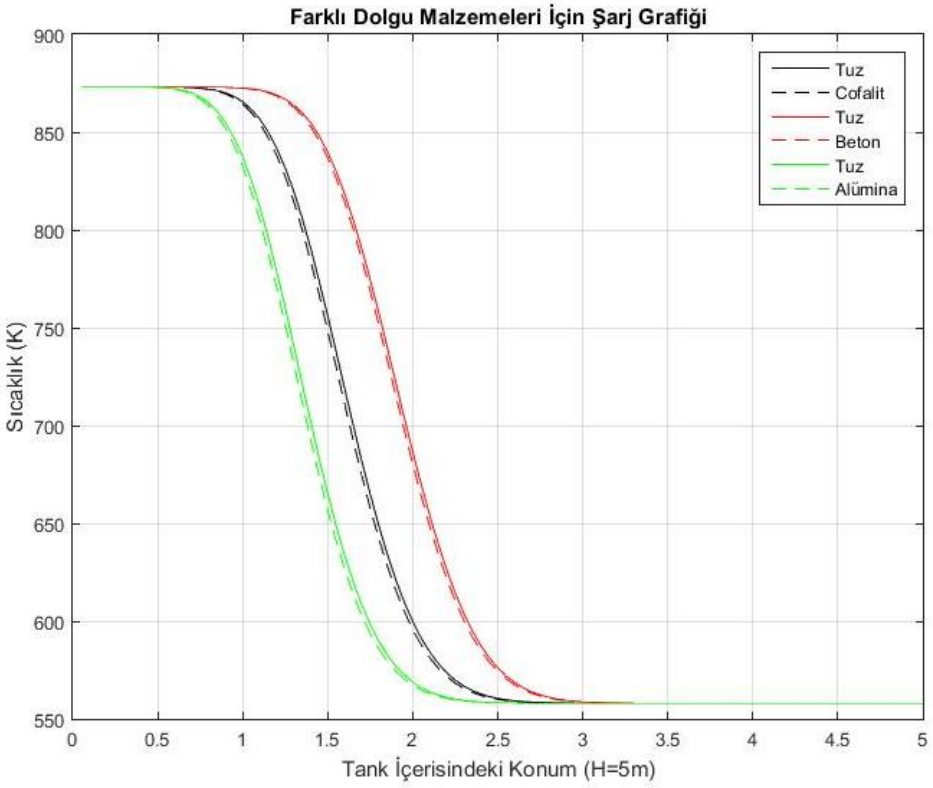
4.8.3 Farklı duyulur ısı depolama katılarının kullanılması

Şekil 4.13'de Kofalit'e alternatif olarak, Beton ve Alümina (Alüminyum oksit-AL_2O_3) seçilerek karşılaştırılmıştır. Bu malzemelere ait termal özellikler Çizelge 4.4'te gösterilmiştir.

Şekil 4.13'de yeşil renk Alümina'yı, siyah renk Kofalit'i, kırmızı renk ise betonu temsil etmektedir. Grafikten de görüldüğü üzere bu üç farklı depolama katısı arasında büyük farklar yoktur. Beton seçilen durumda diğer iki duruma göre daha iyi bir performans gösterildiği gözlemlenmiştir. Burada önemli olan seçilecek katının maliyeti ve kolay bulunabilir olmasıdır.

Çizelge 4.4: Karşılaştırılan malzemelerin termal özellikleri [35].

Malzeme	Yoğunluk (kg/m^3)	Özgül Isı Kapasitesi (J/kg K)	Isı İletim Katsayısı (W/m K)
Kofalit	3120	860	2.7
Beton	2200	850	1.5
Alümina(AL_2O_3)	4000	900	11



Şekil 4.13: Farklı katıların aynı süre ve şartlarda termoklin konumları.

5. SONUÇ VE DEĞERLENDİRMELER

Bu tez çalışması ile; tek tanklı termoklin enerji depolama sistemlerinin tasarlanması aşamasında yararlanılabilecek, basitleştirilmiş yaklaşımı ile hızlı ve yeterli doğrulukta sonuçlar veren bir modelin geliştirilmesi hedeflenmiştir. Bu hedef doğrultusunda yapılan literatür araştırmasında daha önceden yapılan çalışmalarda tek boyutlu (1D) modellerin iki (2D) ve üç boyutlu (3D) modellere göre daha kolay çözülebildiği, ayrıca hızlı ve yüksek doğrulukta çözümler elde edildiği görülmüştür. Depolama sistemi içerisinde kullanılacak akışkan ve katı depolama maddeleri için seçenekler ayrıntılı şekilde araştırılmış, mevcut benzer sistemlerde kullanılan malzemeler ve henüz sistemlerde kullanılmamış olan ama potansiyel vaadeden yeni malzemeler de çalışma kapsamında incelenmiştir. Yapılan değerlendirmelerin sonucunda sistemin duyulur ısı enerji depolama sistemi olmasına karar verilmiştir. Sistem maliyetinin düşürülebilmesi için ısı transfer akışkanının yanı sıra katı depolama malzemesinin de kullanılması planlanmıştır. Bu kapsamda akışkan olarak ergimiş tuz (HITEC), depolama katısı olarak da Kofalit seçilmiştir.

Model belirlenirken asıl amaç tank içerisindeki sıcaklık dağılımının gözlemlenebilmesi ve tankın şarjı-deşarı için gereken sürelerin belirlenmesidir. Bu süreler belirlenebildikten sonra santral daha optimum şekilde çalıştırılabilir. Yine bir diğer yapılan çalışma, belirlenen tank içerisinde seçilen akışkan ve katı malzemenin ne kadar kapasitede enerji depolayabileceğinin hesaplanmasıdır. Bu hesap çalışma içerisinde yapılarak depolama sisteminin kapasitesi belirlenmiştir. Tez kapsamında çözümü üzerine çalışılan matematiksel denklemler Schumann'ın geliştirmiş olduğu, hem katı fazın hem de akışkan fazın hesaplanabildiği denklemlerdir. Bu iki faz denkleminin eş zamanlı çözümü oldukça zordur. Bu zorluktan dolayı denklemler boyutsuz zaman ifadesine bağlı olan tek bir diferansiyel denkleme indirgenmeye çalışılmıştır. Denklemlerin çözümü için özgün boyutsuz sayılar yöntemi ve indirgenmesinde de John A. Duffie'nin "Solar Engineering of Thermal Processes" adlı kitabında da kullanılan Boyutsuz transfer birimi sayısı (NTU) metodu kullanılmıştır.

Denklemler ayrıklaştırıldıktan sonra şarj ve deşarj döngülerinin çözümü için MATLAB programından yararlanılmıştır. Değişkenler programa tanımlandıktan sonra çalışmanın 4.1 Şarj döngüsünün çözümü ve 4.2 Deşarj döngüsünün çözümü başlıklarında elde edilen denklemler ana koda eklenmiştir. Başlangıç koşulları ve sınır koşulları da aynı kısım içerisinde belirlenerek koda eklenmiştir. Programın çalıştırılmasıyla tank içerisindeki şarj (Şekil 4.9) ve deşarj (Şekil 4.10) için sıcaklık zaman dağılımı grafikleri başarıyla elde edilmiştir. Bu grafiklere göre çalışma kapsamında tasarlanan tek tank termoklin enerji depolama sistemi yaklaşık olarak 8 saatte şarj olmakta; aynı şekilde depolanan bu enerji, kayıplar ihmal edildiği için yaklaşık olarak 8 saat boyunca kullanılabilmektedir. Çalışmanın ele aldığı bir başka kısım ise parametre değişikliklerinin depolama sistemi üzerindeki etkilerinin gözlemlenmesi ve yorumlanmasıdır. Bu kapsamda farklı ısı transferi akışkanları karşılaştırılmış ve hangi akışkanın sistem için daha avantajlı olacağı belirlenmeye çalışılmıştır. Karşılaştırması yapılan akışkanlar arasında en avantajlı akışkanın sıvı sodyum olduğu gözlemlenmiştir. Etkisinin gözlemlenmek istendiği bir diğer parametre ise depolama katısıdır. Bu kapsamda kullanım potansiyeli olan farklı depolama malzemeleri belirlenmiş ve karşılaştırılmıştır. Son olarak tank içerisindeki katı-sıvı oranının depolama sistemi performansı üzerine etkisi anlaşılmaya çalışılmıştır. Bu orana, sistem tasarımı yapılırken optimum çalışma şartlarının belirlenmesi aşamasında ihtiyaç duyulmaktadır. Karşılaştırma sonucunda ergimiş tuz – Kofalit ikilisinden oluşan depolama sisteminde ergimiş tuz oranı arttıkça termoklin bölgesinin inceldiği gözlemlenmiştir. Bu sonuç farklı termal özelliklerdeki malzemeler kullanıldığında farklı olacaktır.

Bu çalışma ileride yapılabilecek çalışmalara temel olma hedefiyle hazırlanmıştır. Tasarlanan model hızlı ve belirli bir hata payı içerisinde sonuç veren pratik yaklaşıma sahip bir modeldir. Daha detaylı tasarımların ve sonuçların elde edilebilmesi için gelecek çalışmalarda modelin boyut sayısı arttırılabilir, ihmal edilen ısı alışverişleri (tank içerisinde ve çevreyle olan) ve diğer kayıplar göz önüne alınabilir, yine bu çalışma kapsamında kabuller dahilinde değerleri belirlenen değişkenler ayrıntılı hesaplamaları yapılarak modele dahil edilebilir.

KAYNAKLAR

[1] **Avrupa Birliği Türkiye Delegasyonu**, «Geleceğe Dair: Paris İklim Anlaşması,» Ağustos 2016. [Çevrimiçi]. Available: https://www.avrupa.info.tr/tr. [Erişildi: 16 Mayıs 2018].

[2] **URL-1**, «https://www.co2.earth/,» [Çevrimiçi]. [Erişildi: 2 Şubat 2018].

[3] **URL-2**, «https://www.iea.org/publications/renewables2017,»2017. [Çevrimiçi]. [Erişildi: 13 Mart 2018].

[4] **C. Tabak, H. Dinçer, K. Karayazı, E. Arslan, M. H. Yıldız ve S. Karayazı**, «Yoğunlaştırıcı Güneş Enerjisi Sistemleri ile Elektrik Enerjisi Üretimi,» %1 içinde *III.Enerji Verimliliği ve Kalitesi Sempozyumu Bildirileri*, Kocaeli, 2009.

[5] **URL-3**, «http://www.yilsanholding.com/tr-TR/greenway/313608,» [Çevrimiçi]. [Erişildi: 1 Mayıs 2018].

[6] **H. Livatyalı**, *Yoğunlaştırlmış Güneş Enerjisi Teknolojileri,* Kocaeli: Tübitak MAM, 2011.

[7] **URL-4**, «http://www.solarmillennium.de/english/archives/technology/references-and-projects/andasol-spain/index.html,» [Çevrimiçi]. [Erişildi: 28 Nisan 2018].

[8] **C. Zanaboni**, «Study of a High-Temperature Thermal Energy Storage for a Hybrid Solar-Gas Power Plant,» *POLITECNICO DI MILANO*, p. 12, 2011.

[9] **URL-5**, «https://www.power-technology.com/projects/maricopasolarplantar/,» [Çevrimiçi]. [Erişildi: 1 Mayıs 2018].

[10] **I. Glendenning**, «Compressed Air Storage,» *Phys. Technol.. Vol. 12,* pp. 103-110, 1981.

[11] **İ. Dinçer ve M. Rosen**, Thermal Energy Storage Systems and Applications, Ontario, Canada: Wiley, 2011.

[12] **A. Gil, M. Medrano, I. Martorell, A. Lazaro, P. Dolado ve B. Zalba**, «State of the art on high temperature for power generation. Part 1- Concepts, materials and modellization,» *Renewable & Sustainable Energy Reviews,* pp. 14, 31-55, 2010.

[13] **M. Cascetta, G. Cau, P. Puddu ve F. Serra**, «Numerical Investigation of a Packed Bed Thermal Energy Storage System with Different Heat Transfer Fluids,» *Energy Procedia Volume 45,* pp. 598-607, 2014.

[14] **I. Dincer ve S. Dost**, «A Perspective on Thermal Energy Storage Systems for Solar Energy Applications,» *Int. J. Energy Res., 20,* pp. 547-557, 1996.

[15] **Z. Garimella ve S. V. Yang**, «Thermal Analysis of Solar Thermal Energy Storage in a Molten-Salt Thermocline,» *Solar Energy Vol. 84,* pp. pp. 974-985, 2010.

[16] **D. Y. Goswami**, Principles of Solar Engineering Third Edition, Boca Raton,FL: CRC Press Taylor & Francis Group, 2015.

[17] **URL-6**, «http://www.yelizkonuklu.com/?p=69,» [Çevrimiçi]. [Erişildi: 19 Nisan 2018].

[18] **J. Pacheco, S. K. Showalter ve W. J. Kolb**, «Development of a Molten-Salt Thermocline Thermal Storage System for Parabolic Trough Plants,» *J. Sol. Energy Eng*, no. 124, 2002.

[19] **P. Alto**, Solar Thermocline Storage Systems: Preliminary Design Study, CA: Electric Power Research Institute. , 2010.

[20] **P. Li ve C. L. Chan**, THERMAL ENERGY STORAGE ANALYSES AND DESIGNS, Cambridge: Elsevier, 2017 .

[21] **C. Libby**, «Solar thermocline storage systems: preliminary design study,» EPRI, 2010.

[22] **D. Brosseau, J. Kelton, D. Ray, M. Edgar, K. Chisman ve B. Emms**, «Testing of thermocline filler materials and molten-salt heat transfer fluids for thermal energy storage systems in parabolic trough power plants,» *J Solar Energy Eng-Trans ASME,* p. 127:109–16, 2005.

[23] **K. Hollands ve M. F. Lightstone**, «A review of low-flow, stratified-tank solar water heating systems,» *Solar Energy, vol. 43, no. 2,*, pp. pp. 97-105, 1989.

[24] **P. Li, J. Van Lew, W. Karaki, C. Chan, J. Stephens ve Q. Wang**, «Generalized charts of energy storage effectiveness for thermocline heat storage tank design and calibration,» *Solar Energy,* no. 85, pp. 2130-2143, 2011.

[25] **M. Haller, C. Cruickshank, W. Streicher, S. J. Harrison, E. Andersen ve S. Furbo**, «Methods to determine stratification efficiency of thermal energy storage processes – review and theoretical comparison,» *Sol. Energy, 83,* pp. 1847-1860, 2009.

[26] **W. Delameter ve N. Bergen**, «Review of molten salt electric experiment: Solar central receiver project,» 1986.

[27] **J. e. a. Chavez**, «The solar two power tower project: A 10 MWe power plant. Proceedings of the IECEC 2,» *ASME,* p. 469–475, 1995 .

[28] **M. Z. Yılmazoğlu**, «Isı Enerjisi Depolama Yöntemleri ve Binalarda Uygulanması,» *Journal of Polytechnic Vol: 13 No: 1,* pp. 33-42, 2010.

[29] **X. Py, N. Calvet, R. Olives, P. Echegut, C. Bessada ve F. Jay**, «Thermal storage for solar power plants based on low cost recycled material,» %1 içinde *EFFSTOCK, the 11th International Conference on Thermal Energy Storage*, Stockholm, Sweden, June 14-17, 2009.

[30] **Z. Chang, X. Li, C. Xu, C. Chang ve Z. Wang**, «The design and numerical study of a 2MWh molten salt,» *Energy Procedia 69,* p. 779 – 789, 2015.

[31] **R. Bayon ve E. Rojas**, «Simulation of thermocline storage for solar thermal power plants: from dimensionless results to prototypes and real size tanks,» *Int. J. Heat Mass Transfer*, p. 60:713–21, 2013.

[32] **T. E. W. Schumann**, «Heat Transfer: A Liquid Flowing through a Porous Prism,» *Journal of The Franklin Institute, Vol.208,* pp. 405-416, 1929.

[33] **J. A. Duffie ve W. A. Beckman**, Solar Engineering of Thermal Processes, Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2013.

[34] **J. T. Van Lew, P. Li, C. L. Chan, W. Karaki ve J. Stephens**, «Transient Heat Delivery and Storage Process in a Thermocline Heat Storage System,» *ASME 2009 International Mechanical Engineering Congress and Exposition,* 2009.

[35] **T. Esence, A. Bruch, S. Molina, B. Stutz ve F. Fourmigue**, «A review on experience feedback and numerical modeling of packed-bed thermal energy storage systems,» *Solar Energy,* pp. 629-654, 2017.

ÖZGEÇMİŞ



Ad-Soyad : Asım Ongun HENGİRMEN

Doğum Tarihi ve Yeri : 03.10.1991/ GAZİANTEP

E-posta : asimhengirmen@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

09.2010-08.2015 İstanbul Teknik Üniversitesi Makine Fakültesi
Makine Mühendisliği (Lisans)
Bitirme Tasarım Projesi: PV Panellerin Soğutmaya Bağlı Performans Değişiminin İncelenmesi ve Isıl ve Elektriksel Geri Kazanım Sistem Tasarımı, Mayıs 2015

09.2006-06.2009 Gaziantep Kolej Vakfı Özel Fen Lisesi (Tam Burslu)

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

05.2016-05.2018 Greenway CSP, Proje Mühendisi
İTÜ ARI Teknokent, İstanbul/Türkiye

11.2015-05.2016 Bosch Rexroth Drive & Control Company, Satış Proje Mühendisi
Kocaeli, Türkiye

06.2012-09.2012 Grundfos Manufacturing Ltd, Stajyer,
Tatabanya/ Macaristan

06.2011-07.2011 Türbosan Türbomakinalar San. ve Tic. A.Ş, Stajyer,
Kocaeli/ Türkiye