



# Duyulur Isıl Enerji Depolama Sistemlerinin Enerji Yönünden İncelenmesi

Deniz Yıldırım Yalçınkaya<sup>\*1</sup>, Hüseyin Günerhan<sup>2</sup>, Arif Hepbaşlı<sup>3</sup>, Hourieh Bayramian<sup>4</sup>

## ÖZ

Güneş enerjisi kullanılan sistemlerde aralıklı çalışma şartlarının sakıncasını azaltmak için güneş ışınlarının yeterli olduğu saatlerde güneş enerjisini depolamak ve daha sonra ısıtma uygulamalarında kullanılmak bir ısı enerji depolama sistemi (IED) ile mümkün olabilir. Bu çerçevede güneş enerjisinin sürdürülebilirliğini sağlamak için IED uygulamaları yaygın olarak kullanılabilir. Bu çalışmada önce bu yöntemlerinden birisi olan duyulur ısı enerjisi depolama (DIED) sisteminin özellikleri üzerinde ayrıntılı olarak duruldu. Sonra bu sistemin enerji analizi bağlantıları sunuldu. Daha sonra, bazı DIED uygulamaları açıklandı. Sonunda, bazı önerilerde bulunurken ana sonuçlar verildi. Duyulur ısı IED tankının ısı davranışını değerlendirmek için en kritik parametrelerden birinin ısı tabakalaşma olduğu sonucuna varılabilir.

**Anahtar Kelimeler:** Isıl enerji depolama, ısı tabakalaşma, duyulur ısı enerji depolama

## Investigation of Sensible Thermal Energy Storage Systems in Terms of Energy

### ABSTRACT

In order to reduce the drawback of intermittent operating conditions in systems using solar energy, it may be possible to store solar energy during hours when sunlight is sufficient and then using it in heating applications with a thermal energy storage system (TES). In this context, TES applications can be widely used to ensure the sustainability of solar energy. In this study, basic elements of sensible heat energy storage (STES) system, which is one of these methods, were comprehensively treated first. Next, energy analysis relations of this system are presented. Some applications of STES were then described. Finally, main concluding remarks were given while some recommendations were made. It may be concluded that one of the most critical parameters for evaluating the thermal behavior of the sensible heat TES tank is thermal stratification.

**Keywords:** Thermal energy storage, thermal stratification, sensible thermal energy storage

\* İletişim Yazarı

Geliş/Received : 13.06.2021

Kabul/Accepted : 25.10.2021

<sup>1</sup> Doktora öğrencisi, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, Bornova, İzmir denizyildirim198748@gmail.com, ORCID: 0000-0002-0018-217X

<sup>2</sup> Prof. Dr., Ege Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Bornova-İzmir hsyngnrhn@gmail.com, ORCID: 0000-0003-4256-2418

<sup>3</sup> Prof. Dr., Yaşar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü-İzmir arif.hepbasli@yasar.edu.tr, ORCID: 0000-0002-2074-8281

<sup>4</sup> Doktora öğrencisi, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, Bornova-İzmir hourieh.bayramian@gmail.com ORCID: 0000-0002-8424-9182



## EXTENDED ABSTRACT

Thermal energy storage; It is divided into three as sensible heat, latent heat and chemical energy. Sensible heat storage (STES); It is the amount of energy released or absorbed by the materials (water, thermal oils, sand, rock, ground, soil, brick, etc.) as a result of increasing and decreasing temperatures. In these systems, the temperature change and heat capacity of the material are utilized. STES is mainly used for low-grade heat, short/seasonal storage and industrial thermal processes such as solar power or waste heat from power generation plants.

STES systems are divided into short-term (day/night) and seasonal storage (summer/winter) in terms of usage time. For short-term storage, water, oil, molten salts, molten metals, bricks, sand and soil, etc. There are a number of storage media such as Large aquifers, rock beds, solar pools and large tanks are used for seasonal storage. This storage can storage heat in summer for use in winter and can cold storage in winter to meet cooling demand in summer.

The STES system consists of a storage medium and input/output devices, and energy is stored by varying the temperature of the storage medium. The amount of energy stored by a STES assembly is proportional to the difference between the storage inlet and outlet temperatures, the mass of the storage medium, and the heat capacity of the medium.

One of the most suitable designs created by using water and rock together is the Harry Thomasson method. The water tank is surrounded by rocks through which the air to be supplied to the area to be heated passes; The entire system is surrounded by insulated walls. The advantage of this system is the large heat capacity of water and the use of air and rocks that increase the heat transfer surface.

One of the most critical parameters to evaluate the thermal behavior of the sensible heat storage tank is thermal stratification. In a study, a comparison was made between the highly stratified and fully mixed (unstratified) water tank used in many solar energy utilization systems. The energy storage efficiency and the entire system can be increased by 6 % and 20 % respectively. For seasonal storage, the average net energy efficiency can be improved by 60 %.

One of the proposed models is the three-zone temperature distribution model. This model is realistic, flexible and comfortable to use. Furthermore simulates particularly well the stratification distribution in most real storage fluids, which have lower and upper regions of slightly varying or approximately constant temperature and a middle region (thermocline region) where the temperature varies greatly.

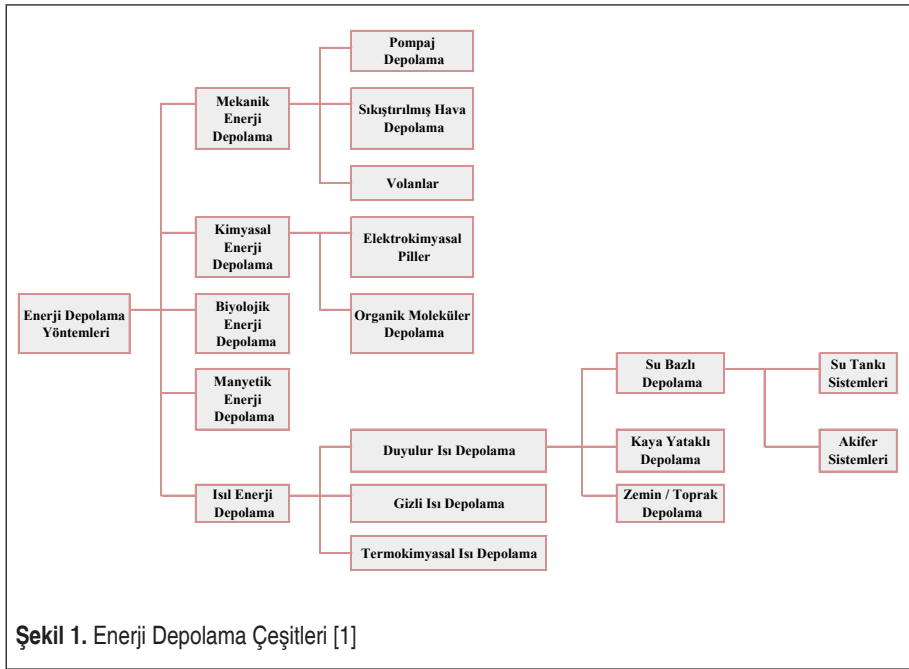
The jacket heat exchanger, one of the common heat transport mechanisms used in water tanks, has a large heat transfer area and this can be useful to support thermal stratification. In addition, three low-flow solar water heating systems with various types of heat exchangers were investigated in the studies carried out. Vertical mantle type was found to outperform the immersed tube, outer shell and tube changer types.

As a thermal energy storage medium, water has excellent specific heat and is also inexpensive and chemically stable. The cost-effective TES material is rock, but its capacity is half the water. Previous studies have shown that the rock containment location is practical and the most important advantage is that it can be easily used to store heat above 100 °C. Air generally has low thermal conductivity and low thermal capacity. In addition, the volume it needs to store heat is larger. Environmental factors such as embodied energy and greenhouse gas emissions are also taken into account in the use of STES materials suitable for high temperature (> 500 °C) TES systems. Suitable materials include ceramics such as alumina, magnesia and composites such as high alumina concretes, silicon carbide, graphite and ferrous metals (cast iron and stainless steel). Molten salts are used commercially in STES, but are unstable above about 600 °C.

To prevent water sealing to increase TES efficiency, technologies need to be developed that can minimize heat losses from steam propagation through walls and optimize stratification within the tank. Issues such as using water vapor or different gases instead of air as HTF for the thermal energy storage system and examining the effects of insulation thickness should also be considered. Factors affecting tank performance and thermal stratification; fluid mass flow rate, storage tank geometric structure, a higher aspect ratio, storage material and heat transfer fluid properties, fluid inlet temperature, etc. should be considered together. It is necessary to increase the desired heat transfer by adjusting parameters such as thermal insulation change, heat exchanger material structure and fluid flow rates, and to examine the effects on TES efficiency by making sensitivity analysis.

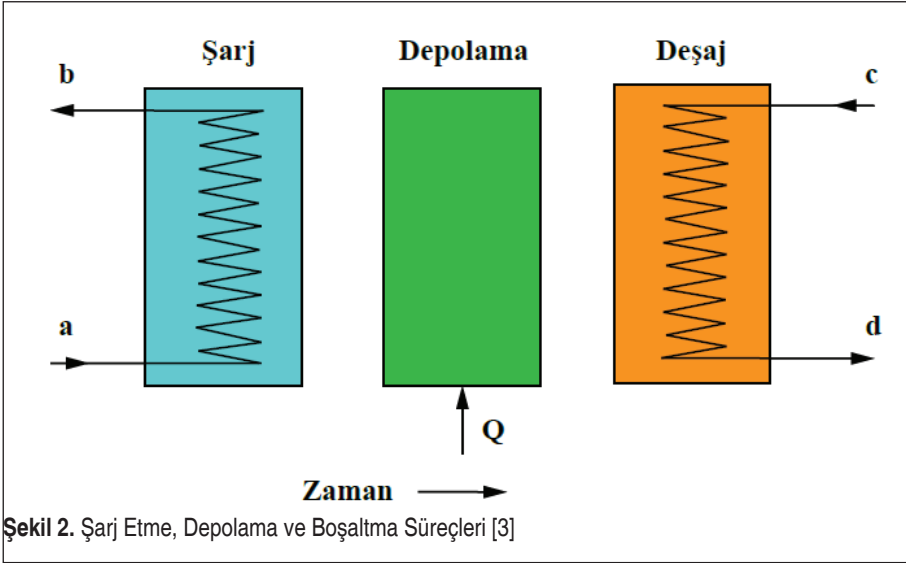
## 1. GİRİŞ

Dünyada meydana gelen iklim değişikliği, çevresel faktörler, fosil yakıtların giderek tükenmesi ve çevreye olan zararlar nedeniyle, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı oldukça önem kazanmıştır. Bununla birlikte rüzgar ve güneş enerjisi gibi birçok yenilenebilir enerji kaynağı doğada kesintili olduğu için çözüm olarak enerji depolama sistemleri kullanılmaktadır. Bu enerji depolama sistemleri mekanik, ısıl, kimyasal, biyolojik ve manyetik olarak sınıflandırılabilir (Şekil 1) [1]. Bu yöntemler arasında yer alan ısıl enerji depolama (IED) güneş enerjisini etkili bir şekilde depolar. IED uygulama aralığı, yüksek sıcaklık seviyesinde güneş enerjisi depolamasından ısıtma, havalandırma ve iklimlendirme ve düşük sıcaklık seviyesinde soğutmaya kadar genişler [2].



IED sistemlerinin seçimi temel olarak gerekli depolama süresine (günlük veya mevsimsel), ekonomik uygulanabilirliğine ve çalışma koşullarına bağlıdır ve üç süreçten oluşur: şarj etme, depolama ve boşaltma (Şekil 2) [3]. Bazı sistemlerde, süreçlerin bazıları eşzamanlı olarak gerçekleşebilir ve her süreç, her depolama döngüsünde birden fazla kez gerçekleşebilir [1].

IED sistemleri; duyulur ısı, gizli ısı ve kimyasal enerji olarak üçe ayrılır. Duyulur ısı depolama (DIED); malzemelerin (su, ısıl yağlar, kum, kaya, zemin, toprak, tuğla



Şekil 2. Şarj Etme, Depolama ve Boşaltma Süreçleri [3]

vb.) sıcaklıklarının artıp azalması sonucu kendileri tarafından açığa çıkan veya emilen enerji miktarıdır. Bu sistemlerde malzemenin sıcaklık değişimi ve ısı kapasitesinden faydalanılır. DIED temel olarak güneş enerjisi veya elektrik üretim tesislerinden gelen atık ısı gibi düşük dereceli ısı, kısa / mevsimsel depolama ve endüstriyel ısı prosesler için kullanılır. Gizli ısı depolama; malzeme fazı katıdan sıvıya geçtiğinde açığa çıkan ısıdır. Bu amaçla kullanılan malzemelere faz değiştiren malzemeler (PCM) denir. Faz değiştiren malzemelerin kullanıldığı (tuz hidratlar ve organik maddeler gibi) gizli ısı depolama sistemleri kısa süreli depolama için uygundur. DIED sistemleri gizli ısı depolamaya göre daha olgun, ekonomik ve birçok endüstriyel uygulamaya sahip bir tekniktir. Termokimyasal depolama (inorganik maddeler vb.) güneş enerjisi uygulamaları için kimyasal reaksiyonları içeren bir depolama tekniğidir ve hala gelişim aşamasındadır [4].

## 2. KISA SÜRELİ VE MEVSİMSSEL DEPOLAMA

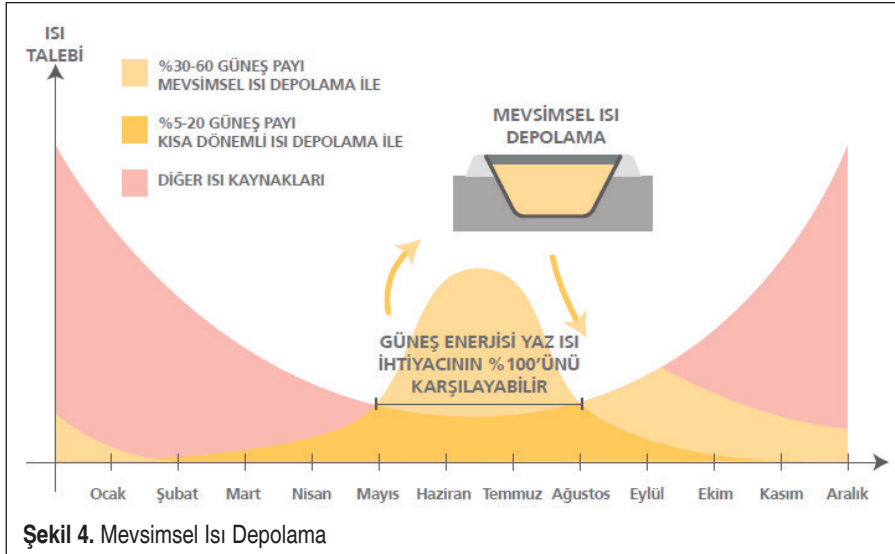
Isıl enerji depolama, kullanım süresi bakımından kısa süreli (gündüz/gece) ve mevsimsel depolama (yaz/kış) olarak ikiye ayrılır. Kısa süreli depolama için, pratikte dik-kate alınan su, yağ, erimiş tuzlar, erimiş metaller, tuğlalar, kum ve toprak vb. gibi bir dizi depolama ortamı vardır. Bu depolamanın avantajı elde edilen enerjinin ihtiyaca göre belirli bir miktarının birkaç saat veya günlük olarak geçici depolaması ve bulutlu dönemlerde de günlük ısı sağlayabilmesidir [5]. Mevsimsel depolama için büyük akiferler, kaya yatakları, güneş havuzları ve büyük tanklar kullanılmaktadır [6]. Bu depolama, kışın kullanım için yazın ısıyı depolayabilir veya yazın soğutma talebini



Şekil 3. Çukur Isıl Enerji Depolama Uygulaması, Langkazi, Tibet, Çin [Fotoğraf: Arcon-Sunmark]

karşılmak için kışın soğuk depolama yapabilir. Mevsimsel ısı depolamanın bir başka uygulama şekli olan çukur ısı enerji depolamada toprağa kazılan büyük bir su deposu kullanılır (Şekil 3).

Mevsimsel depolama; güneş kaynaklı bölgesel ısıtma (SDH) uygulamalarında da kullanılmaktadır. SDH; bir yerleşim merkezinin ısı şebekesine güneş enerjisi sağlayan geniş bir güneş kolektör alanıdır ve tüm konutların ısıtma ihtiyaçlarını karşılamak için ek enerji sağlayan bir ısıtma merkezi ile desteklenir. Bu uygulamanın avantajlarından

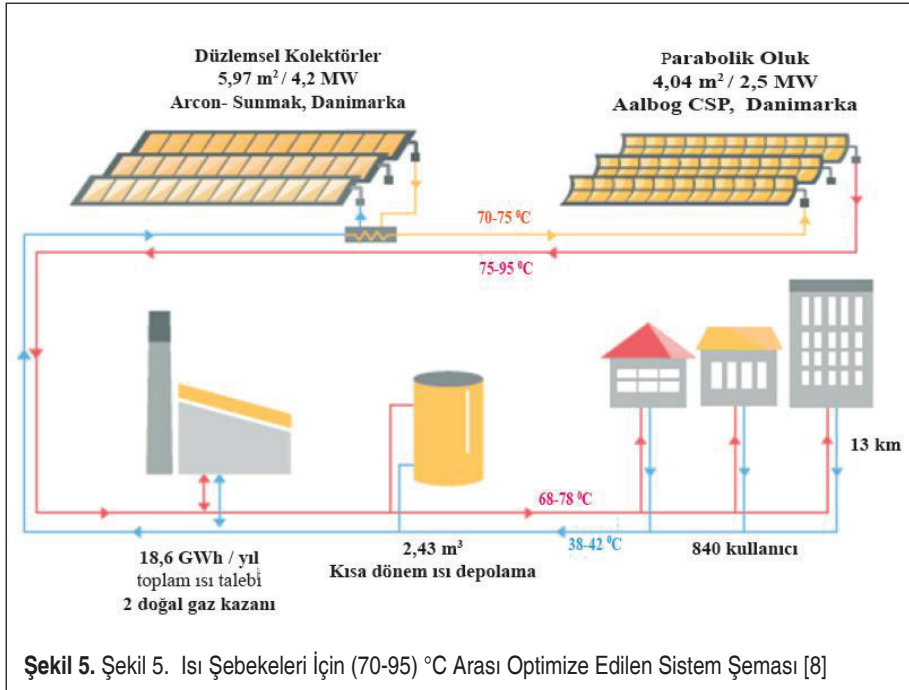


Şekil 4. Mevsimsel Isı Depolama

biri güneş enerjisi yıllık ısı talebinin % 20'ye yakın kısmını karşılayabilmesidir (Şekil 4). Mevsimsel depolama; SDH uygulamalarındaki güneşin payını minimum % 60 artırabilir [7].

Uygulama örneklerinden biri olan Danimarka'da güneş ışınımı yoğun olmamasına rağmen, 113 yerleşim yeri güneş enerjisinden ısı kullanmaktadır. Dünyanın en büyük güneş ısıtma sistemi rekorunu Silkeborg kasabası kırmıştır. Aralık 2016'da devreye alınan sistemin kurulu gücü 110 MW değerindedir. Danimarkada, SDH kapasitesi Ağustos ayında 1 GW değerini aşmıştır. Danimarka'daki (38-42) °C arasındaki şebekenin dönüş hattı birden fazla kolektör tipi kullanılarak (70-95) °C arası ısı şebekeleri için optimize edilmiştir (Şekil 5) [8].

Güneş enerjisinin kullanımını artırmak için, güneş enerjisiyle çalışan kısa süreli düşük sıcaklık (<150 °C) ısı depolama sistemleri yoğun olarak ilgi görmüştür. 2019'da küresel enerji depolama pazarı 183 GW'a ulaşmış olup; son on yıldaki enerji depolama gelişiminin çoğu kısa vadeli uygulamalara odaklanmıştır [9]. Uzun vadeli sistemlere kıyasla, kısa vadeli ısı depolama sistemleri daha fazla yer ve zaman tasarrufu, daha iyi esneklik, daha az ısı kaybı sağlar ve günlük şarj ve deşarj süresine sahip olduğu için çoğunlukla küçük ölçekli kullanım için uygundur [10].



Şekil 5. Isı Şebekeleri İçin (70-95) °C Arası Optimize Edilen Sistem Şeması [8]

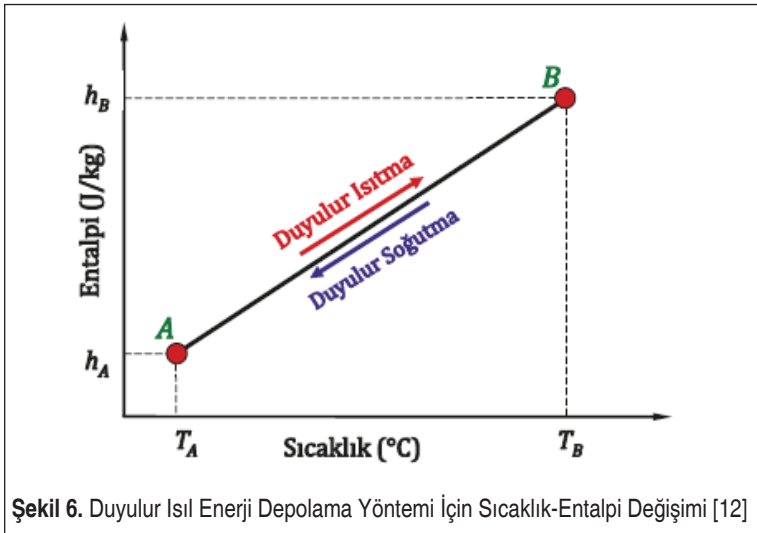
### 3. DUYULUR ISI DEPOLAMA TEMEL UNSURLARI

Duyulur ısı depolama, birçok büyük ölçekli konut uygulaması arasında uygulanan ve değerlendirilen olgun bir teknolojidir [2]. DIED sistemi, bir depolama ortamı ve giriş/çıkış düzeneklerinden oluşur ve depolama ortamının sıcaklığı değiştirilerek enerji depolanır [11]. Bir DIED düzeneği tarafından depolanan enerji miktarı, depolama giriş ve çıkış sıcaklıkları, depolama ortamının kütlesi ve ortamın ısı kapasitesi arasındaki farkla orantılıdır. Her ortamın kendine özgü yararları ve sakıncaları vardır. Örneğin su, kaya (1,3 kJ /kg K) ve toprağın ısı kapasitesinin yaklaşık iki katıdır [4]. Kısa süreli DIED için, pratikte dikkate alınan su, yağ, erimiş tuzlar, erimiş metaller, tuğlalar, kum, toprak vb. gibi çeşitli depolama ortamı vardır (Tablo 1) [13]

Konut uygulamalarında yaygın olarak algılanan ısı depolama malzemeleri için gereksinimler şu şekilde özetlenmiştir:

- yüksek enerji yoğunluğu (yüksek yoğunluk ve özgül ısı);
- iyi termal iletkenlik (0,3 W/mK'den yüksek);
- iyi termal yayılma;
- kolay üretim ve düşük fiyat;
- sıfır ODP etkisi ve düşük GWP etkisi gibi kararlı kimyasal özellikler, düşük korozyon ve düşük çevresel etki faktörleri [2]

Duyulur ısı enerji depolama yöntemine ilişkin sıcaklık- entalpi ilişkisi Şekil 6 ile gösterilmektedir. Bu yöntemde kullanılan malzemelerin yüksek hacimsel ısı kapasitesine ( $C = \rho c$ ) sahip olması gerekir ve yüksek miktarda ısı enerjinin depolanabilmesi için



**Tablo 1.** Potansiyel Duyulur Isı Depolama Malzemeleri Hakkında Yayınlanmış Veriler [13]

$T_{\text{soğuk}}$ (°C)	$T_{\text{sıcak}}$ (°C)	Malzeme	Isıl iletkenlik (W/m K)	Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )	Ortalama özellik ısı kapasitesi $c_p$ (kJ/kg K)	Hacimsel özellik ısı kapasitesi (10 <sup>3</sup> kJ/ m <sup>3</sup> )	Ortam türü
200	300	Kum-kaya-petrol	1	1700	1,3	216	Katı
200	400	Betonarme	1,5	2200	0,85	360	Katı
200	400	Dökme demir	37	7200	0,56	576	Katı
200	500	NaCl	7	2160	0,85	540	Katı
200	700	Çelik döküm	40	7800	0,6	1620	Katı
200	700	Silika ateş tuğlaları	1,5	1820	1	540	Katı
200	1200	Magnesia ateş tuğlaları	5	3000	1,15	2160	Katı
250	350	Sentetik yağ	0,11	900	2,3	205,2	Sıvı
250	450	Nitrit tuzları	0,57	1825	1,5	547,2	Sıvı
270	530	Sıvı sodyum	71	853	1,3	288	Sıvı
300	400	Silikon yağı	0,1	900	2,1	187,2	Sıvı
180	1300	Lityum sıvı tuz	38,1	510	4,19		Sıvı
15	400	Dowtherm A	155°C'de 0,1171	867	2,2		Sıvı
0	345	Therminol 66		750	2,1		Sıvı

depolama malzemesinin kütlelerinin de artırılması gerekir. Bu yüzden bu yöntemin sınırlı hacimler için kullanımı azalmaktadır [12].

Ele alınan bir tesis için uygun depolama seçiminde; yerel jeolojik koşullar, mevcut saha büyüklüğü, deponun sıcaklık seviyeleri, sondajla ilgili yasal konular ve yatırım maliyetleri dikkate alınmalıdır. Duyulur ısı depolama yöntemlerinin karşılaştırması Tablo 2 ile gösterilmektedir. [14].

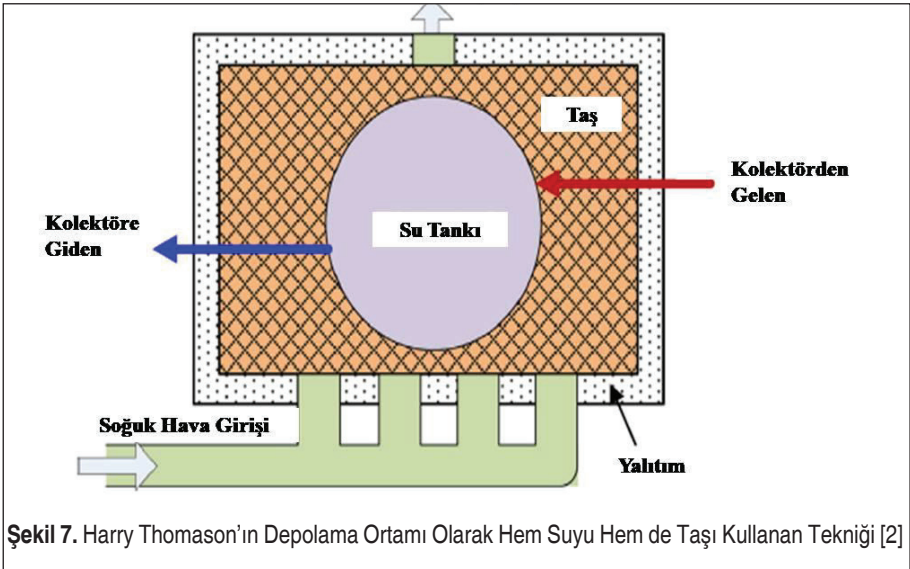


**Tablo 2.** Duyulur Depolama Konseptlerinin Karşılaştırılması [14]

Sıcak- su	Çakıl - su	Kanal	Akifer
<i>Depolama ortamı</i>			
Su	Çakıl-su	Zemin malzemesi (toprak / kaya)	Zemin malzemesi (kum / çakıl... -su)
<i>Isı kapasitesi (10<sup>3</sup> kJ/m<sup>3</sup>)</i>			
216-288	108-180	54-108	108-144
<i>1 m<sup>3</sup> su eşdeğeri için depolama hacmi eşdeğeri</i>			
1 m <sup>3</sup>	1,3-2 m <sup>3</sup>	3-5 m <sup>3</sup>	2-3 m <sup>3</sup>
<i>Jeolojik gereksinimler</i>			
• Kararlı zemin koşulları	• Kararlı zemin koşulları	• Delinebilir zemin	• Yüksek hidrolik iletkenliğe sahip doğal akifer tabakası (kf > 1.10 m/s)
• Tercihen yeraltı suyu yok	• Tercihen yeraltı suyu yok	• Uygun yeraltı suyu	• Üstte ve altta katmanları sınırlama
• 5-15 m derinlik	• 5-15 m derinlik	• Yüksek ısı kapasitesi	• Doğal zemin akışı yok veya düşük
		• Yüksek termal iletkenlik	• Yüksek sıcaklıklarda uygun su kimyası
		• Düşük hidrolik iletkenlik (kf < 1,10 m/s)	• Akifer kalınlığı 20-50 m
		• Doğal yer altı suyu akışı <1 m / yıl	
• 30-100 m derinlik			

### 3.1 Harry Thomasson Yöntemi

Kayaç olarak isimlendirilen çakıl veya bazalt taşı gibi malzemeler; ev ısıtmasında ısı enerji depolama amaçlı kullanılmaktadır. Kaya, maliyet açısından iyi bir DIED malzemesidir, ancak ısı kapasitesi suyun sadece yarısıdır. Kayalarda depolanan ısı miktarı, suda depolanan eşdeğer miktarda ısı miktarı ile karşılaştırıldığında, yaklaşık üç kat daha fazla yer kaplar [11]. Bununla birlikte suyun basınçlandırılması için gereken ek maliyetler düşünüldüğünde, kayanın kullanıldığı depolama sisteminin daha ekonomik olduğu ve 100 0C'nin üzerindeki ısı depolama için kolayca kullanılabilmesi söylenebilir. Su ve kayanın birlikte kullanılması ile oluşan en uygun tasarımlardan biri Harry Thomasson yöntemidir (Şekil 7). Bu yöntemde göre kolektörde ısınan su depoya üstten girerken ısıyı verir, daha sonra soğuyan su aşağıya iner ve buradan tekrar kolektöre geri döner. Su tankı, ısıtılacak bölgeye verilecek havanın aralarından geçtiği kayaçlarla çevrili olup; sistemin tamamı yalıtılmış duvarlarla çevrilidir. Bu sistemin avantajı suyun ısı kapasitesinin büyüklüğü ve hava ile ısı transfer yüzeyini arttıran kayaçların beraber kullanılmasıdır [2].



Şekil 7. Harry Thomasson'ın Depolama Ortamı Olarak Hem Suyu Hem de Taşı Kullanan Tekniği [2]

### 3.2 Isı Yayılm Katsayısı

Isı yayılım katsayısı ( $\alpha$ ), ısıнын bir malzeme içinde ne kadar hızlı yayıldığını gösterir: yoğunluk ( $\rho$ ), özgül ısı kapasitesi ( $C_p$ ), ısı iletim katsayısı ( $k$ ) olmak üzere;

$$\alpha = \frac{\text{İletilen ısı}}{\text{Depolanan ısı}} = \frac{k}{\rho \cdot C_p} \quad (1)$$

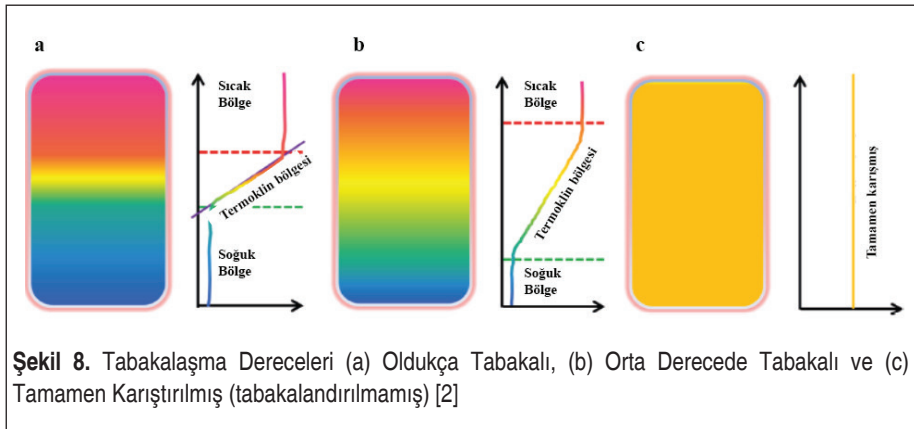
Düşük ısı yayılım katsayısı ısının büyük miktarda malzeme içinde soğurulduğunu, yüksek ısı yayılım katsayısı ise; iç ortamın ısı yayılımının yüksek olduğunu gösterir. Bu tür malzemelerde ısı iletim miktarı da yüksektir [15].

### 3.3 Depolama Kapasitesi

Depolama malzemelerinin enerji yoğunluğu, birim hacim başına enerji salınımı olarak tanımlanabilir. Farklı IED depolama kapasiteleri karşılaştırıldığında termo-kimyasal depolama çok daha fazla enerji depolayabilir fakat ekonomik değildir. Duyulur ısı depolama, istenen ısıyı depolamak için en yüksek hacmi gerektirir ve sistemden ısı kayıpları da depolama hacmi arttıkça artacaktır. Bununla birlikte duyulur ısı depolama diğer IED sistemlerinden daha ekonomik bir üstünlüğe sahiptir [6].

### 3.4 Isıl Tabakalaşma Olgusu

Duyulur ısı depolama tankının ısıl davranışını değerlendirmek için en kritik parametrelere biri ısıl tabakalaşmadır. Uygulamalarda genellikle üstte bir sıcak su girişi (çıkışı) ve altta bir soğuk su girişi (çıkışı) olan dikey silindirik bir tank kullanılır. Tanktaki sıcak ve soğuk su başlangıçta aralarında bir karıştırma tabakası olacak şekilde iki katmana ayrılır [16]. Deşarj sırasında, deponun üst kısmından ılık su çekilerek depolanmış ısıl enerji geri kazanılır, aynı zamanda alt taraftan giren soğuk su ile değiştirilir. Tabakalaşmanın görevi, tankın tepesine doğru yüzen daha düşük yoğunluklu sıcak suyu, arada bir karıştırma tabakası ile dibe çöken yüksek yoğunluklu soğuk sudan ayırmasıdır. Termoklin adı verilen karıştırma tabakası, geçici şarj/deşarj işlemi sırasında tankın altından tankın tepesine doğru hareket eder ve sıcak su bölgesini soğuk bölgeden ayıran bir bariyer görevi görür ve termoklin kalınlığı, çizilen süreç geliştikçe değişir. Tankta daha büyük bir sıcak su hacmi elde etmek için termoklin tabakası mümkün olduğunca dar olmalıdır, böylece sıcak ve soğuk su arasında daha az karışım olacağı için enerji depolama verimliliği artar. Örnek olarak Şekil 8 ile

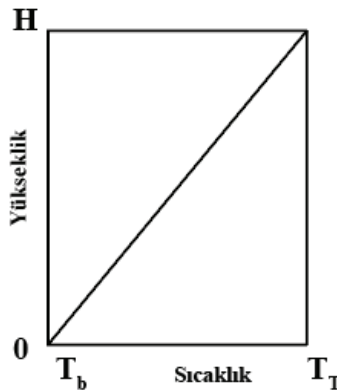


gösterildiği gibi a seçeneğindeki termoklin kalınlığı b dan daha dar olduğu için a'nin sıcaklık gradyanı (iki nokta arasındaki sıcaklık değişim oranı) daha yüksektir [2].

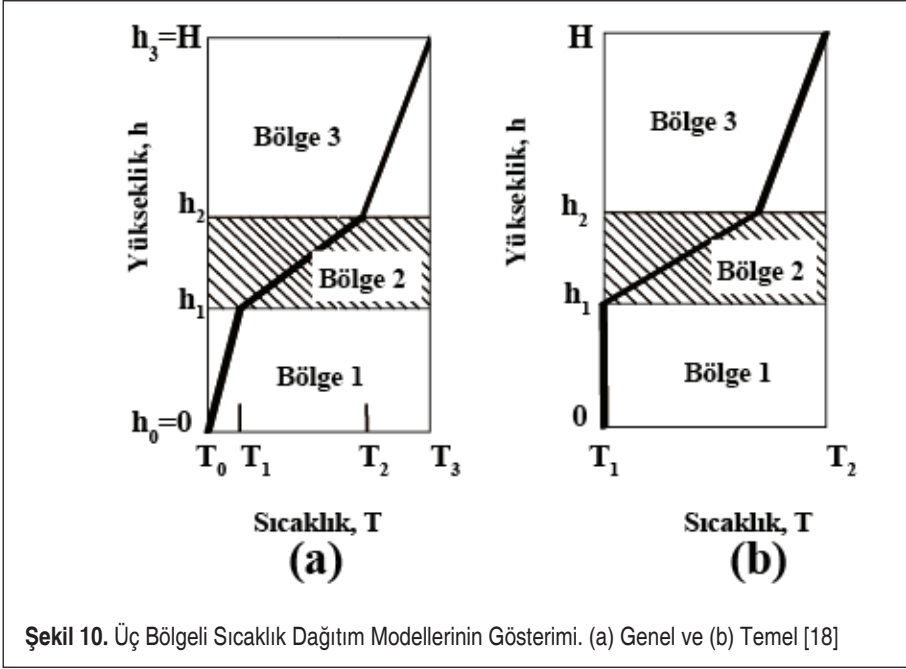
Isıl tabakalaşma konusunda birçok çalışma bulunmaktadır. Ghaddar tarafından yürütülen bir çalışmada, birçok güneş enerjisi kullanım sisteminde kullanılan oldukça tabakalı ile tam karışık (tabakalandırılmamış) su tankı arasında bir karşılaştırma yapılmıştır [17]. Enerji depolama verimliliği ve tüm sistem sırasıyla % 6 ve % 20 kadar artırılabilir. Mevsimsel depolama için, ortalama net enerji verimliliği % 60 oranında iyileştirilebilir. Isıl tabakalaşma, kollektör girişindeki sıcaklığı düşürmek için de yararlı olabilir, bu da verimini artırır ve yardımcı enerji kaynağı için çalışma sürelerini kısaltır. Proses soğutma ve ısıtma ve bölgesel soğutma veya ısıtma yükleri için sistemlere dahil edilebilir [2].

### 3.4.1 Tabakalı Sıcaklık Dağılım Modelleri

Tek boyutlu (dikey) sıcaklık tabakalaşmasını dikkate alan tabakalı sıcaklık dağılım modelleri şöyle sıralanabilir; kademeli, sürekli doğrusal, genel doğrusal, temel üç bölgeli ve genel üç bölgeli modellerdir. Tümünün ortak özelliği sıcaklık dağılımı yüksekliğin bir fonksiyonudur. Bu bölümde doğrusal model ve genel üç bölgeli model üzerinde durulacaktır. Doğrusal model, kullanımı uygun olan basitleştirilmiş bir modeldir. Bu model, bazı depolama sıvılarında tabakalaşma dağılımını gerçeğe yakın bir şekilde simüle eder, ancak hafif değişen veya yaklaşık olarak sabit sıcaklıkta alt ve üst bölgelere ve sıcaklığın büyük ölçüde değiştiği bir orta bölgeye (termoklin bölgesi) sahip sistemler için daha az gerçekçidir. Sıcaklık, T; H yüksekliği ile doğrusal olarak (lineer) değişim gösterir. IED tankının altındaki sıcaklıktan (yani,  $h = 0$ 'dan  $T_b$  den), tankın üstündeki sıcaklığa (yani  $h = H$  dan  $T_t$  ye) kadar değişir (Şekil 9) [14].



Şekil 9. Dikey Olarak Tabakalı Bir Isıl Enerji Depolama İçin Doğrusal Sıcaklık Dağılım Modelinin gösterimi [16]



Önerilen modellerden bir diğeri genel üç bölge dağılım modelidir. Model gerçekçi, esnek ve kullanımı rahattır. Bu model özellikle hafif değişen veya yaklaşık olarak sabit sıcaklıkta alt ve üst bölgelere ve sıcaklığın büyük ölçüde değiştiği bir orta bölgeye (termoklin bölgesi) sahip olan çoğu gerçek depolama sıvısında tabakalaşma dağılımını iyi bir şekilde simüle eder [17]. Üç bölge sıcaklık dağılım modelinde, üç yatay bölge vardır. Sıcaklık her bölgede doğrusal ve sürekli olarak değişir (Şekil 10) [17].

### 3.4.2 Dikey Tabakalı IED Enerjisi

H yüksekliğinde bir ısıl enerji depolama, sabit depolama akışkan yoğunluğunun ve sıcaklığın, sadece h yüksekliği ile birlikte değiştiği bir sistem olarak kabul edilmiştir. Depolama akışkanı, bir m külesine ve c özgül ısısına (sabit olduğu varsayılır) sahiptir. Deponun yatay kesit alanı sabit olarak alınmıştır. Isıl enerji depolamadaki enerji E'nin şu şekilde yazılabileceği gösterilmiştir [16];

$$E = E_m = m c (T_m - T_0) \quad (2)$$

Em, karıştırıldığında aynı depodaki enerjiyi belirtir, T<sub>0</sub> referans ortamın sıcaklığını (sabit kabul edilir), T<sub>m</sub> karıştırıldığında depolama sıvısının sıcaklığı aşağıda verildiği gibi ifade edilebilir [16];

$$T_m = \frac{1}{H} \int_0^H T(h) dh \quad (3)$$

Doğrusal bir sıcaklık dağılım modelinde, sıcaklık  $h$  yüksekliği ile doğrusal olarak  $T_b$  IED 'in altındaki sıcaklıktan (yani,  $h = 0$ 'da), üstteki sıcaklık  $T_t$  ye (yani  $h = H$ 'de) doğrusal olarak değişir. Doğrusal model için dağılım bir üst simge  $L$  ile gösterilir ve aşağıda verildiği gibi ifade edilebilir [16]:

$$T^L(h) = \frac{T_t - T_b}{H} h + T_b \quad (4)$$

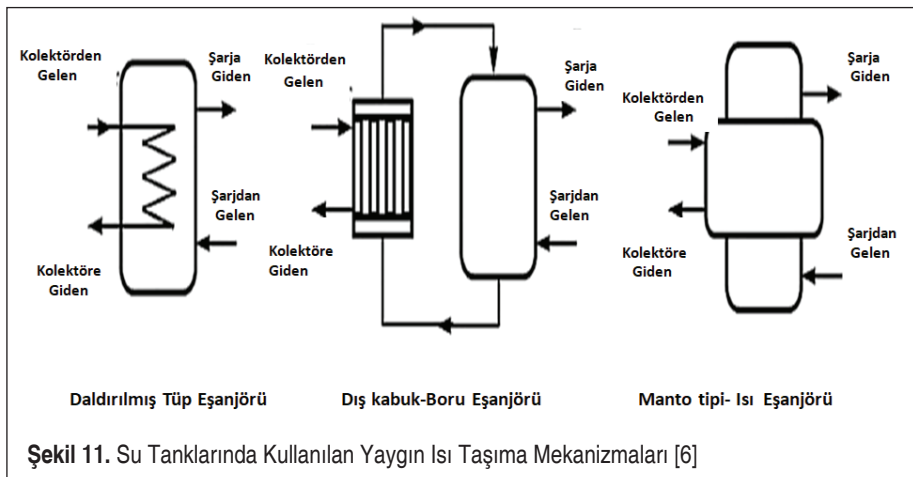
Denklemler ile doğrusal model için  $T_m^L$  aşağıda verildiği gibi ifade edilebilir [16]:

$$T_m^L = \frac{T_t + T_b}{2} \quad (5)$$

### 3.5 Isı Taşıma Mekanizmaları

Genellikle en yaygın üç ısı transfer modu vardır: (1) tanktaki daldırılmış tüpler veya daldırılmış bobinler; (2) dış kabuk-boru eşanjörü; (3) depolama tankı etrafında dar bir halka kılıflı örtülü manto tipi ısı eşanjörü (Şekil 11) [6].

Mantolu ısı eşanjörü, büyük bir ısı transfer alanına sahiptir ve bu, termal tabakalaşmayı desteklemek için yararlı olabilir. Ayrıca bu model oldukça basittir ve sistem birimi ucuzdur. Furbo tarafından yürütülen bir çalışmada, çeşitli ısı eşanjörü çeşidine sahip üç düşük debili güneş enerjili su ısıtma sistemi incelenmiştir. Dikey manto tipinin;



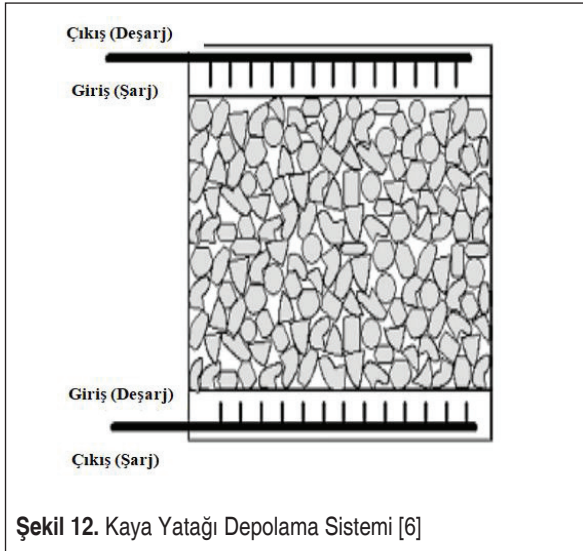
Şekil 11. Su Tanklarında Kullanılan Yaygın Isı Taşıma Mekanizmaları [6]

daldırılmış tüp, dış kabuk ve tüp değiştirici tiplerinden daha iyi performans gösterdiği bulunmuştur [19].

### 3.6 Duyulur Enerji Depolama Malzemeleri

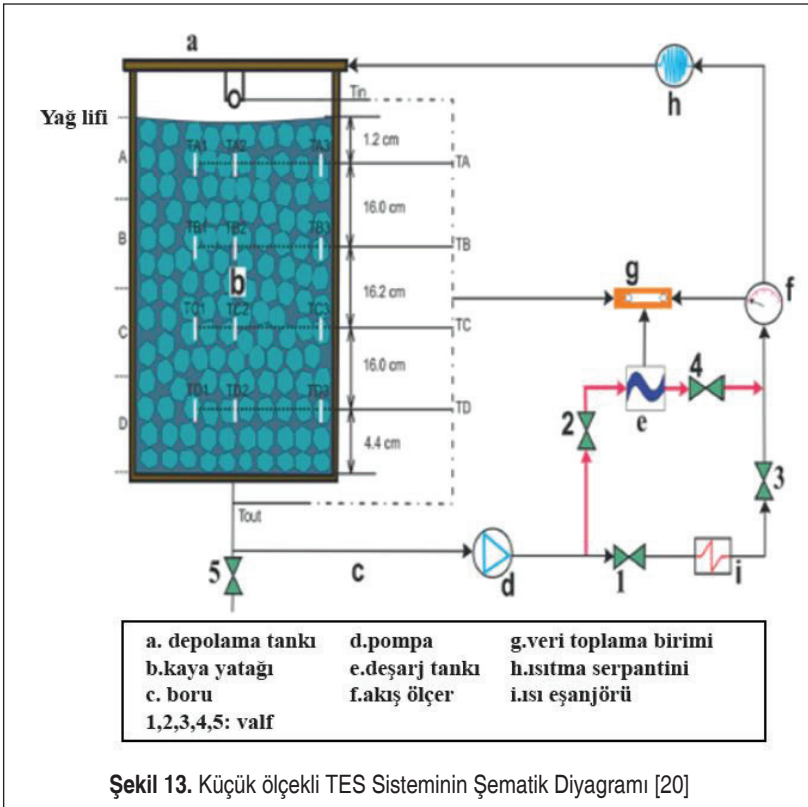
Isıl enerji depolama ortamı olarak su mükemmel özgül ısıya sahiptir ve aynı zamanda ucuz ve kimyasal olarak stabildir. Dezavantajlarından biri; 100 °C'nin üzerinde kullanılırsa, sistem basınçlandırılmalıdır, bu da maliyetleri artırıcı etki yapar [11]. Diğer bir dezavantajı; Su, uygun tabakalaşma düzenekleri olmadan basit depolama tanklarında uygun şekilde tabakalaşamaz. Tabakalandırma düzenekleri de depolama sistemlerine otomatik olarak daha fazla maliyet ekler [20].

Maliyet açısından oldukça uygun IED malzemesi kayadır, ancak kapasitesi suyun yarısı kadardır. Önceki çalışmalar, kaya muhafaza yerinin pratik olduğunu göstermiştir ve en önemli avantajı, 100 °C'nin üzerinde ısı depolamak için kolayca kullanılabilmesidir. Bu nedenle güneş sistemlerinde su yerine kayalar tercih edilmektedir [11]. Hava / kaya paketli yatak IED sistemlerinin kullanımı konusunda birçok araştırma yapılmıştır. Hava genellikle düşük ısı iletkenliğine ve düşük ısı kapasiteye sahiptir. Buna ek olarak, ısıyı depolamak için ihtiyaç duyduğu hacim daha büyüktür. Alan ısıtmaya yönelik geleneksel hava/kaya güneş enerjisi sistemleri, yalnızca ısıtma mevsiminde hizmet verir ve evsel sıcak su kullanımı için suda kısmi ısı depolaması sağlayabilir [20]. Kayaç malzemesi olarak bazalt taşı da incelenmiştir ve en yüksek ısı kapasitesi değeri 4.2.106 J/m<sup>3</sup>K olarak belirlenmiştir [21]. Bilinen en ucuz paket yatak; kaya yatağı depolama sistemidir (Şekil 12) [6].



Uygulamalarda -10 ila 320°C arasındaki geniş bir aralıktaki sıcaklıklarda basınçlandırma olmadan kolayca kullanılabilen ısıya dayanıklı yağ (örneğin, terminal yağ) vardır. Mineral yağ genellikle 400 °C sıcaklığına kadar HTF olarak kullanılabilir. Uygun malzemeler arasında; seramik, beton, alüminyum silikat, alümina boncukları, silis kumu, kuvars, kuvarsit-kaya, granit numuneleri, magnezya gibi seramikler, silikon karbür, grafit ve demirli metallere (dökme demir ve paslanmaz çelik) gibi kompozitler atık / inertleştirilmiş malzemeler, asbest içeren atıklar, tekstil endüstrisinden geri dönüştürülmüş naylon elyaf, elektrik ark ocağı (EAF) çürük çeşitleri vb. örnek olarak verilebilir [6]. Yüksek sıcaklık (> 500 °C) sistemlerine uygun DIED malzemeleri kullanılırken sera gazı emisyonları gibi çevresel faktörler de dikkate alınır. Erimiş tuzlar ticari olarak DIED için kullanılır ancak yaklaşık 600°C sıcaklığın üzerinde stabil değildir. Malzeme seçimi konusundaki araştırmalar halen devam etmektedir.

Örnek uygulama olarak; güneş ocakları için üç IED yağının ısı performansını değerlendirmek için şarj deneyleri sunulmuştur [22]. Deneyleri gerçekleştirmek için yalıtılmış 20 L depolama tankı içeren deney düzeneği kurulmuştur. Değerlendirilen







ısıll yağlar arasında ayçiçek yağı, yüksek güç şarjı altında daha iyi performans göstermiştir [2]. HTF olarak ayçiçek yağı kullanılan bir deneysel araştırma için tasarlanmış ve inşa edilmiş küçük ölçekli bir IED sisteminin şematik diyagramı Şekil 13 ile gösterilmektedir [20].

#### 4. DIED SİSTEMİNİN ENERJİ YÖNÜNDEN İNCELENMESİ

Duyulur ısıll enerji performansının geleneksel olarak ölçülmesi ve değerlendirilmesi, ısı ve iş arasındaki denkliliğini ifade eden termodinamiğin birinci yasası ile ortaya konabilir [2]. Bir malzeme kütlelerinde depolanan ısı miktarı için temel denklem aşağıda verilmiştir, burada  $c_p$  malzemenin özgül ısıdır,  $\Delta T$  sıcaklık artışıdır,  $V$  tanktaki malzemenin toplam hacim olup  $\rho$  malzemenin yoğunluğudur. Belirli bir tanktaki duyulur ısıyı saklama kabiliyeti  $\rho \cdot c_p$  malzemesinin değerine bağlıdır [21]:

$$Q = m \cdot c_p \cdot \Delta T \quad \text{veya} \quad Q = \rho \cdot c_p \cdot V \cdot \Delta T \quad (6)$$

IED uygulamalarında, enerji verimliliği, herhangi bir proses için faydalı enerji çıktısının toplam enerji girdisine oranı olarak tanımlanır [5]. Depolama süreci, “şarj işlemi” ve “deşarj işlemi” ile ilgilidir. Ayrıca enerji depolama sistemi performansını değerlendirmek için “ısı depolama oranı” ve “ısı yayma oranı” terimleri de kullanılmaktadır [2].

$$\text{Isı depolama oranı} = \frac{\text{Ünitenin toplam enerji depolaması}}{\text{Ünitenin maksimum depolama kapasitesi}} \quad (7)$$

$$\text{Isı yayma oranı} = \frac{\text{Ünite tarafından salınan toplam enerji}}{\text{Ünitenin maksimum depolama kapasitesi}} \quad (8)$$

Genellikle depolanan ve açığa çıkan ısı, sırasıyla HTF tarafından emilen ve açığa çıkan ısıdan hesaplanabilir. Isıl verimlilik  $\square$  şarj,deşarj ve genel süreç için tanımlanmıştır. DIED sistemlerindeki ana hedef mümkün olan maksimum verime ulaşmaktır [2].

$$\mu_{\text{şarj}} = \frac{\text{Ünitede depolanan toplam enerji}}{\text{Üniteye verilen toplam enerji}} \quad (9)$$

$$\mu_{\text{deşarj}} = \frac{\text{Üniteden geri kazanılan toplam enerji}}{\text{Ünitede depolanan toplam enerji}} \quad (10)$$

$$\mu_{\text{genel}} = \frac{\text{Üniteden geri kazanılan toplam enerji}}{\text{Üniteye verilen toplam enerji}} \quad (11)$$

## 5. DEPOLAMA PERFORMANSINI ETKİLEYEN FAKTÖRLER

Isıl tabakalaşmayı etkileyen faktörler akışkan kütle akış hızı, yatak malzemesinin boyutu, akışkan özellikleri vb. olarak sayılabilir. Sıcak su tankı için akışkan kütle akış hızı uygun şekilde artırıldıkça, ısı transfer hızının arttığı ve tabakalaşmanın iyileştirilebileceği sonucuna varılabilir. Ek olarak, daha düşük bir akışkan kütle akış hızı ile düşük viskozite ve daha az pompalama gücü gerekeceğinden dolayı daha yüksek bir akışkan çıkışı sıcaklığı elde etmek mümkündür ve akış hızının en aza indirilmesi tabakalaşmayı artırabilir [2].

Depolama tankı geometrik yapısının etkisi üzerine yapılan çalışmalar genel olarak daha yüksek en-boy oranının daha iyi sıcaklık tabakalaşması ve sıcak su tankı için daha az karıştırma etkisi sağlayabileceğini ortaya koymaktadır. Kısa ve geniş depolama tankı ( $L / D < 1$ ) için, daha az yükseklik nedeniyle daha az pompalama gücü gerekir, ancak geniş kesit alanı nedeniyle HTF'nin radyal yönde homojen dağılımı korunmaz ve kendi kendine deşarj nedeniyle ekserji kaybı yüksektir. çünkü soğuk ve sıcak bölge birbirinden çok uzak değildir. Uzun ve ince tanklarda ( $L / D > 1$ ), akış radyal yönde homojen bir şekilde dağıtılır ve kendi kendine deşarj ekserji kaybı, sıcak ve soğuk bölge arasındaki önemli ayırım nedeniyle daha azdır, ancak bu tanklar daha fazla yükseklik nedeniyle büyük pompalama gücü gerektirir. Depolama tankı boyutlarının seçimi için 'herkese uyan tek bir' teori olmadığı sonucuna varılmıştır, ancak bunun faydası ve ekonomik yönü gibi çeşitli faktörlere bağlıdır [23]. Depolama tankının yüksekliğinin artırılması, depolama ortamının toplam kütesini ve maksimum sıcaklığa ulaşma süresini de arttırmaktadır.

Akışkan özelliklerinin etkisine bakıldığında, yüksek ısı iletkenliğine ve yüksek ısı kapasitesine sahip malzemenin yüksek bir şarj oranına ve depolama kapasitesine yol açabileceği sonucuna varılabilir. Çeşitli akışkanların farklı termodinamik özellikleri nedeniyle, yağ ve tuzlar havaya göre daha iyi performans gösterir. Ayrıca, metal yapılar vb. gibi uygun yüksek iletkenliğe sahip katkı maddelerinin eklenmesinin daha yüksek bir şarj / deşarj oranı için faydalı olabileceğinden de bahsedilmelidir. Beton ve seramik gibi malzemeler, iyi ısı ve mekanik özellikleri ve düşük maliyetleri nedeniyle tercih edilmektedir. Bununla birlikte,  $550\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'nin üzerindeki yüksek sıcaklıklar için geleneksel olarak kullanılan erimiş tuzlar uygun değildir ve bu tür alanlar için sınırlı araştırma vardır [2].

Depolama performansını etkileyen diğer parametrelerden biri seçilen yatak malzemesinin boyutudur. Örneğin kaya boyutuna göre de HTF sıvısının kaya yatağı arasından geçmesi için daha az boşluk kalır, bu boşluk ne kadar küçük olursa tabakalaşma da o kadar büyük olur ve daha iyi ısı transferi sağlanır [6].

## 6. DUYULUR ISI DEPOLAMA UYGULAMALARI

Duyulur ısı depolama su bazlı (su tankı ve akifer), kaya yataklı ve zemin / toprak depolama olmak üzere üç ana grupta toplanır [2].

### 6.1 Su Tankı ve Akifer

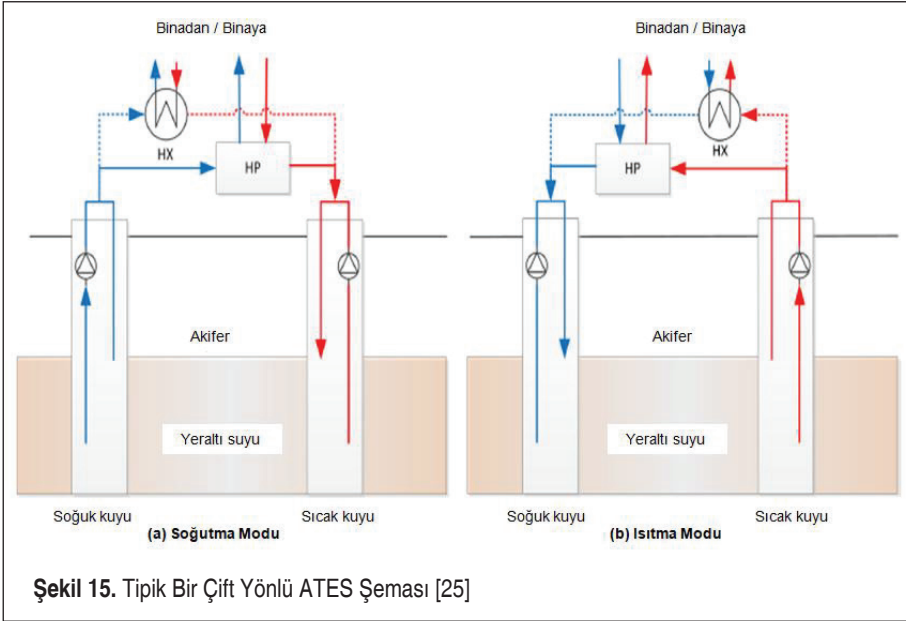
Su, yüksek özgül ısısı ve şarj edilirken ve boşaltılırken yüksek kapasite oranı nedeniyle enerji depolaması için uygun bir malzeme olarak kabul edilir. Su bazlı depolama sistemleri, depolama ortamı olarak suyu veya ısıyı depolamak için HTF olarak kullanılır (Şekil 14). Yirmi katlı bina yüksekliğinde ısı depolama tankları birçok konutun ısınmasını saatlerce sağlayabilmektedir. Su tankı depolama sistemleri suyu yapay bir yapıda depolarken, akifer depolama doğrudan doğal yeraltı katmanından doğal su kullanır [2].



Şekil 14. Su Tankları [12]

Su tankları, paslanmaz çelikten, plastikten veya kalın yalıtımla çevrelenmiş betonarme malzemeden yapılmış yapay yapılardır. Genellikle yeraltına (su çukurları olarak da adlandırılır), çatıya veya bir binanın dışına yerleştirilirler [24]. Su depolama tankları, tankın üst kısmındaki su, ısıl kaldırma nedeniyle üstü alttan daha sıcak olacak şekilde tabakalı bir şekilde çalışır ve sıcaklık farkının neden olduğu karıştırma etkisi, ısı kaynağı seviyesini düşürebilir ve sistem verimliliğini olumsuz yönde etkileyebilir [6].

Akifer ısıl enerji sistemleri (ATES), ısıl enerjinin yeraltı suyu tarafından sıcak bir kuyudan soğuk bir kuyudan, bir ısı eşanjöründen (HX) geçerek Şekil 1 (b).’de gösterildiği gibi binaya bir ısıtma etkisi sağlamak için taşındığı tipik bir çift yönlü ATES’i



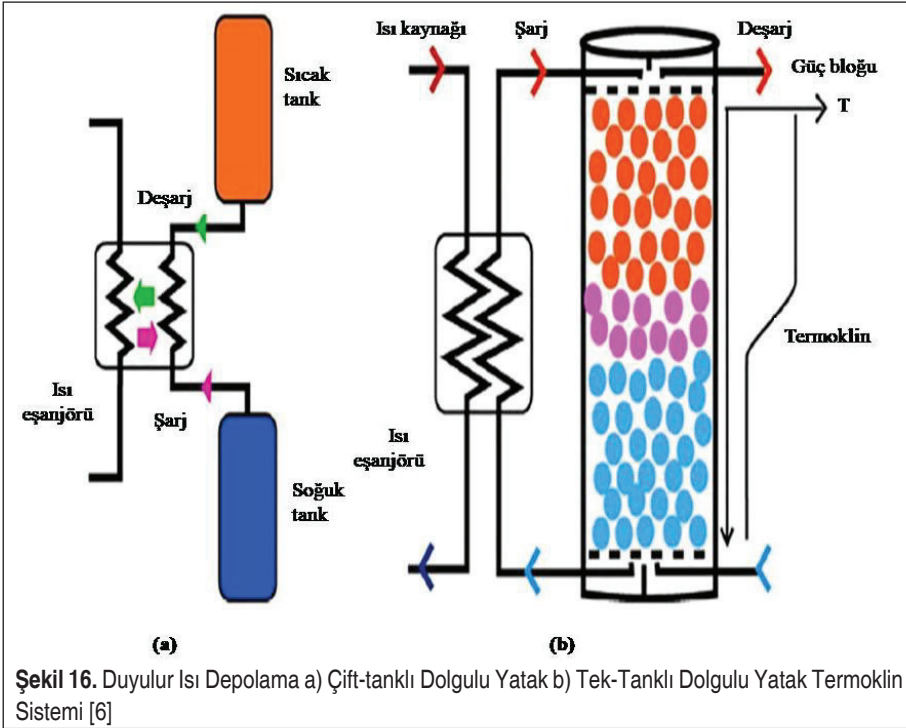
Şekil 15. Tipik Bir Çift Yönlü ATEŞ Şeması [25]

temsil etmektedir. Binanın yer altı sularından elde edilen soğuk enerjisi, soğuk bir akifer rezervuarında depolanmak üzere taşınır. Soğutma mevsimi boyunca, binanın gerekli soğutma talebini sağlamak için yeraltı suyu soğuk rezervuardan pompalanır, böylece süreç tersine çevrilir (Şekil 15) [25].

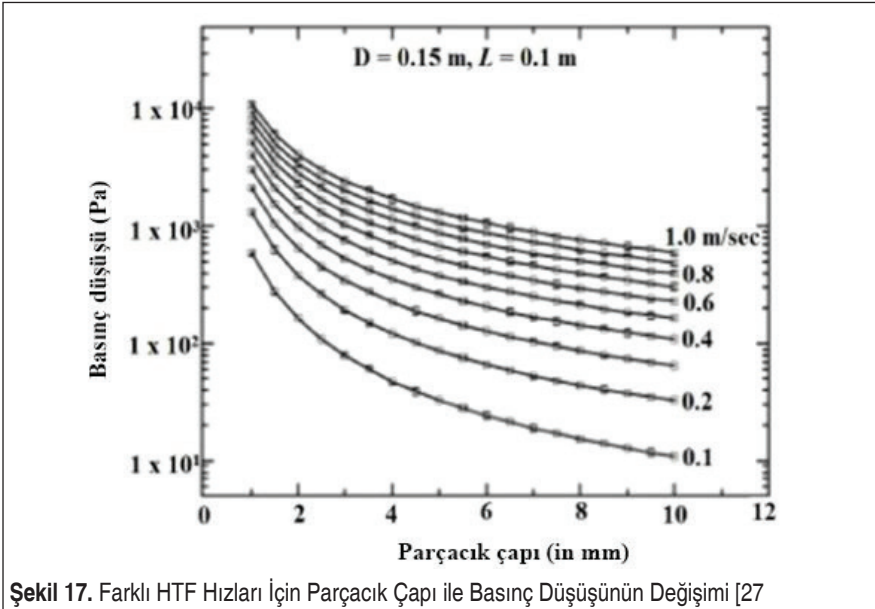
ATES sisteminin yıllık çalışma döngüsü, üç çalışma modundan oluşur: ısıtma, depolama ve soğutma. Bu çalışma modlarının süresi, büyük ölçüde operasyon sahasındaki mevsimsel iklim modeline bağlıdır [25]. Akifer ısı enerjisi depolaması (ATES) ısıtma modunda çalışırken depolama süresi boyunca ısı kaybının ve soğutma modunda çalışırken depolama süresi boyunca ısı kazancının fazla olması enerji verimliliğini düşürmektedir.

## 6.2 Kaya Yatakları (Paketlenmiş Yataklar – Dolgulu Yataklar)

Kaya yatağı ısı depolamasında, yatak olarak kaya, çakıl, tuğla, seramik, geri dönüştürülmüş malzemeler vb. ve ısıyı değiştirmek için de genellikle HTF olarak su, hava, ısıl yağ vb. kullanılır. Su ve ısıl yağ, yaygın ısı transfer akışkanlarıdır. Kaya bazlı sistemler su bazlı sistemlere göre çok daha yüksek sıcaklıklara dayanabilir. Hava, maliyet tasarrufu sağlayan bir seçenek olarak ısı transfer malzemesi olarak seçilir ve ısıtıldıktan sonra doğrudan iç mekan ısıtması için kullanılabilir [26]. Paketlenmiş yatak depolamasının bir diğer uygulaması olan CSP (konsantre güneş enerjisi) tesislerinde, erimiş tuz içeren iki tanklı sistem kullanılmaktadır (Şekil 16 (a)). Tanklardan biri soğuk diğeri sıcak olarak adlandırılır. Tek-tanklı dolgulu yatak termoklin sistemi



Şekil 16. Duyulur Isıl Depolama a) Çift-tanklı Dolgulu Yatak b) Tek-Tanklı Dolgulu Yatak Termoklin Sistemi [6]



Şekil 17. Farklı HTF Hızları İçin Parçacık Çapı ile Basınç Düşüşünün Değişimi [27]

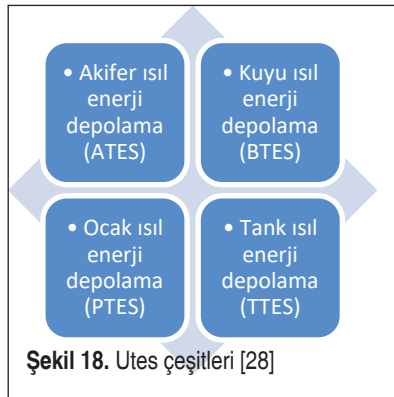
Şekil. 16 (b) ile gösterilmektedir. Burada depolama tankı paketlenmiş yatak olarak depolama malzemesi ile doldurulur. Tek tanklı termoklin sistemleri, iki tanklı depolama sistemlerine göre yatırım maliyetinde % 35 daha fazla avantajlıdır [6].

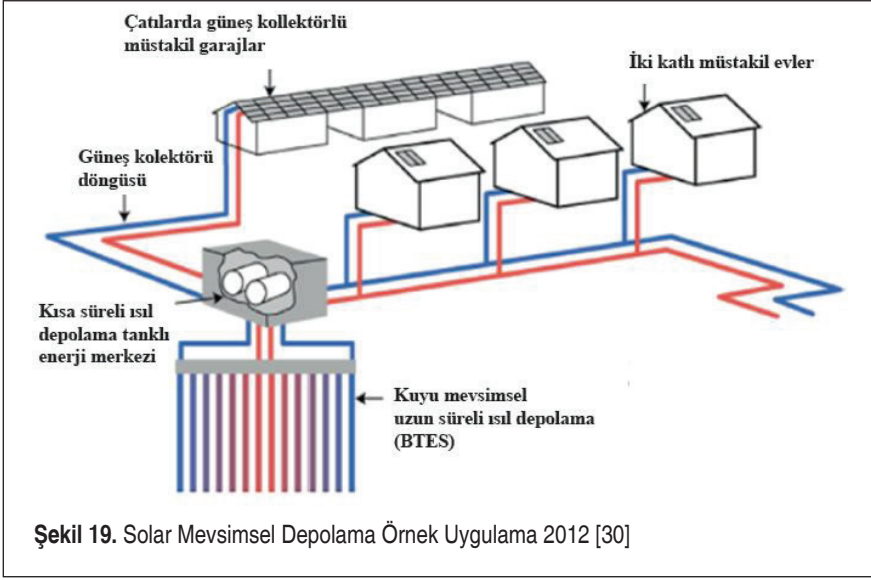
Optimum HTF hızı, depolama tankındaki akış rejiminin türünü gösteren partikül Reynolds sayısına ( $R_{ep}$ ) göre belirlenmelidir.  $R_{ep}$ 'e dayalı akış rejimleri; tamamen laminar ( $R_{ep} < 10$ ), doğrusal olmayan ( $10 < R_{ep} < 150$ ), kararsız laminar ( $150 < R_{ep} < 300$ ), tamamen türbülanslı ( $R_{ep} > 300$ ) olarak sınıflandırılır [35].  $R_{ep}$ 'i 10'un altında tutmak için operasyonel ve partikül parametreleri seçilerek tamamen laminar rejimde daha yüksek depolama verimliliği elde edilebilir.  $R_{ep}$ 'e ek olarak, optimum paketleme malzemesi boyutunu seçmek için Biot numarası da dikkate alınmalıdır. Her bir paket malzemesi içinde homojen sıcaklık dağılımı elde etmek için biot sayısı 0,1'den az olmalıdır [6].

Dolgulu yatak içindeki basınç düşüşü; partikül çapı, yatak yüksekliği, boşluk oranı, HTF'nin bazı fiziksel özellikleri, hızı vb. gibi bazı parametrelerle tanımlanabilir. Şekil 17 ile gösterildiği gibi, belirli bir boyutta paketleme elemanı için basınç düşüşü, HTF'nin akış hızı ile artar. Basınç düşüşü, yatak içindeki akış dağılımı üzerindeki etkisinden dolayı partikül çapından etkilenir [27].

### 6.3 Zemin ve Toprak Depolama

Akifer sistemlerinin bir diğer uygulaması zemin/toprak (UTES, yeraltı ısı enerji depolama) depolamadır ve zeminin kendisi doğrudan depolama malzemesi olarak kullanıldığı için ayrı bir alana gerek yoktur. UTES sistemleri ısıyı mevsimsel olarak su veya su/çakıl karışımı kullanarak depolayabilir. Genellikle düşük sıcaklık uygulamalarında ( $< 40$  °C) tercih edilmelerine rağmen 40 °C'nin üzerindeki uygulamalarda da kullanılabilirler. UTES sistemleri akifer (ATES), kuyu (BTES), ocak (PTES) ve tank (TTES) ısı enerji depolama olmak üzere dörde ayrılır (Şekil 18) [28]. UTES; yeraltı jeolojik yapısı gereği, daha sonra kışın kullanılmak üzere yaz aylarında toplanan büyük miktarda güneş ısıyı depolayabilir. Bu depolama yaklaşımında, zemin dikey





veya yatay tüplerin yerleştirilmesi için kazılır ve delinir, bu nedenle bazı literatürlerde sondaj deliği ısıl enerji depolama (BTES) veya kanal ısı depolama olarak da adlandırılır [14]. Sondaj delikleri 30 ila 200 m derinliğe kadar bir delik açılır ve çevredeki toprakla iyi ısıl temas sağlamak için, borular ile sondaj deliği duvarı arasındaki boşluk, ısı transferini arttırmak için genellikle yüksek ısıl iletkenliğe sahip dolgu malzemesi ile doldurulur [29]. Suya doymuş kil ve kil taşları yüksek ısı kapasitelerine sahip olup, yeraltı su akışını önleyebildiklerinden dolayı BTES için uygundur [28]

Kanada'daki The Drake Landing Solar Community (DLSC, 2012), dünyanın ilk büyük mevsimlik depolama topluluğudur (Şekil 19). Dört yıllık bir çalışmanın ardından, toplumun kışın tüm enerji taleplerinin % 80'ini karşılayan bu projeden 52 ev faydalanmıştır [30].

TTES ve PTES sistemlerinde, yüksek hacimli yer altı çukurları veya su depoları kullanılır. TTES sisteminde tank tamamen yeraltına gömülüdür. PTES sistemi toprakta kazılan yarı gömülü insan yapımı çukurları kullanır. Çukur depolamada genellikle depolama malzemesi olarak su kullanılır [28]

## 7. SONUÇ VE ÖNERİLER

DIED sistemleri, ısıl enerji ekipmanının daha etkin kullanımı, uygun maliyeti ve çevresel etki açısından büyük ölçekli enerji gereksinimlerinde iyi bir potansiyele sahiptir. Yüksek başlangıç sermaye maliyetini azaltmak için yenilenebilir kaynaklardan, endüstriyel atık malzemelerinden vb. alternatif IED malzemelerinin kullanılması ge-



rekmedir. DIED sistemlerinde, depolama ortamı sıcaklığı kabaca 44 °C ila 59 °C arasında değişir. Sıcaklık aralığı, bir binanın su ısıtma ve yerden ısıtma gibi düşük sıcaklıklı ısıtma taleplerini yeterince karşılamak için uygundur. DIED tankı, buharlaşma sıcaklığını artırmak için bir ısı pompası bulunan bir bölgesel ısıtma sistemine de yardımcı olabilir.

Su sızdırmazlığını önlemek için, duvarlardan buhar yayılımından kaynaklanan ısı kayıplarını en aza indirecek ve tank içindeki tabakalaşmayı optimize edebilecek teknolojilerin geliştirilmesi gerekir. Isıl enerji depolama sistemi için HTF olarak hava yerine su buharının ya da farklı gazların kullanılması ve yalıtım kalınlığının etkilerinin incelenmesi gibi konular da dikkate alınmalıdır. Tankın performansını ve ısıl tabakalaşmayı etkileyen faktörler; akışkan kütle akış hızı, depolama tankı geometrik yapısı, daha yüksek bir en-boy oranı, depolama malzemesi ve ısı transfer akışkanı özellikleri, akışkan giriş sıcaklığı, vb. birlikte düşünülmelidir.

Isı yalıtımı değişikliği, ısı eşanjörü malzeme yapısı ve akışkan akış hızları gibi parametreleri ayarlayarak istenen ısı transferini artırmanın IED verimliliği üzerindeki etkilerine ek olarak hangi parametre varyasyonlarının IED verimliliğinde en büyük gelişmelere yol açacağını belirlemek için duyarlılık analizlerinin de yapılması gerekir.

## SEMBOLLER VE KISALTMALAR

### Semboller

$C_p$	Özgül ısı [J/(kgK) ]
$E$	Karışım deposundaki enerji miktarı [J]
$k$	Isı iletim katsayısı [W/(mK)]
$Q$	Isı miktarı [J]
$M$	Kütle [kg]
$R_{ep}$	Reynold sayısı
$T$	Sıcaklık [K ya da °C]
$T_0$	Referans ortamın sıcaklığı [K ya da °C]
$T_m$	Karıştırıldığında depolama sıvısının sıcaklığı [K ya da °C]
$V$	Hacim [m <sup>3</sup> ]

### Yunan Harfleri

$\alpha$	Isı yayılım katsayısı [m <sup>2</sup> /s]
$\mu$	Isıl verimlilik
$\rho$	Yoğunluk [kg/m <sup>3</sup> ]





## Kısaltmalar

ATES	Akifer ısıtıl enerji sistemleri
BTES	Kuyu ısıtıl enerji depolama
CSP	Konsantre güneş enerjisi
DIED	Duyulur enerji depolama
HTF	Isı transfer akışkanı
IED	Isıl enerji depolama
PBSS	Paket yataklı depolama sistemi
SDH	Güneş kaynaklı bölgesel ısıtma
UTES	Yeraltı ısıtıl enerji depolama

## KAYNAKÇA

1. **Dincer I, Rosen MA.** 2011. "Thermal Energy Storage: Systems and Applications". Wiley. USA
2. **Li, G.** 2016. "Sensible Heat Thermal Storage Energy and Exergy Performance Evaluations", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 53, 897–923
3. **Dincer, I.** 2002. "On Thermal Energy Storage Systems and Applications in Buildings", *Energy and Buildings*, 34, 377–388
4. **Dincer, I., Dost, S., Li, X.** 1997. "Performance Analyses of Sensible Heat Storage Systems for Thermal Applications" *International Journal of Energy Research*, 21, 1157-1171.
5. **Stutz, B., Pierres, N.L., Kuznik, F., Johannes, K., Barrio, E.P.D., B'ed'ecarrats, J.P., Gibout, S., Marty, P., Zalewski, L., Soto, J., Mazet, N., Olives, R., Bezia, J.J., Minh, D.P.** 2017. "Storage of Thermal Solar Energy", *C. R. Physique*, 18, 401–414
6. **Kocak, B., Fernandez, A.I., Paksoy, H.** 2020. "Review on Sensible Thermal Energy Storage for Industrial Solar Applications and Sustainability Aspects", *Sol. Energy*, 209 (2020) 135–169.
7. **Riahi, L.** 2015. "District Energy in Cities (Report) Unlocking The Potential of Energy Efficiency and Renewable Energy", UNEP, 18.05.2021
8. **Solar District Heating Trends and Possibilities (Report) Technical report, 2018, IEA SHC Task 52 (Subtask B), Updates of figures by Plan Energi, 18.05.2021**
9. **REN21, RENEWABLES,** "Global status report. 2020. p. 2020", <https://ren21.net/gsr-2020>, 16 June 2020
10. **Yongliang Shen a, Shuli Liu a., Abdur Rehman Mazhar b, Xiaojing Han a, Liu Yang a, Xiu'e Yang,** 2021. "A Review of Solar-Driven Short-Term Low Temperature Heat Storage Systems" *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 141, 110824
11. **Dincer, I.** 2002. "Thermal Energy Storage Systems as a Key Technology in Energy



- Conservation”, *International Journal of Energy Research*, *Int. J. Energy Res.* 2002; 26:567;588 (DOI: 10.1002/er.805).
12. **Dincer, I., Ezan, M.A.** 2020. *Tüba Enerji Depolama Teknolojileri Raporu*, Türkiye Bilimler Akademisi Yayınları, 35, 978-605-2249-45-1
  13. **Herrmann U, Kearney DW.** 2002. “Survey of Thermal Energy Storage for Parabolic Trough Power Plants”. *Journal of Solar Energy Engineering*; 124(2):145-152.
  14. **Schmidt, T., Mangold, D., Muller-Steinhagen, H.** 2003. “Seasonal Thermal Energy Storage in Germany”, In: *ISES Solar World Congress*, 14.-19. June, Gothenburg, Sweden.
  15. **Cengel, Y. A.** 2003. “*Heat Transfer: A Practical Approach*”, 2nd ed. New York: McGraw-Hill.
  16. **Rosen, M.A., Dincer, I.** 1999. “Thermal Storage and Exergy Analysis: The Impact of Stratification” *Transactions of the CESME*, Vol.123, No.1B, 186.
  17. **Ghaddar, NK.** 1994. “Stratified Storage Tank Influence on Performance of Solar Water Heating System Tested in Beirut”. *RenewEnergy*;4(8):911–925.
  18. **Rosen, M.A., Tang, R., Dincer, I.** 2004. “Effect of Stratification on Energy and Exergy Capacities in Thermal Storage Systems”, *International Journal of Energy Research*, 28:177-193.
  19. **Furbo, S.** 1993. “Optimum Design of Small DHW, Low Flow Solar Systems”, Conference: *International Solar Energy Society world congress*, DTH-LV-93-24; CONF-930838
  20. **R. Lugololeb, A. Mawire, K.A. Lentswea, D. Okello, K. Nyeingab,** 2018. “Thermal Performance Comparison of Three Sensible Heat Thermal Energy Storage Systems During Charging Cycles”, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 30, 37–51
  21. **Günerhan, H., Hepbaşlı, A.** 2006. “Utilization of Basalt Stone as a Sensible Heat Storage Material”, *Energy Sources*, Registered Number: 1357-1366
  22. **Mawire A, Phori A, Taole S.** 2014. “Performance Comparison of Thermal Energy Storage Oils for Solar Cookers During Charging”, *Applied Thermal Engineering*, 73, 1323-1331
  23. **Abhishek Gautam, R.P. Saini,** 2020. “A Review on Technical, Applications and Economic Aspect of Packed Bed Solar Thermal Energy Storage System”, 27, 101046
  24. **Gowtham Mohan, Mahesh B. Venkataraman, Joe Coventry,** 2019. “Sensible Energy Storage Options for Concentrating Solar Power Plants Operating Above 600 °C”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 107, 319–337
  25. **Alzahrani, A.A.** 2016. “Performance Assessment of an Aquifer Thermal Energy Storage System for Heating and Cooling Applications”, *Transactions of the ASME*, 011901-8 / Vol. 138.
  26. **Zhao, D.L., Li, Y., Dai, Y.J., Wang, R.Z.** 2011. “Optimal Study of a Solar Air Heating System with Pebble Bed Energy Storage”, *Energy Convers. Manage.*, 52, 2392–2400.



27. **A. Ramzy K, R. Kadoli, T.P. Ashok Babu**, 2012. "Performance Studies on the Desiccant Packed Bed with Varying Particle Size Distribution Along the Bed", *Int. J. Refrig.*, 35, 663–675
28. **Givoni, B.** 1977. "Underground longterm storage of solar energy – an overview", *Sol. Energy*, 19, 617–623
29. **Gao L, Zhao J, Tang Z.** 2015. "A Review on Borehole Seasonal Solar Thermal Energy Storage", *Energy Procedia* , 70, 209–218.
30. **J. Xu, R.Z. Wang, Y. Li.** 2014. "A Review of Available Technologies For Seasonal Thermal Energy Storage", *Solar Energy*, 103, 610–638