

Kapsüllenmiş Faz Değiştiren Malzemelerin Sıcak Su Tankları İçerisindeki Konumlarının Isıl Enerji Depolama Performansı Üzerindeki Etkisi

Doğan Erdemir*¹

*¹ Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği, KAYSERİ

(Alınış / Received: 05.09.2019, Kabul / Accepted: 26.12.2019, Online Yayınlanma / Published Online: 31.12.2019)

Anahtar Kelimeler

Düşey mantolu sıcak su tankı,
Güneş enerjili sıcak su sistemi,
Isıl enerji depolama,
Hibrit ısıl enerji depolama

Öz: Güneş enerjili sıcak su sistemleri yenilenebilir enerji ve ısıl enerji depolama uygulamalarının bilinen ve yaygın türlerinden biridir. Güneş enerjili sıcak su sistemlerinde kullanılan sıcak su tanklarının ısıl enerji depolama kapasitesini arttırmak için tank içerisine faz değiştiren malzeme yerleştirmek yaygın bir yöntemdir. Bu çalışmada, kapsüllenmiş parafinlerin tank içerisindeki konumlarının ısıl enerji depolama performansı üzerindeki etkisi deneysel olarak araştırılmıştır. Parafin kapsüllerin tank tabanından 0, 200, 400, 600 ve 800 mm mesafede yerleştirilmiştir. Yapılan çalışmanın sonucunda, parafin kapsüllerinin tank içerisinde sıcak su bölgesinin başladığı konumdan itibaren yerleştirilmesinin tanktan elde edilen sıcak su miktarını arttırdığı gözlenmiştir. Kapsüller tank tabanından 400 mm mesafede yerleştirilmesi durumunda tanktan 639 litre sıcak su elde edilmiştir. Parafin kapsüllerinin konumunun 0 mm olması durumunda ise 619 litre sıcak su elde edilmiştir. 400 mm'ye kadar elde edilen sıcak su miktarı artış gösterirken, 600 mm'den sonra tanktan elde edilen sıcak su miktarı düşmüştür.

Effect of Position of Encapsulated Phase Change Materials in Hot Water Tanks on Thermal Energy Storage Performance

Keywords

Vertical mantled hot water tank,
Solar domestic hot water system,
Thermal energy storage,
Hybrid thermal energy storage

Abstract: Solar domestic hot water systems are one of the known and common types of renewable energy and thermal energy storage applications. It is a common way to place phase change material in the tank in order to increase the thermal energy storage capacity of the hot water tanks used in solar domestic hot water systems. In this study, the effect of the location of encapsulated paraffin in the tank on thermal energy storage performance was investigated experimentally. Paraffin capsules were placed at a distance of 0, 200, 400, 600 and 800 mm from the tank bottom. As a result of the study, it was observed that the placement of paraffin capsules from the position where the hot water zone started inside the tank increased the hot water output from the tank. When the capsules were placed at a distance of 400 mm from the bottom of the tank, 639 liters of hot water were obtained from the tank. If the position of the paraffin capsules was 0 mm, 619 liters of hot water was obtained. While the amount of hot water obtained up to 400 mm increased, the amount of hot water obtained from the tank decreased after 600 mm.

Makine Mühendisliği Bölümü, Erciyes Üniversitesi, Kayseri
*İlgili yazar, email: erdemir@erciyes.edu.tr

1. Giriş

Enerji depolama; enerji arz talep dengesini kurmak açısından kullanılabilir önemli yöntemlerden biridir. Güneş enerjisi gibi enerji kaynağının sürekli olarak aktif olmadığı enerji kaynaklarında enerji kullanımına devam etmeyi ve enerji pik yüklerini pik olmayan saatlere kaydırmayı sağlarlar. Enerji depolama enerji kaynağı kullanımına devam etmek ve pik yükleri kaydırmanın dışında çok sayıda avantajları vardır. Enerji depolama sistemlerinin avantaj ve dezavantajları Dinçer ve Rosen [1] tarafından detaylı bir şekilde irdelenmiştir. Enerji depolama her bir

enerji türünde gerçekleştirilebilmektedir. Enerji depolama türlerinin; enerji depolama yoğunluğu, sistem ömrü, ilk yatırım maliyeti, gelişmişlik, çevresel etkiler vb. kriterler üzerinden değerlendirilmesi ve kıyaslanması [2] tarafından gerçekleştirilmiştir. Isıl enerji depolama sistemleri; enerji depolama sistemleri arasında teknik uygunluk ve kolay adapte olabilme açısından öne çıkmaktadır. Isı enerjisi dünya genelinde üretilen ve tüketilen enerjinin yarısından fazlasını kapsamaktadır. Ayrıca, enerji kayıplarının büyük kısmı yine ısı enerjisi olarak gerçekleşmektedir. Yaygın üretilen ve kullanılan enerji türü olması, kayıpları geri kazanmada direk olarak kullanılabilmesi açısından da ısı enerji depolama sistemleri önem arz etmektedir.

Güneş enerjili sıcak su elde etme sistemleri hem yenilenebilir enerji uygulaması hem de ısı enerji depolama uygulaması olarak hem bireysel hem de büyük ölçekte yaygın kullanılan sistemlerden biridir. Sıcak su tankları geçmişten günümüze ısı enerji depolamanın en yaygın kullanılan uygulamalarındandır. Sıcak su tanklarının yaygın bir uygulama alanına sahip olmasından dolayı, araştırmacılar tarafından incelenmiş ve iyileştirilmeye çalışılmıştır. Bir sıcak su tankı için en önemli performans kriterlerinden biri sıcaklık tabakalaşmasıdır. Ayrıca tanktan elde edilen sıcak su miktarı da hem kullanıcı memnuniyeti hem de direkt sistem çıkışı olmasından dolayı önemli bir performans kriteridir. İyileştirilmiş sıcak su tankları tanktan elde edilen sıcak su miktarını da arttırmaktadır [3-6]. Sıcak su tanklarının ısı enerji depolama kapasitesini ve tanktan elde edilen sıcak su miktarını arttırmak için tank içerisindeki faz değiştiren malzeme kullanımını etkin bir yöntemdir. Çünkü malzemeler faz değişimi sırasında daha yüksek miktarda enerji gerektirdiği ve ortaya çıkardığından dolayı aynı hacimde daha fazla miktarda enerji depolamaya olanak sağlamaktadır. Faz değiştiren malzemeler tank içerisine farklı şekillerde yerleştirilerek sıcak su tankında hem duyulur hem de gizli ısı enerji depolamaya olanak sağlamaktadır. Böylece tankın ısı enerji depolama kapasitesini önemli ölçüde arttırmaktadır.

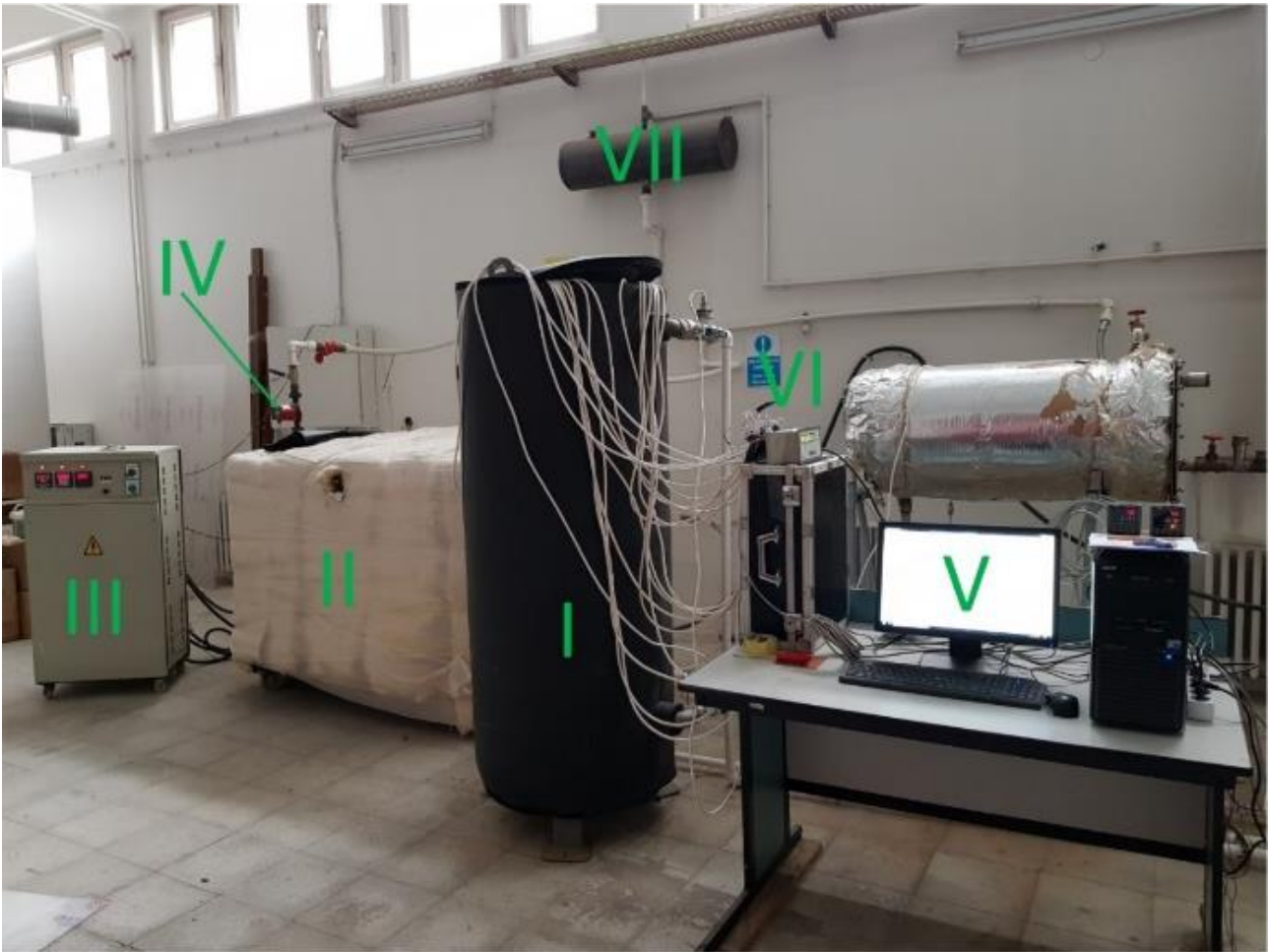
Elias ve Stathopoulos [7] enerji depolama sistemlerinde kullanılan faz değiştiren malzemeler ile alakalı son gelişmeleri ve potansiyelleri incelemişlerdir. Parhizi ve Jain [8] enerji depolama sistemlerinde kullanılan faz değiştiren malzemeleri incelemişler ve onların termofiziksel özelliklerinin sistemin performansını ve optimizasyonunu önemli ölçüde etkilediğini vurgulamışlardır. Alva vd. [9] bazı ısı enerji depolama malzemelerinin güneş enerjili sıcak su sistemlerinde kullanımı incelemişlerdir. Sharif vd. [10] ısıtma ve sıcak su elde sistemlerinde faz değiştiren malzeme kullanımı uygulamalarını incelemişlerdir. Sıcak su tanklarında faz değiştiren malzeme olarak sodyum asetat trihidrat kullanımının ısı enerji depolama performansını önemli ölçüde arttırdığı tespit edilmiştir [11, 12]. Kılıçkap vd. [13] sıcak su tanklarında kalsiyum klorür heksahidrat kullanımının faz değiştiren malzeme olarak etkisi irdelemişlerdir. Yang vd. [14] enerji depolama periyodunda kapsüllü faz değiştiren malzeme kullanımının bir gizli ısı enerji depolama sistemi üzerindeki etkisi incelemişlerdir. He vd. [15] bir sıcak su tankı içerisine 230 kg parafinin kapsüllenmiş şekilde yerleştirmenin etkisini deneysel olarak incelemişler ve bu çalışmanın sonucunda parafinin tankın enerji depolama kapasitesini %30 arttırdığını tespit etmişlerdir. Zhou vd. [16] güneş enerjili sıcak su sisteminde çelik kapsüller içerisinde parafin kullanmanın etkisini araştırmışlar ve parafinin tankın ve sistemin verimini arttırdığını gözlemlemişlerdir. Parakash vd. [17] parafin, puretemp68 ve stearik asit ve palmitik asit karışımı üç farklı faz değiştiren malzemenin sıcak su tankında kullanımının etkisini incelemişlerdir. Sıcak su elde etme sistemlerinde faz değiştiren malzeme duvarı kullanımının etkisi Thantong vd. [18, 19] tarafından araştırılmıştır. Frazzica vd. [20] sıcak su tanklarında makro olarak kapsüllenmiş parafin ve hidrat tuzlarının faz değiştiren malzeme olarak kullanımının etkisini incelemişler ve tanktan elde edilen sıcak su miktarını önemli ölçüde arttırdığını belirtmişlerdir. Mazman vd. [21] parafin, sterik asit ve palmitik asit ve miristik asit karışımının faz değiştiren malzeme olarak kullanımını gerçek şartlar altında 150 litrelik tankta deneysel olarak incelemişlerdir. Fazilati vd. [22] bir düzey mantolu sıcak su tankında küresel kapsüller içerisinde parafin kullanımının enerji depolama yoğunluğunu %39, ekserji verimini %16 ve elde edilen sıcak su tankını %25 arttırmıştır. Meng ve Zhang [23] boru şeklinde gizli ısı enerji depolama sisteminde parafin kullanımının etkisini incelemişlerdir. Agresti vd. [24] parafinin nano emülsiyon olarak ısı enerji depolama sisteminde kullanılmasını incelemişlerdir. Kahvaji vd. [25] parafinin termofiziksel özelliklerinin üretici firmalara göre önemli ölçüde değiştiğini vurgulamışlardır. Bu yüzden parafinin termofiziksel özelliklerinin iyi şekilde belirlenmesi gerekmektedir. Nkwetta vd. [26] sıcak su tanklarında faz değiştiren malzeme kullanımını ve onların konumunun sıcak su ihtiyaç profiline göre değerlendirmesini yapmışlardır. Akgün vd. [27] parafinin katılma ve sıvılaşma karakteristiklerini incelemişlerdir. Felinski ve Sekret [28] vakum tüplü güneş enerjili sıcak su sistemlerinde parafin kullanımının etkisi araştırmışlar ve bu yeni sistemin verimini %45 ile %79 arasında değiştiğini tespit etmişlerdir. Essa vd. [29] vakum tüplü güneş enerjili sıcak su sistemlerinde faz değiştiren malzeme kullanımını enerji yükleme ve boşaltma periyotlarında incelemişlerdir.

Literatür taramasından görüldüğü üzere, sıcak su tanklarında faz değiştiren malzeme kullanmanın tanktan elde edilen sıcak su miktarını arttırmak için önemli potansiyele sahiptir. Ayrıca, faz değiştiren malzeme kullanımının tankın sıcaklık tabakalaşması üzerinde önemli bir etkisi olmadığı görülmektedir. Bu çalışmada, tank içerisine 5 litrelik silindirik kapsüller içerisinde faz değiştiren malzeme olarak parafin yerleştirilmiştir. Parafin kapsüllerinin tank tabanından mesafesinin ısı enerji depolama üzerindeki etkisi deneysel olarak incelenmiştir.

2. Materyal ve Metot

2.1. Deneysel Sistemi

Bu çalışmada Şekil 1'de görülen deneysel sistemi kullanılmıştır. Deneysel sistemi; düşey mantolu sıcak su tankı, ısıtıcı tank, varyak trafo, pompa, bilgisayar, veri toplayıcı, genişleme tankı, debimetreler ve termokupplardan oluşmaktadır. Manto ve şebeke çevrimlerindeki anlık debileri ve geçen toplam su hacimlerini belirlemek için 2 adet debimetre kullanılmıştır. Debimetrelerin anlık ölçüm hassasiyeti $\pm\%1.5$ 'dir. Sıcaklık ölçümleri PT100 tipi termokupplarla gerçekleştirilmiş olup ölçüm hassasiyeti ise ± 0.2 °C'dir. Manto ve şebekeden geçen akışkanların debisini kontrol etmek için vanalar kullanılmıştır. Isıtıcı tank içerisinde 15 kW'lık rezistans bulunmaktadır. Rezistanslara elektrik akımı bir varyak trafo tarafından sağlanmaktadır. Varyak trafo üzerinde bir otomatik kontrol birimi bulunmakta olup, ısıtıcı tank içerisindeki sıcaklık suyun ± 2 °C tutulmaktadır. Isıtıcı tank içerisindeki su bir sirkülasyon pompasıyla düşey mantolu sıcak su tankına gönderilmektedir. Deneysel için şebeke suyu direk şebeke hattından sağlanmıştır. Deneysel sistemde akan suyun sıcaklık farklılıklarından kaynaklanan hacim değişimlerinin sisteme zarar vermemesi için bir genişleme tankı sisteme entegre edilmiştir. Termokupplardan ve debimetrelerden gelen bilgileri işlemek ve kaydetmek için bir adet ELİMKO E680 veri toplayıcı kullanılmıştır. Deneysel verilerinin işlenmesi ve görüntülenmesi için bir adet bilgisayar kullanılmıştır.



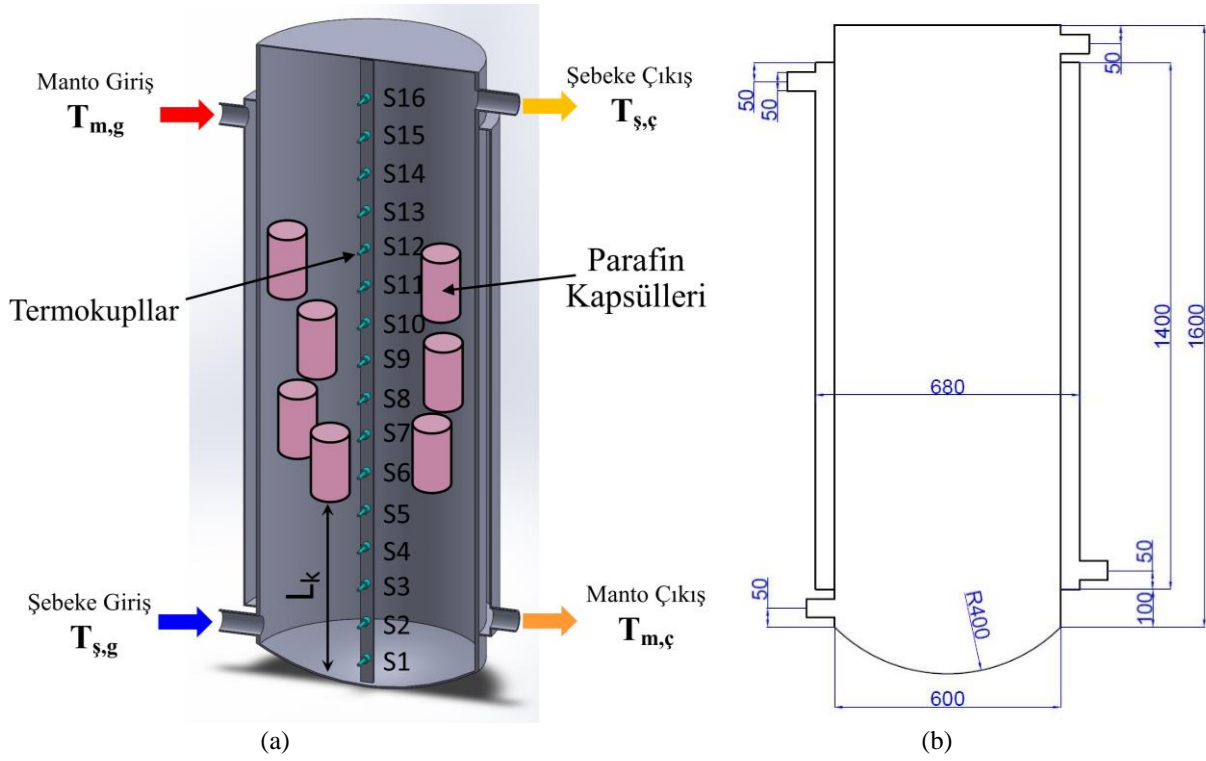
I: test tankı, II: ısıtıcı, III: varyak trafo, IV: pompa, V: bilgisayar, VI: veri toplayıcı, VII: genişleme tankı

Şekil 1. Deneysel sistemin görünümü

2.2. Düşey Mantolu Sıcak Su Tankı

Bu çalışmada, güneş enerjili sıcak su sistemlerinde yaygın olarak kullanılan bir düşey mantolu sıcak su tankı kullanılmıştır. Tankın görünümü Şekil 1'de (I) numara ile verilmiştir. Test tankının şematik görünümü ve ölçüleri Şekil 2'de verilmiştir. Tank 450 litre olup, 2 mm kalınlığında paslanmaz çelik plakalardan üretilmiştir. Tankın giriş ve çıkışları 50 mm çaptadır. Tanktan çevreye olan ısı kaybını azaltmak için tankın üzeri 6 cm kalınlığında kauçuk köpük malzeme yalıtım malzemesi ile kaplanmıştır. Tank içerisinden ölçüm almak için tank tabanından başlayarak her 100 mm'de bir sıcaklık ölçümü alınmıştır. Toplamda 16 termokupl yerleştirilmiştir. Bu termokuplları tank içerisine yerleştirmek için 40 mm genişliğinde bir çubuk kullanılmıştır. Şekil 2.a'dan görüldüğü üzere, termokupllar tankın alt kısmından başlayarak S1, S2, S3, ..., S16 olarak adlandırılmıştır. Kapsüller tank içerisinde

dairesel tel kafesle yapıya sahip paslanmaz metal ile sabitlenmiştir. Deneylerde ticari bir parafin kullanılmıştır. Parafinin özellikleri Tablo 1'de verilmiştir.



Şekil 2. Düşey mantolu sıcak su tankının a) şematik görünümü; b) ölçüleri

Tablo 1. Çalışmada kullanılan parafinin özellikleri [30]

Erime noktası	62-66 °C
Yağ içeriği	%1-2
Özgül ısı	2700 J/kg K
Faz değişim enerjisi	220 kJ/kg
Isı iletim katsayısı	0.179 W/m K
Yoğunluk	880 kg/m ³

2.3. Deneysel Prosedürü

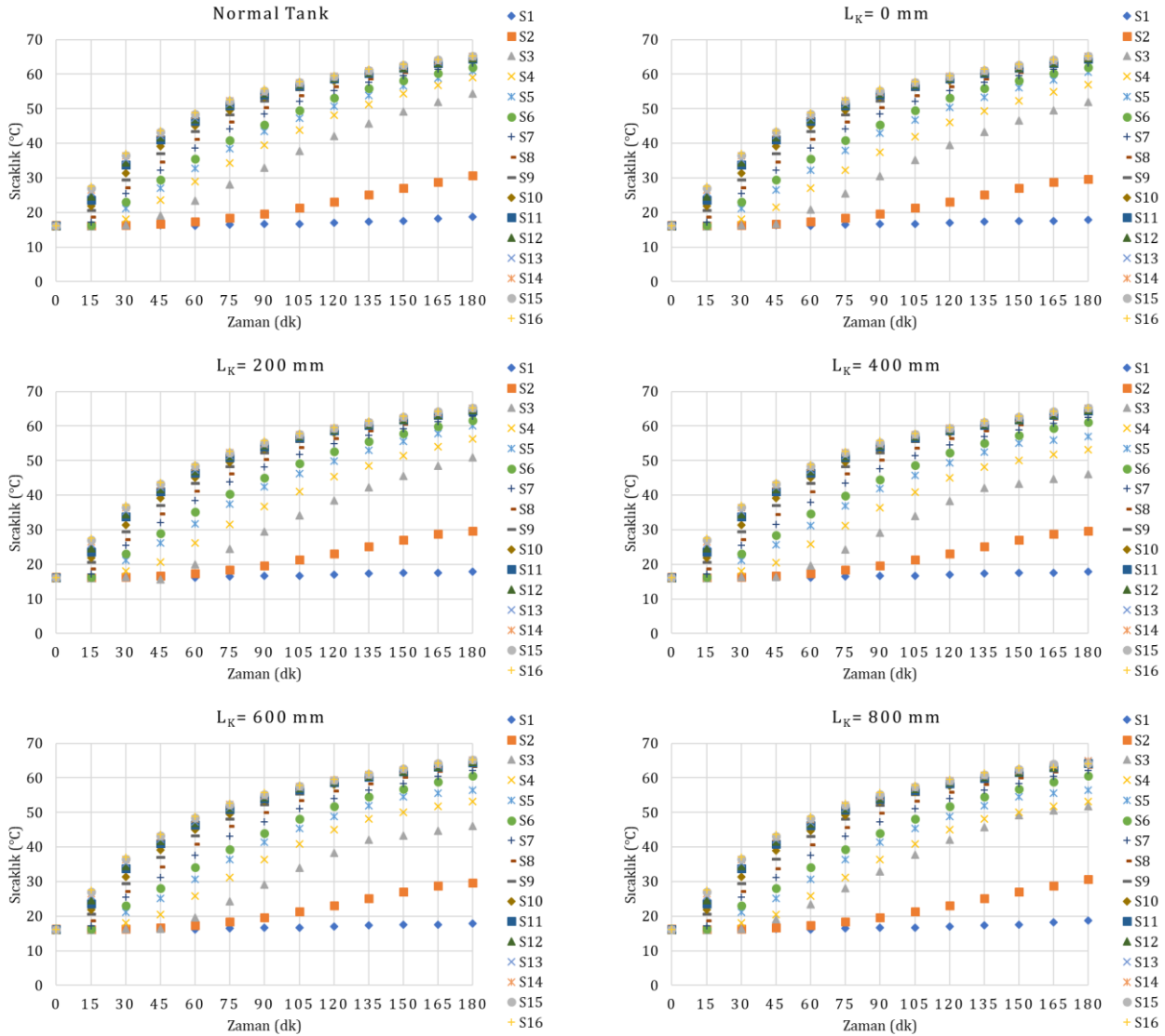
Bu çalışma kapsamında kapsüller tank tabanından başlayarak $L_k=0, 200, 400, 600$ ve 800 mm mesafede yerleştirilmiştir. İçerisinde kapsül olmayan durumlarla beraber 6 farklı durum için deney gerçekleştirilmiştir. Tank içerisine 13 kapsül yerleştirilmiştir. Toplam kapsül hacmi 65 litre olup, kapsüller içerisinde 32.5 kg parafin bulunmaktadır. Deneyler $T_{m,g}=70$ °C ve $V_{manto}=5$ l/min olan tek bir yükleme şartında gerçekleştirilmiştir. Enerji yükleme deneyleri 3 saat boyunca gerçekleştirilmiştir. Enerji yükleme deneylerinin hemen ardından enerji boşaltma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Enerji boşaltma deneyleri şebeke çıkış sıcaklığı $T_{s,ç}=30$ °C'ye düşene kadar sürdürülmüştür. Enerji yükleme periyodunda şebeke çevrimi kapalıyken, enerji boşaltma periyodunda da manto çevrimi kapalıdır. Deneyler sırasında şebeke giriş sıcaklığı yaklaşık 17.5 °C ve çevre sıcaklığı ise 18 °C civarında kalmıştır. Toplamda 18 farklı durum için deneyler gerçekleştirilmiştir. Deneyler sırasında tank içerisinden 16 sıcaklık, tank giriş/çıkışlarından 4 ve çevre sıcaklığı olmak üzere 21 sıcaklık ölçümü alınmıştır. Manto ve şebeke debisi olmak üzere iki hacimsel debi değeri ölçülmüştür. Ölçümler her 10 s'de bir alınmıştır. Ayrıca hem enerji yükleme hem de enerji boşaltma periyotlarında sistemden geçen toplan su hacmi de gözlemlenmiştir.

3. Bulgular ve Tartışma

Bu çalışmada, tank içerisine parafin kapsüllerinin tank içerisindeki konumlarının ısıl enerji depolama performansı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Sonuçlar tank içerisindeki sıcaklık dağılımları, giriş ve çıkış sıcaklıklarının zamanla değişimi, Richardson sayısı ve tanktan elde edilen sıcak su miktarı üzerinden değerlendirilmiştir.

3.1. Kapsül Konumunun Enerji Yükleme Periyodunda Sıcaklık Dağılımı ve Manto Giriş/Çıkış Sıcaklıkları Üzerindeki Etkisi

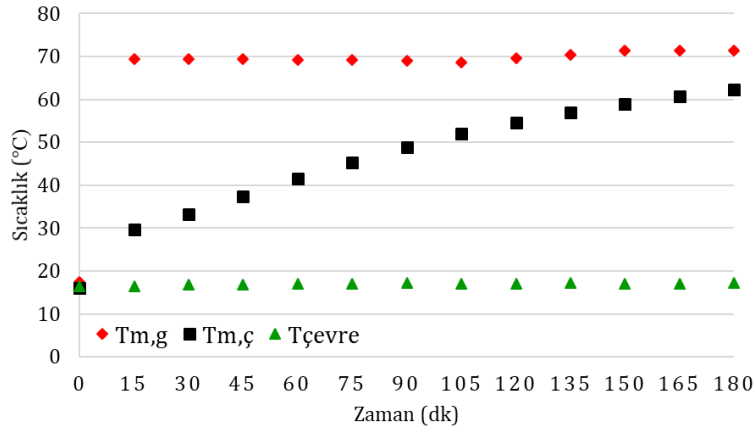
İçerisinde parafin kapsülü bulunmayan normal tank için ve tank tabanından farklı yüksekliklerde 13 kapsül bulunan durumlar için 180 dakikalık enerji yükleme periyodunda sıcaklıkların zamanla değişimi Şekil 3'te verilmiştir. Şekil 3'ten görüldüğü üzere, içerisinde parafin kapsüllerinin bulunmayan tankta 180 dakikalık enerji depolama süresi sonunda tankın alt kısmında bir soğuk su bölgesi bulunmaktadır. Tank tabanından 100 mm'de su sıcaklığı neredeyse şebeke suyu sıcaklığına eşit olup 18°C 'dir. 200 mm mesafedeki su sıcaklığı ise 30.5°C 'dir. Tank tabanından 300 mm mesafeden sonra tank içerisindeki suyun sıcaklığı ani olarak yükselmiş ve 400 mm'den sonra tank içerisindeki sıcak su bölgesi başlamıştır. Termoklin (thermocline) bölgesi olarak adlandırılan düşük sıcaklıktan yüksek sıcaklığa geçiş bölgesi oldukça dar bir bölgede kalmıştır. Geçiş bölgesi kalınlığı yaklaşık 200 mm'dir. Tank içerisine kapsül yerleştirmek ve kapsül konumlarının sıcaklık dağılımı karakteristiği üzerinde önemli bir etkisi olmadığı Şekil 3'ten görülmektedir. Kapsüller bulunduğu konumların sıcaklık seviyesini etkilemiştir. L_K mesafesinin artmasıyla, Tankın alt kısmındaki soğuk bölgenin yeri değişirse de üst kısımdaki sıcak su seviyesi düşüş göstermiştir. $L_K=0$ ve 200 mm olduğu durumda, sıcaklık dağılımı karakteristikleri önemli bir değişiklik olmamakla beraber, S3, S4 ve S5 konumlarında yaklaşık 1°C 'lik düşüş gerçekleşmiştir. Ancak termoklin kalınlığında ciddi bir değişiklik olmamıştır. $L_K=400$ ve 600 mm olması durumunda, S3, S4 ve S5 sıcaklıklarında meydana gelen düşüşten dolayı tankın termoklin kalınlığı genişlemiştir. $L_K=800$ mm durumunda, tankın alt S1 ile S7 arasındaki sıcaklık dağılımı normal tank ile benzerken, S8 ile S16 arasında parafin kapsüllerinin enerji absorbe etmesiyle beraber sıcaklıklar yaklaşık olarak 0.5 ile 1.5°C arasında düşmüştür. Sıcaklık dağılımı karakteristiğinden ve termoklin kalınlığından görüldüğü üzere, tank içerisindeki sıcaklık tabakalaşmasının derecesi tank içerisine kapsül yerleştirilmesiyle olumsuz etkilenmiştir. $L_K=400$ ve 600 mm olduğu durumlarda sıcaklık tabakalaşmasının derecesi en kötü durumdadır.



Şekil 3. Enerji yükleme periyodunda tank içerisindeki sıcaklık dağılımının zamanla gelişimi

Güneş enerjili sıcak su sistemlerinde sistemin sürekli kullanılmaması durumunda tank içerisinde sıcaklık seviyesi aşırı seviyede yükselir. Sistem kullanılmadığı zaman tank içerisindeki su sıcaklığı düşmeden yeniden yükseleceğinden su kaynamaya başlar. Bu durum buhara kalma olarak adlandırılır ve hem sisteme hem de kullanıcılara zarar verebilir. Buhara kalma durumunun önüne geçmek ve tank içerisindeki sıcaklığı kontrol etmek için tank içerisinde faz değiştiren malzeme kullanmak etkili bir yöntemdir. Şekil 3'ten görüldüğü üzere, tank içerisindeki sıcaklık, tank içerisine 13 kapsül ve 32.5 kg parafin yerleştirme ile tank içerisindeki sıcaklık 1.5 °C düşürülebilmektedir.

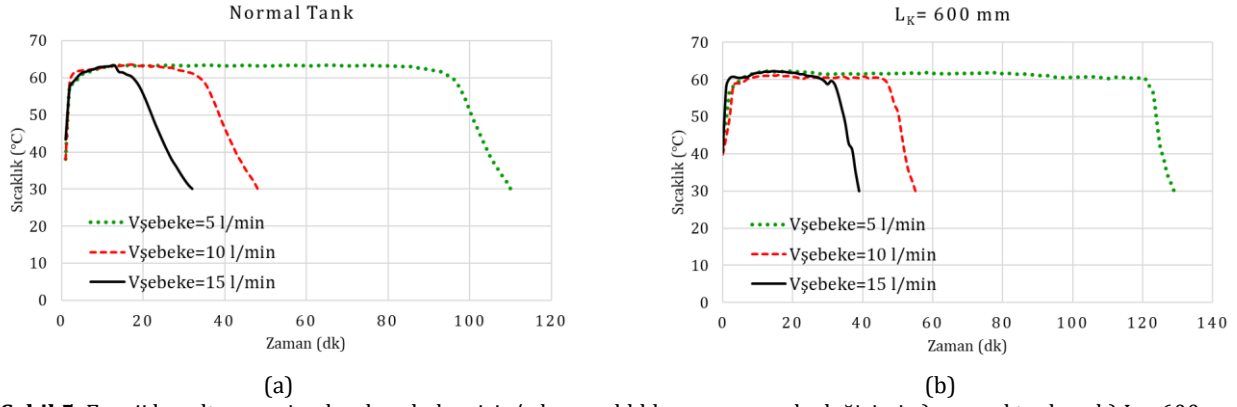
Deneyler sırasında enerji yükleme periyodunda sadece manto çevrimi aktifti. Deneyler tek bir enerji yükleme şartında ($T_{m,g}=70$ °C ve $V_{manto}=5$ l/min) şartında gerçekleştirilmiştir. Şekil 4'te enerji yükleme periyodunda manto giriş ve çıkış sıcaklıklarının zamanla değişimi görülmektedir. Şekil 4'teki durum tüm kapsül durumlarında benzerdir. Tüm durumlarda tanka aynı miktarda enerji yüklenmiştir. Çevre sıcaklığı tüm deneyler boyunca 18 ± 1 °C'de seyretmiştir.



Şekil 4. Enerji yükleme periyodunda manto giriş ve çıkış sıcaklıklarının zamanla değişimi

3.2. Kapsül Konumunun Şebeke Giriş ve Çıkış Sıcaklıkları Üzerindeki Etkisi

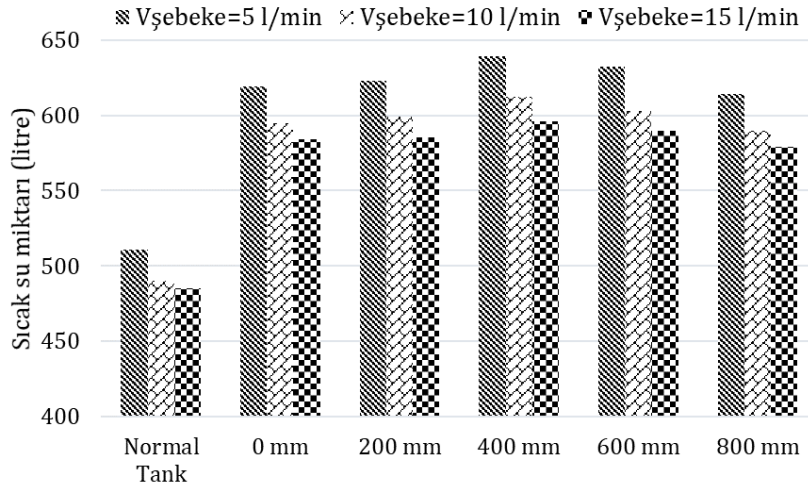
Bir sıcak su tankında depolanan enerjinin geri kazanılan kısmı, şebeke giriş ve çıkış sıcaklıklarından direk olarak anlaşılmaktadır. Sıcak su tanklarında şebeke giriş suyu giriş sıcaklığı sıcak su kullanımı sırasında genellikle sabit kalmaktadır. Bu çalışmada, enerji boşaltma döneminde şebeke giriş sıcaklığı 16 ile 17.5 °C civarında seyretmiştir. Şebeke giriş sıcaklığı neredeyse sabit seyrettiğinden şebeke çıkış sıcaklığının yüksekliği ve elde edilen sıcak suyun miktarı tanktan geri kazanılan enerji miktarını belirlemektedir. İçerisinde engel bulunmayan ve 13 kapsülün $L_K=600$ mm pozisyonun yerleştirildiği durumdaki şebeke giriş ve çıkış sıcaklıklarının zamanla değişimi Şekil 5'te görülmektedir. Şekil 5'ten görüldüğü üzere, içerisinde kapsül olmayan duruma göre şebeke çıkış sıcaklığı yaklaşık 1.5 °C düşmüş ancak enerji boşaltma periyodu uzamıştır. Şebeke debisinin 5 l/dk olduğu durumda normal tankta enerji boşaltma süresi 32 dakika sürmüştür, 13 kapsülün $L_K=600$ mm konumunda olduğu durumda ise 39 dakika sürmüştür. Şebeke debisinin 10 l/dk olduğu durumda normal tank ve içerisinde 13 kapsül bulunan tank için sırasıyla 48 ve 55 dakika, 15 l/dk olduğu durumda enerji boşaltma süresi 110 ve 120 dakika sürmüştür. Ayrıca, içerisinde engel bulunmayan tankta tanktan en yüksek seviyede alınan suyun sıcaklığının 30 °C'ye düşmesi 20 dakika sürerken, içerisinde kapsül bulunan durumlarda yaklaşık 10 dakika sürmüştür. Şekil 5.b'de görülen sıcaklık değişim karakteristiği tüm L_K durumlarında benzerdir. Sadece en yüksek seviyeden alınan suyun süresi değişmiştir. Bu süre değişimi de tanktan elde edilen sıcak suyun miktarını değiştirmiştir.



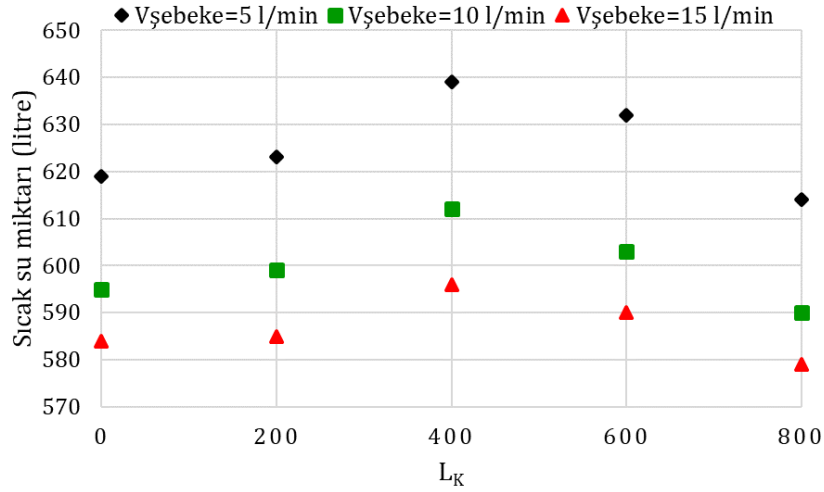
Şekil 5. Enerji boşaltma periyodunda şebeke giriş/çıkış sıcaklıklarının zamanla değişimi a) normal tank ve b) $L_K=600$ mm

3.3. Kapsül Konumunun Tanktan Elde Edilen Sıcak Miktarı Üzerindeki Etkisi

Bir sıcak su tankından alınan en önemli çıktı tanktan elde edilen sıcak su miktarıdır. Kullanıcılar tarafından bir tanktan elde edilen sıcak su miktarı en yüksek miktarda ve yüksek sıcaklıkta istenir. Bu çalışmada tank içerisine 13 kapsül yerleştirilmiştir. 13 kapsül toplamda tank içerisinde 65 litre hacim kaplamaktadır ve kapsüller içerisinde 32.5 kg parafin bulunmaktadır. Tank içerisinde 13 parafin kapsülü yerleştirmek tanktan elde edilen sıcak su miktarını en az %20 arttırmıştır. Bu artışı parafinin faz değişimi sırasında bünyesinde depoladığı gizli ısı enerjisiyle sağlamaktadır. Şekil 6'da bu çalışmada incelenen tüm durumlar için tanktan elde edilen sıcak su miktarı görülmektedir. Tanktan en yüksek miktarda sıcak su $L_K=400$ mm konumunda elde edilmiştir. Normal tanka göre tanktan elde edilen sıcak su miktarı 110 litre artmıştır. Şekil 7'de tanktan elde edilen sıcak su miktarının parafin konumu ile değişimi görülmektedir. Şekil 7'den görüldüğü üzere, düşey mantolu sıcak su tankından maksimum miktarda sıcak su elde etmek için kapsüller tank tabanından $L_K=400$ mm konumda tutulmalıdır. Kapsüllerin konumu ayarlanarak tanktan elde edilen sıcak su miktarı 20 litre artırılabilir. Bu durum üzerinde en önemli etken tank içerisindeki sıcaklık dağılımıdır. Tank içerisindeki kapsül bulunmayan durumda tankın ilk 200 mm'lik kısmında soğuk su bölgesi ve 400 mm'lik konuma kadar ise termoklin bölgesi bulunmaktadır. Bu bölgelerde parafin kapsülleri tutulsa da parafin sıcaklığı yükselip erimeyeceğinden efektif olarak enerji depolamayacaktır. Parafin kapsüllerinden maksimum seviyede yararlanmak için tank içerisindeki sıcaklık karakteristiği iyi bir şekilde incelenmelidir. Parafin kapsülleri sıcak su bölgesinin tank tabanının en yakın bölgesine konumlandırılmalıdır.



Şekil 6. Çalışmada incelenen tüm durumlar için tanktan elde edilen sıcak su miktarları



Şekil 7. Tanktan elde edilen sıcak miktarının kapsül konumları ile değişimi

4. Sonuçlar

Bu çalışmada düşey mantolu sıcak su tanklarında tank içerisinde yerleştirilen parafinlerin konumlarının ısı enerji depolama üzerindeki etkisi incelenmiştir. Tank içerisine içinde 2.5 kg parafin bulunan 13 adet 5 litrelik silindirik kapsül yerleştirilmiştir. Kapsüller tank tabanından $L_K=0, 200, 400, 600$ ve 800 mm mesafelere yerleştirilmiştir. Yapılan çalışmanın sonucunda aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

- Tank içerisinde toplam 65 litre hacim kaplayan 32.5 kg parafin yerleştirmek tanktan elde edilen sıcak su miktarını önemli ölçüde arttırmaktadır. Tanktan elde edilen sıcak su miktarı en az %20 seviyede arttırılabilir.
- Tank içerisinde parafin kapsüllerinin tutulduğu konum ayarlanarak tanktan elde edilen sıcak su miktarı 20 litreye kadar arttırılabilir. En yüksek miktarda sıcak su $L_K=400$ mm konumunda elde edilmiştir.
- Tank içerisinde parafin kapsülleri sıcaklık tabakalaşmasını $L_K=0$ ve 200 mm konumlarında etkilemezken, $L_K=400$ ve 600 mm konumlarında olumsuz yönde etkilemiştir. $L_K=400$ mm konumunda tank içerisindeki sıcaklık tabakalaşmasının derecesi düşse de tanktan en yüksek miktarda sıcak su yine aynı konumda elde edilmiştir.
- Tank içerisine yerleştirilen faz değiştiren malzemelerden maksimum seviyede yararlanmak için tank içerisindeki konumu dikkatli bir şekilde ayarlanmalıdır. Parafin kapsülleri tank içerisindeki sıcak su bölgesinin başladığı tank tabanına en yakın konumda tutulmalıdır.

Kısaltmalar ve Semboller

L_K	:	Kapsül konumu (mm)
S1, S2, ... S16	:	Tank içerisindeki termokupl konumları
$V_{\text{şebeke}}$:	Şebeke giriş debisi (l/dk)
$T_{\text{çevre}}$:	Çevre sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)
$T_{m,g}$:	Manto giriş sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)
$T_{m,ç}$:	Manto çıkış sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)
$T_{ş,g}$:	Şebeke giriş sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)
$T_{ş,ç}$:	Şebeke çıkış sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)

Teşekkür

Bu çalışma TÜBİTAK 1002 Hızlı Destek Programı kapsamında 217M993 nolu proje kapsamında desteklenmiştir. Yazar sağlanmış olduğu destekten dolayı TÜBİTAK'a teşekkürlerini sunar.

Kaynakça

- [1] Acar, C. 2018. A comprehensive evaluation of energy storage options for better sustainability. International Journal of Energy Research, 42(12), 3732-3746. doi:10.1002/er.4102
- [2] Agresti, F., Fedele, L., Rossi, S., Cabaleiro, D., Bobbo, S., Ischia, G., & Barison, S. 2019. Nano-encapsulated PCM emulsions prepared by a solvent-assisted method for solar applications. Solar Energy Materials and Solar Cells, 194, 268-275. doi:10.1016/j.solmat.2019.02.021

- [3] Akgün, M., Aydın, O., Kaygusuz, K. 2007. Experimental study on melting/solidification characteristics of a paraffin as PCM. *Energy Conversion and Management*, 48(2), 669-678. doi:10.1016/j.enconman.2006.05.014
- [4] Alva, G., Liu, L., Huang, X., Fang, G. 2017. Thermal energy storage materials and systems for solar energy applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 68, 693-706. doi:10.1016/j.rser.2016.10.021
- [5] Arslan, M., Igci, A. A. 2015. Thermal performance of a vertical solar hot water storage tank with a mantle heat exchanger depending on the discharging operation parameters. *Solar Energy*, 116, 184-204. doi:10.1016/j.solener.2015.03.045
- [6] Dehghan, A. A., Barzegar, A. 2011. Thermal performance behavior of a domestic hot water solar storage tank during consumption operation. *Energy Conversion and Management*, 52(1), 468-476. doi:10.1016/j.enconman.2010.06.075
- [7] Dincer, I., Rosen, M. A. 2011. *Thermal Energy Storage Systems and Applications*: Wiley and Sons, Ltd., Publication.
- [8] Elias, C. N., Stathopoulos, V. N. 2019. A comprehensive review of recent advances in materials aspects of phase change materials in thermal energy storage. *Energy Procedia*, 161, 385-394. doi:10.1016/j.egypro.2019.02.101
- [9] Erdemir, D., Altuntop, N. 2016. Effect of thermal stratification on energy and exergy in vertical mantled heat exchanger. *International Journal of Exergy*, 20(1), 105-121. doi:10.1504/ijex.2016.076681
- [10] Essa, M. A., Mostafa, N. H., Ibrahim, M. M. 2018. An experimental investigation of the phase change process effects on the system performance for the evacuated tube solar collectors integrated with PCMs. *Energy Conversion and Management*, 177, 1-10. doi:10.1016/j.enconman.2018.09.045
- [11] Fazilatı, M. A., Alemrajabi, A. A. 2013. Phase change material for enhancing solar water heater, an experimental approach. *Energy Conversion and Management*, 71, 138-145. doi:10.1016/j.enconman.2013.03.034
- [12] Feliński, P., Sekret, R. 2016. Experimental study of evacuated tube collector/storage system containing paraffin as a PCM. *Energy*, 114, 1063-1072. doi:10.1016/j.energy.2016.08.057
- [13] Frazzica, A., Manzan, M., Sapienza, A., Freni, A., Toniato, G., Restuccia, G. 2016. Experimental testing of a hybrid sensible-latent heat storage system for domestic hot water applications. *Applied Energy*, 183, 1157-1167. doi:10.1016/j.apenergy.2016.09.076
- [14] He, Z., Wang, X., Du, X., Amjad, M., Yang, L., Xu, C. 2019. Experiments on comparative performance of water thermocline storage tank with and without encapsulated paraffin wax packed bed. *Applied Thermal Engineering*, 147, 188-197. doi:10.1016/j.applthermaleng.2018.10.051
- [15] Huang, H., Wang, Z., Zhang, H., Dou, B., Huang, X., Liang, H., Goula, M. A. 2019. An experimental investigation on thermal stratification characteristics with PCMs in solar water tank. *Solar Energy*, 177, 8-21. doi:10.1016/j.solener.2018.11.004
- [16] Kahwaji, S., Johnson, M. B., Kheirabadi, A. C., Groulx, D., White, M. A. 2018. A comprehensive study of properties of paraffin phase change materials for solar thermal energy storage and thermal management applications. *Energy*, 162, 1169-1182. doi:10.1016/j.energy.2018.08.068
- [17] Kılıçkap, S., El, E., Yıldız, C. 2018. Investigation of the effect on the efficiency of phase change material placed in solar collector tank. *Thermal Science and Engineering Progress*, 5, 25-31. doi:10.1016/j.tsep.2017.10.016
- [18] Mazman, M., Cabeza, L. F., Mehling, H., Noguez, M., Evliya, H., Paksoy, H. Ö. 2009. Utilization of phase change materials in solar domestic hot water systems. *Renewable Energy*, 34(6), 1639-1643. doi:10.1016/j.renene.2008.10.016
- [19] Meng, Z. N., & Zhang, P. (2017). Experimental and numerical investigation of a tube-in-tank latent thermal energy storage unit using composite PCM. *Applied Energy*, 190, 524-539. doi:https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.12.163
- [20] Nkwetta, D. N., Vouillamoz, P.-E., Haghighat, F., El-Mankibi, M., Moreau, A., & Daoud, A. (2014). Impact of phase change materials types and positioning on hot water tank thermal performance: Using measured water demand profile. *Applied Thermal Engineering*, 67(1), 460-468. doi:https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.03.051
- [21] Parhizi, M., & Jain, A. (2019). The impact of thermal properties on performance of phase change based energy storage systems. *Applied Thermal Engineering*, 114154. doi:https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114154
- [22] Prakash, J., Roan, D., Tauqir, W., Nazir, H., Ali, M., & Kannan, A. (2019). Off-grid solar thermal water heating system using phase-change materials: design, integration and real environment investigation. *Applied Energy*, 240, 73-83. doi:https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.02.058
- [23] Sharif, M. K. A., Al-Abidi, A. A., Mat, S., Sopian, K., Ruslan, M. H., Sulaiman, M. Y., & Rosli, M. A. M. (2015). Review of the application of phase change material for heating and domestic hot water systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 42, 557-568. doi:https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.09.034

- [24] Thantong, P., & Chantawong, P. (2017). Experimental Study of Solar - Phase Change Material Wall for Domestic Hot Water Production under the Tropical Climate. *Energy Procedia*, 138, 38-43. doi:<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.10.042>
- [25] Thantong, P., Khedari, J., & Chantawong, P. (2018). Study of Solar- PCM Walls for domestic hot water production under the tropical climate of Thailand. *Materials Today: Proceedings*, 5(7, Part 1), 14880-14885. doi:<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.04.023>
- [26] Wang, Z., Zhang, H., Huang, H., Dou, B., Huang, X., & Goula, M. A. (2019). The experimental investigation of the thermal stratification in a solar hot water tank. *Renewable Energy*, 134, 862-874. doi:<https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.11.088>
- [27] Yang, H., Song, J., He, B., & Ding, G. (2019). Numerical study on charging characteristics of heat pipe-assisted cylindrical capsule for enhancing latent thermal energy storage. *Solar Energy*, 190, 147-155. doi:<https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.08.007>
- [28] Zachár, A. (2015). Investigation of a new helical flow distributor design to extract thermal energy from hot water storage tanks. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 80, 844-857. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.09.055>
- [29] Zhou, Z., Liu, J., Wang, C., Huang, X., Gao, F., Zhang, S., & Yu, B. (2018). Research on the application of phase-change heat storage in centralized solar hot water system. *Journal of Cleaner Production*, 198, 1262-1275. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.281>
- [30] BAYKIM Chemicals. 2019. Erişim tarihi: 18.08.2019., Available from: <http://www.baykim.com.tr/tr-TR/12-22/3/10/66/>.