

CaCl₂.6H₂O ve Na₂SO₄.10H₂O Faz Değişim Malzemelerinin Kullanıldığı Gizli Termal Enerji Depolama Ünitesinde Farklı Tip Bir Kanat Kullanmanın FDM'nin Erime Süresine Etkisinin HAD Analiziyle Araştırılması

Fadime ŞİMŞEK*¹, Sefa ORGAN²

Öz

Bu çalışmada, CaCl₂.6H₂O (Kalsiyum klorür heksahidrat) ve Na₂SO₄.10H₂O (Sodyum klorür dekahidrat) inorganik faz değişim malzemelerinin (FDM) gizli ısı depolama özelliklerinden faydalanılarak termal enerji depolamak için çift borulu eşmerkezli bir ısı değiştiricisi tasarlanmıştır. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) analizleri, işletme atık ısı değerlerine uygun olarak seçilen 50 °C, 60 °C ve 70 °C ITA (ısı transfer akışkanı) su sıcaklıkları için ANSYS Fluent ticari programı yardımıyla yapılmıştır. İki boyutlu ve zamana bağlı olarak gerçekleştirilen analizlerle öncelikle kanatçiksiz durumdaki, daha sonra ısı transferini arttırmak amacıyla FDM içerisine literatürden farklı bir tip kanat yerleştirilmesi durumundaki FDM erime süresi analizleri tamamlanmıştır. Kanat etkenlikleri sırasıyla 2,2, 3,3, 4,4, 5,5 olarak literatürden farklı bir şekilde ANSYS analiziyle tespit edilen 6,9,12,15 kanatlı modellerin, kanatsız modele göre optimum atık ısı sıcaklığı olarak belirlenen 60 °C sıcaklıkta erime prosesleri incelenmiştir. Kanatçiksiz durumda CaCl₂.6H₂O'ın 140 dakikada, Na₂SO₄.10H₂O' ün ise 180 dakikada erime gösterdiği görülmüştür. Bu durumun nedeni CaCl₂.6H₂O'nin ısı iletim katsayısının daha yüksek olmasıdır. Kanatsız duruma göre kanat sayısının artmasıyla erime sürelerinin, CaCl₂.6H₂O faz değişim malzemesi için %71,42, %75,71, %79,28 ve %82,14, Na₂SO₄.10H₂O için ise %73,33, %77,77, %80 ve %81,66 oranında azaldığı belirlenmiştir. Analiz sonuçlarına göre, ITA sıcaklığı ve kanat sayısındaki artışla FDM'nin erime süresinin azaldığı ve ısı transfer akışkanından faz değişim malzemesine daha hızlı bir şekilde ısı enerjisi aktarıldığı tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Termal enerji depolama, FDM, kanat, erime süresi.

Investigation of The Effect of Using Different Type of Fin on The Melting Time of PCM in A Latent Thermal Energy Storage Unit Using CaCl₂.6H₂O and Na₂SO₄.10H₂O Phase Change Materials by CFD Analysis

Abstract

In this study, a double tube concentric heat exchanger was designed to store thermal energy by utilizing the latent heat storage properties of CaCl₂.6H₂O (calcium chloride hexahydrate) and Na₂SO₄.10H₂O (sodium chloride decahydrate) inorganic phase change materials (PCM). Computational Fluid Dynamics (CFD) analyzes were performed with the help of ANSYS Fluent commercial program for 50 °C, 60 °C and 70 °C ITA (heat transfer fluid) water temperatures selected in accordance with the operational waste heat values. With the two-dimensional and time-dependent analyzes, the PCM melting time analyzes were completed first in the finless state and then in the case of placing a different type of fin in the PCM in order to increase the heat transfer. Different from the literature, the fin effectiveness of 6,9,12,15 finned models, which were determined by ANSYS analysis as 2.2, 3.3, 4.4, 5.5, respectively, were at 60 °C, which was determined as the optimum waste heat temperature compared to the finless model. It was observed that CaCl₂.6H₂O melted in 140 minutes and Na₂SO₄.10H₂O in 180 minutes in the finless state. The reason for this situation is that the thermal conductivity coefficient of CaCl₂.6H₂O is higher. With the increase in the number of fins compared to the finless condition, the melting times decreased by 71.42%, 75.71%, 79.28% and 82.14% for CaCl₂.6H₂O phase change material, and 73.33%, 77.77%, 80% and 81.66% for Na₂SO₄.10H₂O. According to the results of the analysis, it was determined that the melting time of PCM decreased with the increase in ITA temperature and the number of fins, and heat energy was transferred from heat transfer fluid to phase change material more quickly.

Keywords: Thermal energy storage, PCM, fin, melting time.

¹ Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Erzurum, Türkiye, fadimesimsek@atauni.edu.tr

² Makine Mühendisi, Erzurum, Türkiye, sefaorgan2@gmail.com

¹<https://orcid.org/0000-0002-1440-7480>

²<https://orcid.org/0000-0002-5926-6212>

1. Giriş

Fosil enerji kaynaklarının, insanoğlunun enerji tüketim hızındaki artışa bağlı olarak her geçen gün azalıyor olması, dünyayı yeni enerji kaynaklarının araştırılmasına yöneltmektedir. Günümüzde geleneksel enerji kaynaklarının çevreye verdikleri zararların yanı sıra oluşturdukları iklim değişiklikleri, yenilenebilir enerji sistemlerinin geliştirilmesine yönelik çalışmaları hızlandırmaktadır. Bu bağlamda; güneş enerjisi, atık ısı enerjisi gibi sistemlere entegre edilerek enerji üretiminin sürekliliğini desteklemek amacıyla, termal enerji sistemleri (TES) üzerine çalışmalar gelişen teknolojiye paralel olarak sürdürülmektedir.

Termal enerji depolama sistemleri genel olarak duyulur ısı depolama, kimyasal ısı depolama ve faz değişim malzemesiyle gizli ısı depolama şeklinde ifade edilmektedir. Son zamanlarda yüksek depolama kapasitesi ve faz değişimi boyunca sıcaklığın sabit kalması gibi avantajlarından dolayı, FDM kullanılarak termal enerji depolamaya ilgi artmaktadır. FDM kullanılan termal enerji depolama sistemleri, binalardaki enerji kullanımını azaltmak için faydalı elektrik enerjisi potansiyelinin maximum yükünü değiştirebilme potansiyeli de gösterir (Khadiran ve ark., 2016). Termal enerji depolama sistemlerinin büyük ölçekli tesislere uygulanabilmesi için veriminin araştırılması ve pilot ünitelerde ön çalışmalarının yapılması maliyet analizi açısından da önemlidir.

Termal enerji depolamada dar bir sıcaklık aralığında katı halden sıvı hale geçebilen ve faz değişimi sırasında yüksek enerji depolayabilme potansiyeline sahip olabilen faz değişim malzemelerinin kullanımına son yıllarda ilgi oldukça artmıştır (Medrano ve ark., 2009). FDM'ler kimyasal kararlılık, çalışma sıcaklığındaki düşük buhar basıncı, ısının geri kazanımı esnasında hafif sıcaklık düşüşü, aşındırıcı özelliği olmaması gibi olumlu özelliklere sahiptirler (Pahamli ve ark., 2016). Faz değişim malzemelerin termal iletkenliklerinin düşük olması nedeniyle ısı transfer akışkanının verdiği ısıyı erime esnasında absorbe etmeleri ve katılaşma esnasında deşarj etmeleri uzun zaman alabilmektedir. Bu nedenle FDM ile ITA (ısı transfer akışkanı) olan su arasındaki ısı transferini arttırmak, erime ve katılaşma süresini kısaltmak amacıyla FDM içerisine nanopartikül ilavesi, farklı geometrili kanatlar yerleştirilmesi, farklı depolama ünitesi modellerinin tasarlanması gibi pek çok uygulama yürütülmektedir

Uygun FDM'nin seçiminde termofiziksel, kinetik, kimyasal özellikleri ve ekonomik faktörler rol alır. FDM'ler katı-gaz, sıvı-gaz, katı-katı, katı-sıvı, kristalleşmiş katı-sıvı gibi formlarda ısının emilmesi veya salınması yoluyla, fiziksel ve kimyasal dönüşümlere uğrayabilirler. Her ne kadar katı-gaz ve sıvı - gaz form dönüşümleri en büyük ısı geçişlerine eşlik etse de tasarımı zorlaştırmaktadır. Katı - sıvı form dönüşümleri erime ve katılaşma sırasında daha az hacim değişikliği gösterirler ve önemli miktarda enerji depolama kapasitesi sağlarlar. Bu nedenle, yaygın ve pratik uygulamaları olan katı - sıvı faz değişim malzemeleri, inorganik bileşikler, organik bileşikler ve inorganik ve/veya

organik ötektikler bileşikler şeklinde üç gruba ayrılabilirler (Iten ve Liu, 2014; Ravikumar, 2008). 0,24 W/m K gibi bir termal iletkenliğe sahip organik FDM'lerin, 1,0 W/mK termal iletkenliğe sahip inorganik FDM'ye kıyasla daha az termal iletkenliği sözkonusudur (Iten ve Liu, 2014). Organik malzemeler kullanılan gizli ısı depolama sistemlerinin daha yavaş termal tepkime gösterdikleri görülmektedir (Mettawee ve Assassa., 2007). Tuzlar, tuz hidratlar, metaller ve alaşımlardan oluşan inorganik FDM'ler arasında özellikle ekonomik olmaları nedeniyle sodyum sülfat dekahidrat (Glauber tuzu), kalsiyum klorür heksahidrat, sodyum tiyosülfat pentahidrat, sodyum asetat trihidrat ve baryum hidroksit oktahidrat gibi tuz hidratlar oldukça fazla araştırmaya konu olmuşlardır (Hasnain, 1998; Verma ve ark., 2008). İnorganik FDM'ler çok sayıda erime ve katılaşma çevrimi gerçekleştirmelerine rağmen hâlâ erime ısılarını koruyabilmeleri (Sharma ve ark., 2015), organik faz değişim malzemelerine göre birim hacimde iki kat daha fazla depolama kapasitesine sahip olmaları nedeniyle (Verma ve ark., 2008; Mohamed ve ark., 2017) gizli ısı depolama malzemesi olarak tercih edilirler. İnorganik faz değişim grubuna giren tuz hidratların, aşırı soğuma göstermeleri, orta derecede aşındırıcı, hafif derecede zehirli olmaları ve uygunsuz erime göstermeleri gibi dezavantajlarına rağmen ekonomik olmaları, termal iletkenliklerinin yüksek olması, hacim değişikliklerinin düşük olması ve iyi çekirdeklenme özelliği göstermeleri gibi avantajları nedeniyle tercih edilirler (Carlsson ve Wettermark, 1980; Pillai ve Brinkworth, 1976).

Gizli termal enerji depolamada kullanılan ısı transfer malzemelerinin, erime ve katılaşma proseslerinin belirlenmesi, avantajlarının ve dezavantajlarının, depolama ünitesi geometrilerinin, kullanılan kanat modellerinin incelenmesi ve karşılaştırılması üzerine literatürde pek çok çalışma yapılmıştır.

Li ve arkadaşlarının yaptığı HAD analizi çalışmasında, hem yatay hem de dikey yönlerde tek, çift, üçlü ve dördü kanatlar dahil olmak üzere farklı kanat sayılarına sahip bükümlü kanatçıkların FDM'nin erimesi üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Kabuk ve tüp tipi gizli ısı termal enerji depolama sisteminin enerji ve ekserji açısından performansındaki artış, toplam 10 durum için simüle edilerek analiz edilmiştir. Kanatçıkların hacmi eşit ve ısı transfer yüzeyi her durumda sabit tutulmuştur. Sonlu hacim yöntemi ve eritme işleminin simülasyonu için entalpi - gözeneklilik yöntemi kullanılmıştır. Faz değişim malzemesi olarak parafin kullanılan çalışmada, sabit ısı transfer yüzeyine sahip tekli, çiftli, üçlü ve dördü kanatçıklara sahip farklı konfigürasyonlu kanatçıkların performansı araştırılmıştır. Dikey yöndeki üçlü kanatçık ve yatay yöndeki çift kanatçıkların temel duruma göre %37,4 ve %30,5 oranlarında FDM'de erime artışı sağladığı görülmüştür. Ayrıca, çalışmada dikey üçlü kanatçık ve yatay çift kanatçıkların en iyi ekserji verimine sahip olduğu belirtilmiştir (Li ve ark., 2023). Stritih'in yaptığı çalışmada binalarda termal depolama uygulamalarına uygun olduğu için erime noktası 30 °C olan parafin kullanılan kanatlı bir yüzeye sahip gizli ısı depolama ünitesinin katılaşma ve eritme süreçlerinin, ısı transfer özelliklerinin deneysel olarak incelendiği bir çalışmada,

katılma süresinde kanatçiksız yüzeye sahip bir ısı depolama ünitesiyle karşılaştırıldığında, %40 azalma hesaplanmıştır (Stritih, 2004).

Castell ve diğerleri tarafından yapılan bir çalışmada, FDM içerisine yerleştirilen kanatlara sahip dikey silindirik bir modülden oluşan sistemde belirli geometriler için, kullanım sıcak suyu tankındaki, doğal taşınım ile ısı transfer katsayısını bulabilmek amacıyla, deneysel korelasyonlar uygulanmıştır. İncelenen geometriler için literatürde herhangi bir korelasyon bulunamayan bu çalışmada, FDM modüllerinde ısı transferini arttırmak için harici kanatçıkların kullanılmasının, sistemi çevreleyen suya olan ısı transfer oranını arttırdığı bulunmuştur. Ayrıca, kanatlar ne kadar büyükse, ısı transfer sürecinin o kadar hızlı olduğu, ancak ısı transfer katsayısının azaldığı bildirilmiştir. FDM ve suyun sıcaklık değişiminin ve farklı kanatçıklar için sıcaklık farkının bir fonksiyonu olan ısı transfer katsayısının, zamanın fonksiyonu olduğu belirtilmiştir. Deneysel Nusselt sayısının farklı boyutsuz sayıların bir fonksiyonu olduğu görülen korelasyonlar elde edilmiştir (Castell ve ark., 2008). Vyshak ve Jilani aynı hacim ve ısı transfer yüzey alanına sahip dikdörtgen, silindirik ve kabuk-boru geometrik konfigürasyonlarına sahip üç farklı gizli ısı termal depolama konfigürasyonunun etkisini sayısal olarak analiz etmişlerdir. FDM olarak $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 'nun toplam erime süresinin; FDM kütleleri ve farklı ITA giriş sıcaklığı için karşılaştırmalı bir çalışmasını sunmuşlardır. Elde edilen sonuçlar, silindirik kabuk kaplarla eşit miktarda enerji depolamada, erime ve katılma sürecinin en az zaman aldığını ve bu geometrik etkinin FDM'nin kütlesindeki artışla daha belirginleştiğini göstermişlerdir (Vyshak and Jilani, 2007).

El Qarnia ve diğerleri, dikey bir iletken plaka üzerine monte edilmiş üç çıkıntılı ısı kaynağı ile ısıtılan dikdörtgen bir boşlukta FDM (erime noktası 36°C olan n-eikozan) erimesinin sayısal bir modelini sunmuşlardır. FDM tabanlı ısı emicinin termal performans üzerindeki farklı temel parametrelerin etkisini incelemek için sayısal araştırmalar yapmışlardır. Burada geliştirilen yaklaşımla, maksimum çalışma süresi ve karşılık gelen erime fraksiyonu için FDM tabanlı soğutma sistemlerinin tasarımında kullanılacak iki korelasyon geliştirilmiştir (El Qarnia ve ark., 2013). Esen ve diğerleri farklı FDM'ler ve depolama ünitesi konfigürasyonları için tüm FDM erime süresi üzerinde çeşitli FDM'lerin; silindir yarıçapları, boru yarıçapları, depolama kabındaki toplam FDM hacmi, ısı transfer akışkanının kütle akış hızları ve giriş sıcaklıkları gibi çeşitli termal ve geometrik parametrelerin performansını incelemişlerdir. Tüm FDM erime süresinin sadece termal ve geometrik parametrelere değil, aynı zamanda FDM'nin termofiziksel özelliklerine de bağlı olduğunu bulmuşlardır (Esen ve ark., 1998).

Barba ve Spiga (Barba ve Spiga, 2003), ısı transferi akışkanı olarak su kullanılan bir tankta levha, silindirik veya küresel olarak kapsüllenmiş üç geometrik formda FDM'nin davranışını incelemişlerdir. Sonuç olarak, küçük küresel kapsüllerle en büyük enerji yoğunluğunun, en hızlı şarj ve deşarj sürelerinde sağlandığını belirtmişlerdir. Bedecarrats ve diğerleri (Bedecarrats ve ark., 1996),

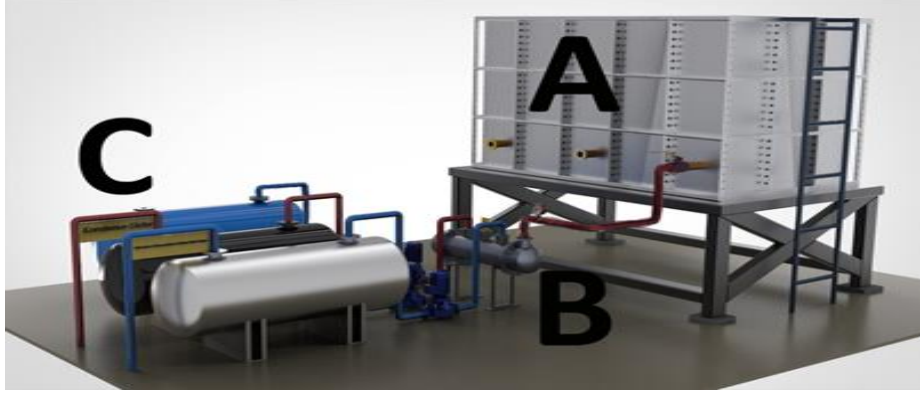
iklimlendirme için kullanılabilen endüstriyel bir enerji depolama tankı yapmak amacıyla faz değiştiren bir malzeme içerisine küresel kapsüller ilave edilmiş bir tankla, borular içeren geleneksel bir sıcak su tankının termal performansını karşılaştırmak için sayısal ve deneysel bir çalışma yapmışlardır. Sonuçta test amacıyla denenen tanklardan FDM dolu tankın daha iyi performansa sahip olduğu görülmüştür. Rahimi ve diğerleri, FDM olarak RT35 kullandıkları çalışmada, akış hızı (0,2 ila 1,6 L/dakika), ısı transfer akışkanı giriş sıcaklığı (50 °C ve 70 °C) ve geometrik parametrenin etkisini araştırmak için pilot ünite olarak spiral boru içeren dikdörtgen bir küp şeklindeki ısı değiştiriciyi incelemişlerdir. Sonuçlar, kanatçık kullanımının akış rejiminden bağımsız olarak kanatçık ortalama sıcaklığını arttırdığını ve kanat hatvesindeki azalmanın, bu parametreyi her iki rejim için de hissedilir şekilde etkilemediğini belirtmişlerdir. Isı transfer akışkanı giriş sıcaklığının 50 °C'den, 60 °C'ye yükseltilmesi ile erime süresinin kat kat daha kısaldığını belirtmişlerdir. Ayrıca ısı transfer akışkanının hızındaki artışın, hem erime hem de katılaşma sürelerinde bir azalmaya yol açtığını bulmuşlardır (Rahimi ve ark., 2014).

Bu çalışmada incelenen ve materyal metotta sistemi tanıtılan pilot bir ısı eşanjörünün boyutları veya geometrisi geliştirilerek uygulanabileceği, bir atık ısı depolama ünitesi Şekil 1'de verilmiştir. Şekil 1'de görüldüğü gibi, yüksek sıcaklığa sahip atık su açığa çıkaran endüstriyel tesisler ve fabrikalar için sisteme entegre edilecek eş merkezli bir ısı eşanjöründe FDM kullanarak, termal enerjiyi depolamak mümkün olabilecektir. Yapılan bu çalışma belirtilen sistemlerde geliştirilerek kullanılması durumunda, literatürden farklı geometriye sahip bir kanat modelinin kullanılması ve ayrıca literatürden farklı olarak ANSYS analiz programı kullanılarak kanat etkinliği hesabının gerçekleştirilmesi açısından farklılık arz etmektedir. Sonuç olarak hem kanat geometrisi hemde kanat etkinliğinin hesaplanması açısından literatürden farklı bir çalışma gerçekleştirilmiştir.

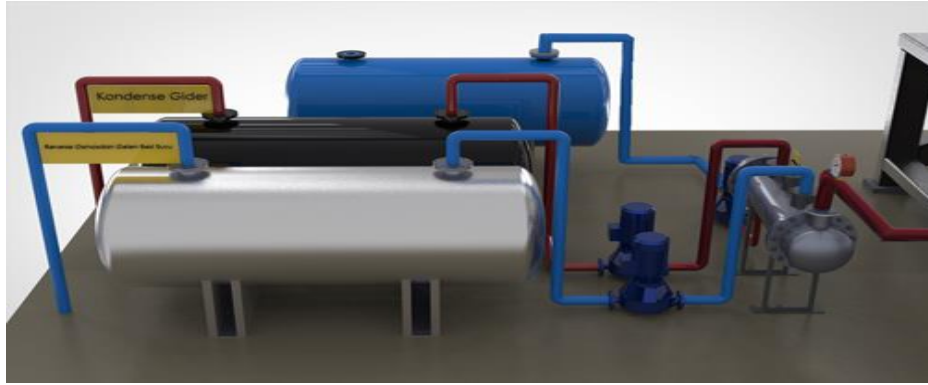
2. Materyal ve Metod

Depolama tankları ve ısı eşanjöründen oluştuğu tasarlanan Şekil 1(a)'daki gibi bir sistemde, atık ısı potansiyeli olan suyun eşanjöre modüler depodan düşü enerjisiyle gitmesi sağlanarak, eşmerkezli borular arasında depolanan FDM'nin erimesi sağlanabilecektir. Daha sonra FDM'nin erime halinden katılaşma haline dönmesi esnasında açığa çıkan enerjiden faydalanmak amacıyla, eşanjörün içindeki borudan reverse osmos sisteminden geçerek gelmiş olan yumuşatılmış suyun pompalanması sağlanabilecektir. Bu şekilde sıcaklığı, katılaştıran FDM'nin verdiği ısı enerjisi ile arttırılan suyun tesis içerisinde tekrar kullanımının sağlanması amaçlanmıştır. Bu mantıkla kurulan termal enerji depolama ünitesinden elde edilen ve geri dönüşümle sıcaklığı arttırılmış besi suyunun, tesisteki buhar kazanına hem ilk kalkış rejiminde hem de buhar üretim safhalarında kullanılmak üzere pompalanması mümkün olabilecektir. Gizli ısı depolayan faz değişim malzemesinin eşanjöre dolumu

ise eşanjörün üst kısmındaki kapak ile gerçekleştirilmesi tasarlanmıştır. Söz konusu atık su potansiyeli olan bu tür tesislerde kullanılabilir ısı eşanjörlerinde, sunulan simülasyon çalışmasından elde edilen sonuçların yol gösterebilmesi amaçlanmıştır.



Şekil 1(a). Isı eşanjörünün uyarlanabileceği bir atık su enerji depolama ünitesi tasarım çizimi (A- Tesis atık su depolama tankı B- Eş merkezli termal enerji ısı depolama eşanjörü C- Depolama tankları)



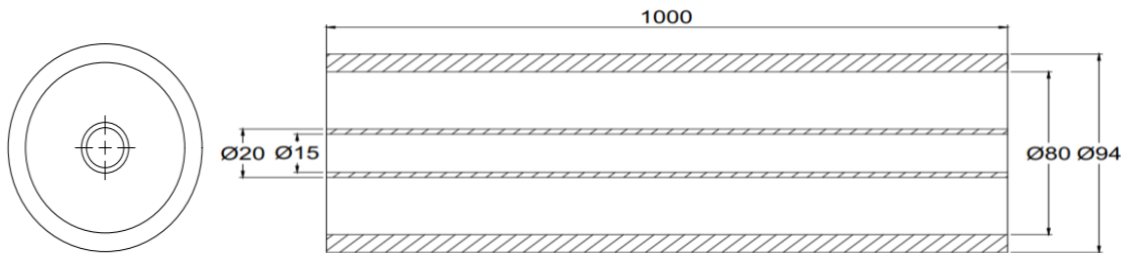
Şekil 1(b) Isı eşanjörü önden görünümü

Sunulan çalışmada incelenen literatür çalışmaları ve inorganik FDM'lerin avantajları dikkate alınarak ITA'dan (ısı transfer akışkanından) avantajları nedeniyle belirlenen faz değişim malzemesine aktarılması istenen ısı miktarını arttırmak amacıyla, literatürden farklı tip bir kanat modeli kullanmanın pilot bir çift borulu eşanjörün verimliliğine katkısı HAD analizleriyle araştırılmıştır. Öncelikle kanatçıksız modeldeki analizlerle 50 °C, 60 °C, 70 °C sıcaklıkları için ITA'dan FDM'ye aktarılan ısı etkisiyle FDM erime süreleri incelenmiş ve optimum sıcaklık 60 °C olarak belirlenmiştir. Daha sonra FDM'nin ITA'dan depolanması istenilen ısı miktarını daha kısa sürede absorbe edebilmesi için; kanat kullanımının, performansa etkisi analizle araştırılmıştır. Kanat kullanılmamış ısı değiştirici analizlerinden elde edilen sonuçlara göre, inorganik faz değişim malzemesi olarak seçilen $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ve $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ 'ın karşılaştırılması sonucunda, $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 'ta $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ 'dan daha kısa sürede erime gerçekleştiği görülmüştür. Kanatsız halde, $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ için ANSYS analiz sonuçlarında elde edilen, mesh sayısı analizi, ITA sıcaklığına ve kanat sayısına göre FDM sıcaklığı değişimi analiz grafikleri oluşturulmuştur. Sonrasında ITA'nın

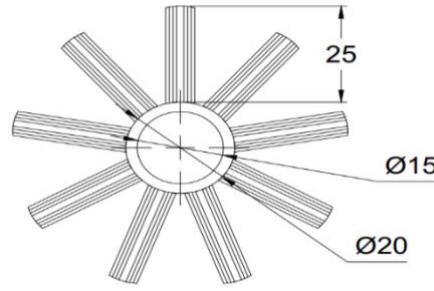
60 °C sıcaklık ve 0,5 m/sn hızda olduğu ve farklı kanatçık sayılarının kullanıldığı durum için ısı sayısal analizler gerçekleştirilmiştir. Seçilen kanat modeliyle, kanat taban alanının içteki borunun dış yüzeyini tamamen kaplamasını sağlayan kanat sayısı 15 olarak tespit edilmiştir. Ve FDM'nin erimesi durumunda kanat sayısının erime süresine etkisi $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ve $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ için incelenmiştir. Ayrıca kanat etkinliği hesabı, literatürden farklı olarak ANSYS analiz programı kullanılarak gerçekleştirilmiş ve FDM'nin termal depolama kapasitesine bağlı olarak erime süresinin, kanatçık sayısının artırılmasıyla nasıl değiştiği kanatçık sayıları için incelenmiştir.

2.1. Sistemin Tanıtılması

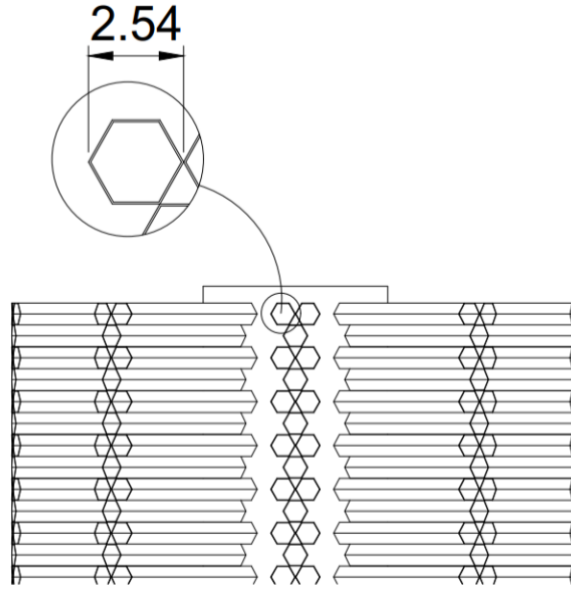
Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) analizi yardımıyla simülasyonu gerçekleştirilen eşmerkezli ısı değiştiricinin içteki borusundan ısı transfer akışkanının akması, iki boru arasında ise FDM'nin depolanması amaçlanmaktadır. Gizli termal enerji depolama pilot ünitesi olarak tasarlanan iki borulu ısı eşanjörü, et kalınlığı 2,5 mm olan 15 mm iç çapına sahip iç boru ile iki boru arasındaki boşlukta FDM'nin depolandığı 80 mm iç, 94 mm dış çaplı dış borudan meydana gelmektedir. Tasarlanan modelin ön görünüşü ve sol yan kesit görünüşü ile ölçüleri Şekil 2'de verilmiştir. Isı transferini artırması düşünülen literatürden farklı kanatçıkların bulunduğu kısım ise FDM'nin depolandığı ortam olarak tasarlanmıştır. Kanatçıklar bal peteği matris yapısında olup sırasıyla iki, bir ve iki petek şeklinde dizayn edilmiştir. Eşanjörün boyu 1000 mm ve kanatçıklarla dış borunun iç çapı arasındaki mesafe, FDM'nin peteklere tamamen dolabilmesi için 5 mm olacak şekilde düzenlenmiştir. FDM içerisine gömülü olarak kullanılacak kanat malzemesi, 6000 serisi alüminyum malzeme olarak belirlenmiştir. ITA'nın (ısı transfer akışkanının) içinden geçtiği eşanjörün iç borusu ve dıştaki borusu paslanmaz çelikten olacak şekilde tercih edilmiştir. Eşanjörün deney düzeneğinde kullanılması imkanını sağlamak için, kullanılan petek kanat ölçüleri piyasada mevcut olan bal peteği matrix yapısı ölçülerine uygun seçilmiştir. Örnek olarak 9 kanatlı modelin ise önden görünüşü ve ölçülerinin gösterildiği Şekil 3'de, içteki paslanmaz çelik borunun iç ve dış çapları ile kanat yüksekliği verilmiştir. Kanatların geometrik diziliminin ve ölçülerinin üstten görünüşünün gösterildiği Şekil 4'de, altıgen olan tek bir balpeteği modelinin, kanatlı modelde üstten görünüşü verilmiştir.



Şekil 2. Modelin ön görünüşü ve sol yan kesit görünüşü



Şekil 3. 9 Kanatlı modelin önden görünüşü ve ölçüleri



Şekil 4. Kanatlı modelin üstten görünüşü ve bir bal petek ölçüsü

Mevcut çalışmada, çift borulu bir ısı eşanjörünün içteki borusundan geçecek olan ısı transfer akışkan sıcaklığı, optimum işletme atık su sıcaklıkları dikkate alınarak 60 °C olarak tespit edilmiştir. 60 °C olan ITA sıcaklığında erime sağlayabilecek uygun FDM malzemesinin seçimi yapılırken, tuz hidratlar ve bunların karışımlarının 0 °C ile 100 °C arasındaki sıcaklıklara uygun olma özelliği dikkate alınarak (Iten ve Liu,2014; URL-1), inorganik FDM grubuna giren faz değişim malzemeleri olan $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ve $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ tercih edilmiştir. Gizli termal ısı depolamada katı-sıvı faz özelliği gösteren bu tuz hidratların termofiziksel özellikleri aşağıdaki Tablo 2.1 ve 2.2’de verilmiştir.

Tablo 2.1. $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ termofiziksel özellikleri (Bilen ve ark., 2008, Mazman*,2006)

Fiziksel Özellikler	$\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$
Erime Sıcaklığı (°C)	28
Gizli ısı (kJ/kg)	200
Yoğunluk (kg/dm^3)	1,71*
Özgül Isı kapasitesi katı/sıvı ($\text{kJ}/\text{kg} \text{ } ^\circ\text{C}$)	1,25/2,13
Termal iletkenliği katı/sıvı ($\text{W}/\text{m} \text{ } ^\circ\text{C}$)	0,626 (24 °C) / 0,454 (41 °C)
Viskozite katsayısı(Pa.s)	2.25×10^{-2}

Tablo 2.2. NaSO₄.10H₂O'nun ve paslanmaz çeliğin termofiziksel özellikleri (Ji ve ark.,* 2018; Mazman**, 2006; Sharma ve ark.,*** 2004)

Fiziksel Özellikler	Na ₂ SO ₄ .10H ₂ O**	Paslanmaz çelik*
Erime Sıcaklığı (°C)	32,4	-
Gizli ısı (kJ/kg)	254	-
Yoğunluk (kg/dm ³)	1,485	(Katı) 8030
Özgül Isı kapasitesi (J/kgK)	1930	502
Termal iletkenliği (W/mK)	0,544***	16,27

2.3. HAD Analizi

HAD analizleri ile akışkanlar mekaniğinde, hız-sıcaklık ve basınç dağılımlarını, faz akışlarını, sabit ve yoğunluklu akışkanları, sıcaklık transferleri gibi olay ve kavramları detaylı bir şekilde inceleyip, analiz etmek mümkündür.

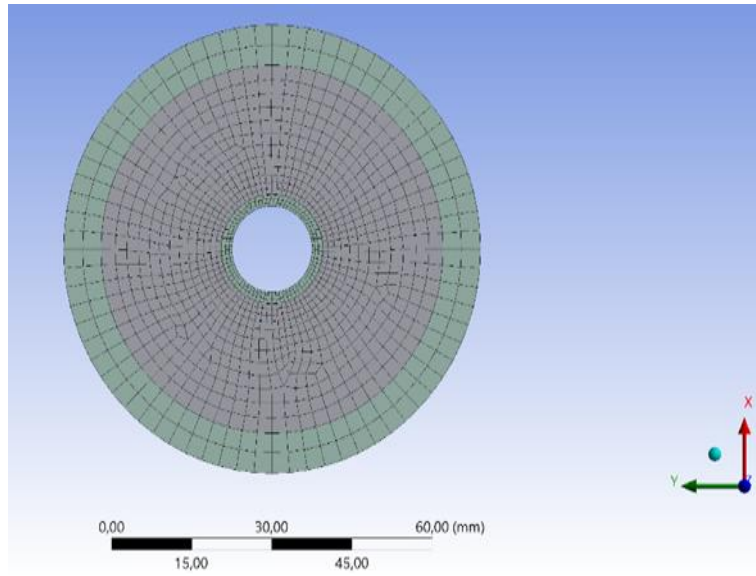
İki borulu bir ısı değiştiricide meydana gelen faz değişimi prosesinin sayısal olarak analizini yapmada kullanılan entalpi-gözeneklilik yöntemiyle, faz değişiminin sabit sıcaklık ve sıcaklık aralıklarında oluşan problemleri çözümlenebilir. Bu yöntemle katı-sıvı ara yüzünün her zaman adımında takibi yapılmadan, devreye sokulan temel denklemler yardımıyla çok boyutlu problemlere uygulanması sağlanabilir (ANSYS, 2008). Uygulanan sayısal analizin kolaylaştırılabilmesi için sayısal analizde, faz değişim malzemesinin homojen ve izotropik yapıda olduğu ve sıvı halde hareketinin laminer, süresiz ve sıkıştırılmaz olduğu kabulü yapılmıştır. Bununla birlikte faz değişim sürecinin izotermal olduğu, süreç boyunca hem iletimle hem de doğal taşınım ile ısı transferinin gerçekleştiği, FDM'nin termal ve fiziksel özelliklerinin katı ve sıvı fazda farklılık göstermesi yanında, sıcaklığa da bağlı olmadığı kabulleri gözönüne alınarak işlemler sürdürülmüştür (Koşan ve Aktaş, 2018). Sunulan çalışmada, Ansys Fluent 2020 R2 programı yardımıyla Fluent çözümlemesinde "Solidification and Melting" bölümü aktif hale getirildikten sonra erime prosesi analiz edilmiştir. "Transient" yani zamana bağlı olarak işlem gerçekleştirilmiş ve her iterasyon adımı 0,2 saniye olacak şekilde analizler yürütülmüştür. Basınç ve hız seçenekleri "second order" olarak hazırlanmış, enerji seçeneği ise bununla birlikte aktif edilmiştir. Türbülans modeli olarak, iç akışta gerçeğe çok yakın çözümler sunan "k-epsilon" iki denklemlilik "solver" kullanılmıştır. Programın işletilmesinde kullanılan süreklilik, momentum ve enerji denklemleri aşağıdaki şekilde verilmiştir

$$\text{Süreklilik Denklemi: } \nabla \cdot \vec{V} = 0 \quad [1]$$

$$\text{Momentum Denklemi: } \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + (\vec{V}) \cdot \nabla (\vec{V}) = \frac{1}{\rho} \left(-\nabla P + \mu \nabla^2 \vec{V} + \rho g \beta (T - T_{ref}) \right) + \vec{S} \quad [2]$$

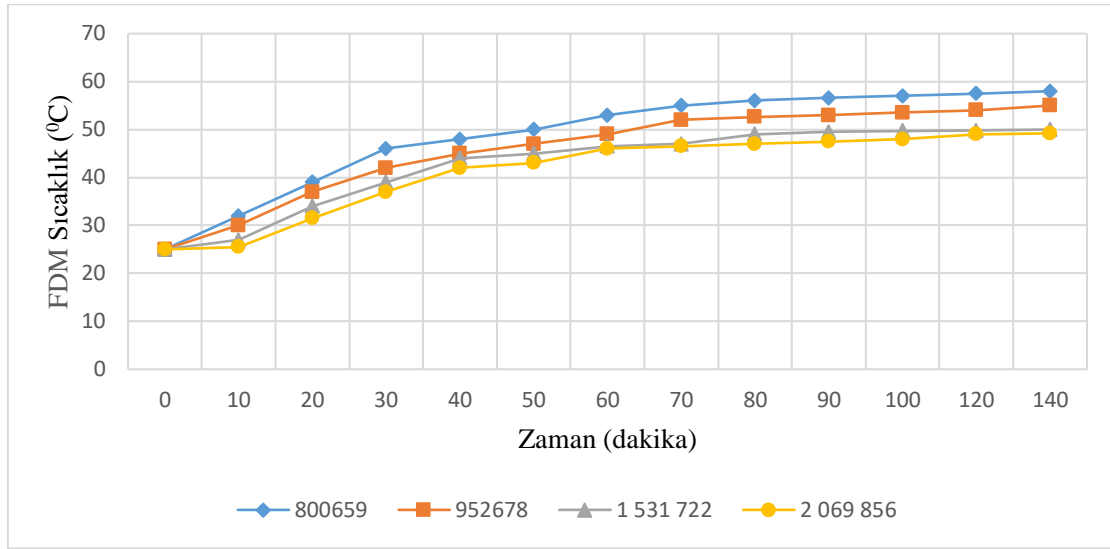
$$\text{Enerji Denklemi: } \frac{\partial h_{sensible}}{\partial t} + \frac{\partial h_{latent}}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{V} h_{sensible}) = \nabla \cdot \left(\frac{k}{\rho c_p} \nabla T \right) \quad [3]$$

HAD analizinde hesaplama yapılacak modelde eleman sayısı (mesh) arttıkça, gerçeğe yakın sonuçlar elde edilmesi adımına daha çok yaklaşılmış olacaktır. Fakat analizi yapılan modelin geometrisi ve boyutlarına uygun bir ağ yapısı oluşturulmaz ise analiz, uzadıkça uzayacak ya da daha üst kapasiteli bir bilgisayar gerekli olacaktır. Kısaca zamana bağlı çözümlerde zaman adımının küçülmesi artan maliyet olarak karşımıza çıkacaktır (Çengel ve Cimbala, 2006). Ayrıca modelin meshten bağımsız olduğunu gösteren optimum mesh sayısının belirlenmesi kadar, modele uygulanan mesh kalitesinin de yüksek olması, analiz sonucunu olumlu yönde oldukça fazla etkileyecektir. Şekil 5’de analizi yapılan ısı eşanjörü için 1.531.722 elemandan oluşan iki boyutlu modelin ağ yapısı (mesh) sunulmuştur. Bu mesh sayısı, Şekil 6’daki mesh sayısı analizleri tamamlandıktan sonra, modele uygun optimum mesh sayısı olarak kabul edilerek analizlere başlanmıştır.



Şekil 5. 1.531.722 elemana sahip eş merkezli ısı eşanjörünün mesh görüntüsü

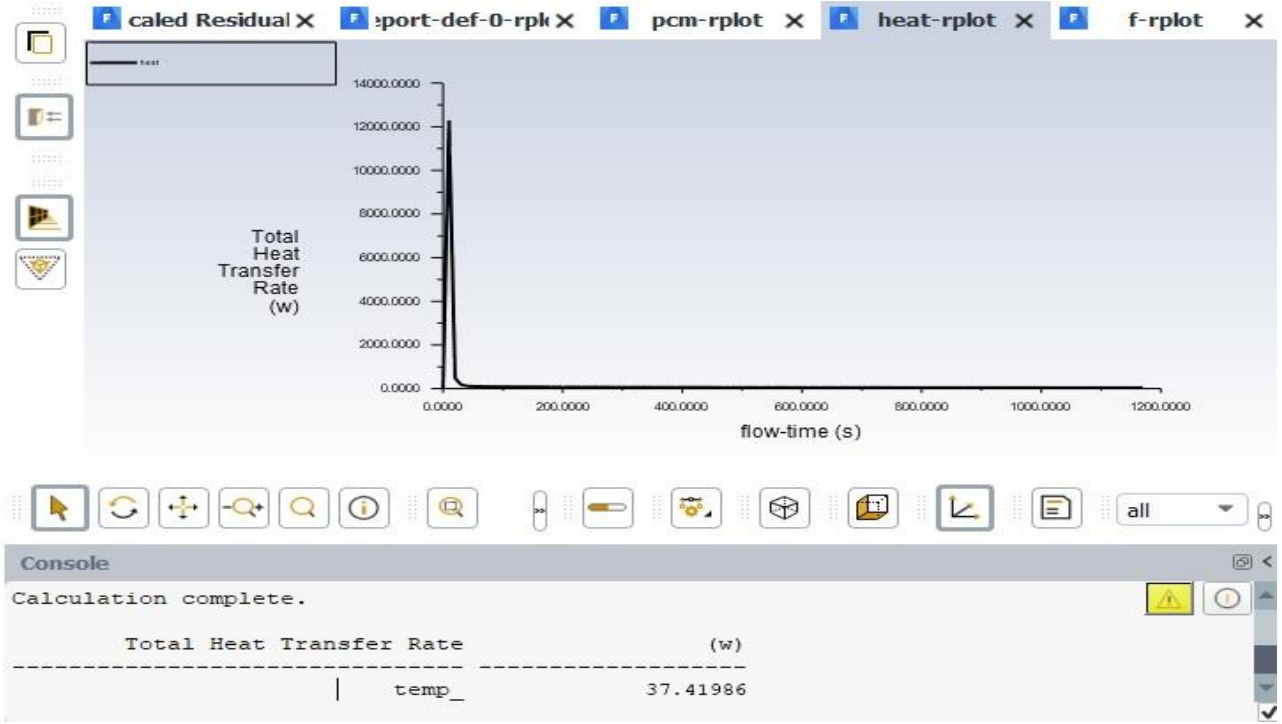
İki boyutlu ve zamana bağlı olarak yapılan ANSYS analizinde kanatsız model için dört farklı 800.659, 952.678, 1.531.722, 2.069.856 eleman sayısı (mesh) ve 0,2 zaman adımı çalışılmıştır. Şekil 6’da mesh edilen eleman sayısına göre $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ için FDM sıcaklığı-erime süresi değişim grafiği verilmiştir.



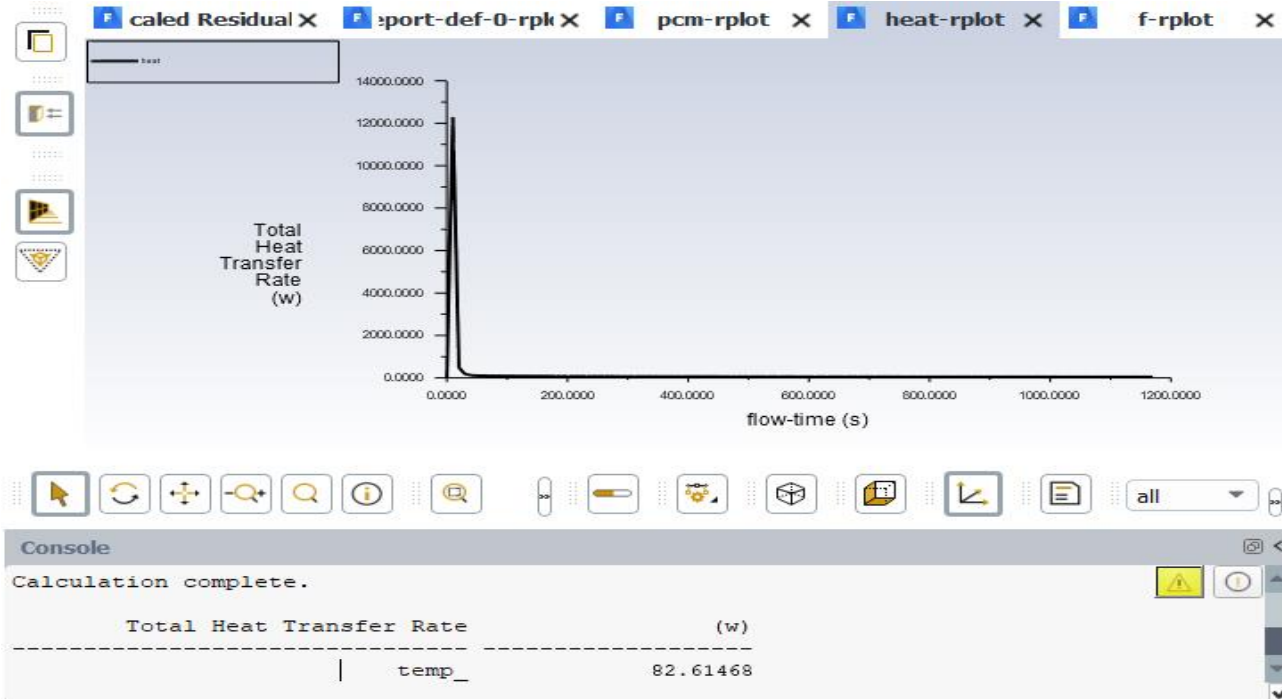
Şekil 6. Eleman sayısına göre $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ için FDM sıcaklığı-erime süresi değişim grafiği

Şekil 6'ya göre 800.659 mesh elemanına sahip analiz modelinde 140 dakikada kalsiyum klorür heksahidrat sıcaklığı $60\text{ }^\circ\text{C}$ 'ye yaklaşmaktadır. Ancak aynı FDM, 2.069.856 mesh elemanına sahip modelde $50\text{ }^\circ\text{C}$ 'nin biraz üzerindedir. Bu durumda yaklaşık olarak $10\text{ }^\circ\text{C}$ sıcaklık farkı oluşturmaktadır. Yapılan analize göre 800.659 mesh sayısında $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ malzemesi, aynı zaman diliminde çok daha yüksek sıcaklığa ulaşmaktadır. Bu tür karışık model analizlerde mesh eleman sayısı doğru çözüm için optimum değerde olmalıdır. 1.531.722 mesh elemanına sahip modelde 2.069.856 mesh elemanına sahip model ile sonuçlar oldukça yakındır. Sonuçta mesh sayısı arttığında daha kararlı bir sıcaklık ölçümü sağlanmıştır. Sonlu elemanlar analizi dinamiklerine göre ne kadar çok elemanla işlem yapılırsa yakınsama oranı o kadar artacağından eleman sayısı çok önemlidir. Eleman sayısı arttıkça doğru sonuca yakınsama artacaktır ve belli bir eleman sayısından sonra bu yakınsama çok küçük değerlerde olacağından eleman sayısını arttırmak sadece analiz süresini arttıracak da bir gerçektir. Bu bağlamda mesh sayısının çözüm sürecini arttıracak gerçeği ışığında, mesh sayısı optimum olması gerektiği ilkesi kendini kanıtlamış durumdadır.

FDM içerisine gömülü olarak kullanılacak faydalı kanat sayılarının hesabında literatürdeki gibi analitik çözüm kullanmak yerine, bu çalışmada HAD analiz veri sonuçlarından faydalanılmıştır. Çalışmada literatürden farklı bir şekilde faydalı kanat sayısı hesabında ϵ değerinin belirlenmesi amacıyla HAD analizinden faydalanılmış olması, bu çalışmanın farklılığını da ortaya koymaktadır. Aşağıda kanat etkinliğinin hesaplanması başlığı altında $\epsilon > 2$ ilkesini sağlayan ısı transferine katkı sağlayacak kanat sayısı hesabı açıklanmıştır. Kanat etkinliği çalışması yapıldıktan sonra, uygun bulunan kanat sayılarına karşılık gelen Q değerlerinin, HAD analizinden elde edilen görüntüleri ise Şekil 7'de kanatsız ve Şekil 8'de 6 kanat için kanıtı sunulan ve (9, 12 ve 15 kanat için dataları mevcut olan) ANSYS programı üzerinden elde edilen görüntüleri verilmiştir.



Şekil 7. Kanatsız halde ITA' dan FDM'ye gerçekleşen toplam ısı transferinin ANSYS programı üzerinden alınan Q değeri görüntüsü



Şekil 8. 6 kanatlı halde ITA' dan FDM'ye gerçekleşen toplam ısı transferinin ANSYS programı üzerinden alınan Q değeri görüntüsü

ANSYS analizinin başlangıç kabulleri, ITA için hız ve sıcaklık değerleri değişmeyen parametre olacak şekilde belirlenmiş ve Tablo 2.3'de sunulmuştur.

Tablo 2.3. Analiz Başlangıç Şartları

Hız (m/s)	0,5
Ortam sıcaklığı (°C)	25
ITA sıcaklığı (°C)	60

2.2. Kanat Etkinlik Hesabı

Bu çalışmada, FDM içerisine yerleştirilecek kanatlarla, içteki borudan geçen ITA'nın verdiği ısının FDM'nin erime süresini azaltması amaçlanmaktadır. Bu nedenle kullanılacak kanat sayısının belirlenmesi için kanat etkinliği hesaplaması yapılmıştır. Kanat etkinliğinin hesaplandığı formül, 1 nolu denklemde sunulmuştur(Çengel, 2015; Çengel, 2015).

$$\varepsilon_{fin} = \frac{(\dot{Q}_{finned})}{(\dot{Q}_{finless})} \quad [4]$$

Yukarıdaki formülden $\varepsilon > 2$ ilkesini sağlayan başlangıç kanat sayısı 6 olacak şekilde 9, 12 ve 15 kanat için kanat etkinlik katsayıları aşağıdaki gibi hesaplanmıştır. Kanatsız haldeki ısı transferi miktarı, $\dot{Q}_{no\ fins}$ olacak şekilde, 6, 9, 12 ve 15 kanatın transfer ettikleri ısı miktarları, belirlenen kanat alanları için, literatürden farklı olarak ANSYS Fluent 2020 R2 programından

$$\dot{Q}_{no\ fins} = 37,42 \text{ W}$$

$$\dot{Q}_{6\ fins} = 82,61 \text{ W}$$

$$\dot{Q}_{9\ fins} = 123,92 \text{ W}$$

$$\dot{Q}_{12\ fins} = 164,63 \text{ W}$$

$$\dot{Q}_{15\ fins} = 206,53 \text{ W}$$

olarak tespit edilmiştir. Daha sonra 1 nolu denklemden hesaplanan kanat etkinlikleri;

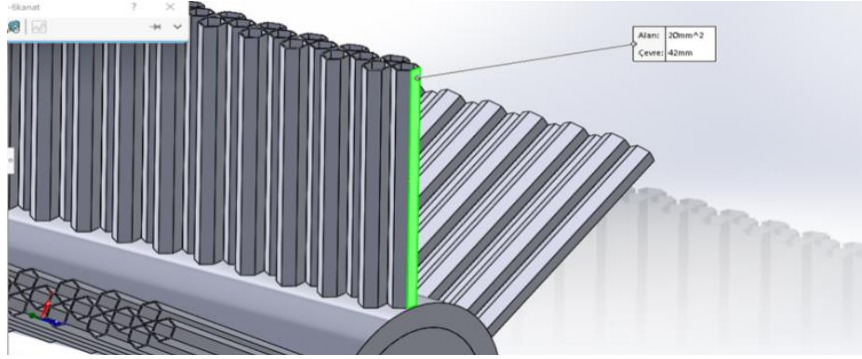
$$\varepsilon_{6\ fin} = \frac{82,62 \text{ W}}{37,42 \text{ W}} = 2,2$$

$$\varepsilon_{9\ fin} = \frac{123,92 \text{ W}}{37,42 \text{ W}} = 3,3$$

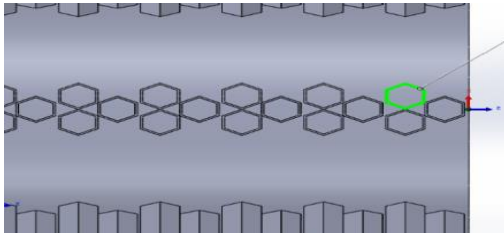
$$\varepsilon_{12\ fin} = \frac{164,63 \text{ W}}{37,42 \text{ W}} = 4,4$$

$$\varepsilon_{15\ fin} = \frac{206,53 \text{ W}}{37,42 \text{ W}} = 5,5$$

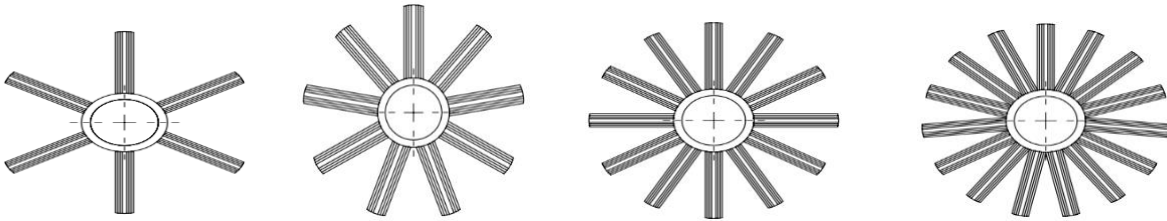
şeklinde elde edilmiştir. FDM içerisinde etkinlik şartını sağlayan kanat sayıları belirlendikten sonra oluşturulan montaj görüntüleri Şekil 9, Şekil 10, Şekil 11, Şekil 12’de kanatların farklı dizaynları için ayrıntılı bir şekilde sunulmuştur.



Şekil 9. Tek bir altıgen petek kanat modeli için bir kenar alanının görünüşü



Şekil 10. Kanat petek yapısının üstten görünüşü Şekil 11. Altıgen petek kanat modeli panel görünüşü



Şekil 12. 6,9,12,15 adet kanat uygulamalarının önden görünüşü

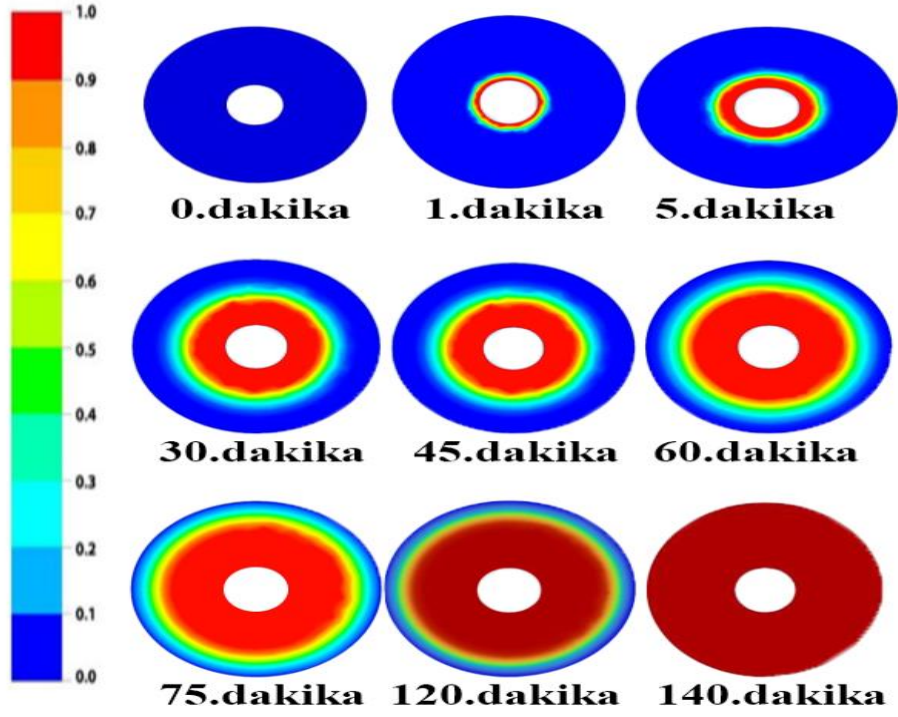
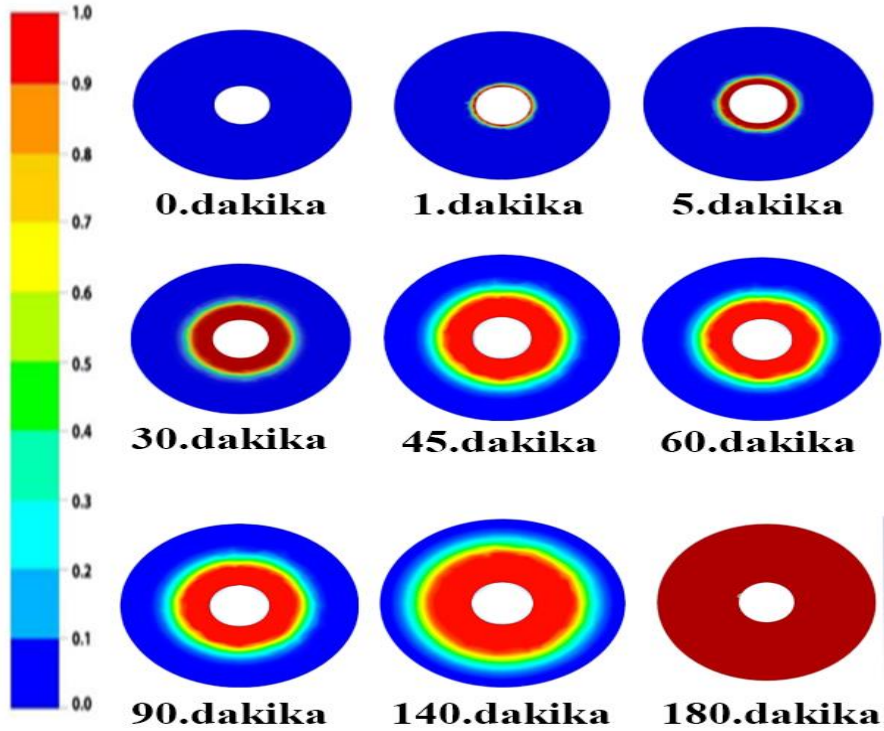
Etkinlik katsayısı $\varepsilon > 2$ olması şartını sağlayan kanat sayıları olan 6, 9, 12, 15 adet kanat uygulamaları sırasıyla kanat etkinlikleri 2.2,3.3,4.4,5.5 olarak belirlenen dört kanatlı model için, HAD analizleri yapılmış ve FDM şarj (erime) süresindeki değişim sözkonusu kanatlı modeller için incelenmiştir.

3. Bulgular ve Tartışma

Bu çalışmada eş merkezli bir ısı değiştiricinin iki boru arasında kalan boşluğunda, iki adet inorganik faz değişim malzemesi $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ve $\text{NaSO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ tuz hidratlarının depolanması tasarlanmıştır. Ara boşluğa kanat yerleştirilmesi durumunda, artan ısı transfer yüzey alanı nedeniyle

erime süresinde kısılma olacaktır fakat yerleştirilen kanat hacmi kadar FDM'nin de dışarıya atılması gerekecektir. Bu nedenle kanatsız modelde iç içe yerleştirilmiş iki boru arasındaki hacim hesaplandıktan sonra, kanat ilave edilince atılan FDM miktarları hesaplanabilecektir. Dolayısıyla kanatlı modellerde ara boşluğa yerleştirilen FDM miktarı, kanatsız modelde yerleştirilen FDM miktarından az olacaktır. Kanatsız modeldeki FDM miktarının sağladığı ısı sığa, kanatlı modellerde azalan FDM miktarıyla azalma göstereceği için, çalışmada kanat yerleştirilmesi durumunda oluşacak FDM ısı sığa azalması araştırılmıştır. Yapılan teorik çalışmada kanat kullanılması durumunda ara boşluktan atılacak FDM miktarlarının, kanatsız modelde yerleştirilen FDM miktarı yanında her iki FDM içinde kütle olarak yaklaşık %1,8 oranında ihmal edilebilir bir kütle azalmasına sebep olacağı görülmüştür. Bu nedenle kanatlı modellerde FDM miktarı azalmasının (FDM ısı sığasındaki azalma nedeniyle) erime süresine olan etkisi kanat kullanımı yanında ihmal edilecek kadar az olduğundan, kanat kullanımının erime süresi üzerine etkisi analiz edilmiştir. Ve kanat kullanımının erime süresini ne kadar etkilediğini araştırmak üzere, kanatsız ve kanatlı haller için HAD analizleri yardımıyla ara boşluktaki FDM erime süreleri tespit edilmiştir. Şekil 13'de inorganik FDM olan $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ tuz hidratının kanatsız haldeki erime süresi analiz çıktıları verilmiştir. Şekil 14'de ise yine inorganik FDM sınıfından seçilen $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ 'ın kanatsız haldeki erime süresi analiz çıktıları verilmiştir. ITA sıcaklığı 60°C ve hızı $0,5\text{ m/s}$ olan, zaman adımı $0,2$ saniye seçilen analiz verilerine göre, kanatsız durum için erime süresi, $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ile $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ için sırasıyla 140 ve 180 dakika olarak belirlenmiştir.

Şekil. 13. ve Şekil 14'te görüldüğü gibi gizli ısı depolama kapasitesi $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ 'ya göre daha yüksek olan $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ için elde edilen erime süresinin, $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ 'ın erime süresinden daha az olduğu tespit edilmiştir. Bu nedenle, ITA sıcaklığı ve kanat sayısını arttırmanın, FDM erime süresine etkisinin araştırılması için erime süresinin kanatsız durumda daha kısa olduğu tespit edilen $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ seçilmiştir. Şekil 13 ve 14'de verilen renk skalası, 0 noktasından 1 noktasına (lacivertten kırmızıya doğru) ilerlerken, FDM'nin yüzde olarak erime süreçlerini gösteren renklerle tanımlanmıştır. $0.0-0.1$ aralığında katı olan FDM'nin, $0.9-1$ aralığındaki skala renklerine uygun olarak tamamen erime gösterdiğini belirtmek üzere verilmiştir.

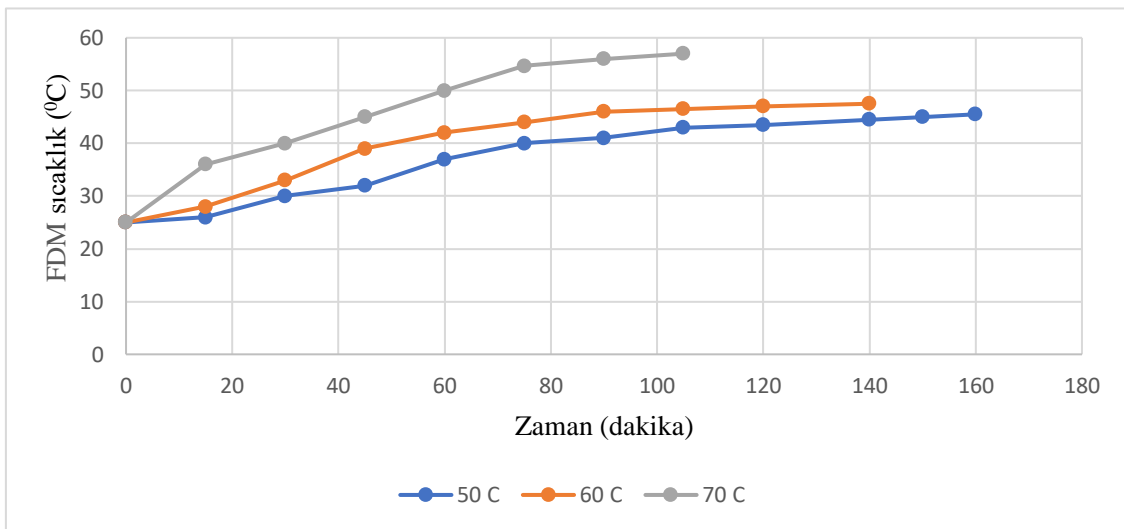
Şekil. 13. $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ için kanatsız hal analiz çıktılarıŞekil 14. $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ için kanatsız hal analiz çıktıları

Acir ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada faz değiştiren malzemesi olarak parafin kullanılan enerji depolama ünitesinde 1, 1,5 ve 2 mm kanat kalınlığında ve 3, 5 ve 7 adet kanat kullanılan çalışmada 7 kanat sayısı kullanmanın, 3 kanat sayısına kıyasla daha iyi ısı transfer performansı sağladığı tespit edilmiştir (Acir ve Canli, 2018). Eritme işleminin simülasyonunu sonlu hacim

yöntemi kullanarak inceleyen Li ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, sunulan çalışmada da kullanılan entalpi-gözeneklilik yöntemi ile HAD analizi yapılmıştır. En kötü kanatçıklı duruma kıyasla bile kanatçıksız durumda %11,2 ve %10,7'lik erime süresinde artış tespit edilmiştir (Li ve ark., 2023).

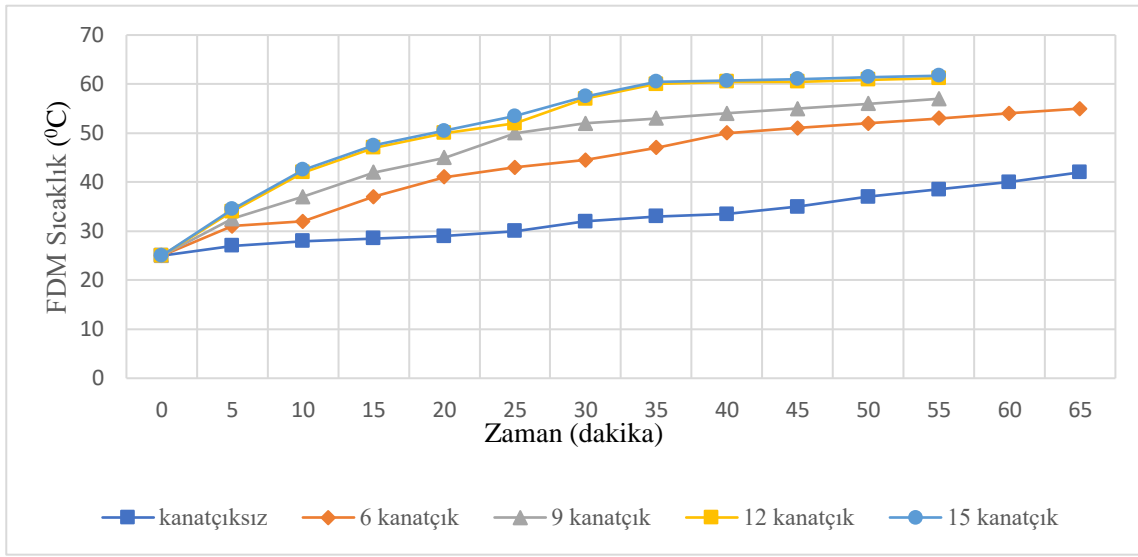
Şekil 15'de 50 °C, 60 °C ve 70 °C ITA su sıcaklıklarına göre CaCl₂.6H₂O sıcaklığının zamana göre değişimini gösteren grafikte, 70 °C'de FDM en kısa erime süresine sahipken, en yüksek erime süresi 50 °C için gerçekleşmiştir. Şekilde görüldüğü gibi ısı transfer akışkanı olan suyun sıcaklığı arttığında, birim zamanda gerçekleşen ısı transferi miktarıda arttığı için tahmin edildiği gibi FDM'nin sıcaklığının da arttığı gözlemlenmiştir. Endüstriyel tesisler ve işletmeler için atık su sıcaklığını 70 °C seçmek, çoğu işletme için gerçekçi bir yaklaşım olmadığından, bu çalışmada FDM sıcaklığı için 60 °C optimum sıcaklık değeri olarak kabul edilmiştir. 50 °C ise kabul edilebilir bir ITA sıcaklığı olarak değerlendirilmiştir. Sunulan çalışmada kanatsız model için Şekil 3.3'de görüldüğü gibi, ITA sıcaklığı 50 °C iken CaCl₂.6H₂O 160 dakikada, 60 °C iken 140 dakikada ve 70 °C iken ise 105 dakikada erimektedir. Simülasyon sonuçları, ITA sıcaklığının 50 °C'den 60 °C'ye çıkması halinde erime süresinin %12, 50 °C'den 70 °C'ye çıkması halinde ise %34 oranında azalarak gerçekleştiğini göstermiştir.

Koşan ve arkadaşının yaptığı HAD analiziyle erime süresinin incelendiği çalışmada ise FDM olarak RT42'nin depolandığı eş merkezli bir ısı değiştiricide, ITA sıcaklığı 50 °C, 60 °C, 70 °C, olduğunda FDM'nin sırasıyla 300 dakika, 240 dakika ve 180 dakikada eridiği belirtilmektedir. Sunulan çalışmada ise CaCl₂.6H₂O için elde edilen ısı transfer akışkanı sıcaklığı simülasyon sonuçlarının, ITA sıcaklığının artışıyla erime süresinin kısaldığı görülen Koşan ve arkadaşının RT42 için yaptığı simülasyon modelinin analizindeki sonuçla uyumlu olduğu görülmüştür (Koşan ve Aktaş, 2018).



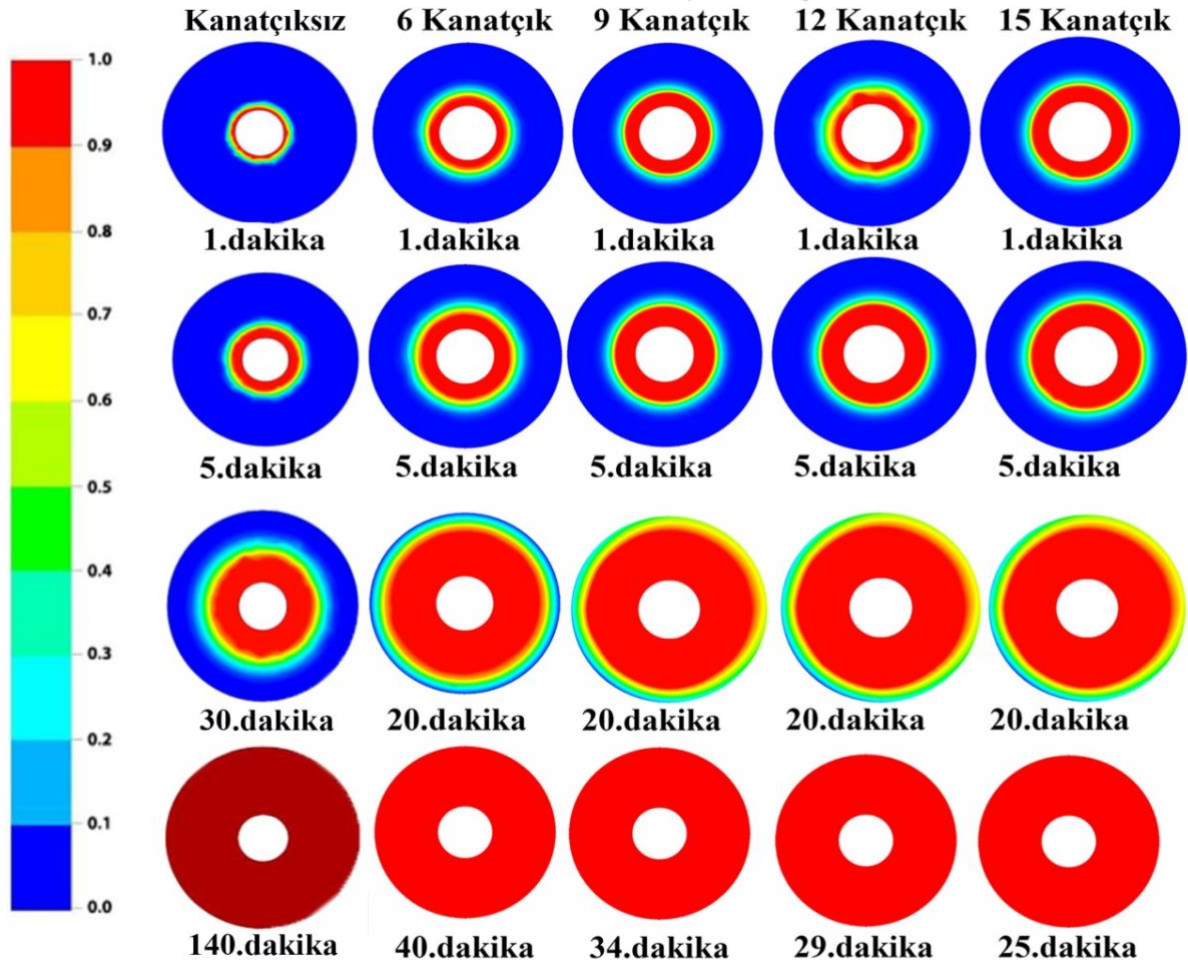
Şekil 15. ITA su sıcaklıklarına göre CaCl₂.6H₂O için FDM erime süresi- sıcaklık grafiği

İnorganik iki FDM'nin erime süresinin incelendiği bu çalışmada, erime süresini azaltmak amacıyla eşmerkezli ısı değiştiricinin FDM depolanan ara boşluğuna kanat eklenmiş ve ara boşlukta 6, 9, 12, 15 kanatçık kullanılması hallerine göre yeniden analizler yürütülmüştür. Yani FDM içerisine yerleştirilen kanatçıklar vasıtasıyla, ITA'nın verdiği ısı enerjisinin erime süresini ne kadar azalttığı incelenmiştir. Kanat sayısına göre $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 'ın sıcaklığının değişiminin verildiği Şekil 16'da, kanat sayısını arttırmanın FDM sıcaklığını arttırdığı tespit edilmiştir. 2,2, 3,3, 4,4, 5,5 kanat etkinliklerine sahip sırasıyla 6,9,12 ve 15 kanat için; erime süresinin ciddi oranda düştüğü verilen FDM sıcaklık değişimleri grafiğinde gösterilmiştir. FDM sıcaklığının en iyi kanat veriminin elde edildiği 15 kanat durumunda sağlandığı, 15 kanat sayısının üstünde ise sabit kalacağı grafikten tespit edilmiştir.



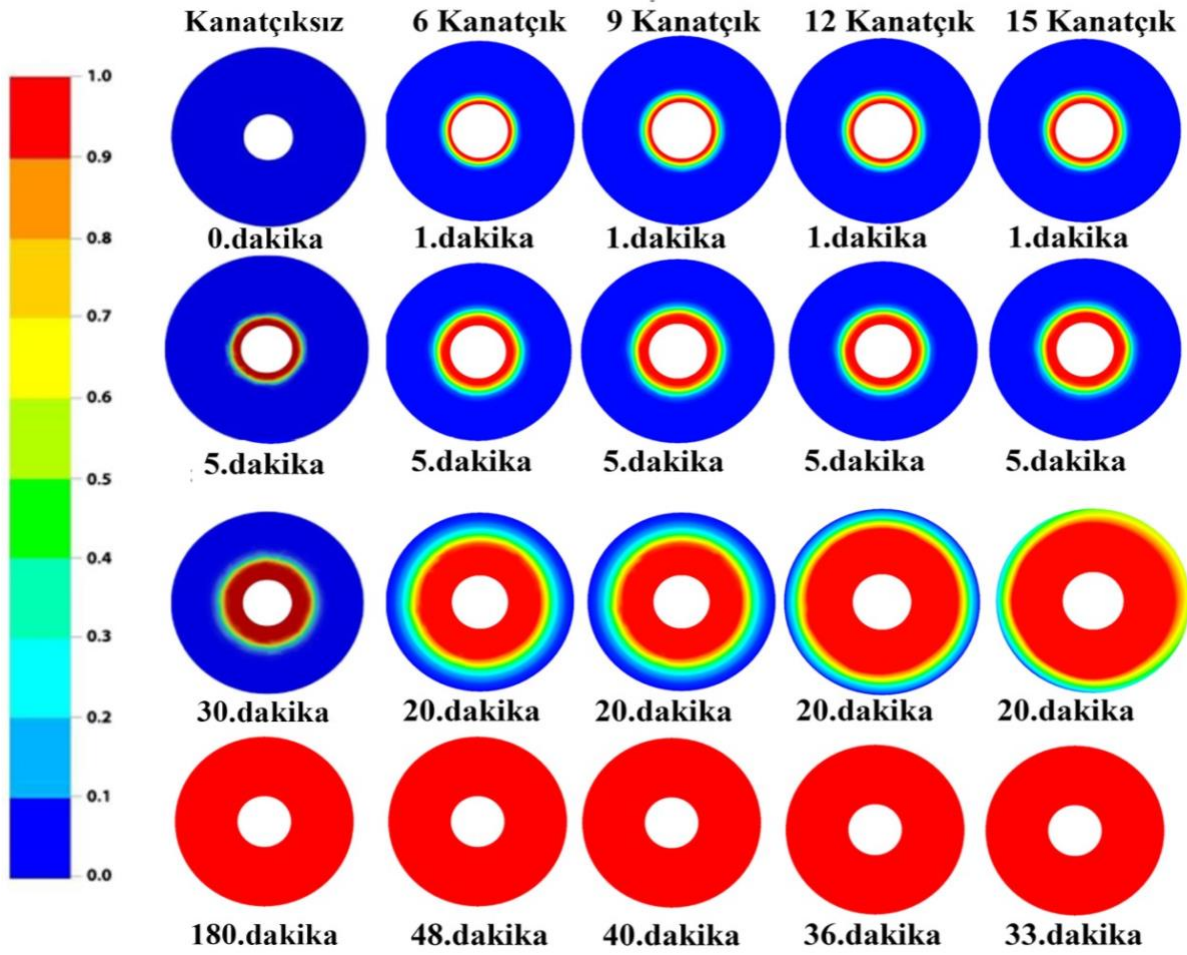
Şekil 16. Kanat sayısına göre $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ için FDM erime süresi- sıcaklığı grafiği.

Şekil 17'de faz değişim malzemesi $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ için 0,5 m/s hızına sahip, 60 °C sıcaklıktaki ITA için, 6, 9, 12, 15 kanatlı eşanjör modellerine ait HAD analizleri verilmiştir. Bu analiz sonuçlarına göre 15 kanatlı eşanjör sistemi içinde depolanan $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 'ın tamamen erime süresi 25 dakika olarak tespit edilmiştir. Bu tespit sonucunda hiç kanat konulmamış eşanjör sistemine göre %82,14 oranında bir süre azalımı elde edilmiştir. Kanatsız modele göre; 6, 9, 12, 15 kanatlı modellerin erime süresinin artan kanat sayısına göre sırasıyla %71,42, %75,71, %79,28 ve %82,14 oranında azaldığı görülmüştür.



Şekil 17. $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ kullanılan kanatsız ve 6,9,12,15 kanatlı ısı eşanjörü için FDM erime süresi analizleri

Şekil 18’de 0,5 m/s hıza, 60 °C sıcaklığa sahip ısı transfer akışkanı kullanılan eşmerkezli eşanjörde, kanat etkenlikleri sırasıyla 2,2, 3,3, 4,4, 5,5 olarak tespit edilen 6, 9, 12, 15 kanatlı modellerin kanatsız modele göre; erime süresinin; $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ’ın için artan kanat sayısı ile %73,33 , %77,77 , %80 ve %81,66 oranında azaldığı belirlenmiştir. $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ’ın faz değişim malzemesinin 6, 9, 12, 15 kanatlı eşanjör modelleri için yapılan analiz sonuçlarına göre ise 15 kanat durumunda, tamamen erime süresi 33 dakika olarak ölçülmüştür. Bu ölçüm sonucunda kanatsız eşanjör sistemine göre 15 kanat kullanımı durumunda, $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ’ın erime süresinde % 81,66 oranıyla maximum süre azalması meydana gelmiştir. Koşan ve arkadaşının yaptığı, FDM olarak RT42 faz değişim malzemesi depolanan çalışmada, 6, 9, 12 ve 15 dikdörtgen geometrili kanat kullanılan durumlarda kanatsız modele göre FDM erime süresinin %72,5, %76,7, %78,4 ve %80 azaldığı görülmüştür (Koşan ve Aktaş, 2018). Sunulan çalışmada kullanılan literatürden farklı bal peteği kanat modeli verimlerinin, Koşan’ın çalışmasındaki RT-42 için elde edilen aynı sayıda ve dikdörtgen geometrideki kanat verimlerinden yüksek olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 18. $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ kullanılan kanatsız ve 6,9,12,15 kanatlı ısı eşanjörü için FDM erime süresi analizleri

LHTES (Gizli ısı termal enerji depolama) ünitesindeki faz değıştiren malzemenin ısı transfer verimliliğini artırmak için Ao ve arkadaşlarının yaptığı sayısal analiz çalışmasında, boyuna kanatlı bir ısı eşanjörü sisteminde de kanatçık tasarım parametrelerinin "N = 20, L = 30, W = 1" olarak belirtildiği bir ısı değıştirici optimal bir kombinasyonunda FDM'nin toplam erime süresi %71,2 oranında azaldığı belirtilmiştir (Ao ve ark., 2023).

Sonuç olarak literatürdeki pek çok çalışmada (Bilen ve ark., 2008; Velraj ve ark., 1999; İsmail ve ark., 2001) olduğu gibi sunulan çalışmada da belirtildiği üzere, kanat kullanımının, eşanjör verimini arttırdığı tespit edilmiştir. Sunulan çalışmada iki inorganik faz değışim malzemesine yönelik elde edilen analiz çıktıları birbiri ile karşılaştırıldığında, $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 'ın $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ 'ya göre daha düşük bir ergime sıcaklığına sahip olması nedeniyle, FDM olarak bu eşanjör sisteminde kullanımının daha avantajlı olduğu belirtilmiştir. Sonuçta aynı ısı eşanjöründe en avantajlı kanat sayısı olan 15 kanat kullanılması halinde, $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 'ın, $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ 'ya göre yaklaşık %24 oranında daha erken bir erime sağladığı tespit edilmiştir.

4. Sonuçlar ve Öneriler

ANSYS Fluent ticari yazılımı kullanılarak, eşmerkezli ısı değiştiricinin ara boşluğunda $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ve $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ 'ın FDM olarak kullanıldığı bir termal enerji depolama ünitesinde, FDM'nin erime süresi HAD analiziyle incelenmiştir. Kanatçiksız ve literatürden farklı bir kanatçıklı model için iki boyutlu ve zamana bağlı olarak gerçekleştirilen çalışma neticesinde elde edilen sonuçlar aşağıda belirtilmiştir.

- Eş merkezli iki borulu ısı değiştiricisinde içteki borudan 50°C , 60°C ve 70°C sıcaklıklarında ısı transfer akışkanı su geçirilmesi halinde, sıcaklığın artmasıyla birlikte şarj işlemi esnasında erime süresinde azalma gerçekleşmiştir.
- FDM içerisinde kanat etkenliği 2.2, 3.3, 4.4, 5.5 olan 6, 9, 12 ve 15 adet kanat kullanımıyla iletimle olan ısı transfer yüzey alanının artmasına bağlı olarak ara boşlukta depolanan FDM'nin erime süresinin kısaldığı tespit edilmiştir. Gizli enerji depolanan eş merkezli ısı eşanjörlerinde, kanat ilavesi ve geometrisinin erime süresine önemli oranda katkısı olması nedeniyle yeni kanat tasarımlarının geliştirilmesi desteklenmelidir.
- Atık su ısı enerjisi açığa çıkaran endüstriyel tesislerde atık ısının, termal enerji depolamada kullanılabilmesi için tasarlanan pilot ısı eşanjörünün, bu tür tesislerde kullanılacak eşanjörler için yol gösterici olabileceği tespit edilmiştir. Bu kapsamda yapılacak deneysel, sayısal ve simülasyon çalışmalarının, atık ısının değerlendirilmesinde faydalı olabileceği görülmüştür.
- Sonuçta eşmerkezli ısı eşanjörünün kanatsız durumunda FDM erime süresi $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ve $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ için sırasıyla 140 ve 180 dakika iken, içteki borunun dış yüzeyini taban alanlarıyla tamamen kaplayacak şekilde tasarlanan maximum kanat sayısı olan 15 kanatın uygulanması halinde, sırasıyla 25 ve 33 dakika olarak ölçülmüştür. Erime süresinde kanatsız modele göre sırasıyla %82,14 ve %81,66 oranında bir süre azalımı sağlanarak FDM'ye gömülü olarak kullanılacak kanat uygulamasının erime süresinde ciddi azalmaya sebebiyet verdiği ortaya konulmuştur.

Yazarların Katkısı

Tüm yazarlar çalışmaya eşit katkıda bulunmuştur.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Kaynaklar

- Acir, A. and Canli, M. E. (2018). Investigation of fin application effects on melting time in a latent thermal energy storage system with phase change material (PCM). *Applied Thermal Engineering*, 144.
- ANSYS, (2008) Inc. Fluent Theory Guide, USA, November 28, Chp:21.1-14.
- Ao, C., Yan, S., Zhao, L., Wu, Y. (2023). Assessment on the effect of longitudinal fins upon melting process in a latent heat thermal energy storage unit. *Journal of Energy Storage*, 59.
- Barba, A., and Spiga, M. (2003). Discharge mode for encapsulated PCMs in storage tanks. *Solar Energy*, 74(2), 141–148.
- Bédécarrats, J., Strub, F., Falcon, B., and Dumas, J. (1996). Phase-change thermal energy storage using spherical capsules: performance of a test plant. *International Journal of Refrigeration*, 9(3), 187–196.
- Bilen, K., Takgil, F., and Kaygusuz K. (2008). Thermal energy storage behavior of $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ during melting and solidification. *Energy Sources, Part A*, 30:775–787.
- Carlsson, B., and Wettermark, G. (1980). Heat transfer properties of a heat of fusion store based on $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$. *Solar Energy*, 24, 239–47.
- Castell, A., Solé, C., Medrano, M., Roca, J., Cabeza, L. F., and García, D. (2008). Natural convection heat transfer coefficients in phase change material (PCM) modules with external vertical fins. *Applied Thermal Engineering*, 28 (13), 1676–1686.
- Çengel, Y. A. and Cimbala, J. M. (2006). *Akışkanlar mekaniği temelleri ve uygulamaları*. İzmir: Güven Bilimsel Yayınevi. 818-830.
- Çengel, Y. A., (2015) *Heat and mass transfer: Principles and applications*. Ankara: Palme Pub.
- Çengel, Y. A., (2015) *Thermodynamics: with an engineering approach*. Ankara: Palme Pub.
- El Qarnia, H., A. Draoui, A., and Lakhali, E.K. (2013). "Computation of melting with natural convection inside a rectangular enclosure heated by discrete protruding heat sources. *Applied Mathematical Modeling*, 37 (6), 3968-3981.
- Esen, M., Durmuş, A., and Durmuş, A. (1998). Geometric design of solar-aided latent heat store depending on various parameters and phase change materials. *Solar Energy*, 62(1), 19–28.
- Hasnain, S. M. (1998). Review on sustainable thermal energy storage Technologies., Part 1: heat storage materials and techniques. *Energy Conversion and Management*, 39 (11), 1127–38.
- Ismail, K.A.R., Alves, C.L.F., Modesto, M. (2001). Numerical and experimental study on the solidification of PCM around a vertical axially finned isothermal cylinder. *Applied Thermal Engineering*, 21, 53–77.
- Iten, M., and Liu, S. (2014), A work procedure of utilizing pcms as thermal storage systems based on air-tes systems. *Energy Conversion and Management*, 77, 608–627.
- Ji, C., Qina, Z., Low Z., Dubeya S., Chooa, F. H., and Duanb F. (2018). Non-uniform heat transfer suppression to enhance PCM melting by angled fins. *Applied Thermal Engineering*, 129, 269-279.
- Khadiran, T., Hussein, M. Z., Zainal, Z., and Rusli, R. (2016). Advanced energy storage materials for building applications and their thermal performance characterization. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 57, 916–928.
- Koşan, M., ve Aktaş M. (2018). Faz değiştiren malzemelerle termal enerji depolayan bir ısı değiştiricisinin sayısal analizi. *Politeknik*, 21(2), 403-409.
- Li, J., Abdulghani Z.R., Alghamdi M.N., Sharma K., Niyas H., Moria H., Arsalanloo A. (2023) Effect of twisted fins on the melting performance of PCM in a latent heat thermal energy storage system in vertical and horizontal orientations: Energy and exergy analysis, *Applied Thermal Engineering*, 219, Part A, 119489.
- Mazman, M., " *Gizli ısı depolaması ve uygulamaları*", Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana. 2006.
- Medrano, M., Yilmaz M.O., Nogués M. Martorell I., Roca J., Cabeza L.F. (2009). Experimental evaluation of commercial heat exchangers for use as PCM thermal storage systems. *Applied Energy*, 86 (10), 2047–2055.
- Mettawee EB.S., and Assassa G.M.R. (2007). Thermal conductivity enhancement in a latent heat storage system. *Solar Energy*, 81(7), 839–845.
- Mohamed, S. A., Al-Sulaiman, F. A., Ibrahim, N. I., Zahir, M. H., Al-Ahmed, A., Saidur, R., Yılbaş, B.S., and Sahin, A.Z (2017). A review on current status and challenges of inorganic phase change materials for thermal energy storage systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 70, 1072-1089.

- Pahamli, Y., Hosseini M.J., Ranjbar A.A., and Bahrampoury R. (2016). Analysis of the effect of eccentricity and operational parameters in pcm-filled single-pass shell and tube heat exchangers. *Renewable Energy*, 97, 344–357.
- Pillai, K.K. and Brinkworth, B.J. (1976). The storage of low-grade thermal energy using phase change materials. *Applied Energy*, 2, 205–16.
- Rahimi, M., Ranjbar, A. A., Ganji, D. D., Sedighi, K., Hosseini, M. J. and Bahrampoury, R. (2014). Analysis of geometrical and operational parameters of PCM in a fin and tube heat exchanger. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 53, 109–115.
- Ravikumar M. and Srinivasan P. (2008). Phase change material as thermal energy storage material for cooling of buildings. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, 4, 503–11.
- Sharma, R., Ganesan, P., Tyagi, V., Metselaar, H. and Sandaran, S. (2015). Developments in organic solid–liquid phase change materials and their applications in thermal energy storage. *Energy Conversion and Management*, 95, 193-228.
- Sharma, S.D., Kitano H. and Sagara K. (2004). Phase change materials for low temperature solar thermal applications. *Res. Rep. Fac. Eng. Mie Univ.*, 29, 31-64.
- Stritih, U. (2004). An experimental study of enhanced heat transfer in rectangular PCM thermal storage. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 47, 2841–2847.
- Velraj R., Seeniraj R., Hafner B., Faber C., Schwarzer K. (1999). Heat transfer enhancement in a latent heat storage system. *Solar Energy*, 65,171–80.
- Verma, P., Varun G., and Singal, S.K. (2008). Review of mathematical modeling on latent heat thermal energy storage systems using phase-change material. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12(4), 999-1031.
- Vyshak, N. R., and Jilani, G. (2007). Numerical analysis of latent heat thermal energy storage system. *Energy Conversion and Management*, 48 (7), 2161–2168.
- URL-1: <https://en.zae-bayern.de/> (Erişim Tarihi: 1 Mart 2023).