



## BİR ISIL ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMİNDE GALYUM FAZ DEĞİŞTİREN MALZEMESİNİN KULLANIMININ SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ

<sup>1</sup>Cumhur YALÇINDERE<sup>ID</sup>, <sup>2</sup>Tolga DEMİRCAN<sup>ID</sup>

Kırıkkale Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Kırıkkale, TÜRKİYE  
<sup>1</sup>kalieron33@gmail.com, <sup>2</sup>tolgademircan@kku.edu.tr

(Geliş/Received: 23.08.2022; Kabul/Accepted in Revised Form: 26.09.2022)

**ÖZ:** Bu çalışmada, faz değiştiren madde olarak Galyum kullanılan bir ısı enerjisi depolama sisteminde, Galyumun erime davranışları ve ısı performansı incelenmiştir. Bu amaçla, öncelikle içi içe geçmiş, eş merkezli iki dairesel borudan oluşan temel bir model geometrisi belirlenmiştir. Bu modelin iç borusundan su geçtiği, iki boru arasında kalan bölgenin ise faz değiştiren malzeme ile dolu olduğu düşünülmüştür. Bu temel geometride, iç borunun kesit geometrisinin eliptikliği değiştirilerek farklı yeni model geometriler oluşturulmuştur. Bu kapsamda, farklı model geometrileri ve farklı su giriş sıcaklıkları için Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği yardımı ile zamana bağlı analizler yapılmıştır. Analizlerden elde edilen veriler aracılığı ile, doğal taşınımın ve akışkan giriş sıcaklığının erime davranışı üzerindeki etkileri belirlenmeye çalışılmıştır. Sonuç olarak, ısı transfer akışkanının giriş sıcaklığı arttıkça Galyumun erime süresinin azaldığı belirlenmiştir. İç borunun kesit geometrisinin eliptikliği arttıkça, erime hızının arttığı dolayısıyla erime süresinin kısaldığı gözlemlenmiştir. En iyi ısı performansı eliptikliğin en fazla olduğu Model-5'te elde edilmiştir. Model-5 in erime süresi Model-2'ye oranla, akışkan giriş sıcaklığı 65 °C, 70 °C ve 75 °C olduğu durumlar için sırasıyla %34,06, %33,92 ve %30,91 kadar kısaldığı belirlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Faz Değiştiren Malzeme, FDM, Galyum, Enerji Depolama

### Analysis of Gallium Phase Changing Material in a Thermal Energy Storage System

**ABSTRACT:** In this study, the melting behavior and thermal performance of gallium as a phase changing material is investigated in a thermal energy storage system. For this purpose, a fundamental model geometry as an annular is determined. This model is assumed to have water flow on the inner pipe and phase changing material inside the gap between two pipes. Different new model geometries are created from this fundamental model by changing the cross-section geometry elliptic of the inner pipe. Within this scope, time-based analysis is conducted with Computational Fluid Dynamic for different model geometries and different water input temperature values. By using the data obtained from the analysis, the effects of natural convection and fluid input temperature on the melting behavior are investigated. As a result, it is found that the gallium melting duration decreased as the input temperature of thermal transfer increased. It is observed that melting speed increased and therefore, melting duration decreased as the ellipticity of the inner pipe cross-section geometry increased. The best thermal performance was obtained in Model-5 with the highest ellipticity. Compared to Model-5 and Model-2, melting times for 65 °C, 70 °C and 75 °C were shortened by 34.06%, 33.92% and 30.91% respectively.

**Keywords:** Phase Changing Material, PCM, Gallium, Energy Storage

### GİRİŞ (INTRODUCTION)

Günümüzde gelişen teknoloji ile beraber enerji ihtiyacının karşılanabilmesi büyük bir problem haline almaktadır. Dünyamızda enerji ihtiyacının karşılanmasında büyük oranda fosil yakıtların kullanılması, çevre açısından büyük sorunlar ortaya çıkarmaktadır. Fosil yakıtlar enerji üretimi amacıyla

yakıldıklarında zararlı emisyon gazları üretmektedirler. Bu emisyon gazları hem insan sağlığı, hem canlı yaşamı hem de doğal çevre için büyük zararlar oluşturmaktadır. Ayrıca fosil yakıtların yoğun kullanımı, bu kaynakların hızlıca tüketilmesine sebep olmaktadır. Bu kaynakların rezervlerinin kısıtlı olması nedeniyle, gelecekte dünyanın enerji ihtiyacının karşılanmasında büyük bir sorun yaşanacağı öngörülmektedir. Günümüzdeki tüketim hızıyla, petrol, kömür ve doğalgaz gibi fosil yakıtların gelecekte hızlı bir şekilde tükeneceği tahmin edilmektedir. Bundan dolayı, enerji ihtiyacının yenilenebilir enerji kaynakları ile karşılanması sürdürülebilirlik açısından büyük bir önem arz etmektedir. Günümüzde güneş enerjisi, rüzgar enerjisi, jeotermal enerji, dalga enerjisi vb. yenilenebilir enerji kaynakları kullanılmaktadır. Ancak bu yenilenebilir enerji kaynaklarının verimli kullanımında farklı problemler ile karşılaşılabilir. Örneğin güneş enerjisinin temiz, yenilenebilir, ucuz olması gibi birçok avantajlı özelliği olmasına rağmen, kesintisiz olarak kullanılamaması büyük bir problem teşkil etmektedir. Güneş enerjisine ulaşım, anlık olarak değişebilmektedir. Özellikle gündüz ve gece vakitleri arasında güneş enerjisine ulaşımında büyük farklılıklar oluşmaktadır. Bu durum, güneş ısıl enerjisinin depolanması ihtiyacını getirmiştir.

Isıl enerjinin depolanması ile, gün içinde enerji ihtiyacı olduğunda depolanan enerji kullanılabilen ve gerekli ihtiyaç karşılanabilmektedir. Bu amaçla geliştirilen enerji depolama sistemleri genellikle, güneş enerjisine ulaşımın fazla olduğu saatlerde ısıl enerjinin depolanması, güneş enerjisine ulaşımın yetersiz olduğu saatlerde ise depolanan enerjinin kullanılması mantığı ile çalışmaktadır. Bu ısıl enerji depolama sistemleri bir ısı değiştiricisi mantığı ile çalışmaktadır. Bu kapsamda, bir ısı transferi akışkanı ve bir faz değiştiren malzeme birlikte kullanılmaktadır. Isıl enerji depolama işlemi, duyulur ısı depolama, gizli ısı depolama ve termokimyasal enerji depolama olmak üzere üç farklı yöntemle gerçekleştirilmektedir. Gün içinde güneş enerjinin fazla olduğu zamanlarda, güneş enerjisi sayesinde ısı transfer akışkanının sıcaklığı artırılmaktadır. Bu yüksek sıcaklıktaki ısı transfer akışkanı ile, faz değiştiren malzeme arasında ısı geçişi gerçekleşmekte ve faz değiştiren malzeme erime davranışı göstermektedir. Faz değiştiren malzemenin erimesi ile ısıl enerji depolama sisteminin şarj olduğu düşünülmektedir. Güneş enerjisinin yetersiz olduğu zamanlarda ise, ilgili sistem ters yönlü çalıştırılmaktadır. Yüksek sıcaklıktaki faz değiştiren malzemenin ısı transfer akışkanına ısı geçişi gerçekleşmekte ve faz değiştiren malzeme katılaşma davranışı göstermektedir. Yüksek sıcaklığa ulaşan ısı transferi akışkanı ise enerji ihtiyacının karşılanmasında kullanılmaktadır. Faz değiştiren malzeme katılaşma davranışı gösterdiği bu süreçte ise, ısıl enerji depolama sisteminin deşarj olduğu düşünülmektedir. Bu çalışma kapsamında bir faz değiştiren malzemenin, erime süreci dolayısıyla şarj işlemi incelenmiştir.

Literatür incelendiğinde ısıl enerji depolama sistemlerinde faz değiştiren malzemelerin kullanımı üzerine yapılmış birçok çalışma olduğu gözlenmiştir. Bu çalışmalarda, araştırmacılar genellikle şarj kapasitesinin artırılması ve şarj süresinin azaltılması üzerine çalışmışlardır. Faz değiştiren malzeme tipi, ısı transfer akışkanı giriş debisi, giriş sıcaklığı, geometri vb. birçok parametrenin ısıl performans üzerindeki etkilerini irdelemişlerdir. Bu kapsamda, literatürde bulunan bazı önemli çalışmalara aşağıda değinilmiştir.

Darzi ve diğ. (2016), yapmış oldukları çalışmada iki eş merkezli yatay silindir tüpün içinde, bir dikey eliptik, bir yatay eliptik, bir dairesel, bir de dairesel ancak kanatçıklı geometrinin şarj ve deşarj davranışlarını incelemişlerdir. Çalışmalarının sonucunda dikey eliptik geometrinin şarj durumunda dairesel geometriye üstünlük sağladığını, ancak deşarj durumunda pek etkili olmadığını belirlemişlerdir. Assis ve diğ. (2007), dairesel bir geometri içerisindeki faz değiştiren malzemenin erime davranışını deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Faz değiştiren malzeme olarak parafin kullanmışlardır. Çalışmalarının sonucunda doğal taşınım etkilerinin erimede önemli bir rol oynadığını belirtmişlerdir. Bouhal ve diğ. (2018) ise, içerisinde ısı kaynağı olan faz değiştiren malzeme ile dolu silindirik bir geometrinin erime sürecini sayısal olarak incelemişlerdir. Faz değiştiren malzeme olarak Galyum kullanmışlardır. Bu amaçla, düz silindir şeklinde ve dört kanatçıklı silindir şeklinde iki farklı model geometri kullanmışlardır. Sonuç olarak, dört kanatçıklı olan geometri kullanımı ile Galyumun erime süresinin 18,35 dakikadan 13,35 dakikaya kadar azaltılabildiğini belirlemişlerdir.

Cao ve diğ. (2018), yapmış oldukları sayısal ve deneysel çalışmada ısıl enerji depolama sistem

geometrilerinin eksantrikliğinin, erime davranışı üzerine olan etkilerini incelemişlerdir. Bu kapsamda, eksantrikliğin ve sınır sıcaklığının üzerine yoğunlaşmışlardır. Çalışmalarının sonucunda, eksantrikliğin erime süreci üzerinde önemli bir fark oluşturmadığını gözlemlemişlerdir. Ji ve diğ. (2018), ısı enerji depolama sistemlerinde kanatçıklı geometrinin kanatçıklarının açılı olmasının ısı transferine olan etkisini araştırmışlardır. Çalışmalarında faz değiştiren malzeme olarak RT42 malzemesini kullanmışlardır. Oluşturdukları farklı model geometrilerde kanatçık açısını 0, +15, +30, -15 ve -30 derece olacak şekilde değiştirmişlerdir. Çalışmalarının sonucunda -15° açılı kanatçığa sahip olan geometrinin erime sürecinin en hızlı tamamlandığını gözlemlemişlerdir. Ancak +15 ve +30 derecelerde kanatçık kullanımında ise erime sürecinin yavaşladığını belirtmişlerdir. Longeon ve diğ. (2013), eş merkezli bir ısı değiştiricinin gizli ısı enerji depolama sistemi olarak kullanılmasını deneysel ve sayısal olarak ele almışlardır. Faz değiştiren malzeme olarak RT35 kullanmışlardır. Doğal konveksiyonun, özellikle şarj sürecinde önemli bir rol aldığını gözlemlemişlerdir. Sonuç olarak, şarj işleminde üst enjeksiyonun,deşarj işleminde ise alt enjeksiyonun daha avantajlı olduğunu belirtmişlerdir.

Yazıcı ve diğ. (2014), bir ısı enerji depolama sisteminde kullanılan parafinin katılaşma karakteristiklerini incelemişlerdir. Akış hızı ve giriş sıcaklığının sabit tutulduğu çalışmada eksantrik geometrilerin ısı transferine olan etkileri üzerine yoğunlaşmıştır. İç borunun eksantrikliğinin 10, 20, 30, -10, -20, -30 mm olduğu çalışmada dış tüp boyutu sabit olarak alınmıştır. Sonuç olarak içteki tüpün eksantrikliğinin değişmesiyle toplam katılaşma süresinin uzadığını gözlemlemişlerdir. Katılaşma sürecinde en iyi performansın, iki tüpünde eş merkezli olduğu durumda gerçekleştiğini belirtmişlerdir. Pahamli ve diğ. (2016), yapmış oldukları çalışmada eksantrikliğin, ısı transfer akışkanının sıcaklığının ve akış hızının ısı performans üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Faz değiştiren malzeme olarak RT50'yi kullanmışlardır. Isı transfer akışkanının giriş hızının, erime davranışı üzerinde önemli bir etkisi olmadığını görmüşlerdir. Eksantrikliğin artmasıyla, erime işleminin son aşamalarındaki ısı transfer hızının ve ortalama sıcaklığın arttığını belirlemişlerdir.

Tao ve diğ. (2017), yapmış oldukları çalışmada gövde borulu bir ısı değiştiricisinde faz değiştiren malzeme kullanıldığında, doğal konveksiyonun ısı performansına olan etkilerini araştırmışlardır. İlgili problemi hem erime hem de katılaşma süreci için incelemişlerdir. Çalışmalarının sonucunda doğal konveksiyon etkileri ihmal edildiğinde faz değiştiren maddenin erime sürecinin kısaldığını görmüşlerdir. Doğal konveksiyonun erime sürecinde sistem verimini artırdığını, ancak katılaşma sürecinde pek bir fark yaratmadığını belirtmişlerdir. Wang ve diğ. (2016), bir ısı depolama sisteminde, kanatçık uzunluğu, kanatçık oranı ve komşu kanatçıklar arası açı gibi değişkenlerin sisteme olan etkilerini deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Çalışmalarının sonucunda, kanatçık oranının erime sürecini kısalttığını belirtmişlerdir. Doğal konveksiyonun erime sürecinde büyük bir etkisi olduğunu gözlemlemişlerdir. Komşu kanatçıklar arasındaki açının 60-90 derece olduğu durumda optimum ısı performansına ulaşıldığını gözlemlemişlerdir. Deng ve diğ. (2019) ise, yapmış oldukları sayısal çalışmada yatay konumlandırılmış ısı enerji depolama sisteminde, iki kanatçıklı geometrinin kanatçık açılarının değiştirilmesinin sistem performansına olan etkilerini incelemişlerdir. Çalışmalarının sonucunda, dış borunun iletkenliğinin, erime davranışı ve kanat düzeni üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu gözlemlemişlerdir.

Rana ve diğ. (2022) ısı eşanjörlerinde faz değiştiren malzemelerin erimesini ve ısı transfer karakteristiklerini sayısal olarak incelemişlerdir. Bu kapsamda dairesel, dikdörtgen ve eliptik borulu ısı eşanjörlerini ele almışlardır. Faz değiştiren malzemenin erimesinin en hızlı dikdörtgen borulu geometride, en yavaş ise daire borulu geometride gerçekleştiğini belirtmişlerdir. Eisapour ve diğ. (2021) çift eliptik geometrili ısı enerji depolama sisteminin optimum tasarımını belirlemek için sayısal analizler yapmışlardır. Bu maksatla R35 faz değiştiren malzemesinin erime davranışını incelemişlerdir. Sonuç olarak, iç boru ile dış borunun alt duvarı arasındaki mesafe azaldıkça ısı performansın arttığını belirtmişlerdir. Çift dalgalı iç borular kullanılması ile ısı transfer yüzey alanının artırıldığı ve bu sayede faz değiştiren malzemenin erime süresinin hızlandığını gözlemlemişlerdir. Punniakodi ve Senthil (2021) güneş enerji depolama sistemlerinde faz değiştiren malzeme kullanımı ve kap geometrik parametreleri üzerine bir inceleme çalışması yapmışlardır. Geometriye kanatların eklenmesinin erime hızını önemli ölçüde artırdığını belirtmişlerdir. Nanoparçacık eklenmesi ve kabın yönünün değişiminin ısı transferi

üzerinde artırıcı etkisi olduğunu söylemişlerdir. Dikey kap geometrilerinin, yatay geometrilere oranla daha etkili erime sağladığı belirtmişlerdir.

Ghafoor ve Mussa (2020) termal enerji depolama sistemlerinde farklı iç boru geometrilerinin ısı performansını sayısal olarak incelemişlerdir. Faz değiştiren malzeme olarak parafin kullanmışlardır. İç boru geometrisini dairesel, yatay eliptik ve dikey eliptik olacak şekilde değiştirmişlerdir. Çalışmalarının sonucunda, inceledikleri parametre aralığında dairesel borunun ısı performansının daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir. Benbrika ve diğ. (2021) enerji depolama sistemlerinde eliptik geometrinin toplam erime süresine olan etkilerini sayısal olarak incelemişlerdir. Çalışmalarının sonucunda yatay eliptik borunun, dikey eliptik boruya oranla daha yüksek erime hızına ve daha düşük erime süresine sahip olduğunu belirtmişlerdir. Shin ve diğ. (2019) geliştirdikleri yeni tip eliptik geometriye sahip enerji depolama sistemini deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışmalarının sonucunda, geliştirdikleri PCM kapsülü ile, şarj ve deşarj işlem süresinin sırasıyla %50 ve %35 oranında azaldığını belirtmişlerdir.

Park ve diğ. (2021) kanatlı eliptik bir iç boruya sahip ısı enerji depolama sisteminde faz değiştiren malzemenin erime sürecini sayısal olarak incelemişlerdir. Kanat uzunluğunu 5-8 mm ve iç boru sıcaklığını ise 56,15-92,22°C aralığında değiştirerek analizler yapmışlardır. Sonuç olarak, ısı ve kütle transfer özelliklerinin kanat uzunluğunun ve iç boru sıcaklığının değişiminden önemli ölçüde etkilendiğini belirtmişlerdir. Jourabian ve diğ. (2020), eliptik borulu bir ısı enerji depolama sisteminde, nanopartikül eklentisi ve gözenekliliğin etkilerini incelemişlerdir. bu kapsamda Cu nano partikülünün hacimsel karışım oranını 0-0,002 aralığında, gözenekliliği ise 1-0,9 aralığında değiştirmişlerdir. Eliptik halkanın eğiminin sıvı oranında herhangi bir değişikliğe sebep olmadığını belirtmişlerdir. Nano partikülünün hacimsel karışım oranının artması ile, gizli füzyon ısısının azaldığını ancak termal iletkenliğin ve sıvı oranının arttığını gözlemlemişlerdir. Eisapour ve diğ. (2022) dalgalı geometriye sahip eliptik bir ısı enerji depolama sisteminde nano partikül eklenmiş faz değişim malzemesinin ısı performansını sayısal olarak incelemişlerdir. Faz değiştiren malzeme olarak RT35, nano partikül olarak SiC kullanmışlardır. Dalgalı yüzey kullanımının ısı transferini artırdığını gözlemlemişlerdir. SiC nano partikül ilavesinin şarj boşalma hızını artırdığını belirtmişlerdir. Ayrıca ısı transfer akışkan sıcaklığının azaltılması ile faz değiştiren malzemenin katılaşma süresinin kısaldığını belirlemişlerdir. Bazai ve diğ. (2020) dairesel-eliptik çift borulu ısı enerji depolama sisteminin ısı performansını sayısal olarak incelemişlerdir. Eliptik iç borunun farklı en-boy oranları ve farklı açıları için analizler yapmışlardır. Çalışmalarının sonucunda daire bir boru yerine elips şeklinde bir iç boru kullanımı ile erime süresinin yaklaşık %61 azaldığını, verimliliğin ise %26 arttığını gözlemlemişlerdir. Elips açısı 90° olduğunda en iyi ısı performansı gözlemlemişlerdir.

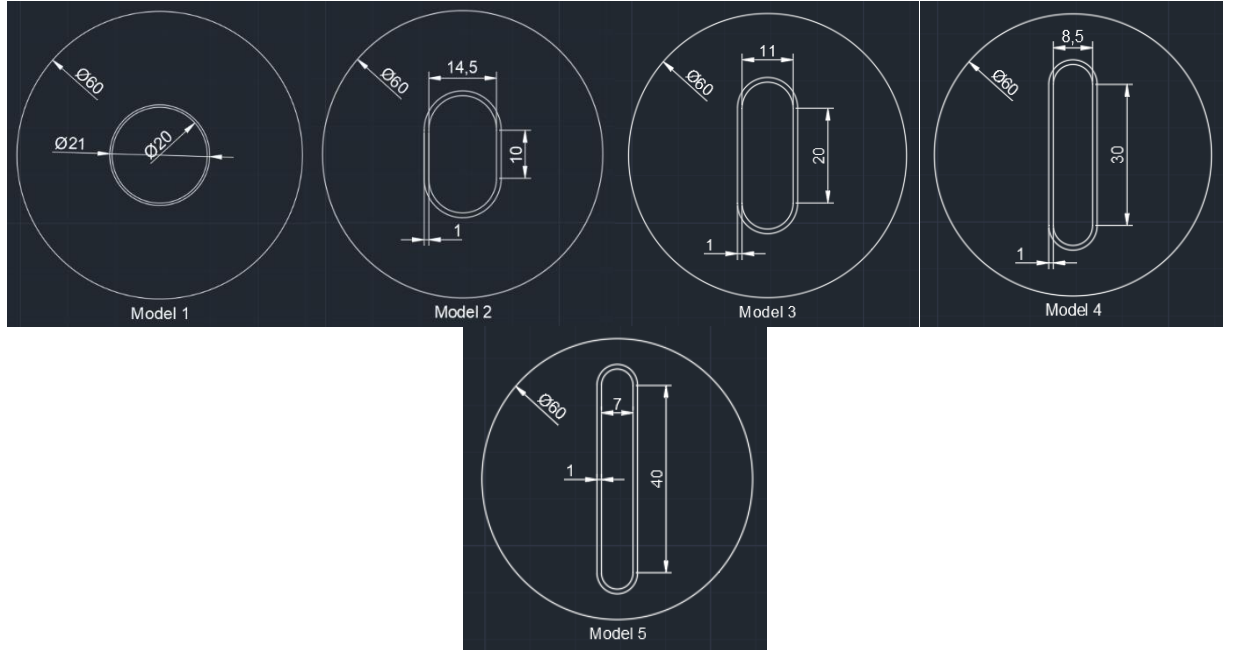
Literatür incelemesinden de görüldüğü üzere, ısı depolama sistemlerinde kullanılan faz değiştiren malzemeler üzerine yapılan çalışmalarda genel olarak problem geometrisi, akışkan giriş sıcaklığı, debisi, faz değiştiren malzeme tipi vb. parametreler incelenmiştir. Çalışmaların bir kısmında sadece erime veya sadece katılaşma süreci ele alınırken, diğer bir kısmında her iki süreç birlikte incelenmiştir. Yapılan incelemede, literatürde faz değiştiren malzemeler üzerine yapılmış birçok çalışmanın bulunduğu, güncel çalışmalarında yapılmaya devam edildiği tespit edilmiştir. Yapılan bu çalışmalarda, birçok geometrik parametrenin ısı performans üzerine etkilerinin incelendiği görülmüştür. Ancak yapılan incelemede, ısı transfer akışkanının geçtiği borunun kesitinin eliptikliğinin değişiminin, faz değiştiren malzemenin erime sürecine ve ısı performansına olan etkileri üzerine çalışıldığı çalışmalara fazla rastlanılmamıştır. Ayrıca literatürde bulunan mevcut çalışmalarda, farklı tip (N-eicosane, N-octadecane, RT22, RT50, RT65, RT82, RT44HC vb.) faz değiştiren malzemelerin erime sürecine ve ısı performansına olan etkileri üzerine yoğunlaşıldığı gözlemlenmiştir. Ancak literatürde galyum üzerine yapılmış çalışmalara fazla rastlanılmamıştır. Galyum yüksek ısı iletkenliğe ve düşük erime sıcaklığına sahip bir faz değiştiren malzemedir. Bu özellikleri sayesinde düşük sıcaklıklarda, küçük sıcaklık farklarında bile faz değişimi gerçekleştirebilmekte ve hızlı bir şekilde ısı enerji depolama için kullanılabilir. Bundan dolayı bu çalışmada, literatürde bulunan diğer çalışmalardan farklı olarak ısı transfer akışkanının geçtiği borunun eliptikliğinin değişiminin ve galyum faz değiştiren malzeme kullanımının ısı performans üzerindeki etkilerine yoğunlaşılmıştır. Bu amaçla iç borunun eliptikliği değiştirilerek 5 farklı model geometri oluşturulmuştur. Bu model geometrilerde, ısı transfer akışkanının giriş sıcaklığı değiştirilerek analizler

yapılmış ve galyum faz değiştiren malzemesinin erime davranışı irdelenmiştir.

## MATERYAL VE METOT (MATERIAL AND METHOD)

### Problem Tanımı (Description of the Problem)

Bu çalışmada, faz değiştiren malzeme kullanılan bir ısı enerji depolama sisteminde, faz değiştiren malzemenin erime (şarj edilme) süreci ve ısı performansı incelenmiştir. Bu amaçla, iç içe geçmiş eş merkezli bakır borulardan oluşan bir ısı değiştiricisi temel modeli oluşturulmuştur. Bu temel model geometride, iç borunun çapı 20 mm, et kalınlığı 1 mm ve dış borunun çapı ise 60 mm olarak belirlenmiştir. İki borunun uzunluğu ise 500 mm olarak seçilmiştir. Oluşturulan bu temel geometriye Model-1 ismi verilmiştir. Bu Model-1 geometrisi kullanılarak, diğer model geometrileri tasarlanmıştır. Bu kapsamda, dış borunun çapı ve boruların uzunlukları değiştirilmeden sadece iç borunun eliptikliği değiştirilerek diğer 4 model geometri daha oluşturulmuştur. Bu yeni model geometriler oluşturulurken, Model-1 geometrisinde bulunan iç borunun kesit alanı kullanılmıştır. Bu kesit alanı sabit kabul edilmiş ve diğer model geometrilerde farklı eliptikliğe sahip elips şeklinde iç boru kesit geometrileri oluşturulmuştur. Dolayısıyla bu çalışmada incelenen 5 geometrik modelde de, iç borunun kesit alanı birbirine eşit olarak belirlenmiştir. İç borunun elips kesit geometrileri oluşturulurken, elipsin odakları arasındaki mesafe kullanılmıştır. Bu mesafe Model-2, Model-3, Model-4 ve Model-5 geometrilerinde sırasıyla 5, 10, 15 ve 20 mm olarak ayarlanmıştır. Oluşturulan model geometriler Şekil 1’de şematik olarak verilmektedir.



**Şekil 1.** Modellerin şematik gösterimi.

*Figure 1.* The schematic representation of the models.

Bu çalışmada ele alınan tüm model geometrilerde, iç borunun içinden ısı transfer akışkanı olarak su geçtiği, iki boru arasında kalan mesafenin ise Galyum faz değiştiren malzemesi ile doldurulduğu düşünülmüştür. Suyun ve Galyumun fiziksel özellikleri Çizelge 1 ve Çizelge 2’de verilmektedir. Isı transfer akışkanı olarak seçilen suyun, sisteme giriş debisi sabit kabul edilmiş, giriş sıcaklıkları ise değiştirilmiştir.

**Çizelge 1.** Suyun fiziksel özellikleri.*Table 1. Physical properties of water.*

Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )	998,2
Özgül ısı (J/kgK)	4182
Isı iletim katsayısı (W/mK)	0,6
Dinamik Viskozite (kg/ms)	0,001003

**Çizelge 2.** Saf Galyumun fiziksel özellikleri (Bouhal ve diğ., 2018).*Table 2. Physical properties of pure Gallium (Bouhal et al., 2018).*

Erime sıcaklığı (K)	302,93
Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )	6093
Özgül ısı (J/kgK)	381,5
Isı iletim katsayısı (W/mK)	32
Dinamik viskozite (kg/ms)	0,00181
Gizli ısı değeri (L) (J/kg)K	80160
Isıl genleşme katsayısı (β) (1/K)	0,00012

### Çözüm Yöntemi (Solution Method)

#### Matematiksel Formülasyon ve Diferansiyel Denklemler (Mathematical Formulation and Differential Equations)

Bu çalışmada incelenen problemin temel diferansiyel denklemleri aşağıda verilmiştir (Pahamli ve diğ., 2016).

Süreklilik Denklemleri

$$\Delta \cdot \vec{V} = 0 \quad (1)$$

Momentum Denklemleri

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla \vec{v} = \frac{1}{\rho} (-\nabla P + \mu \nabla^2 \vec{v} + \rho \vec{g} \beta (T - T_{ref})) + \vec{S} \quad (2)$$

Enerji Denklemleri

$$\frac{\partial h_{duy}}{\partial t} + \frac{\partial (h_{duy} + h_{gizli})}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{V} h_{duy}) = \nabla \cdot \left( \frac{k}{\rho c_p} \nabla h_{duy} \right) \quad (3)$$

Bu denklemlerde " $\vec{V}$ " hız vektörünü, " $\rho$ " yoğunluğu, " $P$ " basıncı, " $\mu$ " dinamik viskoziteyi, " $\vec{g}$ " yerçekimi kuvvetini, " $T$ " sıcaklığı, " $T_{ref}$ " referans sıcaklığını, " $\vec{S}$ " kaynak terimini, " $h_{duy}$ " duyu entalpiyi, " $h_{gizli}$ " gizli entalpiyi, " $c_p$ " ise özgül ısıyı temsil etmektedir.

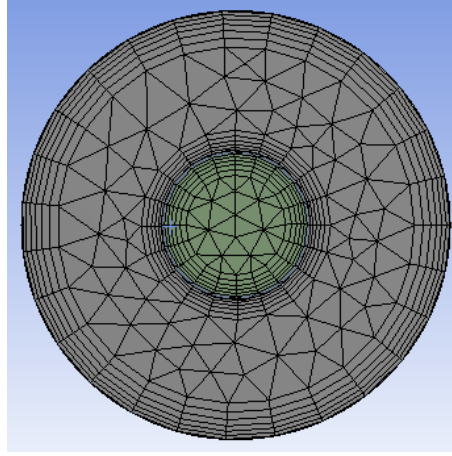
#### Sınır Şartları (Boundary Conditions)

Bu çalışma kapsamında ele alınan 5 geometride de aynı sınır şartları kullanılmıştır. Dış borunun dış yüzeyinin yalıtılmış olduğu kabul edilmiştir. Faz değiştiren maddenin başlangıçta 25°C sıcaklıkta ve katı halde olduğu düşünülmüştür. Isı transfer akışkanını sisteme sabit 0,023 kg/s debi ile girmektedir. Giriş sıcaklığının ise sırasıyla 65, 70, 75°C olacak şekilde değiştiği varsayılmıştır. Sistemden ise atmosfer basıncında olan bir ortama çıkış yaptığı düşünülmüştür. Yapılan tüm analizlerde yer çekim ivmesinin etkileri dikkate alınmıştır.

#### Ağ Yapısı (Mesh Structure)

Bu çalışmada incelenen problemin ağ yapısı, sınır tabaka bölgelerine yakın bölgelerde sık diğer bölgelerde gevşek bir ağ yapısı olacak şekilde ayarlanmıştır. Bu kapsamda, boru yüzeylerine yakın bölgelerde daha sık bir ağ yapısı oluşturulmuştur. Örnek olması açısından Model-1 geometrisi için

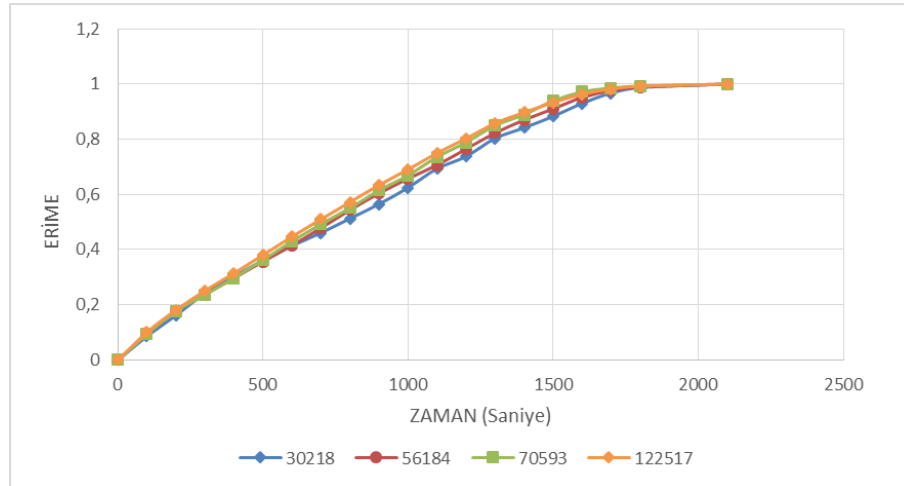
oluşturulan ağ yapısı Şekil 2’de verilmektedir. Diğer model geometrilerde de Model-1’dekine benzer bir ağ yapısı oluşturulmuştur.



Şekil 2. Model-1'in ağ yapısı.

Figure 2. Mesh structure of Model 1.

Kullanılan sayısal yöntemin ve elde edilen sonuçların ağ yapısından etkilenmemesi amacıyla, farklı düğüm nokta sayılarına sahip ağ yapıları oluşturularak simülasyonlar yapılmıştır. Bu simülasyonlardan elde edilen sonuçlar Model-1 geometrisi için Şekil 3’de verilmektedir. Şekilden de görüldüğü üzere 70593 düğüm sayısından sonra, artan düğüm sayısı için fazla bir değişim gözlemlenmemiştir. Bundan dolayı 70593 düğüm sayısına sahip ağ yapısı, Model-1 için optimum ağ yapısı olarak kabul edilmiştir. Benzer işlemler diğer model geometrileri içinde uygulanmıştır. Bu kapsamda Model-2, Model-3, Model-4 ve Model-5 için, sırasıyla 122608, 212342, 288781 ve 194677 düğüm sayısına sahip ağ yapıları optimum ağ yapısı olarak belirlenmiştir. Yapılan tüm analizlerde bu optimum ağ yapıları kullanılmıştır.



Şekil 3. Farklı ağ yapıları için elde edilen sonuçlar.

Figure 3. The results for different mesh structures.

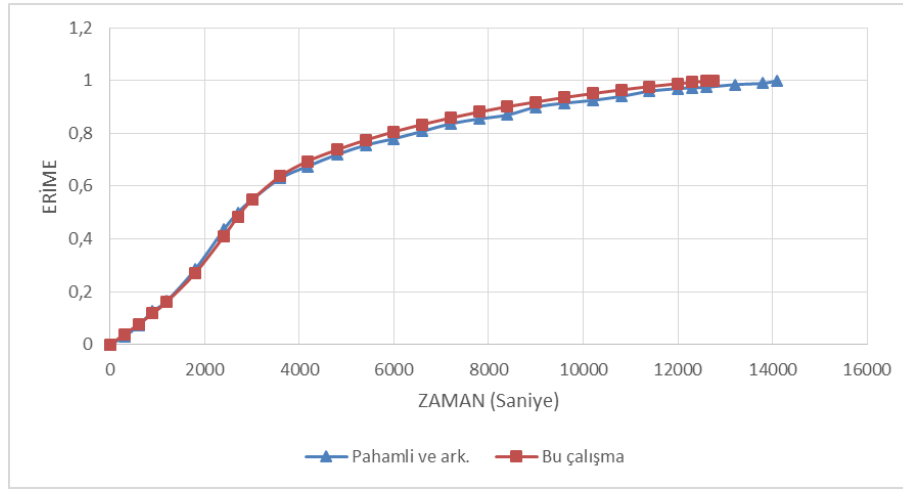
### Sayısal Yöntem (Numerical Method)

Bu çalışma kapsamında 5 farklı model geometri oluşturulmuştur. Bu model geometriler için optimum ağ yapıları belirlenmiştir. Problemin diferansiyel denklemleri, belirlenen sınır şartları kullanılarak Fluent paket programı aracılığı ile sayısal olarak çözülmüştür. Bu süreçte sayısal yaklaşım için SIMPLE algoritması tercih edilmiştir. Basınç hesaplamaları için PRESTO algoritması, momentum ve enerji hesaplamaları için ise QUICK algoritması kullanılmıştır. Sayısal analizler zamana bağımlı olarak

yapılmıştır. Zaman adımını belirlemek için zamandan bağımsızlaştırma işlemi yapılarak optimum zaman adımı boyutu 0,1 saniye olarak belirlenmiştir. Bu kapsamda yapılan tüm analizlerde 0,1 saniye zaman adımı kullanılmıştır. Süreklilik ve momentum denklemlerinin yakınsama kriteri  $10^{-5}$ , enerji denkleminin yakınsama kriteri ise  $10^{-6}$  mertebesinde seçilmiştir.

#### Sayısal Yöntemin Güvenilirliğinin Test Edilmesi (Validation of Numerical Method)

Belirlenen modeller ve sınır şartları için yapılacak olan analizlere başlamadan önce, bu problemin çözümünde kullanılan sayısal yöntemin ve elde edilen sonuçların güvenilirliğinin belirlenmesi istenmiştir. Bu amaçla literatür incelenmiş ve bu çalışmaya benzer bir çalışma belirlenmiştir. Bu kapsamda, Pahamli ve diğ. (2016) tarafından yapılan çalışmanın geometrisi ve şartları aynen kullanılarak sayısal analizler yapılmıştır. Bu analizlerden elde edilen sonuçlar ile diğer çalışmanın sonuçları birbirleri ile karşılaştırılmıştır. Her iki çalışmanın sonuçlarının karşılaştırılması Şekil 4’de verilmektedir. Şekilden de görüldüğü üzere her iki çalışmadan elde edilen sonuçlar kullanılarak çizilen eğriler birbirleri ile oldukça uyumludur. Dolayısıyla bu çalışmada kullanılan sayısal yöntemin ve elde edilen verilerin güvenilir bir seviyede olduğu söylenebilir.



Şekil 4. Bu çalışmanın sonuçları ile literatürün (Pahamli ve diğ., 2016) karşılaştırılması.

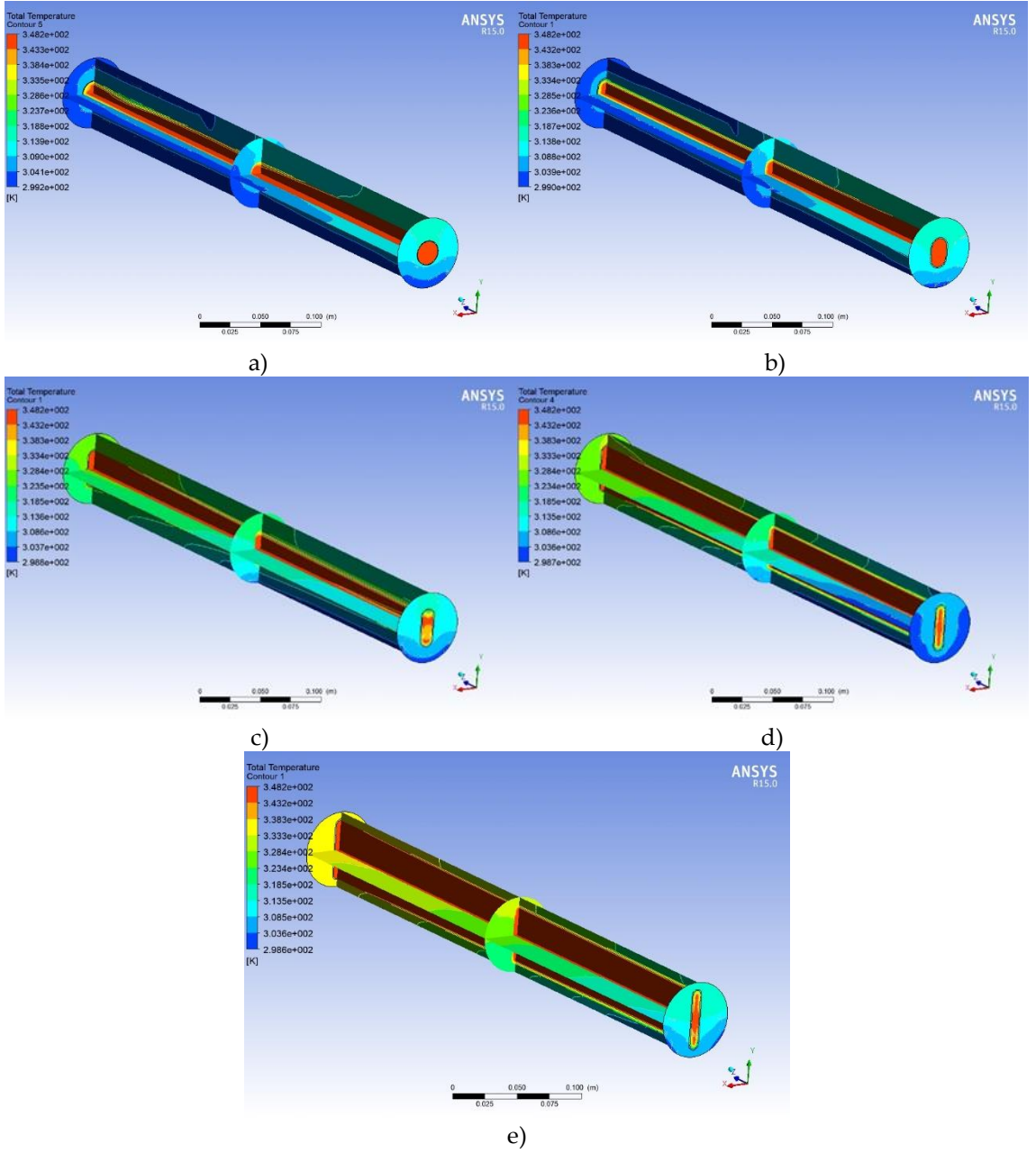
Figure 4. Comparison of the results of this study with literature (Pahamli et al., 2016).

#### BULGULAR VE TARTIŞMALAR (FINDINGS AND DISCUSSIONS)

Bu çalışma kapsamında, bir ısı depolama sisteminde faz değiştiren madde olarak Galyum kullanılması sayısal olarak ele alınmıştır. Bu kapsamda, kullanılan ısı değiştiricisinin iç borusunun eliptikliği değiştirilerek 5 adet farklı model geometrisi oluşturulmuştur. Bu model geometriler kullanılarak farklı su giriş sıcaklıkları için analizler yapılmıştır. Bu analizlerden elde edilen sonuçlar kullanılarak, problemin sıcaklık ve erime dağılımları belirlenmiştir. Bu sayede, geometrinin eliptikliğinin ve su giriş sıcaklığının Galyumun erime davranışları ve sistemin ısı performansı üzerindeki etkileri belirlenmeye çalışılmıştır. Bu kapsamda, sayısal analizlerden elde edilen verilerden oluşturulan şekil ve grafiklerden bir kısmı aşağıda verilmiş ve irdelenmiştir.

Şekil 5’te su giriş sıcaklığı  $75^{\circ}\text{C}$  olduğu durumda 12,5. dakika için elde edilen sıcaklık dağılımları farklı model geometrileri için birlikte verilmektedir. Şekiller incelendiğinde, iç borudan geçen sıcak suyun ve yerçekiminin etkisi ile galyumun sıcaklığının dikey yönde farklılık gösterdiği görülmektedir. Tüm model geometrilerde boru boyunca tüm kesitlerde, galyumun sıcaklığının dikey olarak yukarıdan aşağı doğru azaldığı gözlemlenmiştir. Ayrıca iç borunun eliptikliği arttıkça faz değiştiren malzemenin ortalama sıcaklığının arttığı, buna karşılık suyun ortalama sıcaklığının ise azaldığı belirlenmiştir.





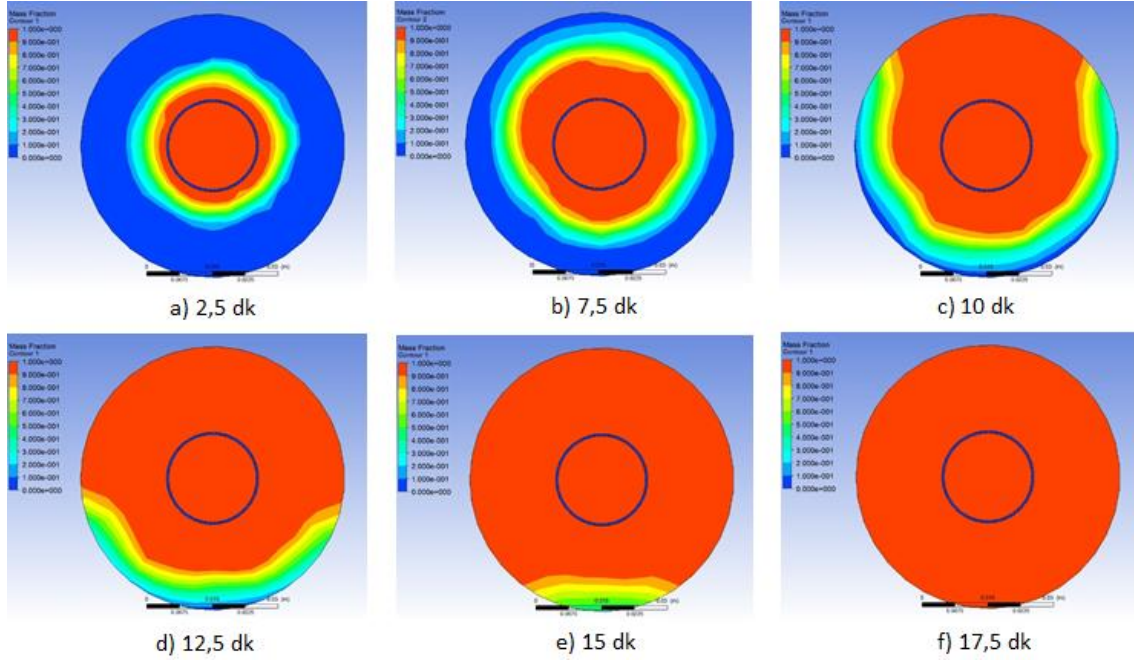
**Şekil 5.** Su giriş sıcaklığı 75°C ve 12,5. dakika için sıcaklık dağılımları; (a) Model-1, (b) Model-2, (c) Model-3, (d) Model-4 ve (e) Model-5.

*Figure 5.* Temperature distributions for 75°C and at 12.5th minute; (a) Model-1, (b) Model-2, (c) Model-3, (d) Model-4 and (e) Model-5.

Ayrıca Şekil 5'te, akış yönünde aksenal olarak girişte, tam ortada ve çıkışta alınan kesitler için elde edilen sıcaklık dağılımı birlikte görülebilmektedir. Şekil incelendiğinde sabit model geometrisi için, giriş, orta ve çıkış kesitlerinde elde edilen sıcaklık dağılımlarının birbirinden farklılık gösterdiği görülmektedir. Bu durum bu çalışmada incelen tüm geometriler için benzerlik göstermiştir. Aksenal yönde gerçekleşen bu sıcaklık değişimi, aksenal yönde erime hızının da farklı olduğunu belirtmektedir. Bu kapsamda akış girişinden çıkışına doğru aksenal yönde, faz değiştiren malzemenin erime hızının arttığı gözlemlenmiştir.

Model-1 ve su giriş sıcaklığı 70 °C olduğu durumda, akış yönünde geometrinin tam orta noktasında alınan bir kesitte farklı zaman anları için elde edilen kütle dağılımları Şekil 6'da birlikte görülmektedir. Şekil incelendiğinde 2,5. dakikada faz değiştiren malzemenin iç boru ile temasta olduğu bölgelerde sıvı faza geçmeye başladığı ancak diğer bölgelerde halen katı fazda olduğu görülmektedir. Zaman ilerledikçe faz değiştiren malzeme erimeye devam etmektedir. 10. dakikaya kadar sıvı faz ile katı fazın halka tipi bir

yapı oluşturduğu, bu dakikadan sonra ise üst bölgelerin daha hızlı eriyerek u tipi bir yapı oluşturduğu gözlemlenmiştir. 17,5. dakikada ise faz değiştiren malzemenin tamamının eriyerek sıvı faza geçtiği, dolayısıyla ısı depolama sisteminin şarj işlemini tamamladığı tespit edilmiştir.

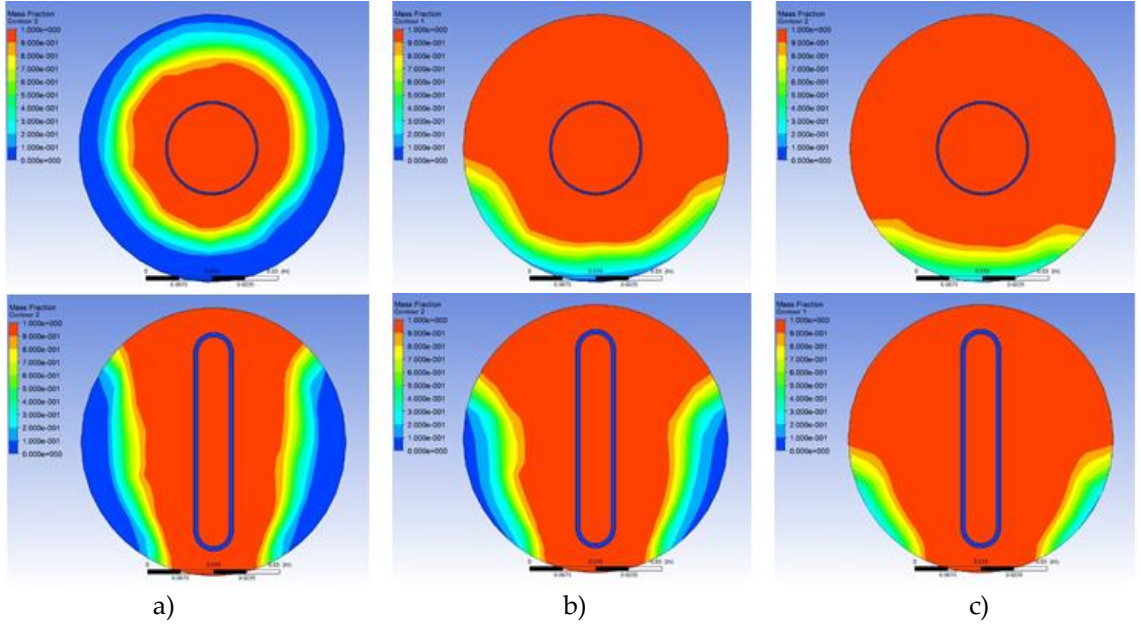


**Şekil 6.** Model-1 ve su giriş sıcaklığı 70 °C için kütle dağılımları; (a) 2,5 dk, (b) 7,5 dk, (c) 10 dk, (d) 12,5 dk, (e) 15 dk ve (e) 17,5 dk

*Figure 6. Melting distribution for Model-1 and 70°C; (a) 2.5th minute, (b) 7.5th minute, (c) 10th minute, (d) 12.5th minute, (e) 15th minute and (e) 17.5th minute.*

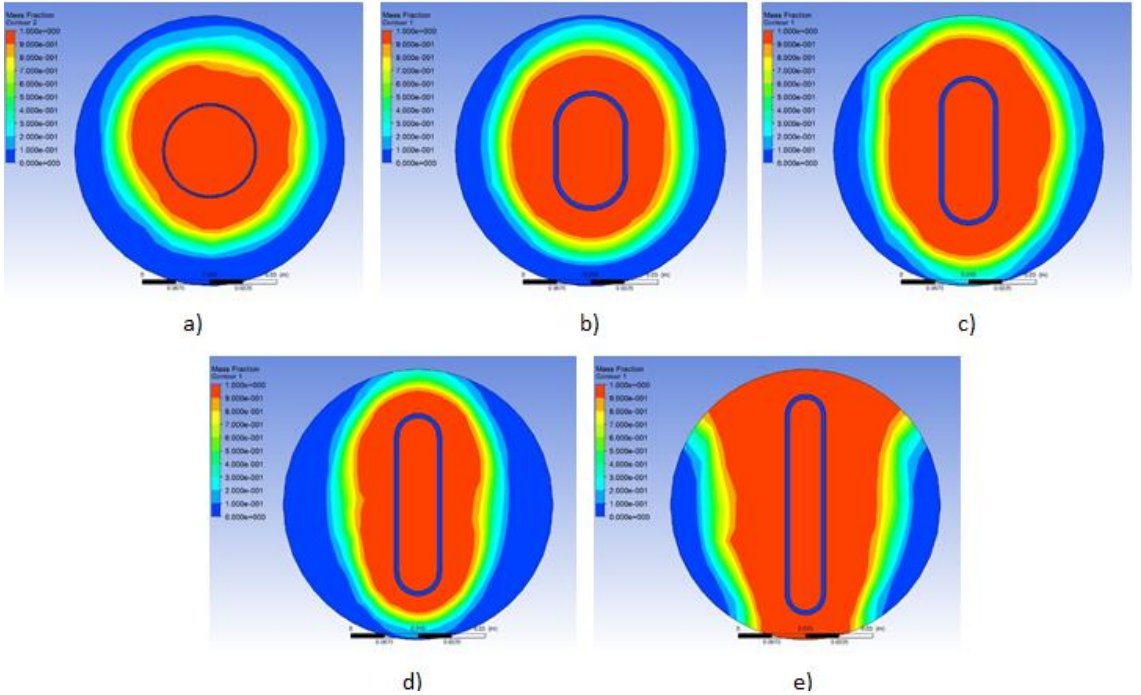
Model-1 ve Model-5 geometrilerinde 12,5. dakika için, akış yönünde geometrinin tam orta noktasında alınan bir kesitte farklı giriş sıcaklıkları için elde edilen kütle dağılımları Şekil 7’de birlikte görülmektedir. Her iki model geometride de, su giriş sıcaklığı arttıkça faz değiştiren malzemenin erime miktarının da arttığı görülmüştür. Dolayısıyla akışkan giriş sıcaklığının artışı ile galyumun erime hızının arttığı ve erime süresinin kısaldığı belirlenmiştir. Dolayısıyla akışkan giriş sıcaklığının değişmesinin, faz değiştiren malzemenin şarj olma süresini önemli ölçüde etkilediği söylenebilir.

Şekil 8’de ise su giriş sıcaklığı 75 °C ve 7,5. dakikada, akış yönünde geometrinin tam orta noktasında alınan bir kesitte farklı model geometrileri için elde edilen kütle dağılımları görülmektedir. İç borunun eliptikliği arttıkça Galyumun erime miktarı artmaktadır. Bu durumun iç borudaki eliptiklik artışı ile erime üzerinde yer çekim kaynaklı doğal konveksiyon etkilerinin artış göstermesi olduğu düşünülebilir. Ayrıca iç borunun eliptikliği arttıkça, borunun ısı transfer yüzey alanı da artış göstermektedir. Bu durum yüzeylerden gerçekleşen ısı transferi miktarını da artırmaktadır. Dolayısıyla iç borunun eliptikliğinin değişmesinin, faz değiştiren malzemenin şarj olma süresini önemli ölçüde etkilediği söylenebilir.



Şekil 7. Model-1 ve Model-5 geometrileri için 12,5. dakikadaki kütle dağılımları; (a) 65 °C, (b) 70 °C, (c) 75 °C.

Figure 7. Melting distribution for Model 1 and Model 5 at 12.5th minute; (a) 65 °C, (b) 70 °C, (c) 75 °C.

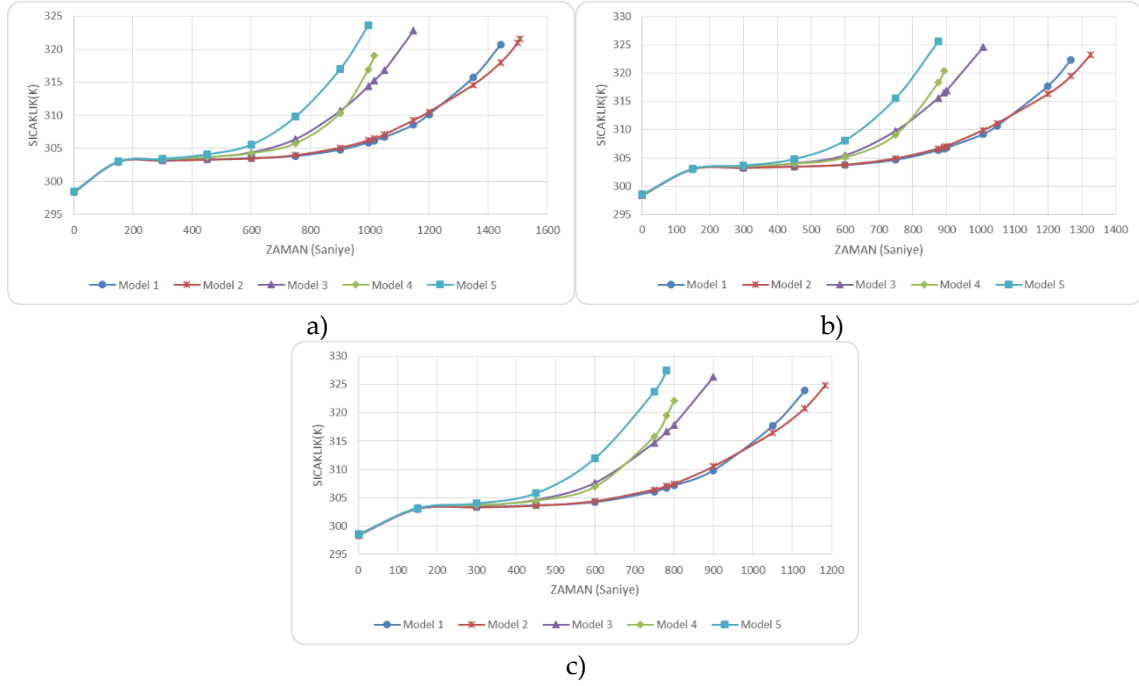


Şekil 8. Su giriş sıcaklığı 75 °C için 7,5. dakikadaki kütle dağılımları (a) Model-1, (b) Model-2, (c) Model-3, (d) Model-4 ve (e) Model-5.

Figure 8. Melting distribution for 75 °C and at 7.5th minute; (a) Model-1, (b) Model-2, (c) Model-3, (d) Model-4 and (e) Model-5)

Şekil 9'da farklı model geometrileri için faz değiştiren malzemenin ortalama sıcaklık değerinin zamana göre değişimi, farklı su giriş sıcaklıkları için birlikte verilmiştir. Şeklin şıkları birlikte incelendiğinde, tüm model geometrileri için ısı transfer akışkanının giriş sıcaklığı arttıkça, faz değiştiren malzemenin maksimum ortalama sıcaklık değerinin de arttığı görülmektedir. İlk 300 saniyelik zaman diliminde tüm model geometriler benzer bir davranış göstermektedir ve galyumun ortalama sıcaklık değerleri birbiri ile benzerdir. Ancak yaklaşık ilk 5 dakikalık süreden sonra modeller arasında farklılaşma

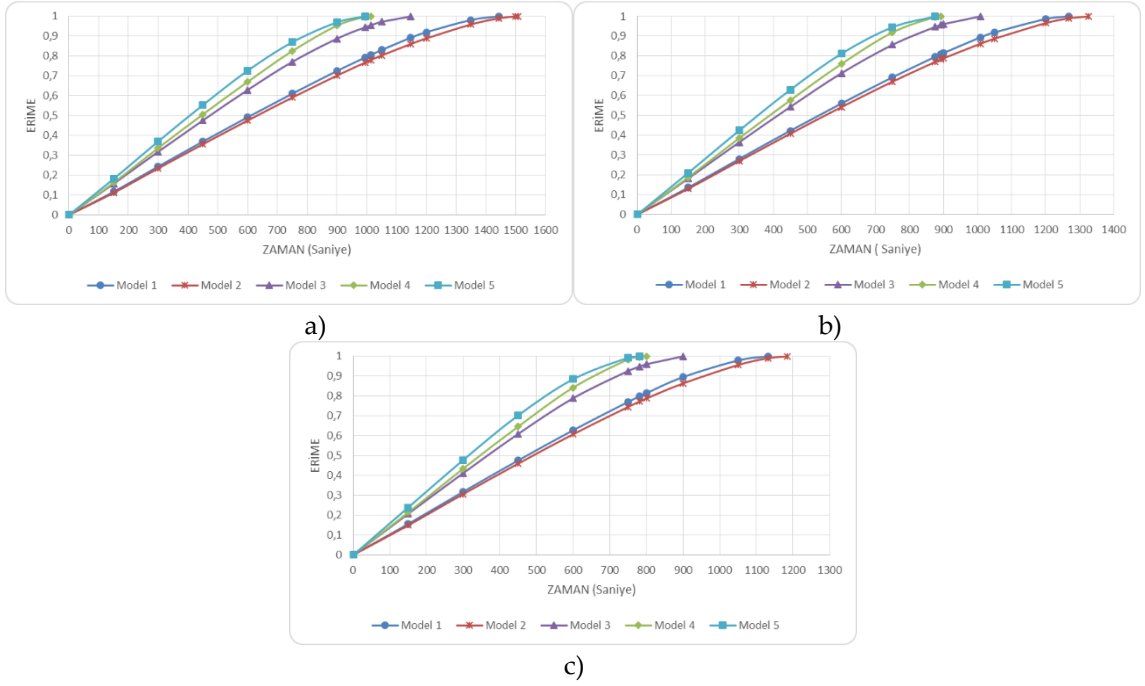
söz konusudur. Model-5 geometrisi en hızlı ısınan model olmuştur. Bu durum tüm su giriş sıcaklıkları için benzer olarak gözlemlenmiştir. Ayrıca en yüksek sıcaklık değerine de Model-5’de ulaşılmıştır. Dolayısıyla bu çalışmada ele alınan model geometriler içinden, eliptikliğin en fazla olduğu geometrinin ısı performansının diğerlerine göre daha iyi olduğu görülmüştür.



Şekil 9. Farklı model geometrileri için ortalama sıcaklığın zaman ile değişimi; (a) 65 °C, (b) 70 °C ve (c) 75°C

Figure 9. The variation of mean temperature with time for different model geometries; (a) 65 °C, (b) 70 °C and (c) 75°C

Şekil 10’da ise farklı model geometrileri için faz değişim malzemesinin erime oranının zamana göre değişimi, farklı su giriş sıcaklıkları için birlikte verilmiştir. İlgili şekilde verilen eğriler, galyumun erimesinin %100 gerçekleştiği duruma kadar yapılan analizlerin sonuçlarını içermektedir. Her model ve sıcaklık değerinde galyumun %100 erimesi için geçen süre farklılık göstermesinden dolayı, şekilde verilen eğrilerin uzunluğu farklılık göstermektedir. İncelenen tüm model geometriler için, su giriş sıcaklığının artışıyla erime süresinin kısaldığı görülmektedir. Şekil incelendiğinde, tüm su giriş sıcaklıkları için Model-5 geometrisinin en hızlı eriyen model olduğu görülmüştür. Su giriş sıcaklığı 65 °C olduğu durumda, dairesel iç boruya sahip olan Model-1’de galyumun %100 erimesi yaklaşık olarak 1500 saniye sürerken, eliptikliğin en fazla olduğu Model-5’de ise yaklaşık 1000 saniye sürmektedir. İç borunun eliptikliğin artırılmasının erimeyi hızlandırarak, erime süresinin yaklaşık %33 kısılmasına neden olduğu belirlenmiştir. Benzer durum diğer su giriş sıcaklıkları için de gözlemlenmiştir. Dolayısıyla iç borunun eliptikliğin artırımının, faz değiştiren malzemenin daha hızlı erimesini sağlayarak ısı depolayan sistemin daha hızlı şarj olabilmesine katkı sağladığı söylenebilir.



Şekil 10. Farklı model geometrileri için erime yüzdesinin zaman ile değişimi; (a) 65 °C, (b) 70 °C ve (c) 75 °C

Figure 10. Variation of melting percentage with time for different model geometries; (a) 65 °C, (b) 70 °C and (c) 75 °C

## SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışma kapsamında, bir ısı depolama sisteminde faz değiştiren madde olarak Galyum kullanılması sayısal olarak ele alınmıştır. Bu kapsamda, kullanılan ısı değiştiricisinin iç borusunun eliptikliği değiştirilerek 5 adet farklı model geometrisi oluşturulmuştur. Bu model geometriler kullanılarak farklı su giriş sıcaklıkları için analizler yapılmıştır. Bu analizlerden elde edilen sonuçlar kullanılarak, problemin sıcaklık ve erime dağılımları belirlenmiştir.

Çalışmanın sonucunda, su giriş sıcaklığı arttıkça galyumun erime hızının arttığı ve erime süresinin kısaldığı belirlenmiştir. Bu kapsamda, akışkan giriş sıcaklığının 65 °C'den 75 °C'ye çıkarılması ile, Model-1 ve Model-5'in erime süreleri sırasıyla %21,53 ve %20,60 kısalmıştır. Dolayısıyla akışkan giriş sıcaklığının değişmesinin, faz değiştiren malzemenin şarj olma süresi üzerinde önemli bir etki sağladığı görülmüştür. İç borunun eliptikliği arttığında ise faz değiştiren malzemenin ortalama sıcaklığının arttığı, buna karşılık suyun ortalama sıcaklığının ise azaldığı gözlemlenmiştir. Bu durum galyumun erime hızının artmasına sebep olmuştur. Dolayısıyla iç borunun eliptikliğinin değişmesinin, faz değiştiren malzemenin şarj olma süresini etkilediği gözlemlenmiştir. Çalışılan parametre aralığında en iyi ısı performans eliptikliğinin en fazla olduğu Model-5'te elde edilmiştir. Bu kapsamda, Model 5 in erime süresi Model-2'ye oranla, akışkan giriş sıcaklığı 65 °C, 70 °C ve 75 °C olduğu durumlarda sırasıyla %34,06, %33,92 ve %30,91 kadar kısalmıştır. Sonuç olarak, faz değiştiren malzeme olarak galyum kullanılan bir ısı depolama sistemi tasarımında, su giriş sıcaklığının ve iç borunun eliptiklik oranının ısı performansını etkileyen önemli parametreler olduğu görülmüştür.

## KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Assis, E., Katsman, L., Ziskind, G., Letan, R., 2007, "Numerical and experimental study of melting in a spherical Shell", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 50, No. 9–10, pp. 1790-1804.
- Bazai, H., Moghimi, M.A., Mohammed, H.I., Babaei-Mahani, R., Talebizadehsardari, P., 2020, "Numerical study of circular-elliptical double-pipe thermal energy storage systems", *Journal of Energy*

- Storage, Vol. 30, 101440.
- Benbrika, M., Teggar, M., Benbelhout, M., Ismail, K.A.R., Bouabdallah, S., 2021, "Effect of orientation of elliptic tube on the total melting time of latent thermal energy storage systems", *Journal of Thermal Engineering*, Vol. 6, No. 7, pp. 1479-1488.
- Bouhal, T., Fertahi, S.D., Kousksou, T., Jamila, A., 2018, CFD thermal energy storage enhancement of PCM filling a cylindrical cavity equipped with submerged heating sources", *Journal of Energy Storage*, Vol. 18, pp. 360-370.
- Cao, X., Yuan, Y., Xiang, B., Haghighat, F., 2018, "Effect of natural convection on melting performance of eccentric horizontal shell and tube latent heat storage unit", *Sustainable Cities and Society*, Vol. 38, pp. 571-581.
- Darzi, A.A.R., Jourabian, M., Farhadi, M., 2016, "Melting and solidification of PCM enhanced by radial conductive fins and nanoparticles in cylindrical annulus", *Energy Conversion and Management*, Vol. 118, pp. 253-263
- Deng, S., Nie, C., Wei, G., Ye, W.B., 2019, "Improving the melting performance of a horizontal shell-tube latent-heat thermal energy storage unit using local enhanced finned tube", *Energy and Buildings*, Vol. 183, pp. 161-173.
- Eisapour, A.H., Eisapour, M., Mohammed, H.I., Shafaghat, A.H., Ghalambaz, M., Talebizadehsardari, P., 2021, "Optimum design of a double elliptical latent heat energy storage system during the melting process", *Journal of Energy Storage*, Vol. 44, No. A, 103384.
- Eisapour, M., Eisapour, A.H., Shafaghat, A.H., Mohammed, H.I., Talebizadehsardari, P., Chen, Z., 2022, "Solidification of a nano-enhanced phase change material (NePCM) in a double elliptical latent heat storage unit with wavy inner tubes", *Solar Energy*, Vol. 241, pp. 39-53.
- Ghafoor, A.N.A., ve Mussa, A., 2020, "Numerical study of a thermal energy storage system with different shapes inner tubes", *Journal of Mechanics of Continua and Mathematical Sciences*, Vol. 15, No. 4, pp. 21-35.
- Jourabian, M., Darzi, A.A.R, Akbari, O.A., Toghraie, D., 2020, "The enthalpy-based lattice Boltzmann method (LBM) for simulation of NePCM melting in inclined elliptical annulus", *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, Vol. 548, 123887.
- Ji, C., Qin, Z., Low, Z., Dubey, S., Choo, F.H., Duan, F., 2018, "Non-uniform heat transfer suppression to enhance PCM melting by angled fins", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 129, pp. 269-279.
- Longeon, M., Soupart, A., Fourmigué, J.F., Bruch, A., Marty, P., 2013, "Experimental and numerical study of annular PCM storage in the presence of natural convection", *Applied Energy*, Vol. 112, pp. 175-184.
- Pahamli, Y., Hosseini, M.J., Ranjbar, A.A., Bahrapoury, R., 2016, "Analysis of the effect of eccentricity and operational parameters in PCM-filled single-pass shell and tube heat exchanger", *Renewable Energy*, Vol. 97, pp. 344-357.
- Park, S.Y, Park, Y.G., Park, S.H., Ha, M.Y., 2021, "Numerical study and multilayer perceptron-based prediction of melting process in the latent heat thermal energy storage system with a finned elliptical inner cylinder", *Journal of Energy Storage*, Vol. 42, 103008.
- Punniakodi B.M.S. ve Senthil, R., 2021, "A review on container geometry and orientations of phase change materials for solar thermal systems", *Journal of Energy Storage*, Vol. 36, 102452.
- Rana, S., Zunaid, M., Kumar, R., 2022, "CFD analysis for heat transfer comparison in circular, rectangular and elliptical tube heat exchangers filled with PCM", *Materials Today: Proceedings*, Vol. 56, No. 2, pp. 637-644.
- Shin, D.H., Park, J., Choi, S.H., Ko, H.S., Karng, S.W., Shin, Y., 2019, "A new type of heat storage system using the motion of phase change materials in an elliptical-shaped capsule", *Energy Conversion and Management*, Vol. 182, pp. 508-519.
- Tao, Y.B., Liu, Y.K., He, Y.L., 2017, "Effects of PCM arrangement and natural convection on charging and discharging performance of shell-and-tube LHS unit", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 115, No. B, pp. 99-107.

- Wang, P., Yao, H., Lan, Z., Peng, Z., Huang, Y., Ding, Y., 2016, "Numerical investigation of PCM melting process in sleeve tube with internal fins", *Energy Conversion and Management*, Vol. 110, pp. 428-435.
- Yazici, M.Y., Avci, M., Aydin, O., Akgun, M., 2014, "On the effect of eccentricity of a horizontal tube-in-shell storage unit on solidification of a PCM", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 64, No. 1-2, pp. 1-9.