



EGZOZ GAZLARINI KULLANAN TERMAL ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMİNDE RT35 PARAFİN MUMUNUN ERİME VE KATILAŞMA SÜREÇLERİNİN SAYISAL ANALİZİ

Habib GÜRBÜZ^{1*}, Durukan ATEŞ²

¹Department of Automotive Engineering, Faculty of Engineering, Süleyman Demirel University, ISPARTA

²Graduate School of Natural and Applied Sciences, Süleyman Demirel University, ISPARTA

Anahtar Kelimeler	Öz
<i>Termal Enerji Depolama, Egzoz Atık Isı Geri Dönüşümü, Parafin Mumu, Buji Ateşlemeli Motor.</i>	<p>Bu çalışmada buji ateşlemeli bir motorunun egzoz atık ısı enerjisinin geri kazanımı için tasarlanan termal enerji depolama (TED) sisteminin erime ve katılaşma süreçlerinin sayısal analizleri gerçekleştirilmiştir. TED sisteminde termal enerjiyi gizli ısı olarak depolayan ve ticari olarak RT35 koduyla tanımlanan parafin mumu faz değişim malzemesi (FDM) olarak kullanılmıştır. TED sistemi için iki ısı eşanjöründen oluşan iki kapalı devre sıvı sirkülasyon sistemi tasarlanmıştır. Isı eşanjörlerinden ilki, atık ısı geri kazanımı için buji ateşlemeli motorunun egzoz yoluna, diğeri ise FDM kabında atık ısı enerjisinin şarjı ve boşaltılması için kullanıldı. FDM kabı içerisinde, RT35'in erime ve katılaşma süreçlerinde kullanılmak üzere serpantin tipi iki adet ısı eşanjörü iç içe konumlandırılmış. Sayısal analizlerde, tek silindirli ve buji ateşlemeli bir motorda gerçekleştirilen deneysel çalışmadan elde edilen egzoz gazının sıcaklık ve debi değeri kullanılmıştır. Sayısal analizler sonucunda, tasarlanan gizli ısı TED sistemi ve kabul edilen sınır şartları altında RT35'in erime işlemi 13375.sn'de %98 sıvı oranına ulaşarak 1136 kJ'ün gizli ısı enerjisi olarak depolanabildiği, katılaşma işlemi ise 49775.sn'de %18 sıvı oranı ile 945 kJ'lük enerjisinin geri salınabildiği tespit edilmiştir.</p>

NUMERICAL ANALYSIS OF MELTING AND SOLIDIFICATION PROCESSES OF RT35 PARAFIN WAX IN THERMAL ENERGY STORAGE SYSTEM USING EXHAUST GASES

Keywords	Abstract
<i>Thermal Energy Storage, Exhaust Waste Heat Recovery, Paraffin Wax, Spark Ignition Engine.</i>	<p>In this paper, a numerical analysis of the melting and solidification processes of the thermal energy storage (TES) system designed for the exhaust waste heat recovery of a spark-ignition engine was performed. Paraffin wax, which stores thermal energy as latent heat and is commercially identified with the code RT35, is used as phase change material in the thermal energy storage (TES) system. Two closed-loop fluid circulation system was designed consisting, two heat exchangers for the TES system. The first of the heat exchangers were used to the exhaust path of the SI engine for waste heat recovery, and the other was used for charging and discharging waste heat energy in the PCM container. In the PCM container, two serpentine type heat exchangers are positioned one inside the other to be used in the melting and solidification processes of the RT35. In the numerical analyses, the experimental exhaust gas temperature and flow rate values of a single-cylinder SI engine were used. As a result of the numerical analysis, it has been determined that 1136 kJ energy can be stored as latent heat energy in the PCM container at 13375 sec by 98% liquid fraction, while in the heat discharge process, 945 kJ of energy can be released at 49775 sec by 18% liquid fraction.</p>

Alıntı / Cite

Gürbüz, H., Ateş, D., (2021). Egzoz Gazlarını Kullanan Termal Enerji Depolama Sisteminde RT35 Parafin Mumunun Erime ve Katılaşma Süreçlerinin Sayısal Analizi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi,9(2), 520-534.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

H. Gürbüz, 0000-0001-5157-6227
D. Ateş, 0000-0002-6604-7384

Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date	03.01.2021
Revizyon Tarihi / Revision Date	15.02.2021
Kabul Tarihi / Accepted Date	21.05.2021
Yayın Tarihi / Published Date	20.06.2021

* İlgili yazar/Corresponding author: habibgurbuz@sdu.edu.tr, +90-246-211-1867

1. Giriş (Introduction)

Konvansiyonel fosil kökenli yakıtlar ile çalışan içten yanmalı motorlarda (İYM) yakıtın ısı enerjisinin, buji ateşlemeli motorlarda \approx %25-28'lik kısmı çıkış milinde mekanik enerjiye dönüştürülürken \approx %17-26'lik kısmı soğutma sisteminde, \approx %36-50'lik kısmı egzoz gazlarıyla ve \approx %3-10'lik kısmı radyasyon, mekanik sürtünme ve yardımcı sistemlere harcanan güç olarak kaybedilmektedir. Sıkıştırma ile ateşlemeli dizel motorlarda ise, yakıtın ısı enerjisinin %34-38'lik kısmı çıkış milinde mekanik enerjiye dönüştürülürken, \approx %16-35'lik kısmı soğutma sisteminde, \approx %23-37'lik kısmı egzoz gazlarıyla ve \approx %2-6'lik kısmı radyasyon, mekanik sürtünme ve yardımcı sistemlere harcanan güç olarak kaybedilmektedir (Moran vd., 2010). İYM'larda egzoz ve soğutma sistemi ile kaybedilen atık ısı enerjisinin geri kazanılarak motorun veya taşıtın ihtiyacında kullanılabilmesi için günümüzde birçok çalışma yapılmaktadır. Bu çalışmalarda, termoelektrik, piezoelektrik, termioyonik ve termo fotovoltaiik jeneratörler gibi sistemler kullanılarak atık ısı enerjisinin direk olarak elektrik enerjisine dönüştürülmesi mümkün olduğu gibi, Rankine ve Stirling çevrimlerini kullanılarak dolaylı olarak güç üreten sistemler kullanılmaktadır (Rahman vd., 2015; Hoseini vd., 2017, Topalci vd., 2020). Bunların dışında, egzoz gazlarının atık ısı enerjisini depolanarak taşıt kabini, katalitik konvertör, taşıt ya da İYM'a ait diğer donanımlarının ısıtılması ile sistem verimliliğinin artırıldığı termal ısı depolama (TED) sistemlerinin kullanılması üzerine araştırmalar yapılmaktadır (Mollenhauer vd., 2018; Gürbüz ve Ateş, 2020). TED sistemlerinde, yüksek gizli ısı entalpisine sahip faz dönüşüm malzemeleri (FDM) kullanılarak atık ısı enerjisinin depolanması ve gerektiğinde faz dönüşümü ile depolanan ısı enerjisinin yeniden kullanılabilmesi mümkün olabilmektedir (Karasu ve Dincer, 2018; Wu vd., 2018). TED sistemlerinde, dış ortamdan alınan ısı enerjisi FDM'nin katı fazdan sıvı faza dönüşümü sırasında artan iç enerjisi yarımıyla depolanmaktadır. Sıvı faza geçen FDM, katılaşma sırasında iç enerjinde depoladığı ısı enerjisini dış ortama bırakarak tekrardan katı faza geçmektedir (Fleischer, 2015; Liu vd., 2020). TED sistemlerinde parafin mumları, hidratlanmış tuzlar, organik ve inorganik bileşikler gibi çeşitli erime sıcaklıklarına sahip çok çeşitli FDM malzemeleri kullanılmaktadır (Ebadi vd., 2018). TED sistemlerinde FDM olarak parafinler yaygın olarak kullanılmaktadır. C_nH_{2n+2} genel kimyasal formülüne sahip parafinler, düz zincirli hidrokarbon yapısına sahiptir ve karbon sayılarının artışına bağlı olarak erime-katılaşma sıcaklıkları ve gizli ısı entalpileri artmaktadır. Yüksek gizli ısı entalpisine sahip olan parafinler, iyi ısı ve kimyasal kararlılığa sahip olmalarının yanında zehirli veya aşındırıcı olamamaları gibi avantajlara sahiptir (Sharma vd., 2009). Parafinler, yüksek gizli ısı entalpileri nedeniyle ısı enerjisinin uzun süre depolanmasına olanak sağlarlar. Ancak, düşük ısı iletim katsayısına sahip olmaları nedeniyle ısı transferi açısından dezavantajlıdır (Tiari vd., 2015). Bu nedenle, FDM olarak parafinlerin kullanıldığı TED sistemlerinde, ısı iletim katsayısının iyileştirilmesi için farklı kanat geometrisi, yapısı ve sayılarına sahip eşanjörler kullanılarak ısı tutma kapasitesi ve faz dönüşüm süresinin kısaltılması mümkündür. Ayrıca, parafinlere farklı metallerin, elementlerin ve nano partiküllerin katılması ile ısı iletim katsayısını artırmaya yönelik birçok çalışma yapılmıştır (Mahdi vd., 2018; Mahdi vd., 2019). Bu konuda, yürütülen teorik çalışmalarda genellikle Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) kullanılarak sayısal analizleri yapılmaktadır. HAD analizleri sayısal olarak tanımlanan sıvı ve gaz akışkan yapıdaki malzemelerin katı yüzeyler ile etkileşimleri, ısı transferi, kütle transferi, kimyasal reaksiyon gibi durumların bilgisayar yardımıyla sayısal olarak çözülmesine olanak sağlamaktadır (Scupi, 2016). John ve Subramanian (2019) sıkıştırma ile ateşlemeli bir sabit tesis dizel motorun 1500 d/d motor devrinde, egzoz gazlarının ısı enerjisinin kullanıldığı 8417 kJ ısı enerjisi depolama kapasitesine sahip TED sistemi ile gerçekleştirdikleri deneysel çalışmalarda, motorun tam yükünde 1,55 kW, %75 motor yükünde 1,07 kW, %50 motor yükünde 0,77 kW ve %25 motor yükünde 0,56 kW'lık ısı enerjisini depolayabildikleri. Kauranene vd. (2010), sıkıştırma ile ateşlemeli bir dizel motorun 0 °C'ın altındaki soğuk iklim koşullarında ortaya çıkan yüksek egzoz emisyonları ve düşük motor performansını iyileştirmek için egzoz atık ısı enerjisinin FDM ile depolandığı TED sistemini kullanılarak motora ön ısıtma uygulamışlardır. Gerçekleştirdikleri deneysel çalışmalarda, FDM ile 2500 kJ'lük ısı enerjinin 45 dakika içerisinde depolandığını ve 15 dakika içerisinde deşarj edilerek motorun soğuk havalarda ısıtılabilmesini tespit etmişlerdir. Pandiyarajan vd. (2011), İYM'un egzoz yoluna bağlanan kabuk ve kanatlı boru tip eşanjörler ile egzoz atık ısı enerjisinin depolandığı TED sistemi üzerine deneysel çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada, gizli ısı ve hissedilir ısı depolarını birleştiren silindirik FDM kapsüllerini kullanan bir TED sistemi tasarlamışlardır. Sonuç olarak, birleştirilmiş TED sistemi ile motora alınan yakıtın ısı enerjisinin yaklaşık %10-15'nin FDM'de depolanabildiğini tespit etmişlerdir. Oró vd. (2016), tipik bir aracın tavanına yerleştirilen FDM'nin kullanıldığı TED sistemi ile soğuk iklim şartlarında araç kabinin ısıtılmasını amaçlayan bir deneysel çalışma gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada, FDM'de ısı depolama için güneş ve ortam ısısını kullanan bir TED sistemi tasarlamışlardır. Gerçekleştirdikleri deneysel çalışmalar sonucunda, aracın toplam kabin hacminin yalnızca %0,22'lik kısmına FDM kullanan TED sistemini yerleştirerek yolcuların yaz ve kış şartlarında konforunun artırabileceğini tespit etmişlerdir. Kant vd. (2018) dögüsel olarak ısıtılan FDM'nin erime ve katılaşma davranışlarını HAD yöntemini kullanarak sayısal olarak incelemişlerdir. HAD analizlerinde, FDM'nin erime ve katılaşma süreci boyunca hız dağılımı, sıvı oranı, sıcaklık dağılımı ve ısı enerjisi değişimini gözlemlemişlerdir. HAD sayısal analizler sonucunda, erime süresinin değişken ısı akışı ile azaldığı, erime süresinin katılaşma süresine göre daha kısa sürdüğünü tespit etmişlerdir. Bouhal vd. (2018), silindirik geometrideki kabin içerisine doldurulan FDM'nin erime işleminin 2 boyutlu HAD modeli ile sayısal analizlerini yapmışlardır. Yapılan HAD analizleri sonucunda, ısı kaynağı geometrisine eklenen kanatlar ile ısı transferi

özelliğinin iyileştirilerek erime süresinin 18,35 dakikadan 13,55 dakikaya düşürülebileceğini tespit etmişlerdir. İncelenen çalışmalar, atık ısı enerjisinin bir kısmının PCM kullanan TED sistemlerinde depolanarak faydalı enerjiye dönüştürülebildiği görülmektedir. Ancak, şarj/deşarj süresi, faz değişim kabiliyeti ve ısı iletkenlik gibi parametrelerin optimizasyonu açısından uygun FDM'nin seçimi ve TED sisteminin tasarımı üzerinde ek deneysel ve sayısal çalışmalara ihtiyaç vardır. Bu çalışmada, buji ateşlemeli bir motorunun egzoz atık ısı enerjisini depolamak ve yeniden kullanmak için FDM olarak ticari olarak RT35 koduyla tanımlanan parafin mumu kullanan bir TED sistemi tasarlanmıştır. TED sisteminde erime ve katılaşma süreçleri için zamana bağlı HAD analizleri gerçekleştirilmiştir. HAD analizlerinde RT35'in erime ve katılaşma kabiliyeti; ısı akışı, sıcaklık, sıvı oranı ve ısı enerjisi değişiminin zamana bağlı sayısal veriler ve kontur görüntüleri ile incelenmiştir.

2. Materyal ve Metot (Material and Method)

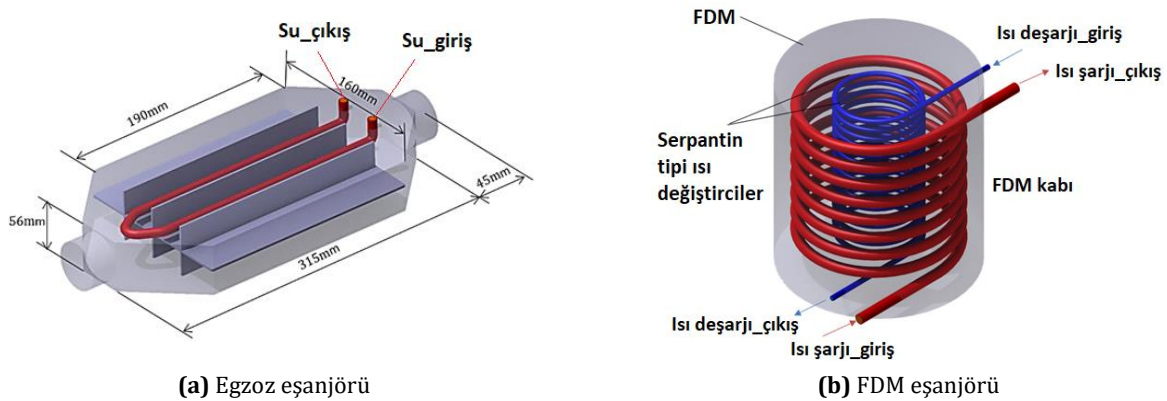
Bu çalışmada buji ateşlemeli bir motorunun egzoz atık ısı enerjisinin geri kazanmak için bir TED sistemi tasarlanmıştır. TED sisteminde, FDM'nin katı-sıvı faz dönüşümü ve sıvı-katı faz dönüşümü işlemleri ile gerçekleşen gizli ısı termal enerji depolama ve salınımının proseslerinin zamana bağlı sayısal analizleri gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, gizli ısı termal enerji depolama ve salınım işlemlerinde, FDM olarak piyasada RT35 koduyla tanımlanan parafin mumu kullanılmıştır. RT35'in termo-fiziksel özellikleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo1. RT35'in termo-fiziksel özellikleri (Thermophysical properties of RT 35) [Yang vd., 2016; Sunku vd., 2020; Shamsavar vd., 2020]

Termo-fiziksel özellik	Katı /Sıvı
Yoğunluk (kg/m ³)	880/770
Dinamik viskozite (Pa.s)	0.023
Spesifik ısı (c _p) - (kJ/kgK)	1,8 /2,4
Isı iletim katsayısı (W/mK)	0,2/0.1
Gizli füzyon ısı (kJ/kg)	157
Isıl genleşme katsayısı (K ⁻¹)	0,0006
Sıcaklık (K) Katılaşma/Erime	302/309

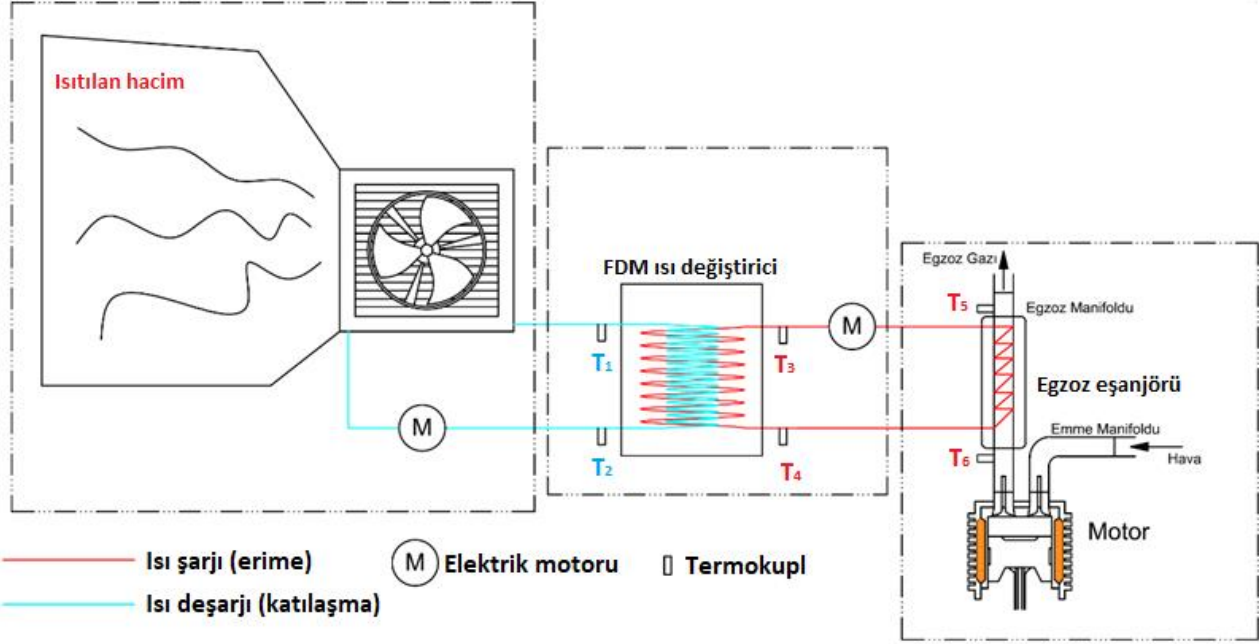
2.1. TED sisteminin tasarımı

FDM'nin ısı şarj ve ısıdeşarj proseslerinin sayısal olarak analiz edilebilmesi için 2 ısı eşanjöründen oluşan bir tasarım gerçekleştirilmiştir. Isı eşanjörlerinden birincisi, motorun egzoz atık ısı enerjisinin bir kısmının aracı akışkana aktarılabilmesi için içerisinden egzoz gazlarının geçtiği 190x160x56 mm dikdörtgen prizma yapıya sahip egzoz susturucusundan oluşmaktadır. Dikdörtgen prizma egzoz susturucusu, giriş ve çıkışında 62,5 mm uzunluklara sahip bir yayıcı ve lüle yardımıyla motorun egzoz hattına 45 mm dış çapa sahip giriş-çıkış boruları ile bağlanmaktadır. Susturucu içerisine U şeklinde bükülmüş 7 mm dış çapa sahip bakır boru egzoz akışı boyunca konumlandırılarak "egzoz eşanjörü" oluşturulmuştur. İkinci ısı eşanjörü, içerisinden FDM'nin depolandığı 230 mm çapa, 210 mm yüksekliğe ve 8395 cm³ iç hacmine sahip silindirik bir kaptan (FDM kabı) oluşmaktadır. FDM kabı içerisinden, RT35'in erime ve katılaşma proseslerinin gerçekleştirilebilmesi için iç içe geçmiş 2 adet serpantin tipi ısı eşanjörü yerleştirilmiştir. 150 mm helis uzunluğu ve çapına sahip, 8 adet helezon halkasından oluşan dış serpantin tipi ısı eşanjörü, 10 mm dış çapa sahip bakır borudan tasarlanarak FDM'nin eritme prosesinde kullanılmıştır. 150 mm helis uzunluğu, 75 mm helis çapı ve 16 adet helezon halkasından oluşan iç serpantin tipi ısı eşanjörü, 7 mm dış çapa sahip bakır borulardan tasarlanarak FDM'nin katılaşma prosesinde kullanılmıştır. Böylece, "FDM eşanjörü" oluşturulmuştur. Egzoz ve FDM eşanjörlerinin katı model resimleri Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Egzoz ve FDM eşanjörlerinin katı model resmi (Solid model drawing of exhaust and FDM heat exchangers)

Egzoz atık ısı enerjisinin FDM kabında depolanması ve depolanan ısı enerjisinin ısıtılacak ortama aktarılabilmesi için 2 adet kapalı devre sıvı dolaşım sistemi tasarlanmıştır. Egzoz eşanjörü içerisinde konumlandırılan U şeklindeki bakır boru ile FDM kabı içerisindeki dış serpantin tipi ısı eşanjörü arasında oluşturulan kapalı devre sıvı dolaşım sistemi ile egzoz atık ısı enerjisinin bir kısmı RT35'in erime sürecinde kullanılarak gizli ısı enerjisi olarak depolanmıştır. FDM kabı içerisindeki iç serpantin tipi ısı değiştirici ile RT35'de gizli ısı olarak depolanan termal enerjinin ısıtılacak ortama aktarılabilmesi için ikinci kapalı devre sıvı dolaşım sistemi oluşturulmuştur. Her iki sıvı dolaşım sisteminde ısı taşıyıcı aracı akışkan olarak su kullanılmış ve suyun bir elektrikli pompa yardımıyla dolaştırılması sağlanmıştır. Tasarlanan TED sisteminin şematik yapısı Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2. Tasarlanan TED sisteminin şematik yapısı (Schematic structure of the designed TED system)

Sayısal analizlerde, kapalı devre sıvı sirkülasyon sisteminde su sıcaklığını döngüsel olarak hesaplayabilmek için "Kullanıcı Tanımlı Fonksiyon (UDF) kodu geliştirilmiştir. Bu kodda, ilk adım başlangıç sınır değerleri kullanılarak hesaplanarak ilk adımın sonunda $Su_{\text{çıkış}}$ ve $Isı\ şarjı_{\text{çıkış}}$ 'larındaki ortalama sıcaklık değerleri kaydedilmiştir. Bir sonraki zaman adımının başlangıcında, " $Su_{\text{çıkış}}$ " yüzeyinden alınan sıcaklık değeri " $Isı\ şarjı_{\text{giriş}}$ " yüzeyine ve " $Isı\ şarjı_{\text{çıkış}}$ " yüzeyinden alınan sıcaklık değeri " $Su_{\text{giriş}}$ " yüzeyine taşınır. Bu döngüsel hesaplama sayısal analiz tamamlanana kadar adım adım devam etmektedir.

2.2. Yönetim Denklemleri (Government Equations)

Sayısal analizler, üç boyutlu zamana bağlı türbülanslı akış modeli kullanılarak gerçekleştirildi. Sunulan yönetim denklemleri, ANSYS-Fluent 14.5 yazılımı ile hesaplamalı akışkanla mekaniği (HAD) kullanılarak zamana bağlı olarak çözüldü. Ayrıca ANSYS-Fluent 14.5 yazılımının "Kullanım Kılavuzu" Denklem 1-12 ve açıklamalarında kullanılmıştır (ANSYS FLUENT, 2014). Zamana bağlı sayısal çözümlemede, film zamanını aynı fiziksel akış süresine iletirmek için film alt-zaman adımlarının sayısı kullanıldı ve film alt-zaman adımı Denk.1'de belirtilen "Transient equation" ile hesaplandı.

$$\Delta t = \frac{\Delta t_{flow}}{N_{film}} \quad (1)$$

Burada, Δt_{flow} akış zamanı adımlarıdır ve N_{film} film zaman adımlarının sayısıdır. Sıkıştırılmayan akışların yanı sıra sıkıştırılabilir akışlar için kütle korunumunu yansıtan genel "Süreklilik denklemi" Eşitlik 2'deki gibi ifade edilebilir.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = S_m \quad (2)$$

Burada S_m kullanıcı tarafından tanımlanmış kaynaklardan veya 2. farklı fazın olduğu durumda bir fazdan diğer faza (sıvı fazdan gaz fazına geçiş gibi) eklenen kütle, ρ yoğunluk ve \vec{v} hız vektörüdür.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla(\bar{\tau}) + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (3)$$

Burada, \vec{v} hız vektörü, p statik basıncı, $\bar{\tau}$ gerilme tensörünü, $\rho \vec{g}$ yerçekimi vücut kuvvetini ve \vec{F} dış gövde kuvvetlerini belirtir. Gerilme tensörü ($\bar{\tau}$) HAD analizlerinde Eşitlik 4 ile hesaplanmaktadır.

$$\bar{\tau} = \mu \left[(\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{v} I \right] \quad (4)$$

Burada, μ moleküler viskoziteyi, I birim tensörünü ve sağdan ikinci terim (2/3) hacim genişlemesinin etkisini gösterir. Katılma ve sıvılaştırma analizlerinde, peltemsi bölgenin azalmış gözenekli yapısını hesaba katmak için Eşitlik 5'te tanımlanan modifiye "Momentum denklemi" kullanılmıştır.

$$S = \frac{(1-\beta)^2}{(\beta^3 + \varepsilon)} A_{mush} (\vec{v} - \vec{v}_p) \quad (5)$$

Burada, β sıvı oranıdır. ε sıfır ile bölünmeyi önleyen çok küçük bir sayıdır. A_{mush} peltemsi bölge sabitidir ve 10^{-5} olarak tanımlanmıştır (Yang and Wang, 2012). \vec{v} ve \vec{v}_p katılma malzemenin alan dışına çekilmesinden dolayı değişen katı hızlarıdır ve ayrıca çekme hızı olarak ta adlandırılır. Enerji denklemi Eşitlik 6 ile tanımlanabilir.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot (\vec{v}(\rho E + p)) = \nabla \cdot \left(k_{eff} \nabla T - \sum_j h_j \vec{J}_j + (\bar{\tau}_{eff} \cdot \vec{v}) \right) + S_h \quad (6)$$

Burada, ρ yoğunluktur, E toplam enerjidir, \vec{v} hız vektörüdür, $\bar{\tau}_{eff}$ gerilme tensörüdür, k_{eff} efektif ısı iletim katsayısıdır, \vec{J}_j , j türlerinin difüzyon akısıdır ve h_j , j türünün entalpisidir. S_h , kimyasal reaksiyon ve/veya tanımlanan başka bir ısı kaynağı tarafından üretilen ısıdır. Malzemenin toplam ısı içeriği veya malzemenin entalpi (H), hissedilebilir ısı (ΔH) ve gizli ısı (h) toplamı ($H = h + \Delta H$) olarak hesaplanır. Gizli ısı (h) Eşitlik 7 ile tanımlanır.

$$h = h_{ref} + \int_{T_{ref}}^T c_p dT \quad (7)$$

Burada, h_{ref} referans entalpisini, T_{ref} referans sıcaklığını, c_p sabit basınçtaki özgül ısıyı tanımlamaktadır. Eşitlik 7'de kullanılan katılma ($T_{solidus}$) ve sıvılaşma ($T_{liquidus}$) sıcaklığa bağlı olarak belirlenen sıvı oranı HAD analizlerinde malzemenin sıvı/katı oranını belirten sıvı oranı β ile tanımlanırsa;

$$\begin{aligned} \beta &= 0 \text{ ise } T < T_{solidus}, \\ \beta &= 1 \text{ ise } T < T_{liquidus} \\ \beta &= \frac{T - T_{solidus}}{T_{liquidus} - T_{solidus}} \text{ ise } T_{solidus} < T < T_{liquidus} \end{aligned} \quad (8)$$

Burada, β sıvı oranıdır, $T_{solidus}$ katılma sıcaklığını ve $T_{liquidus}$ sıvılaşma sıcaklığının tanımlamaktadır. Gizli ısı içeriği (ΔH), bir L tipinde malzemenin gizli ısı değerine göre $\Delta H = \beta L$ olarak formüle edilebilir. ΔH , sıfır (katı için) ve L (sıvı için) arasında bir değer alabilir. Böylece, faz değişiminin meydana geldiği FDM analizleri için Eşitlik 6'nın modifiye edilmiş bir formu olan Eşitlik 9 elde edilir.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho H) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} H) = \nabla \cdot (k \nabla T) + S \quad (9)$$

Burada, H entalpi, ρ yoğunluk, \vec{v} sıvı hızı, S kullanıcı tarafından girilen kaynak terimi ve k ısı iletim katsayısını tanımlamaktadır. Erime ve katılma sırasında gerçekleşen sıvı oranı değişimi ile oluşan çökelmeler, katılma malzeme ve peltemsi bölgede türbülansın hesaplanabilmesi için türbülans denkleminde eklenir. Çökme terimi Eşitlik 10'daki momentum çökmesine ile oldukça benzerdir.

$$S = \frac{(1-\beta)^2}{(\beta^3 + \varepsilon)} A_{mush} \quad (10)$$

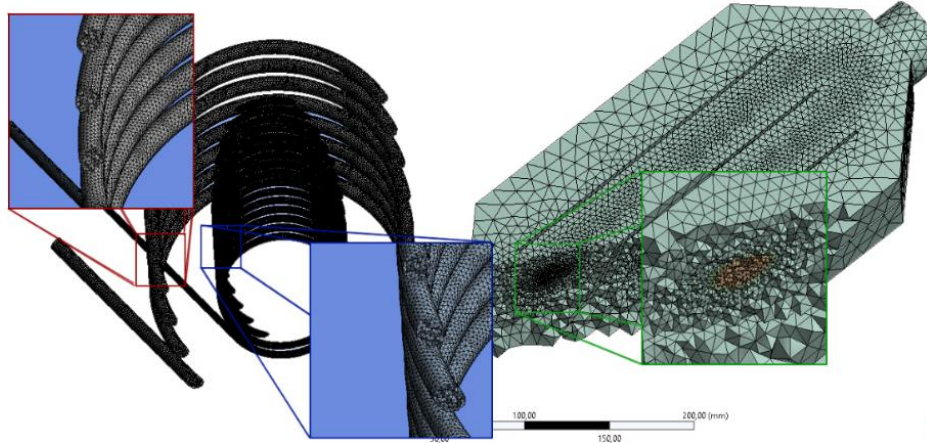
Burada, S malzemenin hızındaki azalmayı tanımlayan kaynak terimidir, \emptyset çözülen türbülans miktarını (k, ε, ω) temsil eder. Sayısal analizde kullanılan RNG k- ε modeli, renormalizasyon grubu teorisi adı verilen istatistiksel teknikler kullanılarak türetilir. Genel formdaki RNG k- ε modeli için taşıma denklemleri aşağıdaki gibidir (Eşitlik 11 ve 12),

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (11)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_\varepsilon \mu_{eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R_\varepsilon + S_\varepsilon \quad (12)$$

Burada, k kütle başına düşen kinetik enerjiyi, ε türbülans dağılım oranını, μ_{eff} efektif dinamik viskoziteyi, u hız vektörünü, R_ε gaz sabitini tanımlamaktadır. G_k , $k - \varepsilon$ modülünün türbülans üretim modelinde tanımlanan ortalama hız gradientlerinden dolayı türbülans kinetik enerjisinin üretimini temsil eder. G_b , $k - \varepsilon$ modülünde türbülansın Buoyancy'nin etkisinden dolayı oluşan türbülans kinetik enerjisidir. Y_M , kararsız genişleyen sıkıştırılabilir türbülansın toplam dağılım oranına katkısını temsil etmektedir. α_k ve α_ε sırasıyla k ve ε için ters etkili Prandtl sayılarıdır. S_k ve S_ε kullanıcı tarafından tanımlanan kaynaklardır. $C_{1\varepsilon}$ ve $C_{2\varepsilon}$ model sabitleridir ve sırasıyla 1,44 ve 1,68 değerlerini alırlar.

TED sisteminin HAD analizlerinde basınç ve hız arasındaki ilişkiyi çözmek için "SIMPLE" algoritması kullanılmıştır. Basınç doğrulama denklemini çözmek için "PRESTO" diyagramı kullanılırken, momentum ve enerji denklemlerini çözmek için "Second Order Up Wind" şeması kullanıldı. Ayrıca Geçici Formülasyon için "First Order Implicit" şeması kullanılmıştır. Sayısal modelleme için tasarlanmış egzoz ve FDM ısı eşanjörlerinin ağ oluşturma adımları Şekil 3'de verilmiştir.



	Yamukluk	Düğüm sayısı	Element sayısı
FDM eşanjörü	0,9054	597.324	2.883.601
Egzoz eşanjörü	0,8400	372.012	1.992.795

Şekil 3. Sayısal modelleme için tasarlanmış ısı eşanjörlerinin mesh yapısı (Mesh structure of heat exchangers designed for numerical modeling)

Sayısal analizlerde, 1600 rpm motor devri, stokiometrik hava-yakıt karışımı ve 1/2 gaz kelebeği konumunda yakıt olarak benzin ile çalışan tek silindri, hava soğutmalı buji ateşlemeli bir motorun egzoz gazının sıcaklığı ve kütle akış hızı değerleri kullanılmıştır. Buji ateşlemeli motor, 476,5 cm³ strok hacmine, maksimum 13 HP çıkış gücüne ve 25 Nm tork değerine sahiptir. Egzoz gazlarının atık ısının FDM kabına ve FDM kabında depolanan gizli ısınının ısıtılacak ortama aktarılmasında ısı taşıyıcı akışkan olarak su kullanılmıştır. Egzoz gazı ve suyun termo-fiziksel özellikleri Tablo 2'de verilmiştir. Isı şarjı (erime) ve ısı deşarjı (katılaşma) süreçlerinin analizlerinde egzoz gazı, PCM ve su için kabul edilen başlangıç sınır koşulları Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 2. Su ve egzoz gazının termofiziksel özellikleri (Thermophysical properties of water and exhaust gas) [Perry, 1984]

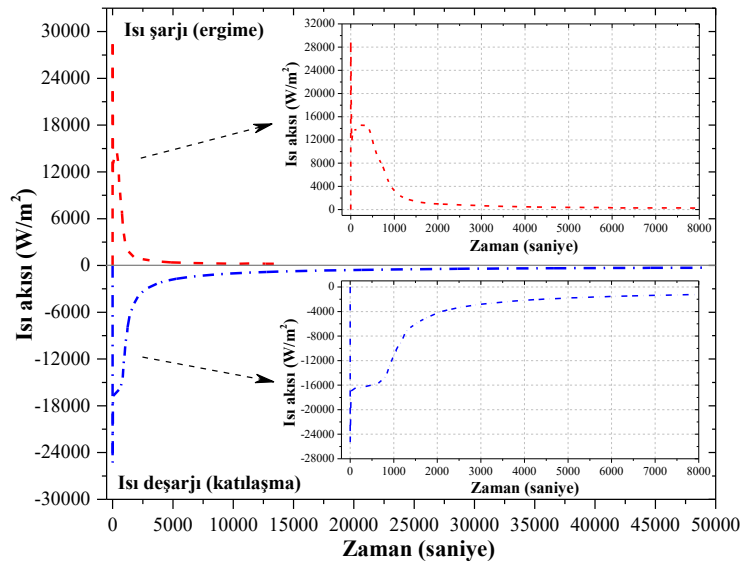
Termofiziksel özellik	Egzoz gazı (400-600K)		Su (283 K)
Yoğunluk, ρ (kg/m ³)	0,871	0,58	999,75
Spesifik ısı, c_p (kj/kgK)	1,014	1,051	4,1997
Isı iletim katsayısı, k (W/Mk)	0,0336	0,0466	0,5797
Dinamik viskozite, μ (Pa.s)	0,0000320	0,0000306	0,001375

Tablo 3. Egzoz gazı, su ve RT35 için başlangıç ve sınır şartları (Initial and boundary conditions for exhaust gas, water and RT35)

FDM ısı eşanjörü	Serpantin tipi ısı eşanjörü yüzey sıcaklığı (K)		FDM (RT35)'in sıcaklığı (K)
	Isı şarjı	363,15	-
Isı deşarjı	-	273,15	363,15
Egzoz ısı eşanjörü	Su giriş	Sıcaklık (K)	Kütlesel debi (kg/s)
		283,15	0,008
Egzoz gaz giriş	Sıcaklık (K)	Kütlesel debi (kg/s)	
	500	0,004	

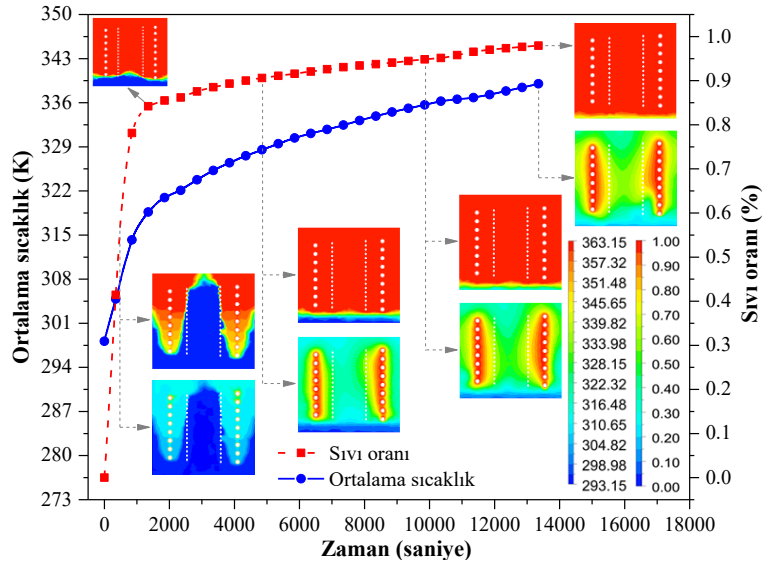
3. Araştırma Bulguları ve Tartışma (Research Findings and Discussion)

RT35'in ısı şarjı (erime) ve ısı deşarjı (katılaşma) süreçlerinde ısı akısının zamana karşı değişimini Şekil 4'de verilmektedir. Şekil 4'te görüldüğü gibi, RT35'in ısı şarjı sürecinde ≈ 3250 .sn'de maksimum ısı akısına ulaşmış ve ardından ısı akısı ≈ 1500 .sn'e kadar hızla azalmaktadır. Eritme işleminin ilk aşamaları, iletim baskın ısı transfer modudur. Bu aşamada, sıvı nano-FDM katmanlarının darlığı viskoz kuvvetin kaldırma kuvvetine hâkim olmasına izin verdiği için, neredeyse hareketsiz bir sıvı nano-FDM yapısı hakimdir (Cui vd., 2011). Bu nedenle, RT35'in eritme işleminin başlangıcında ısı akısı daha yüksek bir değere sahiptir. ≈ 4000 .sn'de ısı akısı çok düşük bir değere azalmış ve analizin sonuna kadar (13375.sn) neredeyse sabit kalmıştır. Isı deşarjı işleminin başlangıcında, sıcak serpantin tipi ısı değiştirici (STID) duvarı ile daha soğuk RT35 arasındaki yüksek sıcaklık farkı nedeniyle ısı akışı hızla arttı. Isı akışı daha sonra ≈ 2500 .sn'e kadar hızla azaldı ve 2500-15000.sn arasında daha yavaş bir hızla azalan ısı akısı ≈ 15000 .sn'den analizin sonuna kadar neredeyse sabit kaldı.



Şekil 4. RT35'in erime ve katılaşma süreçlerinde ısı akısının zamana karşı değişimi (Variation of heat flux over time in the melting and solidification processes of RT35)

RT35'in ısı şarjı sürecinde ortalama sıcaklık ve sıvı oranının zamana karşı değişimi Şekil 5'te verilmiştir. RT35 ile doldurulmuş FDM kabındaki ortalama sıcaklık, ≈ 1300 .sn'de yaklaşık 318 K'ye ulaşmıştır. Isı şarjı işleminin ilk aşamalarında (0-900.sn), iletim baskın ısı transferi modu ile artan ısı akısı, STID'dan geçen sıcak sudan FDM kabındaki daha soğuk RT35'e olan ısı aktarım hızını artırdı ve ortalama sıcaklığın daha hızlı yükselmesine neden oldu. ≈ 1300 .sn'den sonra, RT35'in daha yavaş artan ortalama sıcaklığı, analizin sonunda (13375.sn) 339 K'ye ulaştı. RT35, ≈ 1300 .sn'den sonra STID'a yakın bölgelerde peltensı kıvamda olduğundan, bu safhada baskın olan doğal konveksiyonun etkisi ile azalan ısı akısı ısı transfer hızını düşürmüştü ve buda ortalama sıcaklık artış hızının azalmasına neden olmuştur. FDM kabındaki peltensı kıvamdaki RT35 miktarının artması ile ısı şarjı işleminin ilerleyen safhalarında ısı transfer hızı ve buna bağlı olarak ortalama sıcaklıktaki artış hızı daha da yavaşlamıştır. Şekil 5'de görüldüğü gibi, eritme işleminin başlangıcında (0-900.sn), sıcak STID duvarı ile daha soğuk RT35 arasındaki yüksek sıcaklık farkı nedeniyle, erime hızı ve dolayısıyla sıvı oranındaki artış hızı daha yüksektir. PCM kabındaki RT35'nin sıvı oranı ≈ 900 .sn'nin sonunda $\approx 80\%$ 'e ulaşmıştır. Bu sürenin ardından, sıvı oranındaki artış çok yavaş ilerledi ve 13375.sn'de 98% 'e ulaşmıştır.

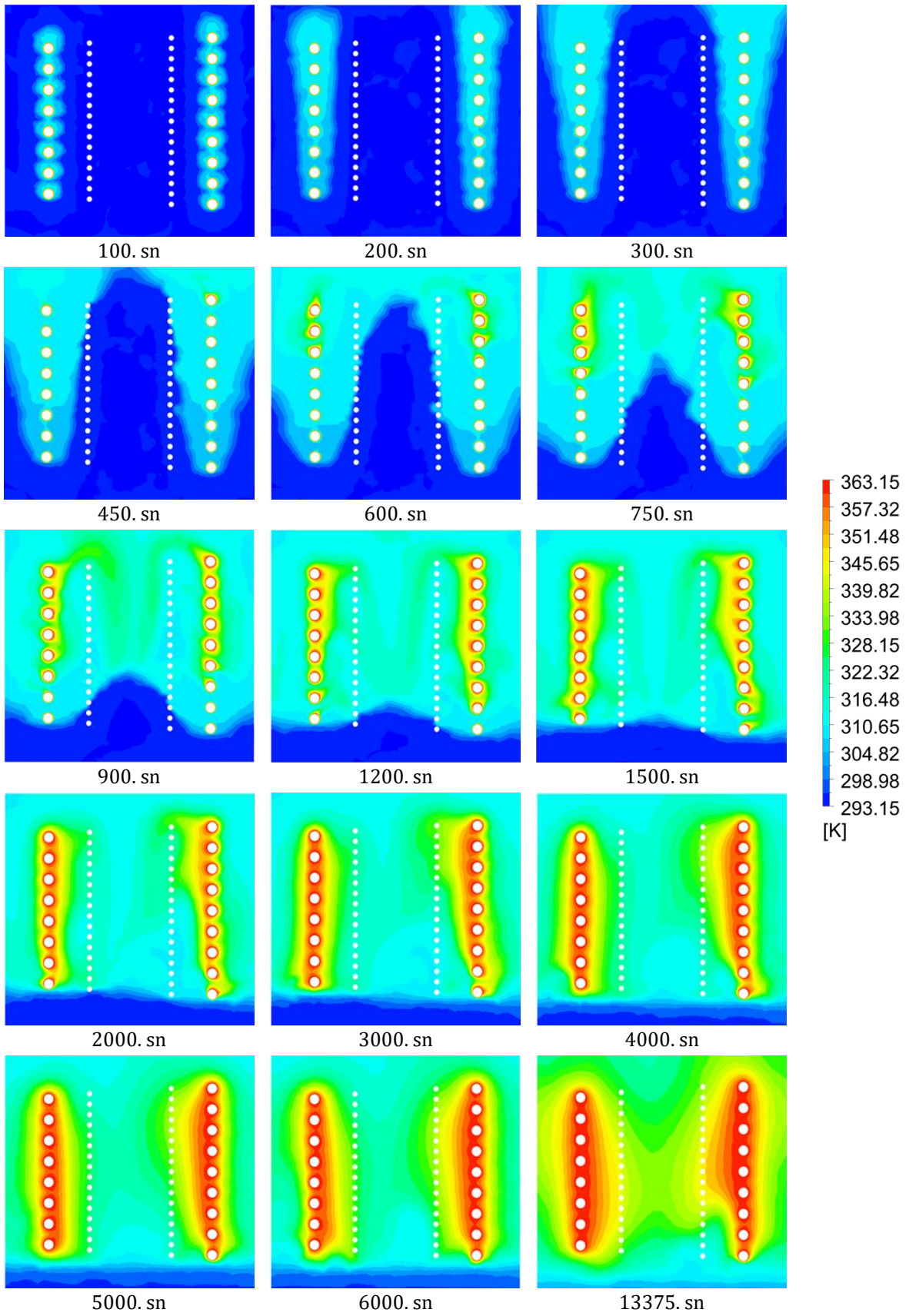


Şekil 5. Erime sürecinde ortalama sıcaklık ve sıvı oranının zamana karşı değişimi (Variation of average temperature and liquid ratio versus time during the melting process)

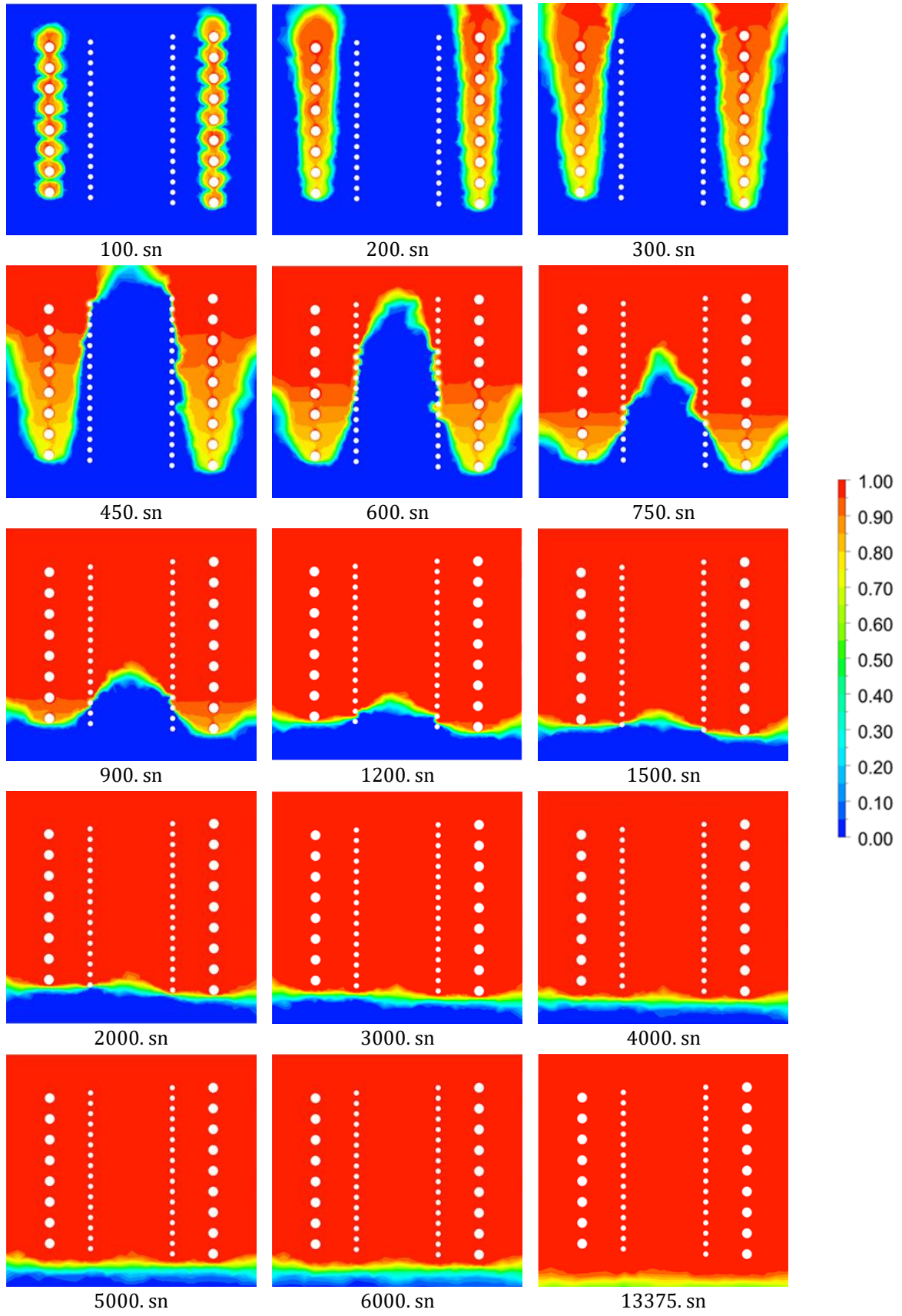
Şekil 6'da verilen RT35'in ısı şarjı (erime) sürecinde sıcaklık konturlarının zamana karşı değişimi incelendiğinde; başlangıçta sıcaklık gardiyanlarının STID'in halkalarından FDM kabının üst bölgelerine doğru, ardından üst merkezden dikey olarak aşağıya olarak dağıldığı görülmektedir. ~600. saniyeden sonra, sıcaklık gardiyanlarının STID çevresinde daha yüksek bir sıcaklık değerinde yoğunlaştı ve sonraki aşamalarda STID çevresinden FDM kabının merkezine doğru sıcaklık gardiyanlarının dağıldığı görülmektedir.

RT35'in ısı şarjı sürecinde sıvı oranı konturlarının zamana karşı değişim Şekil 7'de verilmektedir. Şekil 7'de görülebileceği gibi 0-900 saniye aralığında sıvı oranı hızla artmıştır. Başlangıçta, STID çevresinde erime ile başlayan sıvı oranındaki artış, FDM kabının iç ve kenar bölgelerine yayılmıştır. ~900.sn'den sonra önemli ölçüde yavaşlayan sıvı oranındaki artış hızı, analizin sona kadar çok düşük artış hızına sahip olmuştur. 13375.sn'de FDM kabının tabanında halen sıvı faza geçmeyen bir miktar RT35'in olduğu görülmektedir. FDM kabının tabanında katı ve/veya peltemsi kıvamdaki RT 35 miktarı yaklaşık %2'dir.

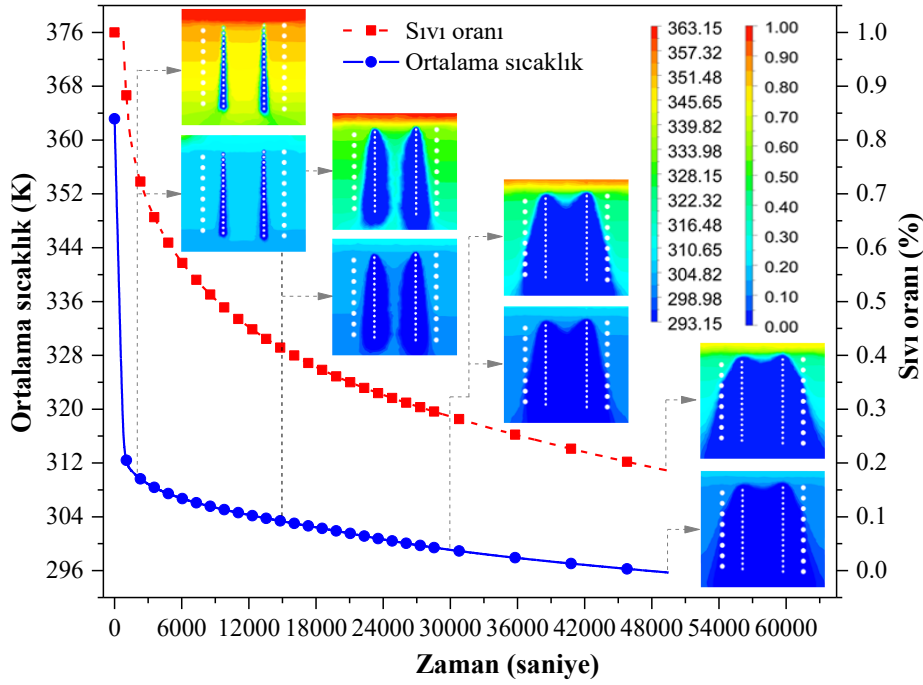
Isı deşarj (katılaşma) sürecinde ortalama sıcaklık ve sıvı oranının zamana bağlı değişimi Şekil 8'de verilmiştir. RT35 ile doldurulmuş FDM kabındaki ortalama sıcaklık, ~1000.sn'de 363 K başlangıç değerinden ~312 K'e azalmıştır. Katılaşma sürecinin başlangıcında (0-1000.sn), soğuk STID duvarı ile daha sıcak RT35 arasındaki yüksek sıcaklık farkı altında ortaya çıkan yüksek ısı akısı, FDM kabındaki RT35'in ortalama sıcaklığını hızla azalmıştır. ~1000.sn'den sonra ortalama sıcaklıktaki azalma hızı önemli ölçüde yavaşladı ve analizlerin sonlandırıldığı 49475.sn'de ancak 294 K'e ulaşılabilmiştir. Şekil 8'de görüldüğü gibi, ısı deşarj sürecinin başlangıcından ~600.sn'ye kadar sıvı oranının neredeyse azalmadığı bir periyot meydana gelmiştir. Bu süreçte (0-600.sn), katılaşma sadece STID çevresindeki çok küçük bir alanda meydana geldi. FDM kabındaki ortalama sıcaklık RT35'in katılaşma sıcaklığı olan 302 K'e yaklaştıkça RT35'in sıvı oranı azalmış, ortalama sıcaklığın 302 K'e ulaştığı 20000.sn'den sonra FDM kabı içerisindeki katılaşma işlemi oldukça hızlanmıştır. Ancak, analizlerin tamamlandığı 49472.sn'de FDM kabı içerisindeki RT35'in %18'i halen sıvı fazda kalmıştır.



Şekil 6. Erime sürecinde sıcaklık konturlarının zamana karşı değişimi (Variation of temperature contours versus time during the melting process)



Şekil 7. Erime sürecinde sıvı oranı konturlarının zamana karşı değişim (Variation of fluid fraction contours versus time during the melting process)

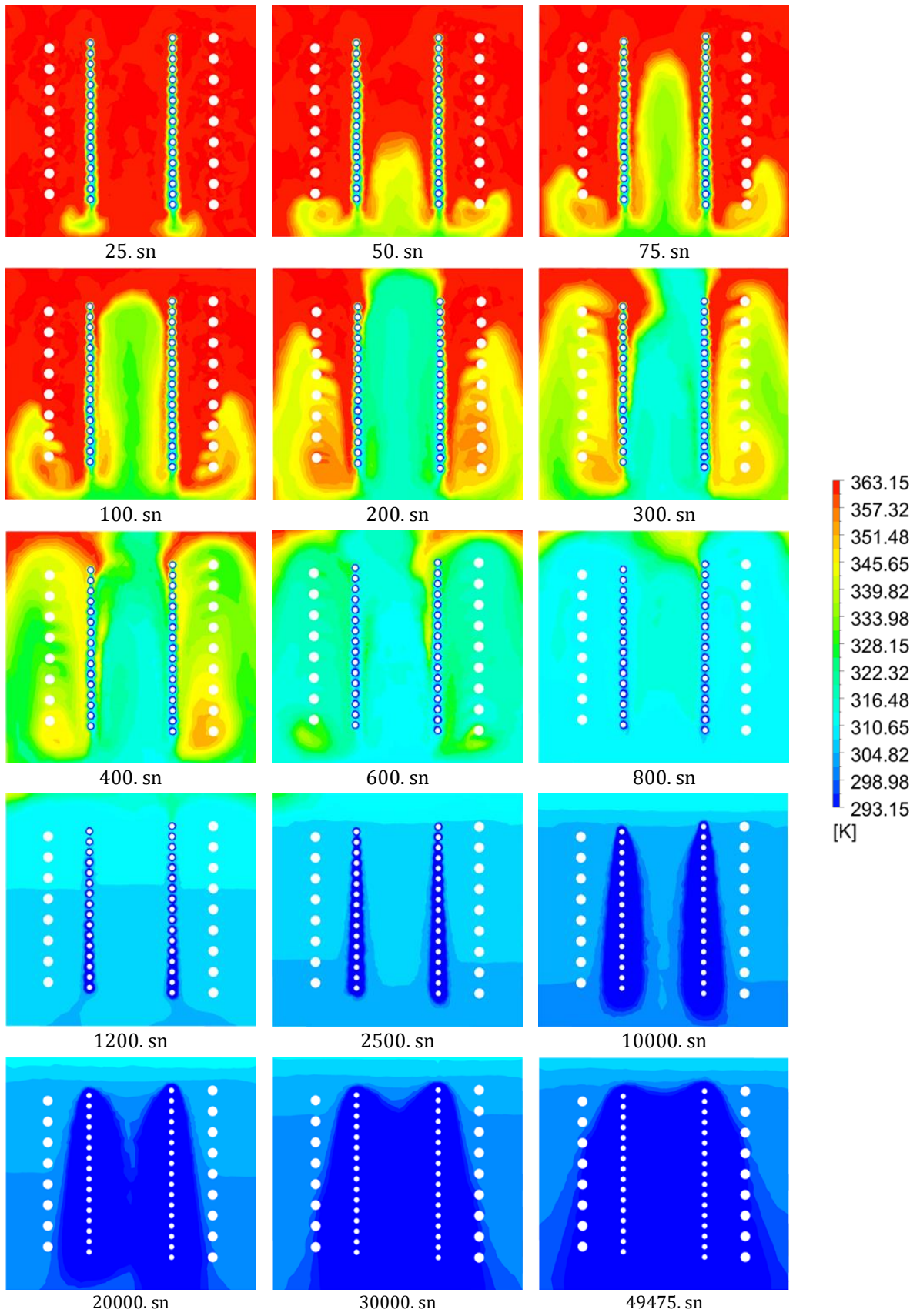


Şekil 8. Katılaşma sürecinde ortalama sıcaklık ve sıvı oranının zamana karşı değişimi (Variation of average temperature and liquid fraction versus time during the solidification process)

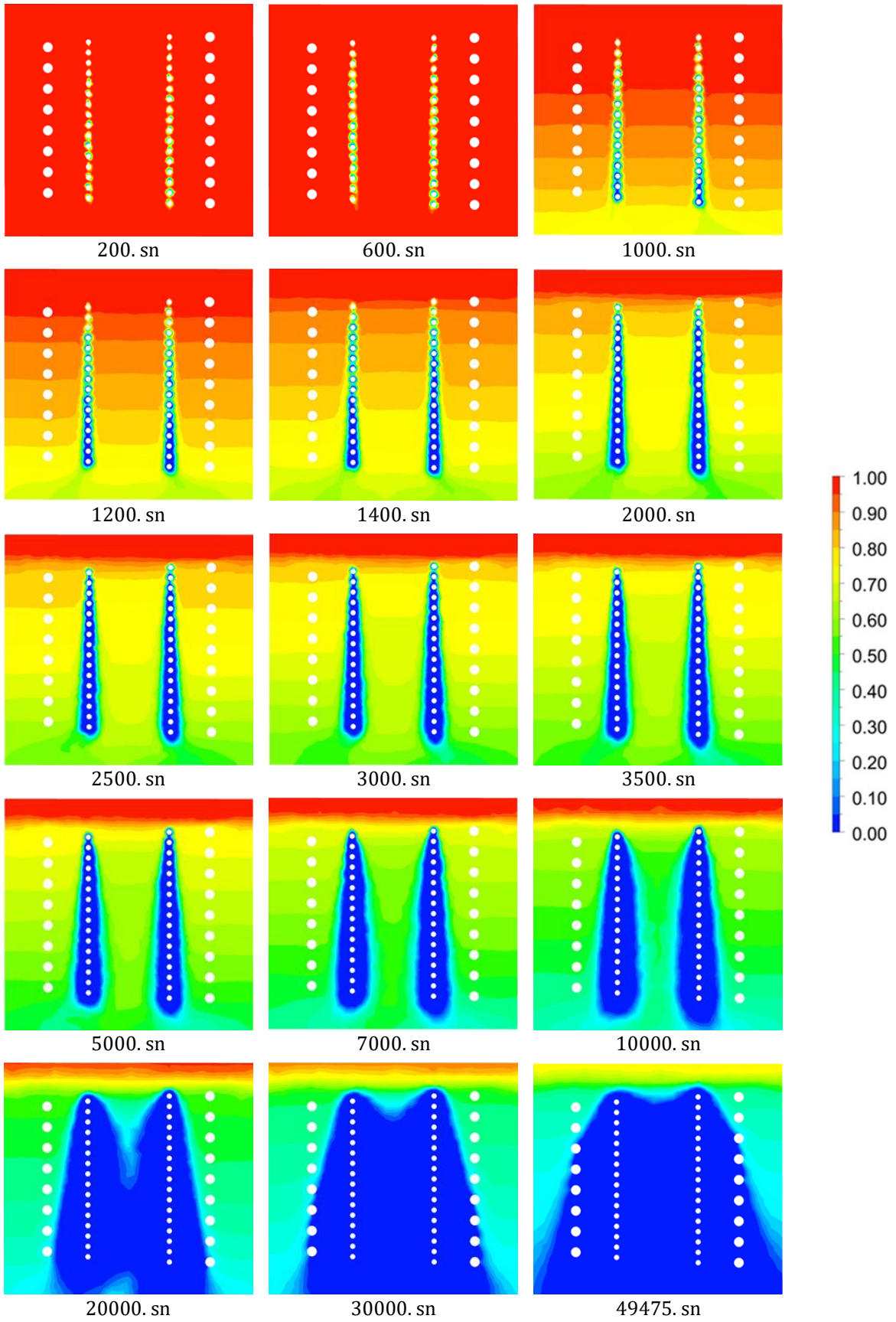
Şekil 9'da RT25'in ısı deşarjı (katılaşma) sürecinde sıcaklık konturlarının zamana karşı değişimi görülmektedir. Şekil 9'da görüldüğü gibi, başlangıçta sıcaklık gardiyanları yatay olarak STID'in giriş halkalarından FDM kabının merkezine ve yanlarına, ardından dikey olarak FDM kabının üst bölgelerine dağılmıştır. Sıcaklık gardiyanlarının dağılımı, başlangıçta çok yüksek hızda iken ≈ 1000 .sn'den sonra oldukça yavaşlayarak analizlerin tamamlandığı 49475.sn'ye kadar yavaş bir hızla devam etmiştir. Analizlerin tamamlandığı 49475.sn'de FDM kabının yan duvarlarına yakın bölgeler ve üst kısmında RT35'in bir kısmının halen katılaşmamış halde olduğu görülmektedir.

Şekil 10'da RT35'in ısı deşarjı (katılaşma) sürecinde sıvı oranı konturlarının zamana karşı değişimi görülmektedir. Şekil 10'da görüldüğü gibi, sıvı oranındaki önemli azalma ilk 600.sn'den sonra başlamıştır. Sıvı oranı konturlarından görüldüğü gibi, RT35'in katılaşması başlangıçta FDM kabının alt kısmından başlayıp yukarı doğru ilerledi. Analizlerin sonunda FDM kabının kenarlarına yakın üst kısmında tamamen katılaşmamış bir miktar RT35 kalmıştır.

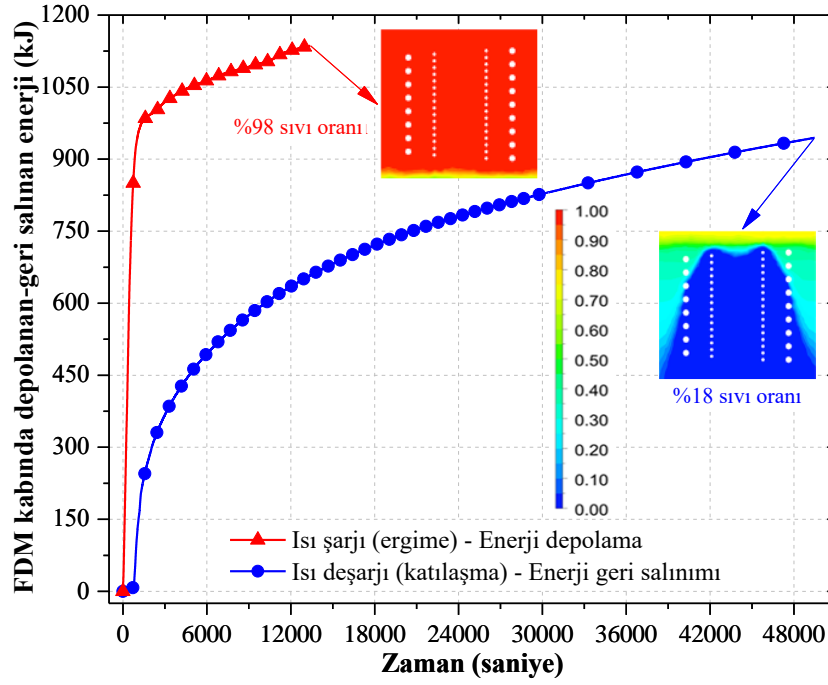
RT35'in ısı şarj ve deşarj süreçlerinde FDM kabında depolanan ve geri salınan enerji miktarının zamana karşı değişimi Şekil 11'de verilmektedir. Isı şarj sürecinde, FDM kabı içerisindeki RT35'in katı-sıvı faz dönüşümü ile açığa çıkan gizli ısı enerjisi, ilk 900 saniye içerisinde oldukça hızlı bir şekilde artarak 920 kJ değerine ulaşmıştır. 900.sn'den sayısal analizlerin tamamlandığı 13375.sn (%98 sıvı oranı) aralığında FDM kabı içerisinde depolanan enerji miktarı 216 kJ ve RT35'in ısı şarjı (erime) sürecinde (13375.sn) depolanan enerji miktarı 1136 kJ olmuştur. Görüldüğü gibi, erime sürecinin başlangıcında iletim baskın ısı transferi modunun baskın olduğu ilk 0-900.sn aralığında FDM kabında depolan toplam enerjinin ≈ 81 'inin toplam erime süresine göre oldukça kısa bir sürede depolandığı görülmektedir. Buna karşın, katı-sıvı faz dönüşümünün baskın olarak ortaya çıkması ile oluşan peltemsi kıvama ulaşan RT35'de, doğal konveksiyonun etkin olduğu 900-13375.sn aralığında toplam enerjinin yalnızca %19'luk kısmı depolanabilmiştir. Şekil 11'de görüldüğü gibi ısı deşarj (katılaşma) sürecinde, 0-600.sn aralığında ortalama sıcaklığının henüz RT35'in katılaşma sıcaklığı olan 302 K'den çok yüksek olması nedeniyle katılaşma ve dolayısıyla kayda değer miktarda enerji geri salınımının ortaya çıkmadığı görülmektedir. 600-49472.sn aralığında RT35'den ısı salınımının parabolik bir eğri ile artarak sayısal analizlerin sonlandırıldığı 49472.sn'de toplam 945 kJ enerji geri salınabilmiştir. Sayısal analiz sonuçlarından görülebileceği gibi, ısı deşarjı (erime) sürecine göre oldukça uzun bir sürede gerçekleşen ısı deşarjı (katılaşma) sürecinin sonunda (49472.sn) FDM kabındaki RT35'de faz dönüşümü ile depolanan 1136 kJ'lük gizli ısı enerjisinin yaklaşık %83'lük kısmı geri salınabilmiştir. RT35'in erime ve katılaşma süreçlerinde katı-sıvı ve sıvı-katı faz dönüşümü ile açığa çıkan gizli ısı enerjisi miktarının bir karşılaştırması olarak; erime sürecinde %98 sıvı oranının elde edildiği 13375.sn'de FDM kabında depolanan toplam enerji miktarı 1136 kJ iken, aynı sürede (13375.sn) katılaşma sürecinde %18 sıvı oranı ile geri salınan enerji miktarı 658 kJ olmuştur.



Şekil 9. Katılaşma sürecinde sıcaklık konturlarının zamana karşı değişimi (Variation of temperature contours versus time during the solidification process)



Şekil 10. Katılaşma sürecinde sıvı oranı konturlarının zamana karşı değişimi (Variation of fluid fraction contours versus time during the solidification process)



Şekil 11. Erime ve katılaşma süreçlerinde FDM’de depolanan ve geri salınan ısı enerjisinin zamana karşı değişimi (Variation of heat energy stored and released in FDM versus time during melting and solidification processes)

4. Sonuç ve Öneriler (Conclusion and Recommendations)

Tipik bir buji ateşlemeli motorunun egzoz atık ısı geri kazanımı için tasarlanan TED sisteminde RT35 parafin mumu kullanılarak ısı şarjı (erime) ve ısı deşarjı (katılaşma) süreçlerinin sayısal analizlerinde elde edilen bulgular aşağıda özetlenmiştir;

- RT35’in ısı şarjı (erime) sürecinin başlangıcında, iletim baskın ısı transferi modu nedeniyle ısı akısı dolayısıyla ısı aktarım hızı yüksek değerler almıştır. Bu nedenle RT35’in ortalama sıcaklığı ve sıvı oranı da bu süreçte hızla artmıştır. Erime sürecinin ilerleyen aşamalarda, katı-sıvı faz dönüşümü esnasında ortaya çıkan peltensı kıvam ile birlikte baskın olan doğal konveksiyonun etkisi ile ısı akısı ve dolayısıyla ısı transfer hızı azaldı. Bu nedenle hem ortalama sıcaklık hem de RT35’in sıvı oranındaki artış eğilimi yavaşlamıştır. Çalışmada sayısal analizler RT35’in erime sürecinin oldukça yavaşladığı, sayısal analizlerin sona erdirildiği 13375.sn’de FDM kabındaki RT35’in ortalama sıcaklığı 333 K’e ve sıvı oranı %98’e ulaşmıştır.
- RT35’in ısı deşarjı (katılaşma) sürecinin başlangıcında soğuk STID duvarı ile daha sıcak RT35 arasındaki yüksek sıcaklık farkı nedeniyle oluşan yüksek ısı akısı FDM kabındaki RT35’in ortalama sıcaklığının hızla düşmesine neden olmuştur. Buna karşın, ortalama sıcaklığın RT35’in katılaşma sıcaklığı olan 302 K’e henüz ulaşmadığı 600.sn’ye kadar katılaşma işlemi STID etrafındaki oldukça küçük bir alanda gerçekleşmiştir. 600.sn’den sonra sıvı oranı parabolik olarak azalmış ve sayısal analizlerin sonunda (49472.sn) FDM kabındaki RT35’in ortalama sıcaklığı 296 K’e ve sıvı oranı %18’e azalmıştır.
- Sonuç olarak; geliştirilen TED sistemi ile RT35’in ısı şarjı (erime) sürecinin sonunda (13375.sn) FDM kabından %98 sıvı oranı ile 1136 kJ enerji depolanabilmiş ve ısı deşarjı (katılaşma) sürecinin sonunda (49472.sn) %18 sıvı oranı ile 945 kJ enerji geri alınabilmiştir. Sayısal analizlerin sonunda, FDM kabında katı-sıvı faz dönüşümü (erime) ile gizli ısı olarak depolanan enerjinin yaklaşık olarak %83’lük kısmı sıvı-katı faz dönüşümü sürecinde (katılaşma) geri alınabilmiştir.

Teşekkür (Acknowledgement)

Bu çalışma, Doç. Dr. Habib Gürbüz danışmanlığında yürütülen ve Durukan ATEŞ tarafından hazırlanan "İçten yanmalı bir motorda egzoz atık ısı enerjisinin FDM tarafından depolanması ve yeniden kullanımının HAD analizi" (Durukan, 2019) başlıklı Yüksek Lisans Tezi kapsamında gerçekleştirmiştir.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazarların herhangi bir kişi veya kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır. No conflict of interest was declared by the authors.

Referanslar (References)

- ANSYS FLUENT, 14.5, 2014. User's and theory guide. Canonsburg, Pennsylvania, USA: ANSYS, Inc.
- Ateş, D., 2019. İçten Yanmalı Motorun Egzoz Atık Isı Enerjisinin FDM Yardımıyla Depolanması ve Yeniden Kullanımının HAD Analizi. Süleyman Demirel University, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 253s, Isparta.
- Bouhal, T., Fertahi, S.D., Kousksou, T., Jamil, A. 2018. CFD thermal energy storage enhancement of PCM filling a cylindrical cavity equipped with submerged heating sources. *Journal of Energy Storage*, 18 (2018) 360–370.
- Cui, Y., Xie, J., Liu, J., Wang, J., Chen, S. 2011. A review on phase change material application in building. *Advanced in Mechanical Engineering*, 9(6), 1-15.
- Ebadi, S., Tasnim, S.H., Aliabadi, A.A. and Mahmud, S., 2018. Melting of nano-PCM inside a cylindrical thermal energy storage system: Numerical study with experimental verification, *Energy Conversion and Management*, 166, 241-259.
- Fleischer, A.S., 2015. *Thermal energy storage using phase change materials: fundamentals and applications*. Springer, London, 93p.
- Gürbüz, H, Ateş, D., 2020. A numerical study on processes of charge and discharge of latent heat energy storage system using RT27 paraffin wax for exhaust waste heat recovery in a SI engine, *International Journal of Automotive Science and Technology*, 4 (4), 314-327.
- Hoseini, S.S., Najafi, G., Ghobadian, B., Mamat, R., Sidik, N.A.C., Azmi, W H., 2017. The effect of combustion management on diesel engine emissions fueled with biodiesel-diesel blends. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 73, 307-331.
- John, M.R.W., Subramanian, L.R.G., 2019. Performance Analysis of Custom-Designed Heat Exchanger and Latent Heat Thermal Energy Storage System for Diesel Engine Exhaust Waste, *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Mechanical Engineering*, 43 (1), 679-S694.
- Kant, K., Shukla, A., Sharma, A., Biwole, P.H. 2018. Melting and solidification behaviour of phase change materials with cyclic heating and cooling. *Journal of Energy Storage*, 15, 274-282.
- Karasu, H., Dincer, I., 2018. Analysis and Efficiency Assessment of Direct Conversion of Wind Energy into Heat Using Electromagnetic Induction and Thermal Energy Storage, *Journal of Energy Resources Technology*, 140 (7): 071201
- Kauranen, P., Elonen, T., Wikström, L., Heikkinen, J., Laurikko, J. 2010. Temperature optimisation of a diesel engine using exhaust gas heat recovery and thermal energy storage (diesel engine with thermal energy storage). *Applied Thermal Engineering*, 30(6-7), 631-638.
- Liu, M., Y. Sun, and F. Bruno., 2020. A Review of Numerical Modelling of High-Temperature Phase Change Material Composites for Solar Thermal Energy Storage, *Journal of Energy Storage*, 29, 101378.
- Mahdi, J.M., Lohrasbi, S., Ganji, D.D., Nsofor, E.C. 2018. Accelerated melting of PCM in energy storage systems via novel configuration of fins in the triplex-tube heat exchanger. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 124, 663-676.
- Mahdi, J.M., Lohrasbi, S., Ganji, D.D., Nsofor, E.C. 2019. Simultaneous energy storage and recovery in the triplex-tube heat exchanger with PCM, copper fins and Al₂O₃ nanoparticles. *Energy conversion and management*, 180, 949-961.
- Mollenhauer, E., Christidis, A., Tsatsaronis, G., 2018. Increasing the Flexibility of Combined Heat and Power Plants with Heat Pumps and Thermal Energy Storage, *Journal of Energy Resources Technology*, 140(2): 020907.
- Moran, M.J., Shapiro, H.N., Boettner, D.D., Bailey, M.B. 2010. *Fundamentals of engineering thermodynamics*. John Wiley&Sons, USA, 825s.
- Oró, E., Jong, E.d., Cabeza, L.F. 2015. Experimental analysis of a car incorporating phase change material. *Journal of Energy Storage*, 7, 131-135.
- Pandiyarajan, V., Pandian, M.C., Malan, E., Velraj, R., Seeniraj, R.V. 2011. Experimental investigation on heat recovery from diesel engine exhaust using finned shell and tube heat exchanger and thermal storage system. *Applied Energy*, 88(1), 77-87.
- Perry, R.H. 1984. *Perry's Chemical Engineers Handbook*, 6th edition, McGraw-Hill, New York, 2640.
- Rahman, A., Razzak, F., Afroz, R., Mohiuddin, A.K.M., Hawlader, M.N.A. 2015. Power generation from waste of IC engines. *Renewable and sustainable energy reviews*, 51, 382-395.
- Sarı, A., Karaipekli, A., 2007. Thermal conductivity and latent heat thermal energy storage characteristics of paraffin/expanded graphite composite as phase change material. *Applied Thermal Engineering*, 27(8-9), 1271-1277.
- Scupi, A.A. 2016. The use of numerical programs in research and academic institutions. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 145(8), 082002.
- Shahsavari, A., Ali, H.M., Mahani, R., Talebizadehsardari, P., 2020. Numerical study of melting and solidification in a wavy double-pipe latent heat thermal energy storage system. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 141, 1785-1799.
- Sharma, A., Tyagi, V.V., Chen, C.R., Buddhi, D., 2009. Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. *Renewable and Sustainable energy reviews*, 13(2), 318-345.
- Sunku Prasad, J., Anandalakshmi, R., Muthukumar, P. 2020. Numerical investigation on conventional and PCM heat sinks under constant and variable heat flux conditions. *Clean Techn Environ Policy* <https://doi.org/10.1007/s10098-020-01829-8>.
- Tiari, S., Qiu, S. and Mahdavi, M., 2015. Numerical study of finned heat pipe-assisted thermal energy storage system with high temperature phase change material, *Energy Conversion and Management*, 89, 833-842.
- Topalci, Ü, Gürbüz, H, Akçay, H, Demirtürk, S., 2020. Buji ateşlemeli bir motorda egzoz atık ısı geri kazanımı için termoelektrik jeneratör modelinin geliştirilmesi, *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 8 (2), 582-596.
- Wu, J., Feng, Y., Liu, C., Li, H., 2018. Heat transfer characteristics of an expanded graphite/paraffin PCM-heat exchanger used in an instantaneous heat pump water heater. *Applied Thermal Engineering*, 142, 644-655.
- Yang, X., Li Yang, Lu, Z., Zhang, L., Zhang, Q., Jin, L. 2016. Thermal and Fluid Characteristics of a Latent Heat Thermal Energy Storage Unit, *Publication: Energy Procedia*, 104, 425-430.
- Yang, Y.-T., Wang, Y.-H., 2012. Numerical simulation of three-dimensional transient cooling application on a portable electronic device using phase change Material. *International Journal of Thermal Sciences*, 51, 155-162.
- Zalba, B., Marín, J. M., Cabeza, L. F., Mehling, H., 2003. Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications. *Applied thermal engineering*, 23(3), 251-283.