

Katmanlı FDM Isı Alıcısında SP40, SP31 ve SP24 Diziliminin Erime ve Katılaşma Davranışına Etkisinin Sayısal İncelenmesi

Halil İbrahim Yamaç^{1*} 

¹Kurum ve Adres Fırat Üniversitesi Mekatronik Mühendisliği Bölümü, Elazığ, Türkiye

* e-mail:hiyamac@firat.edu.tr

* Orcid No: 0000-0002-4628-0971

Received: 09.06.2026

Accepted: 26.07.2026

DOI: 10.47118/somatbd.1967315

Özet

Bu çalışmada, SP40, SP31 ve SP24 faz değiştiren malzemelerinden oluşan alüminyum çerçeveli katmanlı bir ısı alıcısında FDM sıralamasının erime ve katılaşma davranışına etkisi sayısal olarak incelenmiştir. İki boyutlu modelde SP40 alt katmanda sabit tutulmuş, SP31 ve SP24 ise orta ve üst katmanlarda iki farklı düzende yerleştirilmiştir. Erime ve katılaşma analizleri, faz değişim aralıkları dikkate alınarak tanımlanan karşıt ısı sınır şartları altında gerçekleştirilmiştir. Her FDM bölgesi için alan ortalamalı kütle kesri ve alan ortalamalı sıcaklık değerleri değerlendirilmiştir. Sonuçlar, FDM sıralamasının erime sürecinde katmanların ısı depolama sürecine katılma sırasını değiştirdiğini, katılaşma sürecinde ise ısı boşaltma davranışı üzerinde daha belirgin bir etki oluşturduğunu göstermiştir. SP24'ün orta katmanda yer aldığı düzenleme, özellikle katılaşma aşamasında daha hızlı ısı toparlanma sağlamıştır.

Anahtar Kelimeler: Faz değiştiren malzeme; Erime ve katılaşma; Katmanlı FDM dizilimi; Sayısal analiz; Pasif termal yönetim

Numerical Investigation of the Effect of SP40, SP31, and SP24 Arrangement on Melting and Solidification Behavior in a Layered FDM Heat Sink

Abstract

This study numerically investigates the effect of phase change material arrangement on the melting and solidification behavior of an aluminum-framed layered heat sink consisting of SP40, SP31, and SP24. In the two-dimensional model, SP40 was fixed at the bottom layer, while SP31 and SP24 were placed in two different middle-upper layer arrangements. The melting and solidification analyses were carried out under opposite thermal boundary conditions selected according to the phase-change ranges of the materials. The area-averaged mass fraction and area-averaged temperature of each PCM region were evaluated. The results showed that the PCM arrangement changed the activation sequence of the layers during melting, while it had a more pronounced influence on the heat release behavior during solidification. The arrangement in which SP24 was located in the middle layer provided faster thermal recovery, particularly during the solidification stage.

Keywords: Phase change materials; Melting and solidification; Layered FDM array; Numerical analysis; Passive thermal management

1. Giriş

Elektronik bileşenlerde güç yoğunluğunun artması, cihaz boyutlarının küçülmesi ve çalışma süreleri boyunca oluşan geçici ısı yükleri, etkili ısıl yönetim sistemlerine olan ihtiyacı artırmaktadır. Özellikle taşınabilir elektronik cihazlar, güç elektroniği elemanları, batarya modülleri ve kompakt elektronik sistemlerde sıcaklık artışının sınırlandırılması, hem güvenilirlik hem de çalışma ömrü açısından kritik öneme sahiptir (Kandasamy et al., 2007). Geleneksel hava soğutmalı veya iletim/taşıma esaslı soğutma yöntemleri birçok uygulamada yeterli olmakla birlikte, kısa süreli yüksek ısı yüklerinin bastırılması veya sıcaklığın belirli bir aralıkta tutulması gereken durumlarda pasif ısı kontrol yaklaşımları daha avantajlı hale gelmektedir. Bu kapsamda faz değiştiren malzemeler, yani FDM'ler, gizli ısı depolama kapasiteleri sayesinde elektronik soğutma uygulamalarında önemli bir çözüm alternatifi olarak değerlendirilmektedir (Wang et al., 2005).

FDM tabanlı ısı alıcıların temel avantajı, faz değişimi sırasında yüksek miktarda ısıyı nispeten dar bir sıcaklık aralığında depolayabilmeleridir. Bu özellik, elektronik bileşenlerde ani sıcaklık yükselmelerini geciktirmekte ve cihazın kritik sıcaklık sınırına ulaşma süresini uzatabilmektedir. Literatürde, FDM ile doldurulmuş ısı alıcıların özellikle geçici çalışma rejimlerinde, mobil ve kompakt elektronik cihazların termal yönetiminde etkili olduğu gösterilmiştir (Fok et al., 2010; Tan & Tso, 2004). Bununla birlikte FDM'nin tamamen erimesinden sonra sistemin ısı depolama kabiliyeti azalmakta ve sıcaklık artışı daha hızlı gerçekleşebilmektedir. Bu nedenle FDM tabanlı sistemlerde yalnızca toplam gizli ısı kapasitesi değil, aynı zamanda erime cephesinin gelişimi, ısı transfer yolu, malzeme yerleşimi ve iletken yapıların konfigürasyonu da performansı belirleyen temel parametrelerdir (Baby & Balaji, 2012; Hosseinizadeh et al., 2011).

FDM'lerin elektronik soğutmadaki en önemli sınırlamalarından biri, özellikle parafin esaslı malzemelerde görülen düşük ısı iletkenliğidir. Düşük ısı iletkenliği, ısı kaynağına yakın bölgelerde hızlı erimeye neden olurken, uzak bölgelerde FDM'nin yeterince etkin kullanılmasını geciktirebilmektedir (Mahmoud et al., 2013; Maqbool et al., 2023). Bu problemi azaltmak amacıyla literatürde alüminyum kanatlar, pin-fin yapılar, metal köpükler, ısı boruları, nanopartikül katkıları ve farklı ısı iletkenliği artırıcı elemanlar yaygın şekilde incelenmiştir (Nayak et al., 2006; Saha et al., 2008; Sahoo et al., 2016). Bu çalışmalar, iletken yapıların FDM içerisindeki ısı yayılımını artırabildiğini ve erime sürecini hızlandırabildiğini göstermektedir. Ancak bu tür elemanların kullanılması, FDM hacminin bir kısmını azaltabilmekte ve dolayısıyla toplam gizli ısı depolama kapasitesi ile ısı transfer hızlandırma etkisi arasında bir tasarım dengesi gerektirmektedir (Al Siyabi et al., 2018; Arshad et al., 2022).

FDM tabanlı ısı alıcıların performansını artırmaya yönelik bir diğer yaklaşım ise tek bir FDM yerine farklı faz değişim sıcaklıklarına sahip birden fazla FDM'nin birlikte kullanılmasıdır. Çoklu veya kademeli FDM sistemlerinde, farklı erime sıcaklıklarına sahip malzemeler ısı transfer yönüne uygun şekilde yerleştirilerek daha kontrollü bir erime davranışı elde edilebilir (Al Siyabi et al., 2018; Nedumaran et al., 2022). Bu yaklaşım, tek FDM'nin belirli bir sıcaklık aralığına bağlı çalışma sınırlamasını azaltmayı ve ısı alıcı içindeki FDM hacminin daha dengeli kullanılmasını amaçlamaktadır. Özellikle kademeli FDM ısı alıcılarında, düşük ve yüksek erime sıcaklığına sahip FDM'lerin sıralanması, erime cephesinin ilerleme karakterini, sıcaklık dağılımını ve sistemin ısı depolama süresini doğrudan etkileyebilmektedir (Chang et al., 2025).

Çoklu FDM sistemlerinde malzeme seçimi kadar FDM katmanlarının sıralaması da kritik bir tasarım parametresidir. Isı kaynağına yakın konumlandırılan FDM'nin faz değişim sıcaklığı, sistemin ilk ısıl cevabını belirlerken, üst katmanlarda yer alan FDM'lerin erime sıcaklıkları ısıya daha uzak bölgelere taşınma ve depolanma karakterini etkilemektedir (Moustafa et al., 2025). Bu nedenle, aynı FDM malzemeleri kullanılsa bile farklı katman dizilimleri farklı erime süreleri, kütle kesri gelişimleri ve sıcaklık dağılımları oluşturabilir. Benzer şekilde soğutma veya donma sürecinde de FDM katmanlarının konumu, depolanan ısıya sistemden uzaklaştırılma hızını ve yeniden katılma davranışını değiştirebilir. Buna rağmen literatürdeki çalışmaların önemli bir kısmı tek FDM'li ısı alıcılar, kanat geometrisi optimizasyonu, metal köpük/nanopartikül katkıları veya yalnızca erime sürecinin iyileştirilmesi üzerine yoğunlaşmıştır. Çoklu FDM kullanılan çalışmalar mevcut olmakla birlikte, farklı FDM sıralamalarının aynı geometri ve aynı sınır şartları altında hem erime hem de donma süreçleri açısından karşılaştırılması hâlâ geliştirilmesi gereken bir araştırma alanıdır.

Bu çalışmada, farklı faz değişim sıcaklıklarına sahip üç FDM katmanından oluşan alüminyum çerçeveli bir ısı alıcının erime ve donma davranışı sayısal olarak incelenmektedir. İncelenen sistem iki boyutlu olarak modellenmiş olup, FDM bölgeleri 4 mm kalınlığında alüminyum çerçeve ve ara plakalarla sınırlandırılmıştır. Her FDM katmanı 20 mm kalınlığa ve 50 mm genişliğe sahiptir. Çalışmada iki farklı FDM dizilimi karşılaştırılmaktadır. Birinci dizilimde alt katmanda SP40, orta katmanda SP31 ve üst katmanda SP24 yer almaktadır. İkinci dizilimde ise alt katmanda yine SP40 bulunmakta, ancak orta ve üst katmanların sırası değiştirilerek orta katmana SP24, üst katmana SP31 yerleştirilmektedir. Böylece aynı FDM malzemeleri ve aynı alüminyum çerçeve yapısı kullanılarak, yalnızca katman sıralamasının sistem performansı üzerindeki etkisi araştırılmaktadır.

Erime analizinde sistem başlangıçta 20 °C sıcaklığa getirilmiş ve alt duvar sıcaklığı 46 °C olarak tanımlanmıştır. Donma analizinde ise başlangıç sıcaklığı 46 °C olarak alınmış ve alt duvar sıcaklığı 20 °C'ye düşürülmüştür. Her iki analizde de bir yan sınır simetri ekseni olarak kabul edilmiş, diğer sınırlar ise adyabatik olarak tanımlanmıştır. Faz

değişimi davranışının modellenmesinde, katı-sıvı geçişini sabit ağ yapısı üzerinde izlemeye imkân veren entalpi-gözeneklilik yaklaşımı esas alınmaktadır. Bu sayede, zamana bağlı sıcaklık dağılımları, kütle kesri gelişimi, erime/donma cephesinin ilerleyişi ve katmanlar arası ısıl etkileşimler karşılaştırmalı olarak değerlendirilebilmektedir.

Bu çalışmanın temel amacı, alüminyum çerçevesi katmanlı FDM ısı alıcısında FDM sıralamasının hem ısı depolama hem de ısı boşaltma davranışı üzerindeki etkisini ortaya koymaktır. Literatürdeki birçok çalışma FDM tabanlı ısı alıcıların genel performansını, kanatlı yapıların etkisini veya tek yönlü erime davranışını ele alırken, bu çalışmada SP40–SP31–SP24 ve SP40–SP24–SP31 dizilimleri aynı sınır şartları altında doğrudan karşılaştırılmaktadır. Bu yönüyle çalışma, çoklu FDM kullanımında yalnızca malzeme seçiminin değil, FDM katmanlarının konumsal düzeninin de ısı performans açısından belirleyici olduğunu göstermeyi hedeflemektedir.

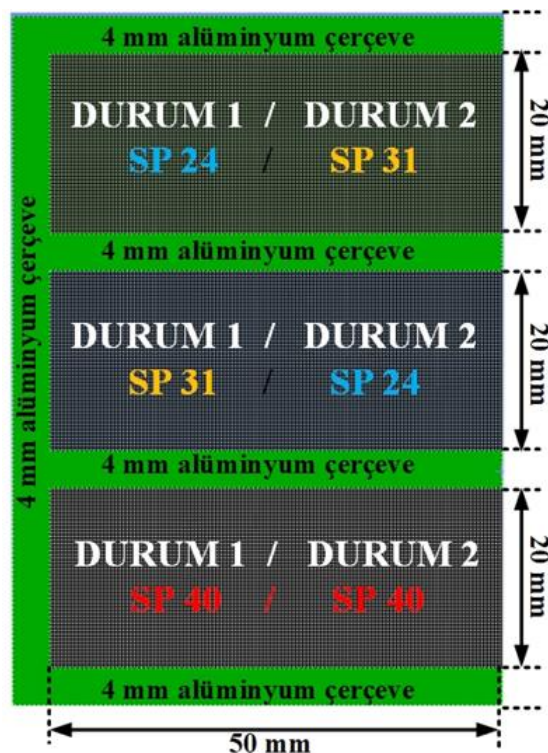
2. Materyal ve Metot

Bu çalışmada, farklı faz değişim sıcaklıklarına sahip üç FDM katmanından oluşan alüminyum çerçeveli bir ısı alıcının erime ve katılaşma davranışı ANSYS Fluent ortamında iki boyutlu olarak incelenmiştir. Geometrik model, elektronik soğutma uygulamalarında kullanılabilecek kompakt ve pasif bir ısı alıcı düzenini temsil edecek şekilde oluşturulmuştur.

2.1. Sayısal Model ve Fiziksel Geometri

Sayısal benzetimde FDM bölgeleri, 4 mm kalınlığında alüminyum çerçeve ve alüminyum ara plakalar ile sınırlandırılmıştır. Her bir FDM katmanı 20 mm yüksekliğe ve 50 mm genişliğe sahiptir. Böylece üç farklı FDM bölgesi, ısı transfer yönü boyunca kademeli olarak yerleştirilmiş ve katmanlar arası ısıl etkileşim alüminyum ara plakalar üzerinden sağlanmıştır.

Çalışmada iki farklı FDM dizilimi karşılaştırılmıştır. Birinci durumda alt katmanda SP40, orta katmanda SP31 ve üst katmanda SP24 yer almaktadır. İkinci durumda ise alt katmandaki SP40 sabit tutulmuş, orta ve üst katmanların yerleri değiştirilerek orta katmana SP24, üst katmana SP31 yerleştirilmiştir. Bu düzenleme ile aynı geometri, aynı toplam FDM hacmi ve aynı sınır şartları altında yalnızca FDM katman sıralamasının ısıl davranış üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir. İncelenen geometri ve iki farklı FDM dizilimi Şekil 1’de verilmiştir.



Şekil 1. Sayısal benzetimde kullanılan yapının ölçüleri ve ağ yapısı

2.2. Malzeme Özellikleri

FDM bölgeleri, farklı faz değişim sıcaklığına sahip SP40, SP31 ve SP24 tipi faz değiştiren malzemeler kullanılarak tanımlanmıştır. Literatürde SP serisi FDM'lerin bina soğutması, klima destekli termal enerji depolama, ısı değiştirici ve sayısal faz değişimi analizlerinde kullanıldığı; özellikle SP24E/SP24 ve SP31 gibi malzemelerin düşük sıcaklık aralıklı ısı depolama uygulamaları için raporlandığı görülmektedir (Ismail & Hassan, 2024; Muzhanje & Hassan, 2024; Salih et al., 2022). Bu çalışmada kullanılan termofiziksel değerler Tablo 1'de verilmiştir. Tablodaki değerler ANSYS Fluent modelinde sabit malzeme girdileri olarak kullanılmış; faz değişimi ise solidus ve liquidus sıcaklıkları arasında tanımlanan kütle kesri üzerinden hesaplanmıştır.

Tablo 2. Sayısal Benzetimde kullanılan FDM'lerin Termofiziksel Özellikleri

Termofiziksel Özellikler	SP40	SP31	SP24
[boussinesq] Özkütle (kg/m^3)	1500	1250	1500
Özgül Isı (J/kg.K)	2000	2000	2000
Isıl İletkenlik (W/m.k)	0,5	0,5	0,5
Dinamik viskozite (kg/m.s)	0,0055	0,0045	0,0035
Isıl Genleşme Katsayısı ($1/\text{K}$)	0,0008	0,00075	0,0007
Gizli Isısı (J/kg)	200000	190000	180000
Katılaşma Sıcaklığı (K)	311,15	302,15	295,15
Sıvılaşma Sıcaklığı (K)	315,15	305,15	297,15

Alüminyum çerçeve ve ara plakalar, FDM bölgeleri arasında iletim yoluyla ısı yayılımını artıran katı iletken bölgeler olarak modellenmiştir. Alüminyum bölgelerde yalnızca ısı iletimi çözülmüş, FDM bölgelerinde ise faz değişimiyle birlikte sıvı fazda oluşan doğal taşınım etkisi hesaba katılmıştır. Bu nedenle FDM bölgeleri için yoğunluk, özgül ısı, ısı iletkenliği, dinamik viskozite ve ısı genleşme katsayısı tanımlanmıştır. Isıl genleşme katsayısı, Boussinesq yaklaşımı ile sıvı FDM içerisindeki kaldırma kuvveti etkisini temsil etmek için kullanılmıştır.

2.3. Matematiksel Model ve Faz Değişimi Yaklaşımı

Sayısal çözüm zamana bağlı, iki boyutlu ve sonlu hacimler esasına dayalı olarak gerçekleştirilmiştir. FDM'nin sıvı fazında doğal taşınımın oluşmasına izin verilmiş, akış laminar ve sıkıştırılmaz kabul edilmiştir. Yerçekimi etkisi açık bırakılmış ve yoğunluk değişiminin kaldırma kuvveti üzerindeki etkisi Boussinesq yaklaşımı ile hesaba katılmıştır. Bu yaklaşımda yoğunluk, momentum denklemindeki kaldırma kuvveti teriminde sıcaklığa bağlı olarak aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$\rho = \rho_{ref}[1 - \alpha(T - T_{ref})] \quad (2.1)$$

Burada ρ_{ref} referans yoğunluğu, α ısı genleşme katsayısını ve T_{ref} referans sıcaklığını göstermektedir. Bu yaklaşım, FDM'nin sıvı fazında sıcaklık farkı nedeniyle oluşan yoğunluk değişimlerinin doğal taşınım hareketine etkisini hesaba katarken, akış alanının sıkıştırılmaz çözüm çerçevesinde ele alınmasına olanak sağlar. Erime ve katılaşma süreçleri ANSYS Fluent'te yer alan solidification/melting modeli ile çözülmüştür. Bu model, faz sınırını hareketli bir arayüz olarak doğrudan izlemek yerine entalpi-gözeneklilik yaklaşımını kullanır. Bu yaklaşımda her hücre için kütle kesri hesaplanır ve hücrenin katı, sıvı veya mushy bölge davranışı kütle kesrine göre belirlenir. Toplam entalpi, duyulur entalpi ve gizli ısı içeriğinin toplamı olarak tanımlanır:

$$H = h + \Delta H \quad (2.2)$$

Duyulur entalpi aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$h = h_{ref} + \int_{T_{ref}}^T c_p dT \quad (2.3)$$

Gizli ısı içeriği ise kütle kesrine bağlı olarak tanımlanmıştır:

$$\Delta H = \beta L \quad (2.4)$$

Burada H toplam entalpi, h duyulur entalpi, ΔH gizli ısı içeriği, c_p özgül ısı, L gizli ısı ve β kütle kesridir. Kütle kesri katılaşma sıcaklığı T_k ile sıvılaşma sıcaklığı T_s arasında doğrusal olarak tanımlanmıştır:

$$\beta = 0 \text{ ise } T < T_k \quad (2.5a)$$

$$\beta = \frac{T - T_k}{T_s - T_k} \text{ ise } T < T_k \quad (2.5b)$$

$$\beta = 1 \text{ ise } T > T_s \quad (2.5c)$$

Bu tanıma göre $\beta = 0$ tamamen katı bölgeyi, $\beta = 1$ tamamen sıvı bölgeyi, $0 < \beta < 1$ ise mushy bölgeyi temsil etmektedir. Enerji denklemi entalpi formunda aşağıdaki gibi çözülmüştür:

$$\frac{\partial(\rho H)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \nu H) = \nabla \cdot (k \nabla T) + S \quad (2.6)$$

Denklemden ν hız vektörü, k ısı iletkenlik ve S kaynak terimidir. Mushy bölgede kütle kesri azaldıkça akış direnci artacak şekilde gözenekli ortam yaklaşımı uygulanmış, tamamen katılaşmış bölgelerde hızın sıfıra yaklaşması sağlanmıştır. Bu bölümde momentum sönümlenme teriminin açık formu verilmemiş; faz değişimi modeli, Fluent'in entalpi-gözeneklilik temelli solidification/melting yaklaşımı üzerinden tanımlanmıştır.

2.4. Başlangıç ve Sınır Şartları

Aynı fiziksel model hem erime hem de katılaşma süreçleri için çözülmüştür. Erime analizinde tüm alan başlangıçta 20 °C sıcaklığa atanmış, alt duvar sıcaklığı ise 46 °C olarak tanımlanmıştır. Bu durumda ısı, alüminyum taban üzerinden FDM bölgelerine aktarılmış ve FDM katmanlarının zamana bağlı erime davranışı incelenmiştir. Katılaşma analizinde ise başlangıç sıcaklığı 46 °C olarak alınmış ve alt duvar sıcaklığı 20 °C'ye düşürülmüştür. Böylece sistemin ısı boşaltma sürecindeki katılaşma davranışı, erime analizinde kullanılan geometri ve sınır şartlarıyla tutarlı olacak şekilde değerlendirilmiştir. Her iki analizde de sağ sınır simetri sınırı olarak tanımlanmış, diğer dış sınırlar adyabatik kabul edilmiştir. FDM-alüminyum arayüzlerinde sıcaklık ve ısı akısı sürekliliği sağlanmış, katı cidarlarla temas eden FDM bölgelerinde kaymama sınır şartı uygulanmıştır.

2.5. Ağ Yapısı ve Çözüm Ayarları

Oluşturulan iki boyutlu hesaplama alanı yapılandırılmış/hücre tabanlı bir ağ ile ayrıklaştırılmıştır. Kullanılan ağ yapısında 25.969 düğüm ve 25.644 eleman bulunmaktadır. Aynı ağ yapısı her iki FDM dizilimi için de korunmuş, böylece hesaplanan farkların ağ değişiminden değil, FDM katman sıralamasından kaynaklanması sağlanmıştır. Geçici çözümde zaman adımı 0,2 s olarak tanımlanmış ve çözüm erime ve/veya katılaşma tamamlanana kadar devam ettirilmiştir. Her zaman adımı için en fazla 20 iterasyon tanımlanmış ve raporlama aralığı 1 olarak seçilmiştir. Basınç-hız bağlaşımı SIMPLE algoritması ile sağlanmıştır. Gradyan terimleri Least Squares Cell Based yöntemiyle, basınç ayrıklaştırması PRESTO! yöntemiyle, momentum ve enerji denklemleri ise Second Order Upwind şemasıyla ayrıklaştırılmıştır. Zamansal ayrıklaştırmada First Order Implicit formülasyonu kullanılmıştır.

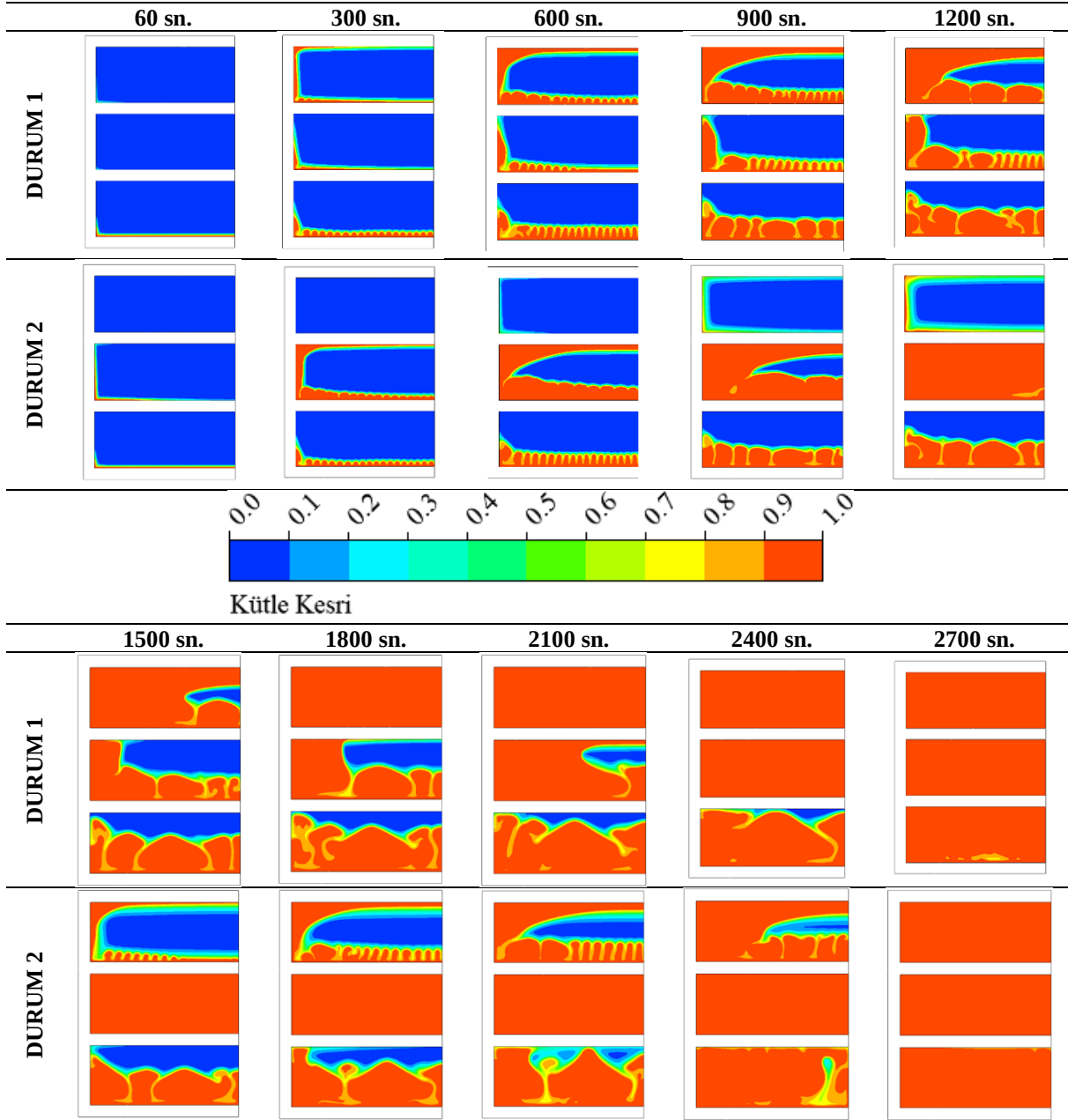
3. Sonuçlar ve Tartışma

Bu bölümde, alüminyum çerçeveli katmanlı FDM ısı alıcısının erime ve katılaşma davranışları iki farklı FDM dizilimi için karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Durum 1 için katman sıralaması üstten alta doğru SP24-SP31-SP40, Durum 2 için ise SP31-SP24-SP40 şeklindedir. Her iki durumda da alt katmanda SP40 sabit tutulmuş, orta ve üst katmanlarda SP24 ile SP31'in konumu değiştirilmiştir. Böylece aynı geometri, aynı alüminyum çerçeve yapısı ve aynı sınır şartları altında FDM katman sıralamasının ısı cevap üzerindeki etkisi incelenmiştir.

Grafiklerde verilen kütle kesri ve sıcaklık değerleri, her bir FDM bölgesi için Fluent üzerinden elde edilen alan ortalamalı (area-averaged) değerlerdir. Bu nedenle eğriler, ilgili FDM katmanının tek bir noktasındaki yerel davranış değil, katmanın tamamı üzerinden hesaplanan ortalama ısı durumu temsil etmektedir. Kontur görsellerinde ise kütle kesri dağılımı zamana bağlı olarak verilmiş olup, renk skalasında 0 değeri katı fazı, 1 değeri ise sıvı fazı ifade etmektedir.

3.1. Erime sürecinde kütle kesri dağılımı

Erime sürecine ait kütle kesri konturları Şekil 2'de verilmiştir. Her iki FDM diziliminde de erime başlangıçta alt alüminyum tabana ve alüminyum ara yüzeylere yakın bölgelerde meydana gelmektedir. Bunun temel nedeni, ısıtının sisteme alt yüzeyden verilmesi ve alüminyum çerçevenin yüksek ısı iletkenliği sayesinde ısıtının FDM katmanlarına iletilmesidir.



Şekil 2. Durum 1 ve Durum 2 için erime sürecinde kütle kesri dağılımlarının zamana bağlı değişimi

Erime sürecinin ilk aşamalarında ısı transferi ağırlıklı olarak iletim mekanizmasıyla gerçekleşirken, sıvı faz hacminin artmasıyla birlikte doğal taşınım etkisi belirginleşmektedir. Yerçekimi etkisinin ve Boussinesq yaklaşımının modele dahil edilmesi, sıvı faz içerisindeki yoğunluk farklarına bağlı akış hareketlerini hesaba katmakta ve bu nedenle erime cephesi ilerleyen zamanlarda daha düzensiz bir biçim almaktadır.

Durum 1’de SP40 alt katmanda, SP31 orta katmanda ve SP24 üst katmanda yer almaktadır. SP40 ısıtılan tabana en yakın konumda olmasına rağmen daha yüksek faz değişim sıcaklığına sahip olduğundan, bu katmanda tam sıvılaşma daha uzun sürede gerçekleşmektedir. Buna karşılık SP24, üst katmanda bulunmasına rağmen daha düşük faz değişim sıcaklığı nedeniyle erime sürecinde erken aktive olmaktadır. Bu durum, faz değişim sıcaklığının katman konumu kadar önemli olduğunu göstermektedir. Konturlarda özellikle orta ve üst bölgelerde sıvı fazın zamanla genişlediği, ancak bu genişlemenin her katmanda aynı hızda gerçekleşmediği görülmektedir.

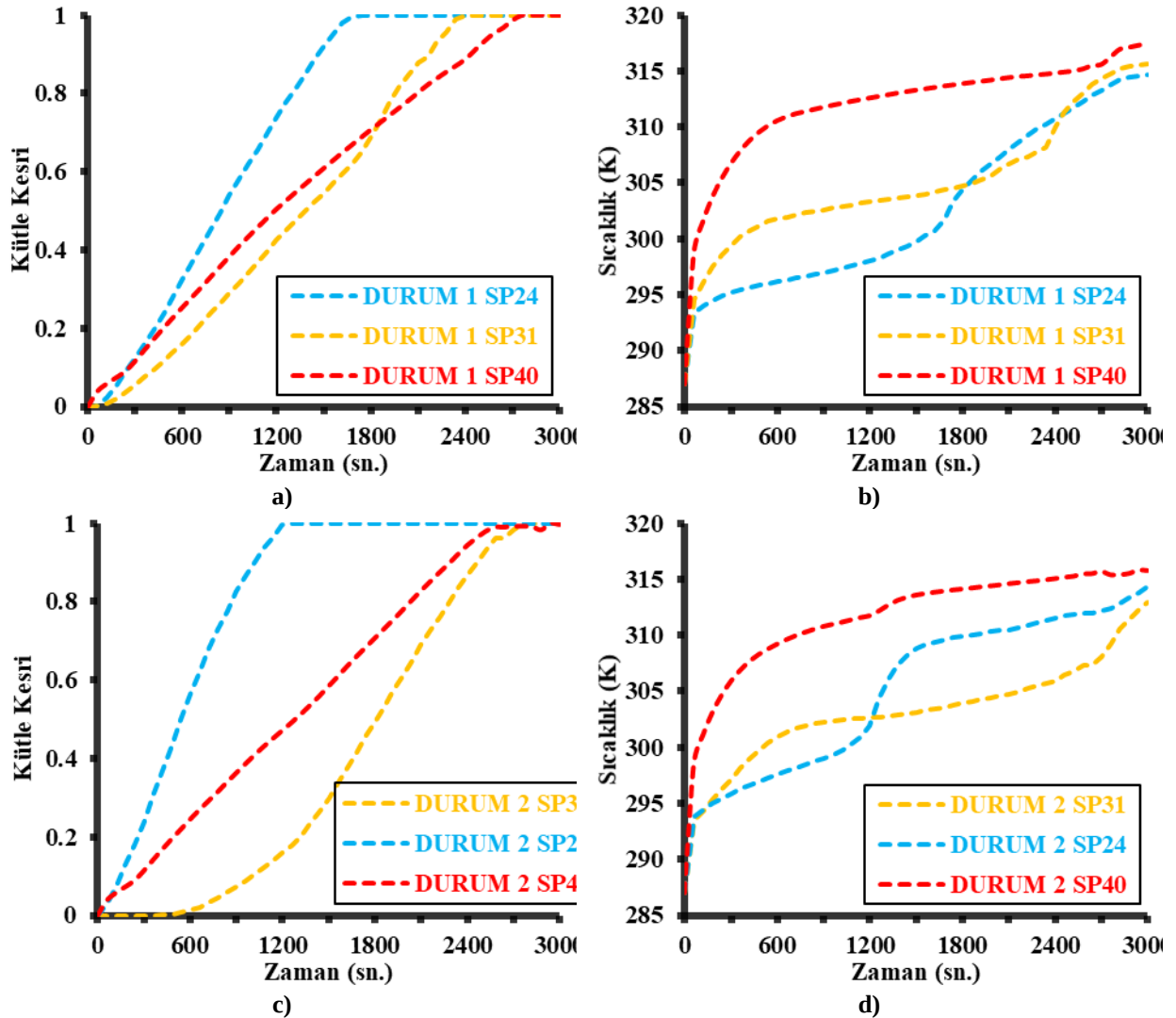
Durum 2’de ise SP24 orta katmana, SP31 ise üst katmana yerleştirilmiştir. Bu dizilimde SP24, Durum 1’e göre ısıtılan tabana daha yakın hale gelmiştir. Bu nedenle düşük faz değişim sıcaklığına sahip olan SP24 katmanı daha erken ve daha hızlı sıvılaşmaktadır.

Üst katmandaki SP31 ise SP24'e göre daha yüksek faz değişim sıcaklığına sahip olduğundan, üst bölgede sıvılaşma daha geç tamamlanmaktadır. Dolayısıyla aynı FDM malzemeleri kullanılsa bile, yalnızca SP24 ve SP31'in konumlarının değiştirilmesi erime cephesinin gelişimini ve katmanların faz değişimine katılma zamanını değiştirmiştir.

Şekil 2 genel olarak değerlendirildiğinde, alüminyum ara plakaların yalnızca katmanları ayıran pasif elemanlar olmadığı, aynı zamanda ısının katmanlar arasında yayılmasını destekleyen iletken yollar oluşturduğu görülmektedir. Buna bağlı olarak erime cephesi yalnızca alt yüzeyden yukarı doğru tekdüze ilerlememekte, alüminyum ara yüzeylere yakın bölgelerde de gelişmektedir. Bu davranış, katmanlı FDM ısı alıcılarında çerçeve ve ara plaka tasarımının faz değişim dinamiği üzerinde etkili olduğunu göstermektedir.

3.2. Erime sürecinde alan ortalamalı kütle kesri ve sıcaklık değişimleri

Şekil 3'te erime sürecinde her bir FDM katmanı için alan ortalamalı kütle kesri ve alan ortalamalı sıcaklık değişimleri verilmiştir. Alan ortalamalı kütle kesri eğrileri, her FDM katmanının toplam alanı içinde sıvı fazın zamana bağlı ortalama oranını göstermektedir. Bu nedenle kütle kesrinin 1 değerine ulaşması, ilgili FDM katmanının alan ortalaması bakımından tamamen sıvı faza geçtiğini; 0 değerine yakın olması ise katmanın büyük ölçüde katı fazda kaldığını ifade etmektedir.



Şekil 3. Erime sürecinde FDM katmanlarının zamana bağlı alan ortalamalı kütle kesri ve alan ortalamalı sıcaklık değişimleri: (a) Durum 1 kütle kesri, (b) Durum 1 sıcaklık, (c) Durum 2 kütle kesri ve (d) Durum 2 sıcaklık

Durum 1’de SP24 katmanının kütle kesri diğer katmanlara göre daha hızlı artmakta ve yaklaşık 1500 s civarında 1 değerine ulaşmaktadır. SP24’ün üst katmanda bulunmasına rağmen daha erken erimesi, bu FDM’nin daha düşük faz değişim sıcaklığına sahip olmasıyla açıklanabilir. SP31 katmanında kütle kesri artışı daha kademeli gerçekleşmekte ve tam sıvılaşma daha geç tamamlanmaktadır. SP40 ise ısıtılan tabana en yakın konumda yer almasına rağmen, yüksek faz değişim sıcaklığı nedeniyle erime sürecinin sonuna doğru tamamen sıvı hale gelmektedir. Bu sonuç, yalnızca ısı kaynağına yakınlığın değil, FDM’nin faz değişim aralığının da erime sırasını belirlediğini ortaya koymaktadır.

Durum 1’e ait sıcaklık eğrileri incelendiğinde, SP40 katmanının sıcaklığının başlangıçta hızlı yükseldiği görülmektedir. Bu davranış, SP40’ın doğrudan ısıtılan tabana komşu olmasıyla ilişkilidir. Buna karşın SP40’ın kütle kesri artışı sıcaklık artışına göre daha yavaş gerçekleşmektedir. Bunun nedeni, SP40’ın faz değişim sıcaklığının diğer iki FDM’ye göre daha yüksek olmasıdır. SP24 ve SP31 katmanlarında ise sıcaklık artışı faz değişimi süresince daha sınırlı bir eğim göstermekte, verilen ısıнын önemli bir bölümü duyulur sıcaklık artışı yerine gizli ısı depolamasına harcanmaktadır.

Durum 2’de SP24’ün orta katmana yerleştirilmesi, bu katmanın ısı kaynağına olan ısı mesafesini azaltmıştır. Bu nedenle SP24 katmanının alan ortalamalı kütle kesri Durum 1’e göre daha hızlı artmakta ve yaklaşık 1200 s civarında tam sıvılaşmaya ulaşmaktadır. Buna karşılık SP31’in üst katmana alınması, bu katmanın erime sürecinin gecikmesine neden olmuştur. Kütle kesri eğrilerindeki bu farklılık, katman sıralamasının özellikle düşük faz değişim sıcaklığına sahip FDM’nin erken dönem ısı cevabı üzerinde belirgin etkisi olduğunu göstermektedir.

Durum 2’ye ait sıcaklık eğrilerinde SP40’ın yine en hızlı ısınan katman olduğu görülmektedir. Ancak SP24’ün orta katmanda bulunması, bu katmanda sıcaklık artışının ve sıvılaşmanın daha erken başlamasını sağlamıştır. SP31 üst katmanda bulunduğu için sıcaklık artışı daha yavaş gelişmekte ve alan ortalamalı kütle kesri daha geç 1 değerine ulaşmaktadır. Bu sonuçlar birlikte değerlendirildiğinde, erime sürecinde Durum 2’nin özellikle orta katmandaki SP24’ün erken aktive olması bakımından avantaj sağladığı, ancak toplam erime tamamlanma süresi bakımından iki durum arasında çok büyük bir fark oluşmadığı söylenebilir.

Erime grafikleri ile kontur dağılımları birbiriyle uyumlu sonuçlar vermektedir. Konturlarda gözlenen sıvı faz ilerlemesi, alan ortalamalı kütle kesri eğrilerindeki artışlarla desteklenmektedir. Sıcaklık eğrilerinde faz değişim aralıklarında görülen eğim azalması ise FDM’lerin gizli ısı depolama davranışını yansıtmaktadır.

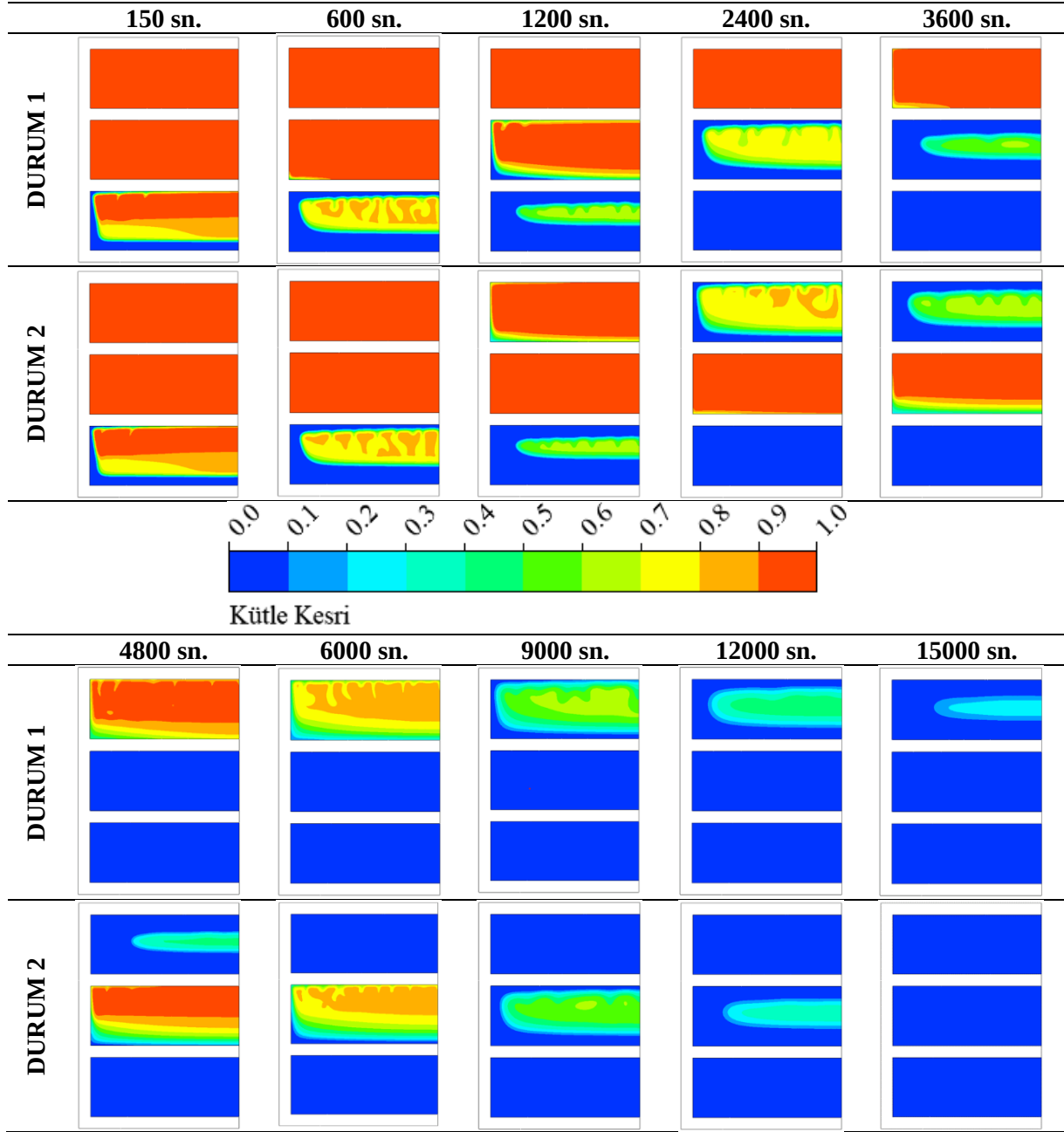
3.3. Katılma sürecinde kütle kesri dağılımı

Katılma sürecine ait kütle kesri konturları Şekil 4’te verilmiştir. Katılma analizinde sistem başlangıçta yüksek sıcaklıkta sıvı fazda kabul edilmiş ve ısı taban yüzeyinden uzaklaştırılmıştır. Bu nedenle her iki durumda da katılma öncelikle alt bölgede başlamaktadır. Soğutulan tabana komşu olan SP40 katmanı, hem konumu hem de yüksek faz değişim sıcaklığı nedeniyle sıvı fazdan katı faza en hızlı geçen katman olmuştur. Katı tabakanın oluşmasıyla birlikte üst katmanlardan tabana doğru gerçekleşen ısı transferi daha dirençli hale gelmekte ve üst bölgelerde katılma daha uzun sürede tamamlanmaktadır.

Durum 1’de SP24 üst katmanda yer almaktadır. SP24’ün soğutulan tabana en uzak konumda bulunması ve düşük faz değişim sıcaklığına sahip olması, bu katmanın katılma sürecinin son aşamasını kontrol etmesine neden olmaktadır. Kontur dağılımlarında alt ve orta katmanlarda kütle kesrinin zamanla azaldığı, buna karşın üst katmandaki SP24 bölgesinde sıvı fazın daha uzun süre korunduğu görülmektedir. Bu durum, Durum 1’de toplam katılma süresinin büyük ölçüde üst SP24 katmanı tarafından belirlendiğini göstermektedir.

Durum 2’de SP24 orta katmana alınmış, SP31 ise üst katmana yerleştirilmiştir. Bu dizilimde SP24, Durum 1’e kıyasla soğutma yüzeyine daha yakın olduğundan bu katmandan ısının uzaklaştırılması daha etkin hale gelmiştir. Üst katmanda bulunan SP31, konum olarak soğutma yüzeyine daha uzak olmasına rağmen SP24’e göre daha yüksek faz değişim sıcaklığına sahiptir. Bu nedenle SP31’in katılma süreci, üstte bulunmasına rağmen SP24’e kıyasla daha erken gelişebilmektedir. Böylece Durum 2’de katılma süreci daha dengeli ilerlemekte ve düşük faz değişim sıcaklığına sahip SP24’ün üstte oluşturduğu geciktirici etki azaltılmaktadır.

Katılma konturları, erime sürecine göre daha uzun bir faz değişim periyodu ortaya koymaktadır. Bunun temel nedeni, soğutma sırasında katılan FDM bölgelerinin zamanla ek bir ısı direnç oluşturması ve üst katmanlardan tabana doğru ısı aktarımını sınırlamasıdır. Ayrıca sıvı faz miktarı azaldıkça doğal taşınım etkisi zayıflamakta ve ısı transferi giderek daha fazla iletim mekanizmasına bağlı hale gelmektedir. Bu nedenle katılma cephesinin ilerleyişi özellikle üst katmanlarda yavaşlamaktadır.

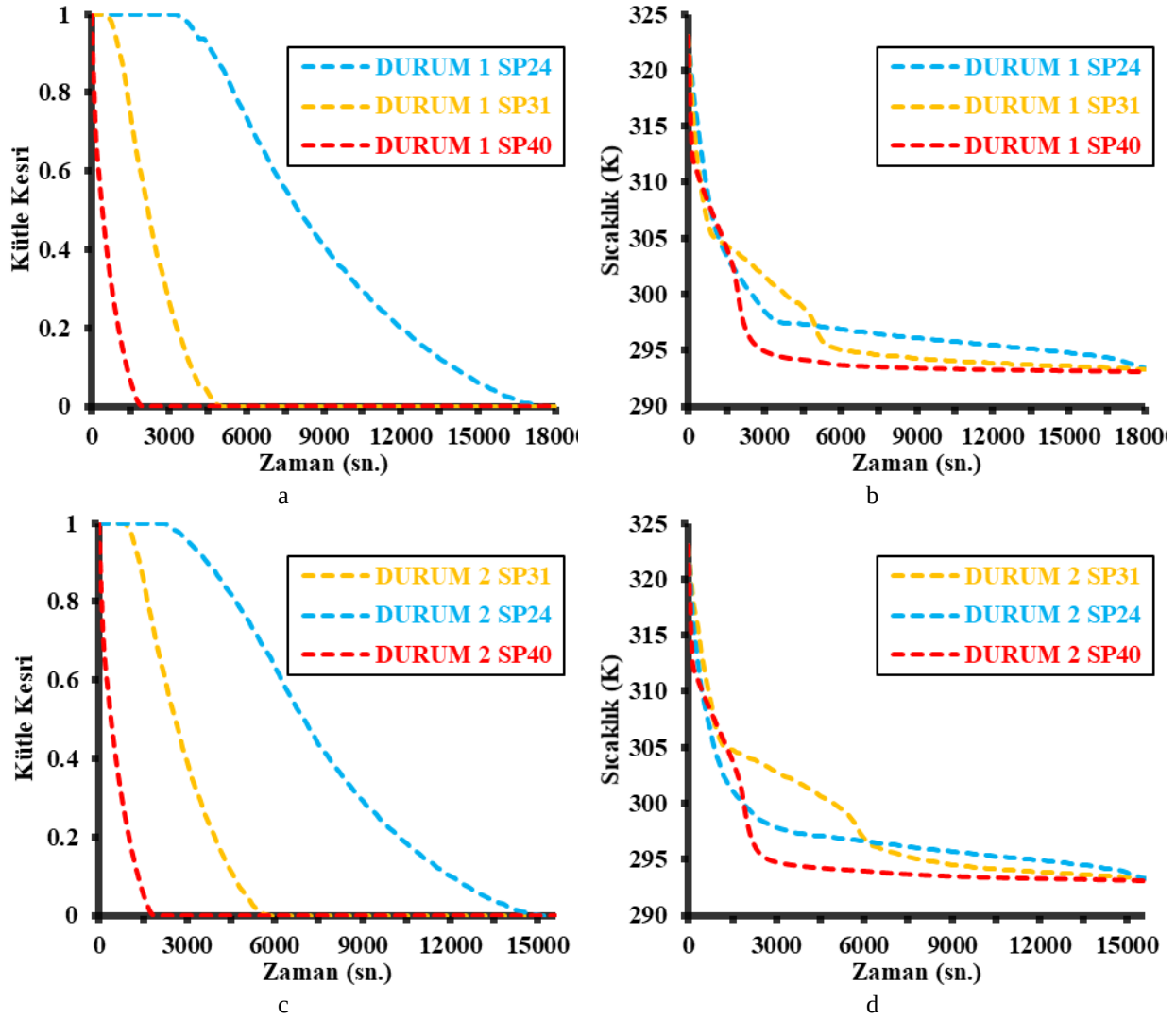


Şekil 4. Durum 1 ve Durum 2 için katılma sürecinde kütle kesri dağılımlarının zamana bağlı değişimi

3.4. Katılma sürecinde alan ortalamalı kütle kesri ve sıcaklık değişimleri

Şekil 5'te katılma sürecinde her bir FDM katmanı için alan ortalamalı kütle kesri ve alan ortalamalı sıcaklık değişimleri verilmiştir. Alan ortalamalı kütle kesri eğrilerinde başlangıçta tüm FDM katmanları sıvı fazda olduğundan değerler 1'e yakındır. Zaman ilerledikçe ısı taban yüzeyinden uzaklaştırılmakta ve ilgili FDM katmanlarının kütle kesri azalarak 0 değerine yaklaşmaktadır. Bu değerler, her katmanın alan ortalaması bakımından katılma düzeyini temsil etmektedir.

Durum 1'de SP40 katmanının kütle kesri kısa sürede azalarak 0 değerine yaklaşmaktadır. Bu sonuç, SP40'ın doğrudan soğutulan tabana komşu olmasından kaynaklanmaktadır. SP31 katmanında katılma daha kademeli gerçekleşirken, SP24 katmanı en uzun süre sıvı fazda kalan bölge olmuştur. SP24'ün üst katmanda bulunması ve düşük faz değişim sıcaklığına sahip olması, bu katmandan ısının uzaklaştırılmasını geciktirmektedir. Bu nedenle Durum 1'de tam katılmanın yaklaşık 18000 s civarında tamamlandığı görülmektedir.



Şekil 5. Katılma sürecinde FDM katmanlarının zamana bağlı alan ortalama kütle kesri ve alan ortalama sıcaklık değişimleri: (a) Durum 1 kütle kesri, (b) Durum 1 sıcaklık, (c) Durum 2 kütle kesri ve (d) Durum 2 sıcaklık

Durum 1'e ait sıcaklık eğrileri, kütle kesri değişimleriyle uyumlu bir eğilim göstermektedir. SP40'ın alan ortalama sıcaklığı başlangıçta hızlı bir şekilde düşmekte ve kısa sürede soğutma sıcaklığına yaklaşmaktadır. SP31 ve özellikle SP24 katmanlarında ise sıcaklık düşüşü daha yavaş gerçekleşmektedir. SP24 sıcaklığının uzun süre daha yüksek seviyelerde kalması, bu katmanda hem konumsal uzaklık hem de düşük faz değişim sıcaklığı nedeniyle ısı boşaltımının geciktiğini göstermektedir. Faz değişimi sırasında sıcaklık eğrilerinde gözlenen yavaşlama, gizli ısı salımıyla ilişkilidir.

Durum 2'de de SP40 katmanı en hızlı katılma bölgesidir. Ancak Durum 1'den farklı olarak SP24 orta katmana taşındığı için bu katmanın kütle kesri daha erken azalmaya başlamaktadır. SP31 üst katmanda yer almasına rağmen daha yüksek faz değişim sıcaklığı sayesinde SP24'e göre daha kısa sürede katılabilir. Alan ortalama kütle kesri eğrileri, Durum 2'de SP24'ün katılma süresinin Durum 1'e kıyasla azaldığını ve toplam katılmanın yaklaşık 15000 s civarında tamamlandığını göstermektedir.

Durum 2'ye ait sıcaklık değişimleri de bu yorumu desteklemektedir. SP40'ın sıcaklığı her iki durumda olduğu gibi hızlı düşmekte, SP24 ve SP31 katmanlarında ise katılma sürecine bağlı olarak daha kademeli bir sıcaklık azalması görülmektedir. SP24'ün orta katmana alınması, bu katmanın soğutma yüzeyine göre daha elverişli bir ısı konuma gelmesini sağlamış ve Durum 1'e göre daha kısa sürede katılmasına katkı sağlamıştır. Bu nedenle katılma performansı açısından Durum 2'nin Durum 1'e göre daha avantajlı bir dizilim sunduğu değerlendirilebilir.

3.5. Erime ve Katılma Davranışlarının Genel Karşılaştırılması

Erime ve katılma sonuçları birlikte değerlendirildiğinde, FDM katman sıralamasının sistemin zamana bağlı ısı cevabı üzerinde belirgin bir etkiye sahip olduğu görülmektedir. Erime sürecinde iki dizilim için toplam erime süreleri birbirine yakın olmakla birlikte, katmanların faz değişimine katılma sırası ve alan ortalamalı kütle kesri gelişimleri farklılık göstermektedir. Durum 2’de SP24’ün orta katmana yerleştirilmesi, düşük faz değişim sıcaklığına sahip bu FDM’nin daha erken sıvılaşmasını sağlamıştır. Buna karşılık SP31’in üst katmana alınması, bu katmandaki erime sürecini geciktirmiştir.

Katılma sürecinde ise iki dizilim arasındaki fark daha belirgindir. Durum 1’de düşük faz değişim sıcaklığına sahip SP24’ün üst katmanda bulunması, sistemin tamamen katılmasını geciktiren temel etken olmuştur. Durum 2’de SP24’ün orta katmana alınmasıyla bu geciktirici etki azalmış ve toplam katılma süresi kısalmıştır. Dolayısıyla aynı FDM malzemeleri kullanılsa bile, FDM katmanlarının soğutma ve ısıtma yüzeylerine göre konumlandırılması sistem performansını değiştirmektedir.

Bu çalışma kapsamında elde edilen bulgular, katmanlı FDM ısı alıcılarında tasarımın yalnızca FDM seçimi ile sınırlı olmadığını göstermektedir. Faz değişim sıcaklığı, alüminyum ara plakalarla sağlanan iletim yolu, doğal taşınım etkisi ve FDM katmanlarının konumsal düzeni birlikte değerlendirilmelidir. Özellikle hem ısı depolama hem de ısı boşaltma süreçlerinin önemli olduğu uygulamalarda, düşük faz değişim sıcaklığına sahip FDM’nin en uzak bölgede konumlandırılması katılma süresini uzatabilmektedir. Bu nedenle Durum 2 dizilimi, özellikle katılma/ısı boşaltma davranışı bakımından daha dengeli bir performans sergilemektedir.

4. Sonuç

Bu çalışmada, farklı faz değişim sıcaklıklarına sahip üç FDM katmanından oluşan alüminyum çerçeveli iki boyutlu bir ısı alıcısının erime ve katılma davranışı sayısal olarak incelenmiştir. Aynı geometri ve sınır şartları altında iki farklı FDM dizilimi karşılaştırılmıştır. Birinci durumda alt katmanda SP40, orta katmanda SP31 ve üst katmanda SP24 yer alırken; ikinci durumda alt katman SP40 olarak sabit tutulmuş, orta ve üst katmanların sırası değiştirilerek SP24 orta katmana, SP31 ise üst katmana yerleştirilmiştir. Sayısal analizlerden elde edilen kütle kesri ve sıcaklık eğrileri, her FDM bölgesi için alan ortalamalı değerler esas alınarak değerlendirilmiştir.

Erime sonuçları, ısıtının sisteme alt alüminyum yüzeyden verilmesi nedeniyle faz değişiminin öncelikle tabana ve alüminyum ara yüzeylere yakın bölgelerde başladığını göstermiştir. Erimenin ilk aşamalarında ısı transferi daha çok iletim etkisiyle gerçekleşirken, sıvı faz hacminin artmasıyla birlikte doğal taşınım etkisi belirginleşmiş ve erime cephesi daha düzensiz bir yapıya dönüşmüştür. Bu durum, Boussinesq yaklaşımıyla hesaba katılan yoğunluk değişimlerinin sıvı FDM içerisindeki akış yapısını etkilediğini göstermektedir.

Erime sürecinde SP40 katmanı her iki durumda da ısıtılan tabana en yakın konumda bulunduğu en yüksek sıcaklık seviyelerine ulaşmıştır. Ancak SP40’ın faz değişim sıcaklığının diğer FDM’lere göre daha yüksek olması, bu katmanın tamamen sıvı hale gelmesini geciktirmiştir. SP24 ise düşük faz değişim sıcaklığı nedeniyle erken dönemde aktif hale gelmiştir. Durum 1’de üst katmanda bulunan SP24 yaklaşık 1500 s civarında tamamen sıvılaşırken, Durum 2’de orta katmana alınan SP24’ün tam sıvılaşması yaklaşık 1200 s civarında gerçekleşmiştir. Bu sonuç, düşük faz değişim sıcaklığına sahip FDM’nin ısı kaynağına daha yakın konumlandırılmasının erken dönem erime davranışını hızlandırdığını göstermektedir. Erime analizlerinde toplam erime süresi açısından iki dizilim arasında belirgin bir fark oluşmamıştır. Her iki durumda da sistemin büyük ölçüde sıvı faza geçişi yaklaşık 2700–3000 s aralığında tamamlanmıştır. Buna karşılık katmanların erime sırası, alan ortalamalı kütle kesri gelişimi ve sıcaklık seviyeleri dizilime bağlı olarak değişmiştir. Bu nedenle erime açısından FDM sıralamasının temel etkisi toplam erime süresinden çok, FDM katmanlarının ısı depolama sürecine hangi sırayla ve hangi hızda katıldığını belirlemesidir.

Katılma sürecinde ısı taban yüzeyinden uzaklaştırıldığı için katılma öncelikle alt bölgede başlamıştır. Her iki durumda da SP40 katmanı soğutulan tabana en yakın bölgede bulunduğu en hızlı katılma FDM olmuştur. SP31 katmanı daha sonraki aşamada katılırken, SP24 katmanı düşük faz değişim sıcaklığı nedeniyle katılma sürecinin son aşamasını kontrol eden katman olarak davranmıştır. Bu davranış, alan ortalamalı kütle kesri eğrileriyle de uyumludur.

Katılma sonuçları iki dizilim arasındaki farkın erime sürecine göre daha belirgin olduğunu göstermiştir. Durum 1’de SP24 üst katmanda bulunduğu, hem soğutma yüzeyine olan ısı mesafesi artmış hem de düşük faz değişim sıcaklığı nedeniyle katılması gecikmiştir. Bu nedenle Durum 1’de tam katılma yaklaşık 18000 s civarında tamamlanmıştır. Durum 2’de ise SP24’ün orta katmana taşınması, bu katmanın soğutma yüzeyine olan etkin ısı direncini azaltmış ve tam katılma süresini yaklaşık 15000 s seviyesine düşürmüştür. Bu durum, katılma süresi bakımından yaklaşık %16–17 oranında bir iyileşmeye karşılık gelmektedir.

Elde edilen sonuçlar, katmanlı FDM ısı alıcılarında yalnızca kullanılan FDM malzemelerinin faz değişim sıcaklıklarının değil, bu malzemelerin ısıtma ve soğutma yüzeylerine göre konumsal yerleşimlerinin de performans üzerinde belirleyici olduğunu ortaya koymaktadır. Erime sürecinde iki dizilim benzer toplam tamamlanma süreleri verirken, katılma sürecinde SP24’ün orta katmana yerleştirildiği Durum 2 daha hızlı ısı boşaltma ve daha kısa

yeniden katılma süresi sağlamıştır. Bu nedenle, tekrarlı ısı yüklerine maruz kalan elektronik soğutma uygulamalarında sistemin bir sonraki çevrime daha kısa sürede hazırlanması açısından Durum 2 diziliminin daha avantajlı olduğu değerlendirilmektedir.

Sonuç olarak, SP40–SP24–SP31 dizilimi özellikle katılma/ısı boşaltma performansı açısından daha uygun bir düzenleme sunarken, SP40–SP31–SP24 dizilimi erime sürecinde katmanların daha farklı bir sırayla aktive olmasına neden olmuştur. Bu bulgular, çok katmanlı FDM tabanlı pasif ısı alıcılarının tasarımında FDM sıralamasının bağımsız bir tasarım parametresi olarak dikkate alınması gerektiğini göstermektedir. Gelecek çalışmalarda modelin deneysel verilerle doğrulanması, üç boyutlu etkilerin incelenmesi, sabit sıcaklık yerine farklı ısı akısı sınır şartlarının uygulanması ve FDM/alüminyum kalınlık oranlarının optimizasyonu ile sistem performansı daha kapsamlı şekilde değerlendirilebilir.

Yazarların Katkıları

Halil İbrahim Yamaç: Makale taslağını hazırladı ve yazdı, benzetim gerçekleştirdi ve sonuç çözümlemesi yaptı, sonuçlarını yorumladı.

Etik

Bu makalenin yayınlanmasının ardından herhangi bir etik sorun ortaya çıkmamıştır.

Kaynaklar

- Al Siyabi, I., Khanna, S., Mallick, T., & Sundaram, S. (2018). Multiple Phase Change Material (PCM) Configuration for PCM-Based Heat Sinks- An Experimental Study. *Energies*, 11(7). <https://doi.org/10.3390/en11071629>
- Arshad, A., Jabbar, M., Faraji, H., Talebizadehsardari, P., Bashir, M. A., & Yan, Y. (2022). Thermal performance of a phase change material-based heat sink in presence of nanoparticles and metal-foam to enhance cooling performance of electronics. *Journal of Energy Storage*, 48(December 2021), 103882. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103882>
- Baby, R., & Balaji, C. (2012). Experimental investigations on phase change material based finned heat sinks for electronic equipment cooling. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 55(5–6), 1642–1649. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2011.11.020>
- Chang, S., Liu, B., Gao, X., Li, X., Meng, Y., & Hu, H. (2025). Numerical thermal analysis and structural optimization of cascaded PCM heat sinks for thermal management of electronics. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 236(P1), 126301. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2024.126301>
- Fok, S. C., Shen, W., & Tan, F. L. (2010). Cooling of portable hand-held electronic devices using phase change materials in finned heat sinks. *International Journal of Thermal Sciences*, 49(1), 109–117. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2009.06.011>
- Hosseinzadeh, S. F., Tan, F. L., & Moosania, S. M. (2011). Experimental and numerical studies on performance of PCM-based heat sink with different configurations of internal fins. *Applied Thermal Engineering*, 31(17–18), 3827–3838. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2011.07.031>
- Ismail, M., & Hassan, H. (2024). Enhancing Air Conditioning System Performance via Dual Phase Change Materials Integration: Seasonal Efficiency and Capsulation Structure Impact. *International Journal of Thermophysics*, 45(8), 1–25. <https://doi.org/10.1007/s10765-024-03407-2>
- Kandasamy, R., Wang, X. Q., & Mujumdar, A. S. (2007). Application of phase change materials in thermal management of electronics. *Applied Thermal Engineering*, 27(17–18), 2822–2832. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2006.12.013>
- Mahmoud, S., Tang, A., Toh, C., AL-Dadah, R., & Soo, S. L. (2013). Experimental investigation of inserts configurations and PCM type on the thermal performance of PCM based heat sinks. *Applied Energy*, 112, 1349–1356. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.04.059>
- Maqbool, Z., Hanief, M., & Parveez, M. (2023). Review on performance enhancement of phase change material based heat sinks in conjugation with thermal conductivity enhancers for electronic cooling. *Journal of Energy Storage*, 60(June 2022), 106591. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.106591>
- Moustafa, S., Wei, G., El-Hamid, M. A., Sun, F., & Du, X. (2025). Comparative study of different multilayered PCM finned heat sinks using low melting point alloys and paraffin: A numerical analysis. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 112(December 2024), 109752. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2025.109752>
- Muzhanje, A. T., & Hassan, H. (2024). Thermo-physical properties of nanoparticle-enhanced phase change materials for winter and summer energy storage applications: Experimental work. *Journal of Energy Storage*, 97(PB), 112937. <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.112937>
- Nayak, K. C., Saha, S. K., Srinivasan, K., & Dutta, P. (2006). A numerical model for heat sinks with phase change materials and thermal conductivity enhancers. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 49(11–12), 1833–1844. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2005.10.039>
- Nedumaran, M. S., Nagarajan, G., & Hooman, K. (2022). Numerical analysis of multiple phase change materials based heat sink with angled thermal conductivity enhancer. *Journal of Energy Storage*, 55(PA), 105316. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.105316>
- Saha, S. K., Srinivasan, K., & Dutta, P. (2008). Studies on Optimum Distribution of Fins in Heat Sinks Filled With Phase Change Materials. *Journal of Heat Transfer*, 130(3). <https://doi.org/10.1115/1.2804948>
- Sahoo, S. K., Das, M. K., & Rath, P. (2016). Application of TCE-PCM based heat sinks for cooling of electronic components: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 59, 550–582. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.238>
- Salih, S. S. O., Hamakhan, I. I. A., & Abdulkader, A. A. A. (2022). Investigation of Thermal Performance of 3D Printing Integrated Phase Change Materials in Building Structure. *International Journal of Heat and Technology*, 40(3), 843–848. <https://doi.org/10.18280/ijht.400325>
- Tan, F. L., & Tso, C. P. (2004). Cooling of mobile electronic devices using phase change materials. *Applied Thermal Engineering*, 24(2–3), 159–169. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2003.09.005>
- Wang, S. J., Devahastin, S., & Mujumdar, A. S. (2005). A numerical investigation of some approaches to improve mixing in laminar confined impinging streams. *Applied Thermal Engineering*, 25(2–3), 253–269. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2004.06.015>