

Basınçlı döküm prosesinde iki farklı soğutma kanallı kalıpların döküm-kalıp arayüzey ısı transfer katsayısının nümerik olarak incelenmesi

Numerical investigation of casting-mold interfacial heat transfer coefficient of molds with two different cooling channels in pressure casting process

Mehmet KAN^{*1,a}, Murat KORU^{2,b} Osman İPEK^{1,c}

¹Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 32260, Isparta

²Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 32200, Isparta

• Geliş tarihi / Received: 26.08.2021

• Düzeltilerek geliş tarihi / Received in revised form: 09.12.2021

• Kabul tarihi / Accepted: 18.12.2021

Öz

Basınçlı dökümde, döküm-kalıp arayüzey ısı transfer katsayısı (AITK) kalıp ve dökümü yapılan parçada meydana gelen yapısal değişimler ile katılma hızını etkileyen önemli unsurdur. AITK, döküm-kalıp arasında meydana gelen ısı transferi, katılma hızı, ergiyik metal ve kalıp sıcaklıkları, döküm ve kalıp malzemesi gibi birçok faktörlerden bağlı olarak değişim gösterir. Bu çalışmada, basınçlı döküm prosesinde klasik soğutma kanallı metal kalıp ile özgün soğutma kanallı metal kalıp için döküm-kalıp AITK'nın zamana bağlı değişimi nümerik olarak incelenmiştir. Basınçlı döküm prosesinde; döküm malzemesi olarak Al6061 alüminyum alaşımı kullanılacak metal kalıplar için AITK, sıcaklık dağılımı ve ısı transferi bakımından karşılaştırılması yapılmıştır. 0.5-10 s zaman aralığında yapılan analizlerde bu kalıplar ile ergiyik metal arasındaki AITK ve sıcaklıklar hesaplanmıştır. Özgün soğutma kanallı kalıpta klasik soğutma kanallı kalıba göre 1.33 kat daha iyi sıcaklık düşüşü gerçekleşmiştir. Özgün soğutma kanallı kalıpta klasik soğutma kanallı kalıba kıyasla 2.23 kat daha iyi ısı transfer katsayısı olduğu hesaplanmıştır. Sonuç olarak; özgün soğutma kanallı kalıpta AITK, sıcaklık dağılımı ve ısı transferinin daha iyi olduğu gözlemlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Arayüzey ısı transfer katsayısı, Basınçlı döküm, HAD, Kalıp

Abstract

In the pressure casting, the casting-mold interface heat transfer coefficient (IHTC) is a significant element affecting the solidification rate with the structural changes occurring in the mold and the part being cast. IHTC varies depending on many factors such as heat transfer between molten metal and mold, solidification rate, casting and mold temperatures, casting, and mold material. In this study, the time-dependent variety of IHTC of casting for a conventional cooling channel metal mold and an original cooling channel metal mold in the pressure casting process was numerically investigated. In the pressure casting process, IHTC for metal molds using Al6061 aluminum alloy as casting material was compared in terms of temperature distribution and heat transfer. The IHTC and temperatures between these molds and the molten metal were calculated in the analyzes made in the 0.5-10 s time interval. In the original cooling channel mold, the temperature drop was 1.33 times better than the conventional cooling channel mold. It has been calculated that the original cooling channel mold has a 2.23 times better heat transfer coefficient compared to the conventional cooling channel mold. As a result, it was observed that IHTC, temperature distribution and heat transfer were better in the original cooling channel mold.

Keywords: Interface heat transfer coefficient, High pressure casting, CFD, Mold

*a Mehmet KAN; mehmetkan@sdu.edu.tr, Tel: (0539) 587 53 67, orcid.org/0000-0001-7336-1489

^b orcid.org/0000-0002-7069-1615

^c orcid.org/0000-0002-6949-645X

1. Giriş

1. Introduction

Basınçlı döküm prosesinde döküm işlemi, ergiyik metalin yüksek basınç etkisinde kalıbı doldurduktan sonra ergiyik metalin katılaşmasıyla gerçekleştirilir. Sıvı metal kalıp boşluğunu doldurmasıyla ergiyik metal ile kalıp arasında ısı transferi meydana gelmektedir. Kalıp ve döküm malzemesi arasında meydana gelen ısı transferi sonucunda döküm-kalıp arayüzeyinde ısıl temas direnci oluşur. Taşınım ısı transfer katsayısına benzeyen (h_c) büyüklüğü olarak ifade edilen bu direnç, ısı transferini ve katılaşma hızını etki eder. Isı transfer katsayısı zamana bağlı değişim gösterdiğinden dolayı döküm-kalıp arasında meydana gelen ısı transferinde ısıl temas direncinin belirlenmesi oldukça güçtür. Isıl temas direnci kalıp ve döküm prosesleri için önemli bir parametredir.

Son zamanlarda, döküm işlemi ve kalıp tasarımına yönelik döküm optimizasyon çalışmalarında simülasyon programlarının kullanımı yaygınlaşmıştır. Birçok endüstriyel döküm işlemlerinde kalıp ve döküm tasarım simülasyonları öncelikle bilgisayar ortamında yapılarak üretimde meydana gelecek hatalar indirgenmeye çalışılmaktadır. Döküm simülasyon çalışmalarında döküm-kalıp AITK, katılaşma sürecinin irdelenmesi ve döküm optimizasyon bakımından oldukça önemlidir. Döküm-kalıp AITK'nın belirlenmesi, ergiyik metal ile kalıp arasında meydana gelen ısı transferine, kalıp ve döküm malzemesinin termofiziksel özelliklerine, kalıp-döküm sıcaklıklarına bağlı olarak değişmektedir. Katılaşma sürecinde katılaşan ergiyik metalin özgül ve ergime gizli ısısının ısıl temas dirençleriyle etkileşimi sonucu kalıba aktarılır. Katılaşma sürecinde ısı transferinin büyük bölümü iletimle gerçekleşirken, yüksek sıcaklığın etkisiyle ışınım ve taşınım da gerçekleşmektedir (Zhang vd., 2007; Chen, 2003; Akar vd., 2008; Dour vd., 2005; Şahin vd., 2006; Hamasaiid vd., 2010; Michel vd., 1995; Reddy ve Beckermann, 1993; Loulou vd., 1999; Ho, ve Pehlke, 1985)

Basınçlı dökümde, dökümü etkileyen faktörler ve döküm-kalıp AITK ile ilgili çalışmalar yapılmıştır. Farklı kalıplara döküm işleminde ve çeşitli alaşımlarında ısı transferi üzerinde kalıp sıcaklığının etkisini incelemiştir. Isı transferinin ve kalıp sıcaklığının artması ile AITK arttığını gözlemlemişlerdir (Hallam ve Griffiths 2004; Bouchard vd., 2009; Gozlan ve Bamberger, 1987; Sabau ve Wu, 2007; Taha vd, 2001; Arunkumar vd., 2008; Coates ve Argyropoulos, 2007). Ergiyik

metalin kalıba dökülmesiyle; kalıbın yüzey pürüzlülüğü, proses basıncı, ergiyik metalin döküm hızı, kalıp ve döküm sıcaklığının etkisiyle AITK'nın etkilendiğini söylemişlerdir. Ergiyik metalin kalıba temas ettiği alanlarda aşırı soğumasından dolayı AITK'nın azaldığı bildirilmiştir (Akar vd., 2013; Srinivasan, 1982; İpek ve Koru, 2011; Dong vd., 2011; Ikhchy vd., 2012). Basınçlı dökümde, kalıp döküm işleminden önce ön ısıtma işlemine tabi tutulmaktadır. Döküm başladıktan sonra, ergiyik sıcaklığının etkisiyle kalıbın sıcaklığı artmaya devam eder. Döküm sırasında kalıp sıcaklığı sabit olmamaktadır. Bu yüzden kalıbın sıcaklığını belli bir sıcaklık değerlerinde tutmak için kalıp soğutma sistemi kullanılmaktadır. Soğutma sistemiyle hem kalıp soğutulmakta hem de ergiyik metalin katılaşması gözlemlenmektedir. Yaptıkları soğutma sistemleriyle kalıbın sıcaklık dağılımını, katılaşma hızını, soğuma sürecini ve meydana gelen ısı transferini incelemişlerdir (Santos vd., 2004; Garza vd., 2003; Gafur vd., 2003; Durat vd., 2006; Christy vd., 2010; Silva vd., 2011).

Bu araştırmalar dikkate alınarak yapılan bu çalışmada, klasik soğutma kanallı kalıp ve özgün soğutma kanallı kalıp için, farklı zaman aralıklarına göre AITK'nın belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla; döküm ve kalıp malzemesi olarak Al6061 alüminyum alaşımı ve H13 çeliği seçilmiştir. Çalışmada, ergiyik metalin sıcaklığı 973 K, kalıbın sıcaklığı 543 K olarak alınmıştır. Ayrıca soğutma sıvısı olarak ısı transfer yağı kullanılmıştır. Basınçlı dökümde, döküm-kalıp AITK'nın zamana bağlı değişimi nümerik olarak incelenmiş ve kalıp ısı transfer mekanizmaları belirlenmiştir. 0.5-10 s zaman aralığında yapılan analizlerde bu kalıplar ile ergiyik metal arasındaki AITK ve sıcaklıklar hesaplanmıştır. Sonuç olarak; özgün soğutma kanallı kalıpta AITK, sıcaklık dağılımı ve ısı transferinin daha iyi olduğu gözlemlenmiştir.

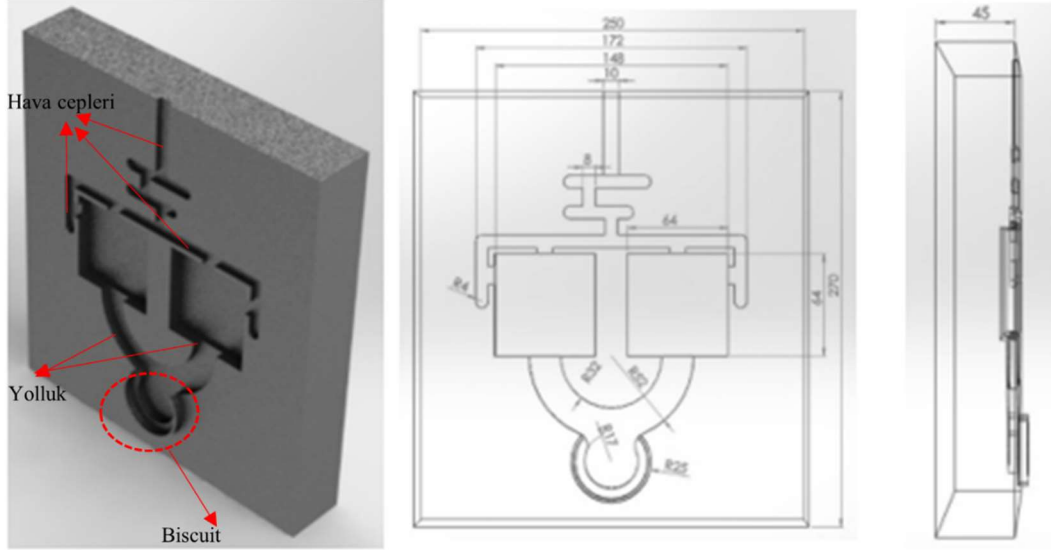
2. Materyal ve metot

2. Material and method

Döküm esnasında; döküm-kalıp AITK, kalıp içindeki döküm malzemesi ve kalıbın sıcaklık dağılımı, döküm sıcaklığı, kalıp sıcaklığı ve katılaşma sırasındaki sınır şartları gibi parametrelerin uygun şekilde belirlenmesi hem enjeksiyon ürünü kalitesi hem de prosesin performansında etkili olan parametrelerdir. Bu çalışmada, basınçlı döküm prosesinde klasik soğutma kanallı metal kalıp ile özgün soğutma kanallı metal kalıp için döküm-kalıp arayüzey ısı transfer katsayısının zamana bağlı değişimi

nümerik olarak incelenmiştir. Bu amaçla, Al6061 alüminyum alaşımının basınçlı döküm prosesinde kullanılacak metal kalıplar için döküm-kalıp AITK, sıcaklık dağılımı ve ısı transferi nümerik olarak hesaplanmıştır. Şekil 1’de görüldüğü gibi metal kalıbın katı modelinin simetri kalıp parçaları kompakt olarak tasarlanmıştır. Döküm parçası için

optimum soğutma yapılması amacıyla klasik soğutma kanalları tasarlanmıştır. Tasarlanan soğutma kanallarının, ısı transferine etkisi ve ergiyik metalin katılaşması simetri durumundan dolayı kalıbın yarısı için nümerik olarak irdelenmiştir.



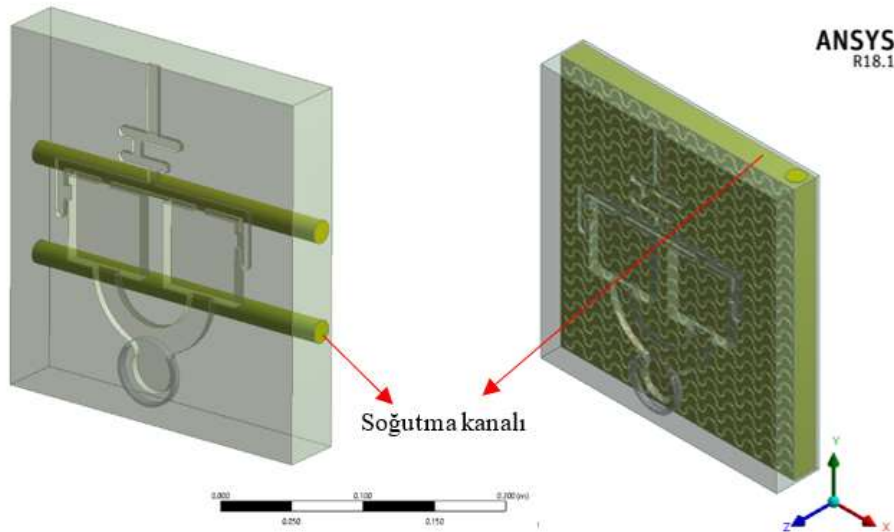
Şekil 1. Metal kalıp 3D çizimi
Figure 1. Metal mold 3D drawing

2.1. Ansys-Fluent yazılımında kullanılan temel denklemler ve analiz çözümlemesindeki metotlar

2.1. Basic equations used in Ansys-Fluent software and methods in analysis analysis

HAD (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği) analizlerinde sayısal ağ yapısı oluşturulmuştur.

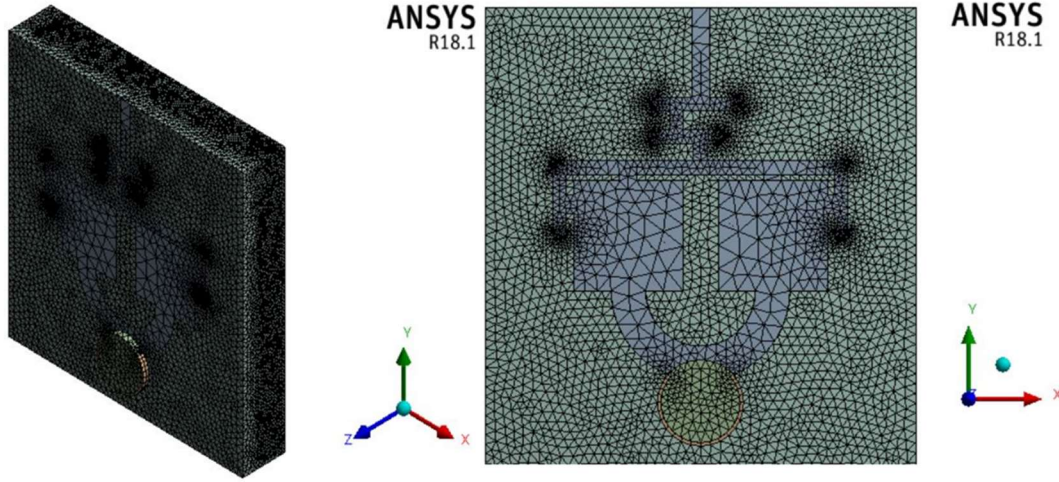
Klasik soğutma kanallı ve özgün soğutma kanallı metal kalıbın akış hacmi ağ modelinde tetrahedral elemanlar kullanılmıştır. Bu modelde ortalama 6541221 eleman, 1449372 adet düğüm noktası bulunmaktadır. Şekil 2’de görüldüğü gibi metal kalıpta dolaşan akışkana ait akış hacmi modeli oluşturulmuştur.



Şekil 2. Soğutma kanalı akış hacmi
Figure 2. Cooling channel flow volume

Yapılan bu tasarım için Şekil 3'te verilen ağ yapısına göre CFD analizleri soğutma kanalı ısıl ve

hidrodinamik davranışı için Ansys-Fluent yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3. Kalıpların ağ yapısı
Figure 3. Network structure of the molds

Sonlu hacimler metoduna dayanan bu yöntemde Ansys-Fluent veya diğer simülasyon programları kullanılmaktadır. Programlardan alınan ağ yapısı dosyalarına sınır şartları ve parametreler uygulanarak sistemin çözümü yapılmaktadır. Sayısal çalışmada, üç boyutlu ve zamana bağlı kütle korunumu, momentum ve enerji denklemleri kullanılarak analizler gerçekleştirilmektedir. Ansys-Fluent programı, sistemi çözüme ulaştırmak için geri planda aşağıdaki denklemleri kullanmaktadır (Ansys, 2018).

Süreklilik denklemi Denklem 1'de gösterilmiştir.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (1)$$

Momentum denklemi ise Denklem 2'de verilmiştir:

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

Burada β , 0 ile 1 arasında değişmektedir. 0 katı fazı gösterirken 1 sıvı fazı temsil etmektedir. $0 < \beta < 1$ bölgesi ise mushy bölgesi olarak tanımlanmaktadır. Ayrıca A (m^2) alanı ve \vec{v} (m/s) akış hızını ifade etmektedir.

Enerjinin korunumu denklemi (Denklem 3) aşağıda verilmiştir.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho H) + \nabla \cdot \rho \vec{v} H = \nabla \cdot (k \nabla T) + S \quad (3)$$

Burada; H entalpi (J); ρ yoğunluk (kg/m^3), \vec{v} akış hızı (m/s) ve S_E kaynak terimini (J/m^3s) ifade etmektedir.

Tablo 1'de nümerik hesaplamalarda kullanılan yaklaşımlar belirlenmiştir (Ansys, 2018).

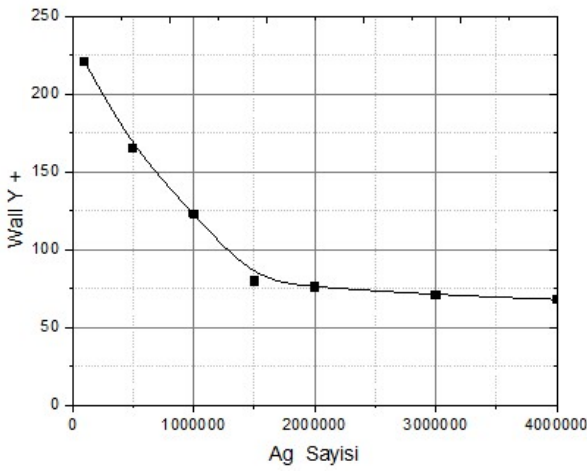
Tablo 1. Nümerik hesaplamalarda kullanılan yaklaşımlar (Ansys, 2018)
Table 1. Approaches used in numerical calculations (Ansys, 2018)

Simülasyon koşulu	Zamana bağlı durum (Transient-state)
Çözücü tipi	Basınca dayalı çözücü
Viskoz model	Standard $k - \varepsilon$ türbülans modeli
Hız-basınç etkileşimi	COUPLED algoritması
Ayrıklaştırma yöntemi	İkinci dereceden merkezi farklar metodu
Basınç, momentum ve enerji denklemleri	İkinci dereceden merkezi farklar metodu
Türbülans kinetik enerji ve türbülans dağılım oranı	İkinci dereceden merkezi farklar metodu
COUPLED (Birleşik) algoritması	Poseido-Transient Explicit (açık) çözüm

Sonlu hacimler ile ilgili yapılan sayısal çalışmalarda düzgün ve kaliteli bir ağ oluşturmak

sonuçların doğruluğu açısından çok önemlidir. Bu yüzden sayısal çalışmalarda ağ kalitesi

aranmaktadır. Ancak analizi yapılan geometrilerin karmaşıklığı arttıkça bu ağ kalitesini elde etmek zorlaşmaktadır. Sayısal çalışmaların doğrulanmasında başvurulan yöntemlerden birisi de ağdan bağımsızlık testleridir. Sayısal çözümlemede ağ sayısı artmasına rağmen sonuç belli bir değerden sonra değişmiyorsa, çözümlemede ağdan bağımsızlık elde edilmektedir. Analizlerde standart duvar fonksiyonları modeli kullanılmıştır. Bu modelde ve türbülanslı akışlarda, sınır tabakası belirlemek için ($30 < Y+ < 300$) aralığında olması beklenmektedir. $Y+$ değerinin 30'a yakın olması beklenmektedir (Ansys, 2018). Şekil 4'te ağ bağımsızlık test grafiği verilmiştir.



Şekil 4. Ağ bağımsızlık test grafiği
Figure 4. Network independence test plot

Ağdan bağımsızlık testleri sırası 7 farklı ağ sayılarında yapılmıştır. Şekil 4'te görüleceği üzere 1449372 düğüm noktasında yapılan çözümlemelerden sonra Wall $Y+$ değerinde çok fazla değişim gözlemlenmemiştir. Bu yüzden bu modelde 6541221 elaman, 1449372 adet düğüm noktası bulunmaktadır.

2.2. Metal kalıbın matematiksel analizi

2.2. Mathematical analysis of metal mold

Yapılan çalışmada; döküm esnasında meydana gelen faz değişimi ve malzeme özellikleri göz önünde bulundurularak, ergiyik metalin katılaşması ve kalıpta meydana gelen ısı transferi için doğrusal olmayan zamana bağlı denklemler kullanılmıştır. Ergiyik metalin kalıba dökümüyle katılaşma ve soğuma süreci boyunca kalıba ısı akışı gerçekleşir. Döküm ve kalıp malzemesinin her ikisinde de ısı akışı arayüzey ve arayüzeyi takip eden ilk düğüm noktalarındaki sıcaklık farkları ($\Delta T = T_K - T_{K-1}$) ile Denklem 4 yardımıyla hesaplanır.

$$\dot{q} = -k \frac{\Delta T}{\Delta l} \quad (4)$$

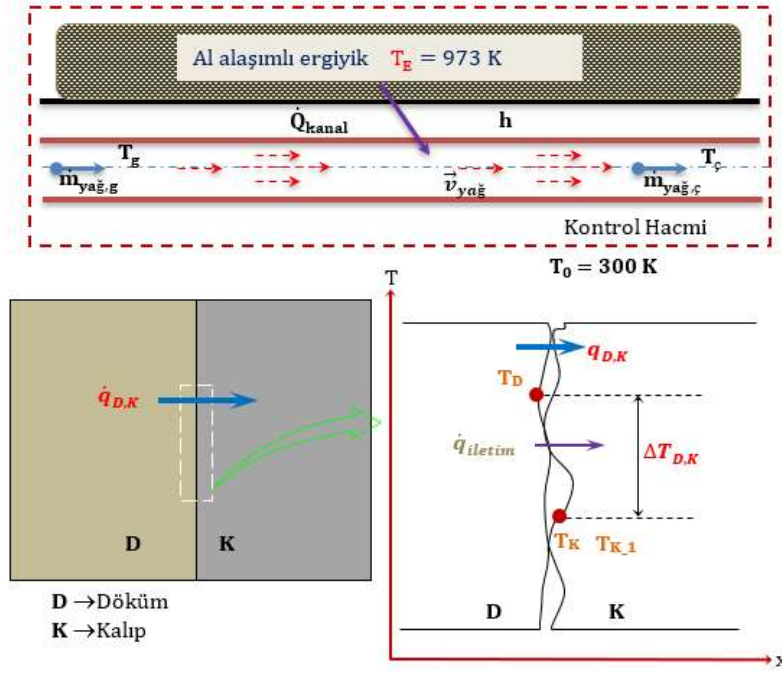
Burada k ısı iletim katsayısı (W/mK), Δl (mm) herhangi bir zaman aralığında iki nokta arasındaki mesafeyi göstermektedir. Daha sonra Denklem 5'ten döküm parça-kalıp AITK hesaplanır.

$$h = \frac{\dot{q}}{T_D - T_K} \quad (5)$$

Burada h AITK (W/m^2K), \dot{q} birim zamanda birim yüzeyden geçen ısı akısı (W/m^2), T_D ve T_K sırası ile dökümün ve kalıbın yüzey sıcaklığıdır (K).

Şekil 5'te Kalıp-döküm malzemesi arayüzeyinde meydana gelen ısı transferi mekanizması gösterilmektedir.

Döküm alaşımı olarak Al6061 alüminyum alaşımı kullanılmıştır. Malzeme özellikleri sıcaklığa dolayısıyla zamana bağlı olarak değiştiği için zamana bağlı analiz yapılmıştır. Hesaplamalarda kullanılan kalıp ve döküm malzemelerinin termodinamik özellikleri Tablo 2'de verilmiştir. Analizlerde kullanılan Al6061 alüminyum alaşımının kimyasal bileşenleri Tablo 3'te verilmiştir. Isı transfer yağının özellikleri Tablo 4'te verilmiştir.



Şekil 5. Kalıp–döküm malzemesi arayüzeyinde meydana gelen ısı transferi mekanizması
Figure 5. The heat transfer mechanism occurring at the mold-cast material interface

Tablo 2. Isı transfer katsayısının hesaplamalarında kullanılan malzemelerin termodinamik özellikleri (Dong vd., 2011)

Table 2. Thermodynamic properties of the materials used in the calculations of the heat transfer coefficient (Dong et al., 2011)

Malzeme	c (J/kgK)	k (W/mK)	ρ (kg/m ³)
H13	435.37+0.2 T	0.00029T-26.85	7866.86-0.3174 T
Al6061	656.35+ 0.8736 T- 0.0004T ²	21.483+ 0.8048 T-0.0007T ²	2514.6+ 0.7597 T- 0.0008T ²

Tablo 3. Al6061 alaşımlarının kimyasal bileşenleri (Christy vd., 2010)

Table 3. Chemical components of Al6061 alloy (Christy et al., 2010)

Element	Mg	Fe	Si	Cu	Mn	V	Ti	Al
Ağırlık(%)	1.08	0.17	0.63	0.32	0.52	0.001	0.02	Kal.

Tablo 4. Isı transfer yağının özellikleri (Therminol-XP) (Looser vd.,2014)

Table 4. Properties of heat transfer oil (Therminol-XP) (Looser et al., 2014)

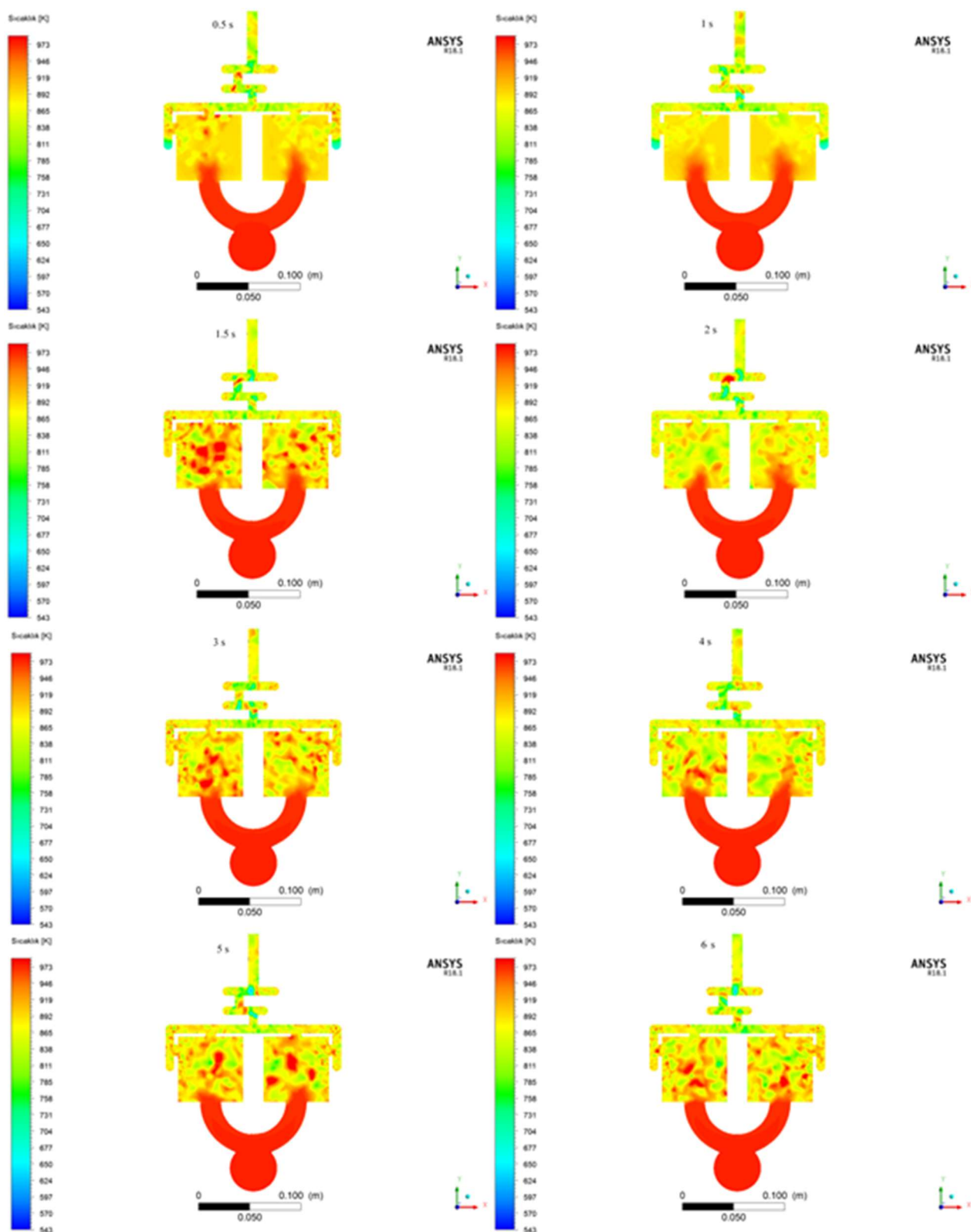
Özgül ısı (kJ/kgK)	Yoğunluk (kg/m ³)	Viskozite (Mpa s)	Isıl İletkenlik (W/mK)	Termal gen. katsayısı (K ⁻¹)	Çalışma Sıcaklığı (K)
1.85	875	22.7	0.124	0.00089	253-600 K

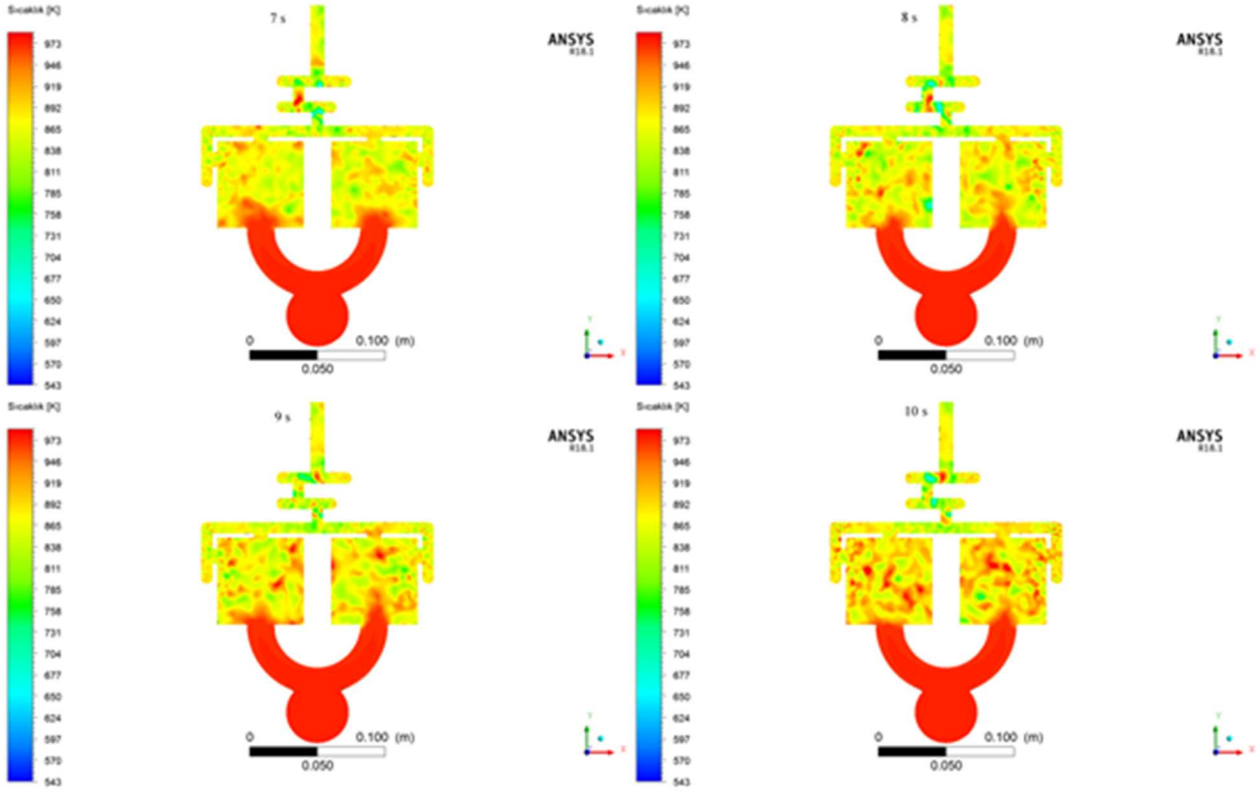
3. Bulgular

3. Results

Yapılan analizler, simetri kompakt kalıbın tamamı için 3 D soğutma kanalı, metal kalıp çekirdeği ve ergiyik metalin sıcaklık dağılımı belirlemek amacıyla zamana bağlı olarak ve 10.s sonuna kadar

yapılmış olup, ergiyik metal katılma hızı da incelenmiştir. Şekil 6’da, klasik soğutma kanalı için dökümden sonraki ilk 0.5 – 10 s aralıklarındaki ergiyik metal boyunca sıcaklık dağılım konturlarının zamana bağlı olan değişimleri verilmiştir.





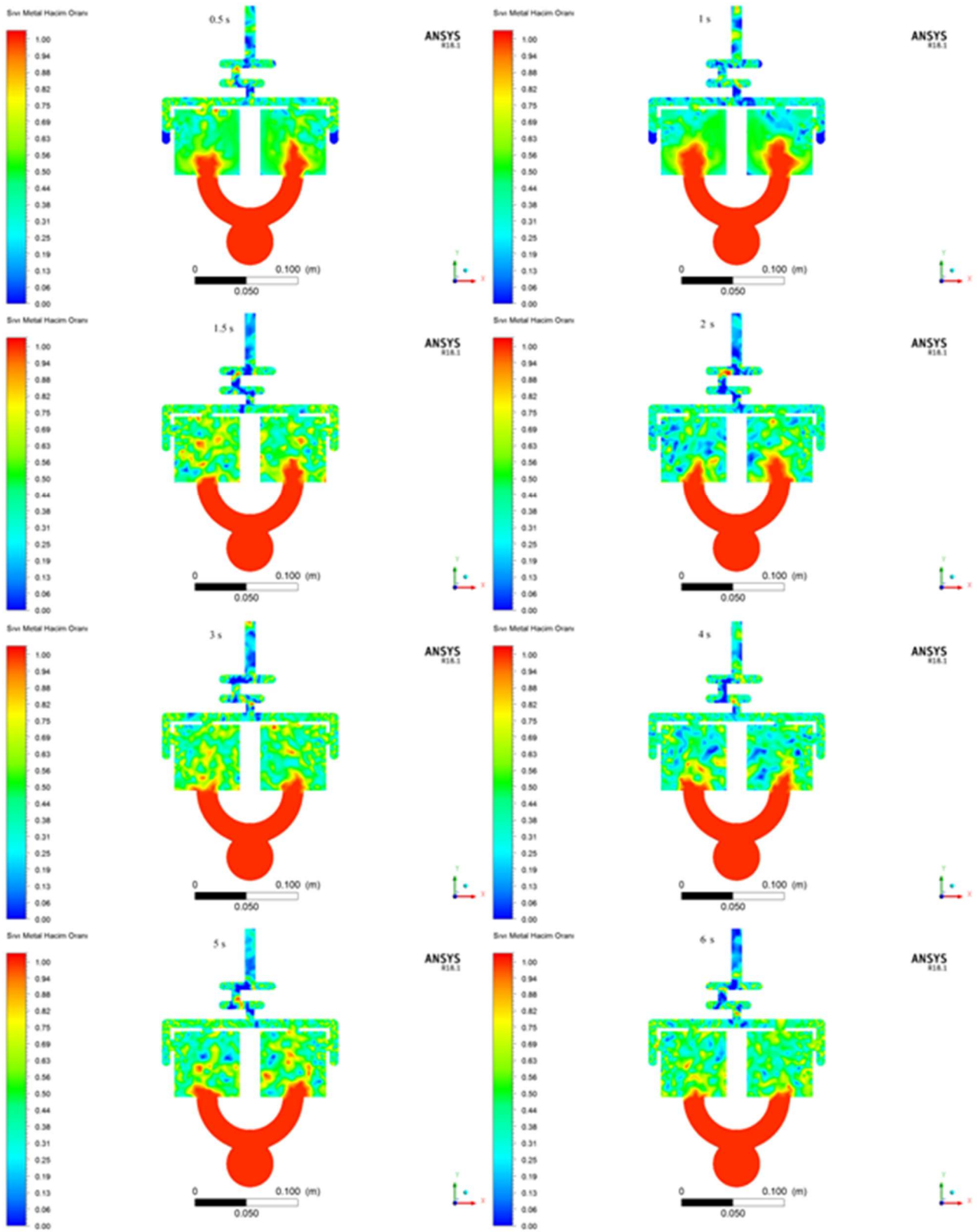
Şekil 6. Klasik soğutma kanalı için zamana bağlı sıcaklık konturları

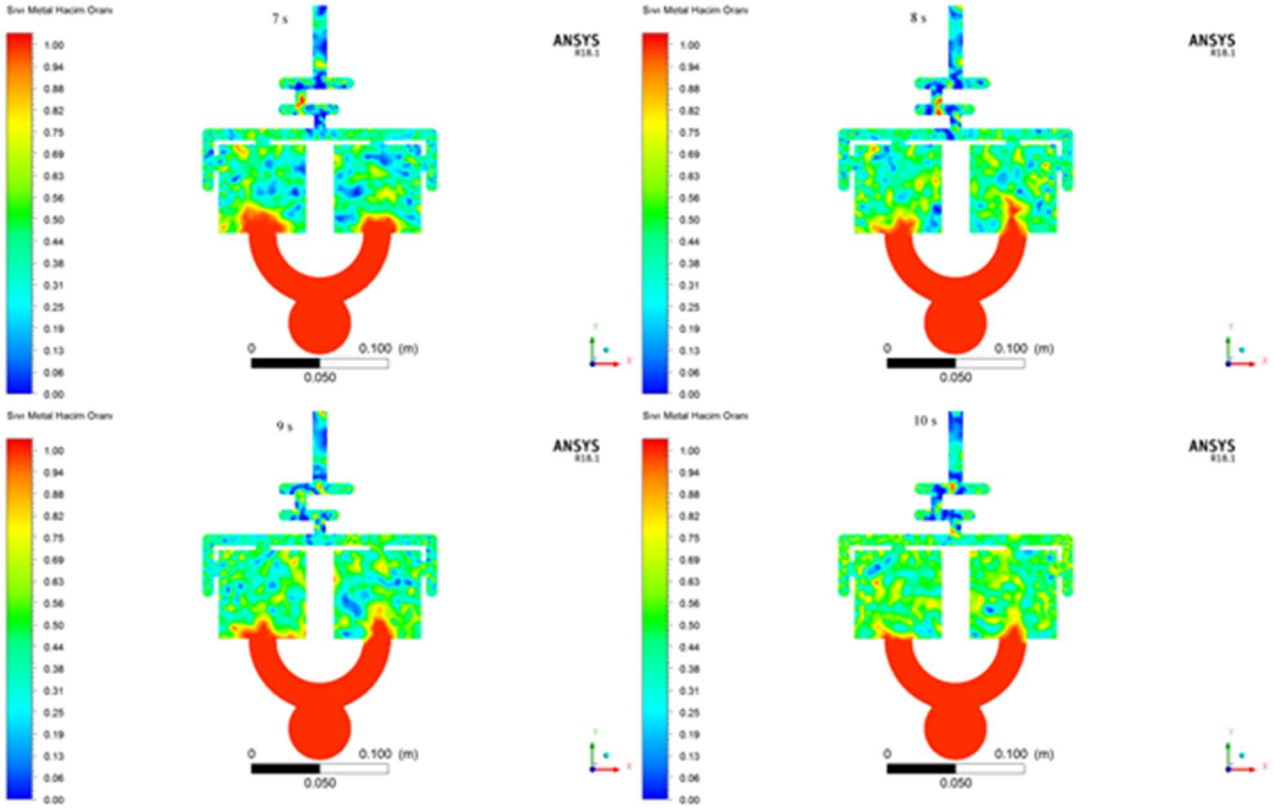
Figure 6. Time-dependent temperature contours for the conventional cooling channel

Şekil 6' dan görüleceği gibi, kalıbın tam olarak soğutulmamasından dolayı ergiyik metalin sıcaklığında çok fazla bir değişim görülmemektedir. Ancak soğutma kanallarının olduğu bölgelerde soğutmanın etkisiyle sıcaklıklarda düşüşler olduğu gözlemlenmiştir. Soğutma işleminin başlamasıyla birlikte metal sıcaklığının zamana bağlı olarak, azaldığı, 2. s'den sonra kalıpta zamana bağlı olarak 811– 643 K

arasında değiştiği görülmektedir. Proses zamanının her 0.5 s'lik artışıyla, kalıptaki sıcaklık ortalama 20 °C düşmüştür.

Şekil 7'de klasik soğutma kanalı için dökümden sonraki ilk 0.5 – 10 s aralıklarındaki ergiyik metalin sıvı hacim oranının zamana bağlı olarak değişim konturlarının verilmiştir.





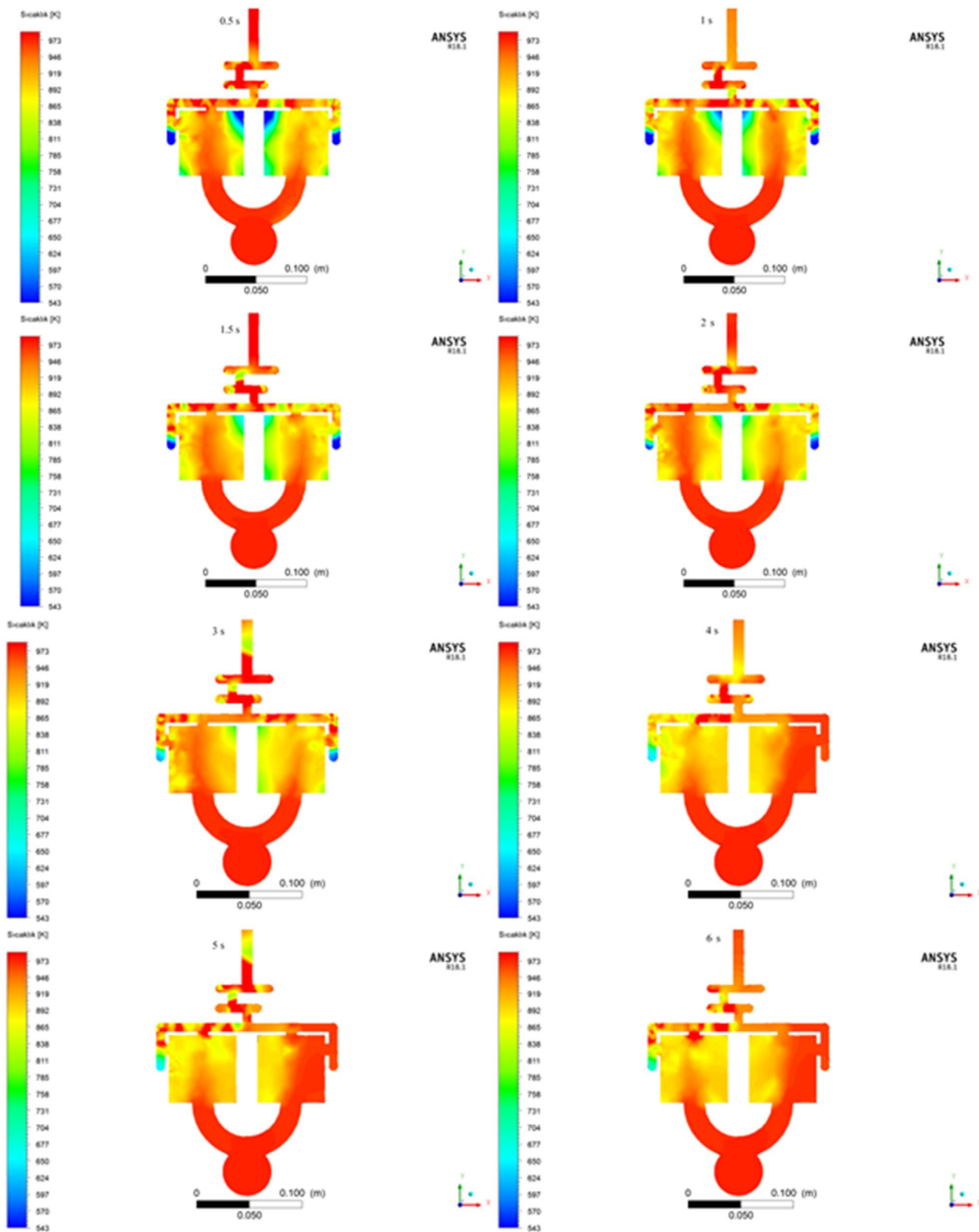
Şekil 7. Klasik soğutma kanalı için zamana bağlı sıvı- hacim oranı konturları

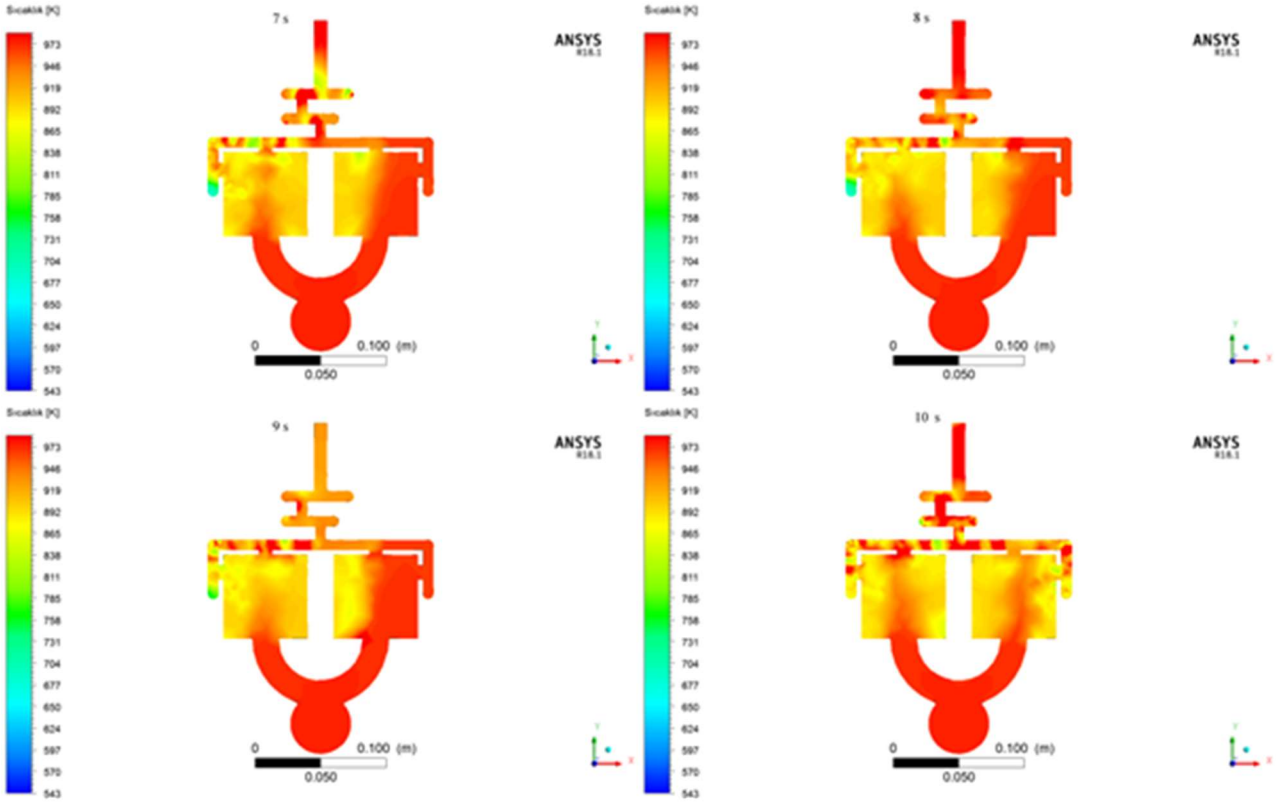
Figure 7. Time-dependent liquid-to-volume ratio contours for the conventional cooling channel

Şekil 7’de klasik soğutma kanalı için dökümden 0.5 -10 s aralıklarına ait ergiyik metal boyunca sıvı hacim oranlarının zamana bağlı olarak değişimleri görülmektedir. Ergiyik metalin tamamen katılaşmasında değer 0 iken sıvı haldeki kısımlarda 1 değerini ifade etmektedir. 0 ile 1 aralığında ise katılaşmanın gerçekleşmediği kısımları göstermektedir. En hızlı soğuma ilk 2. s içerisinde gerçekleşirken sonraki zaman dilimlerinde soğuma hızı kısmen yavaşlamaktadır. Sıcaklık konturlarında olduğu gibi soğutma kanallarının

geçtiği bölgelerde katılaşmanın olduğu gözlemlenmiştir. Buna göre, amaç hızlı soğumayı gerçekleştirmek ise, kalıp üzerinde uygun tasarlanmış soğutma kanallarının kullanılması gerektiği anlaşılmaktadır.

Şekil 8’de, özgün soğutma kanalı için dökümden sonraki ilk 0.5 – 10 s aralıklarındaki ergiyik metal boyunca sıcaklık dağılım konturlarının zamana bağlı olan değişimleri verilmiştir.





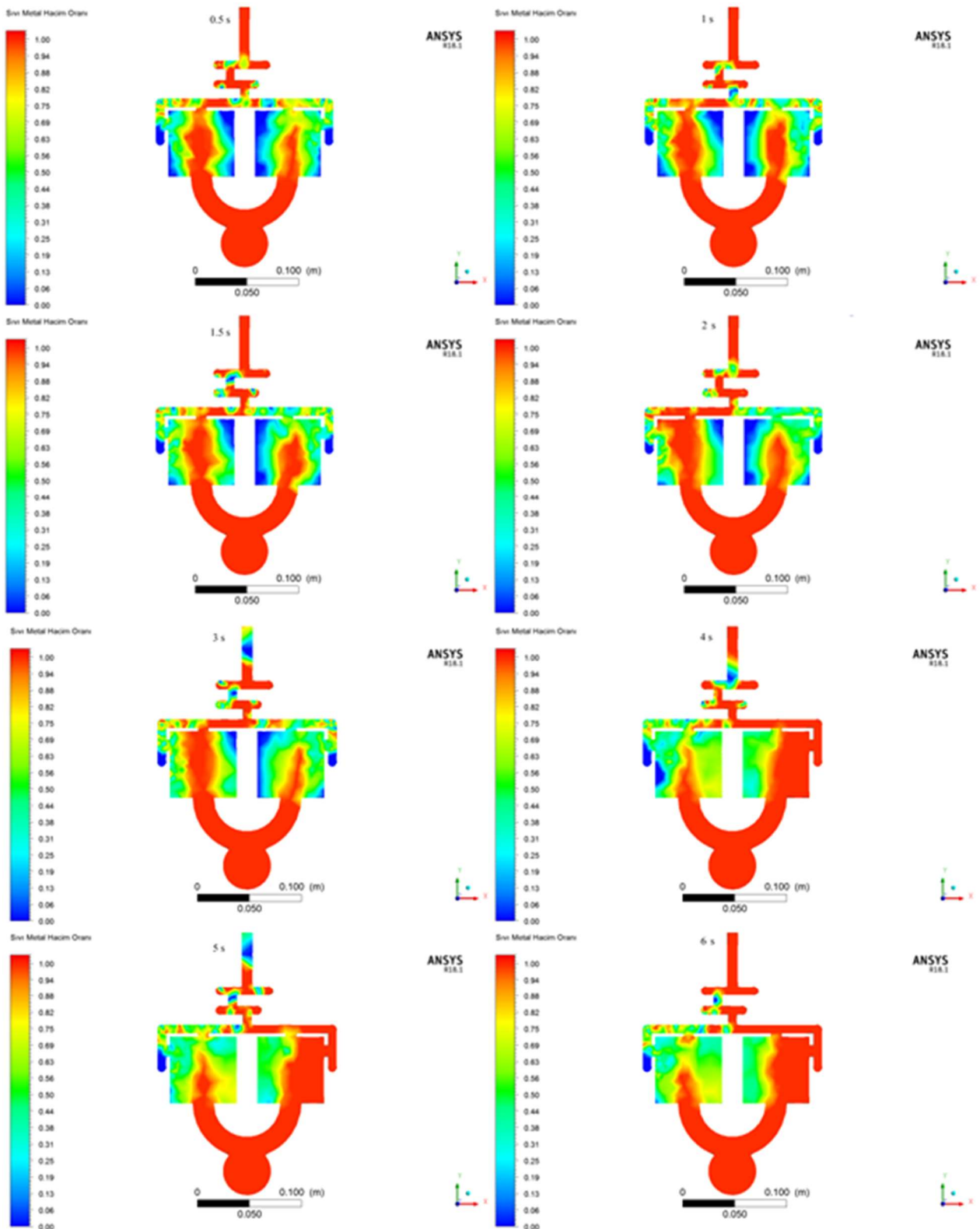
Şekil 8. Özgün soğutma kanalı için zamana bağlı sıcaklık konturları

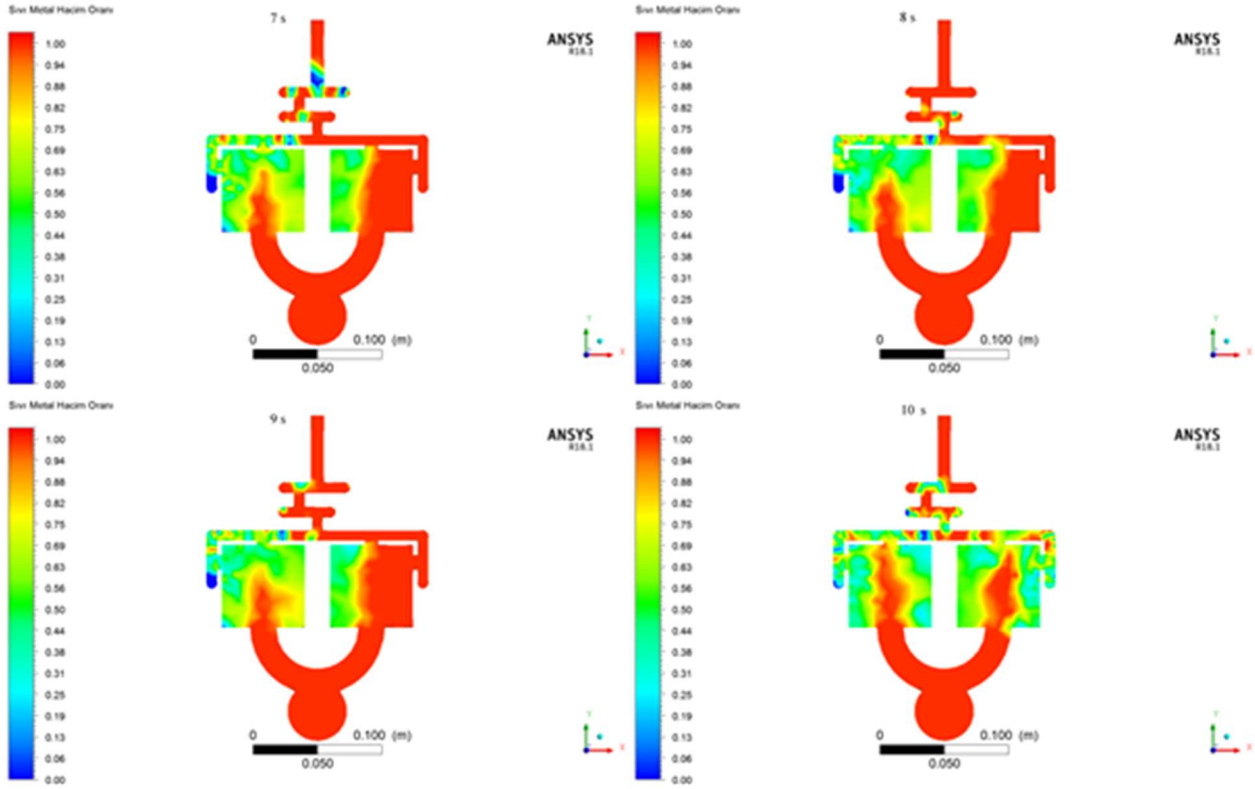
Figure 8. Time-dependent temperature contours for the unique cooling channel

Şekil 8’ den görüleceği gibi, özgün soğutma kanallı kalıpta klasik soğutma kanallı kalıba göre sıcaklık farklılıkları dikkati çekmektedir. Zamana bağlı olarak, soğutmanın yapılmasıyla birlikte sıcaklığın azalmaya başladığı ve homojen dağılım olduğu görülmektedir. Soğutma işleminin başlamasıyla birlikte metal sıcaklığının zamana bağlı olarak, azaldığı, 2. s’den sonra kalıpta zamana bağlı olarak

763– 551 K arasında değiştiği görülmektedir. Proses zamanının her 0.5 s’lik artışıyla, kalıptaki sıcaklık ortalama 30 °C düşmüştür.

Şekil 9’da özgün soğutma kanalı için dökümden sonraki ilk 0.5 – 10 s aralıklarındaki ergiyik metalin sıvı hacim oranının zamana bağlı olarak değişim konturlarının verilmiştir.

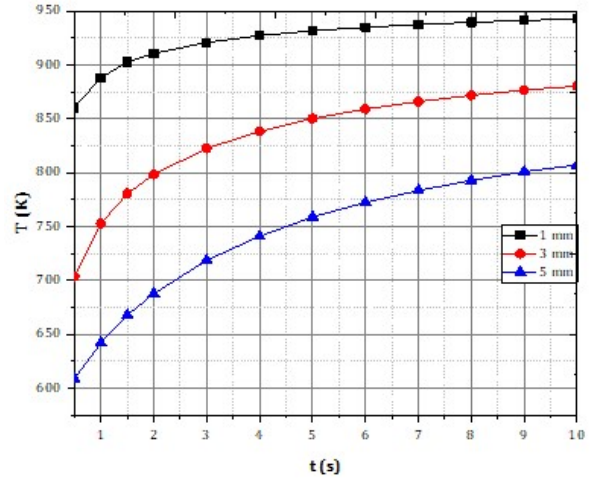




Şekil 9. Özgün soğutma kanalı için zamana bağlı sıvı- hacim oranı konturları
Figure 9. Time-dependent liquid-to-volume ratio contours for a unique cooling channel

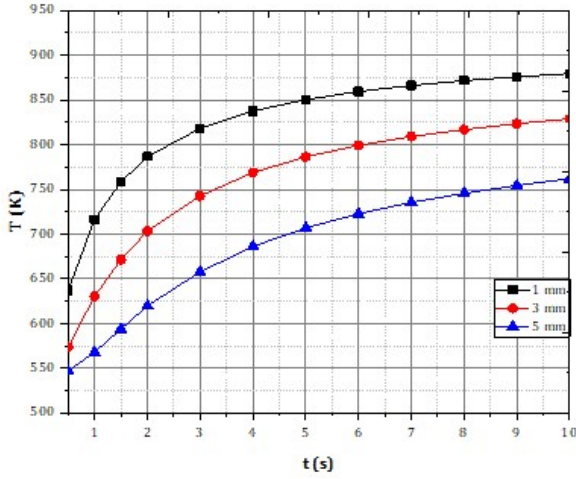
Şekil 9’ dan görüleceği gibi, özgün soğutma kanallı kalıpta klasik soğutma kanallı kalıba göre katılma hızı dikkati çekmektedir. Zamana bağlı olarak, soğutmanın yapılmasıyla birlikte sıcaklığın azalmaya başladığı ve katılmanın daha hızlı olduğu görülmektedir. Soğutma kanallarının etkisiyle en hızlı soğuma ilk 1.5. s içerisinde gerçekleşirken sonraki zaman dilimlerinde soğuma hızı kısmen yavaşlamaktadır. Böylece kalıbı soğutma için harcanan zamanda azalma olduğu gözlemlenmiştir.

Şekil 10’da verilen grafikte klasik soğutma kanallı kalıp sıcaklık dağılımlarının farklı mesafelerdeki karşılaştırılması verilmiştir. Buradaki 1 mm, 3 mm, 5 mm mesafeler biscuit kısmında ergiyük metalin kalıpla temas ettiği noktadan itibaren kalıba doğru olan mesafelerdir.



Şekil 10. Klasik soğutma kanallı kalıbın farklı mesafelerdeki sıcaklık dağılımlarının zamana bağlı karşılaştırılması

Figure 10. Time-dependent comparison of the temperature distributions of the conventional cooling channel mold at different distances

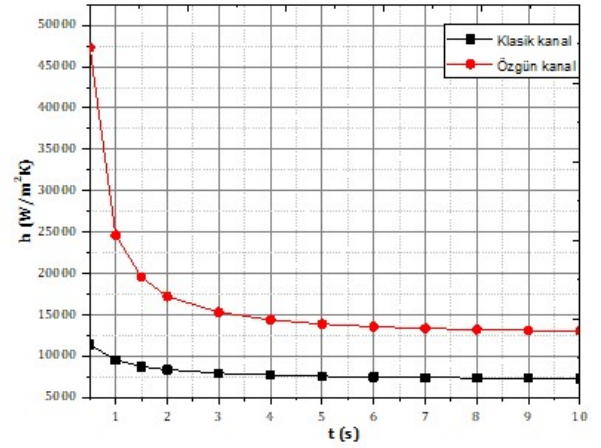


Şekil 11. Özgün soğutma kanallı kalıbın farklı mesafelerdeki sıcaklık dağılımlarının zamana bağlı karşılaştırılması

Figure 11. Time-dependent comparison of temperature distributions at different distances of a unique cooling channel die

Şekil 10'da, klasik soğutma kanallı kalıpta biscuit kısmında ergiyik metalin kalıpla temas ettiği 1 mm mesafedeki noktada sıcaklıklar 943-857 K arasında, 3 mm mesafedeki noktada 871-701 K arasında ve son olarak 5 mm mesafedeki noktada ise 803-611 K arasında değişiklik göstermektedir. Şekil 11'den de görüldüğü üzere; özgün soğutma kanallı kalıpta biscuit kısmında ergiyik metalin kalıpla temas ettiği 1 mm mesafedeki noktada sıcaklıklar 888-632 K arasında, 3 mm mesafedeki noktada 727-575 K arasında ve son olarak 5 mm mesafedeki noktada ise 759-548 K arasında değişiklik göstermektedir. Şekil 10 ve Şekil 11'den de görülebileceği gibi; kalıpların farklı mesafelerdeki kalıp sıcaklıkları arasında farklılıklar olduğu gözlemlenmiştir. Soğutmanın etkisiyle ve arada meydana gelen ısı transferinin daha yüksek olmasıyla özgün soğutma kanallı kalıpta sıcaklıkların daha düşük olduğu görülmektedir. Özgün soğutma kanallı kalıpta klasik soğutma kanallı kalıba göre 1.33 kat daha iyi sıcaklık düşüşü gerçekleşmiştir. Burada daha homojen bir soğutmanın gerçekleştiği katlaşımanın daha hızlı olduğu düşünülmektedir. Ayrıca ergiyik metalden uzaklaştıkça kalıbın sıcaklığı düşmektedir. Klasik soğutma kanallı kalıpta sıcaklıklar

Şekil 12'de analizlerden elde edilen veriler doğrultusunda hesaplanan zamana bağlı arayüzey ısı transfer katsayıları verilmiştir.



Şekil 12. Zamana bağlı arayüzey ısı transfer katsayılarının karşılaştırılması

Figure 12. Comparison of time dependent interfacial heat transfer coefficients

Şekil 12'de, hesaplanan arayüzey ısı transfer katsayılarının zamanla azaldığı görülmektedir. Grafikten de görüleceği üzere, özgün soğutma kanallı kalıpta arayüzey ısı transfer katsayısının daha iyi olduğu görülmektedir. 0.5-10 s aralığı dikkate alındığında; özgün soğutma kanallı kalıpta ortalama arayüzey ısı transfer katsayısı 18210 W/m²K olduğu ve klasik soğutma kanallı kalıpta ise 8164.4 W/m²K olarak hesaplanmıştır. Özgün soğutma kanallı kalıpta klasik soğutma kanallı kalıba kıyasla 2.23 kat daha iyi ısı transfer katsayısı olduğu hesaplanmıştır.

4. Tartışma ve sonuçlar

4. Discussion and conclusions

Yapılan bu çalışma kapsamında, basınçlı döküm ile H13 çeliğinden yapılacak bir kalıba, Al6061 alaşımından yapılan döküm işlemi, 3D-CAD programı yardımıyla modellenerek katılma süresi, sıcaklık dağılımları ve AITK'sı sonlu elemanlar metoduyla incelenmiştir. Öncelikli olarak klasik soğutma kanalı kalıp tasarımı yapılmıştır. Daha sonra özgün soğutma kanallı kalıp çekirdeği tasarlanmıştır. Bu tasarımlar üzerinde, Ansys-Fluent programı kullanılarak nümerik analiz çalışmaları yapılmıştır. Ansys-Fluent programı kullanılarak yapılan nümerik hesaplamalarda, kalıp içerisinde sirküle edecek soğutucu akışkanın kanal içindeki akış ve ısı davranışları gözlemlenmek amacıyla HAD analizlerinden yararlanılmıştır.

Klasik soğutma kanallı kalıpta, soğutma işleminin başlamasıyla birlikte metal sıcaklığının zamana bağlı olarak, azaldığı, 2. s'den sonra kalıpta zamana bağlı olarak 811- 643 K arasında değiştiği

görülmektedir. Proses zamanının her 0.5 s'lik artışıyla, kalıptaki sıcaklık ortalama 20 °C düşmüştür. Özgün soğutma kanallı kalıpta ise, soğutma işleminin başlamasıyla birlikte metal sıcaklığının zamana bağlı olarak, azaldığı, 2. s'den sonra kalıpta zamana bağlı olarak 763– 551 K arasında değiştiği görülmektedir. Proses zamanının her 0.5 s'lik artışıyla, kalıptaki sıcaklık ortalama 30 °C düşmüştür.

Klasik soğutma kanallı kalıpta biscuit kısmında ergiyik metalin kalıpla temas ettiği 1 mm mesafedeki noktada sıcaklıklar 943-857 K arasında, 3 mm mesafedeki noktada 871-701 K arasında ve son olarak 5 mm mesafedeki noktada ise 803-611 K arasında değişiklik göstermektedir. Özgün soğutma kanallı kalıpta biscuit kısmında ergiyik metalin kalıpla temas ettiği 1 mm mesafedeki noktada sıcaklıklar 888-632 K arasında, 3 mm mesafedeki noktada 727-575 K arasında ve son olarak 5 mm mesafedeki noktada ise 759-548 K arasında değişiklik göstermektedir. Kalıpların farklı mesafelerdeki kalıp sıcaklıkları arasında farklılıklar olduğu gözlemlenmiştir. Soğutmanın etkisiyle ve arada meydana gelen ısı transferinin daha yüksek olmasıyla özgün soğutma kanallı kalıpta sıcaklıkların daha düşük olduğu görülmektedir. Özgün soğutma kanallı kalıpta klasik soğutma kanallı kalıba göre 1.33 kat daha iyi sıcaklık düşüşü gerçekleşmiştir.

0.5-10 s aralığı dikkate alındığında; özgün soğutma kanallı kalıpta ortalama arayüzey ısı transfer katsayısı 18210 W/m²K olduğu ve klasik soğutma kanallı kalıpta ise 8164.4 W/m²K olarak hesaplanmıştır. Özgün soğutma kanallı kalıpta klasik soğutma kanallı kalıba kıyasla 2.23 kat daha iyi ısı transfer katsayısı olduğu hesaplanmıştır.

Bu çalışma sayesinde özgün soğutma kanallı kalıp tasarımı, imalatı ve optimum çalışma şartlarının belirlenmesi konusunda ileride yapılacak uygulamalara katkı sağlayacaktır. Bu çalışmadaki tasarımlar yapılacak olan özgün soğutma kanallı kalıpların yolluk, itici ve soğutma sistemlerinin iyileştirilmesinde yarar sağlayacaktır. Yapılan tasarımların ve analizlerin özgün soğutma kanallı kalıp soğutma performansına katkısı olacaktır. Analizlerin, özgün soğutma kanallı kalıbın imalata geçilmeden önce gerekli revizelerin yapılmasına ve imalat için maliyetin azalmasına yardımcı olması beklenmektedir.

Yazar katkısı

Author contribution

Bütün yazarlar araştırmaya eşit oranda katkıda bulunmuşlardır.

Etik beyanı

Declaration of ethical code

Bu çalışmada, “Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesi” kapsamında uyulması gerekli tüm kurallara uyulduğunu, bahsi geçen yönergenin “Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiğine Aykırı Eylemler” başlığı altında belirtilen eylemlerden hiçbirinin gerçekleştirilmediğini taahhüt ederiz.”

Çıkar çatışması beyanı

Conflicts of interest

Bu çalışmadaki yazarların herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Kaynaklar

References

- Akar N., Sahin H.M., Yalçın N. & Kocatepe K. (2008). Experimental study on the effect of liquid metal superheat and casting height on interfacial heat transfer coefficient. *Experimental Heat Transfer*, 21(1),83–98. <https://doi.org/10.1080/08916150701647785>
- Akar N., Boran K. & Hozikliğil B. (2013). Kalıp sıcaklığının döküm parça-kalıp arayüzey ısı transfer katsayısı üzerine etkisi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 28(2), 275-282.
- Arunkumar, S., Rao, K. S., & Kumar, T. P. (2008). Spatial variation of heat flux at the metal–mold interface due to mold filling effects in gravity die-casting. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 51(11-12), 2676-2685. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2007.10.020>
- Bouchard D., Leboeuf S., Nadeau J.P., Guthrie I.L.R. & Mihaiela I. (2009). Dynamic wetting and heat transfer at the initiation of aluminum solidification on copper substrates. *Journal of Materials Science*, 44(8), 1923-1933. <https://doi.org/10.1007/s10853-008-2888-3>
- Chen, Z.W. (2003). Skin solidification during high pressure die casting of Al-11Si-2Cu-1Fe alloy. *Materials Science and Engineering: A*, 348(1-2), 145-153. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(02\)00747-5](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(02)00747-5)

- Christy T.V., Murugan N. & Kumar S. (2010). A comparative study on the microstructures and mechanical properties of Al 6061 alloy and the MMC Al 6061/TiB₂/12p. *Journal of Minerals&Materials Characterization& Engineering*, 9(1), 57-65.
- Coates, B., & Argyropoulos, S. A. (2007). The effects of surface roughness and metal temperature on the heat-transfer coefficient at the metal mold interface. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 38(2), 243-255. <https://doi.org/10.1007/s11663-007-9020-y>
- Dong Y., Bu K., Dou Y. & Zhang D. (2011). Determination of interfacial heat-transfer coefficient during investment casting process of single-crystal blades. *Journal of Materials Processing Technology*, 211(12), 2123-2131. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2011.07.012>
- Dour, G., Dargusch, M., Davidson, C. & Nef, A. (2005). Development of a non-intrusive heat transfer coefficient gauge and its application to high pressure die casting effect of the process parameters. *Journal of Materials Processing Technology*, 169(2), 223–233. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.03.026>
- Durat M., Nart E., Kayıkcı R. & Özsert İ. (2006). Metal döküm kalıpların sonlu elemanlar yöntemiyle tekrarlı termal analizi. *Timak-Tasarım İmalat Analiz Kongresi*, (ss 549-557). Balıkesir. <http://timak.balikesir.edu.tr/pdf/%20549.pdf>
- Fluent M. (2018). *Chapter 17: Modeling Solidification & Melting; ANSYS, Inc.: Canonsburg, PA, USA*. https://mae.iith.ac.in/ansys/files/scientific/fluent_tut/theoryguide_Solidification%20and%20melting.pdf
- Gafur M.A., Haque M.N. & Prabhu K.N. (2003). Effect of chill thickness and superheat on casting/chill interfacial heat transfer during solidification of commercially pure aluminum. *Journal of Materials Processing Technology*, 133(3), 257-265. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(02\)00459-4](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(02)00459-4)
- Garza H.A. & Miller R.A. (2003). The effects of heat released during fill on the deflections of die casting dies. *Journal of Materials Processing Technology*, 142(3), 648–658. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(03\)00685-X](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(03)00685-X)
- Gozlan E. & Bamberger M. (1987). Heat flow and solidification in a metal mould source. *International Journal of Materials Research*, 78(9), 677-682. <https://doi.org/10.1515/ijmr-1987-780911>
- Hallam C.P. & Griffiths W.D. (2004). A model of the interfacial heat-transfer coefficient for the aluminum gravity die-casting process. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 35(4), 721-733. <https://doi.org/10.1007/s11663-004-0012-x>
- Hamasaïid A., Dour G., Loulou T. & Dargusch M.S. (2010). A predictive model for the evolution of the thermal conductance at the casting–die interfaces in high pressure die casting. *International Journal of Thermal Sciences*, 49(2), 365–372. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2009.07.014>
- Ho, K., & Pehlke, R. D. (1985). Metal-mold interfacial heat transfer. *Metallurgical Transactions B*, 16(3), 585-594.
- Ilkhchy, A. F., Jabbari, M., & Davami, P. (2012). Effect of pressure on heat transfer coefficient at the metal/mold interface of A356 aluminum alloy. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 39(5), 705-712. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2012.04.001>
- Ipek O. & Koru M. (2011). Yüksek basınçlı döküm prosesinde kalıp sıcaklığına bağlı olarak döküm-kalıp arayüzeyinde oluşan termal temas direncinin belirlenmesi. *Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi*, 31(1), 45-57.
- Looser R., Vivar M. & Everett V. (2014). Spectral characterization and long-term performance analysis of various commercial heat transfer fluids (HTF) as direct-absorption filters for CPV-T beam-splitting applications, *Applied Energy*, 113, 1496–1511. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.09.001>
- Loulou, T., Artyukhin, E. A. & Bardon, J. P. (1999). Estimation of thermal contract resistance during the first stages of metal solidification process: II—experimental setup and results. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 42(12), 2129-2142 [https://doi.org/10.1016/S0017-9310\(98\)00338-X](https://doi.org/10.1016/S0017-9310(98)00338-X)
- Michel F., Louchez P. R. & Samuel F. H. (1995). Heat transfer coefficient during solidification of al-si alloys: effects of mold temperature, coating type and thickness. *Transactions of The American Foundrymen's Society*, 103, 275-283.
- Reddy, A. V. & Beckermann, C. (1993). Measurements of metal-mold interfacial heat transfer coefficients during solidification of Sn and Sn-Pb alloys. *Experimental Heat Transfer an International Journal*, 6(2), 111-129. <https://doi.org/10.1080/08916159308946449>

- Sabau A.S. & Wu Z. (2007). Evaluation of a heat flux sensor for spray cooling for the die casting processes. *Journal of Materials Processing Technology*, 182(1-3), 312-318. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.07.039>
- Sahin H.M., Kocatepe K., Kayıkçı R. & Akar N. (2006). Determination of unidirectional heat transfer coefficient during unsteady-state solidification at metal casting chill interface. *Energy Conversion and Management*, 47(1), 19-34. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2005.03.021>
- Santos C.A., Siqueira C.A., Garcia A. & Quaresma J.M.V. and Spim J.A. (2004). Metal/Mold heat transfer coefficients during horizontal and vertical unsteady-state solidification of Al-Cu and Sn-Pb alloys. *Inverse Problems in Science and Engineering*, 12(3), 279-296. <https://doi.org/10.1080/10682760310001598706>
- Silva, J. N., Moutinho, D. J., Moreira, A. L., Ferreira, I. L., & Rocha, O. L. (2011). Determination of heat transfer coefficients at metal–mold interface during horizontal unsteady-state directional solidification of Sn–Pb alloys. *Materials Chemistry and Physics*, 130(1-2), 179-185. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2011.06.032>
- Srinivasan M.N. (1982). Heat transfer coefficients at the casting-mould interface during solidification of flake graphite cast iron in metallic moulds. *Indian Journal of Technology*, 20 (4), 123-129.
- Taha M.A., El-Mahallawy N.A., El-Mestekawi M.T. & Hassan A.A. (2001). Estimation of air gap and heat transfer coefficient at different faces of Al and Al-Si casting solidifying in permanent mould. *Materials Science and Technology*, 17(9), 1093-1101. <https://doi.org/10.1179/026708301101511004>
- Zhang B., Maijer D.M. & Cockcroft S.L. (2007). Development of a 3D thermal model of the low pressure die cast (lpdc) process of Al356 aluminum alloy wheels. *Materials Science and Engineering: A*, 464(1-2), 295-305.