



YÜKSEK BASINÇLI DÖKÜM PROSESİNDE KALIP SICAKLIĞINA BAĞLI OLARAK DÖKÜM-KALIP ARAYÜZEYİNDE OLUŞAN TERMAL TEMAS DİRENCİNİN BELİRLENMESİ

Osman İPEK* ve Murat KORU**

* Süleyman Demirel Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü
Isparta, oipek@mmf.sdu.edu.tr

** Süleyman Demirel Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Makine Eğitimi Bölümü
Isparta, mkoru@tef.sdu.edu.tr

(Geliş Tarihi: 05. 03. 2010, Kabul Tarihi: 10. 05. 2010)

Özet: Basınçlı döküm prosesinde, kalıpta, döküm-kalıp ara yüzeyinde ve döküm malzemesinde oluşan termal dirençler üretilen parçanın mekanik, fiziksel özelliklerini belirleyen ve katılma oranını kontrol eden önemli faktörlerdir. Özellikle döküm ve kalıptaki ısı transferinin belirlenmesi döküm parçasının kalitesi açısından önemlidir. Bu amaçla, A413 Alüminyum-silisyum alaşımının enjeksiyonu sırasında döküm-kalıp ara yüzey ısı transfer katsayısı (IHTC), sıcaklık dağılımı ve ısı akısı farklı kalıp başlangıç sıcaklıklarına bağlı olarak belirlenmiştir. Kalıp ve döküm malzemesine farklı derinliklerde yerleştirilen 24 adet termokupl ile sıcaklıklar zamana bağlı olarak ölçülmüştür. Ölçülen ve hesaplanan sıcaklık verileri bir uyum içersindedir. Deneysel olarak ölçülen sıcaklıkları kullanan, FORTRAN programlama dilinde yazılmış sonlu farklar metodu (FDM) ile döküm-kalıp ara yüzey ısı transfer katsayısı (h) ve ısı akısı (q) hesaplanmıştır. Aynı zamanda, soğuk kamaralı döküm makinesinin dinamik parametreleri (enjeksiyon basıncı ve hızı) zamanın bir fonksiyonu olarak dinamik parametre ölçüm cihazı (hidroliskop) ile kaydedilmiştir. Sonuç olarak; ara yüzey ısı transfer katsayısı, sıcaklık dağılımı ve ısı akısı zamana bağlı olarak belirlenmiştir. Kalıp başlangıç sıcaklıklarına bağlı olarak ara yüzey ısı transfer katsayılarındaki ve ısı akılarındaki değişim sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Basınçlı döküm, IHTC, Isı akısı, FDM, Dinamik parametreler.

DETERMINATION OF THE THERMAL CONTACT RESISTANCE IN THE CASTING- MOULD INTERFACE DURING HIGH PRESSURE DIE-CASTING PROCESS DEPENDING ON MOULD TEMPERATURE

Abstract: Thermal resistances in the mould, die-mold interface and mould material are most important parameters for produced material's mechanical, physical and solidification properties in die casting. Particularly, determining of heat transfer in die and mould is important for quality of die material. For this aim, die-mould interfacial heat transfer coefficient (IHTC), temperature distribution and heat flux are determined according to different mould initial temperatures during injection process of A413 aluminum-silicon alloy. Temperatures are measured based on time by 24 pieces of thermocouples which are mounted at different depths of die and mould material. Measured and calculated temperature values are concordant. Interfacial heat transfer coefficient (h) and heat flux (q) are calculated with finite difference method (FDM) by FORTRAN programming language using experimentally measured temperatures values. Additionally, dynamic parameters of cold chamber machine (injection pressure and speed) are recorded with dynamic parameter measuring device as a function of time. As a result, interfacial heat transfer coefficient, temperature distribution and heat flux are determined as a function of time. The variations of heat transfer coefficients and heat flux are presented according to mould initial temperatures.

Keywords: Die casting, IHTC, Heat Flux, FDM, Dynamical parameters.

SEMBOLLER

a	Küresel geometride radyal iç yarıçap	k	Isı iletkenlik katsayısı, [W/mK]
b	Küresel geometride radyal dış yarıçap	L	Ergime gizli ısı, [J/kg]
c	Özgül ısı, [J/kgK]	q	Isı akısı [MW/m ²]
h	Döküm-kalıp ara yüzey ısı transfer katsayısı [kW/m ² K]	q'''	Birim hacimde ısı üretim oranı, [W/m ³]
h*	Modelleme ile elde edilen IHTC [kW/m ² K]	ρ	Yoğunluk, [kg/m ³]
		t	Zaman, [s]
		T	Sıcaklık, [K]
		T _C	Döküm metal yüzey sıcaklığı, [K]

T_M	Soğutucu metal yüzey sıcaklığı, [K]
r	Döküm yarıçapı, uzaklık mesafe [m]
h^*	Modelleme ile elde edilen ara yüzey ısı transfer katsayısı [$\text{kW}/\text{m}^2\text{K}$]
P	Basınç [Bar]
f_s	Katılaştıran metal miktarı [%]
$R''_{t,c}$	Termal temas direnci [$\text{m}^2\text{K}/\text{W}$]
Δt	Zaman aralığı
Δr	Mesafe aralığı
Alt indisler	
m	Düğüm noktası
Üst indisler	
t	Zaman işaret

GİRİŞ

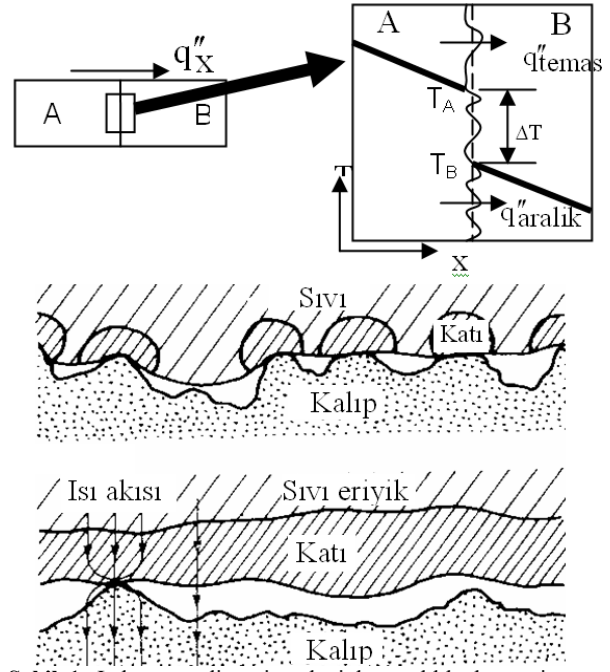
Basınçlı döküm, sıvı metalin yüksek basınç ve yüksek hız altında metal kalıba gönderilmesi sonrasında kalıp içersinde katılaşmasını tamamlayarak parça üretimine imkân veren bir döküm yöntemidir. Basınçlı döküm prosesinde döküm-kalıp ara yüzeyindeki ısı transferi döküm parçasının mikro ve makro yapısını önemli derecede etkilemektedir. Bu nedenle sıvı metalin enjeksiyon haznesine döküldükten sonra başlayan ve enjeksiyon kalıbında katılaşma tamamlanana kadar süren basınçlı döküm prosesinde döküm-kalıp ara yüzey ısıl temas direncinin belirlenmesi son derece önemlidir. Özellikle basınçlı döküm prosesi diğer döküm yöntemleri ile kıyaslandığında (kum kalıba döküm) hem döküm hem kalıp malzemesinin yüksek ısıl iletkenliğe sahip olması ara yüzeyde gerçekleşen ısı transfer karakteristiğinin belirlenmesini önemli bir araştırma konusu yapmıştır (Doehler, 1974, Flemings, 1976; Vinarçık, 2003; Anderesen, 2005).

Basınçlı döküm prosesinde sıvı metalin katılaşması boyunca gerçekleşen döküm-kalıp ara yüzey ısıl temas direncinin tam olarak belirlenebilmesi, döküm ve kalıp malzemesinin sıcaklığa bağlı termofiziksel özelliklerinin, kalıp sıcaklık dağılımının ve sınır şartlarının çok iyi belirlenmesine bağlıdır. Bu parametreler proses boyunca sıcaklığa ve zamana bağlı olarak değişim gösterir. Katılaşma tamamlanmaya kadar katılaştıran metalin özgül ve ergime gizli ısıları bir dizi termal dirençlerle karşılaşılarak kalıba geçer. Bu süreç boyunca ısı önemli ölçüde iletim yoluyla transfer olurken yüksek sıcaklıktan dolayı ışınım ve taşınım ile de transfer olmaktadır (Chen, 2003; Dour vd., 2005; Şahin vd., 2006; Akar vd., 2008).

Döküm yöntemlerinin tamamında katmanların ara yüzeylerinde sıcaklık düşmesi meydana gelir. Bu sıcaklık düşmesi ısıl temas direnci $R_{t,c}$ ile ilişkilidir. Bu etki Şekil 1'de gösterildiği gibi, ara yüzeyin birim alanı için direnç, denklem 1'deki gibi ifade edilmektedir. Sonlu bir temas direncinin varlığı yüzey pürüzlülüğünden kaynaklanır. Temas noktaları, çoğu durumda, hava ile dolu olan aralığa yayılmıştır. Isı geçişi bundan dolayı gerçek temas noktaları üzerinden iletimle ve aralık boyunca iletim ve/veya taşınım ile

olur. Temas alanı genellikle küçüktür ve özellikle, pürüzlü yüzeyler için dirence en büyük katkı aradaki hava tarafından yapılır (Incropera ve Dewitt, 2001; Campbell, 2002).

$$R''_{t,c} = \frac{T_A - T_B}{q''_x} \quad (1)$$



Şekil 1. Isıl temas direnci nedeniyle sıcaklık düşmesi ve ısı transferi (Incropera ve Dewitt, 2001; Campbell, 2002).

Literatür incelendiğinde, döküm-kalıp ara yüzey ısı transfer katsayısının belirlenmesi amacıyla kullanılan temelde iki farklı metod mevcuttur. Birinci metod ara yüzey boşluk boyutunun LVDT ile ölçülmesi ve boşluk boyutunun genişliğine bağlı olarak ısı transfer katsayısının belirlenmesi (Trovant ve Argyropoulos, 1998). Diğer metod ise döküm ve kalıp malzemesinin farklı noktalarına yerleştirilen termokupullar ile sıcaklıklarının ölçülmesi ve nümerik hesaplama metodları (FDM, FEM) ile ara yüzey ısı transfer katsayısının belirlenmesinden oluşmaktadır. Bazı araştırmacılar döküm-kalıp ara yüzey ısı transfer katsayısının belirlenmesi konusunda çalışmalar yapmışlardır. Bu araştırmalarda, sıvı metal kalıba ilk döküldüğü anda sıvı metalin ıslatabilme kabiliyeti, kalıbın yüzey pürüzlülüğü, sıvı metale uygulanan basınç, sıvı metalin kalıba giriş hızı, kalıp ve döküm sıcaklığına bağlı olarak ısı transfer katsayısının çok yüksek değerlerde olduğu görülmüştür. Daha sonra sıvı metalin kalıba temas noktalarında aşırı soğumanın çekirdeklenmeye sebep olması ile döküm kalıp ara yüzeyinde meydana gelen kabuk ile ara yüzey ısı transferinin azaldığı bildirilmiştir (Griffiths vd., 2000; Taha vd., 2001; Santos vd., 2002; Akar, 2006).

Basınçlı döküm prosesinde farklı proses parametreleri ve döküm-kalıp ara yüzey ısı transfer katsayılarına etkileri bazı araştırmacılar tarafından çalışılmıştır. (Papai, 1994; Lau, vd., 1998; Guo Zhi-peng, vd., 2008;

Hamasaiid, vd., 2010). Dour, G., vd, (2005) basınçlı döküm prosesi için kalıp sıcaklığı, döküm sıcaklığı, enjeksiyon basıncı, enjeksiyon hızı gibi parametreleri düzenlemişlerdir. Yaptıkları çalışmalarda, kalıbın ilk sıcaklığı ve piston hızının döküm kalıp ara yüzey ısı transfer katsayısı üzerine önemli bir etkiye sahip olduğunu tespit etmişler, enjeksiyon basıncı, döküm sıcaklığı ile ilgili önemli bir etkinin olmadığını söylemişlerdir. Krimpenis vd., (2006), enjeksiyon hızı, kalıp ve döküm sıcaklığının ürün kalitesi üzerine etkilerini araştırmışlardır. Loulou vd., (1999), döküm sıcaklığının artması ile termal temas direncinin azaldığını bildirmiştir. Taha vd., (2001), Santos vd., (2002), Hallam ve Griffiths, (2004), Gafur vd., (2003), Akar vd., (2008), döküm sıcaklığı arttıkça ısı transfer katsayısının arttığını bildirmişlerdir.

Hallam ve Griffiths, (2004), Sabau ve Wu (2007), kalıp sıcaklığının artması ile döküm-kalıp ara yüzey ısı transfer katsayısının arttığını bildirmişlerdir. Bu çalışmaların aksine Srinivarsan (1982), Dour vd., (2005) tarafından yapılan çalışmada, kalıp sıcaklığının artması ile döküm kalıp ara yüzey ısı transfer katsayısının azaldığı bildirilmiştir. Broucuret vd., (2001) kalıp sıcaklığının artması ile ısı akısı değerinin azaldığını bildirmiştir.

Basınçlı döküm prosesinde, enjeksiyondan önce kalıp belli bir sıcaklığa ısıtılmaktadır. Enjeksiyon başladıktan sonra, dökülen malzemenin sıcaklığı ile kalıp ısınmaya devam etmekte ve kalıp sıcaklığı belli sıcaklık değerleri arasında tutulamamaktadır. Bu durumda kalıp yüzeyi ve kalıp gövdesi bir soğutma sistemi ile soğutulmuş kalıbın belli limit sıcaklık değerinde tutulması gerekmektedir. Soğutma işlemi ile hem kalıp soğutulmakta hem de enjekte edilen malzemenin katılaşma şartlarını kontrol edilebilmektedir. Bu konuda literatürde sınırlı sayıda çalışma yapılmış ve araştırmacılar enjeksiyon prosesi boyunca kalıp üzerine yerleştirilen soğutma kanallarından, kalıp yüzeyine soğutucu püskürtülmesinden kaynaklanan kalıp sıcaklık dağılımını, soğutma oranını, soğuma zamanını ve çekilen ısı oranını belirlemişlerdir (Chen, 2003; Garza ve Miller, 2003).

Literatürde genel olarak kalıp sıcaklığının artması ile döküm-kalıp ara yüzey ısı transfer katsayısının azaldığı ifade edilmekle birlikte; kalıp malzemesi, kaplama cinsi ve alayım tipine bağlı olarak döküm-kalıp ara yüzey ısı transfer katsayısı değişim göstermektedir. Literatürde farklı enjeksiyon parametrelerine bağlı olarak yapılan çalışmalarda döküm kalıp ara yüzey ısı transfer katsayısı ile ilgili farklı yaklaşımlar mevcuttur.

Bu araştırmalarda dikkate alınarak çalışmamız, A413 alüminyum alaşımının basınçlı dökümü esnasında farklı kalıp sıcaklığı değerlerine göre döküm kalıp ara yüzey ısı transfer katsayısının belirlenmesini amaçlamıştır. Bu amaçla; 200 ton mengine kilitleme gücüne sahip soğuk kamaralı döküm makinesi, termofiziksel özellikleri iyi bilinen döküm malzemesi (A413) ve kalıp malzemesi

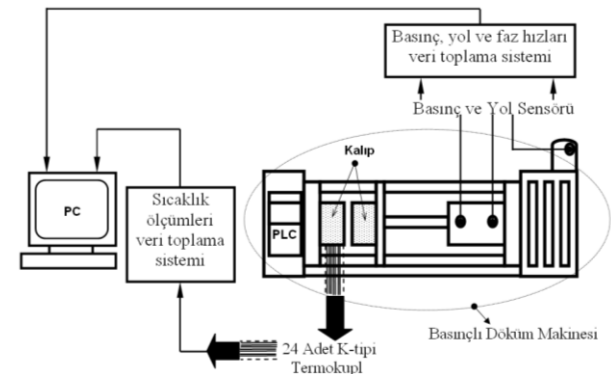
(H13) seçilmiştir. Enjeksiyon hızı 1.9-2.2 m/s ve enjeksiyon basıncı 170-175 bar olarak düzenlenmiştir.

Kalıp küresel geometriye uygun olarak hazırlanmıştır. Yönlü katılaşma sağlayabilmek için kalıp yüksek sıcaklığa dayanıklı yalıtım malzemesi ile izole edilmiş ve soğutma yapılmıştır. Küresel geometriye uygun olarak döküm ve kalıp malzemesine hem ekselel hem de açısal olarak yerleştirilen termokupplardan sağlanan deneysel sıcaklık verileri sonlu farklar metoduna dayalı FORTRAN programlama dilinde yazılan bir bilgisayar kodu ile elde edilmiştir. Kalıp sıcaklığına bağlı olarak elde edilen sonuçlar literatür değerleri ile tartışılmıştır.

MATERYAL METOD

Deneylerin Yapılışı ve Deneysel Sistemi

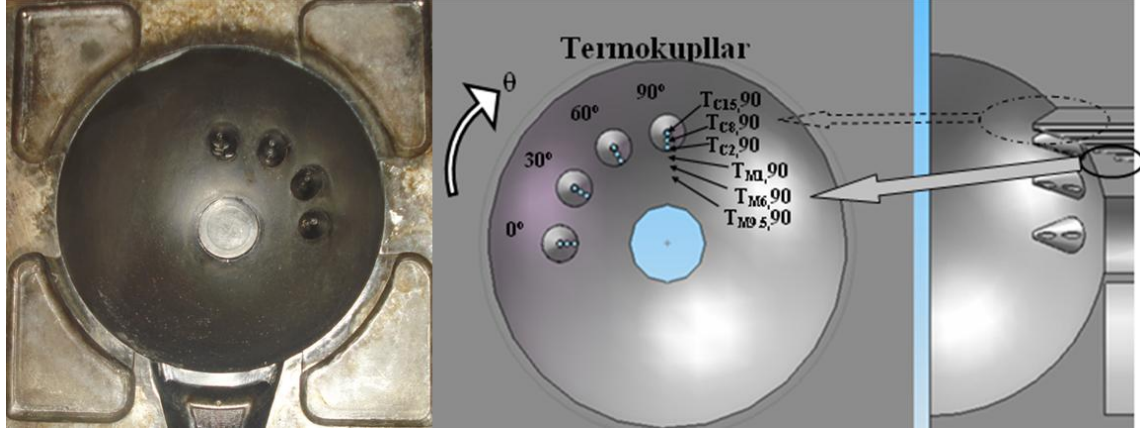
Basınçlı döküm makinesi ve deneysel sistemin genel gösterimi Şekil 2’de verilmiştir. Kalıp H13 çeliğinden ve 100 mm çapında küresel geometride yapılmış, tek yönlü katılaşma sağlayabilmek için kalıp izole edilmiş ve kalıbın soğutulması sağlanmıştır.



Şekil 2. Deneysel çalışmanın yapıldığı sistemin genel gösterimi

Basınçlı döküm kalıbından sıcaklıkların ölçülmesi amacıyla kalibrasyonları yapılmış $\pm 1,5$ °C ölçme hassasiyetine sahip K tipi 24 adet mineral izoleli termokupl aksiyal yönde 90°'lik bir dilim üzerinde 30°'lik aralıklarla hem döküm malzemesine hem de kalıba Şekil 3’de gösterildiği gibi yerleştirilmiştir. Bu termokupplardan 4 adedi kalıp ara yüzeyinden 15 mm (T_{C15}) uzakta, 4 adedi kalıp ara yüzeyinden 8 mm (T_{C8}) uzakta ve 4 adedi kalıp ara yüzeyinden 2 mm (T_{C2}) uzakta olacak şekilde döküm malzemesine yerleştirilmiştir. Benzer şekilde 4 adedi kalıp ara yüzeyinden 1 mm (T_{M1}) geride, 4 adedi kalıp ara yüzeyinden 6 mm (T_{M6}) geride ve 4 adedi kalıp ara yüzeyinden 9.5 mm ($T_{M9,5}$) geride olacak şekilde kalıp içersinde kalacak şekilde yerleştirilmiştir. Tablo 1’de termokupplların isimleri ve konumları verilmiştir. Bu termokuppllar kompanzasyon kablosu ile veri toplama ünitesine bağlanmıştır.

Basınçlı döküm prosesi esnasında enjeksiyon makinesinin dinamik parametrelerini ölçmek amacıyla hidroliskop kullanılmıştır. Hidroliskop ile enjeksiyon 1. faz hızı, 2. faz hızı, enjeksiyon basıncı, kalıp doldurma



Şekil 3. Sıcaklıkların ölçülmesi amacıyla termokupulların kalıp üzerine yerleştirilmesi.

zamanı, gecikme zamanı, topuk kalınlığı, maksimum basınç, faz geçiş noktası, yolluk kesit hızı, kalıp yüzey alanına uygulanan kuvvet, maksimum strok gibi proses parametreleri belirlenmektedir.

Dinamik parametrelerin belirlenmesi ile basınçlı döküm makinesinin dinamik karakteristiği ortaya konulmaktadır. Belirlenen bu dinamik karakteristiklerin döküm kalıp ara yüzey ısı temas direnci ile birlikte değerlendirilmesi sonucunda enjeksiyon prosesine ait çalışma şartlarının tespiti mümkün olabilmektedir. Basınçlı döküm prosesi ile ilgili yapılan deneysel çalışmada, döküm alaşımı olarak ötektik Al-Si alaşımı (A413) kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan A413 alaşımının kimyasal bileşimi Tablo 2’de verilmiştir. Deneysel çalışmada kullanılan kalıp ve döküm malzemelerine ait termofiziksel özellikler Tablo 3’de sunulmuştur (Hallam, Griffiths, 2004; Akar, 2006).

Deney düzeneğinde katılaşmanın tek yönde ve ısı transferinin aksiyal yönde gerçekleşmesini sağlamak amacıyla kalıp soğutulmuştur. Kalıp 60 mm kalınlığında, yüksek sıcaklığa (1200 °C) dayanıklı

Tablo 1. Kalıp üzerine monte edilen termokupulların isim ve konumları.

Termokupl	Termokupl İsmi
$T_{Ca,b}$	$T_{C15,0}-T_{C8,0}-T_{C2,0}$ $T_{C15,30}-T_{C8,30}-T_{C2,30}$ $T_{C15,60}-T_{C8,60}-T_{C2,60}$ $T_{C15,90}-T_{C8,90}-T_{C2,90}$
$T_{Ma,b}$	$T_{M1,0}-T_{M6,0}-T_{M9.5,0}$ $T_{M1,30}-T_{M6,30}-T_{M9.5,30}$ $T_{M1,60}-T_{M6,60}-T_{M9.5,60}$ $T_{M1,90}-T_{M6,90}-T_{M9.5,90}$
Açıklama	Burada C termokupulların döküm malzemesine, M ise termokupulların kalıp malzemesi daldırıldığını, a termokuplun ara yüzeyden uzaklığını b ise termokuplun aksiyal yöndeki derece olarak konumunu ifade etmektedir. $T_{CC8,0}$; Döküm tarafı orta nokta için hesaplanan sıcaklık değerini $T_{MC6,0}$; Kalıp tarafı orta nokta için hesaplanan sıcaklık değerini ifade etmektedir.
Termokupl K (CrNi) tipi olup ölçme hassasiyeti $\pm 1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ veya $0.004 \times T $ dir.	

seramik yalıtım malzemesi ile izole edilmiş böylece yönlü katılaşma şartları elde edilmiştir (Şekil 4).

Döküm malzemesinin ergitme işlemi elektrikli ergitme fırınında yapılmıştır. Döküm sıcaklığı olarak 973 K seçilmiştir. Sıvı metal bir kepçe vasıtasıyla basınçlı döküm makinesinin haznesine dökülmüştür. Deneyin başlangıcında, metal enjeksiyon kalıbı 8 adet fişek tipi rezistansla üç farklı kalıp sıcaklığına (483–533–590 K) ısıtılmıştır. Basınçlı döküm prosesi için; enjeksiyon basıncı (intensification pressure) 170-175 bar ve enjeksiyon 2.Faz hızı 1.9-2.2 m/s olarak seçilmiştir.

Katılaşma esnasında termokupullardan 0.004 saniye (1 s’de 250 veri) zaman aralığında sıcaklıklar ölçülmüş ve ölçülen bu değerler bir veri toplama ünitesi (NI SCXI-1600) ile kaydedilerek bilgisayar ortamına aktarılmıştır. Enjeksiyon işlemi tamamlandıktan 60 sn sonra kalıp açılarak katılaşmanın tamamlanması sağlanmıştır. Bir sonraki deneye geçilmeden evvel kalıbın deneysel çalışmaya uygun sıcaklığı ulaşması beklenmiştir. Katılaşma periyodu boyunca ölçülen zamana bağlı sıcaklık verileri sonlu farklar yöntemi (FDM) kullanılarak döküm ve kalıp malzemesinde ara yüzeye en yakın noktalar için sıcaklık dağılımları tespit edilmiştir. Kalıp ve döküm için belirlenen bu ara yüzey sıcaklıkları kullanılarak döküm-kalıp ara yüzey ısı transfer katsayısı ve ısı akısı kalıp başlangıç sıcaklığına bağlı olarak belirlenmiştir.

Küresel Geometride ve Radyal Yönde Isı Transfer Katsayısının Belirlenmesi

Basınçlı döküm prosesinde, kalıp ve dökümdeki sıcaklık dağılımının bilinmesi önemlidir. Kalıp ve dökümdeki sıcaklık dağılımı gerçek uygulamalarda üç boyutludur. Küresel geometrinin simetri özelliğinden yararlanabilmek amacıyla küresel koordinat sistemi seçilmiştir. Fakat problemin sadeleşmesi ve çözüm kolaylığı açısından döküm kalıbına yalıtım yapılmıştır. Bu sayede döküm-kalıp ara yüzey ısı transferi zamana bağlı, tek boyutlu ve radyal yöndeki sıcaklık dağılımları kullanılarak döküm-kalıp ara yüzey ısı transfer katsayısının hesaplanması için eşitlik (2) kullanılmıştır (Özişik, 1994; Genceli 2000; Santos vd., 2002).

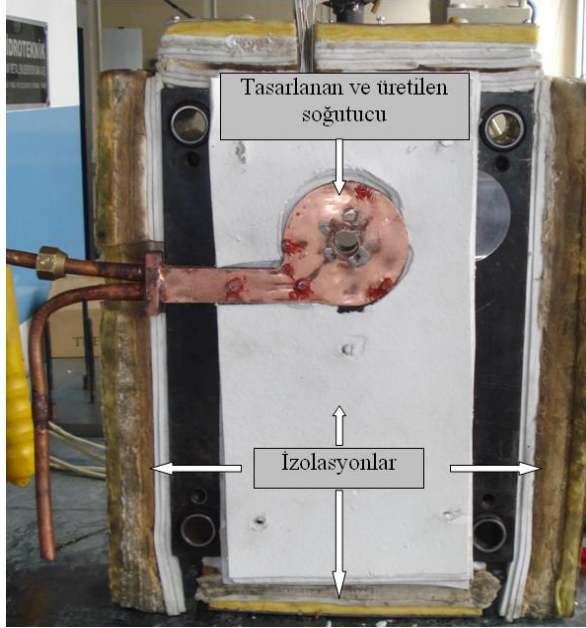
Tablo 2. Deneyleerde kullanılan ötektik Al-Si (A413) alaşımının kimyasal bileşimi.

Deneyleerde kullanılan malzemenin kimyasal bileşimi (% Ağırlık)											
Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Cr	Ni	Ti	Sn	Pb
84.9	12,1	1,09	0,667	0,323	0,232	0,491	0,0136	0,179	0,020	0,0206	0,0365

Tablo.3 Isı transferi katsayısının hesaplanmasında kullanılan termofiziksel özellikler (Hallam, Griffiths, 2004; Akar, 2006).

Malzeme	c, J/kgK	ρ , Kg/m ³	k, W/mK	L, J/kg
H13	435,37+0,2 T	7866,86-0,3174 T	0,00029.T-26,85	-
A413 (katı)	1180	2682,54-0,2969 T	149,2+0,019667 T	505530
A413 (sıvı)	1200	2613,27-0,2414 T	0,865 T-648,75	

T Sıcaklık (K), Ergime sıcaklığı 850 K, Katılaşma sıcaklığı 849 K



Şekil 4. Basınçlı döküm kalıbının izolasyonu ve soğutucunun montajı.

$$h = \frac{\dot{q}}{(T_C - T_M)} \quad (2)$$

Burada h döküm-kalıp ara yüzeyindeki ısı transferi katsayısıdır (W/m²K), \dot{q} birim zamanda birim yüzeyden geçen ısı akısı (W/m²), T_C ve T_M sırasıyla döküm ve kalıp ara yüzey sıcaklıklarıdır (K). (\dot{q}) Isı akısı değeri için döküm ve kalıp malzemesi üzerinden gerçekleşen ısı akıları kullanılmıştır. Hem kalıp malzemesi hem de döküm malzemesinin katı ve sıvı faz durumları için tek boyutlu zamana bağlı sıcaklık dağılımı aşağıdaki eşitliğin çözümü ile elde edilmiştir.

$$\rho c \frac{dT}{dt} = \frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} \left(kr^2 \frac{dT}{dr} \right) \quad (3)$$

Bu eşitlikte ρ , c ve k sırası ile malzemenin yoğunluğu (kg/m³), özgül ısı (J/kgK) ve ısı iletkenlik katsayısı (W/mK), T sıcaklık (K), t zaman (s), r uzaklıktır (m). Döküm prosesinde metaller katılaşırken ergime gizli ısılarını bırakarak faz dönüşümüne uğrarlar ve bu durumda döküm parçası içinde ısı üretimi \dot{q}''' (W/m³) gerçekleşir. Isı üretimi olması durumunda, denklem aşağıdaki şekilde yazılır.

$$\rho c \frac{dT}{dt} = \frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} \left(kr^2 \frac{dT}{dr} \right) + \dot{q}''' \quad (4)$$

Eşitliğin sağ tarafındaki \dot{q}''' terimi aşağıdaki eşitlik ile hesaplanır.

$$\dot{q}''' = \rho L \frac{df_s}{dt} \quad (5)$$

Burada L ergime gizli ısı (J/kg) ve f_s katılaşma sırasındaki katı oranıdır. Eşitlik (5) deki $\frac{df_s}{dt}$ terimi sıcaklıkla ilişkilendirildiğinde aşağıdaki şekilde yazılır.

$$\frac{df_s}{dt} = \frac{df_s}{dT} \frac{dT}{dt} \quad (6)$$

Eşitlik (6) eşitlik (4)'de yerine yazılırsa (7) eşitliği elde edilir.

$$\rho c \frac{dT}{dt} = \frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} \left(kr^2 \frac{dT}{dr} \right) + \rho L \frac{df_s}{dT} \frac{dT}{dt} \quad (7)$$

Terimler düzenlendiğinde ise eşitlik;

$$\rho(c - L \frac{df_s}{dT}) \frac{dT}{dt} = \frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} \left(kr^2 \frac{dT}{dr} \right) \quad (8)$$

şekline gelir. Burada $c' = c - L \frac{df_s}{dT}$ katılaşma esnasındaki özgül ısı tanımlaması yapıldığında (9) eşitliği elde edilir.

$$\rho c' \frac{dT}{dt} = \frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} \left(kr^2 \frac{dT}{dr} \right) \quad (9)$$

Döküm malzemesinin faz değişim durumu için, bir boyutlu, zamana bağlı, küresel geometride ve radyal doğrultuda sıcaklık dağılımını veren ifade, denklem (9)'de verilmiştir.

Radyal Doğrultuda ve Zamana Bağlı Isı Transfer Katsayısının FDM ile Belirlenmesi

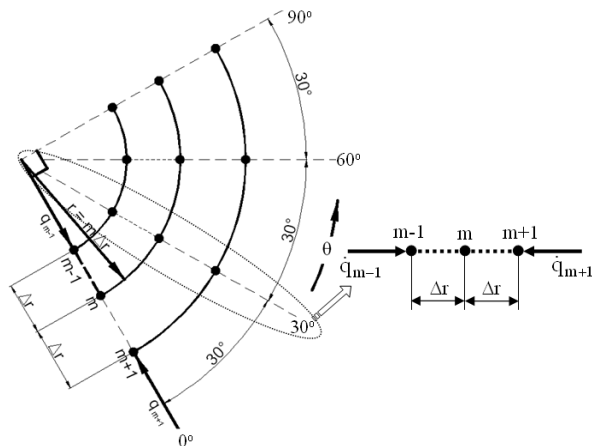
Uygulama kolaylığı nedeniyle ve özellikle nümerik çözümler için FDM çok kullanılan bir yöntemdir. Birçok problem sürekli ve çok değişkenli bir fonksiyon olarak verilebilir veya değişkenlerin belli değerleri için bir fonksiyon oluşturulabilir. Bazı durumlarda fonksiyon sadece bir takım ayırık noktalarla belirlenmiştir. Bu takdirde sonlu farklar metodu kullanılarak bilinmeyen noktalarda fonksiyonun değeri için tahmin yapmak mümkün olabilmektedir. Hatta bu kolaylığı nedeniyle, birçok durumda problem analitik çözüme olduğu halde, problem FDM kullanılarak daha basite indirgenebilir. (3) bağıntısında bir an için k 'nin sıcaklıktan bağımsız olduğu düşünüldüğünde bu denklemin sağ tarafını

$$\frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} \left(r^2 \frac{dT}{dr} \right) = \frac{2}{r} \frac{dT}{dr} + \frac{d^2T}{dr^2} \quad (10)$$

şeklinde yazmak mümkündür. Bu ifade $T(r)$ fonksiyonunun r_m noktasındaki değer için merkezi fark yaklaşımına göre türev işlemi uygulanırsa,

$$\begin{aligned} & \left(\frac{2}{r} \frac{dT}{dr} + \frac{d^2T}{dr^2} \right)_{r_m+\Delta r} \\ &= \lim_{\Delta r \rightarrow 0} \left(\frac{2}{r_m} \frac{T_{r_m+\Delta r} - T_{r_m-\Delta r}}{2\Delta r} + \frac{T_{r_m-\Delta r} - 2T_{r_m} + T_{r_m+\Delta r}}{(\Delta r)^2} \right) \\ &= \frac{T_{m+1} - T_{m-1}}{(\Delta r)^2} + \frac{T_{m-1} - 2T_m + T_{m+1}}{(\Delta r)^2} \\ &= \frac{1}{(\Delta r)^2} \left\{ \frac{1}{m} (T_{m+1} - T_{m-1}) + (T_{m-1} - 2T_m + T_{m+1}) \right\} \end{aligned} \quad (11)$$

bağıntısı elde edilir. Şekil 5'de çalışmada kullanılan küresel geometriye uygun olarak hazırlanan düğüm noktaları verilmiştir (Özışık 1994; Genceli 2000).



Şekil 5. Radyal yöndeki FDM metodu için kullanılan modelin düğüm noktaları.

(11) bağıntısına FDM yönteminde merkezi fark metodu uygulandığı zaman,

$$\begin{aligned} \frac{\rho c}{k} \frac{dT}{dt} &= \frac{1}{\alpha} \frac{dT}{dt} = \frac{1}{r} \frac{dT}{dr} + \frac{d^2T}{dr^2} \\ &\cong \frac{T_m^{t+\Delta t} - T_m^t}{\alpha \Delta t} \\ &= \frac{2}{m \Delta r} \frac{T_{m+1}^t - T_{m-1}^t}{2\Delta r} + \frac{T_{m-1}^t - 2T_m^t + T_{m+1}^t}{(\Delta r)^2} \end{aligned} \quad (12)$$

(12) bağıntısı ile, küresel koordinatlarda ve radyal yönde ısı transfer denkleminin FDM metoduna uygun formu elde edilmiş olur. (12) bağıntısında $T_m^{t+\Delta t}$ terimi çekilirse, (13) bağıntısı elde edilir. (13) bağıntısındaki

$$Fo = \frac{\left(\frac{k}{\rho c}\right) \Delta t}{(\Delta r)^2} \text{ terimi Fourier sayısidir.}$$

$$\begin{aligned} T_m^{t+\Delta t} &= \frac{\alpha \Delta t}{(\Delta r)^2} \left\{ \left[1 - \frac{\Delta r}{m \Delta r} \right] T_{m-1}^t + \left[1 + \frac{\Delta r}{m \Delta r} \right] T_{m-1}^t + \left[1 - 2 \frac{\alpha \Delta t}{(\Delta r)^2} \right] T_m^t \right\} \\ &= Fo \left\{ \left[1 - \frac{1}{m} \right] T_{m-1}^t + \left[1 + \frac{1}{m} \right] T_{m+1}^t \right\} + (1 - 2Fo) T_m^t \end{aligned} \quad (13)$$

(13) bağıntısını, (14) bağıntısı ile de ifade etmek mümkündür.

$$\begin{aligned} T_m^{t+\Delta t} &= \frac{Fo}{r_m^2} \left\{ \left[r_m - \frac{\Delta r}{2} \right]^2 T_{m-1}^t + \left[r_m + \frac{\Delta r}{2} \right]^2 T_{m+1}^t \right\} \\ &+ \left\{ 1 - \frac{Fo}{r_m^2} \left[\left(r_m - \frac{\Delta r}{2} \right)^2 + \left(r_m + \frac{\Delta r}{2} \right)^2 \right] \right\} T_m^t \end{aligned} \quad (14)$$

Burada kararlılık kriteri için, T_m^t teriminin katsayısının sıfırdan büyük olması gereklidir. Bu durumda, denklem (15) bağıntısı ile ifade edilebilir (Özışık 1994; Genceli 2000).

$$\frac{1}{Fo} \geq \frac{\left(r_m - \frac{\Delta r}{2} \right)^2 + \left(r_m + \frac{\Delta r}{2} \right)^2}{r_m^2} \quad (15)$$

Tek boyutlu küresel geometri için sonlu fark çözümünü verecek bağıntı Şekil 6'da verilen ve deneylerde kullanılan kalıp geometrisi için yeniden yazılacak olursa (19) eşitliğine ulaşılır.

$$\Delta r = \frac{b-a}{M} \quad (16)$$

$$\rho c' \frac{dT}{dt} = \frac{1}{r} \frac{dT}{dr} + \frac{d^2T}{dr^2} \quad a < r < b \quad (17)$$

$$\frac{T_i^{t+\Delta t} - T_i^t}{\alpha \Delta t} = \frac{T_{i-1}^t - 2T_i^t + T_{i+1}^t}{(\Delta r)^2} + \frac{2}{a+i\Delta r} \frac{T_{i+1}^t - T_{i-1}^t}{2\Delta r} \quad (18)$$

$$T_i^{t+\Delta t} = Fo \left[1 - \frac{1}{\left(\frac{a}{\Delta r} + i\right)} \right] T_{i-1}^t \quad (19)$$

$$+ (1 - 2 Fo) T_i^t + Fo \left[1 + \frac{1}{\left(\frac{a}{\Delta r} + i\right)} \right] T_{i+1}^t$$

$$\Delta r = \frac{b-a}{M}, \quad Fo = \frac{\alpha \Delta t}{(\Delta r)^2}, \quad (20)$$

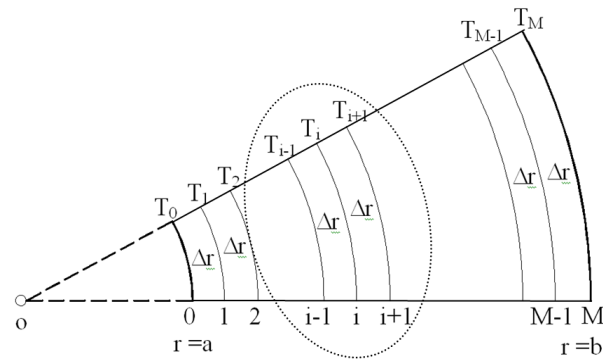
Sınır Şartları

Başlangıç sıcaklığı ve sınır şartları aşağıdaki şekilde belirlenmiştir.

$$T(r,0) = T_i \quad t = 0 \quad (21)$$

$$T(r_1, t) = T_M \quad r_1 = T_{C,15}, t \geq 0 \text{ (Döküm)} \quad (22)$$

$$T(r_2, t) = T_M \quad r_2 = T_{M,9.5}, t \geq 0 \text{ (Kalıp)} \quad (23)$$



Şekil 6. Tek boyutlu küresel geometride radyal yönde ısı transfer bağıntısının FDM uygulandığında simgesel gösterimi.

Döküm-kalıp ara yüzeyinde kalıp tarafında 9.5 mm ($T_{M9.5}$) ve döküm tarafında 15 mm (T_{C15}) mesafeye yerleştirilmiş termokupplardan deneysel olarak ölçülen sıcaklıklar (T_i ve T_M) sınır şartları için kullanılmıştır. Döküm ve kalıp üzerine yerleştirilen $T_{M9.5}$ ve T_{C15} no'lu termokupplardan ölçülen ilk sıcaklıklar döküm ve kalıpta $t=0$ anında eşitlik (21)'de başlangıç sıcaklığı olarak kullanılmıştır. FDM hesaplamalarında termokupplardan ölçülen sıcaklıklar daha sonraki zaman adımlarında sınır şartı olarak kullanılmıştır. (22) ve (23) eşitlikleri döküm ve kalıp yüzey sıcaklıklarının aynı olduğu kabulü ile ara yüzey sınır şartı olarak verilmiştir. Dökümde T_{C2} ve kalıpta T_{M1} no'lu termokupplardan ölçülen sıcaklık değerleri Beck metodu yardımıyla ileri doğru iterasyon yapılarak bilinmeyen sıcaklıklar bulunmuştur. Seçilen zaman aralığında, tüm düğüm noktaları ve ara yüzeylerdeki sıcaklıklar T_C ve T_M hesaplanmıştır.

BULGULAR VE TARTIŞMA

A413 alüminyum alaşımı ve H13 kalıp çeliği kullanılarak yapılan basınçlı döküm prosesi ile ilgili deneysel çalışmaların tamamında enjeksiyon

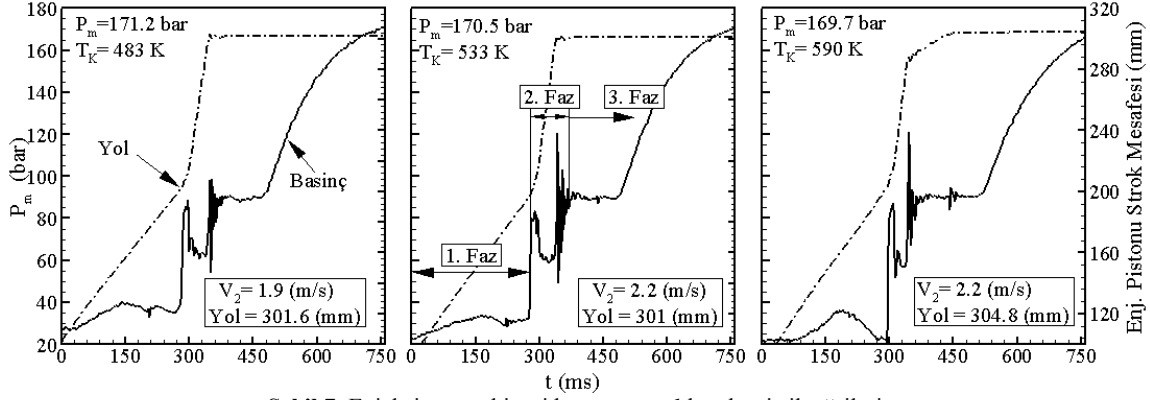
makinesinin dinamik hareketleri 256 örnekleme hızında kaydedilmiştir. Her bir deneysel proses için kaydedilen veriler aynı karakteristikte kaydedilmiştir ve verilerden elde edilen eğrilerin literatürdeki eğriler ile uyumlu olduğu gözlemlenmiştir (Andreoni vd., 1996). Enjeksiyon makinesinin zamana bağlı olarak değişen basınç ve enjeksiyon pistonu mesafesi (yol) eğrileri Şekil 7'de, hız karakteristik eğrileri Şekil 8'de verilmiştir. Tüm parametreler için benzer eğriler elde edilmiştir.

200 ton kilitleme kuvvetine sahip, soğuk kamaralı metal enjeksiyon makinesi ile deneyler, yüksek hızlarda ve yüksek basınç altında yapılmıştır. Şekil 7 ve 8'de görüldüğü gibi enjeksiyon toplam 600 ms'de ve 1, 2 ve 3 faz olmak üzere üç aşamada gerçekleşmektedir.

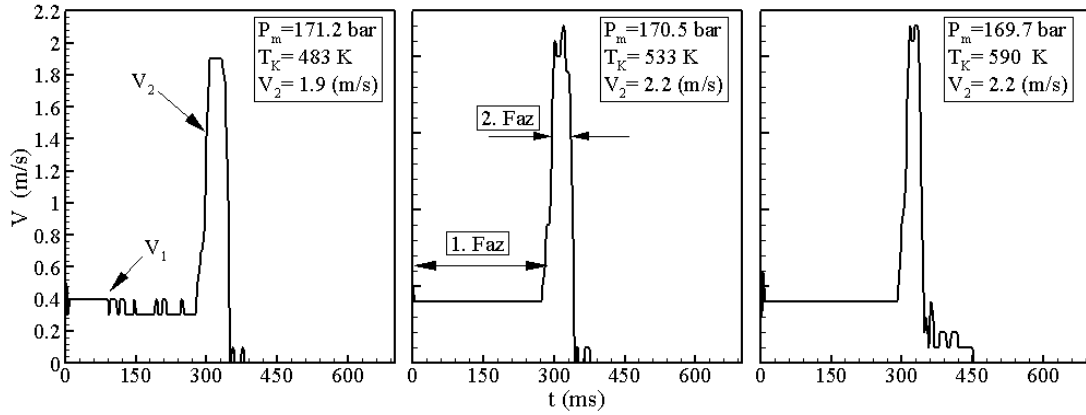
Prosesin 1. fazında makine haznesine dökülen sıvı metal yaklaşık olarak 300 ms de kalıp giriş açıklığına kadar sürüklenmektedir. 2. fazda piston maksimum hızda (2 m/s) sıvı metali 80 – 100 ms süre içerisinde kalıp boşluğuna doldurmaktadır. 3. fazda ise, piston hızı neredeyse hemen hemen sıfır olur ve kalıp içersine doldurulan malzeme üzerine katılma tamamlanmaya kadar, piston tarafında yüksek basınç (170 bar) uygulanır. Böylece kalıp içersinde oluşması muhtemel döküm hataları (boyutsal değişim, gözeneklilik) minimuma indirilebilmektedir. 3. faz kalıp açılma zamanı ile orantılıdır. Kalıp açılmaya kadar malzeme üzerine yüksek basınç uygulanarak katılma tamamlanmaktadır.

Metal enjeksiyon kalıbına ve döküm malzemesine termokuppların yerleştirme planı Şekil 3'de verilmiştir. Bu yerleşim planına göre, 2 m/s enjeksiyon hızında, 170 bar enjeksiyon basıncında, 483, 533 ve 590 K kalıp sıcaklığında, 973 K döküm sıcaklığında ve termokupl konumunun $\theta=30^\circ$ olduğu durumda, 0.004 zaman aralıklarında termokupplarla ölçülen ve ölçüm değerlerinden hareketle nümerik olarak hesaplanan sıcaklık eğrileri Şekil 9, Şekil 10 ve Şekil 11'de verilmiştir. Hesaplamalar yapılırken, döküm ve kalıp malzemeleri için Tablo 3'de verilen termofiziksel değerler kullanılmıştır. Şekillerde T_{M1} , T_{M6} ve $T_{M9.5}$ ile gösterilen sıcaklık eğrileri kalıptan, T_{C2} , T_{C8} ve T_{C15} sıcaklık eğrileri döküm malzemesinden zamana bağlı olarak ölçülen sıcaklıkları temsil etmektedir. T_C döküm ve T_M kalıp için sonlu farklar metodu ile hesaplanan yüzey sıcaklıklarıdır. T_{CC8} ve T_{MC6} döküm ve kalıptaki orta noktalardan hesaplama ile elde edilen sıcaklık eğrileridir. Ölçülen ve hesaplanan sıcaklık değişimleri literatür ile uyum göstermektedir (Dour vd., 2005; Akar vd., 2008).

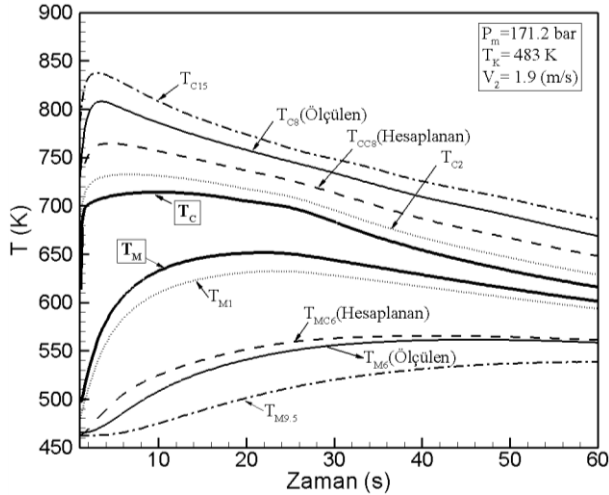
Deneyler, kalıp sıcaklığına bağlı olarak 3. kez tekrar edilmiştir. Döküm ara yüzey sıcaklığı (T_C) ve kalıp ara yüzey sıcaklığı (T_M) değerleri nümerik hesaplama yöntemi (FDM) ile bulunmuştur. Kalıp sıcaklığı ($T_K = 483, 533, 590 \text{ K}$) olduğu durumlar için hesaplanan döküm yüzey ve kalıp yüzey sıcaklıkları Şekil 12'de verilmiştir. Kalıp sıcaklığı 50 K arttığında, T_C ve T_M arasındaki fark yaklaşık 45–70 K arasında olurken, kalıp



Şekil 7. Enjeksiyon makinesi basınç ve yol karakteristik eğrileri.



Şekil 8. Enjeksiyon makinesi hız karakteristik eğrileri.



Şekil 9. 483 K Kalıp sıcaklığında termokupullar ile ölçülen ve hesaplanan sıcaklıklar.

sıcaklığı 107 K arttığına ise T_C ve T_M arasındaki fark yaklaşık 34–58 K arasında bir değişim göstermiştir. Elde edilen sonuçlardan, kalıp sıcaklığının artması ile hesaplanan T_C ve T_M sıcaklıkları arasındaki farkın azaldığı gözlemlenmiştir.

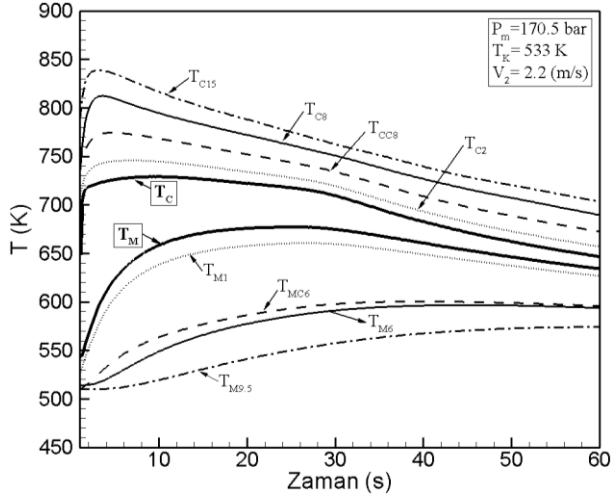
Döküm kalıp ara yüzeyinin döküm tarafından 8 mm (T_{C8}) mesafeye yerleştirilen termokupuldan ölçülen ve aynı nokta için hesaplanan sıcaklık eğrileri Şekil 13'de verilmiştir. Kalıp sıcaklığına bağlı olarak, döküm tarafından 8 mm mesafeye yerleştirilen termokupuldan

ölçülen (T_{C8}) ve nümerik hesaplama yöntemi ile hesaplanan sıcaklık (T_{CC8}) değerleri arasındaki fark 6–12 K olarak belirlenmiştir.

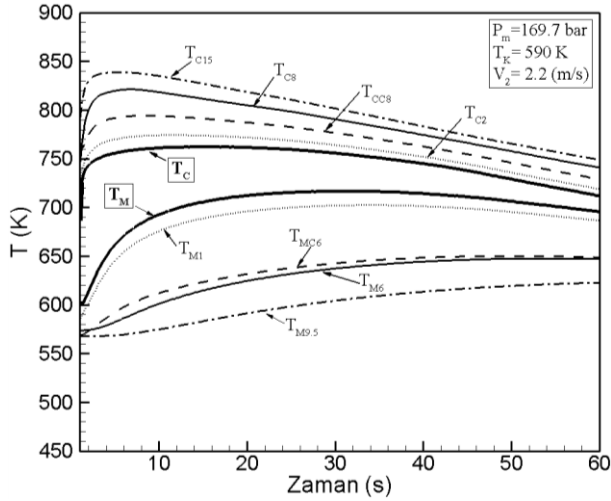
Kalıp tarafından 6 mm (T_{M6}) mesafeye yerleştirilen termokupullardan ölçülen ve aynı nokta için hesaplanan sıcaklık eğrileri Şekil 14'de verilmiştir. Bu şekiller detaylı olarak incelendiğinde, kalıp tarafından 6 mm mesafeye yerleştirilen termokupuldan ölçülen (T_{M6}) ve FDM ile hesaplanan sıcaklık (T_{MC6}) değerleri arasında 4–33 K arasında değişim gösteren bir fark gözlemlenmiştir.

Özellikle 30°'lik açıdaki termokupul için hesaplanan ve ölçülen değerlerin tam bir uyum gösterdiği, hesaplanan ve ölçülen değerler arasındaki farkın 3-8 K olduğu dikkate alınırsa kalıp malzemesi için seçilen termodinamik özelliklerin doğruluğu gözlemlenebilir. Bu sıcaklık farkı literatürde kabul edilebilir sınırlar arasındadır (Şahin vd., 2006). Elde edilen sıcaklık dağılımlarından faydalanılarak döküm-kalıp ara yüzey ısı transfer katsayısı hesaplanmıştır.

Şekil 15'de kalıp sıcaklığına (T_K), ve zamana bağlı olarak (IHTC) verilmiştir. Eğrilerde ara yüzey ısı transfer katsayısı, zaman ve açısal değişim birlikte verilmiştir. 2 m/s enjeksiyon hızında, 973 K döküm sıcaklığında yapılan deneysel çalışmalarda, 483, 533 ve 590 K kalıp sıcaklıkları için hesaplanan (IHTC) sırasıyla 26, 22 ve 16 $\text{kW/m}^2\text{K}$ olarak bulunmuştur.



Şekil 10. 533 K Kalıp sıcaklığında termokupullar ile ölçülen ve hesaplanan sıcaklıklar.



Şekil 11. 590 K Kalıp sıcaklığında termokupullar ile ölçülen ve hesaplanan sıcaklıklar.

Kalıp sıcaklığının artması ile ara yüzey ısı transfer katsayılarında kayda değer bir azalma gözlemlenmiştir. Srinivarsan (1982), Dour vd., (2005) and Guo Zhi-peng vd., (2008), kalıp sıcaklığının artması ile döküm-kalıp

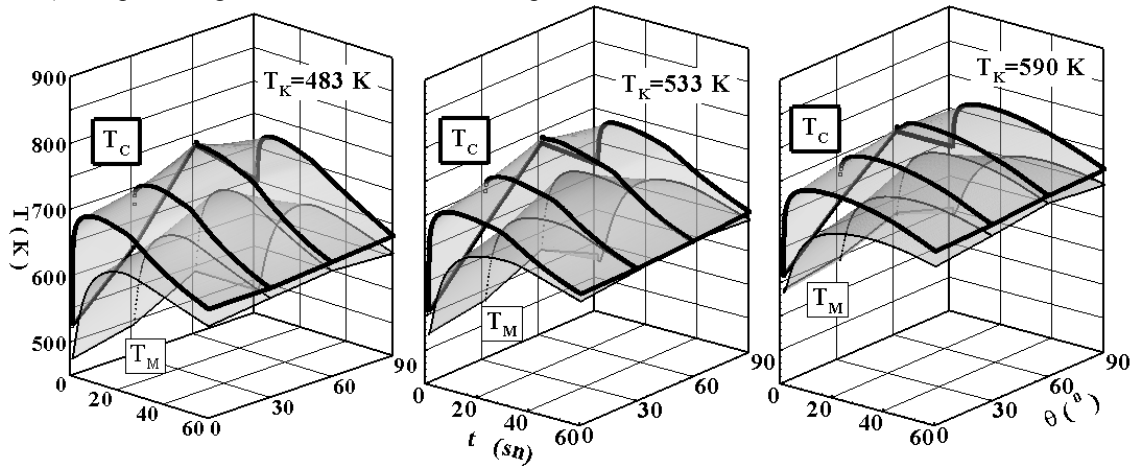
ara yüzey ısı transfer katsayılarının azalacağını ifade etmişlerdir.

Kalıp ve döküm malzemesindeki sıcaklık dağılımları belirlendikten sonra ara yüzey ısı akıları (q) hesaplanmıştır. Şekil 16'da kalıp sıcaklığına (T_K), termokupl konumuna (θ) ve zamana bağlı olarak ara yüzey ısı akıları verilmiştir. Deneylerden elde edilen eğrilerin benzer karakteristiğe sahip olduğu gözlemlenmiştir.

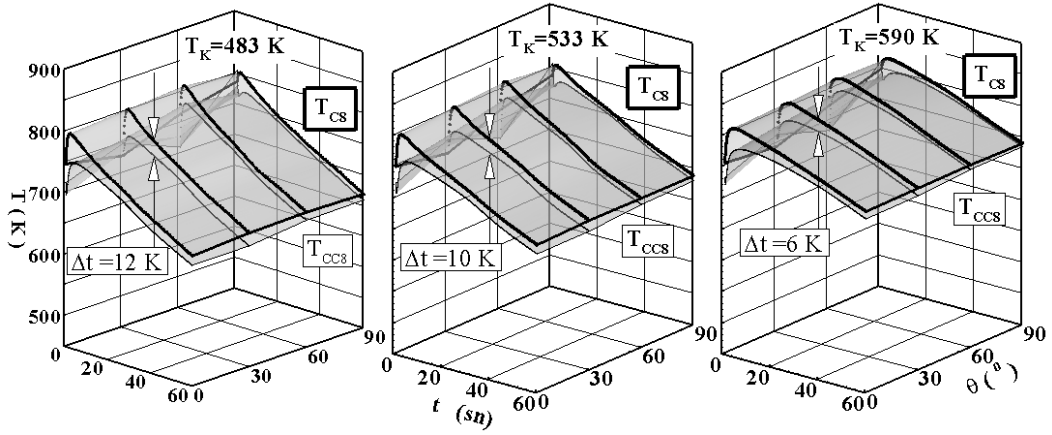
$V_2=2$ m/s, $T_D=873$ K'de yapılan deneysel çalışmalarda, 483, 533 ve 590 K kalıp sıcaklıkları için hesaplanan ısı akısı değerleri sırasıyla 960, 860 ve 620 kW/m^2 olarak bulunmuştur. Kalıp sıcaklığının artması ile ısı akısı değerlerinde kayda değer bir azalma gözlemlenmiştir. Broucaret (2001) ve Dour (2005), kalıp sıcaklığının artması ile ara yüzey ısı akısı değerlerinin azaldığını ifade etmişlerdir.

Şekil 17'de kalıp sıcaklığına bağlı olarak, termokupl konumunun 30° olduğunda ara yüzey ısı transfer katsayısı (h) ve ısı akısında (q) meydana gelen değişim sunulmuştur. Kalıp sıcaklığının artması ile hem döküm kalıp ara yüzey ısı transfer katsayısında hem de ısı akısı değerlerinde kayda değer bir azalma gözlemlenmiştir.

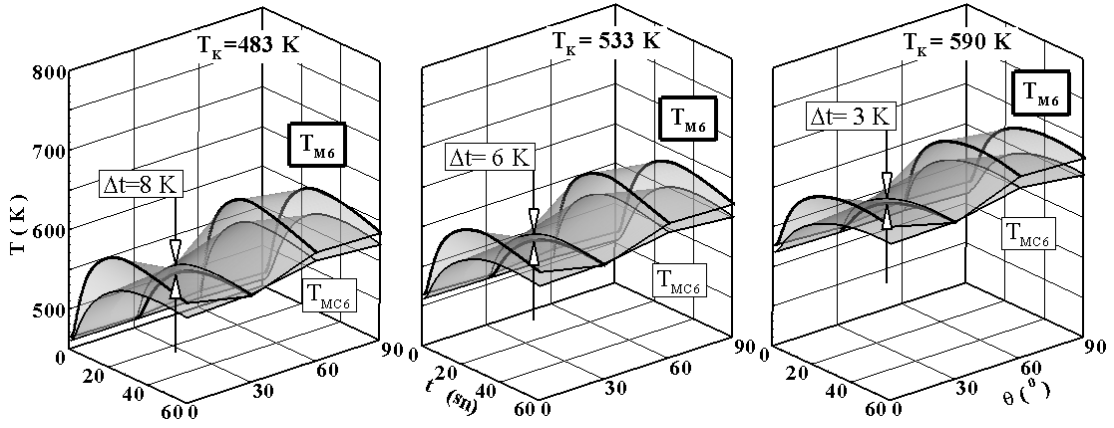
Deneysel verilerden ve nümerik hesaplamalardan sağlanan bulgular ışığında elde edilen zamana bağlı döküm kalıp ara yüzey ısı transfer katsayıları, nümerik yaklaşımlar kullanılarak hazırlanmış bir yazılım ile değerlendirilerek, regresyon analizi yapılmıştır. Döküm-kalıp ara yüzey ısı transfer katsayıları zamana bağlı ve ampirik bağıntı şeklinde verilmiştir. Modelleme sonucuna göre, zaman ve kalıp sıcaklığı dikkate alınarak elde edilen döküm-kalıp ara yüzey ısı transfer katsayısının zaman bağlı değişimi eşitlik (24)'de verilmiştir.



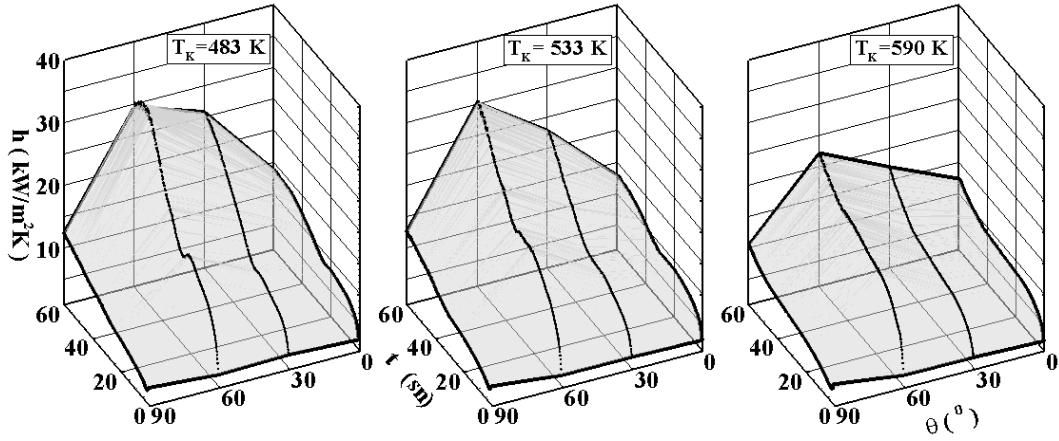
Şekil 12. Nümerik olarak hesaplanan döküm yüzey (T_C) ve kalıp yüzey (T_M) sıcaklıkları



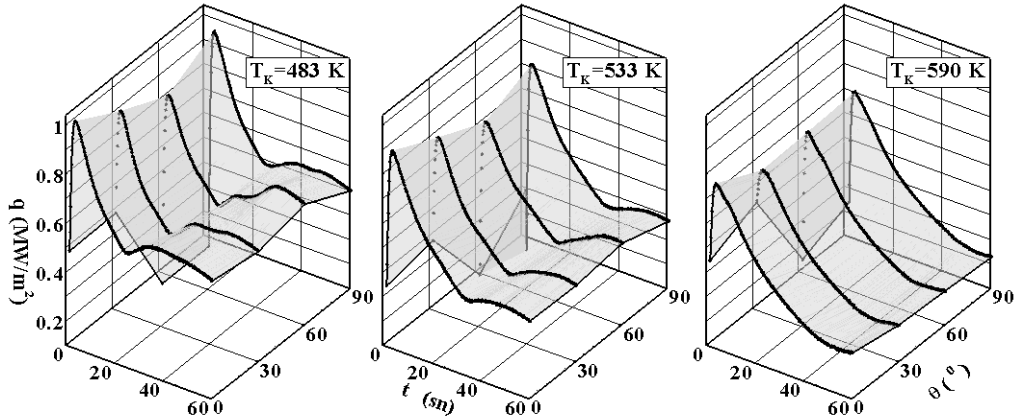
Şekil 13. Nümerik olarak hesaplanan (T_{CCS}) ve ölçülen (T_{CS}) döküm sıcaklıkları.



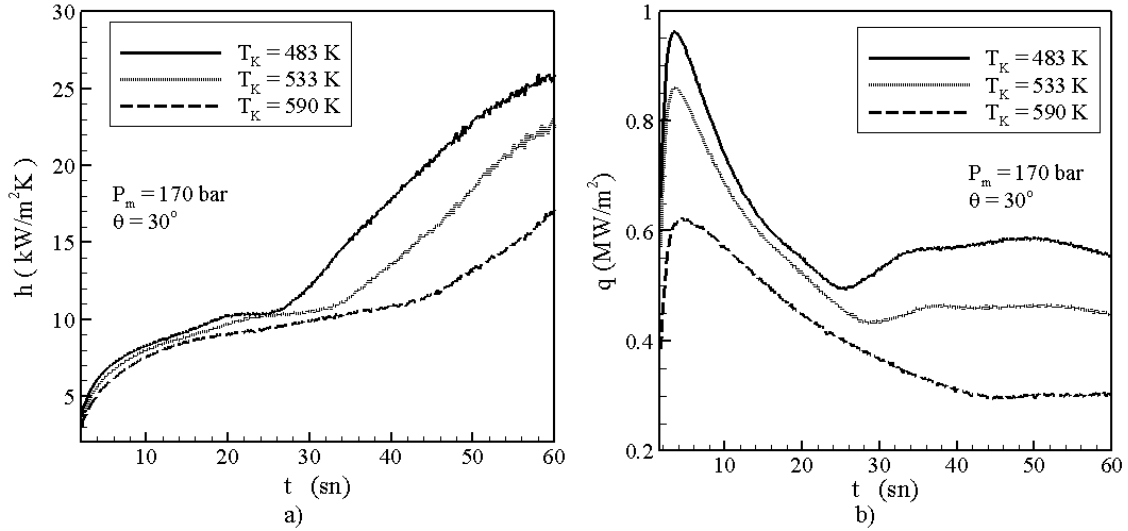
Şekil 14. Nümerik olarak hesaplanan (T_{MC6}) ve ölçülen (T_{M6}) kalıp sıcaklıkları.



Şekil 15. Kalıp sıcaklığına bağlı olarak h 'in zamana bağlı değişimi.



Şekil 16. Kalıp sıcaklığına bağlı olarak döküm-kalıp malzemesi ara yüzeyindeki ısı akılarının zamana bağlı değişimi.



Şekil 17. Kalıp sıcaklığına bağlı olarak, termokupl konumu $\theta=30^\circ$ için hesaplanan h ve q 'nin zamana bağlı değişimi.

Tablo 4. Basınçlı döküm prosesinde zamana bağlı döküm-kalıp ara yüzey ısı transfer katsayıları

Kalıp Sıcaklığı T_K (K)	Döküm Sıcaklığı T_D (K)	Enj. Basıncı P_m (Bar)	Enj. Hızı V_2 (m/s)	$h^* = a b^t T_K^c$ (kW/m ² K)	R^2
473 ~ 590	873	170	1.9 ~ 2.2	$655673.4 (1.0234)^t (T_K)^{-0.846}$	0.90

$$h^* = a b^t T_K^c \quad (24)$$

Burada, t zaman (s), T_K kalıp sıcaklığı, a , b ve c model sabitleridir. Bu sabitler kalıp geometrisine, enjeksiyon basıncına, enjeksiyon hızına, döküm ve kalıp sıcaklığına bağlı olarak değişim göstermektedir.

Zamanın fonksiyonu olarak, kalıp sıcaklığına göre değişen model sabitleri a , b ve c Tablo 4'de verilmiştir. Tablo'da verilen değerler de dikkate alındığında, modelleme ve nümerik hesaplama ile elde edilen döküm-kalıp ara yüzey ısı transfer katsayısı değerlerinin uyumlu olduğu görülmektedir.

SONUÇLAR

Bu çalışmada, 200 ton kapasiteli basınçlı döküm makinesi, A413 Al-Si alaşımı ve kalıp malzemesi olarak H13 çeliği kullanılmıştır. Kalıp küresel geometriye sahip olup tek yönlü katılma şartları için döküm-kalıp ara yüzey ısı transfer katsayısı, sıcaklık dağılımı ve ara yüzey ısı akısı değerleri deneysel verilerin kullanıldığı FDM ile belirlenmiştir.

1) Deneysel olarak yapılan çalışmalardan elde edilen sıcaklık değerleri ile aynı noktalar için nümerik olarak hesaplanan sıcaklık değerleri arasındaki fark; döküm tarafı için 6-12 K ve kalıp tarafı için 3-8 K olarak belirlenmiştir. Bu sıcaklık farkları deneysel sıcaklık ölçümlerinin uygunluğunu ortaya koymuştur.

2) Deneyler aynı şartlarda üçer kez tekrar edilmiştir. Her üç deneyde ölçülen sıcaklık değerleri arasındaki sıcaklık farkı en fazla 8 K olarak belirlenmiştir. Bu değer deneylerin tekrar edilebilirliğini göstermektedir.

3) Kalıp sıcaklığındaki artış ara yüzey ısı akısı (q) değerlerinin azalmasına sebep olmuştur. Termokupl takımları ve konumları dikkate alındığında, kalıp sıcaklığının 50 K artması ile ısı akısı 150-240 kW/m² mertebesinde azalırken, kalıp sıcaklığının 107 K artması ile yaklaşık 250-350 kW/m² mertebesinde azaldığı gözlemlenmiştir.

4) Kalıp sıcaklığının artması ile döküm kalıp ara yüzey ısı transfer katsayıları (h) azaltmıştır. Kalıp sıcaklığının 50 K artması ile döküm-kalıp ara yüzey ısı transfer katsayısı 3-6 kW/m²K mertebesinde azalırken, 107 K artması ile yaklaşık 6-10 kW/m²K mertebesinde azaldığı gözlemlenmiştir. Bu azalma kalıp sıcaklığının artışı yükseldikçe daha hızlı olmaktadır. Döküm kalıp ara yüzey ısı transfer katsayısı ve ısı akısı ile ilgili bulgular literatür ile uyum göstermektedir.

5) Döküm-kalıp ara yüzey ısı transfer katsayılarının $h^* = a b^t T_K^c$ eşitliğine bağlı olarak zamanın ve kalıp sıcaklığının bir fonksiyonu olduğu gözlemlenmiştir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmaya 2003K 121020/12 no'lu DPT projesi çerçevesinde maddi destek sağlayan Devlet Planlama Teşkilatına teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

Akar, N., Katılma sırasında döküm-Kalıp ara yüzeyinde ısı transfer katsayısının incelenmesi. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi*, 136 S., Ankara, 2006.

Akar, N., Şahin, H.M., Yalçın, N., Kocatepe, K., Experimental study on the effect of liquid metal

- superheat and casting height on interfacial heat transfer coefficient, *Experimental Heat Transfer*, 21, 83–98, 2008.
- Anderesen, B., Die casting engineering a hydraulic, thermal and mechanical process. *Marcel Dekker*, 384p, New York, USA, 2005.
- Andreoni, L., Case, M., Pomesano, G., The pressure die-casting process. *Edimet Spa-25124 Brescia Italy*, 1996.
- Broucaret, S., Michrafy A., Dour, G., Heat transfer and thermo-mechanical stresses in a gravity casting die influence of process parameters. *Journal of Materials Processing Technology*, 110, 211-217, 2001.
- Chen, Z.W., Skin solidification during high pressure die casting of Al-11Si-2Cu-1Fe. *Alloy Materials Science and Engineering*, A348 145-153, 2003.
- Campbell, J., Casting. *Butterworth Heinemann*, 288p, Oxford, UK, 2002.
- Doehler, H.H., Basınçlı Döküm. Çeviren, Bayvas, M.Ş., Mesleki ve Teknik Öğretim Kitapları, *Etüd Ve Programlama Dairesi Yayınları* No:80, Erkek Teknik Yüksek Öğretmen Okulu Matbaası, 514s, Ankara, 1974.
- Dour, G., Dargusch, M., Davidson, C., Nef, A., 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, 223–233, 2005.
- Flemings, C.M., Döküm ve Katılaştırma Tekniği. Çeviren, Başaran, M., *İstanbul Teknik Üniversitesi Matbaası, Gümüşsuyu*, 415s, İstanbul, 1976.
- Gafur, M.A., Haque, M.N., Prabhu, K.N., Effect of chill thickness and superheat on casting/chill interfacial heat transfer during solidification of commercially pure aluminum. *Journal of Materials Processing Technology* 133, 257-265, 2003.
- Garza, H.A., Miller, R.A., The effects of heat released during fill on the deflections of die casting dies. *Journal of Materials Processing Technology* 142, 648–658, 2003.
- Griffiths, W.D., Modelled heat transfer coefficient for al-7 wt-%si alloy casting unidirectionally solidified horizontally and vertically downwards. *Materials Science and Technology*, Vol. 16, 255-260, 2000.
- Guo Zhi-peng, Xiong Shou-mei, Liu Bai-cheng, Mei Li, John Allison, Determination of the heat transfer coefficient at metal–die interface of high pressure die casting process of AM50 alloy. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 51, 6032–6038, 2008.
- Hallam, C.P., Griffiths, W.D., A model of the interfacial heat transfer coefficient for the aluminum gravity die casting process. *Metallurgical and Materials Transactions*, 35b, 4, Proquest Science Journals 721 P, 2004.
- Hamasaïid, A., Dour, G., Loulou T., Dargusch, M.S., 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, 365–372, 2010.
- Incropera, P.F., Dewitt, D.P., Heat and Mass Transfer Fundamental (Isı Ve Kütle Geçişinin Temelleri). Çevirenler, Derbentli, T., Genceli, O., Güngör, A., Hepbaşlı, A., İlken, Z., Özbalta, N., Özgüç, F., Parmaksızoğlu, C., Uralcan, Y., *Literatür Yayınları*, 960s, İstanbul, 2001.
- Krimpenis, A., Benardos, P.G., Vosniakos, G.C., Koukouvitaki, A., Simulation-Based selection of optimum pressure die-casting process parameters using neural nets and genetic algorithms. *Int J Adv Manuf Technol*, 27, 509–517, 2006.
- Lau, F., Lee, W.B., Xiong, S.M., Liu, B.C., A study of the interfacial heat transfer between an iron casting and a metallic mould. *Journal of Materials Processing Technology*, 79, 25–29, 1998.
- Loulou, T., Artyukhin, E.A., Bardon, J.P., Estimation of thermal contact resistance during the first stage of metal solidification process: I-experiment principle and modelisation. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 42, 2119-2127, 1999.
- Özışık, M.N., Finite difference methods in heat transfer, *Mechanical and aerospace engineering engineering department, north Carolina state university, CRC*, 412p., Florida, USA, 1994.
- Papai, J.P., Contact heat transfer coefficient in aluminum alloy die casting: an experimental and numerical investigation. *Ph. D. Thesis, The Ohio State University*, 285p, 1994.
- Sabau, A.S., Wu, Z., Evaluation of a heat flux sensor for spray cooling for the die casting processes. *Journal of Materials Processing Technology*, 182, 312-318, 2007.
- Santos, C.A., Siqueira, C.A., Garcia, A., Quaresma, J.M.V., Spim, J.A., Metal/mold heat transfer coefficients during horizontal and vertical unsteady-state solidification of Al-Cu and Sn-Pb alloys. *4th International Conference on Inverse Problems in Engineering*, Rio De Janeiro, Brazil, 2002.
- Srinivasan, M.N., Heat transfer coefficients at the casting-mould interface during solidification of flake graphite cast iron in metallic mould, *Indian Journal of Technology*, 20(4), p.123-129, 1982.
- Şahin, H.M., Kocatepe, K., Kayıkçı, R., Akar, N., Determination of unidirectional heat transfer coefficient during unsteady-state solidification at metal casting-

chill interface. *Energy Conversion and Management*, 47,19-34, 2006.

Şahin, H.M., Kocatepe, K., Kayıkçı, R., Akar, N., Ötektik Al-Si alaşımında soğutucu yüzey pürüzlülüğünün ara yüzey ısı transfer katsayısına etkisi. *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der.*, Cilt 21, No 3, 473-481, 2006.

Taha, M.A., El-Mahallawy, N.A., El-Mestekawi, M.T., Hassan, A.A., 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 Wilson Applied Science & Technology, p. 1093, 2001.

Trovant, M., Argyropoulos, A.S., The implementation of a mathematical model to characterize mold metal interface effect in metal casting. *Canadian Metallurgical Quarterly*, Vol. 37, No 3-4, 185-196, 1998.

Vinarcık, J.E., High Integrity Die Casting Processes. *John Wiley&Sons*, 223p, New York, USA, 2003.



Osman İPEK, 1963 yılında Mersin ili Erdemli ilçesin’de doğdu. 1986 yılında Akdeniz Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü’nden mezun oldu. 1988 yılında yine aynı üniversitenin Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Ana bilim dalında yüksek lisans derecesini aldı. 1993 yılında Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliğinde doktora eğitimini tamamladı ve doktor unvanını aldı. 2003 yılında Doçentlik ve 2008 yılında Profesörlük unvanlarını almıştır. Nükleer Enerji, Isı Transferi, Enerji Yönetimi, Enerji Üretimi ve Kullanımı, Bilgisayar Programlama (C#, C, Fortran 95), doğalgaz sistemleri, Enerji Ekonomisi, Mühendislik Matematiği ve Uygulamaları, Mühendislikte MATLAB uygulamaları, Sayısal Çözümleme, Yakıtlar ve Yanma, Basınçlı döküm konularında çalışmaları vardır. Pek çok endüstriyel projede (TÜBİTAK, DPT, SAN-TEZ-BAP) yürütücü, araştırmacı, hakem ve izleyici olarak görev almıştır.



Murat KORU, 1977 yılında Afyon’da doğdu. 1998 yılında Süleyman Demirel Üniversitesi Tesisat Öğretmenliği Bölümü’nden mezun oldu. 2000 yılında, yine aynı Üniversitenin Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Eğitimi Ana bilim dalında yüksek lisans derecesi aldı. 2009 yılında doktorasını Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Ana Bilim dalında tamamladı ve doktor unvanını aldı. Halen Süleyman Demirel Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Makine Eğitimi Bölümü’nde Arş. Gör. Dr. olarak çalışmaktadır. Enerji, Isı Transferi, Termodinamik, Enerji Üretimi ve Kullanımı, doğalgaz sistemleri, Nümerik yöntemler, Basınçlı döküm, Plastik enjeksiyon konularında çalışmaları vardır. TÜBİTAK, DPT, SAN-TEZ-BAP projelerinde, araştırmacı olarak görev almıştır.