

**KATILAŞMA SIRASINDA DÖKÜM-KALIP ARA YÜZEYİNDE ISI
TRANSFER KATSAYISININ İNCELENMESİ**

Neşet AKAR

**DOKTORA TEZİ
METAL EĞİTİMİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MAYIS 2006
ANKARA**

Neşet AKAR tarafından hazırlanan KATILAŞMA SIRASINDA DÖKÜM-KALIP ARA YÜZEYİNDE ISI TRANSFER KATSAYISININ İNCELENMESİ adlı bu tezin Doktora tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Doç. Dr. Kadir KOCATEPE

Doç. Dr. Hacı Mehmet ŞAHİN
Tez Yöneticileri

Bu çalışma, jürimiz tarafından Metal Eğitimi Anabilim Dalında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. Sedat ÖZBİLEN_____

Üye : Prof. Dr. Ekrem SELÇUK_____

Üye : Doç. Dr. Mehmet ERDOĞAN_____

Üye : Doç. Dr. Kadir KOCATEPE _____

Üye : Yrd. Doç. Dr. Ramazan KAYIKCI_____

Tarih : 08/05/2006

Bu tez, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygundur

KATILAŞMA SIRASINDA DÖKÜM-KALIP ARA YÜZEYİNDE ISI TRANSFER KATSAYISININ İNCELENMESİ

(Doktora Tezi)

Neşet AKAR

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

Mayıs 2006

ÖZET

Döküm yöntemlerinde metal/kalıp ara yüzeyindeki ısı transfer katsayısı döküm parçada yapı ve mekanik özellikleri belirleyen katılma oranını kontrol eden önemli bir faktördür. Metal/kalıp ara yüzeyindeki ısı transfer katsayısı zamana bağlıdır ve alaşım tipi, kalıp malzemesi ve yüzey pürüzlülüğü, kalıp ve döküm sıcaklıkları, katılma yönü, metalin çekmesi, kalıbın genişmesi ve ara yüzeyde oluşan hava boşluğu gibi birçok parametrelerden etkilenir. Bu çalışmada ara yüzey ısı transfer katsayısının kalıp yüzey pürüzlülüğü ve zamana göre değişiminin araştırılması ve yüzey pürüzlülüğüne bağlı ara yüzey ısı transfer mekanizmaların belirlenmesi amaçlanmıştır.

Beş değişik yüzey pürüzlülüğüne sahip saf bakır ve sıcak iş takım çeliği (H13) soğutuculardan ve bu soğutuculara karşı yerçekimine ters yönde katılma öteklik Al-Si döküm alaşımından zamana bağlı sıcaklıklar ölçülmüştür. Döküm-kalıp ara yüzey ısı transfer katsayısı üzerine kalıp yüzey pürüzlülüğünün etkisini belirlemek için ölçülen sıcaklıklar kullanılmıştır. Soğutucuların makro ve mikro yapılar üzerine etkilerini araştırmak amacıyla soğutucuya temas eden yüzeyler ve bu yüzeylere dik kesitlerde makroskobik ve mikroskobik incelemeler yapılmıştır. Döküm yüzeyinde deformasyon oluşumu soğutucu ve döküm parça yüzey profillerinden belirlenmiştir.

24, 60, 280, 400 ve 2400 grit zımpara pürüzlülüklerinde döküm-soğutucu ara yüzey ısı transfer katsayısı ve kalıp yüzey pürüzlülüğü arasında ilişki tespit edilmiştir.

Bu çalışmada aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

- 1- 60, 280 ve 400 grit zımpara pürüzlülüklerinde ısı transfer katsayısı grit zımpara numarasının atmasıyla artmıştır.
- 2- Isı transfer katsayısı 24 grit zımpara pürüzlülüğüne sahip saf bakır ve H13 çelik soğutucuların her ikisinde de sıvı metalin soğutucu yüzeyindeki zımpara oyuklarının içine girmesinden dolayı 60, 280 ve 400 grit zımpara pürüzlülüklerinden daha yüksek bulunmuştur.
- 3- 2400 grit zımpara pürüzlülüğünde bakır soğutucu en düşük ısı transfer katsayısı üretirken H13 çelik soğutucu en yüksek ısı transfer katsayısı sağlamış ve her iki döküm yüzeylerinde çok yoğun gaz boşlukları olduğu gözlenmiştir.
- 4- Bakır ve H13 çelik soğutuculara yapılan dökümlerde katılaşma yüzeylerde temasın olduğu pre-dentritik noktalardan başlamıştır.
- 5- Dentritler H13 çelik soğutucu üzerine yapılan dökümlerde döküm yüzeyinde, bakır soğutucu üzerine yapılan dökümlerde ise ara yüzeyden yaklaşık olarak 200 µm mesafede yönlenmiştir.
- 6- H13 çelik soğutucuya temas eden döküm yüzeyinde birincil silisyum oluşmuştur.
- 7- Soğutuculara temas eden ötektik bileşimindeki Al-Si döküm parça yüzeylerinde içbükey ve dışbükey deformasyon meydana gelmemiştir.

Bilim Kodu : 710.3.011
Anahtar Kelimeler : Isı Transfer Katsayısı, Döküm/Kalıp Ara yüzeyi, Katılaşma, Sonlu Farklar Metodu, Kalıp Yüzey Pürüzlülüğü, Al-Si Alaşımları
Sayfa Adedi : 136
Tez Yöneticileri : Doç. Dr. Kadir KOCATEPE
Doç. Dr. H. Mehmet ŞAHİN

**INVESTIGATION OF HEAT TRANSFER COEFFICIENT AT CASTING-
MOLD INTERFACE DURING SOLIDIFICATION**

(PhD. Thesis)

Neşet AKAR

**GAZI UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY**

May 2006

ABSTRACT

In the casting processes, the heat transfer coefficient at the metal/mold interface is an important factor for the solidification rate which controls micro structure and mechanical properties in the casting. The heat transfer coefficient at the metal/mold interface is time dependent and affected by several parameters such as the alloy type, the mold material and surface roughness, the mold and pouring temperatures, casting configuration, shrinkage of the metal, expansion of the mold and formation of air gap at the interface. The purpose of this investigation is to study variations in the metal-mold interface heat transfer coefficient with respect to the mold surface roughness and time, and to clarify the interfacial heat transfer mechanisms.

Time-temperature relationships were measured with the copper and hot working steel (H13) chills having five various surface roughness values in upwards solidifying castings of eutectic Al-Si alloy against the chills. To evaluate the effect of surface roughness on metal-mold interface heat transfer coefficients measured temperatures were used. In order to clarify the effect of chills on macro and microstructures, the casting surface contacted to the chill and vertical section of the casting were examined. The formation of casting surface deformation was determined from the profiles of casting and the chill surfaces.

The relationship between metal-mold heat transfer coefficient and mold surface roughness was identified in terms of 24, 60, 280, 400 and 2400 grid emery papers.

It is concluded that:

- 1- The heat transfer coefficient for 60, 280 and 400 grid emery papers increased with increasing grid number.
- 2- The heat transfer coefficient for both copper and H13 steel molds having 24 grid emery paper was obtained higher than 60, 280 and 400 grid emery papers because of the penetration of the liquid metal into the cavities resulted from 24 grid emery paper.
- 3- 2400 grid emery paper produced the lowest heat transfer coefficient for copper chill while the highest heat transfer coefficient for H13 steel chill, and the formation of relatively high density gas cavities on both casting surfaces were observed.
- 4- Solidification in castings against copper and H13 steel chills started at pre-dendritic points contacted to the chill surface.
- 5- Dendrites on the castings against H13 steel chill were directional from the casting surface although the castings against copper chill this was measured as approximately 200 μm from a distance of the interface.
- 6- Primary silicon crystals were formed of the surface on the castings contacted to H13 steel chill.
- 7- Concave or convex deformation on the surfaces of eutectic Al-Si castings contacted the chill was observed to be non-existent.

Science Code : 710.3.011

Key Words : Heat Transfer Coefficient, Metal-Mold Interface, Solidification, Finite Difference Method, Mold Surface Roughness, Al-Si Alloys

Page Number : 136

Advisers : Assoc. Prof. Dr. Kadir KOCATEPE
Assoc. Prof. Dr. H. Mehmet ŞAHİN

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren tez yöneticilerim Doç. Dr. Kadir KOCATEPE ve Doç. Dr. H. Mehmet ŞAHİN'e, hiçbir zaman manevi desteğini esirgemeyen eşime, kıymetli tecrübelerinden faydalandığım Yrd. Doç. Dr. Ramazan KAYIKCI, Prof. Dr. Sedat ÖZBİLEN, Prof. Dr. Ekrem ŞELÇUK ve Doç. Dr. Mehmet ERDOĞAN'a, ayrıca deneylerimde yardımcı olan Kimya Teknisyeni İsmail ESER'e, bu çalışmaya maddi destek sağlayarak Gazi Üniversitesi Araştırma Fonu Saymanlığına, Metal Eğitimi Bölümünde çalışan akademik ve idari personele ve yüzey pürüzlülük deneylerimi yaptığım Ortadoğu Rulman Sanayi AŞ Fabrika Müdürü Feridun ÖZHAN ve Kalite Kontrol Bölüm şefi Makine Mühendisi Selahattin ÇETİN'e teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	iii
ABSTRACT	iv
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER	viii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ	xii
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	xiii
RESİMLERİN LİSTESİ	xvi
SİMGELER VE KISALTMALAR	xviii
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	3
2.1. Metal-Kalıp Sisteminde Isı Transferine Karşı Gösterilen Dirençler	3
2.1.1. Kalıp direnci	3
2.1.2. Döküm alaşımının direnci	7
2.1.3. Metal-Kalıp ara yüzey direnci	8
2.2. Metal-Kalıp Ara Yüzey Teması ve Isı Transferi	10
2.2.1. Metal-Kalıp ara yüzeyinde temasın ilerlemesi	10
2.2.2. Temas alanı boyunca ısı transferi	13
2.2.3. Hava boşluğundan ısı transferi	15
2.3. Döküm-Kalıp Ara Yüzey Isı Transferini Etkileyen Faktörler	17
2.3.1. Basıncın etkisi	17
2.3.2. Döküm alaşımının kompozisyonunun etkisi	18

	Sayfa
2.3.3. Katılma yönü	20
2.3.4. Döküş sıcaklığının etkisi	21
2.3.5. Kalıp malzemesinin etkisi	23
2.3.6. Kalıp sıcaklığının etkisi	25
2.3.7. Kalıp yüzey pürüzlülüğünün etkisi	25
2.3.8. Döküm yüzeyinin topografik yapısının etkisi	29
2.3.9. Döküm yüzeyi profilinin etkisi	30
2.3.10. Oksit film oluşumu	33
2.3.11. Kalıp kaplamasının etkisi	34
2.4. Ara Yüzey Isı Transfer Katsayısını Belirleme Yöntemleri	35
2.4.1. Ara yüzey boşluk ölçüm yöntemi	35
2.4.2. Nümerik yöntemler	37
2.5. Deneysel Verilerden Elde Edilen Ara Yüzey Isı Transfer Katsayısı Eşitlikleri	37
2.6. Değişik Döküm-Kalıp Ara Yüzeyinde Ölçülen Isı Transfer Katsayıları	39
3. MATERYAL VE METOT	42
3.1. Deney Düzenneği	42
3.2. Metal Alaşımı, Ergitme ve Döküm İşlemleri	43
3.3. Soğutucuların Hazırlanması	44
3.4. Soğutucu Ve Döküm Parçanın Yüzey Profili ve Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümleri	45
3.5. Metalografik İncelemeler İçin Numunelerin Hazırlanması	45

Sayfa

4. ARA YÜZEY ISI TRANSFERİNİN BELİRLENMESİ	47
4.1. Ara Yüzey Isı Transfer Katsayısı ve Isı Transferinin Tek Boyutlu Düzlemde Genel Denklemi	47
4.2. İletimle Isı Transferi	48
4.2.1. Soğutucuda kullanılan ısı iletim denklemi	51
4.2.2. Döküm parçada ısı iletim denklemi	52
4.3. Sonlu Fark Çözümü	54
4.4. Sınır Şartları ve Çözüm	59
5. DENEYSEL SONUÇLAR	60
5.1. Soğutucu ve Döküm Parça Yüzey Pürüzlülük Değerleri	60
5.1.1. Soğutucu yüzey pürüzlülük değerleri	60
5.1.2. Döküm parça yüzey pürüzlülük değerleri	60
5.2. Soğutucu ve Döküm Yüzey Profilleri	62
5.3. Döküm Yüzeylerinin Metalografik İncelemeleri	65
5.3.1. Döküm yüzeylerinin makro yapısı	65
5.3.2. Döküm yüzeylerinde tane ve mikro yapı incelemeleri	69
5.4. Döküm-Soğutucu Ara Yüzeyinden Isı Transferi	81
5.4.1. Zaman-Sıcaklık ilişkisi	81
5.4.2. Ara yüzey ısı transfer katsayıları	86
6. TARTIŞMA	99
6.1. Döküm-Soğutucu Ara Yüzeyi	99

Sayfa

6.1.1. Soğutucu ve döküm parça yüzey pürüzlülüğü değişimi	99
6.1.2. Döküm yüzeyinin deformasyonu	101
6.1.3. Soğutucu malzemesine bağlı döküm ara yüzeyinin mikroyapı ve tane yapısı	102
6.2. Zaman-Sıcaklık İlişkileri ve Ara Yüzey Isı Transfer Katsayıları	105
6.2.1. Zaman-Sıcaklık ilişkileri	105
6.2.2. Ara yüzey ısı transfer katsayıları ve kullanılan soğutucu malzemesi arasındaki ilişki	108
6.2.3. Soğutucu ve döküm yüzey pürüzlülüğünün ısı transfer katsayısına etkileri	113
7. SONUÇ VE ÖNERİLER	121
7.1. Sonuç	121
7.2. Öneriler	123
KAYNAKLAR	124
ÖZGEÇMİŞ	136

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Kalıp-Al ve Al alaşımları arasındaki geçmişte belirlenmiş ara yüzey ısı transfer katsayıları	41
Çizelge 3.1. Seramik tüp yapımında kullanılan alümina-silikat seramik malzemenin özellikleri	43
Çizelge 3.2. Deneylerde kullanılan ötektik Al-Si (ETIAL140) alaşımının kimyasal bileşimi	44
Çizelge 3.3. Hesaplamalarda kullanılan ötektik Al-Si alaşımı ve soğutucuların termofiziksel özellikleri	44
Çizelge 5.1. Deneylerde kullanılan H13 çelik ve bakır soğutucuların yüzey pürüzlülük değerleri	60
Çizelge 5.2. H13 çelik soğutucuya karşı elde edilen dökümleri yüzey pürüzlülük değerleri	61
Çizelge 5.3. Bakır soğutucuya karşı dökülen dökümlerin yüzey pürüzlülük değerleri	61
Çizelge 5.4. Ara yüzeyden 75 mm' lik mesafede katılma tamamlanana kadar Şekil 5.7 – Şekil 5.16'de verilen ara yüzey ısı transfer katsayılarının ortalama ($\bar{h}$) değerleri	87

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Düzlemsel ve dairesel kalıplarda ve maçada ısı akış yönünün şematik görünümü	6
Şekil 2.2. Metal-kalıp ara yüzeyinde temasın ilerlemesi	12
Şekil 2.3. Döküm-kalıp ara yüzeyinde sıcaklık değişimi	14
Şekil 2.4. Dış basıncın ısı transfer katsayısı üzerine etkisi	18
Şekil 2.5. Katılma yönü	21
Şekil 2.6. Bakır soğutucu-Al-%7Si alaşımı ara yüzey ısı transfer katsayısı ve yüzey pürüzlülüğü ilişkisi	26
Şekil 2.7. Çelik soğutucu-Saf çinko ara yüzey ısı transfer katsayısı ve yüzey pürüzlülüğü ilişkisi	27
Şekil 2.8. Çelik soğutucu-Saf alüminyum ara yüzey ısı transfer katsayısı ve yüzey pürüzlülüğü ilişkisi	28
Şekil 2.9. Wang ve Matthys hızlı katılma şartlarında elde ettikleri soğutucu yüzey pürüzlülüğü ve ara yüzey ısı transfer katsayısı ilişkisi	29
Şekil 2.10. Bakır soğutucu yüzeyine sıvı bismut dökümünde döküm yüzeyi	32
Şekil 2.11. Katılan kabuk üzerindeki termal gerilimin neden olduğu bir sıvı metal damlasındaki deformasyonun şematik gösterimi	33
Şekil 2.12. Ho ve Phelke'nin çalışmalarında kullandığı hava boşluğunun ölçümü için deney düzeneğinin şematik görünümü	36
Şekil 3.1. Isı transferinin belirlenmesinde kullanılan deney düzeneğinin şematik görünümü	42
Şekil 4.1. Tek boyutlu ısı iletimi	49
Şekil 4.2. Tek boyutlu zamana bağlı ısı iletimi	50
Şekil 4.3. Tek boyutlu düzlem geometrilerde sonlu fark düğüm noktaları	56

Şekil	Sayfa
Şekil 5.1. H13 çelik soğutucu ve bu yüzeylere dökülmüş döküm numunelerinin birbiri üzerine çakıştırılmış ara yüzey profilleri	63
Şekil 5.2. Bakır soğutucu ve bu yüzeylere dökülmüş döküm numunelerinin birbiri üzerine çakıştırılmış ara yüzey profilleri	64
Şekil 5.3. Ara yüzeyden 37.5 mm mesafede H13 çelik soğutucuya karşı katılan döküm parçadan ölçülen ve hesaplanan sıcaklıklar	82
Şekil 5.4. Ara yüzeyden 37.5 mm mesafede bakır soğutucuya karşı katılan döküm parçadan ölçülen ve hesaplanan sıcaklıklar	82
Şekil 5.5. Ötektik Al-Si ve H13 soğutucudan ölçülen ve hesaplanan sıcaklık eğrileri	84
Şekil 5.6. Ötektik Al-Si ve bakır soğutucudan ölçülen ve hesaplanan sıcaklık eğrileri	85
Şekil 5.7. 24 grit H13 soğutucuya karşı hesaplanan döküm-soğutucu ara yüzey ısı transfer katsayıları	89
Şekil 5.8. 60 grit H13 soğutucuya karşı hesaplanan döküm-soğutucu ara yüzey ısı transfer katsayıları	90
Şekil 5.9. 280 grit H13 soğutucuya karşı hesaplanan döküm-soğutucu ara yüzey ısı transfer katsayıları	91
Şekil 5.10. 400 grit H13 soğutucuya karşı hesaplanan döküm-soğutucu ara yüzey ısı transfer katsayıları	92
Şekil 5.11. 2400 grit H13 soğutucuya karşı hesaplanan döküm-soğutucu ara yüzey ısı transfer katsayıları	93
Şekil 5.12. 24 grit bakır soğutucuya karşı hesaplanan döküm-soğutucu ara yüzey ısı transfer katsayıları	95
Şekil 5.13. 60 grit bakır soğutucuya karşı hesaplanan döküm-soğutucu ara yüzey ısı transfer katsayıları	95
Şekil 5.14. 280 grit bakır soğutucuya karşı hesaplanan döküm-soğutucu ara yüzey ısı transfer katsayıları	96

Şekil	Sayfa
Şekil 5.15. 400 grit bakır soğutucuya karşı hesaplanan döküm-soğutucu ara yüzey ısı transfer katsayıları	97
Şekil 5.16. 2400 grit bakır soğutucuya karşı hesaplanan döküm-soğutucu ara yüzey ısı transfer katsayıları	98
Şekil 6.1. İdealize edilmiş ara yüzey ısı transfer katsayısı eğrileri	110
Şekil 6.2. Bakır soğutucu ve ötektik Al-Si alaşımından ölçülen ve yüzeylerden hesaplanan sıcaklıklar ve bu sıcaklıklar yardımı ile hesaplanan ara yüzey ısı transfer katsayısı	111
Şekil 6.3. H13 çelik soğutucu ve ötektik Al-Si alaşımından ölçülen ve yüzeylerden hesaplanan sıcaklıklar ve bu sıcaklıklar yardımı ile hesaplanan ara yüzey ısı transfer katsayısı	112
Şekil 6.4. Değişik yüzey pürüzlülüğünde H13 çelik soğutucu kullanılarak elde edilen döküm/soğutucu ara yüzey ısı transfer katsayıları	114
Şekil 6.5. Değişik yüzey pürüzlülüğünde bakır soğutucu kullanılarak elde edilen döküm/soğutucu ara yüzey ısı transfer katsayıları	115
Şekil 6.6. 24 grit zımpara gibi kaba yüzeylerde metal-kalıp temasının şematik gösterimi	120
Şekil 6.7. 2400 Grit zımpara gibi çok düzgün yüzeylerde metal-Kalıp temasının şematik gösterimi	120

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 5.1. 24 grit bakır soğutucuya karşı elde edilmiş döküm yüzeyleri	66
Resim 5.2. 2400 grit bakır soğutucuya karşı elde edilmiş döküm yüzeyi	67
Resim 5.3. 2400 grit zımpara ile hazırlanmış H13 çelik soğutucu yüzeyinden elde edilmiş döküm parça ve soğutucunun döküm sonrası yüzey görüntüleri	68
Resim 5.4. 24 grit zımpara ile hazırlanmış H13 çelik soğutucu yüzeyine karşı elde edilen döküm yüzeyinin görüntüsü	69
Resim 5.5. 280 grit zımpara ile hazırlanmış bakır soğutucu yüzeyine karşı elde edilen döküm parça yüzeyindeki tane yapısı ve bu tanelerin çekirdeklenme noktaları olan pre-dentritik yapı görüntüleri	70
Resim 5.6. 24 grit zımpara ile hazırlanmış bakır soğutucu yüzeyine karşı elde edilen döküm parça yüzeyindeki pre-dentritik yapı görüntüleri.	71
Resim 5.7. 2400 grit zımpara ile hazırlanmış bakır soğutucu yüzeyine karşı elde edilen döküm parça yüzeyindeki hava kanalları ve tane yapısı	73
Resim 5.8. 60 grit H13 soğutucu yüzeyine karşı elde edilen döküm parça yüzeyindeki tane yapısı ve bu tanelerin çekirdeklenme noktaları olan pre-dentritik yapı görüntüsü	74
Resim 5.9. 24 grit H13 soğutucu yüzeyinde çizik içine giren döküm yüzeylerinde çatlak görüntüsü	75
Resim 5.10. Soğutucu yüzeyine değen döküm parça yüzey görüntüleri	77
Resim 5.11. Bakır soğutucu yüzeyine dökülmüş Al-%13Si alaşımının ara yüzeye dik kesitteki mikroyapı görüntüleri	78

Resim 5.12. H13 elik soğutucu yüzeyine dökülmüş Al-%13Si alaşımının ara yüzeye dik kesitteki mikro yapı görüntüleri	80
---	----

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
Q	Birim zamanda Geçen Isı Miktarı (W)
h	Ara yüzey ısı transfer katsayısı (W/m ² K))
q	Isı akısı (W/m ²)
q'''	Üretilen ısı (W/m ²)
T_C	Döküm yüzey sıcaklığı (K)
T_M	Soğutucu yüzey sıcaklığı (K)
T	Sıcaklık (K)
T_f	Katılama sıcaklığı (K)
k	Isı iletim katsayısı (W/mK))
x	Mesafe (m)
c	Özgöl ısı (J/KgK)
C	Chvorinov sabiti
ρ	Yoğunluk (kg/m ³)
L	Ergime gizli ısı (J/kg)
S	Katılan metal kalınlığı (m)
f_s	Katılan metal miktarı (%)
t	Zaman (s)
A	Alan (m ²)
V	Hacim (m ³)
α	Isıl yayılım katsayısı (m ² /s)
m	Düğüm noktası
p	Zaman adımı

Kısaltmalar**Açıklama****LVDT**

Linear Variable Displacement Transducers

AISI

American Iron and Steel Institute

1. GİRİŞ

Metal ve alaşımların döküm özellikleri ergitme prosesleri, tane inceltme, aşılama, modifikasyon ve kimyasal ilaveler, eriyik işlemleri, kalıp ve maça yapım prosesleri ve döküm yöntemleri ile kontrol edilmektedir. Sıvı metal kalıba döküldükten sonra doğal katılaşma sürecine bırakılır. Dökümlerin mekanik özelliklerini belirleyen makro yapısı; tane yapısı, tane boyutu ve mikro yapısı; fazlar, fazların şekli, miktarı, boyutu ve dağılımı, mikro ve makro çekme oluşumu döküm parçanın soğuma hızına bağlıdır. Soğuma hızı ise sıvı metalin ısını kalıba kalıptan da çevreye transfer hızı ile belirlenir. Sonuç olarak bir döküm parçanın kalitesini belirleyen bu parametrelerin kontrolü için döküm proseslerinde ısı transferinin iyi bilinmesi gerekmektedir.

Bilgisayar teknolojisindeki gelişmelere paralel olarak bilgisayar destekli tasarım ve modelleme yazılımları dökümcülük sektörüne de girmiştir. MagmaSoft, SolidCast, NovaCast, Flow3D ve DynaCast gibi bazı yazılımlar en yaygın kullanılan döküm simülasyon programlarıdır. Günümüzde birçok dökümhanede dökümlerin üretim dizaynı öncelikle bilgisayar ortamında yapılarak hata oranı minimuma indirilir. Dökümlerin bilgisayar ortamında tasarımı ise doğrudan dökümlerin katılaşma hızı, sıcaklık gradyanı, ısının döküm-kalıp ara yüzeyinden transfer hızı, kalıp malzemesinin ısı özellikleri vb. gibi parametrelerin doğru bilinmesine ve uygun şartların belirlenerek kullanılmasına bağlıdır. Günümüzde mikro ve makro yapı, porozite, döküm parçanın ısıl gerilim analizi, döküm parçadan ısı transfer hızı gibi parametreleri esas alan döküm simülasyonlarının daha doğru yapılabilmesi için çok yoğun araştırmalar devam etmektedir.

Bu çalışma metal kalıp-döküm parça ara yüzey ısı transfer katsayısının kalıp yüzey pürüzlülüğüne bağlı olarak değişimini incelemek ve bu değişime sebep olan etkili mekanizmaları ortaya çıkarmak amacıyla yapılmıştır. Bu amaçla öncelikle değişik yüzey pürüzlülüğüne sahip elektrolitik saflıktaki bakır ve H13 (sıcak iş takım çeliği) soğutuculara karşı tek yönlü katılaşma şartlarında

ETIAL-140 (Al-%12.9Si) alaşımının dökümlerinden ve soğutuculardan zamana bağlı sıcaklıklar ölçülmüştür. Ölçülen sıcaklıklardan döküm parçakalıp ara yüzey ısı transfer katsayıları hesaplanmıştır. Daha sonra döküm ve soğutucu yüzeylerinin yüzey pürüzlölükleri ve yüzey profilleri belirlenmiştir. Döküm ve soğutucu yüzeylerinde makroskobik ve mikroskobik boyutta incelemeler yapılarak soğutucu yüzey pürüzlölüğüne bağlı olarak ara yüzey ısı transfer katsayısını etkileyen mekanizmalar tespit edilmiştir.

Döküm parçanın katılaşması sırasında ara yüzey ısı transferi ile ilgili literatür bilgileri Bölüm 2’de detaylı olarak incelenmiştir. Deneylerde kullanılan malzemeler, ekipmanlar ve metotlar Bölüm 3 ve ara yüzey ısı transfer katsayısının belirlenmesinde kullanılan matematik model Bölüm 4’de verilmiştir. Deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar Bölüm 5 ve bu sonuçların tartışması Bölüm 6’da sunulmuştur. Sonuçlar ve bu konuda yapılacak araştırmalara yönelik tavsiyeler ise Bölüm 7’de verilmiştir.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

2.1. Metal-Kalıp Sisteminde Isı Transferine Karşı Gösterilen Dirençler

Döküm proseslerinde döküm parçadan ısının transferi kalıp, döküm-kalıp ara yüzeyi veya döküm parçanın kendisi tarafından kontrol edilebilir. Kalıbın ısı iletim özelliğinin düşük olduğu durumda kalıp malzemesi, döküm metalinin ısı iletim özelliğinin düşük olduğu durumda döküm alaşımı ısı transferini kontrol ederken kalıp ve döküm metalinin her ikisinin de ısı iletim özelliğinin iyi olduğu durumda ise ısı transferini metal-kalıp ara yüzeyi kontrol eder.

2.1.1. Kalıp direnci

Kalıp büyük oranda döküm parçanın soğuma hızını kontrol ettiği için ısı transferi modellemesinde önemli bir parametredir. Bakır, dökme demir ve çelik gibi yüksek termal iletkenliğe sahip metal kalıplar hızlı soğuma sağlarken kum ve hassas döküm kalıbı gibi düşük ısı iletkenliğe sahip kalıplar yavaş soğumayı teşvik eder. Düşük ısı iletkenliğine sahip bir kalıpta ısı transferi kalıp tarafından kontrol edilir. Yüksek iletkenliğe sahip kalıplarda ısı transferi döküm-kalıp ara yüzeyi tarafından kontrol edilir.

Tek boyutlu ısı akışında metal başlangıçta oda sıcaklığında (T_0) bulunan düz yüzeye sahip bir kalıba dökülsün. Böylece $t=0$ zaman anında kalıp yüzeyi aniden döküm sıcaklığına (T_M) yükselir. Bu durum düzlem levhada tek boyutlu zamana bağlı ısı iletim problemidir ve bu problem Eş. 2.1 ile tanımlanabilir.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (2.1)$$

Burada T sıcaklık (K), t zaman (s), x mesafe (m) ve $\alpha \left(\frac{k}{\rho c} \right)$ ısı yayılım katsayısıdır (m^2/s).

Flemings [1] basit metal-kalıp sistemi için Eş. 2.1'in analitik bir çözümünü vermiştir. Bu çözüme göre kalıptan ısının akması kalıp yüzeyinden herhangi bir mesafede zamanın bir fonksiyonu olarak belirlenebilir. Metal yüzeyi ile kalıp yüzeyi arasındaki ısı değişim oranı metal ve kalıp malzemelerinin termofiziksel özelliklerinin etkisinin bir fonksiyonu olarak belirlenir. Metalin tam ergime sıcaklığında döküldüğü varsayılırsa katılaşma sırasında ergime gizli ısısından kalıba ısı girişi olacağından döküm parçada katılaşan metal kalınlığı hesaplanabilir. Flemings [1] tarafından ısı üretimi için verilen matematik eşitlik;

$$\left(\frac{q}{A} \right)_{x=0} = -\rho_s L \frac{\partial S}{\partial t} \quad (2.2)$$

Burada L sıvı fazdan katı faza geçiş sırasında metalin açığa çıkarttığı ergime gizli ısı (J/kg), ρ metalin yoğunluğu (kg/m^3), S döküm parçada katılaşan kabuk kalınlığıdır (m). Metal kalıp ara yüzeyinde kalıba akan ısının oranı aşağıdaki eşitlik ile hesaplanabilir.

$$\left(\frac{q}{A} \right)_{x=0} = -\sqrt{\frac{k_m \rho_m c_m}{\pi t}} (T_M - T_O) \quad (2.3)$$

Burada k ve c sırası ile ısı iletkenlik katsayısı (W/mK) ve özgül ısı kapasitesidir (J/KgK). Problemin sonuç çözümü Eş. 2.2 ve Eş. 2.3'in birleştirilmesi ile bulunur. Sonuçta katılaşan metal kalınlığı;

$$S = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \left(\frac{T_M - T_O}{\rho_s L} \right) \sqrt{k_m \rho_m c_m} \sqrt{t} \quad (2.4)$$

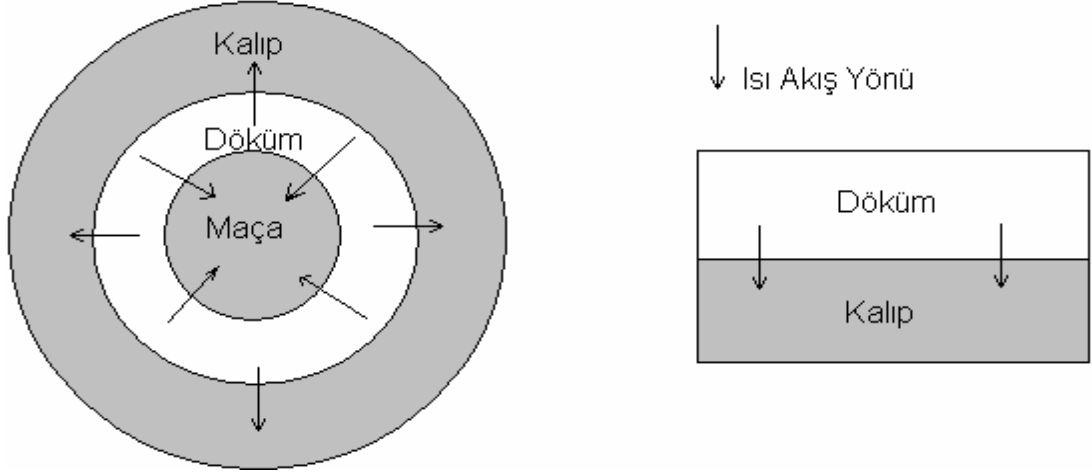
eşitliğinden çıkarılabilir. Bu eşitliğe göre katılaşan metal kalınlığı büyük oranda kalıptaki ısı akışı tarafından belirlenir. Bu nedenle katılaşan metalden ısı transferine direnç kalıp malzemesinin ısı iletkenliği tarafından kontrol edilir. k_{pc} kalıbın absorbe edebileceği ısı hızı için bir ölçü olarak kullanılabilir. Yukarıdaki eşitlik tek boyutlu ısı iletim problemlerinde düşük iletkenliğe sahip kalıplarda yüksek iletkenliğe sahip kalıplardan daha iyi sonuç verir.

Merkezinde maça bulunan bir döküm parçada ısı transferi maça yönünde etkili olabilir. Bu durum Şekil 2.1'de şematik olarak görülmektedir. Şekil 2.1'deki maça dıştaki kalıptan çok daha hızlı ısı tarafından doyurulabilir. Düz bir duvardaki ısı transferi içbükey duvardaki ısı transferinden daha az olacaktır. Şekil 2.1'de görülen durumda maçanın genleşmesi ve ısını kaybeden döküm parçanın çekmesinin sebep olduğu sıkıştırma basıncından dolayı maçadaki ısı transferi daha da artacaktır. Bu durum deneysel olarak da gözlenmiştir ve metal-maça ara yüzeyindeki ısı transfer katsayısı metal-kalıp ara yüzeyinden daha yüksek bulunmuştur [2,3]. Dıştaki kalıpta ısı transfer katsayısının maksimum değere ulaştıktan sonra hızlı bir şekilde azaldığı maça yüzeyinde ise katılaşma tamamlanana kadar sürekli arttığı deneysel olarak bulunmuştur.

Pratik şartlarda maça veya kalıbın herhangi bir bölgesine bakmaksızın kalıp yüzeyinin birim alanında ısı absorbesi sabit olduğu varsayıldığında bu farklar ihmal edilebilir.

Eş. 2.4'de S teriminin yerine V/A terimi yazılabilir. Burada V zamanın bir fonksiyonu olarak katılaşan metal hacmi (m^3) ve " A " metal-kalıp ara yüzey alanıdır (m^2).

$$\frac{V}{A} = \frac{2}{\pi} \left(\frac{T_m - T_o}{\rho L} \right) \sqrt{k_{pc}} \sqrt{t} \quad (2.5)$$



Şekil 2.1. Düzlemsel ve dairesel kalıplarda ve maçada ısı akış yönünün şematik görünümü [4]

Eş. 2.5’de V hacmindeki bir döküm parçanın tamamının katılaşma zamanını t_f ile ve diğer değişkenleri C sabiti ile gösterilir ise Chvorinov kuralı olarak bilinen aşağıdaki eşitlik elde edilir

$$t_f = C \left(\frac{V}{A} \right)^2 \quad (2.6)$$

Eş. 2.6 basit şekilli döküm parçaların katılaşma zamanlarının belirlenmesinde kullanılır. İçbükey yüzeylerde daha hızlı ısı transferi olduğu için Chvorinov kuralı küresel ve silindirik şekilli dökümler için Flemings [1] tarafından aşağıdaki şekilde geliştirilmiştir.

$$\frac{V}{A} = \left(\frac{T_m - T_o}{\rho L} \right) \left(\frac{2}{\sqrt{\pi}} \sqrt{k \rho c} \sqrt{t_f} + \frac{n k t_f}{2r} \right) \quad (2.6)$$

Burada r döküm parçanın yarıçapı ve n silindir için 1, küre için 2 olan şekil faktörüdür. Chvorinov kuralı kalıbın ısı iletkenliği azaldığında daha doğru

sonuçlar verir. Ayrıca silindirlerde kürelerden daha gerçekçi değerler elde edilir. Ho ve Pehlke [5] kum dökümlerinde Chvorinov kuralının kullanımının nümerik çözümlere alternatif hızlı ve etkili bir çözüm yöntemi olduğunu iddia etmektedir. Zuavak [6] elik ve kuru silika kum kalıplara dökülen alüminyum alaşımları için Chvorinov kuralının geçerli olduğunu deneysel olarak göstermiştir.

Özdemir [7] Chvorinov kuralına alternatif olarak *Birim Alan* (BA), yaklaşımını geliştirmiştir. Birim alan yaklaşımına göre katılma zamanı “Birim alan” ile doğru orantılıdır.

$$t_f = k(BA)_c \quad (2.8)$$

Burada t_f toplam katılma zamanı, k malzeme katsayısı ve BA ise birim alanı temsil etmektedir (cm^2). Eş. 2.8’de verilen BA terimi aşığıdaki şekilde tanımlanmıştır:

$$BA = \frac{V}{SR} \quad (2.9)$$

Burada V döküm hacmini (cm^3), ve SR büyüyen sütunsal tanelerin oluşturduğu yapısal bileşkeyi (cm) temsil etmektedir. BA yaklaşımı farklı döküm geometrileri için katılma zamanının simülasyonu ve besleyici boyutlarının belirlenmesinde kullanılmıştır. Bu yaklaşımın Chvorinov kuralına göre daha iyi sonuç verdiği vurgulanmıştır. Özdemir [7,8] BA yaklaşımının katılma izotermelerinin belirlenmesinde uygulanabileceğini göstermiştir.

2.1.2. Döküm alaşımasının direnci

Isı transferi modellemesinde yüksek ısı iletkenliğine sahip olduğu için normalde döküm alaşımı tarafından gösterilen direnç etkili olmaz. Fakat döküm malzemesinin ısı iletkenliğinin kalıp malzemesinin ısı iletkenliğinden

çok daha düşük olduğu bazı durumlar da vardır. Çelik kalıba dökülen Sn-Pb alaşımı ve bakır kalıba dökülen çelik bu durma örnek olarak verilebilir.

Isı akışına katılan metal direnç gösterdiği durumda katının ısı yayılımı (α) ısı akış hızının belirlenmesinde temel faktördür.

Eş. 2.1'nin analitik çözümü su soğutmalı kalıba ergime sıcaklığında dökülen metal için Flemings [1] tarafından verilmiştir. Sınır şartları $x=0$ da $T=T_o$ ve $x = S'$ de $T = T_m$ ve katı-sıvı ara yüzeyindeki ısının hızı, katılan metalin ısı iletim hızı tarafından dengelenmek zorundadır. Sonuç olarak Eş. 2.1 aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$k\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right) = \rho L\left(\frac{\partial S}{\partial t}\right) \quad (2.10)$$

Eş. 2.10'nun sonuç çözümü Flemings [1] tarafından aşağıdaki eşitlik ile verilmiştir.

$$S = 2\gamma\sqrt{\alpha t} \quad (2.11)$$

Burada γ

$$\gamma e^{\gamma^2} \operatorname{erf} \gamma = \left(T_M - T_o \frac{c}{L\sqrt{\pi}} \right) \quad (2.12)$$

ile hesaplanır.

2.1.3. Metal-kalıp ara yüzey direnci

Kalıp ve döküm alaşımının yüksek ısı iletkenliğe sahip olduğu durumda metal-kalıp ara yüzeyin ısı direnci ısı transferini ve soğuma hızını kontrol eder. Bu direnç genellikle ısı transfer katsayısı, h , terimi ile ifade edilir. Isı transfer katsayısı zamana bağlı olarak değiştiği için döküm parçadan kalıba

olan ısı akışında ara yüzeyin gösterdiği direncin gerçekçi olarak belirlenmesi zordur. Ara yüzey direnci metalik kalıp ve basınçlı dökümler başta olmak üzere birçok endüstriyel döküm yöntemlerinde özellikle önemlidir.

Metal-kalıp ara yüzey direncinin etkili olduğu bir metal-kalıp sisteminde tek boyutlu ısı akısı aşağıdaki eşitlik ile belirlenir.

$$q = -h(T_M - T_O) \quad (2.13)$$

Flemings [1] Eş. 2.2 ve Eş. 2.13'yi birleştirerek $t=0$ ve $S=0$ da zamanın fonksiyonu olarak düz kalıp için bir çözüm vermiştir.

$$S = h \frac{T_M - T_O}{\rho L} t \quad (2.14)$$

Bu eşitlik geometrik şeklin önemli bir faktör olmadığı basit döküm parçalar için ısı transferinin belirlenmesinde kullanılabilir.

$$t_f = \frac{\rho L}{h(T_M - T_O)} \frac{V}{A} \quad (2.15)$$

Eş. 2.14 ve Eş. 2.15'de ara yüzey ısı transfer katsayısı (h) katılma boyunca sabit olarak kabul edilir. Fakat birçok durumda ısı transfer katsayısı (h) geometriye bağlı değişkendir. Yukarıdaki analitik metotlar basit olmasına karşın metal-kalıp ara yüzeyinde yüksek dinamik değişimler olduğunda doğru sonuç vermez ve döküm prosesinin modellenmesinde çok büyük hatalara sebep olur. Metal-Kalıp ara yüzeyinin geçici davranışı ve metal-kalıp ara yüzey ısı direncinin önemi gelecek bölümde verilmiştir.

2.2. Metal-Kalıp Ara Yüzey Teması ve Isı Transferi

2.2.1. Metal-Kalıp ara yüzeyinde temasın ilerlemesi

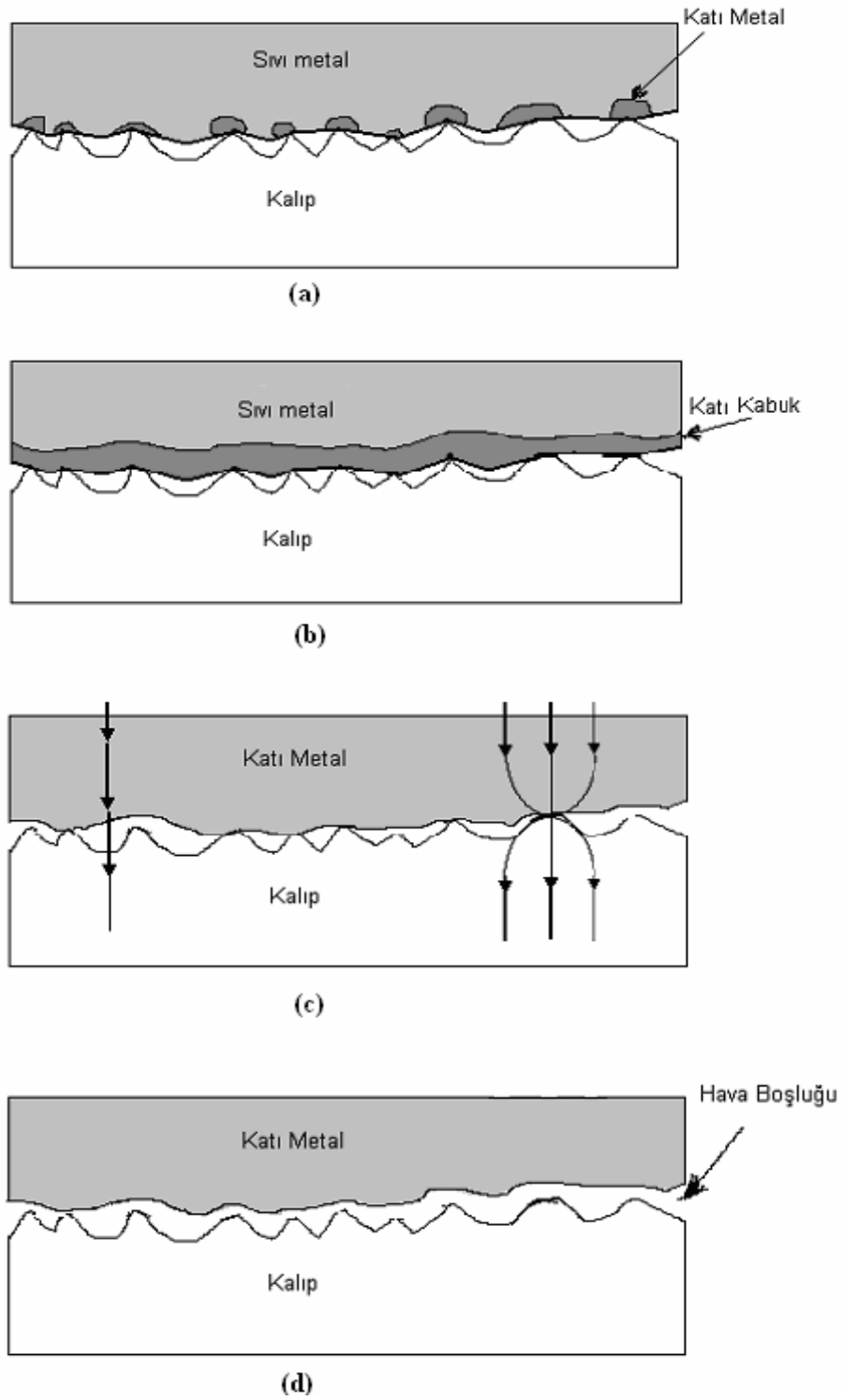
Metal kalıplarda, kalıp duvarı yüzey işleminden sonra sadece yüzey kalitesine bağlı değişik derinliklerde birçok mikroskobik pürüzlülükler içerir. Bununla birlikte metalostatik basıncına rağmen sıvı metalin yüzey gerilimi kalıp yüzeyini tamamen ıslatmasını engellemek için yeterlidir. Yapılan deneysel çalışmalar dökülen sıvı metalin kalıp duvarına ulaştığı zaman bile sadece belli noktalarda kalıp ile temas ettiğini göstermiştir [9]. Bu durum metal-kalıp ara yüzeyinde önemli bir bölümün temas halinde olmadığı anlamına gelmektedir. Metal ve kalıp ara yüzeyin ilerlemesi şematik olarak Şekil 2.2’de verilmiştir [10, 11].

Şekil 2.2.a’da görüldüğü gibi sıvı metal kalıba ilk döküldüğü anda sıvı metalin ıslatma kabiliyeti, metalin statik basıncı ve kalıp yüzeyinin pürüzlülük genişliğine ve derinliğine bağlı olarak kalıp yüzeyi ile temas eder. Sıvı metalden kalıba ısı akışının çok yüksek olduğu temas noktalarında aşırı soğumanın neden olduğu pre-dentritik çekirdek oluşmasına sebep olur. Bu çekirdek daha sonra hızlı bir şekilde büyür ve ara yüzeyde çok ince bir kabuk oluşturur (Şekil 2.2.b) [9, 12]. Katı metal henüz daha visko-plastik davranış gösterdiği ve sıvı metalin statik basıncını yenecek kadar dayanıma sahip olmadığı için temas noktalarından ayrılma gerçekleşmez. Bu durum uyumlu temas olarak adlandırılır. Uyumlu temas metal-kalıp ara yüzeyinde en yüksek temasın olduğu zaman aralığıdır.

Uyumlu temas bölümünün zamanı çok kısa olduğundan dolayı kesin zaman aralığı verilmemiştir. Döküm parça ara yüzeyinde katı kabuk kritik kalınlığa ulaştıktan sonra uyumlu temas sona ermektedir. Hızlı katılaştırma yöntemiyle yapılan deneysel çalışmalar bu bölgedeki ısı transferinin daha detaylı anlaşılmasını sağlamıştır. Wang ve Matthys [13] yaptıkları deneysel çalışmada, silindirik bakır soğutucuya karşı 7 mm kalınlığında ve 12.7 mm

apında kalıp boşluğuna dökülen çinkonun ısı transfer katsayısının 0.085 s'de en yüksek değere ulaştığını ve 0.23 s'ye kadar sabit kaldığını belirlemişlerdir. 0.23 s'den sonra sıvı metalin çekirdeklenmeye başlamasıyla ısı transfer katsayısı düşmeye başlamıştır. Çekirdeklenmeden sonra katılaşmanın ilerlemesi ile metal çeker ve kalıp ısındığı için genişir. Bu durum katılaşan metalin mikro boyutlarda kalıptan bölgesel olarak ayrılmasına sebep olur. Isıl gerilimin etkisi altında katılaşan metal kabuk ve kalıpta çarpılmalar ve hareketler meydana gelir. Bu arpılma ve hareketler başlangıçtaki uyumlu temasın bozulmasına sebep olur. Dolayısı ile temas sadece bazı noktalarda gerçekleşir. Metal-kalıp temasının bu ikinci aşaması uyumsuz temas aşaması olarak isimlendirilir (Şekil 2.2.c). Uyumsuz temas aralığı su soğutmalı bakır soğutucuya karşı saf alüminyum için 3 s ve kum kalıba dökülen Al-%13Si alaşımı için ise 3.5 s olduğu literatürde belirtilmiştir [11,14].

Katılaşma ve soğumanın sürekli ve metal-kalıp geometrisine bağlı olmasından dolayı döküm parçanın çekme oranı kalıbın genişemesinden çok büyüktür. Bu durum metal-kalıp ara yüzeyinin tamamen ayrılmasına sebep olabilir. Ara yüzeyde uyumsuz temas durumu devam etse bile ısı transferi çok düşük bir değere düşebilir. Metal-kalıp ara yüzeyinin birbirinden tam olarak ayrılmasıyla oluşan boşluk hava boşluğu olarak adlandırılır (Şekil 2.2.d). Hava boşluğu oluşumu döküm parça ve metal kalıp yüzey etkileri, döküm ve kalıp malzemesindeki dönüşümler ve geometrik etkiler olmak üzere üç faktörden etkilenir. Hava boşluğu her durumda oluşmaz. Hao [15] yaptığı deneysel çalışmada dökme demirin bünyesindeki grafitin genişemesinden dolayı dökme demir ve kalıp arasında hava boşluğu oluşmadığını ve ısı transfer katsayısının zamanla sürekli olarak arttığını tespit etmiştir.



Şekil 2.2. Metal-kalıp ara yüzeyinde temasın ilerlemesi

2.2.2. Temas alanı boyunca ısı transferi

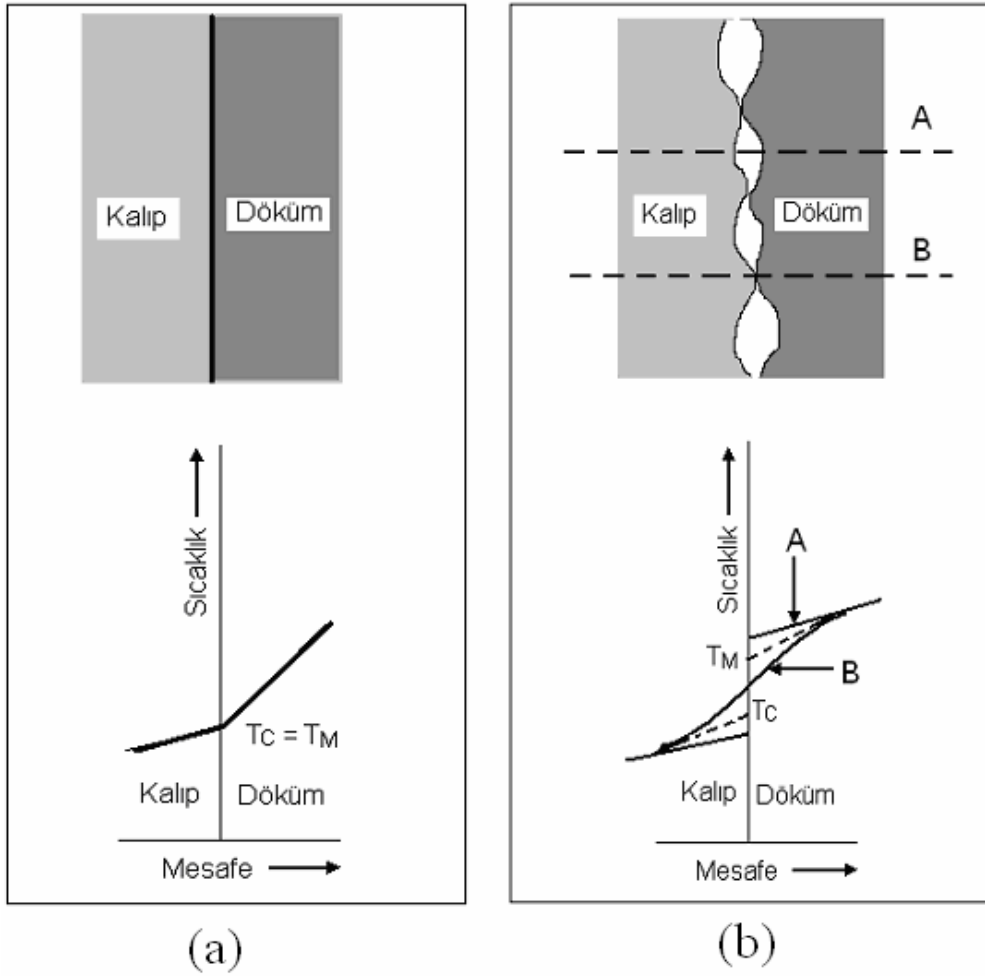
Metalik kalıp veya soğutuculara karşı döküm parça katılaşırken döküm ve kalıp arasındaki uyumsuz temastan dolayı ısı akışına en yüksek direnci metal-kalıp ara yüzeyi gösterir (Bölüm 2.1). Ara yüzey boyunca ısı transferi ısı transfer katsayısı tarafından belirlenir.

Ara yüzeyde mükemmel temas olduğu zaman döküm (T_C) ve kalıp (T_M) yüzey sıcaklıkları birbirine eşit olur (Şekil 2.3.a). Ancak bu durum gerçekte mümkün değildir. Yukarıda anlatıldığı gibi her iki yüzey arasında çok az bir alanda temas vardır ve bundan dolayı iki yüzey arasında bir sıcaklık farkı meydana gelir (Şekil 2.3.b). Bu sıcaklık farkı ara yüzeyde gerçekte var olan gaz boşluklarının bir sonucudur.

Isı transferi, temas alanlarında (Şekil 2.3.b B kesit) gaz dolu boşluklardan (Şekil 2.3.b A kesiti) daha fazla olacaktır. Bu durum aslında ara yüzeyden uzakta ısı akışının tek boyutlu olmasına rağmen metal-kalıp ara yüzeyinde iki farklı sıcaklık meydana getirecektir. Sıcaklık farkları döküm ve kalıbın her iki yüzeyinde sıcaklık dağılımında belirgin bir farka neden olur. Yüzeyler arasındaki sıcaklık farkı her iki yüzeydeki ortalama sıcaklıkların belirlenmesi ile bulunabilir.

Temas için makroskobik ortalama ara yüzey ısı transfer katsayısı aşağıdaki eşitlik ile verilebilir.

$$h = \frac{q}{T_C - T_M} \quad (2.16)$$



Şekil 2.3. Döküm-kalıp ara yüzeyinde sıcaklık değişimi a) mükemmel temas [17] b) uyumsuz temas [5]

Ara yüzeyde temas iletimi ile ısı transferi analizinin nicel olarak belirlenebilmesi için iki yüzeyin topografisinden ara yüzeydeki gerçek temas alanı ve genişliğinin belirlenmesi gerekir. Fakat ara yüzeydeki bu gerçek temas alanı ve genişliğinin belirlenmesi oldukça zordur. Holman [16] temas alanına dayalı ısı transfer katsayısını (h) belirlemek için basit bir yaklaşım vermiştir.

$$h = \frac{I}{L_g} \left[\frac{A_c}{A} \frac{2k_1k_2}{k_1 + k_2} + \frac{A_v}{A} k_{gaz} \right] \quad (2.17)$$

Burada A_c gerçek temas ve A_v boşluk alanı, k_1 ve k_2 birbirine temas eden iki malzemenin ve k_{gaz} boşluktaki gazın ısı iletim katsayılarıdır. L_g yüzeyler arasındaki mesafedir. Temas mesafesi kadar temas noktalarının alanı ve dağılımının hesaplanması oldukça zor olduğu için bu eşitlik ile ısı transfer katsayısının belirlenmesi güçtür.

Griffiths [18] dökümler için Eş. 2.17'deki L_g 'yi döküm ve kalıp yüzey pürüzlülük (R_Z) değerlerinin bileşkesi olarak aşağıdaki eşitlik ile tanımlamıştır.

$$R_{Z(\Sigma)} = \sqrt{R_{Z(döküm)}^2 + R_{Z(sogutucu)}^2} \quad (2.18)$$

Kayıkçı (4) kalıp yüzeyi çok pürüzlü olduğunda döküm yüzeyinin düzgün, kalıp yüzeyi çok düzgün olduğunda ise döküm yüzeyinin çok pürüzlü olduğunu ve döküm yüzeyi orta pürüzlülükte olduğunda ise her iki yüzey pürüzlülüğünün birbirine yakın olduğunu bildirmiştir. Kayıkçı [4] Eş. 2.17'yi aşağıdaki eşitlik ile yeniden tanımlamıştır.

$$h = \frac{1}{R_{Z(\Sigma)}} \left[\frac{A_c}{A} \frac{k_{Kalıp} R_{ZKalıp} + k_{Döküm} R_{ZDöküm}}{R_{ZKalıp} + R_{ZDöküm}} + \frac{A_v}{A} k_{gaz} \right] \quad (2.19)$$

2.2.3. Hava boşluğundan ısı transferi

Döküm-kalıp ara yüzeyinin uyumsuz temasında (Şekil 2.3.b) uyumsuz yüzeyler arasında bulunan bir boşluktaki ısı transfer katsayısı genel olarak aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$h_c = \frac{k_{gaz}}{X_{gaz}} \quad (2.20)$$

Burada X_{gaz} ara yüzeydeki etkili boşluk genişliğidir. Boşluk genişliği sıfır olduğunda ısı transfer katsayısı sonsuz olacağı için Huang [19] Eş. 2.19'a bir düzeltme faktörü ilave etmiştir.

$$h_c = \frac{k_{gaz}}{b + X_{gaz}} \quad (2.21)$$

Boşluk genişliği için düzeltme faktörü olan b maksimum ara yüzey ısı transfer katsayısı ve boşluk genişliği sıfır olduğunda hesaplanır.

Boşlukta bulunan gaz birçok gazın karışımından meydana gelir ve her döküm şartlarına göre değişim gösterir. Genellikle ara yüzeydeki boşlukta hava olduğuna inanılır. Bu da ara yüzeyde bulunan gaz karışımının ısı iletim katsayısının yanlış alınmasına ve sonuçta ısı transfer katsayısının yanlış hesaplanmasına neden olur.

Yüksek sıcaklıkta dökülen metal ve alaşımların ara yüzeyinde taşınım ile ısı transferine ilave olarak ihmal edilemeyecek kadar yüksek ışınlımla da ısı transferi olur [20]. Bu durumda ısı transfer katsayısı aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$h = h_c + h_r \quad (2.22)$$

Eşitlikte “ c ” ve “ r ” indisleri sırası ile taşınım ve ışınlımı temsil etmektedir. Işınım ısı transfer katsayısı, h_r , Eş. 2.23'deki gibi hesaplanır.

$$h_r = \frac{\sigma(T_C^2 + T_M^2)(T_C + T_M)}{\frac{1}{\varepsilon_C} + \frac{1}{\varepsilon_M} - 1} \quad (2.23)$$

“ ε ” cismin ışınlam yayma katsayısı ve “ σ ” Stefan-Boltzmann katsayısıdır (W/m^2K^4). Literatürde ışınlam ısı transfer katsayısının, toplam ısı transfer katsayısının yaklaşık olarak % 5’inden az olduğu ve ara yüzey boşluğu 100 μm ve döküm sıcaklığı 800 $^{\circ}C$ ’nin altında ihmal edilebileceği belirtilmiştir [20–22].

2.3. Döküm-Kalıp Ara Yüzey Isı Transferini Etkileyen Faktörler

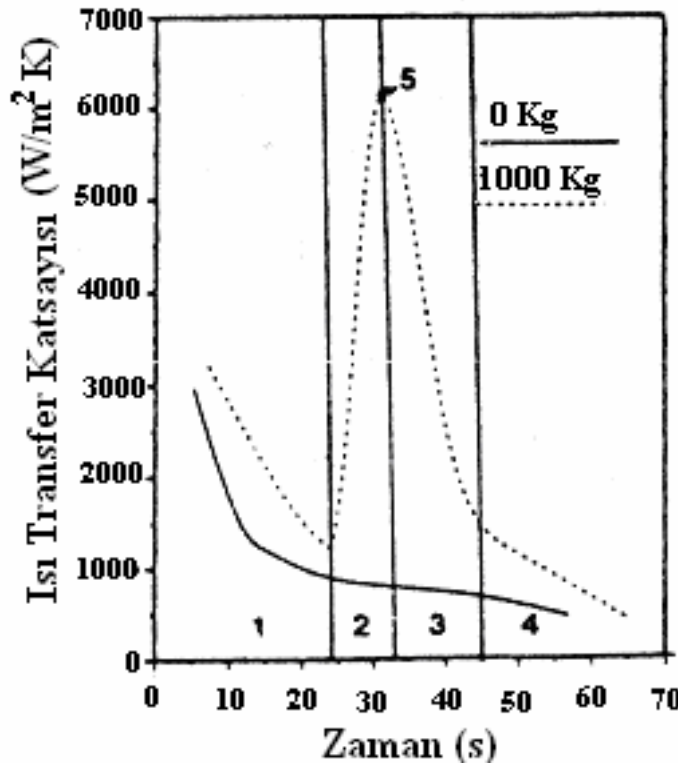
2.3.1. Basıncın etkisi

Katılaşma sırasında sıvı metalin üzerine dış basınç uygulamaları kalıp yüzeyindeki temas alanı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Uygulanan basınç uyum bölgesinin süresini arttırır. Basınç uygulaması ile elde edilen veriler analiz edildiğinde ısı transfer katsayısında kayda değer bir artışın olduğu görülür, Şekil 2.4. Bunu takiben ısı transfer katsayısı şiddetli olarak azalır. Azalmanın sebebi, katılaştan metalin kabuk oluşturma hipotezi ile açıklanabilir. Metal elastik durumdan plastik duruma geçmesiyle uygulanan basıncı etkisiz bırakacak dayanım kazanır ve metalin termal yapısından dolayı metalde geri çekilme başlar [10,11]. Sonuç olarak katı iletimine önemli katkısı olan uyumlu bölge daha yüksek ısı transfer katsayısı elde edilmesine izin verir [10]. Şekil 2.4’deki eğrinin eğimindeki değişimler metalin katılaşması sırasında meydana gelebilen farklı temas ihtimallerini tanımlamaktadır.

Sun [23] ve Tadayon [24] basınç arttığında metal-kalıp ara yüzeyde ısı transfer katsayısının arttığını bildirmişlerdir ve ısı transfer katsayısı ile basınç arasında deneye dayalı ilişkiler kurmuşlardır.

Davies [25] metal kalıba yaptığı dökümlerde metalin statik basıncının ısı transfer katsayısının değeri üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Benzer etki Taha ve arkadaşları [26] tarafından da belirtilmiştir. Nashida ve Matsubara [27] dikey çelik kalıba dökülen metal üzerine 250 kg ile 30000 kg arasında basınç uygulayarak ısı transfer katsayısı üzerine temas

basıncının etkisini araştırmışlardır. Deney sonuçları artan basınç ile ısı direncin düştüğünü göstermiştir. 30000 kg pres basınç uygulamasında ara yüzey ısı transfer katsayısının maksimum değeri önemli oranda artmış ve döküm parçanın katılaşma zamanı basınç uygulanmamış dökümlere göre %50 azalmıştır.



Şekil 2.4. Dış basıncın ısı transfer katsayısı üzerine etkisi [11]

2.3.2. Döküm alaşımının kompozisyonunun etkisi

Garcia [28–35] yandan soğuma şartlarında saf Sn, Sn-%5Pb, Sn-%10Pb, Sn-%20Pb ve ötektik Sn-Pb ve Saf Al, Al-%4.5Cu, Al-%15Cu ve ötektik Al-Cu alaşımlarının ısı transfer katsayısı profillerini belirlemiştir. Isı transfer katsayısı profillerinin döküm metalinin katılaşma karakteristiği, metalin kalıba ıslatabilme kabiliyeti ve katılaşma ve soğuma sırasında meydana gelen toplam çekme miktarından etkilendiğini gözlemlemişlerdir. Katılaşma sıcaklık aralığının genişlemesi ile ısı transfer katsayısının arttığını bildirmiştir. Geniş

katılaşma sıcaklık aralığında dentritler arası sıvının metal-kalıp ara yüzeyinde sıvının daha uzun süre kalmasını sağlaması ve katılaşma çekmesini daha iyi besleyerek ara yüzey temasını geliştirmesini genel bir eğilim olarak vermiştir. Daha dar katılaşma sıcaklık aralığına sahip Al-%15Cu alaşımının ısı transfer katsayısı başlangıçta Al-%4.5Cu alaşımından daha yüksek olduğu fakat daha sonra azaldığı, bunun sebebinin ise başlangıçta Al-%15Cu alaşımının kalıbı ıslatabilme kabiliyetinin daha baskın bir faktör olması ile açıklamışlardır.

Lee [2,3] katılaşma mekanizmasının ısı transfer katsayısı üzerine etkisini incelemek için sıvı ve katının birlikte bulunduğu dentritik (mushy) şekilde katılaşan AC8A (Al-%12.7Si-%1.2Cu-%1.2Mg-%1.1Ni), dentritik + düzlemsel katılaşan ötektik altı A356 (Al-%7Si-%0.2Cu-%0.3Mg) ve düzlemsel katılaşan saf Al ve ötektik Al-Si alaşımlarını merkezinde maça bulunan silindirik bir kalıba dökmüştür. Metal-kalıp ve metal-maça ara yüzeyindeki ısı transfer katsayısını tespit ederek alaşımın katılaşma mekanizmasının ısı transfer katsayısı üzerinde belirgin bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir.

Muojekwu [36] Al-Si alaşımlarında silisyum miktarının azalması ile ısı akısı ve ısı transfer katsayısını arttığını açıklamıştır. Bunun sebebinin, silisyum içeriğinin azalması ile alaşımların katılaşma sıcaklığına göre daha yüksek döküm sıcaklığı gerektirmesi ve ısı iletkenliğinin artmasına bağlamıştır. Michel [37], Fortin [10] ve Garcia [31] da Moujekwu'nun sonuçlarına paralel olarak silisyum içeriğinin azalması ile ısı transfer katsayısının arttığını bildirmişlerdir. Bu sonuçların aksine Taha [26] Al-Si alaşımlarında silisyum içeriğinin artmasıyla ısı transfer katsayısı değerinin arttığını iddia etmektedir. Taha'ya göre ara yüzeyde hava boşluğu oluşumu alaşımın tipine bağlıdır ve silisyum içeriğinin artmasıyla hava boşluğu azalır. Hava boşluğunun azalması da ara yüzey ısı transfer katsayısı değerini artırır.

Krishnan ve Sharma LM24 (Al-9,5%Si-3,58%Cu) alaşımlarında LM6 (Al-%11,49Si) alaşımına göre daha yüksek ısı transfer katsayısı elde etmişlerdir [38]. Araştırmacılar yaptıkları diğer çalışmalar ile teorik [17] ve deneysel [39]

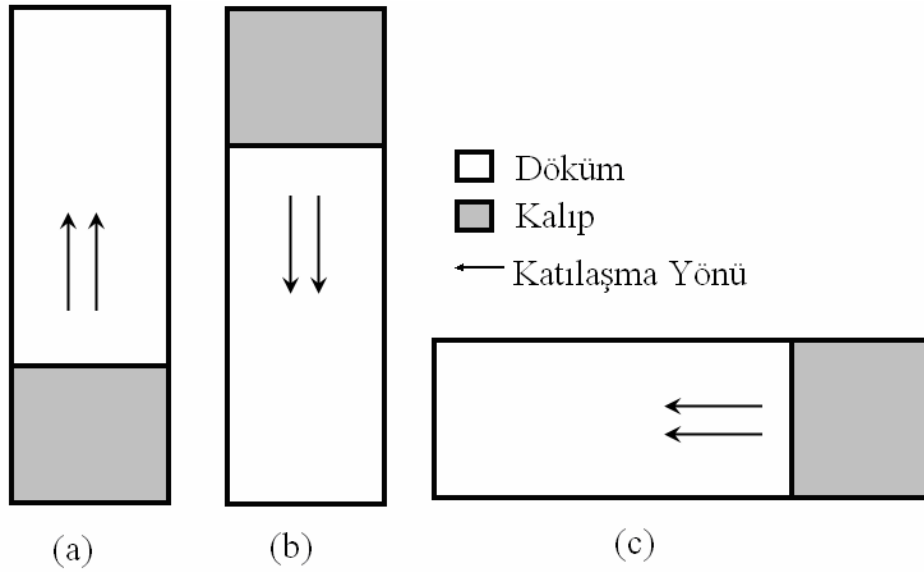
olarak döküm alaşımlarının yüzey gerilimi ve kalıba temas açısının ısı transferi üzerine etkisini incelemişlerdir. Araştırmacılara göre [39] döküm alaşımlarının yüzey gerilimi ve temas açısı değerlerinin azalması ısı transfer katsayısını arttırmaktadır.

Prabhu ve Ravishankar [40] Al-Si alaşımında modifikasyon işleminin ısı transferini geliştirdiğini bildirmişlerdir.

Dökme demir alaşımlarında ısı transfer katsayısının yukarıda verilen çalışmalarında diğer alaşımların aksine zamana bağlı olarak arttığı bildirilmiştir [15, 41–44]. Bunun sebebinin dökme demirin katılaşması sırasında yapıda bulunan grafitin genleşmesi ile döküm metalinin kalıp duvarına baskı yapmasından ve bu baskının da ara yüzey temasını geliştirmesinden kaynaklandığını açıklamışlardır.

2.3.3. Katılaşma yönü

Isı akış yönü, metal-kalıp ara yüzeyinde hava boşluğu oluşumunda önemli rol oynayan katılaşmanın yönünü belirler. Katılaşma, ısıнын çıkış yeri kalıbın alt bölgesinde ise yerçekimine ters, üst bölgesinde ise yerçekimi yönünde olur (Şekil 2.5). Sonuç olarak, hava boşluğu oluşumu katılaşmanın yerçekimi yönünde artarken yerçekimi tersi yönünde azalır. Isının çıkışı kalıbın alt kısmından sağlandığında yerçekimi metal üzerinde uyumlu bölgeyi teşvik eden bir güç uygulaması olarak davranır ve hava boşluğu oluşumuna engel olur. Buna ilave olarak kalıp yüzeyi ve metal arasındaki iyi temas hava boşluğu oluşumunun yavaşlamasına katkıda bulunur. Bu iki parametrenin bir arada olması oldukça yüksek ısı iletkenlik katsayısı verir [10, 45–49].



Şekil 2.5. Katılma yönü a) yerçekimine ters, b) yerçekimi doğrultusunda ve c) yatay katılma.

Hines [50] karmaşık geometriye sahip bir döküm parçadaki değişik yüzeylerde ısı transfer katsayısını ProCAST döküm simülasyon programı ile tespit ederek kalıptaki içbükey ve dışbükey yüzeyler için ısı transfer katsayıları arasında çok büyük farklar olduğunu açıklamıştır.

2.3.4. Döküş sıcaklığının etkisi

Literatürde genelde döküş sıcaklığı arttıkça ısı transfer katsayısının arttığı bildirilmektedir [13, 26, 28, 29, 51, 52]. Döküm sıcaklığının artması ile sıvı metalin akıcılığı ve sıvı metalin kalıp yüzeyini ıslatabilirliği artar. Akıcılık ve ıslatabilirliğin artması metal-kalıp ara yüzeyinde daha iyi termal temas sağlar.

Taha [26] ve Garcia [28, 29, 32] katılma yönü ve döküm sıcaklığının ısı transfer katsayısı üzerine etkisini incelemişlerdir. Taha [26] tüm yönlerde ısı transfer katsayısının döküm sıcaklığının artması ile arttığını, Garcia [29] ise yandan katılma şartlarında döküm sıcaklığının artması ile ısı transfer katsayısının arttığını fakat alttan katılma şartlarında ısı transferinin azaldığını gözlemlemişlerdir. Taha [26] özellikle alttan katılma şartlarında

ısı transfer katsayısı üzerinde döküm sıcaklığının daha belirgin bir etkiye sahip olduğunu ve bunun da metalin statik basıncının en çok kalıbın alt yüzeyine etki etmesi ile açıklamıştır. Sıvı metalin statik basıncının olmadığı kalıbın üst yüzeyinde metal yüzeydeki boşluklara giremediği için bu yüzeydeki döküm sıcaklığının ısı transfer katsayısı üzerinde çok etkili olmadığı ve bunun da ihmal edilebileceği belirtmiştir. Garcia'ya [29] göre aşırı ısı katılaşmayı geciktirir. Yandan katılaşma şartlarında kalıp duvarından metalin çekilmesi de geciktiğinden dolayı döküm sıcaklığının artması ile ısı transfer katsayısı profili de artar. Ancak alttan katılaşma durumunda eğer yan duvardan ayrılma etkili olursa dökümün ağırlığı daha iyi metal-kalıp termal temasa katkıda bulunacaktır. Daha düşük döküm sıcaklıklarında katılaşma daha erken başlar ve bunun bir sonucu olarak döküm sıcaklığının azalması ısı transfer katsayısı profilinin artmasını sağlar. Garcia [28, 29, 32] yandan katılaşma şartlarında Sn-%10Pb alaşımı için 20 °C ve 40 °C'lik aşırı ısının ısı transfer katsayısını etkilemediğini, alüminyum alaşımlarında ise etkilediğini gözlemlemiştir ve bunun sebebi olarak da sıvı metalin akıcılığının daha etkili rol oynaması olarak belirtmiştir.

El-Mahallawy ve Assar [53] ve Taha ve arkadaşları[54] daha yüksek döküm sıcaklığının ara yüzey ısı transfer katsayısını arttırdığını ve ara yüzey boşluk kalınlığını azalttığını deneysel olarak tespit etmişlerdir. Döküm sıcaklığı arttığında sıvı metalin akıcılığı artar ve düzensiz kalıp yüzeyleri ile daha iyi uyum sağlar. Muojekwu [36] aynı soğutucu yüzey pürüzlülüğü için döküm sıcaklığı arttıkça döküm yüzeyinin pürüzlülüğünün azaldığını bildirmiştir. Todoroki ve arkadaşları [55] döküm sıcaklığının artmasıyla maksimum ısı transfer katsayısının arttığını rapor etmişlerdir. Wang ve Matthys [13] de döküm sıcaklığını ergime sıcaklığından 39 °C den 176 °C'ye yükseltilmesi ile sıvı metal-soğutucu temas süresinin dört katı metal-soğutucu temasının üç kat artmasına bağlı olarak maksimum ısı transfer katsayısı değerinin arttığını bildirmişlerdir. Wang ve Matthys [51] yaptıkları diğer bir hızlı katılaştırma çalışmalarında döküm sıcaklığının artması döküm ve soğutucu arasındaki termal teması arttırmamasından dolayı katılaşmasının başlangıcına kadar olan

ısı transfer katsayısı üzerine döküm sıcaklığının soğutucunun yüzey pürüzlülüğüne bağlı olduğunu bildirmişlerdir. Gafur [56] saf alüminyumun döküm sıcaklığının 705 °C'den 800 °C'ye yükselmesi ile maksimum ısı transfer katsayısının 900 W/m²K'den 2100 W/m²K'e yükseldiğini belirlemiştir. Araştırmacılar bu artışı daha yüksek döküm sıcaklığının daha iyi ara yüzey teması ve sıvı metalin ıslatma kabiliyetinin artmasıyla açıklamışlardır.

Döküm sıcaklığının etkilediği birçok faktör dökümün ısı transferi üzerinde etkili olmaktadır. Dökümün aşırı ısı daha düzgün bir döküm yüzeyi sağlayarak da ısı transfer hızını arttırabilir [55,57].

Yüksek döküm sıcaklığının döküm-kalıp ara yüzey ısı transfer katsayısını arttırdığının bilinmesine rağmen kesin döküm sıcaklığı ve ısı transfer katsayısı arasındaki ilişkiyi belirleyen mekanizma henüz tam olarak bilinmemektedir.

2.3.5. Kalıp malzemesinin etkisi

Sıvı metalin kalıbı doldurması, katılaşması ve soğuması sırasında, ısı döküm parçadan kalıba doğru akar [58]. Döküm prosesinde sıvı metalin katılaşma hızı, dökülen metalin mikro ve makro yapısı ve döküm parçanın mekanik dayanım parametreleri sıvı metalin döküldüğü kalıbın ısı iletim hızı, kalıp malzemesinin ısı iletimi ve ısı kapasitesi ile kontrol edilir [58, 59].

Kum kalıp yönteminde sıvı metalden ısının transferi, kum tipi, kumun tane boyutu ve dağılımı, bağlayıcı tipi ve oranı, kalıp yoğunluğu, nem oranı gibi birçok parametreden etkilenir [58–64].

Isı transfer katsayısı üzerinde kalıp malzemesinin etkisini Bamberger ve Stupel [65] araştırmışlardır. Araştırmacılar sıvı metal kalıba döküldükten sonra düşük ısı iletkenliğe sahip çelik soğutucuların ara yüzeye yakın mesafelerde sıcaklıkta ani bir artış olduğunu fakat daha uzak mesafelere

doğru yavaşladığını görmüşlerdir. Bakır soğutucuda ise soğutucu mesafesi boyunca düzenli ısı dağılımı gözlemlenmiştir. Ara yüzey ısı akısının zamana ve soğutucunun özelliklerine bağlı olduğu, döküm alaşımının kalıba dökümünü takip eden ilk 10 s'de ısı emmesi soğutucunun hacimsel ısı kapasitesi ile orantılı olduğu ve bu zaman aralığında ısı yayılımına bağlı olmadığı sonucuna varmışlardır. Sonraki aşamalarda ise ısı transfer hızı daha çok soğutucunun ısı yayılımı özelliği ile orantılı olduğu bildirilmiştir.

Garcia [28, 29, 32] ve Muojekwu [36] soğutucunun ısı yayılım özelliği arttıkça ısı transfer katsayısının arttığını bildirmişlerdir.

Garcia [28, 29, 32], Gafur [58], Kumar [66], ve Meneghini [67] soğutucu kalınlığının ısı transferi üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Kumar [66] maksimum ısı akısı (q_{max}) değerinin katılaşmanın başlangıcında meydana geldiğini ve maksimumu ısı akısı değerinin esas olarak soğutucunun kalınlığına ve ısı yayılımına bağlı olduğunu açıklamışlardır.

Gafur [56] soğutucu kalınlığının ısı transfer katsayısı üzerinde önemli bir etkiye sahip olmadığını bildirmektedir. Garcia'ya [28, 29, 32] göre soğutucu kalınlığı azaldığında ısı transferi artar. Katılaşmanın başında soğutucu sıcaklığı soğutucu kalınlığı azaldıkça çok hızlı artar. Bunun sonucu olarak metal kalıp daha çok genişler. Katılaşmanın hemen başında katı kabuk kalınlığı soğutucu kalınlığına bağlı olmadığı için ara yüzeyden aynı miktarda metal çekilmesi olur. Bu iki faktör ısı transfer katsayısı değerinin artmasına katkıda bulunur. Meneghini [67] bakır soğutucunun kalınlığının artması ile ısı transfer katsayısının arttığını, alüminyum ve dökme demir soğutucuların kalınlığının artmasıyla ısı transfer katsayısının azaldığını bildirmiştir.

2.3.6. Kalıp sıcaklığının etkisi

Isı transferi için önemli parametrelerden birisi de kalıp sıcaklığıdır. Metalik kalıplarda sürekli döküm yapıldığı için kalıp ısınır. Isı transferi üzerinde kalıp sıcaklığının etkisi çok az araştırmacı tarafından çalışılmıştır. [37, 52, 68–70]

Srinivarsan [69] gri dökme demir için kalıp sıcaklığının 250 °C'den 150 °C'ye düşürüldüğünde ısı transfer katsayısının yaklaşık iki kat arttığını bildirmiştir. Michel [37] değişik kaplama kalınlığı ve değişik alaşım kompozisyonlarında ısı transferi üzerinde kalıp sıcaklığının etkisini incelemiştir. Araştırma sonucunda kaplamasız kalıbın sıcaklığı 200 °C'den 300 °C'ye yükseldiğinde Al-%6Si alaşımında ısı transfer katsayısı azalırken Al-%13Si alaşımında önemli derecede artmıştır. Kaplamalı kalıplarda ise kalıp sıcaklığının artması ile bütün alaşım kompozisyonlarında ısı transfer katsayısı bir miktar artmıştır.

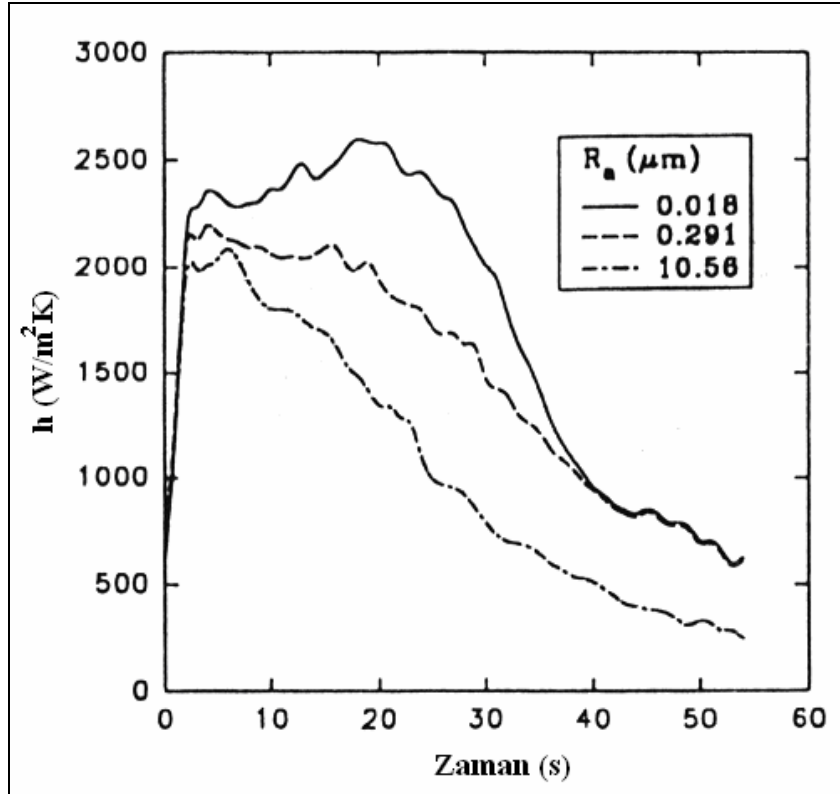
Hallam ve Griffiths [52] yüzeyi kaplanmış ve 30 ve 300 °C ön ısıtılmış çelik soğutucuya Al-%13Si alaşımının dökümünde ısı transfer katsayısının arttığını bildirmişlerdir.

Gozlan ve Bamberger [68] kalıp malzemesi olarak kullandıkları yüzeyi grafit kaplanmış ve 225–400 °C arasında ön ısıtma yapılmış AISI H-19 çelik kalıba alüminyum bronz dökümüştür. Araştırmacılar 300 °C'de maksimum ısı akısı ve soğuma oranı elde etmişlerdir.

2.3.7. Kalıp yüzey pürüzlülüğünün etkisi

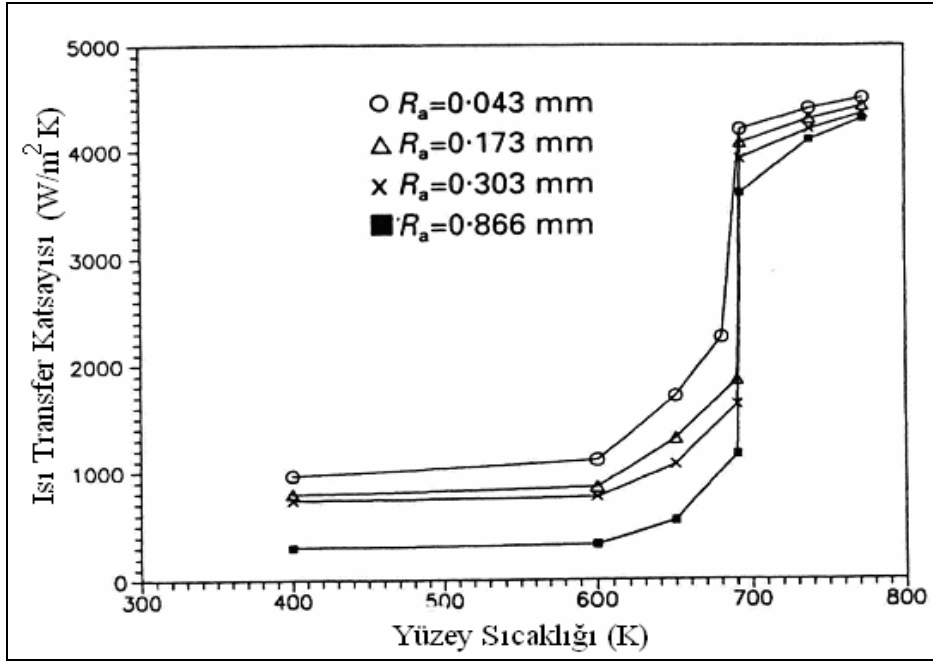
Kalıp yüzey pürüzlülüğünün ısı transfer katsayısı üzerine etkisi çok az sayıda araştırmacı tarafından çalışılmıştır [4, 26, 36, 51, 71, 72]. Muojekwu [36] Al-Si alaşımlarının kalıp yüzey pürüzlülüğü ile ısı transferi (Şekil 2.6) ve mikro yapı arasındaki ilişki konulu çalışmada Al-%7Si alaşımının 0,018µm ile 10,56µm arasında yüzey pürüzlülüğüne sahip kalıplara dökümünde ısı transfer katsayısını ve dentrit kolları arası mesafedeki değişimi ölçmüştür. Kalıbın

yüzey pürüzlülüğü 500 kat arttığında dentrit kolları arası mesafedeki artış 3 kez, döküm yüzey pürüzlülüğü (R_a) değeri ise yalnızca % 40 artmıştır. Dentrit kolları arası mesafe kalıbın yüzey pürüzlülüğünün azalması ile yüzeyden sadece 20 mm mesafeye kadar azalmıştır.



Şekil 2.6. Bakır soğutucu-Al-%7Si alaşımı ara yüzey ısı transfer katsayısı ve yüzey pürüzlülüğü ilişkisi [36]

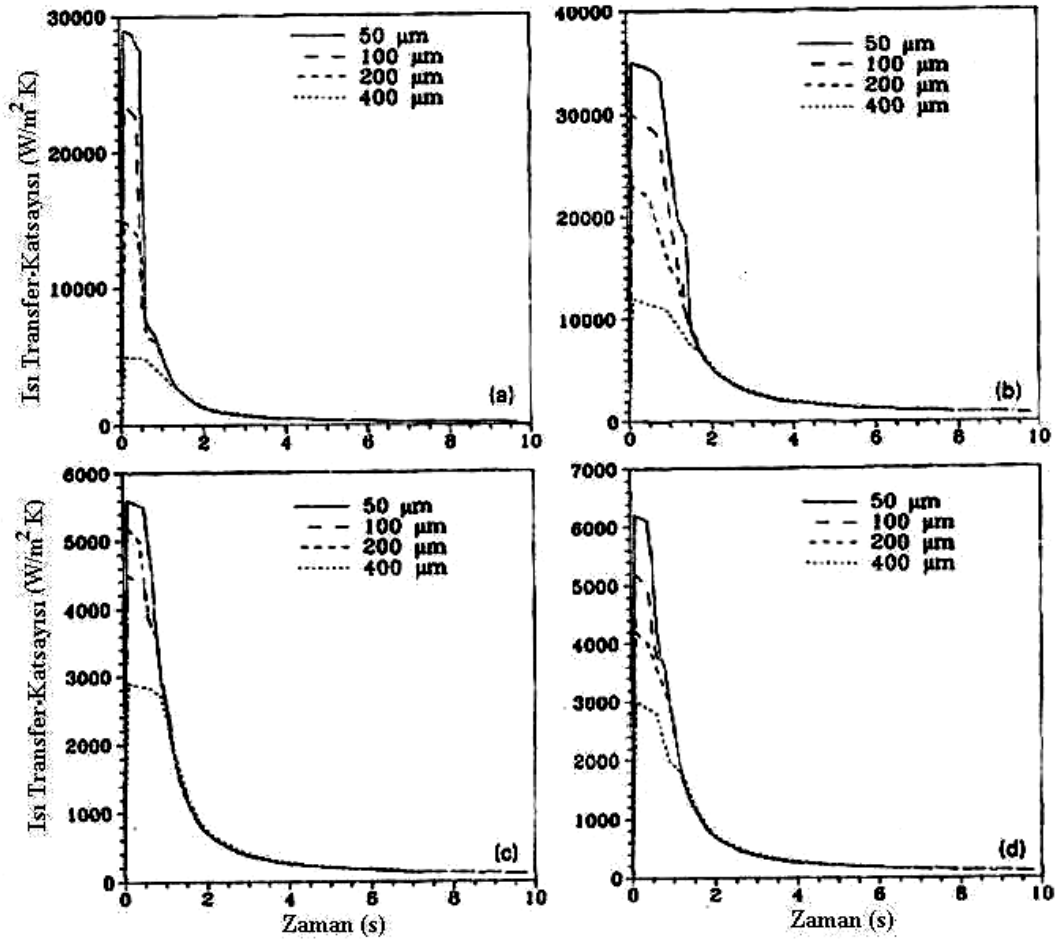
Assar [71] 0,043µm ile 0,866µm arasında yüzey pürüzlülüğüne sahip ve 100°C'ye ısıtılmış kalıba saf çinko dökerek ısı transfer katsayısındaki (Şekil 2.7) değişimi incelemiştir. Assar [71] çok az da olsa ısı transfer katsayısının yüzey pürüzlülük değerinin artması ile azaldığını bildirmiştir.



Şekil 2.7. Çelik soğutucu-saf çinko ara yüzey ısı transfer katsayısı ve yüzey pürüzlülüğü ilişkisi [71]

Taha [26] yaptığı deneylerde kalıp yüzey pürüzlülüğünün ısı transfer katsayısı üzerinde dökümden sonraki birkaç saniyede etkili olduğunu, fakat metal-kalıp ara yüzeyinde uyumsuz temas başladıktan sonra etkili olmadığını gözlemlemiştir (Şekil 2.8).

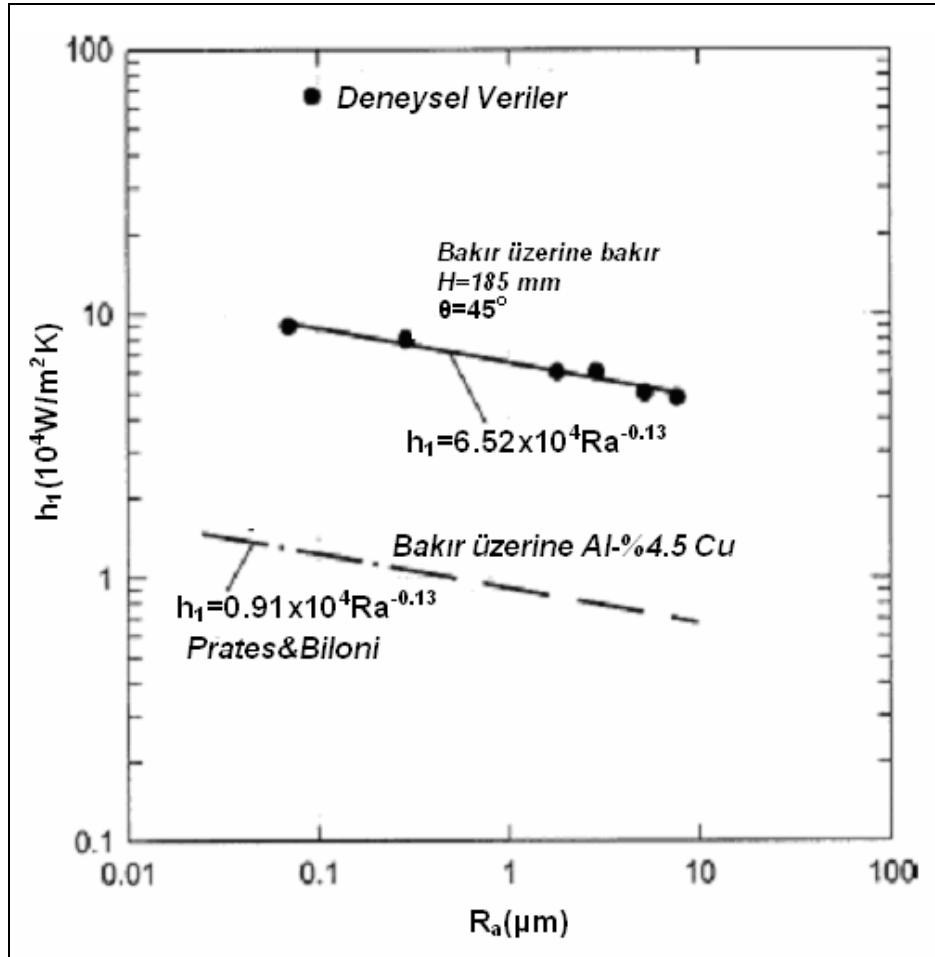
Wang ve Matthys [51] 0,07 ve 2,28 μm (R_a) aralığında yüzey pürüzlülüğüne sahip alüminyum, bakır ve çelik soğutuculara saf bakır ve saf nikel damlatarak hızlı katılaşma şartlarında kalıp yüzey pürüzlülüğünün katılaşmadan önce ve katılaşma sırasında ısı transfer katsayısına etkisini araştırmışlardır (Şekil 2.9). Yüzey pürüzlülüğünün ısı transfer katsayısına etkisinin yüksek yüzey pürüzlülüğü için az, düşük yüzey pürüzlülüğü için ise yüksek olduğunu bildirmişlerdir. Bununla birlikte yaklaşık olarak 0,5 μm R_a değerinin kritik bir değer olduğunu ifade etmişlerdir.



Şekil 2.8. Çelik soğutucu-saf alüminyum ara yüzey ısı transfer katsayısı ve yüzey pürüzlülüğü ilişkisi a) ve b) ve d) yandan ve c) üstten katılma şartları [26]

Morales ve arkadaşları [73] değişik yüzey şartlarına sahip akıcılık test kanallarında Al-Cu alaşımının akıcılığını ölçmüşlerdir. Kanalların yüzey şartları ve katılma alanının uzunluğu arasında bir ilişki olduğunu bildirmişlerdir. Makine ile yüzeyi hazırlamış kanalda 600 grit zımpara ile hazırlamış kanaldan %36 daha uzun numune elde etmişlerdir. Dentritlerin çekirdeklendiği yerlerin kalıp duvarındaki yükseltilerle uyduğunu ve döküm parçanın yüzeyindeki tane boyutunun yüzey pürüzlülüğünden ve soğutucu bölgesindeki bölgesel ısı transfer hızından etkilendiğini bildirmişlerdir. Ayrıca döküm parçanın merkezine doğru uzanan sütunsal bölgenin de yalnızca toplam ısı transferi tarafından kontrol edildiğini belirlemişlerdir.

Kayıkçı [4], Griffiths [47] ve Kayıkçı ve Griffiths [72] kalıp yüzey pürüzlülüğü ile ısı transfer katsayısı arasında doğrusal bir ilişkinin olmadığını açıklamışlardır.



Şekil 2.9. Wang ve Matthys [51] hızlı katılaşma şartlarında elde ettikleri soğutucu yüzey pürüzlülüğü ve ara yüzey ısı transfer katsayısı ilişkisi

2.3.8. Döküm yüzeyinin topografik yapısının etkisi

Isı transferi literatüründe kalıp yüzey pürüzlülüğündeki değişimin ara yüzey ısı transfer katsayısına etkileri az da olsa incelenmiştir. Buna karşılık döküm yüzey pürüzlülüğünün oluşumunu ve döküm yüzey pürüzlülüğünün ara yüzey

ısı transfer katsayılarına olan etkilerini inceleyen çalışmalar yok denecek kadar azdır.

Muojekwu [36] soğutucu yüzey pürüzlülüğünün döküm yüzey pürüzlülüğü üzerinde belirgin bir etkiye sahip olmadığını bildirmiştir. Diğer çalışmalarda [47, 74] da döküm yüzey pürüzlülüğü ile ısı transfer katsayısı arasında açık bir ilişki bulunamamıştır.

Kayıkçı [4], farklı pürüzlülük değerlerine sahip kaplanmamış bakır soğutuculara yaptığı dökümlerin yüzey pürüzlülük değerlerini ve ara yüzey ısı transfer katsayılarını ölçmüştür. Yapılan değerlendirmede ara yüzey iletkenliğinin döküm-soğutucu arasındaki gerçek temas ve bu temasın mesafesine (soğutucu ve döküm yüzey pürüzlülüğünün (R_z) bileşkesine) bağlı olduğunu belirterek verilen soğutucu yüzey pürüzlülüğü için elde edilen döküm yüzeyinin pürüzlülük değerinin ara yüzey ısı transfer katsayılarını doğrudan etkileyebileceğini rapor etmiştir. Bununla birlikte basitçe soğutucu yüzey pürüzlülüğünün kontrol edilmesi döküm yüzey pürüzlülüğünün de kontrol edilebilmesi anlamına gelmemektedir. Özellikle birçok dökümde düşük yüzey pürüzlülüğüne sahip soğutucu yüzeylerine dökülen döküm yüzeylerinin soğutucu yüzey pürüzlülük değerinin yaklaşık 20 kat daha yüksek pürüzlülük değerine sahip oldukları belirtilmiştir [4].

2.3.9. Döküm yüzeyi profilinin etkisi

Yüzey Pürüzlülüğüne ilave olarak katılacak döküm metalinin mekanik davranışı döküm parça ile kalıp yüzeyleri arasındaki temas şekli üzerinde önemli bir etkiye sahip olabilir. Richmond ve Tien [75] katılacak döküm kabuğunda oluşan termal gerilimin döküm-kalıp ara yüzeyinde hava boşluğu oluşumuna sebep olduğunu belirtmiştir. Mathew [76] düz ve çukur yüzeyli paslanmaz çelik plaka üzerine saf kurşun dökmüş ve yüzey profilini ölçmüştür. Her iki durumda da saf kurşun döküm yüzeyinde içbükey

deformasyon gözlenmiştir. Bu deformasyon merkezde döküm parça ve soğutucu plaka arasında 100 µm'den fazla ayrılmaya sebep olmuştur.

Dong ve arkadaşları [77] düz bir soğutucu üzerine birçok demir dışı metal ve alaşımı damlatarak yüzey şekillerini ölçmüş ve soğutucu profilinin düz olmasına rağmen döküm yüzeyinin parabolik olduğunu gözlemlemiştir. Saf metallerde deformasyon her zaman dışbükey, alaşımlarda ise içbükey veya dışbükey olarak belirlenmiştir. Dong ve arkadaşlarına [77] göre deformasyon miktarı metal kalıp arasındaki sıcaklık farkı, döküm metalin ısı genleşme katsayısı ve ara yüzey ısı transfer katsayısından etkilenmektedir. Bu modelde radyal pozisyonda düşey mesafe, $Z_{(r)}$

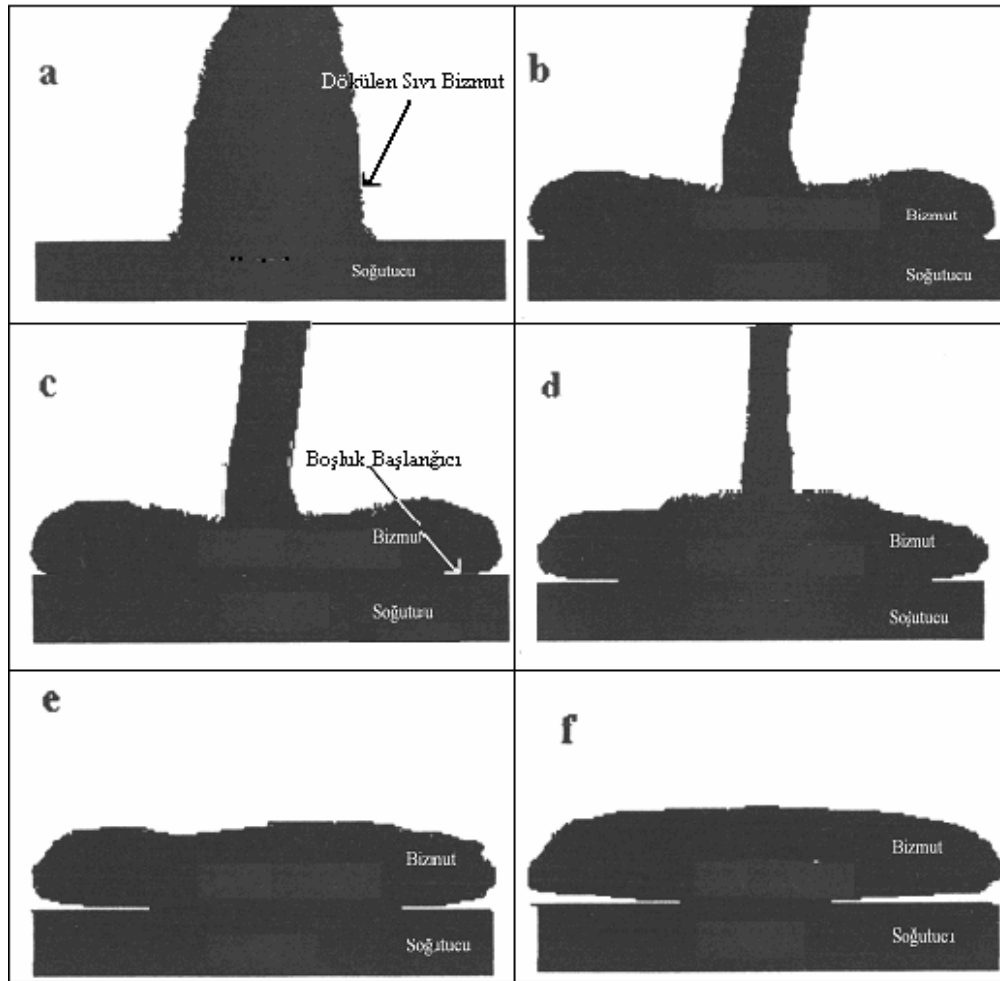
$$Z_{(r)} = \frac{I}{2} \alpha (\Delta T) \cdot r^2 = dr^2 \quad (2.24)$$

eşitliği ile belirlenebilir. Burada α ısı genleşme katsayısıdır.

Dong [78] bakır bir soğutucu yüzeyine sıvı bizmut damlatarak deformasyon oluşumunu kaydetmiş ve sıvının soğutucu üzerine döküldükten hemen sonra çok hızlı şekilde deformasyonun oluştuğunu belirlemiştir. Bizmutun soğutucu yüzeyine döküm başlangıcından 0,03 s sonra üst kısmın sıvı olmasına rağmen toplam deformasyonun yarısından fazlası oluşmuştur. Bu durum Şekil 2.10'da açık bir şekilde görülmektedir.

Dong, Niyama ve Anzai [79] yaptıkları çalışmada katılaştan kabuğun deformasyon şeklinin dökülen alaşımın kompozisyonuna bağlı olduğu göstermişlerdir. Fe-C alaşımında karbon miktarı %0,6'dan az veya % 2,5'den fazla ise döküm yüzeyi dışbükey, %0,6 ile %2,5 arasında ise içbükey olarak belirlenmiştir.

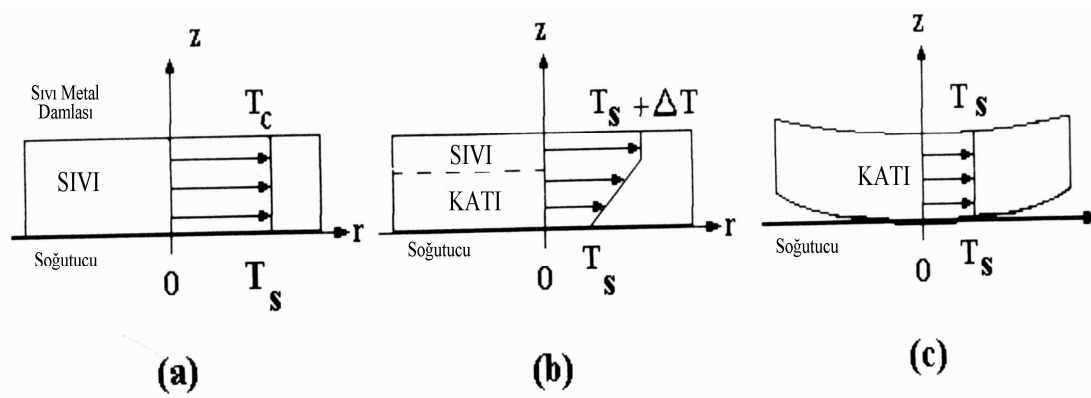
Döküm yüzeyinde deformasyon oluştuğunu Liu [80] (bakır soğutucu-nikel), Griffiths [47, 74] (bakır soğutucu-Al-%7Si) ve Hallam [52, 70, 81, 82] (yüzeyi kaplanmış kalıp çeliği-ötektik Al-Si alaşımı) de bildirmiştir.



Şekil 2.10. Bakır soğutucu yüzeyine sıvı bizmut dökümünde a) soğutucu sıvı teması ($t=0$ s), b) yayılmanın sona ermesi ($t=0,068$ s), c) Deformasyon ve boşluk oluşumunun başlangıcı ($t=0,074$ s), d) deformasyonun ilerlemesi $t=0,108$ s, e) deformasyonun ilerlemesi $t=0,206$ s ve f) oda sıcaklığına soğuduktan sonra döküm yüzeyi [78]

Dong [77] disk şeklinde metal bir soğutucu üzerinde katılaştıran sıvı metal damlacığı için Şekil 2.11’de şematik olarak görünen bir model geliştirmiştir. Bu modele göre T_C sıcaklığındaki sıvı damlacık T_0 sıcaklığındaki soğutucu üzerine düştüğünde soğuma aşağıdan yukarıya doğru tek yönlü olarak

başlar. Başlangıçta sıvı metal döküm sıcaklığındadır ve sıvı metalde sıcaklık farkı yoktur, Şekil 2.11.a. Sıvı-Soğutucu arasından ısıнын iletilmesi ile damlanın altında ince bir katı kabuk şeklinde katılaşma başlar, Şekil 2.11.b. Bu aşamada katılaşan kabuk çok ince ve zayıf olduğu için katı içindeki sıcaklık farkının oluşturduğu gerilim damlanın ağırlığı tarafından bastırılır ve kabuk düz şekilde kalır. Katılaşma ilerledikçe katı kabuğun kalınlığı artar ve katı kabuk sıvı metal ağırlığından kaynaklanan basıncı karşılayacak kadar yeterli dayanım kazanarak deformasyona maruz kalır, Şekil 2.11.c. Sonuçta metal yüzeyi parabolik dışbükey bir şekil alır.



Şekil 2.11. Katılaşan kabuk üzerindeki termal gerilimin neden olduğu bir sıvı metal damlasındaki deformasyonun şematik gösterimi a) Başlangıç aşaması b) Deformasyonun hemen öncesi c) Oda sıcaklığına soğuduktan sonraki görünüm [77]

Döküm yüzeyin deformasyonu döküm-kalıp ara yüzey ısı transfer davranışının önemli bir fonksiyonu olabilir.

2.3.10. Oksit film oluşumu

İnce bir oksit filmin oluşması katılaşma sırasında görünen diğer bir önemli parametredir. Oksijen ile metal reaksiyonundan kaynaklanan film tabakasından dolayı bu parametrenin kontrolü zordur. Alüminyum alaşımlarında oluşan reaksiyon için eşitlik aşağıdaki gibi yazılabilir [10].



Bu filmin oldukça yüksek termal direnci kalınlık derecesine bağılı olarak ısı transfer katsayısını düşürebilir [10].

2.3.11. Kalıp kaplamasının etkisi

Kalıp yüzeyleri sıvı metali erken soğumadan korumak, katılaşma yönünü ve hızını kontrol etmek, sıvı metalin kalıp yüzeyini çözündürmesini ve sıvı metalin kalıba kaynaklanmasını engellemek, kalıp boşluğundaki havanın dışarı atılmasını sağlamak ve kalıbı yağlamak için kaplanır [10, 83, 84].

Kalıp yüzeylerinin kaplanması öncelikli sebeplerinden biri izolasyondur. Metalik kalıplar yüksek termal iletkenliğe sahip metallerden yapıldığı için birçok durumda kalıp ve metal arasında bir izolasyon kaplaması yapmak gereklidir. Bu sıvı metalin kalıp boşluğunu doldurmadan önce soğumasını engellemek için gereklidir [10, 83].

Kaplama kalınlığı değiştirilerek kalıp boşluğundaki farklı bölgelerde metalin katılaşması kontrol edilebilir. Bu da sağlam parça ve istenilen yapıların elde edilmesine yardımcı olur [83, 85].

Metal sıvı durumda diğer birçok katı metal ile yüksek çözündürme kabiliyetine (affinity) sahip olduğundan dolayı sıvı metal ve kalıp arasında yalıtım yapacak bir bariyer gereklidir. Bu bariyer olmaz ise kalıp yüzeyi sürekli erozyona uğrayarak aşınır ve kalıbın ömrü kısalmır [83,85].

Kalıp boşluğundaki havanın kalıbın sıvı metal ile tam dolmadan önce boşlatılması gerekir. Metalik kalıplar havayı geçirme özelliğine sahip değildir. Hava çıkışını kolaylaştırmak için nadiren kalıp ayırma yüzeylerine ince kanalcıklar açılır. Eğer kalıp yüzeyine kaplama yapılırsa kalıp kaplama

malzemesinin yüzeyinde kalıp ve döküm parça arasındaki havayı tahliye edecek ince kanallar meydana gelir [83].

Metaller katılaşma sırasında hacimsel olarak küçülürler. Bu hacimsel küçülme döküm parçanın farklı kesitleri arasında gerilimler meydana getirerek döküm parçanın metal kalıpta sıkışmasına neden olur. Yağlayıcı özelliğe sahip bir kaplama malzemesi döküm parçanın kalıptan ayrılma özelliğini geliştirir [83].

Kaplama malzemesi düşük veya yüksek termal iletkenliğe sahip olabilir. Düşük termal iletkenliğe sahip kaplama malzemesi kalıp-metal ara yüzeyinde termal direnci artırırken yüksek termal iletkenliğe sahip kaplama malzemesi ısı iletimini hızlandırır [10, 84].

Kaplama homojen kalınlığa sahip olmak zorundadır. Daha ince kaplama kalınlığı doğal olarak daha düşük termal direnç ve daha yüksek ısı transfer oranı sağlar. İlave olarak, kalıbın iç yüzeyinde daha düşük pürüzlülük meydana getirerek kalıp-metal ara yüzeyinde daha iyi temas sağlar. Bu da termal direnci düşürür ve ısı akısını artırır [10, 84]. Sonuç olarak bu iki parametrenin kontrolü metal-kalıp ara yüzeyinde daha iyi ısı akısı ve ısı transferinin kontrolünü sağlayacaktır [10].

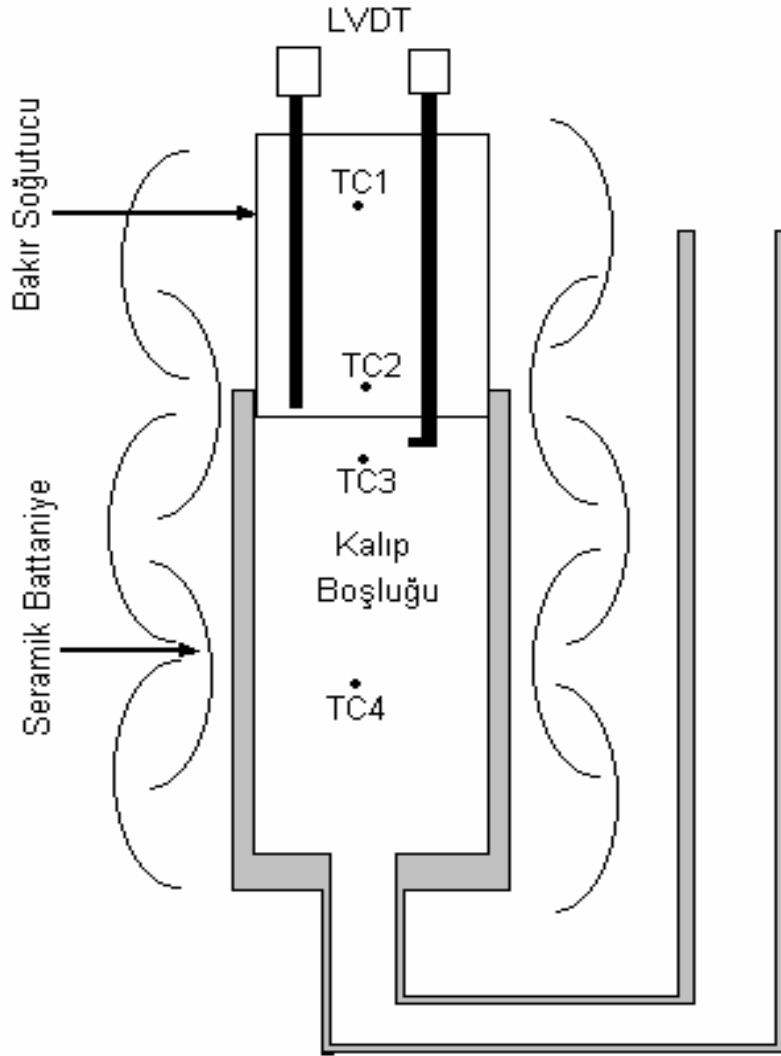
2.4. Ara Yüzey Isı Transfer Katsayısını Belirleme Yöntemleri

2.4.1. Ara yüzey boşluk ölçüm yöntemi

Birçok araştırmacı tarafından çeşitli metal-kalıp sistemlerinde döküm-kalıp ara yüzeyinde oluşan hava boşluğu ölçülerek ara yüzey ısı transfer katsayıları hesaplanmıştır [11, 14, 20, 22, 26, 38, 80, 86–89].

Hava boşluğunun zamanla değişimini ölçmek için en çok kullanılan teknik LVDT (linear variable displacement transducers) tekniğidir. Ho ve Phelke'nin

çalışmalarında kullandığı deney düzeneği şematik olarak Şekil 2.12’de verilmiştir.



Şekil 2.12. Ho ve Phelke’nin çalışmalarında kullandığı hava boşluğunun ölçümü için deney düzeneğinin şematik görünümü [11, 5]

Bu metotta biri kalıp diğeri ise döküm de olmak üzere iki adet LVDT kullanılmıştır. Metal kalıba dökülür ve termal etkiden dolayı kalıp ve döküm hareket etmeye başlar. Kalıp ve döküm yüzeyi ile birlikte her iki ara yüzeydeki LVDT’ler de hareket eder. Ara yüzeydeki LVDT’lerin ölçtüğü farktan hava boşluğunun boyutu hesaplanır ve Eş. 2.19 veya Eş. 2.20’den ara yüzey ısı transfer katsayısı belirlenir.

Bu teknik basit olmasına karşın LVDT çubuklarının tam ara yüzeye yerleştirilememesi, döküm metalinin katılaşmasına kadar döküm parça içindeki çubuğun hareket etmemesi, ara yüzeyde tam ayrılma gerçekleşmemesi gibi nedenlerden dolayı bu yöntemin doğru sonuçlar vermeyebileceği bildirilmiştir [88].

2.4.2. Nümerik yöntemler

Isı transfer problemlerinde sonlu farklar [20, 37, 39, 45, 49, 48, 88, 90–100], sonlu elemanlar [101–110] ve sınır elemanlar [111–114] olmak üzere üç ayrı nümerik çözümleme yöntemi vardır. Bounds ve arkadaşları [114] ayrıca sonlu ve sınır elemanlarının karışımından oluşan üç boyutlu bir çözüm yöntemi geliştirmişlerdir. Bu üç yöntemde de deneysel olarak sıcaklıkların ölçülmesi ve kalıp ve döküm metalinin termofiziksel özelliklerinin bilinmesi gerekir.

Sonlu elemanlar ve sınır elemanları çok karmaşık çözümleme yöntemleridir ve yüksek matematik bilgisi gerektirirler. Bunun yanı sıra karmaşık şekilli parçalarda hesaplama yapmak için sonlu farklar yönteminden daha uygundur. Sonlu farklar yöntemi basit geometrilerde kolaylıkla uygulanabilir ve nümerik çözümlemesi kolaydır.

Bu çalışmada tek yönlü soğuma şartlarında uygulanabilmesi, çözümlemenin kolay olması ve yüksek matematik bilgisi gerektirmemesi gibi avantajlarından dolayı sonlu farklar yöntemi kullanılmıştır. Isı transfer probleminin sonlu farklar yöntemi ile çözümü detaylı olarak Bölüm 4’de verilecektir.

2.5. Deneysel Verilerden Elde Edilen Ara Yüzey Isı Transfer Katsayısı Eşitlikleri

Prates ve Biloni [9, 51] soğutucu yüzey pürüzlülüğünün bir fonksiyonu olarak döküm-kalıp ara yüzeyinde sabit bir ısı transfer katsayısı için aşağıdaki eşitliği vermişlerdir.

$$h^2 = CRa^{-n} \quad (2.26)$$

Burada C ve n alaşım ve döküm geometrisine bağlı çözüm sabitleridir. Ra soğutucu yüzey pürüzlülüğü değeridir.

Sun [23] silindirik bir çubuk ile etrafında katılan metal arasında zamana bağlı ısı transfer katsayısının değişimini aşağıdaki eşitlik ile belirlemiştir.

$$h = a + bt \quad (2.27)$$

Burada a ve b sabittir.

Tadayan ve Lewis [24] ara yüzey ısı transfer katsayısı için metalin statik basınç yüksekliğinin doğrusal bir fonksiyonu olarak Sun'a [23] benzer şekilde aşağıdaki deneye dayalı eşitliği vermişlerdir.

$$h = a + bz \quad (2.28)$$

Burada a ve b sabit, z metalin statik basınç yüksekliğidir.

Garcia [28,32] zamanın fonksiyonu olarak döküm-soğutucu arasındaki ısı transfer katsayılarını aşağıdaki deneye dayalı eşitlikle vermiştir.

$$h = C_i (t)^{-n} \quad (2.29)$$

Burada t zaman (s) ve C_i ve n döküm sıcaklığı, alaşım kompozisyonu ve soğutucu malzemesine bağlı sabitler.

2.6. Değişik Döküm-Kalıp Ara Yüzeyinde Ölçülen Isı Transfer Katsayıları

Tek yönlü katılaşma şartlarında yapılan deneyler genel olarak ısı transfer katsayısının ilk birkaç saniyede en yüksek değere ulaştığını ve sonra hızlı bir şekilde düştüğünü ve bu düşüşü takiben de daha yavaş bir düşüş veya düz bir şekilde ilerlediğini göstermiştir [36, 38, 53, 66, 115]. Bazı araştırmacılar da ısı transfer katsayısının başlangıçtan itibaren sürekli düştüğünü bildirmişlerdir [11, 19, 26, 28, 29, 30, 32, 80, 81, 98]. Çizelge 2.1'de alüminyum ve alüminyum alaşımları için geçmişte yapılan araştırmalarda elde edilmiş ara yüzey ısı transfer katsayısı değerleri toplu olarak görülmektedir.

Muojekwu'nun [36] bakır soğutucuya karşı Al-%3Si, Al-%5Si ve Al-%7Si alaşımı için bildirdiği maksimum ısı transfer katsayısı $4000 \text{ W/m}^2\text{K}$ ve çelik soğutucuya karşı Al-%7Si için ise $2100 \text{ W/m}^2\text{K}$ 'dir.

Michel ve arkadaşları [37] ön ısıtılmış çelik kalıp ve saf alüminyum, Al-%6Si ve Al-%13Si maksimum ara yüzey ısı transfer katsayılarını $4773 \text{ W/m}^2\text{K}$ ve $2540 \text{ W/m}^2\text{K}$ aralığında değiştiğini bildirmişlerdir.

Taha ve arkadaşları [26] saf alüminyum, Al-%8Si, Al-%10Si ve Al-%12,6Si alaşımlarının katılaşma yönüne bağlı çelik kalıp ara yüzeyindeki ısı transfer katsayılarını araştırmıştır. Araştırmacılar maksimum ısı transfer katsayısının alaşımın içinde silisyum içeriğinin artmasıyla arttığını ve en yüksek ısı transfer katsayısının da metal ile kalıbın alt duvarı arasında meydana geldiğini bildirmişlerdir. Ötektik Al-Si alaşımı ve kalıbının üst duvarı arasında maksimum ısı transfer katsayısını $4500 \text{ W/m}^2\text{K}$, yan duvarı için $5000 \text{ W/m}^2\text{K}$ ve alt duvarı için de $50000 \text{ W/m}^2\text{K}$ olarak belirlemişlerdir.

Garcia [28, 32, 29] 1010 çeliği ve saf alüminyum, Al-%4.5Cu, Al-%15Cu ve ötektik AlCu alaşımları için ara yüzeyindeki ısı transfer katsayılarını zamanın bir fonksiyonu olarak sırasıyla $2000 \cdot (t)^{-0.17}$, $8650 \cdot (t)^{-0.17}$, $17000 \cdot (t)^{-0.54}$ ve $4900 \cdot (t)^{-0.54} \text{ W/m}^2\text{K}$ olarak hesaplamıştır.

Griffiths [47] su soğutmalı bakır soğutucu ve Al-%7Si alaşımının ortalama ara yüzey ısı transfer katsayısının katılaşma yönüne bağlı olarak 900–7100 W/m²K aralığında değiştiğini bildirmiştir.

Schimdt ve Svensson [117] ve Schimdt [118] düzgün yüzeye sahip kaplamasız kalıplarda ısı transfer katsayısının sıvı faz sırasında 20 000 ila 30 000 W/m²K arasında ölçüldüğünü fakat daha sonra katı kabuk oluşmaya başlayınca ısı transfer katsayısının hızlı bir şekilde düştüğünü açıklamışlardır.

Kayıkçı [4] su soğutmalı bakır soğutucu ve Al-%4,5Cu alaşımı yüzeyinde soğutucu yüzey pürüzlülüğü ve katılaşma yönüne bağlı olarak ortalama ara yüzey ısı transfer katsayısını 9300–26800 W/m²K aralığında hesaplamıştır.

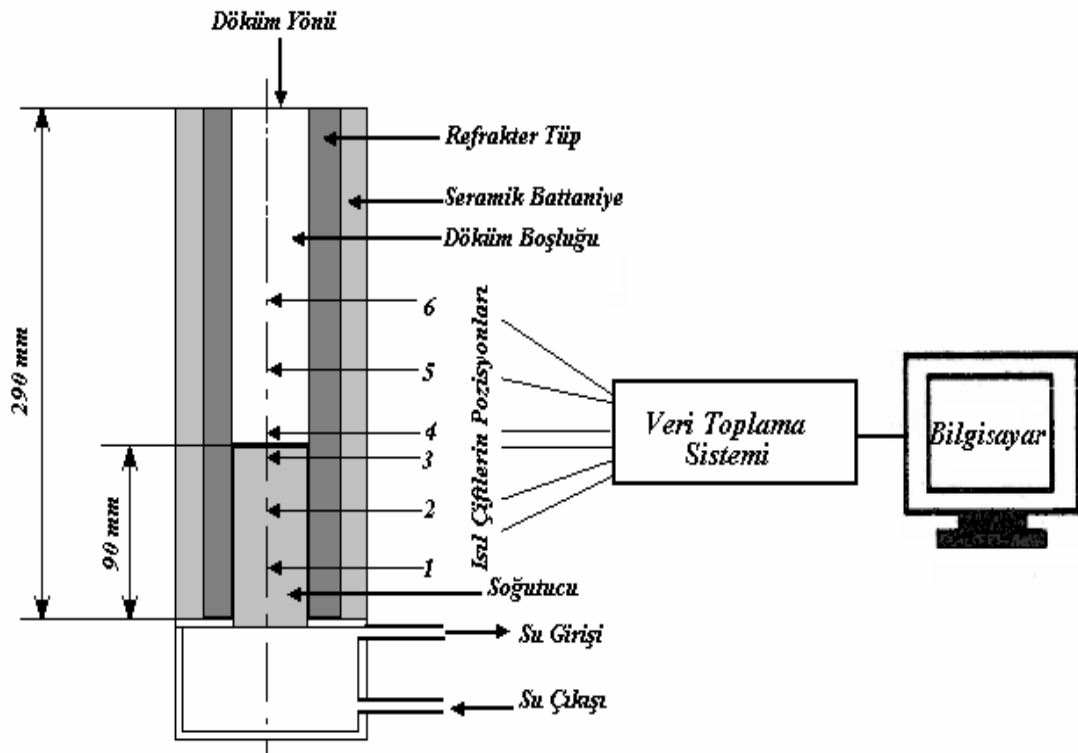
Çizelge 2.1. Kalıp-Al ve Al alaşımları arasındaki geçmişte belirlenmiş ara yüzey ısı transfer katsayıları

Araştırmacı(lar)	Döküm Malzemesi		Kalıp	Katılma Yönü	Isı Transfer Katsayısı (W/m ² K)	
					Maksimum	Minimum
Michel[37]	Saf Al Al-%6Si Al-%13Si		Çelik (200°C)	Yan	2540 4773 4590	- - -
Woodbury[45]	A356		Kum Kalıp	Üst Alt	300 150	70 50
Hwang[88]	A356		Kum Kalıp	Yan	712	210
Muojekwu[36]	Al-%3, 5, 7Si Al-% 7Si		Bakır D. Demir, Çelik	Üst Üst	4 000 2 100	500 500
Ho ve Pehlke[5]	Saf Al Saf Al Al-%5Cu Al-%5Cu		Bakır	Üst Alt Üst Alt	2 200 5 000 1 500 2 800	200 1 000 100 1200
Lee [3,2]	Saf Al A356 Al-Si%12.6		SKD61 (Çelik)	Yan	2 600 2 700 2 600	200 100 200
Taha [26]	Al-%12.6Si		Çelik	Üst Yan Alt	4 500 5 000 50 000	300 300 3 000
Krishnan [38]	Al-%11.49Si		Dökme Demir	Alt Üst	3 000 2 000	200 100
Hallam [81]	Al-%13Si		H13 (Çelik) Bakır	Alt	18 000 21 000	2 000 10 000
Martorona [116]	Al-%8Sn	Döküm Sıcaklığı 1270°C	Bakır	Alt	8000	1000
Griffiths [47]	Al-%7Si		Bakır	Üst Yan Alt	3 400 5 000 7 100	500 900 900
Garcia [31]	Al-%7Si Al-%5Si Al-%3Si		Paslanmaz Çelik	Alt Alt Alt	3 900 (t) ^{-0.09} 4 500 (t) ^{-0.09} 4 800 (t) ^{-0.09}	
Garcia [28]	Saf Al Al-%4.5Cu Al-%15Cu Al-%33Cu		1010 Çelik	Yan	2 000 (t) ^{-0.17} 8 650 (t) ^{-0.17} 17 000 (t) ^{-0.54} 4 900 (t) ^{-0.54}	
Garcia [29]	Al-%4.5Cu	Döküm Sıcaklığı 655°C 663°C 680°C 709°C	1010 Çelik	Alt	3 500 (t) ^{-0.27} 3 200 (t) ^{-0.27} 2 450 (t) ^{-0.27} 2 400 (t) ^{-0.27}	

3. MATERYAL VE METOT

3.1. Deney Düzeneği

Isı transferinin belirlenmesinde kullanılan döküm ve soğutucu sıcaklıklarının belirlenmesinde kullanılan deney düzeneği Şekil 3.1’de şematik olarak verilmiştir. Çalışmada soğutucu olarak 28 mm çapında ve 90 mm boyunda hazırlanan elektrolitik saflıkta bakır ve sıcak iş takım çeliği (AISI H13) kullanılmıştır. Soğutucuların her birine 1,5 mm çapında ve 14 mm derinliğinde soğutucu yüzeyinden 5 mm, 37,5 mm ve 75 mm mesafelerde ısı çiftlerinin yerleştirileceği üç adet delik delinmiştir.



Şekil 3.1. Isı transferinin belirlenmesinde kullanılan deney düzeneğinin şematik görünümü

Tek yönlü ısı akışını sağlayabilmek amacı ile döküm kalıbı olarak Çizelge 3.1’de özellikleri verilen alümina-silikat seramik malzemeden iç çapı 28 mm kesit kalınlığı 10 mm ve yüksekliği 290 mm olan seramik tüpler

hazırlanmıştır. Seramik tüpler bünyelerindeki nemin tamamen giderilmesi ve dayanımlarını arttırmak amacıyla 1173 K' de 1 saat süre ile sinterleme işlemine tabii tutulmuştur. Daha sonra ara yüzeyden 5 mm, 37,5 mm ve 75 mm mesafelerde olacak şekilde ısı çiftlerin yerleştirileceği delikler açılmıştır.

Tek yönlü ısı akısını sağlamak için seramik tüpün çevresi 20 mm kalınlığında seramik battaniye ile kaplanarak ısı izolasyonu etkinliği artırılmıştır.

Soğutucular Şekil 3.1'de görüldüğü gibi dökümün başlangıcından sonuna kadar 20 litre/dakika debiye sahip oda sıcaklığındaki su ile soğutulmuştur.

Soğutucu-döküm ara yüzeyinden simetrik olarak 5 mm, 37,5 mm ve 75 mm mesafelerdeki sıcaklıklar veri toplama sistemi ile kaydedilmiş ve daha sonra bilgisayara aktarılmıştır. Sıcaklık ölçümünde kalibrasyonları yapılmış 1,5 mm çapında K tipi mineral izoleli ısı çiftler kullanılmıştır.

Çizelge 3.1. Seramik tüp yapımında kullanılan alümina-silikat seramik malzemenin özellikleri (Thermal Ceramics, Product Information, LOD)

Yoğunluk (Kg/m ³)	Çamur halinde	1480
	378 K'de kurutulmuş	860
	1088 K'de 5 saat sinterlenmiş	770
Dayanım (MPa)	1088 K'de 5 saat sinterlenmiş	0,8
Boyutsal Değişim (%)	1088 K'de	-0,2
Isı İletim Katsayısı (W/mK)	473 K'de	0,12
	673 K'de	0,15
	873 K'de	0,17
	1073 K'de	0,21

3.2. Metal Alaşımı, Ergitme ve Döküm İşlemleri

Bu çalışmada döküm alaşımı olarak Çizelge 3.2'de spektral analiz sonuçları verilen ticari ötektik Al-Si (ETIAL-140) alaşımı kullanılmıştır.

Çizelge 3.2. Deneylerde kullanılan ötektik Al-Si (ETIAL140) alaşımının kimyasal bileşimi

Elementler (Ağırlıkça %)							
Al	Si	Fe	Cu	Mg	Ni	Zn	Ti
Gerisi	12,94	0,25	0,04	0,09	<0,01	0,02	0,10

ETIAL–140 ötektik Al-Si alaşımı sıcaklık kontrollü elektrik direnç ocağında grafit potanın içinde ergitilmiştir. Sıvı metalin üzerindeki cüruf temizlendikten sonra sıvı metal 1023 K’ de sıcaklık ölçümüne hazır olan sistemdeki döküm boşluğuna dökülmüştür.

Sıvı metal kalıba dökülür dökülmez ısının kaçışını önlemek amacıyla seramik kalıbın üst yüzeyi seramik battaniye ile izole edilmiştir.

Hesaplamalarda kullanılan döküm alaşımı ve soğutucuların termofiziksel özellikleri Çizelge 3.3’de verilmiştir.

Çizelge 3.3. Hesaplamalarda kullanılan ötektik Al-Si alaşımı ve soğutucuların termofiziksel özellikleri [4,52]

Malzeme		Özgül Isı Kapasitesi (J/KgK)	Yoğunluk (Kg/m ³)	Isı İletim Katsayısı (W/mK)	Ergime Gizli Isısı (J/Kg)
H13 Çelik[52]		$1,04 \cdot 10^{-3} T^2 - 0,81T + 666,9$	$-5,75 \cdot 10^{-5} T^2 - 2,51 \cdot 10^{-1} T + 7793$	$26,85 + 0,00029 \cdot T$	-
Saf Bakır [4]		$351 + 1,11 \cdot 10^{-1} T$	$9095,11 - 0,46292 \cdot T$	$416,51 - 5,874 \cdot 10^{-2} T$	-
Al-%13Si [53]	Sıvı*	1200	2388	$173 + (0,2 \cdot (T - T_K))$	505 530
	Katı**	1180	$2716,3 - 1,92 \cdot 10^{-1} T$	162	

T Sıcaklık (K), *Ergime Sıcaklığı 850 K, **Katılaşma Sıcaklığı 849 K

3.3. Soğutucuların Hazırlanması

Soğutucuların döküm yapılacak yüzeyleri her döküm işleminden önce 24, 60, 280, 400 ve 2400 grit SiC zımpara kullanılarak pürüzlendirildi. Soğutucuların zımparalama işlemi su altında el ile gerçekleştirildi. Zımparalama işlemi biter

bitmez oksitlenmeyi engellemek için yüzeyler alkol ile yıkandı ve kurutuldu. Soğutucuların suya temas eden yüzeyleri yine her dökümden önce 220 grit zımpara ile zımparalanarak bir önceki deneyden kalan oksitlerden arındırıldı.

3.4. Soğutucu ve döküm parçanın yüzey profili ve yüzey pürüzlüğü ölçümleri

Soğutucu ve döküm parça yüzey profili ve yüzey pürüzlülük ölçümleri ORTADOĞU RULMAN SANAYİ AŞ fabrikasında Taylor-Hobson marka Form Talysurf Series 2 (Laser System) model yüzey profil cihazı ile yapıldı. Çapı 28 mm olan soğutucu ve döküm parça yüzeylerinin tam merkez çizgisini kesecek şekilde yüzey profil ölçümü yapıldı. Yüzey pürüzlülük (R_a) ölçümleri merkez çizgisi üzerinde 2,5 mm uzunluğunda birbirini takip eden 11 ayrı ölçümün ortalaması dikkate alınarak belirlenmiştir.

3.5. Metalografik İncelemeler İçin Numunelerin Hazırlanması

Döküm ve soğutucu yüzey fotoğrafları tarayıcıda 2400 çözünürlükte bire bir taranarak bilgisayar ortamına alındı.

Dökümlerin soğutucuya temas eden yüzeyleri makroskobik ve mikroskobik çalışmalar için Struers marka ultrasonik yüzey temizleme cihazında alkol içinde 1 saat temizlendi.

Dökümlerin dikey kesitten alınan numunelerin yüzeyleri önce 800 ve 1200 grit zımpara ile hazırlandı. Zımparalama işleminden sonra numuneler 3 μ m elmas pasta sürülmüş keçe üzerinde parlatıldı ve takiben %0,5 HF + 99,5 saf su karışımı ile dağlama, su ile yıkama, alkol ile temizleme ve sıcak hava ile kurutma işlemine tabi tutuldu.

Makro ve mikro yapı görüntüleri Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Malzeme Bilimi Eğitimi Anabilim Dalı laboratuvarlarında bulunan dijital kamera bağlantılı Prior marka optik mikroskopta elde edilmiştir.

4. ARA YÜZEY ISI TRANSFERİNİN BELİRLENMESİ

4.1. Ara Yüzey Isı Transfer Katsayısı ve Isı Transferinin Tek Boyutlu Düzlemde Genel Denklemi

Bölüm 3.1’de detaylı olarak açıklandığı gibi yeterli izolasyonu yapılan soğutucu ve döküm parçada ısı transferinin zamana bağlı ve tek boyutlu olarak aşağıdaki matematik modele göre çözümü yapılmıştır.

Sıvı metalin kalıp ile teması, katılaşma ve soğuma süresi boyunca döküm metalinden kalıba ısı akışı gerçekleşir. Döküm parça ve soğutucunun her ikisinde de ısı akısı ara yüzey ve ara yüzeyi takip eden ilk düğüm noktalarındaki sıcaklık farkları ($\Delta T = T_m - T_{m-1}$) ile aşağıdaki formül yardımıyla hesaplanır.

$$q = -k \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (4.1)$$

Metal-kalıp ara yüzeyinden ısı akısı ortalama bir metal-kalıp ara yüzey ısı transfer katsayısı, h (W/m^2K), ile tanımlanabilir. Bu ara yüzey ısı transfer katsayısı aşağıdaki Eş. 4.2 ile verilebilir.

$$h = \frac{q}{(T_C - T_M)} \quad (4.2)$$

Burada q metal-kalıp ara yüzeyinden geçen ortalama ısı akısı, T_C ve T_M sırasıyla döküm metal yüzeyinde ve kalıp yüzeyinde hesaplanan yüzey sıcaklıklarıdır.

Katılaşma esnasında oluşan ara yüzey ısı transfer katsayısı sonlu farklar yöntemi kullanılarak hesaplanmıştır. Bu yöntemde bilinmeyen sıcaklıkları

belirlemek için deneysel olarak ölçülen zamana bağlı sıcaklık verileri sınır şartları olarak kullanılmıştır.

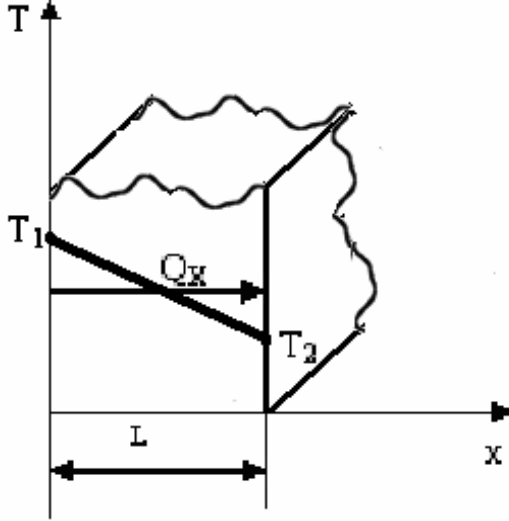
4.2. İletimle Isı Transferi

Madde alışverişi olmaksızın sadece sıcaklık farkından dolayı meydana gelen enerji transferi ısı transferi olarak bilinir. Isı sıcak bir sistemden soğuk bir sisteme doğru kendiliğinden akar. Sıcak sistemden soğuk sisteme doğru ısıнын transferi iletim, taşınım ve ışıınım olmak üzere üç temel ısı transfer mekanizmaları ile gerçekleşir.

Isının iletim yolu ile transferi katı, sıvı ve gaz maddelerde olabilir. Sıvı ve gazlarda atom ve moleküllerin hareket etmeksizin birbirlerine teması sonucu sıcaklık farkından dolayı meydana gelen ısı iletimi katı maddelere nazaran daha az gerçekleşir. Çünkü katı maddelerde atomlar daha sık yapıda birbirleri ile temas halindedir.

İletim ile ısı transferi rejim halinde ve zamana bağlı olabilir. Döküm proseslerinde ısı transferi hesaplanırken zamana bağlı iletim ile ısı transferi geçerlidir. Fakat zamana bağlı iletimi daha iyi anlamak için rejim halindeki iletimin öncelikle anlaşılması gerekir.

Bir cisimde sıcaklık farkı oluştuğu zaman enerji transferi yüksek sıcaklıktan düşük sıcaklığa doğru olacaktır. Eğer sıcaklık zamanla değişmezse sistem rejim halindedir. Tek boyutlu düzlem duvarda iletim ile ısı transferi Şekil 4.1’de görülmektedir. Eş. 4.3’de görüldüğü gibi L boyunca geçen ısı miktarı sıcaklık farkı ile orantılıdır.



Şekil 4.1. Tek boyutlu ısı iletimi

$$\dot{Q} = kA \frac{(T_1 - T_2)}{L} \quad (4.3)$$

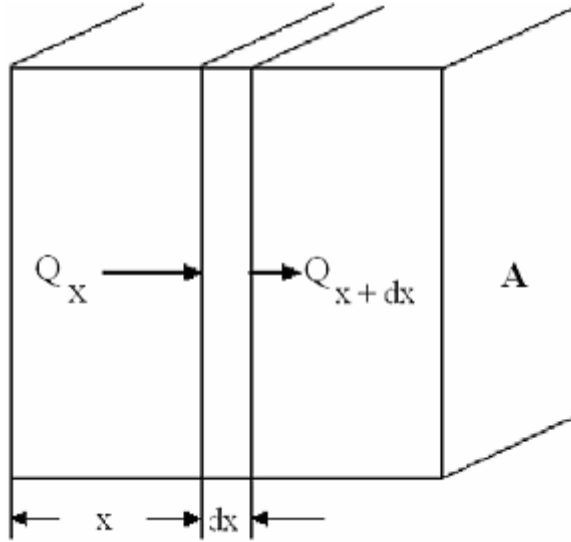
Eş. 4.3'de $\dot{Q}$ ısı enerjisi, A alan ve k malzemenin ısı iletim katsayısıdır. Sabit rejimde iki duvar arasındaki sıcaklık farkı doğrusaldır. Birim alandan birim zamanda geçen ısıya ısı akısı ($\dot{q}$) denir ve Eş. 4.4'deki gibi yazılır.

$$\dot{q} = -k \frac{\partial T}{\partial x} \quad (4.4)$$

Burada $(\partial T / \partial x)$ ısı akış yönündeki sıcaklık gradyantıdır. Eşitlikte (-) işareti ısı transferi düşük sıcaklığa doğru olduğundan geçen ısı miktarını pozitif yapmak için kullanılmıştır. Bu eşitlik "*Fourier ısı iletim kanunu*" olarak bilinir.

Bir sistemde, ısı transferi esnasında herhangi bir noktadaki sıcaklık zamanla değişiyor ise, bu ısı transferine zamana bağlı ısı transferi denir.

Şekil 4.2'de birim hacimden ($dV=A \cdot dx$) çıkan enerji ile iç enerji değişiminin toplamı giren enerjiye eşittir.



Şekil 4.2. Tek boyutlu zamana bağlı ısı iletimi

$$\left(\begin{array}{l} \text{Birim} \cdot \text{zamanda} \\ \text{birim} \cdot \text{hacime} \cdot \\ \text{giren} \cdot \text{enerji} \end{array} \right) + \left(\begin{array}{l} \text{Birim} \cdot \text{zamanda} \\ \text{birim} \cdot \text{hacimde} \cdot \\ \text{üretilen} \cdot \text{enerji} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{l} \text{Birim} \cdot \text{zamanda} \\ \text{birim} \cdot \text{hacimde} \cdot \\ \text{iç} \cdot \text{enerji} \cdot \text{deg isimi} \end{array} \right) + \left(\begin{array}{l} \text{Birim} \cdot \text{zamanda} \\ \text{birim} \cdot \text{hacimden} \cdot \\ \text{cikan} \cdot \text{enerji} \end{array} \right)$$

Birim zamanda birim hacimden geçen ısı enerjisi yani giren enerji;

$$Q_x = -kA \frac{\partial T}{\partial x} \quad (4.5)$$

Eş. 4.5'e eşittir. Birim zamanda birim hacimde iç enerji değişimi;

$$\text{İç enerji değişimi} = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} dv \quad (4.6)$$

ile tanımlanır. Birim zamanda birim hacimden çıkan enerji ise Eş. 4.7'ye eşittir.

$$Q_{x+dx} = Q_x + \frac{\partial Q_x}{\partial x} dx + \frac{\partial^2 Q_x}{\partial x^2} \frac{dx^2}{2!} + \frac{\partial^3 Q_x}{\partial x^3} \frac{dx^3}{3!} + \dots \quad (4.7.a)$$

Taylor serisinin ilk iki terimi alınırsa Eş. 4.7.b yazılabilir.

$$Q_{x+dx} = -kA \frac{\partial T}{\partial x} - kA \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} dx \quad (4.7.b)$$

Eş. 4.5, Eş. 4.6 ve Eş. 4.7 yukarıdaki tanıma uygun olarak düzenlenirse;

$$Q_x + q''' dv = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} dv - Q_{x+dx} \quad (4.8.a)$$

$$-kA \frac{\partial T}{\partial x} + q''' A dx = \rho c A \frac{\partial T}{\partial t} dx - kA \frac{\partial T}{\partial x} - kA \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} dx \quad (4.8.b)$$

Eş. 4.8 elde edilir ve eşitlik aşağıdaki gibi sadeleşebilir.

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{q'''}{k} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (4.9)$$

Eş. 4.9 düzlem levhada tek boyutlu zamana bağlı ısı iletiminin genel denklemdir.

4.2.1. Soğutucuda kullanılan ısı iletim denklemi

Soğutucularda döküm sıcaklığı olan 1023 K'de herhangi bir faz dönüşümü olmadığından ($q''' = 0$) tek boyutlu geometrilerde iletim ile zamana bağlı ısı transferi eşitliği (Eş. 4.9) soğutucu için aşağıdaki şekilde tekrar tanımlanabilir.

$$\rho_M c_M \frac{\partial T(x, t)}{\partial t} = k_M \frac{\partial^2 T(x, t)}{\partial x^2} \quad 0 \leq x \leq L, t > 0 \quad (4.10)$$

Burada T (K) sıcaklık, t (s) zaman ve x (m) Cartesian Koordinatı ve k (W/mK) soğutucu malzemenin ısı iletim katsayısı, ρ (kg/m³) yoğunluğu ve c (J/kgK) özgül ısıdır.

4.2.2. Döküm parçada ısı iletim denklemi

Döküm metali sıvı halde kalıba döküldükten sonra faz dönüşümüne uğrar. Döküm parçadaki ısı akısının faz dönüşümleri göz önünde tutularak hesaplanması gerekir.

Sıvı kalıba döküldükten sonra döküm sıcaklığından katılaşma sıcaklığına kadar sıvı fazda kalır. Daha sonra katılaşma aralığında sıvı ve katı fazlar sıcaklığa bağlı olarak belirli oranlarda bulunurlar. Katılaşma tamamlandıktan sonra döküm metali katı faza geçer. Döküm parçada ısı akısı modellenirken faz dönüşümleri göz önünde tutulmuştur.

Sıvı ve katı fazlarda ısı üretimi olmadığından bu fazlar için ısı akısı sırasıyla Eş. 4.11 ve Eş. 4.12'e göre hesaplanmıştır.

$$\rho_{C_s} c_{C_s} \frac{\partial T(x,t)}{\partial t} = k_{C_s} \frac{\partial^2 T(x,t)}{\partial x^2} \quad 0 \leq x \leq L, \quad t > 0 \quad (4.11)$$

$$\rho_{C_k} c_{C_k} \frac{\partial T(x,t)}{\partial t} = k_{C_k} \frac{\partial^2 T(x,t)}{\partial x^2} \quad 0 \leq x \leq L, \quad t > 0 \quad (4.12)$$

Burada k_{C_s} (W/mK) ve k_{C_k} (W/mK) sırasıyla döküm metalinin sıvı ve katı fazlar için ısı iletim katsayısı, ρ_{C_s} (kg/m³) ve ρ_{C_k} (kg/m³) sıvı ve katı fazlar için yoğunluğu ve c_{C_s} (J/kgK) ve c_{C_k} (J/kgK) sıvı ve katı fazlar için özgül ısıdır.

Döküm sıvı fazdan metali katı faza geçerken ergime gizli ısınıyı bırakır ve ısı üretimi meydana gelir. Isı iletim denkleminin sağ tarafına q''' terimi yazılarak ısı üretimi ilave edilir ve katılaşılan metal için ısı transfer denklemi aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\rho_{C_{YK}} c_{C_{YK}} \frac{\partial T(x,t)}{\partial t} = k_{C_{YK}} \frac{\partial^2 T(x,t)}{\partial x^2} + q''' \quad (4.13)$$

Burada q''' (W/m³) terimi metalin sıvı fazdan katı faza geçerken ergime gizli ısınıyı bırakması sonucu üretilen ısıdır ve Eş. 4.14 ile belirlenir.

$$q''' = \rho l \frac{\partial f_s}{\partial t} \quad (4.14)$$

Burada l (J/kg) ergime gizli ısı ve f_s katı oranıdır. f_s terimi ötektik ve saf döküm metali için Eş. 4.15 ile hesaplanır.

$$f_s = \left(\frac{T_l - T}{T_l - T_s} \right) \quad (4.15)$$

Eş. 4.15'in T terimine göre türevi $\frac{df_s}{dt}$ yazılabilir. Eş. 4.14'de yerine konulacak şekilde aşağıdaki gibi Eş. 4.16 yazılabilir.

$$\frac{\partial f_s}{\partial t} = \frac{\partial f_s}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (4.16)$$

Eş. 4.14'de Eş. 4.16 yerine konulursa Eş. 4.17 yazılır.

$$q''' = \rho l \frac{\partial f_s}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (4.17)$$

Eş. 4.17 Eş. 4.13'da yerine konulursa Eş. 4.18 elde edilir.

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \rho l \frac{\partial f_s}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (4.18)$$

Eş. 4.18 düzenlendiğinde Eş. 4.19 elde edilir.

$$\rho \left(c - l \frac{\partial f_s}{\partial T} \right) \frac{\partial T}{\partial t} = k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (4.19)$$

Eş. 4.19 da $c' = c - l \frac{\partial f_s}{\partial T}$ döküm metalinin katılaşması süresince ortalama özgül ısı olarak alınabilir ve eşitlik tekrar aşağıdaki gibi düzenlenebilir.

$$\rho_{YK} c' \frac{\partial T(x,t)}{\partial t} = k_{YK} \frac{\partial^2 T(x,t)}{\partial x^2} \quad 0 \leq x \leq L, \quad t > 0 \quad (4.20)$$

Eş. 4.20 döküm parçanın yarı katı durumundaki sıcaklıkların belirlenmesi için kullanılmıştır.

4.3. Sonlu Fark Çözümü

Sonlu farklar, $x = x_0$ noktasında $F_{(x)}$ fonksiyonunun türevi ile tanımlanır [119]. Bir fonksiyonun x_0 noktasındaki türevi;

$$\frac{\partial F}{\partial x} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{F(x_0 + \Delta x) - F(x_0)}{\Delta x} \quad (4.21)$$

şeklindedir. x_0 noktasından ileri ve geriye doğru “Taylor” serisi açıldığında,

$$f(x_0 + \Delta x) = f(x_0) + \left. \frac{df}{dx} \right|_0 \Delta x + \left. \frac{d^2 f}{dx^2} \right|_0 \frac{(\Delta x)^2}{2!} + \left. \frac{d^3 f}{dx^3} \right|_0 \frac{(\Delta x)^3}{3!} + \dots \quad (4.22)$$

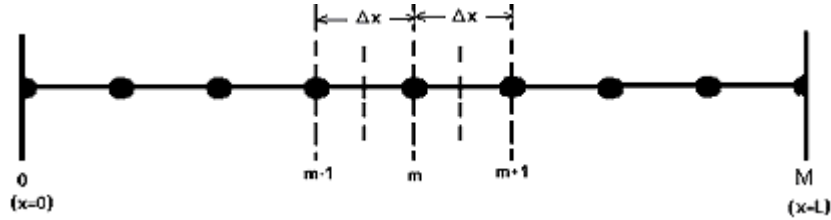
$$f(x_0 - \Delta x) = f(x_0) - \left. \frac{df}{dx} \right|_0 \Delta x + \left. \frac{d^2 f}{dx^2} \right|_0 \frac{(\Delta x)^2}{2!} - \left. \frac{d^3 f}{dx^3} \right|_0 \frac{(\Delta x)^3}{3!} + \dots \quad (4.23)$$

x_0 noktasında $F_{(x)}$ fonksiyonunun birinci türevi aynı zamanda merkezi sonlu farklar yaklaşımını da verir. Bu değer aşağıdaki şekilde elde edilir.

$$\left. \frac{df}{dx} \right|_0 = \frac{f(x_0 + \Delta x) - f(x_0 - \Delta x)}{2\Delta x} - O(\Delta x)^2 \quad (4.24)$$

Burada; $O(\Delta x)^2 \equiv \frac{(\Delta x)^2}{6} f'''(x_0) + \frac{(\Delta x)^4}{120} f''''(x_0) + \dots$ hata miktarıdır ve ihmal edilebilir mertebededir.

Sonlu Farklar Yönteminde referans noktası genelde düğüm noktası olarak adlandırılır ve bu noktaların tümüne ağ denir. Analitik çözümde bir bölgenin tümünde sıcaklık belirlenirken, sayısal çözümde sıcaklık sadece belirlenen düğüm noktalarında bulunur. Sayısal çözümün hassaslığı seçilen düğüm noktalarının sayısına bağlıdır ve bu sayı ne kadar büyükse (aralıklar o kadar sıktır) çözümü de o kadar hassastır [90,119–121]. Aşağıdaki Şekil 4.3’de bir boyutlu düzlem geometrilerdeki çözümler için numaralandırılmış düğüm noktaları görülmektedir ve x yönü, m indisi ile gösterilmektedir.



Şekil 4.3. Tek boyutlu düzlem geometrilerde sonlu fark düğüm noktaları

Kısmi diferansiyel denklem $\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$ ikinci türev; m düğüm noktasındaki sonlu fark değeri yaklaşık olarak,

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \Big|_m \approx \frac{\frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{m+\frac{1}{2}} - \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{m-\frac{1}{2}}}{\Delta x} \quad (4.25)$$

biçiminde gösterilebilir. $\frac{\partial T}{\partial x}$ sıcaklık gradyanı düğüm noktası sıcaklıklarının fonksiyonu olarak yazılabilir.

$$\frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{m+\frac{1}{2}} \approx \frac{T_{m+1} - T_m}{\Delta x} \quad (4.26)$$

$$\frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{m-\frac{1}{2}} \approx \frac{T_m - T_{m-1}}{\Delta x} \quad (4.27)$$

Eş. 4.26 ve Eş. 4.27'i, Eş. 4.25'de yerine konursa;

$$\left. \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right|_m \approx \frac{\frac{T_{m+1} - T_m}{\Delta x} - \frac{T_m - T_{m-1}}{\Delta x}}{\Delta x} = \frac{T_{m+1} + T_{m-1} - 2T_m}{(\Delta x)^2} \quad (4.28)$$

Eş. 4.28 elde edilir.

Zamana bağlı ısı iletimi problemlerinde kullanılan Açık (Explicit) yaklaşımı için t (s) toplam zaman Eş. 4.29 ile verilir. Burada; p zaman adımı olarak kullanılır ve tamsayıdır, Δt (s) zaman aralığıdır.

$$t = p\Delta t \quad (4.29)$$

Eş. 4.20'deki zaman türevi sonlu farklar olarak Eş. 4.30 ile verilebilir.

$$\left. \frac{\partial T}{\partial t} \right|_m \approx \frac{T_m^{p+1} - T_m^p}{\Delta t} \quad (4.30)$$

Bu eşitlikte üst indis p , T 'nin zamana bağıllığını göstermektedir ve zaman türevi hesaplanan $(p+1)$ ve hesaplanandan bir önceki (p) zamana ait sıcaklıkların farkı ile ilişkilidir. Hesaplamalarla her Δt zaman aralığı için yeni T sıcaklıkları bulunabilir.

$$\frac{T_m^{p+1} + T_{m-1}^p - 2T_m^p}{(\Delta x)^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{T_m^{p+1} - T_m^p}{\Delta t} \quad (4.31)$$

Eş. 4.20'deki $\alpha = \frac{k}{\rho c}$ terimi ısı yayılım katsayısıdır (m^2/s).

Fourier sayısı, $Fo = \frac{\alpha \Delta t}{(\Delta x^2)}$ 'dır ve Eş. 4.31 düzenlenirse;

$$T^{p+1}_{(m)} = T^p_{(m)}(1 - 2Fo) + Fo(T^p_{(m+1)} + T^p_{(m-1)}) \quad (4.32)$$

şeklinde yazılır. Eş. 4.32 ile verilen yöntem Açık (Explicit) yaklaşım olarak isimlendirilir [119]. Bu yöntemde bir sonraki adımdaki sıcaklıklar, sadece bir önceki adımdaki sıcaklıklara bağlıdır. $T = 0$ ($p=0$) için düğüm noktalarındaki sıcaklıklar başlangıç koşullarından belirlenmektedir. Böylece $t=\Delta t(p=1)$ 'deki sıcaklıklar Eş. 4.32 kullanarak hesaplanabilir. Bu sıcaklıklar bulunduğundan sonra aynı işlemler $t=\Delta t(p=2)$ 'deki sıcaklıkları bulmak için tekrarlanır. Böylece çözüme adım adım ilerleyerek ulaşılır.

Sonlu-fark çözümünün hassaslığı Δx ve Δt değerleri azaltılarak artırılabilir. Doğal olarak, iç düğüm noktalarının sayısı, Δx küçüldükçe artar. Ayrıca çözümü elde etmek için gereken zaman adımlarının sayısı, Δt küçüldükçe artar. Böylece, hesaplama süresi Δx ve Δt 'nin küçülmeleri ile artar. Δx 'in seçimi hassaslık ve hesaplama süresi arasında bir dengeye göre yapılır. Δx bir kez belirlendikten sonra Δt bağımsız olarak seçilemez. Δt 'nin değeri yakınsama koşulundan bulunur. Eş. 4.32'da bir boyutlu geometride iç düğüm noktası için, $(1-2Fo) \geq 0$ olması gerekir. Başka bir deyişle,

$$Fo \leq \frac{1}{2} \quad (4.33)$$

şeklinde yazılabilir. Bu kıstas, Δx ve α 'nın verilen değerleri için Δt 'nin alabileceği en büyük değeri bulmakta kullanılır.

4. 4. Sınır Şartları ve Çözüm

Bu çalışmada başlangıç sıcaklıkları ve sınır şartları aşağıdaki gibi seçilmiştir.

$$T(x, 0) = T_i \quad (x) \quad t = 0 \quad (4.34)$$

$$T(-x_l, t) = T_m \quad -x_l = L, t \geq 0 \quad (4.35)$$

$$T(x_l, t) = T_m \quad x_l = L, t \geq 0 \quad (4.36)$$

Döküm-soğutucu ara yüzeyden $L=75$ mm mesafelerde simetrik olarak yerleştirilmiş iki ısı çiftten deneysel çalışmalar sırasında ölçülerek belirlenmiş sıcaklıklar (T_i ve T_m) sınır şartları olarak kullanılmıştır.

Döküm-soğutucu ara yüzeyinden 75 mm mesafedeki ısı çiftlerden kaydedilen ilk sıcaklıklar döküm ve soğutucuda $t = 0$ zamanında, Eş. 4.34, başlangıç sıcaklığı olarak kullanılmıştır. Sonlu fark hesaplamalarında ısı çiftlerden ölçülen sıcaklıklar daha sonraki zaman adımlarında sınır şartı olarak kullanılmıştır, Eş. 4.35, Eş. 4.36. Döküm ve kalıp yüzeylerinde yüzey sıcaklıkları yüzeyin her yerinde aynı olduğu varsayılarak ara yüzeyde sınır şartları olarak belirlenmiştir. Her 0,5 s' de sıcaklıklar ısı çiftlerden okunan sıcaklıklar olarak yeniden tanımlanmıştır.

Soğutucu ve döküm parçada ara yüzeyden 5 mm mesafede ısı çiftlerle ölçülen sıcaklıklar aynı noktada hesaplanan sıcaklıklarla hesaplanan sıcaklıklardaki sapmaları önlemek için karşılaştırılmışlardır. Tahmin edilen döküm parça ve soğutucu ara yüzey sıcaklıkları modife edilmiş ve sıcaklık farkı $\pm 0,1$ K oluncaya kadar sonlu fark hesaplamalarına devam edilmiştir.

Bu yolla, ara yüzeyde döküm ve soğutucunun yüzey sıcaklıkları da dahil olmak üzere tüm düğüm noktalarındaki sıcaklıklar belirlenmiştir.

5. DENEYSEL SONUÇLAR

5.1. Soğutucu ve Döküm Parça Yüzey Pürüzlülük Değerleri

5.1.1. Soğutucu yüzey pürüzlülük değerleri

Isı transferi deneylerinde kullanılan H13 çelik ve bakır soğutucuların yüzeylerinde değişik yüzey pürüzlülük değerleri elde etmek için kullanılan 24, 60, 280, 400 ve 2400 grit silisyum-karbür zımparalarında çelik ve bakır soğutucu için elde edilen pürüzlülük değerleri (R_a) Çizelge 5.1’de verilmiştir.

Çizelge 5.1. Deneylerde kullanılan H13 çelik ve bakır soğutucuların yüzey pürüzlülük değerleri

Zımpara		2400	400	280	60	24
R _a (µm)	H13 Çelik	0,02	0,15	0,22	2,47	3,44
	Bakır	0,04	0,34	0,45	4,20	9,43

Bakır soğutucuların yüzey pürüzlülük değerleri aynı grit değerlerine sahip SiC zımparalar ile pürüzlendirilen H13 çelik soğutucuların yüzey pürüzlülük değerlerinden genel olarak yaklaşık iki kat daha yüksektir, ancak en yüksek yüzey pürüzlülüğüne sahip 24 grit zımpara ile hazırlanan bakır ve çelik soğutucu yüzeylerinde bu fark yaklaşık üç kattır.

5.1.2. Döküm parça yüzey pürüzlülük değerleri

H13 çelik soğutuculara karşı dökülen numunelerin yüzeylerinden ölçülen pürüzlülük değerleri ve bu değerlerin ortalamaları Çizelge 5.2’de verilmiştir. Genel olarak R_a değerleri 1,66 – 9,45 μm arasında dağılım göstermektedir.

Döküm parçaların yüzeylerinden ölçülen pürüzlülük değerleri bu dökümlerde kullanılan soğutucuların yüzeyinden ölçülen pürüzlülük değerlerine benzememekte ve döküm yüzey pürüzlülük değerleri soğutucu yüzeylerinden ölçülen değişkenliği yansıtmamaktadır. Örneğin, 2400 zımparadan 60

zımparaya kadar soğutucu yüzey pürüzlülüğü yaklaşık 120 kat değişmesine rağmen bu yüzeylere karşı katılan döküm yüzeylerinden ölçülen pürüzlülük değerleri arasında kayda değer bir fark görülmemiştir. Ancak en yüksek pürüzlülük değerine sahip 24 numaralı zımpara ile hazırlanan soğutucu yüzeyinde katılan dökümlerden ölçülen yüzey pürüzlülük değerleri bütün diğer dökümlerin ortalama pürüzlülük değerlerinin yaklaşık üç katından fazla pürüzlülük değerleri vermektedir.

Çizelge 5.2. H13 çelik soğutucuya karşı elde edilen dökümlerin yüzey pürüzlülük değerleri

Zımpara		2400 $R_a=0,02$	400 $R_a=0,15$	280 $R_a=0,22$	60 $R_a=2,47$	24 $R_a=3,44$
R_a (μm)	a	1,30	3,09	4,42	2,94	9,10
	b	2,01	3,88	4,29	2,75	9,80
	Ort	1,66	3,49	4,36	2,85	9,45

Bakır soğutuculara karşı dökülen numunelerin yüzeylerinden ölçülen pürüzlülük değerleri ve bu değerlerin ortalamaları Çizelge 5.3'de verilmiştir. Bu çizelgeden görüleceği üzere döküm yüzeylerinden ölçülen pürüzlülük değerleri arasında önemli bir fark görülmemekte ve genel olarak R_a değerleri 2,12 – 3,48 μm arasında dağılım göstermektedir.

Çizelge 5.3. Bakır soğutucuya karşı dökülen dökümlerin yüzey pürüzlülük değerleri

Zımpara		2400 $R_a=0,04$	400 $R_a=0,34$	280 $R_a=0,45$	60 $R_a=4,20$	24 $R_a=9,43$
R_a (μm)	a	2,63	2,64	2,59	2,67	3,80
	b	1,60	2,09	2,56	2,80	3,15
	Ort	2,12	2,37	2,58	2,74	3,48

Bakır soğutuculara karşı dökülen numunelerin yüzeylerinden ölçülen pürüzlülük değerleri 2400 ve 60 grit zımpara pürüzlülük aralığında birbirine çok yakın bulunmuştur. 24 grit zımpara pürüzlülüğünde elde edilen döküm yüzey pürüzlülüğü ise yaklaşık olarak 1 μm daha yüksek ölçülmüştür. Nispeten düşük yüzey pürüzlülüğüne sahip soğutucu yüzeylerinden elde edilen döküm yüzeylerinin pürüzlülük değerleri soğutucuların pürüzlülük

değerlerinden daha yüksek çıkarken 60 ve 24 grit zımpara ile pürüzlendirilen soğutuculara karşı elde edilen döküm yüzeyleri soğutucu yüzeylerinden daha az pürüzlü bulunmuştur.

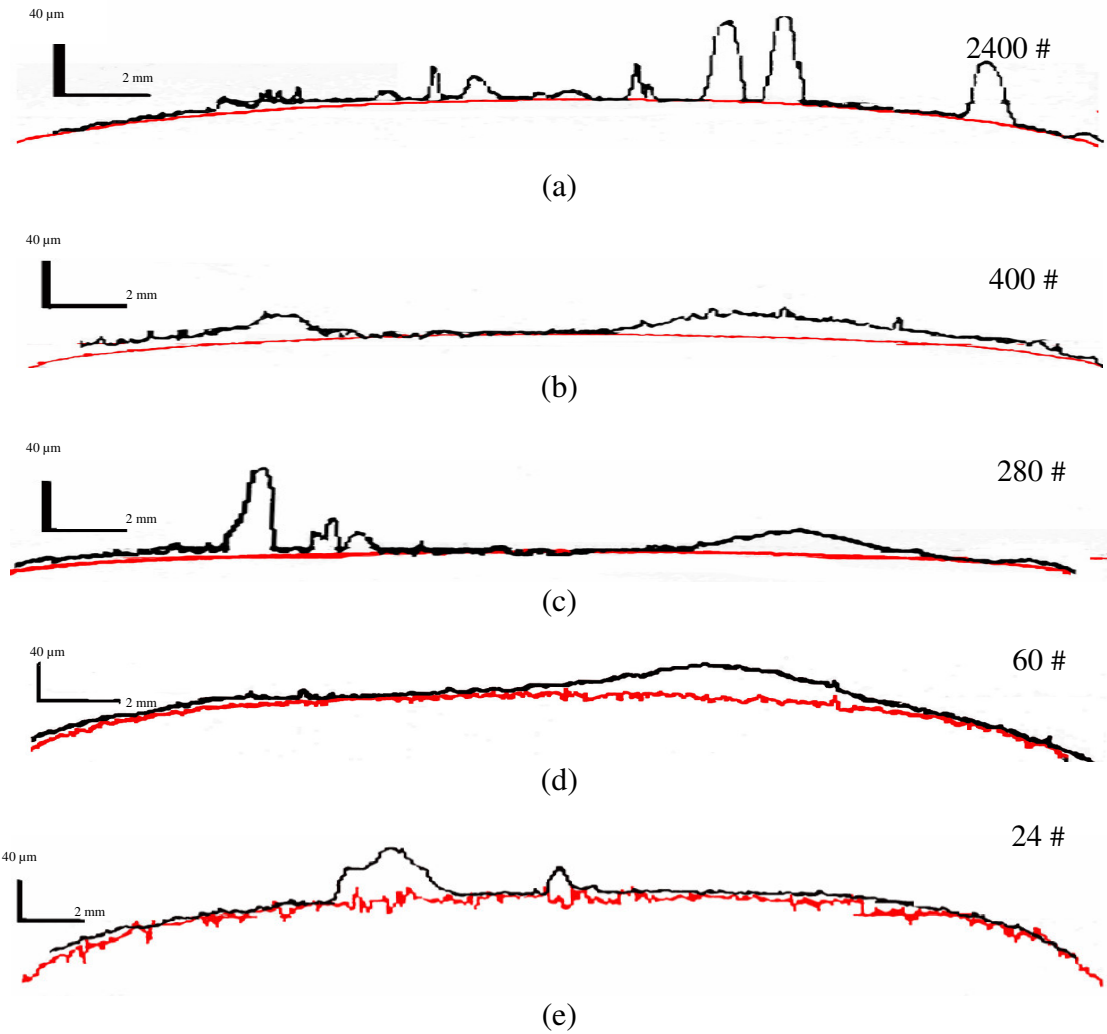
5.2. Soğutucu ve Döküm Yüzey Profilleri

H13 çelik soğutuculardan ve bu soğutuculara karşı katılaştıran dökümlerin soğutuculara temas eden yüzeylerinden alınan yüzey profilleri üst üste çakıştırılarak Şekil 5.1’de verilmiştir. Yüzey profilleri incelendiğinde soğutucu yüzeyinin merkezden dış bölgelerine doğru artarak aşındığı ve dış bükey oluşturduğu görülmektedir. Bu dış bükeyin boyutları merkeze göre kenarda düşük pürüzlülük değerli yüzeyden yüksek pürüzlük değerli yüzeye göre artarak yaklaşık 5-25 μm arasında değiştiği görülmektedir. Şekil 5.1’den görüldüğü üzere döküm yüzey profilleri soğutucu yüzey profilleri ile benzeşmekte ve her iki profilin üst üste çakıştırılması makro seviyede bir boşluk olmadığını göstermektedir.

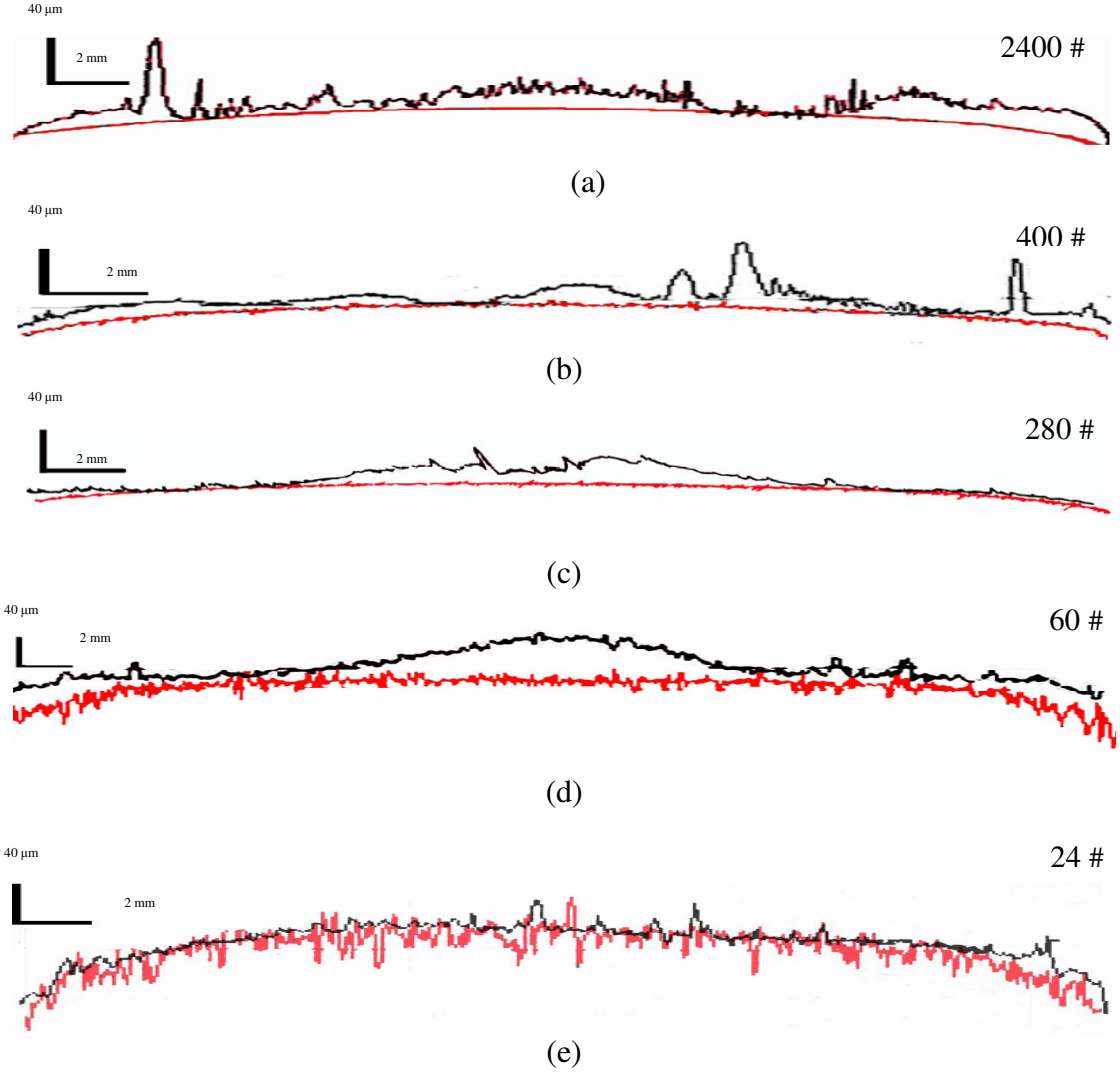
Döküm yüzey profillerinde döküm eksenini yönünde soğutucu yüzeyine dik olarak oluşan bazı boşlukların oluştuğu gözlenmektedir. Bu tür girintilerin boyut ve görülme sıklığı bakımından 2400 grit zımpara ile pürüzlendirilmiş soğutucu yüzeyine karşı yapılan dökümlerde daha belirgin olduğu görülmektedir. Buna karşılık, 60, 280 ve 400 grit zımpara ile pürüzlendirilmiş soğutucu yüzeylerinden elde edilen döküm yüzey profilleri ise birbirine benzer karakteristiktir. Bu döküm yüzeylerinde şekilde de görüldüğü gibi 2400 zımpara ile pürüzlendirilmiş soğutucuya karşı elde edilen döküm yüzeyinde görülen çok sayıda küçük boyutlu girintilerin yerini az sayıda ve daha geniş alan kaplayan ara yüzey boşluklarının aldığı görülmektedir.

Bakır soğutuculardan ve bu soğutuculara karşı soğuyan dökümlerin soğutuculara temas eden yüzeylerinden alınan yüzey profilleri üst üste çakıştırılarak Şekil 5.2’de verilmiştir. Yüzey profilleri incelendiğinde 24 grit zımpara ile pürüzlendirilmiş soğutucuya karşı elde edilen döküm yüzeyi

profilinin aynı zımpara ile hazırlanmış H13 çelik soğutucuya karşı elde edilen yüzey profilinde olduğu gibi iyi bir çakışma sağladığı görülmüştür. 60,280, 400 ve 2400 grit zımpara ile pürüzlendirilmiş soğutucu yüzeyleri ve bu yüzeylere karşı elde edilen döküm yüzey profilleri soğutucu yüzeyleri ile döküm yüzeylerinin yer yer temas halinde olduğunu göstermektedir. Bu temas 60 ve 280 grit zımpara ile pürüzlendirilmiş soğutucu yüzeyine karşı elde edilen döküm yüzeylerinde diğerlerine oranla daha fazla bir alan kaplamaktadır.



Şekil 5.1. a) 2400 grit, b) 400 grit, c) 280 grit, d) 60 grit ve e) 24 grit zımpara ile hazırlanmış H13 çelik soğutucu ve bu yüzeylere dökülmüş döküm numunelerinin birbiri üzerine çakıştırılmış ara yüzey profilleri (siyah döküm kırmızı soğutucu yüzeyi)



Şekil 5.2. a) 2400 grit, b) 400 grit, c) 280 grit, d) 60 grit ve e) 24 grit zımpara ile hazırlanmış bakır soğutucu ve bu yüzeylere dökülmüş döküm numunelerinin birbiri üzerine çakıştırılmış ara yüzey profilleri (siyah döküm kırmızı soğutucu yüzeyi)

Şekil 5.1 ve Şekil 5.2’de görülen birbiri üzerine çakıştırılmış soğutucu ve döküm yüzey profillerinden elde edilen veriler genel olarak H13 çelik soğutuculara karşı elde edilen döküm yüzeylerinin bakır soğutucu yüzeylerine karşı soğuyan döküm yüzeylerine göre daha az dalgalandığı ve temas bakımından daha yüksek temas alanı sağladığını göstermektedir.

5.3. Döküm Yüzeylerinin Metalografik İncelemeleri

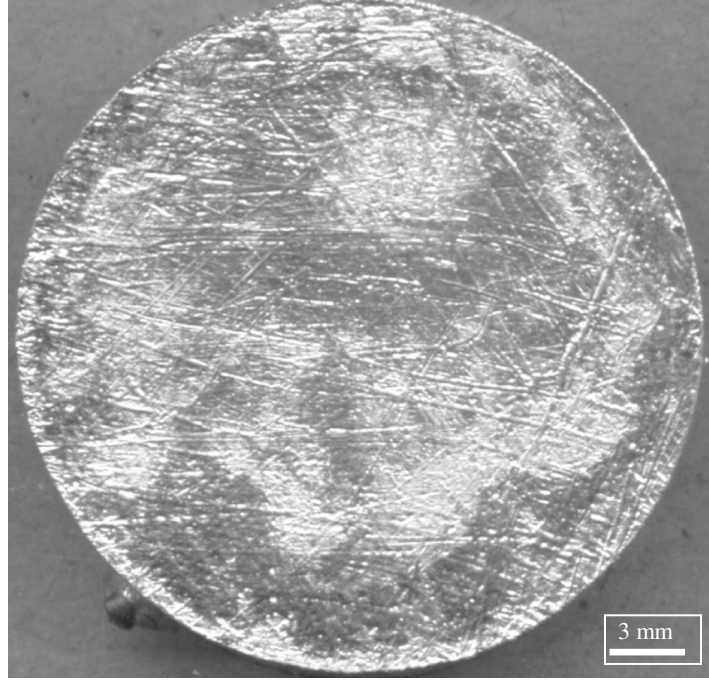
5.3.1. Döküm yüzeylerinin makro yapısı

Döküm numunelerin soğutucu ara yüzeyine gelen yüzeyinden tarama yöntemi ile elde edilen tipik makro yapı görüntüleri döküm yüzeylerinin karşılığı olan bakır ve H13 çelik soğutuculara göre farklı karakteristikler aldığını göstermektedir. Ayrıca soğutucu yüzeylerinin pürüzlülük durumu da döküm yüzeylerinin şekillenmesinde önemli bir rol oynamaktadır.

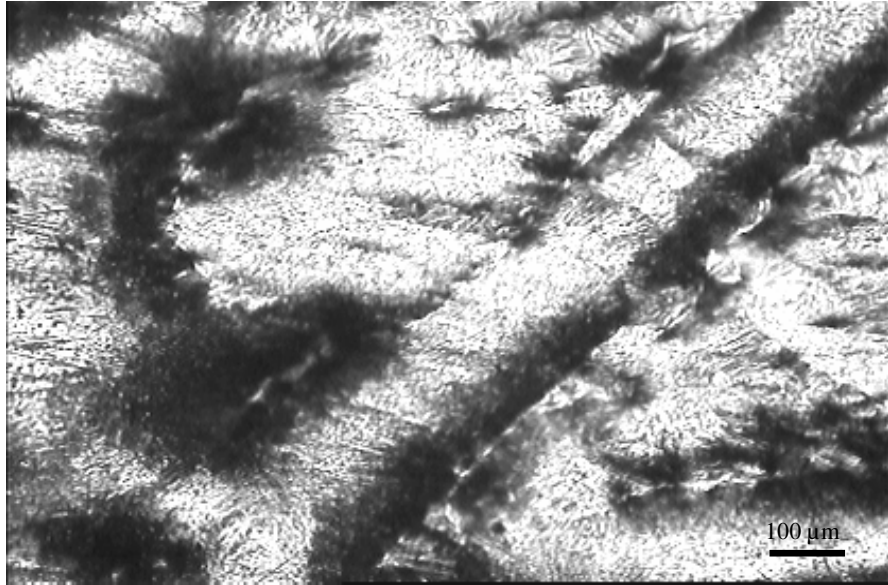
Resim 5.1.a'da gösterilen yüzey 24 grit bakır soğutucuya karşı elde edilmiş döküm yüzeyidir. Şekilden de görüleceği gibi yüzey oldukça iyi bir nominal düzgünlüğe sahiptir. Yüzeyde rasgele doğrultularda görülen kabarık çizgiler döküm alaşımının henüz sıvı halde iken bakır soğutucu yüzeyinde bulunan 24 grit zımpara ile açılmış geniş oyuklara bir miktar girme (penetrasyon) yaptığını göstermektedir.

Resim 5.1.a'da görülen yüzeyin daha büyük ölçekte çekilmiş bir görüntüsü Resim 5.1.b'de gösterilmektedir. Resimde soğutucu üzerindeki oyuklara giren döküm kısımları oldukça net bir şekilde görülebilmektedir.

2400 grit bakır soğutucu yüzeyine karşı dökülmüş tipik bir döküm yüzeyi ise Resim 5.2'de gösterilmiştir. Döküm yüzeyi derin çukurlar ve engebeli bir yapı göstermektedir. Şekil 5.2'de gösterilen yüzey profillerinde görülen dalgalanmalar ile makro yapı resminde görülen yüzey özellikleri birbiri ile uyum göstermektedir. Sıvı metalin bakır soğutucuya çarptığı ilk anda katılaşmaya geçmesi sonucu soğutucu ara yüzeyinde kalan havanın yüzeyden döküm içine doğru genişleşerek kaçmaya çalışması yüzeyde bu tür yapının oluşmasına neden olmuş olabilir.

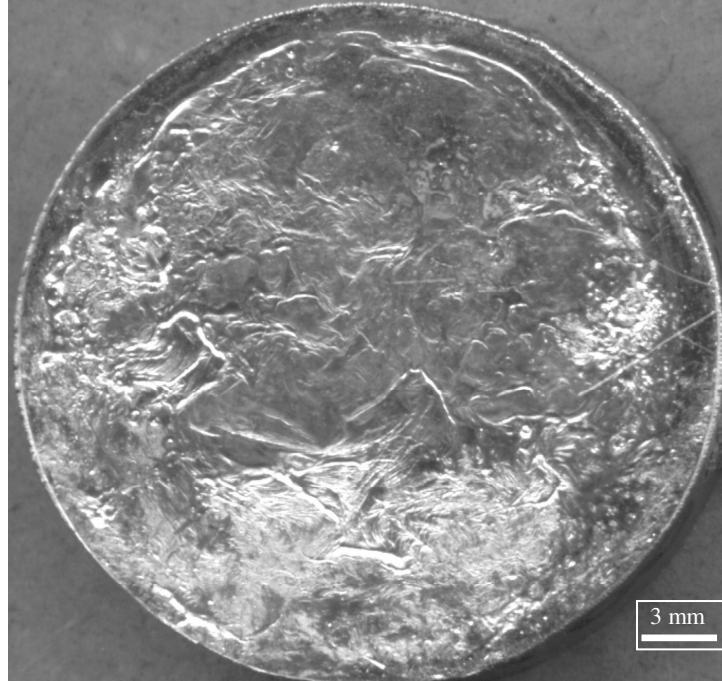


(a)



(b)

Resim 5.1. 24 grit bakır soğutucuya karşı elde edilmiş döküm yüzeyleri

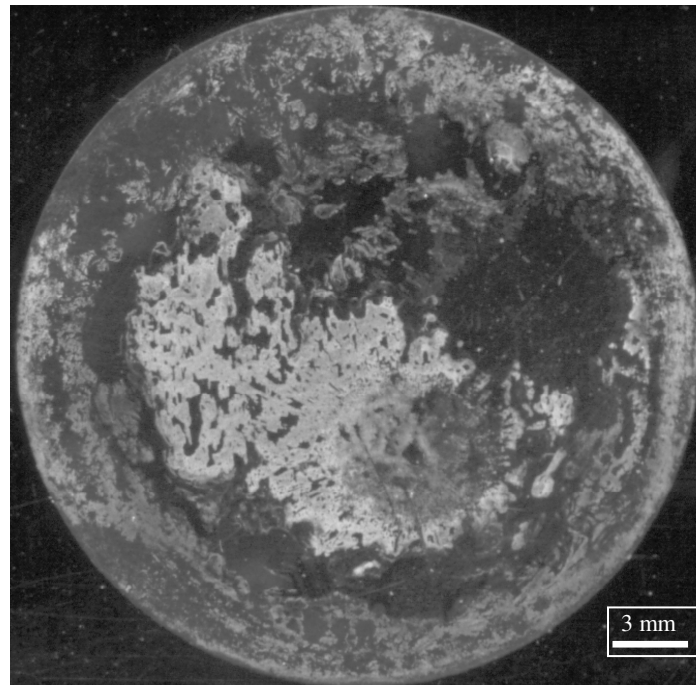


Resim 5.2. 2400 grit bakır soğutucuya karşı elde edilmiş döküm yüzeyi

2400 grit zımpara ile hazırlanan H13 çelik soğutucu yüzeyinin dökümden sonra alınmış bir fotoğrafı ile aynı soğutucu yüzeyine karşı katılaştırılmış bir döküm yüzeyinin fotoğrafı Resim 5.3.a ve Resim 5.3.b'de gösterilmiştir. Resim 5.3.a'dan görüleceği gibi döküm yüzeyinde pürüzler ve boşluklar bulunmaktadır. Bakır soğutucu ile karşılaştırıldığında çelik soğutucuya karşı dökülen döküm yüzeyinin daha az pürüzlü olduğu görülmektedir. Şekil 5.1'de verilen yüzey profilleri ile Resim 5.3'de verilen makro yapılar birlikte değerlendirildiğinde döküm yüzeyinin soğutucu yüzeyine bazı alanlarda tam temas ettiği bazı alanlarda ise soğutucu-döküm ara yüzeyinden dökümün iç bölgelerine doğru boşluklar olduğu görülmektedir. Bu boşluklar aynı grit bakır soğutucuya göre daha dar ve daha yüksektir. Resim 5.3.b'deki dökümden sonraki soğutucu yüzey fotoğrafından da görüleceği üzere tam temas bazı bölgelerde (açık renkli) gerçekleşmiştir.



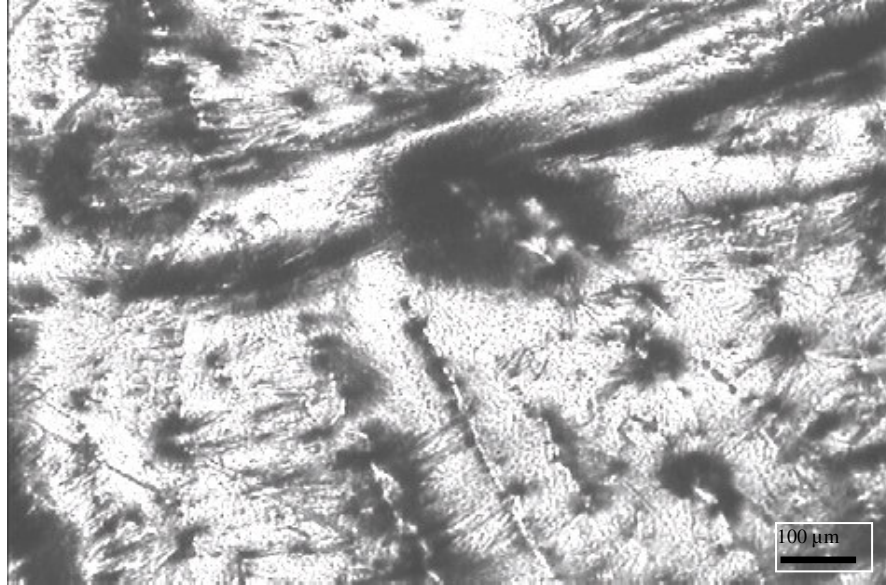
(a)



(b)

Resim 5.3. (a) 2400 grit zımpara ile hazırlanmış H13 çelik soğutucu yüzeyinden elde edilmiş döküm parça ve (b) 2400 grit zımpara ile hazırlanmış H13 çelik soğutucunun döküm sonrası yüzey görüntüleri

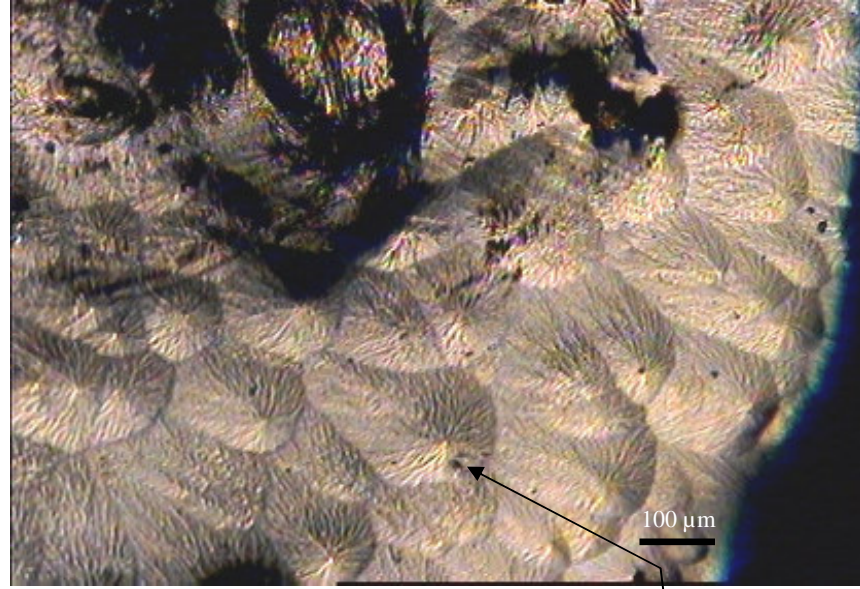
24 grit zımpara ile hazırlanmış H13 çelik soğutucu yüzeyine karşı elde edilen döküm yüzeyi Resim 5.4'da gösterilmektedir. Şekilde soğutucu üzerindeki pürüzlülük oyuklarına giren döküm kısımları oldukça net bir şekilde görülebilmektedir. Resim 5.1.b'deki aynı grit bakır soğutucuya karşı elde edilen döküm yüzeyi ile karşılaştırıldığında oyuklara giren döküm kısımlarının daha dar olduğu görülebilir.



Resim 5.4. 24 grit zımpara ile hazırlanmış H13 çelik soğutucu yüzeyine karşı elde edilen döküm yüzeyinin görüntüsü

5.3.2. Döküm yüzeylerinde tane ve mikro yapı incelemeleri

Bakır soğutucuya karşı dökülen tüm numunelerin soğutucu-döküm ara yüzeylerinde pre-dentritik katılaşma olduğu gözlenmiştir (Resim 5.5). Bu tane yapılarından da anlaşılacağı üzere döküm metali ile soğutucu yüzeyleri arasında sadece pre-dentritik noktalarda temas olduğu söylenebilir. Bu da toplam temas yüzey alanının gerçek yüzey alanından çok daha az olduğunu göstermektedir. 24 grit zımpara pürüzlülüğünde çizik sınırlarında tanelerin çizik boyunca yönlendiği Resim 5.6.a'da görülmektedir.



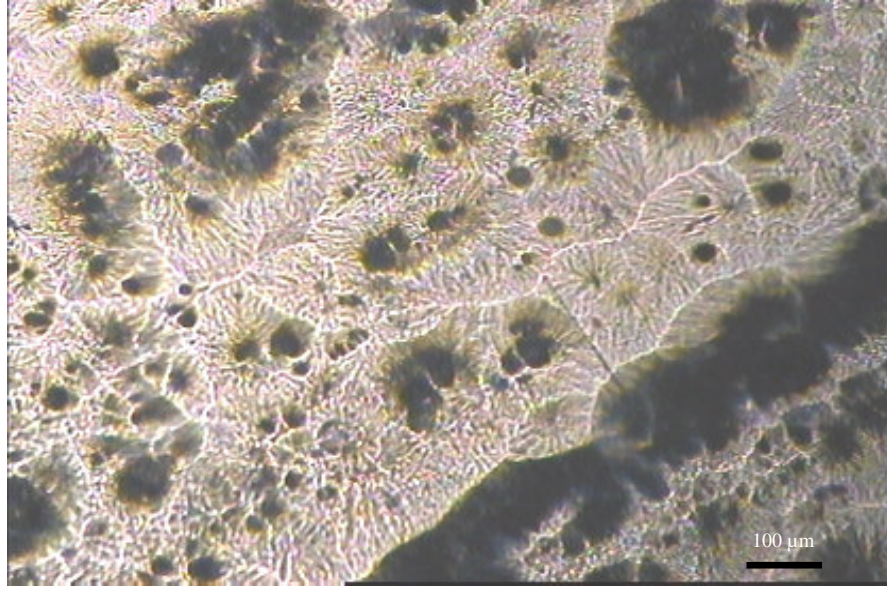
(a)

Predentritik noktalar

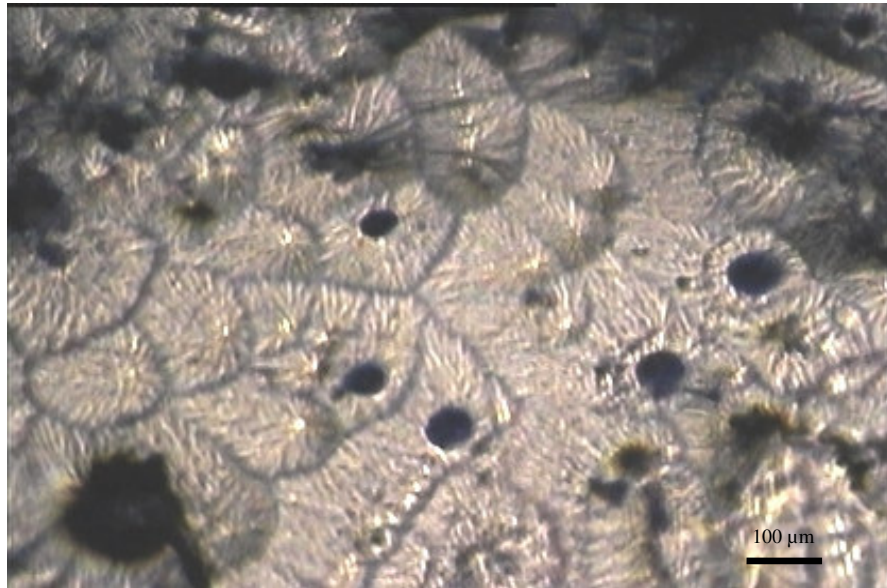


(b)

Resim 5.5. a) ve b) 280 grit zımpara ile hazırlanmış bakır soğutucu yüzeyine karşı elde edilen döküm parça yüzeyindeki tane yapısı ve bu tanelerin çekirdeklenme noktaları olan pre-dentritik yapı görüntüleri



(a)



(b)

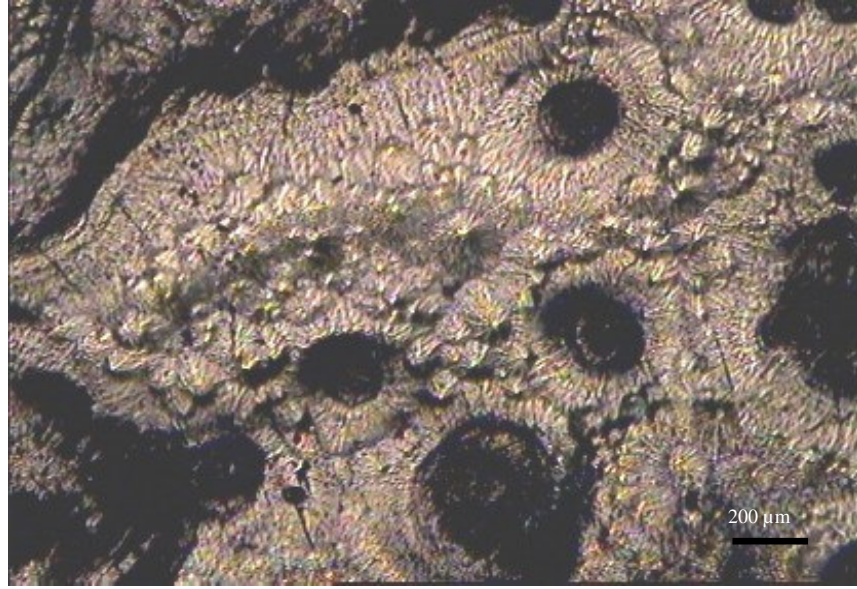
Resim 5.6. 24 grit zımpara ile hazırlanmış bakır soğutucu yüzeyine karşı elde edilen döküm parça yüzeyindeki a) çizik boyunca yönlenmiş taneler b) tane yapısı ve bu tanelerin çekirdeklenme noktaları olan pre-dentritik yapı görüntüleri

2400 grit zımpara pürüzlülüğünde ise ara yüzeyde sıkışan havanın farklı boyutlarda ve şekillerde tane yapısına sebep olduğu görülmektedir. Ara yüzeyde sıkışan gazlar süreklilik oluşturmuştur. Bununla birlikte hava kanallarının içine girememiş çok küçük hacimli gazların sebep olduğu

yuvarlak şekilli gaz boşlukları da mevcuttur. Ara yüzey temasın olduğu bölgelerde zincir şeklinde küçük taneler, ara yüzey temasının olmadığı gaz boşlukların üzerinde ise daha büyük taneler meydana gelmiştir (Resim 5.7).

Bakır soğutucu yüzeyden elde edilen döküm yüzeylerinde olduğu gibi H13 soğutucu yüzeye karşı elde edilen numune yüzeylerinde de pre-dentritik katılaşma gözlenmiştir (Resim 5.8). Ancak pre-dentritik noktalar bakır soğutucuda elde edilen dökümlere göre net değildir. H13 soğutucuda ısı iletiminin düşük olması ara yüzeyin uzun süre yüksek sıcaklığa maruz kalmasına sebep olmuştur (Şekil 5.5). En yüksek ara yüzey sıcaklığı ve bu sıcaklıkta bekleme süresi bakır soğutucuda 560 K'de 5 s iken H13 soğutucuda 710 K'de 300 s'dir (Şekil 5.5 – Şekil 5.6).

24 grit H13 soğutucu yüzeyindeki çizik içine giren döküm yüzeylerinde Resim 5.9'de görüldüğü gibi çatlaklar meydana gelmiştir. Bu çatlaklar yalnız çizik içine giren metal yüzeyinde oluşmuştur.

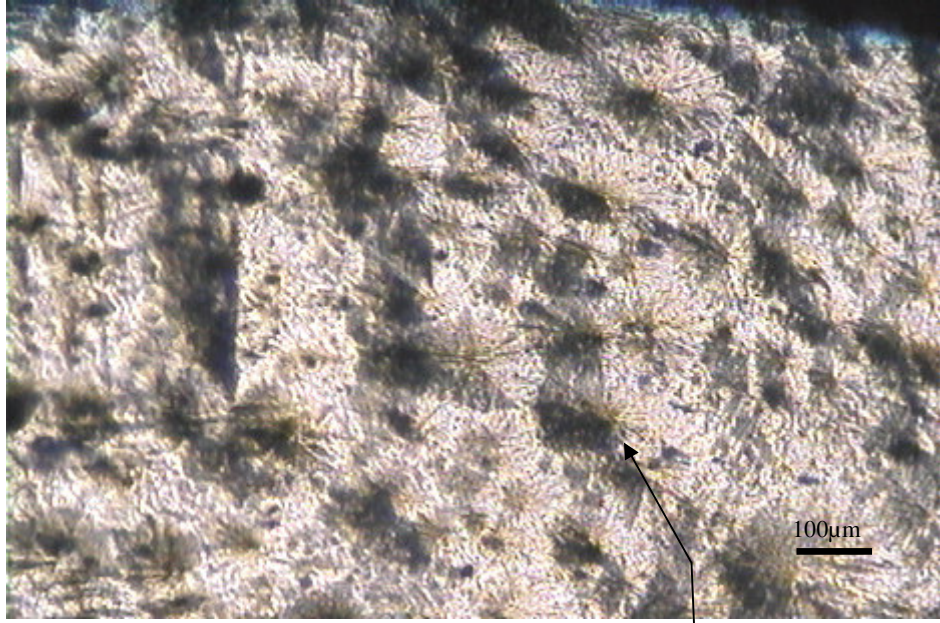


(a)



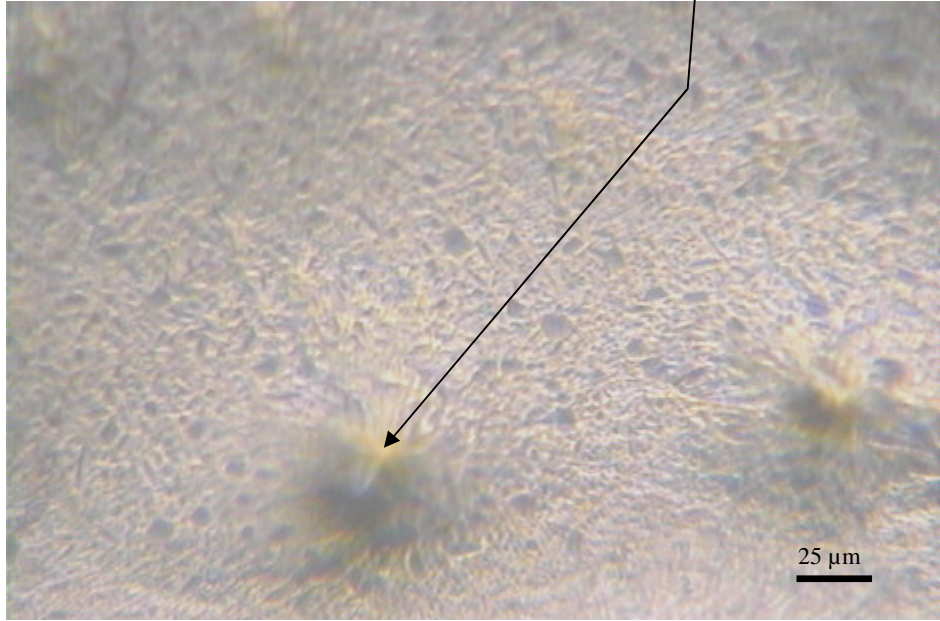
(b)

Resim 5.7. a) ve b) 2400 grit zımpara ile hazırlanmış bakır soğutucu yüzeyine karşı elde edilen döküm parça yüzeyindeki hava kanalları ve tane yapısı



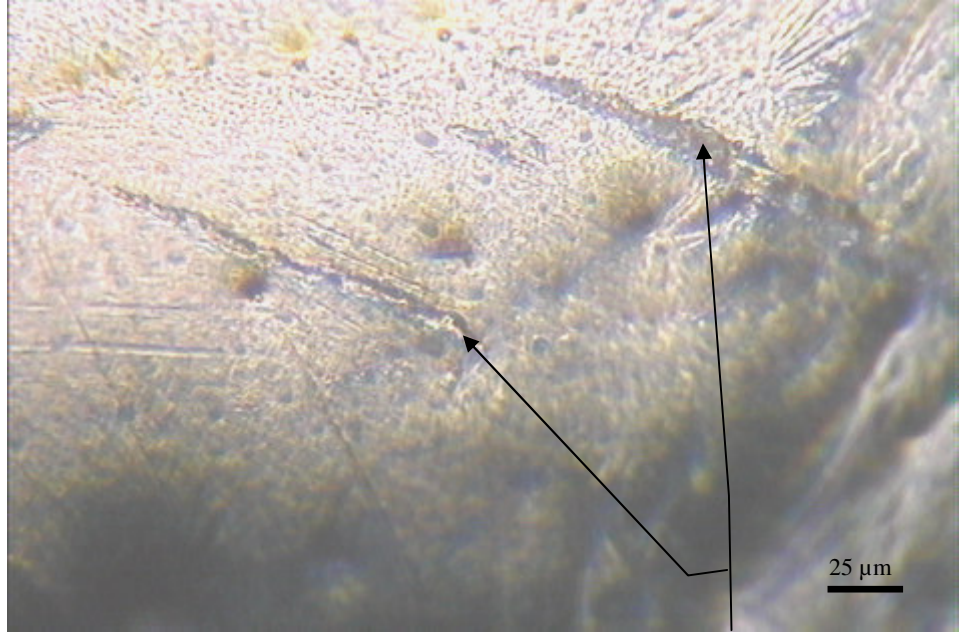
(a)

Predentritik noktalar

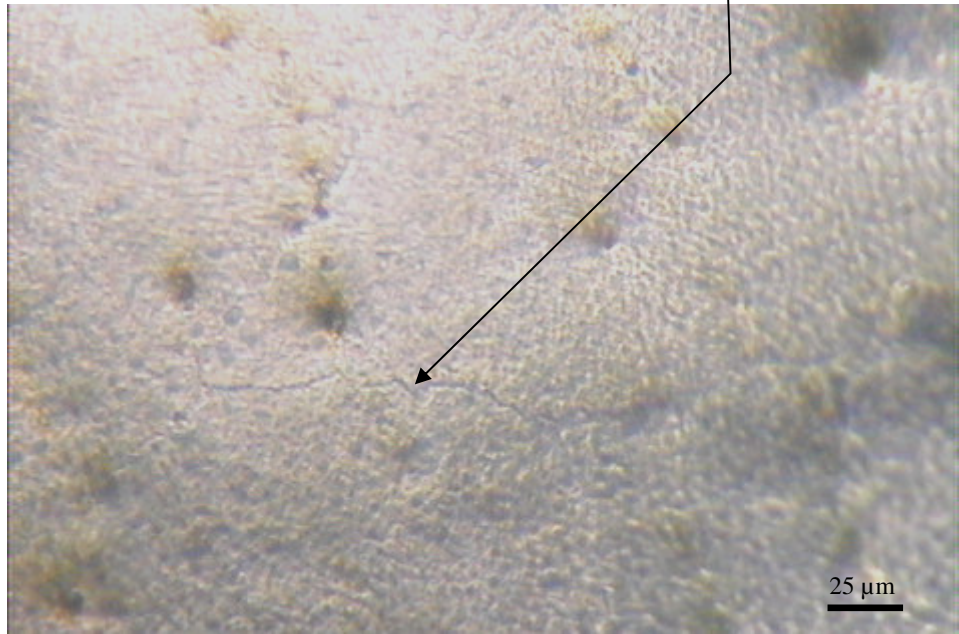


(b)

Resim 5.8. 60 grit H13 soğutucu yüzeyine karşı elde edilen döküm parça yüzeyindeki tane yapısı ve bu tanelerin çekirdeklenme noktaları olan pre-dentritik yapı görüntüsü



(a)



(b)

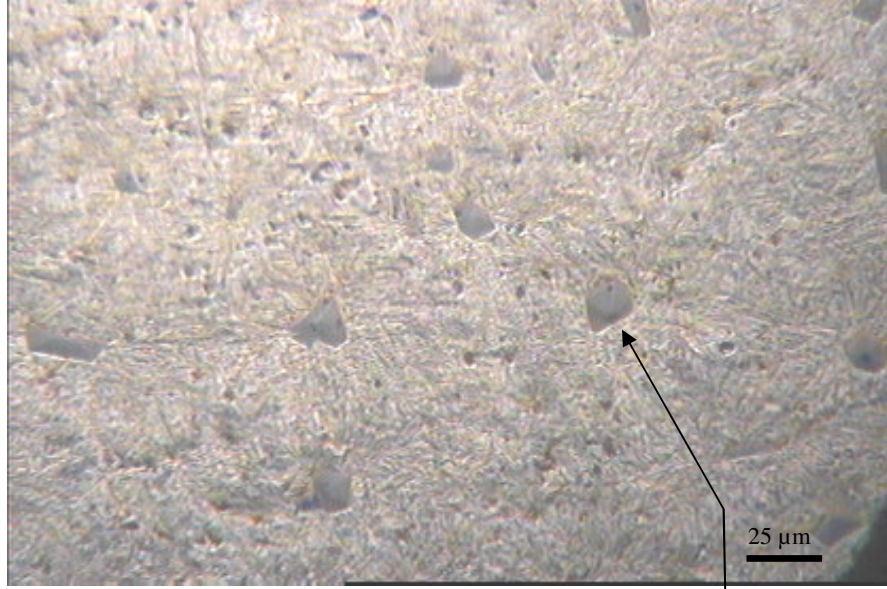
Resim 5.9. 24 grit H13 soğutucu yüzeyinde çizik içine giren döküm yüzeylerinde çatlak görüntüsü

Bakır ve H13 çelik soğutucu yüzeylerinden elde edilen döküm yüzeylerinin mikro yapı görüntüleri Resim 5.10'de verilmiştir. H13 çelik soğutucuya karşı dökülen döküm yüzeylerinde birincil silisyum fazı meydana gelmiştir (Resim

5.10.a ve Resim 5.10.b). Bakır soğutucu yüzeyinden elde edilen döküm yüzeylerinde ise birincil silisyum fazı oluşmamıştır (Resim 5.10.c). Benzer sonuçlar Hallam'ın [81] yaptığı çalışmada da rapor edilmiştir.

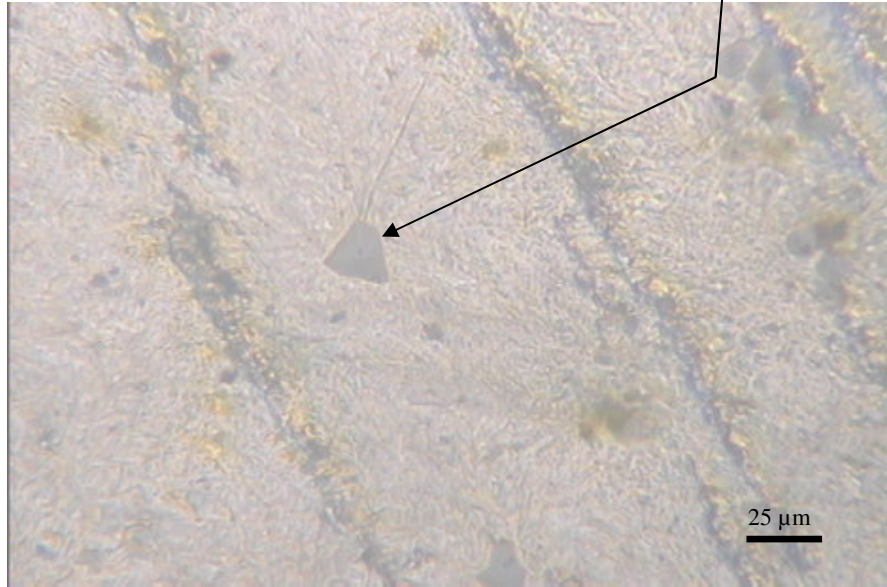
Bakır soğutucu üzerinde katılaşan dökümlerin ara yüzeye dik kesitinden alınan mikroyapı görüntüleri Resim 5.11'de verilmiştir. Döküm yüzeyinden yaklaşık olarak 150 μm mesafeye kadar aşırı soğumadan dolayı eşeksenel dentritik yapı oluşmuştur, Resim 5.11.a. Alaşım % 12,9 silisyumda hafifçe ötektik üstü bileşimindedir. Ancak soğuma oranının yüksek olması bu bölgede ötektik altı yapıyı üretmiştir. Bu sebepten birincil silisyum fazı oluşmamıştır. Bununla birlikte yavaş soğuma şartlarında lameller yapıya sahip ötektik silisyum fazı modife (yosun) yapı şeklinde katılaşmıştır, Resim 5.11.b. Bu bölgenin hemen üzerinde ötektik silisyumun yoğun olduğu geçiş bölgesinde ötektik yapı mevcuttur. Geçiş bölgesinden sonra yönlenmiş dendritler teşekkül etmiştir, Resim 5.11.a. Birincil silisyum partikülleri döküm yüzeyinden 450 μm mesafeden sonra çok az da olsa oluşmaya başlamıştır, Resim 5.11.a ve Resim 5.11.c. Hızlı soğumadan kaynaklanan yosun (fibrous) şeklindeki ötektik silisyum fazı ısının transfer edildiği döküm yüzeyinden uzaklaştıkça lameller yapıya dönüşmüştür.

H13 çelik soğutucu üzerinde katılaşan dökümlerin ara yüzeye dik kesitinden alınan mikroyapılar Resim 5.12'de verilmiştir. Yapılan incelemede döküm yüzeyinden itibaren sütunsal tane içinde yönlenmiş dentritler (Resim 5.12.a) ve birincil silisyum fazı (Resim 5.12.b) gözlenmiştir. Ötektik silisyum yosun şeklinde teşekkül etmiş ancak döküm yüzeyinden uzaklaştıkça lameller yapıya dönüşmüştür. Birincil silisyum partiküllerinin yoğunluğu ve boyutları döküm yüzeyinden daha uzak mesafelere doğru artmıştır.



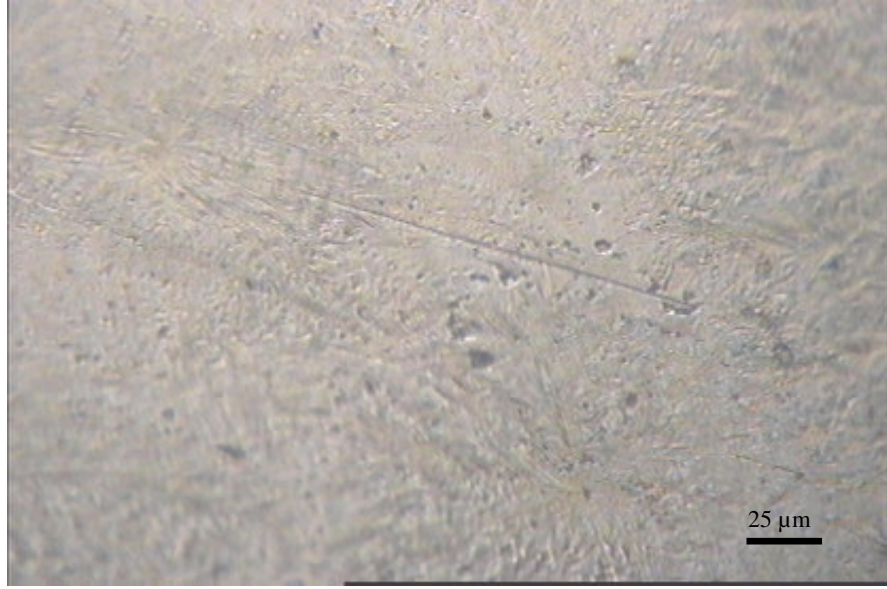
(a)

Birincil Silisyum Fazı



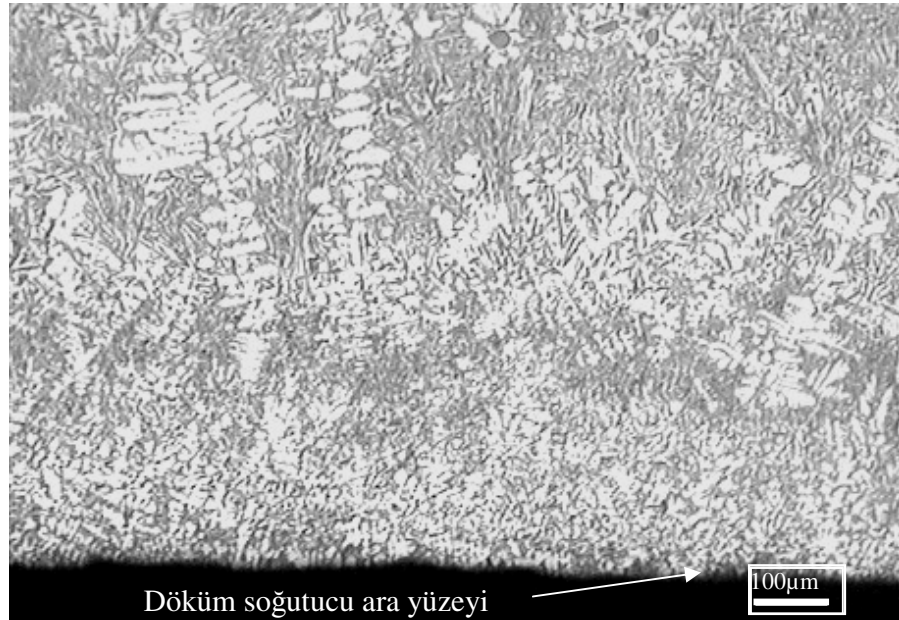
(b)

Resim 5.10. a) H13 2400 grit b) H13 60 grit c) bakır 24 grit soğutucu yüzeylerine değen döküm parça yüzey görüntüleri



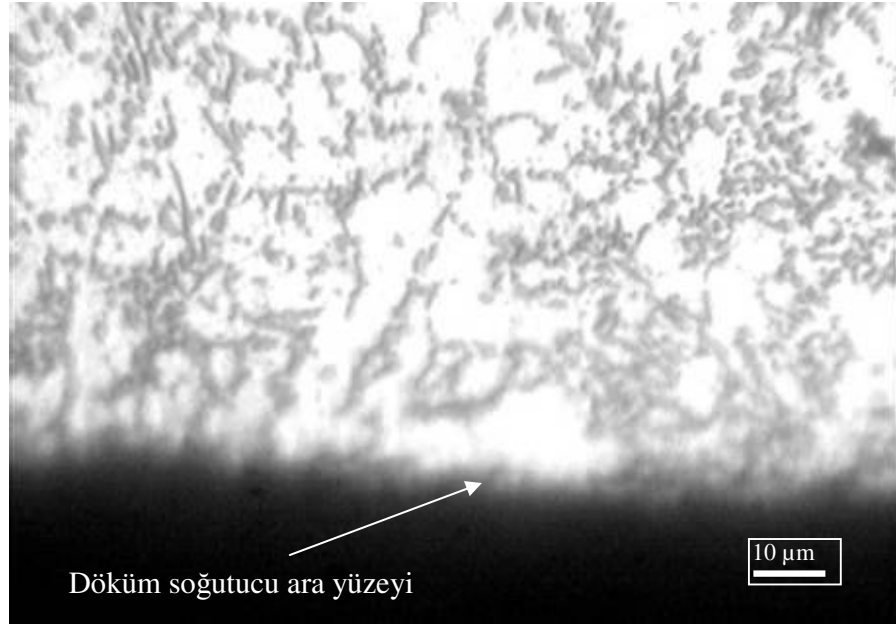
(c)

Resim 5.10. (Devam) a) H13 2400 grit b) H13 60 grit c) bakır 24 grit soğutucu yüzeylerine değen döküm parça yüzey görüntüleri

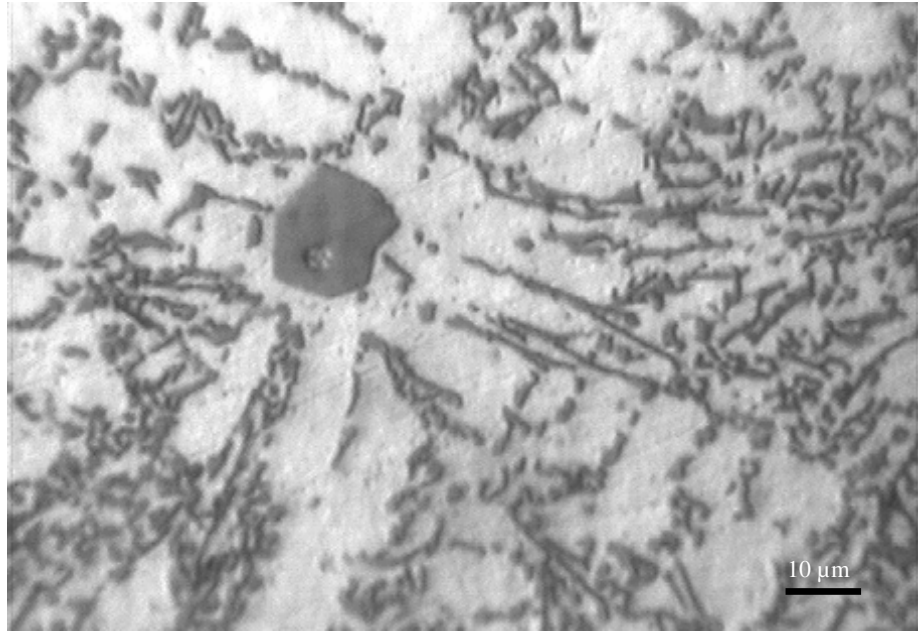


(a)

Resim 5.11. Bakır soğutucu yüzeyine dökülmüş Al-%13Si alaşımının ara yüzeye dik kesitteki mikro yapı görüntüleri, 0.5 HF ile dağlanmış

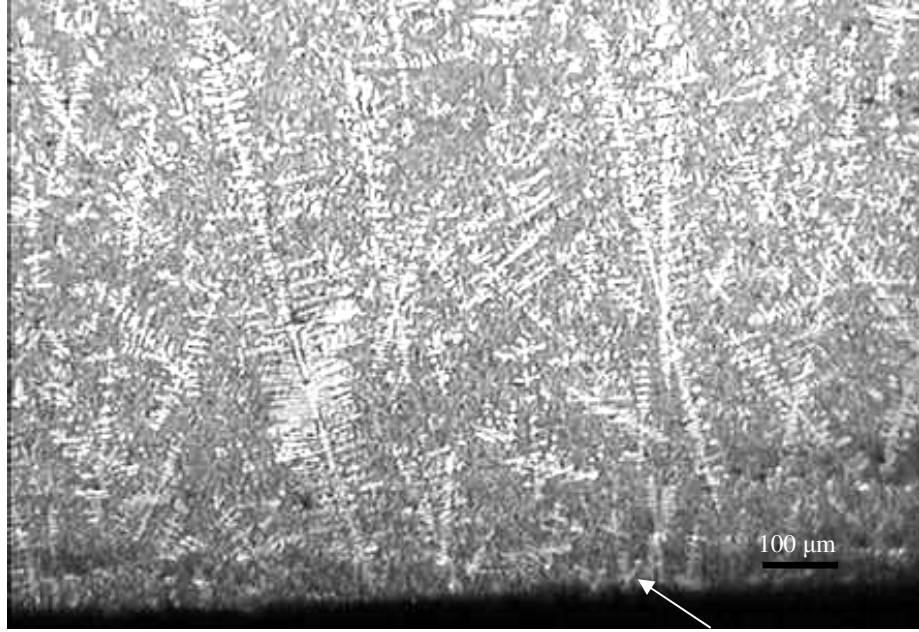


(b)



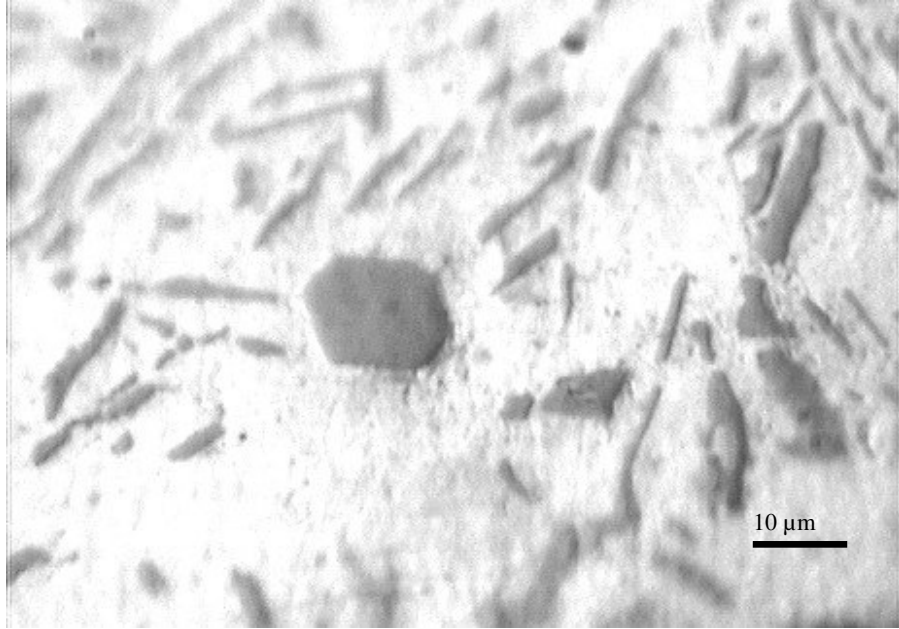
(c)

Resim 5.11. (Devam) Bakır soğutucu yüzeyine dökülmüş Al-%13Si alaşımının ara yüzeye dik kesitteki mikro yapı görüntüleri, 0.5 HF ile dağlanmış



(a)

Döküm soğutucu ara yüzeyi



(b)

Resim 5.12. H13 çelik soğutucu yüzeyine dökülmüş Al-%13Si alaışımının ara yüzeye dik kesitteki mikro yapı görüntüleri a) 50 ve b)400 büyütme, 0.5 HF ile dağlanmış

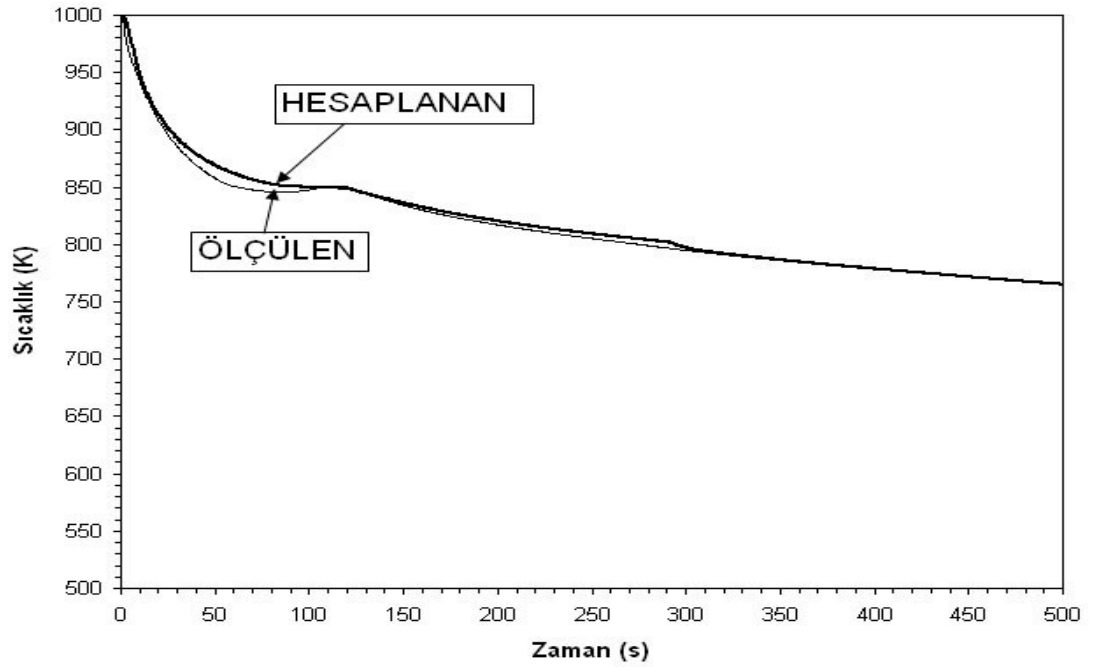
5.4. Döküm-Soğutucu Ara Yüzeyinden Isı Transferi

5.4.1. Zaman-Sıcaklık ilişkisi

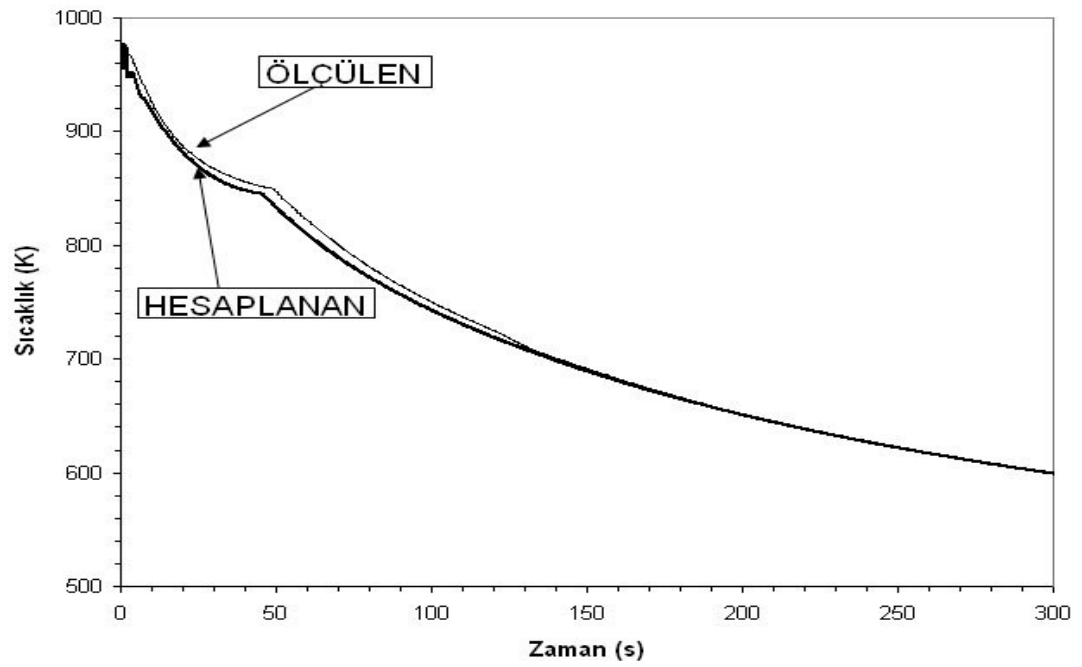
H13 çelik ve bakır soğutucular kullanarak yapılan dökümlerde döküm-soğutucu ara yüzeyinden 37.5 mm (TC5) mesafede ölçülen ve sonlu farklar yöntemi ile hesaplanan sıcaklık eğrileri sırasıyla Şekil 5.3 ve Şekil 5.4 de verilmiştir. H13 çelik soğutucuya karşı dökümden ölçülen ve hesaplanan sıcaklıklar arasındaki fark maksimum 16 K olarak tespit edilmiştir. Bakır soğutucu kullanıldığında ise Şekil 5.4'de gösterildiği gibi ölçülen ve hesaplanan sıcaklıklar arasındaki fark maksimum 11 K bulunmuştur.

H13 çelik ve bakır soğutucular üzerinde ara yüzeyden 37.5 mm mesafeden ölçülen ve hesaplanan sıcaklıkların arasındaki fark sırasıyla maksimum 5 K ve 2 K olarak belirlenmiştir. Bakır ve çelik soğutucu üzerinden ölçülen ve hesaplanan sıcaklıkların zaman-sıcaklık eğrileri grafik üzerinde çakıştığı için burada şekil olarak gösterilememiştir. Hem döküm parça ve hem de soğutucuların kontrol noktalarında (37,5 mm) ölçülen ve hesaplanan sıcaklıklar arasındaki bu mükemmel uyum bu çalışmada kullanılan deneysel metodun ve malzemelerin termofiziksel özelliklerinin doğru seçildiğini ve aynı zamanda doğru kullanıldığını göstermektedir.

Soğutucu ve döküm parçalarda ara yüzeyden 5 mm, 37,5 mm ve 75 mm mesafede ölçülen ve döküm ve soğutucu yüzeylerinde sonlu farklar yöntemi ile hesaplanan sıcaklık verileri Şekil 5.5 ve Şekil 5.6 de sıcaklık-zaman ilişkisi olarak verilmiştir. Şekillerde TC1, TC2 ve TC3 ile gösterilen eğriler soğutuculardan ölçülen zaman-sıcaklık ilişkileri olup ara yüzeyden sırası ile 75 mm, 37,5 mm ve 5 mm mesafelerden alınmıştır. Benzer şekilde, TC4, TC5 ve TC6 ile gösterilen sıcaklık eğrileri ise dökümlerden ara yüzeye 5 mm, 37.5 mm ve 75 mm mesafelerde ölçülen sıcaklık-zaman eğrileridir. T_C ve T_M ise teorik olarak döküm ve kalıp yüzeylerine denk gelen düğüm noktaları için hesaplanan sıcaklık eğrilerini göstermektedir.



Şekil 5.3. Ara yüzeyden 37.5 mm mesafede H13 çelik soğutucuya karşı katılaşılan döküm parçadan ölçülen ve hesaplanan sıcaklıklar

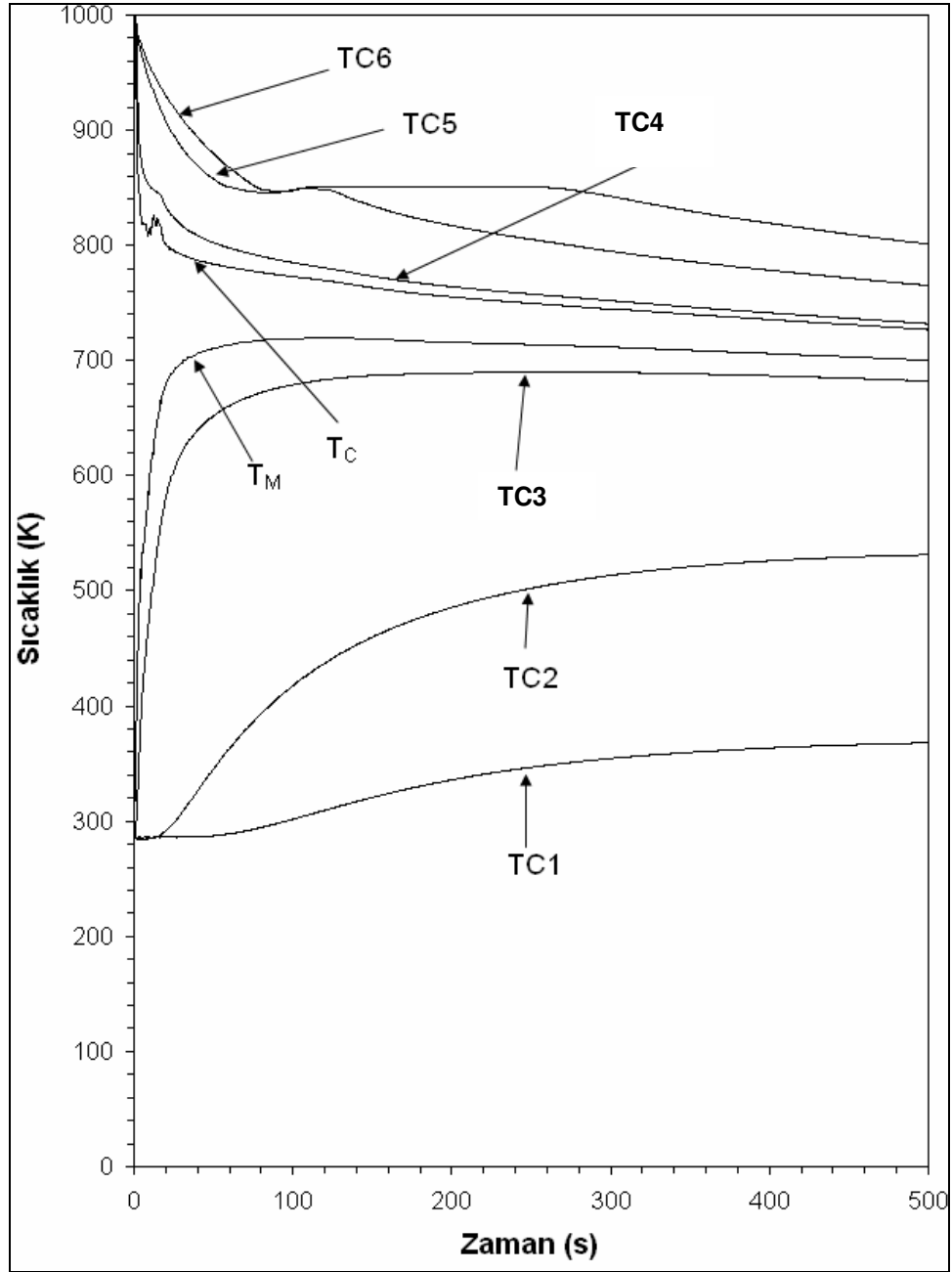


Şekil 5.4. Ara yüzeyden 37.5 mm mesafede bakır soğutucuya karşı katılaşılan döküm parçadan ölçülen ve hesaplanan sıcaklıklar

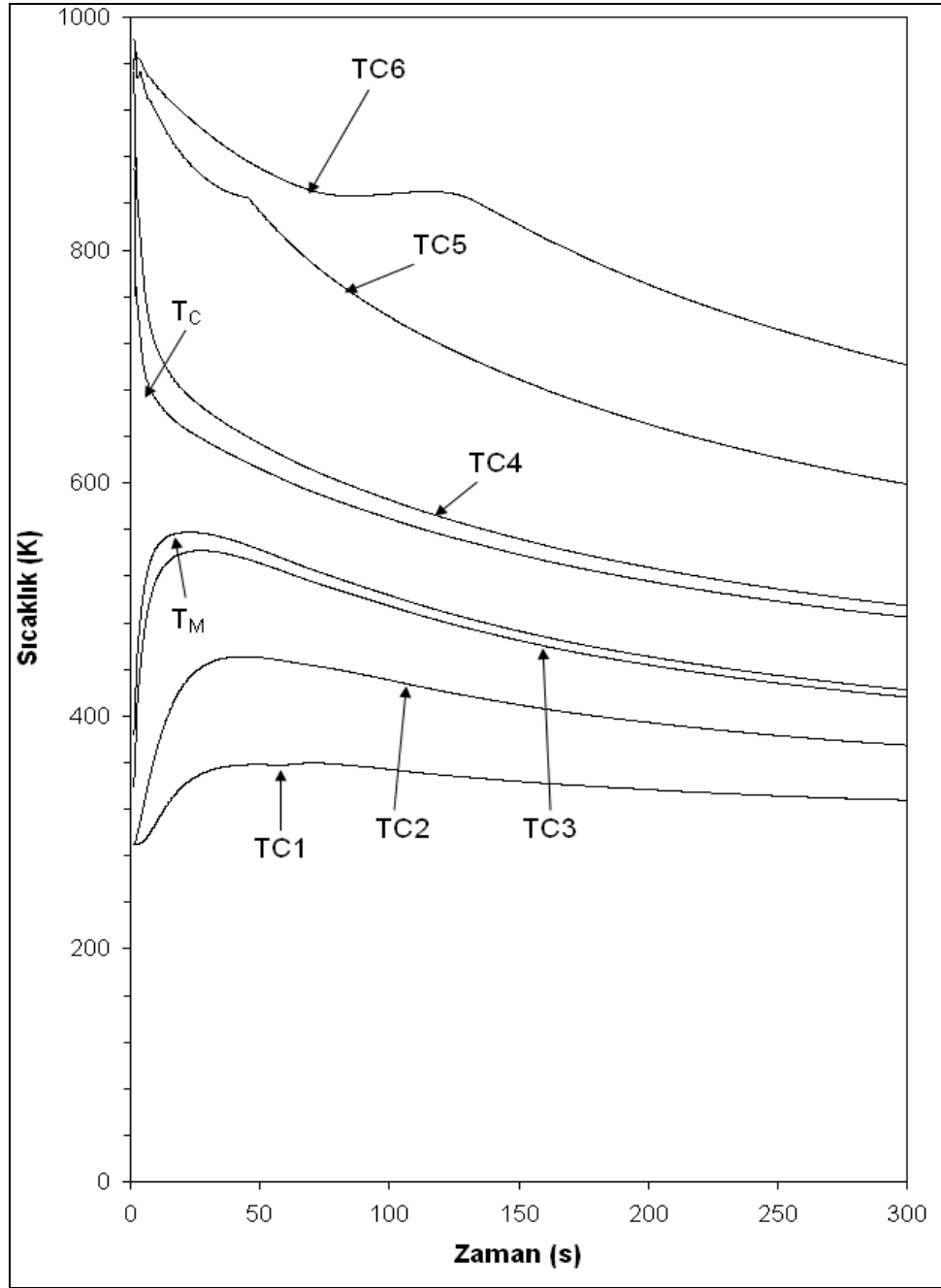
Şekil 5.5 ve Şekil 5.6' de gösterilen grafikler sırası ile yüzeyleri 400 grit zımpara ile hazırlanmış soğutuculara karşı yapılmış dökümlerden alınan sıcaklık-zaman eğrileridir. Her iki soğutucu-döküm sisteminde yapılan dökümlerden alınan sonuçları bu grafikler temsil ettiğinden bütün dökümlerin zaman-sıcaklık eğrileri ayrı ayrı verilmemiştir.

Şekil 5.5 de TC1, TC2 ve TC3 numaralı sıcaklık eğrileri soğutucu içinde sıcaklık farkının döküme göre çok daha fazla olduğu görülmektedir. H13 çelik soğutucuda sıcaklık ara yüzeyden 5 mm mesafede çok hızlı artarken 75 mm mesafede yaklaşık 60 sn sonra artmaya başlamıştır. Buna karşılık, dökümdeki sıcaklıklar ise her bir ısıl çiftin bulunduğu bölgede farklı olarak alaşımın katılma noktasına kadar hızlı bir şekilde düşmüştür. Dökümde 5 mm mesafede sıcaklık-zaman eğrisi (TC4) 14. saniyede ve 840 K 'de küçük bir katılma düzlüğü göstermiştir. Sıcaklık-zaman eğrisi 75 mm mesafede (TC6) 106. saniyede Al-Si ötektik alaşımın katılma sıcaklığı olan 850 K'e ulaşmış ve bu sıcaklıkta devam etmiştir. Katılma 280. saniyede tamamlanmıştır. 37.5 mm mesafede (TC5) katılma ötektik sıcaklıkta 98. saniyede başlamış ve 126. saniyede sona ermiştir.

Bakır soğutucudan elde edilen sıcaklık-zaman eğrisine (Şekil 5.6) göre soğutucu sıcaklıkları başlangıçta çok hızlı artmış ve en yüksek değere ulaştıktan sonra da düzenli olarak azalmıştır. Sıcaklık dökümde 5 mm mesafedeki soğuma eğrisinde (TC4) sürekli azalırken 37,5 mm (TC5) ve 75 mm mesafelerde (TC6) katılma süresince ötektik sıcaklıkta sabit kalmıştır. Soğutucu üzerinde üç noktada (TC1,TC2,TC3) ölçülen sıcaklıklar arası fark dökümde ara yüzeyden aynı mesafedeki noktalardan ölçülen sıcaklık farkından daha azdır. Toplam katılma süresi bakır soğutuculara karşı yapılan dökümlerde çelik soğutuculara karşı yapılan dökümlere göre yaklaşık üç kat daha kısadır. Ayrıca soğutuculardan ölçülen zaman-sıcaklık eğrilerine göre TC1, TC2 ve TC3 eğrileri arasındaki sıcaklık farkı çelik soğutucuda bakır soğutucuya göre çok daha fazladır.



Şekil 5.5. Ötektik Al-Si ve H13 soğutucudan ölçülen ve hesaplanan sıcaklık eğrileri



Şekil 5.6. Ötektik Al-Si ve bakır soğutucudan ölçülen ve hesaplanan sıcaklık eğrileri

5.4.2. Ara yüzey ısı transfer katsayıları

Beş değişik yüzey pürüzlülüğüne sahip H13 çelik ve bakır soğutuculara karşı ötektik Al-Si döküm alaşımının katılaşma ve soğuması süresince ara yüzey ısı transfer katsayıları her pürüzlülük değeri için ayrı ayrı iki deney yapılarak hesaplanmıştır. Ötektik Al-Si döküm alaşımı ile H13 çelik ve bakır soğutucu yüzeyler arasında elde edilen ısı transfer katsayıları Şekil 5.7-Şekil 5.16'da görülmektedir.

H13 çelik soğutucu ile yapılan bütün deneylerden elde edilen ısı transfer katsayıları benzer karakteristiğe sahiptir. Isı transfer katsayıları başlangıçta düşük bir değerden en yüksek değere yükselmiş ve daha sonra yaklaşık 110. s'ye kadar kademeli olarak düşmüştür. Isı transfer katsayısı bu düşüşü takiben döküm metali katılaşmasını tamamlayana kadar sabit bir değerde kalmıştır. Döküm metali katılaşmasını tamamladıktan sonra ısı transfer katsayısı yaklaşık 300 W/m²K'lik düşüşün ardından soğuma sırasında da sabit bir değerde seyretmiştir. H13 çelik soğutucu ve ötektik Al-Si döküm ara yüzeyinde maksimum 11000 W/m²K, minimum 5000 W/m²K ısı transfer katsayıları gerçekleşmiştir.

Bakır soğutucu döküm ara yüzeyinde elde edilen ısı transfer katsayıları başlangıçta H13 çelik soğutucuda olduğu gibi düşük değerden yüksek değere doğru çok hızlı bir şekilde yükselmiştir. Maksimum değere ulaştıktan sonra katılaşma süresince sürekli olarak düşmüştür. Isı transfer katsayısı katılaşma tamamlandıktan sonra yaklaşık 300 W/m²K'lik ani azalmayı takiben düşmeye devam etmiştir. Bakır-döküm ara yüzeyinde maksimum 24000 W/m²K ve minimum 4900 W/m²K değerlerinde ısı transfer katsayıları belirlenmiştir.

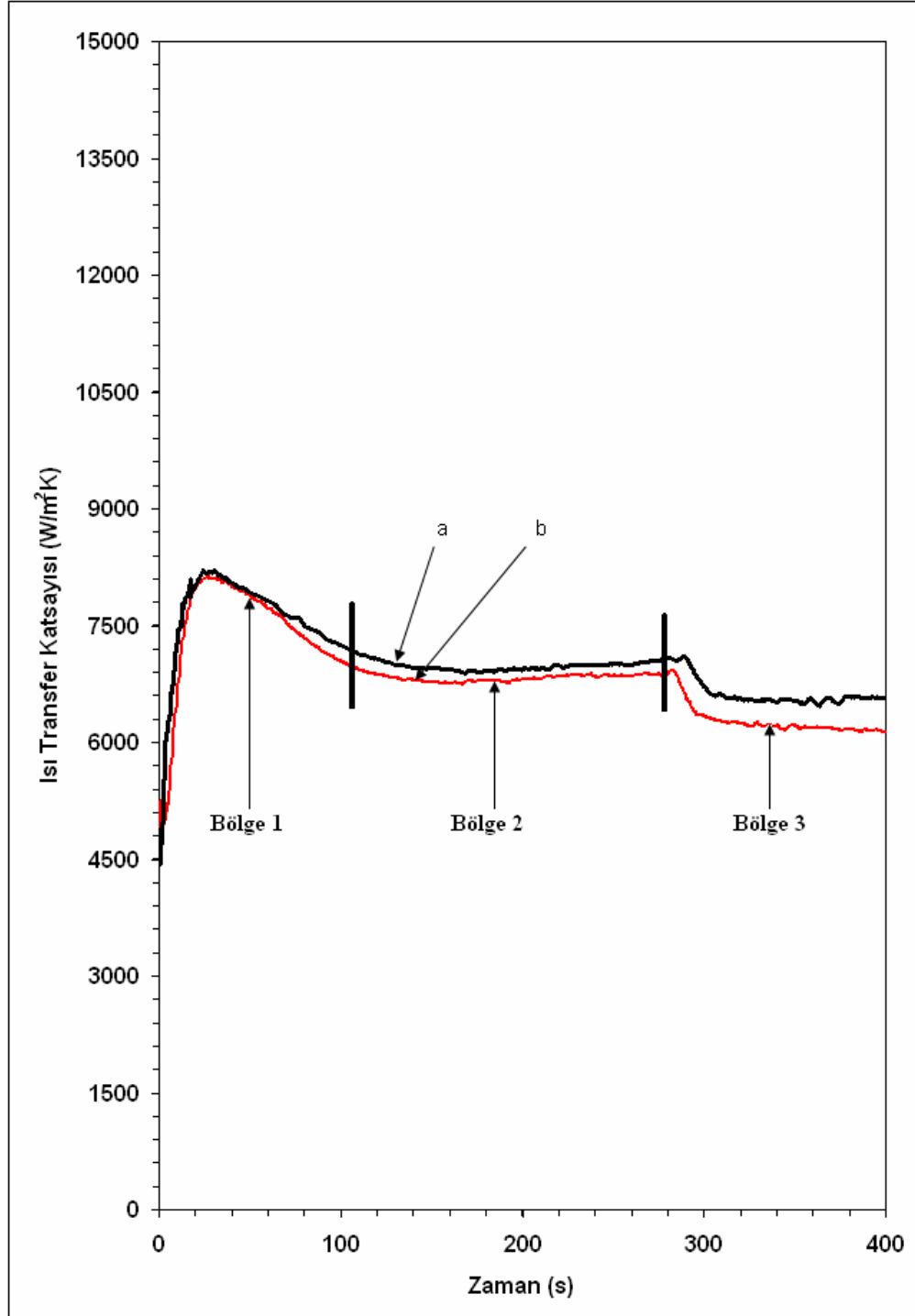
Çizelge 5.4. Ara yüzeyden 75 mm' lik mesafede katılaşma tamamlanana kadar Şekil 5.7–Şekil 5.16'da verilen ara yüzey ısı transfer katsayılarının ortalama ($\bar{h}$) değerleri

Soğutucu	Zımpara	Deney	$\bar{h}$ (W/m ² K)
Bakır	24 Grit	a	22 291
		b	22 266
		Ortalama	22 279
	60 Grit	a	12 961
		b	13 512
		Ortalama	13 237
	280 Grit	a	19 504
		b	19 770
		Ortalama	19 637
	400 Grit	a	21 481
		b	20 863
		Ortalama	21 172
	2400 Grit	a	10 362
		b	10 444
		Ortalama	10 403
Çelik	24 Grit	a	7 449
		b	7 288
		Ortalama	7 369
	60 Grit	a	5 330
		b	5 649
		Ortalama	5 490
	280 Grit	a	6 557
		b	6 493
		Ortalama	6 525
	400 Grit	a	6 590
		b	6 567
		Ortalama	6 578
	2400 Grit	a	10 155
		b	10 231
		Ortalama	10 193

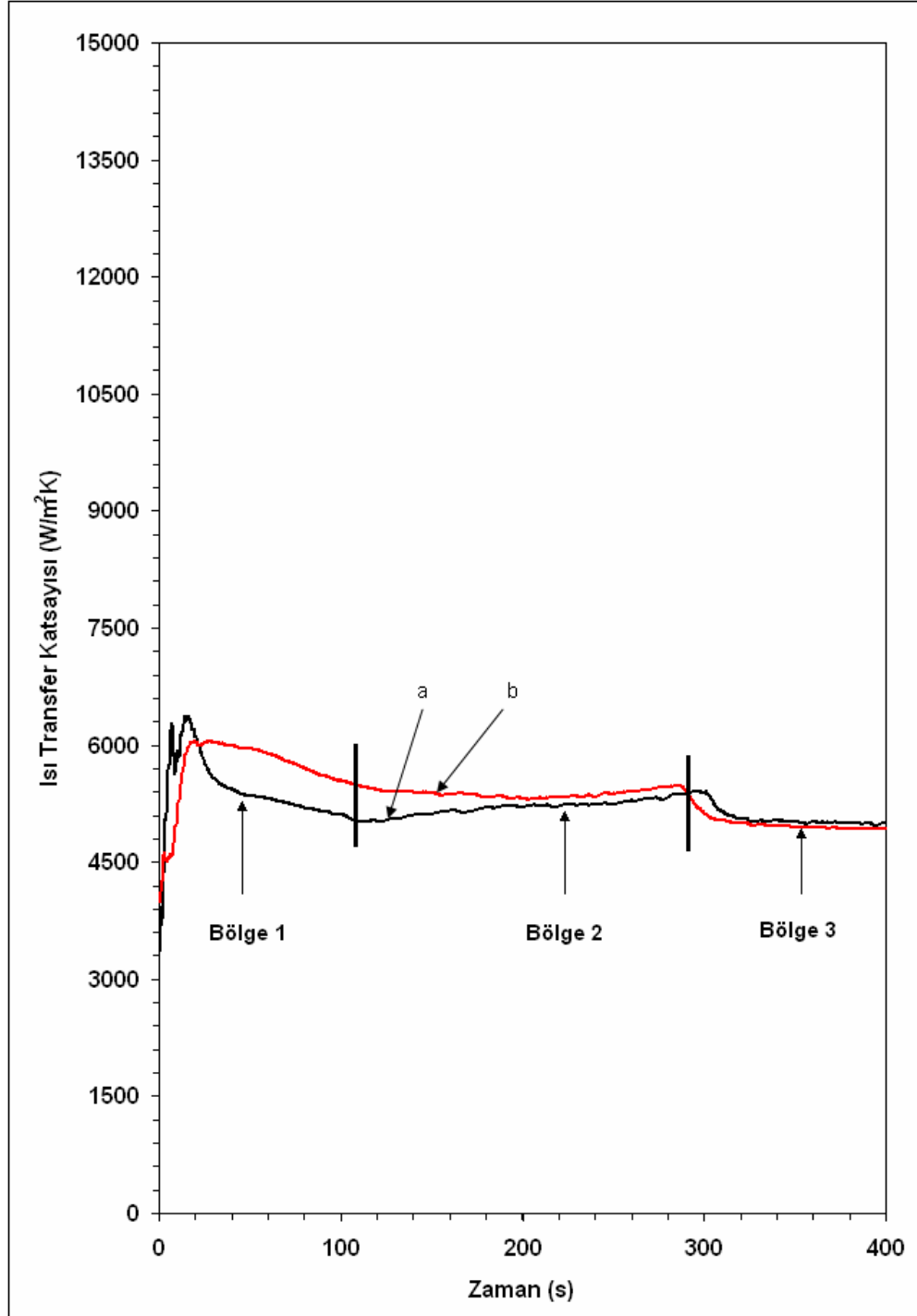
Şekil 5.7-Şekil 5.16'de verilen ısı transfer katsayıları dökümün başlangıcından 75 mm mesafede bulunan (TC6) ısı çiftinin bulunduğu noktada katılaşma tamamlanana kadar ortalama değerleri hesaplanmış ve bu değerler Çizelge 5.4'de verilmiştir. Ortalama ısı transfer katsayıları bakır soğutuculara karşı 22791–13237 W/m²K ve H13 çelik soğutuculara karşı 10193–5490 W/m²K değerler arasında bulunmuştur.

Bakır soğutucuya karşı ortalama ısı transfer katsayısı en yüksek 24 grit zımpara pürüzlülüğünde 22279 W/m²K en düşük ise 2400 grit zımpara pürüzlülüğünde 10403 W/m²K olarak belirlenmiştir. 60, 280 ve 400 grit zımpara pürüzlülüğünde soğutucu yüzey pürüzlülüğü azaldıkça ortalama ısı transfer katsayısında artış gözlenmiştir. H13 çelik soğutucu kullanıldığında bakır soğutuculardaki durumun tam tersi olarak en yüksek ısı transfer katsayısı 2400 grit zımpara pürüzlülüğünde 10193 W/m²K ve daha sonra ise 24 grit zımpara pürüzlülüğünde 7369 W/m²K olarak hesaplanmıştır. H13 çelik soğutucularda da 60, 280 ve 400 grit zımpara pürüzlülüğünde bakır soğutuculara benzer şekilde soğutucu yüzey pürüzlülüğü azaldıkça ortalama ısı transfer katsayısı artmıştır.

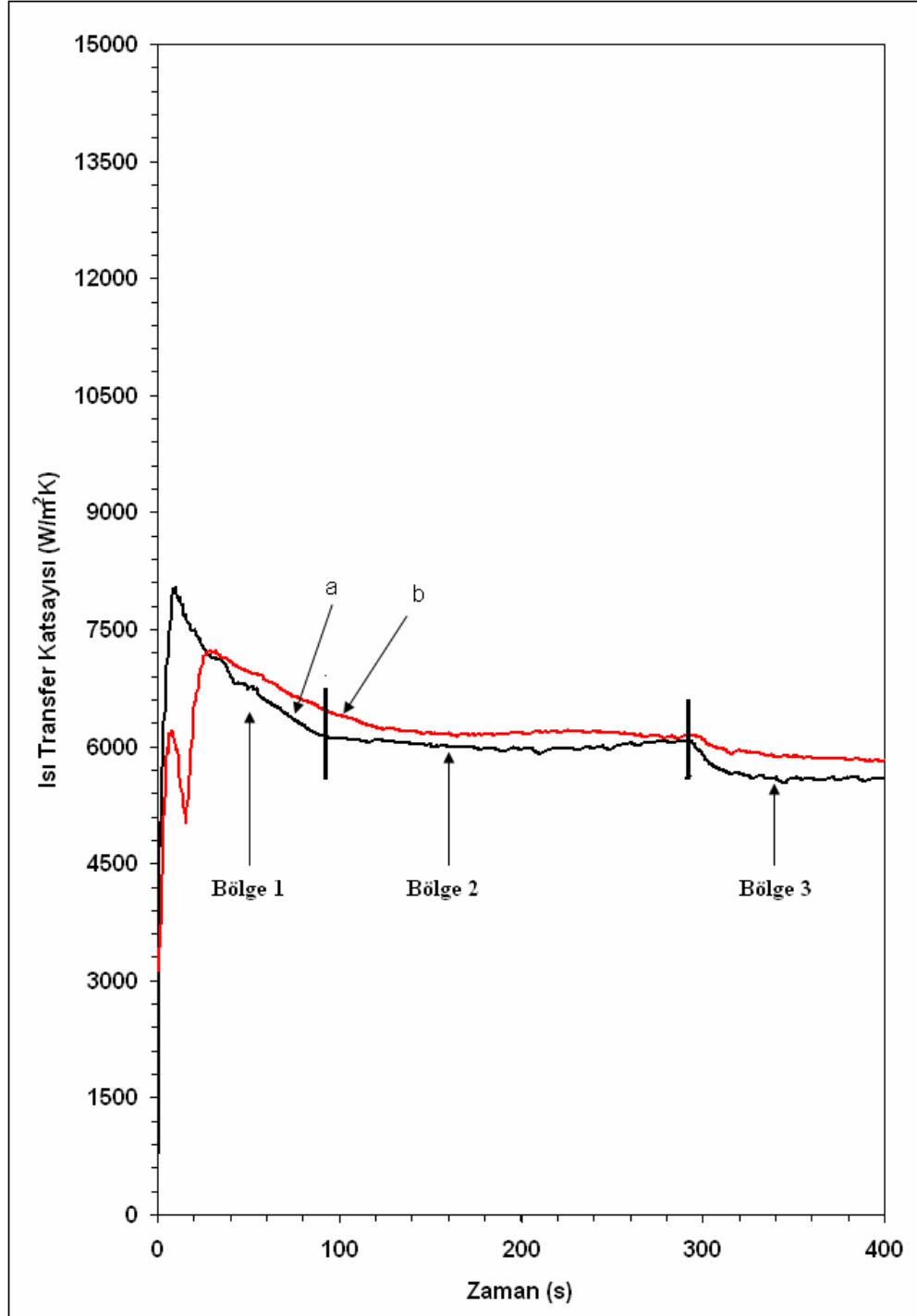
Bu çalışmada elde edilen sonuçlara göre 60, 280 ve 400 grit zımparalar için elde edilen yüzey pürüzlülüğüne bağlı ara yüzey ısı transfer katsayıları yüzey pürüzlülüğünün azalması ile artmıştır. Fakat 2400 grit zımparada hazırlanan bakır soğutucu en düşük ara yüzey ısı transfer katsayısı üretmiştir. Bununla birlikte 24 grit zımparada hazırlanan bakır soğutucu da en yüksek katsayıyı vermiştir. H13 çelik soğutucuda ise 24 grit zımpara pürüzlülüğü dışında yüzey pürüzlülüğünün azalması ile ısı transfer katsayısı artmıştır.



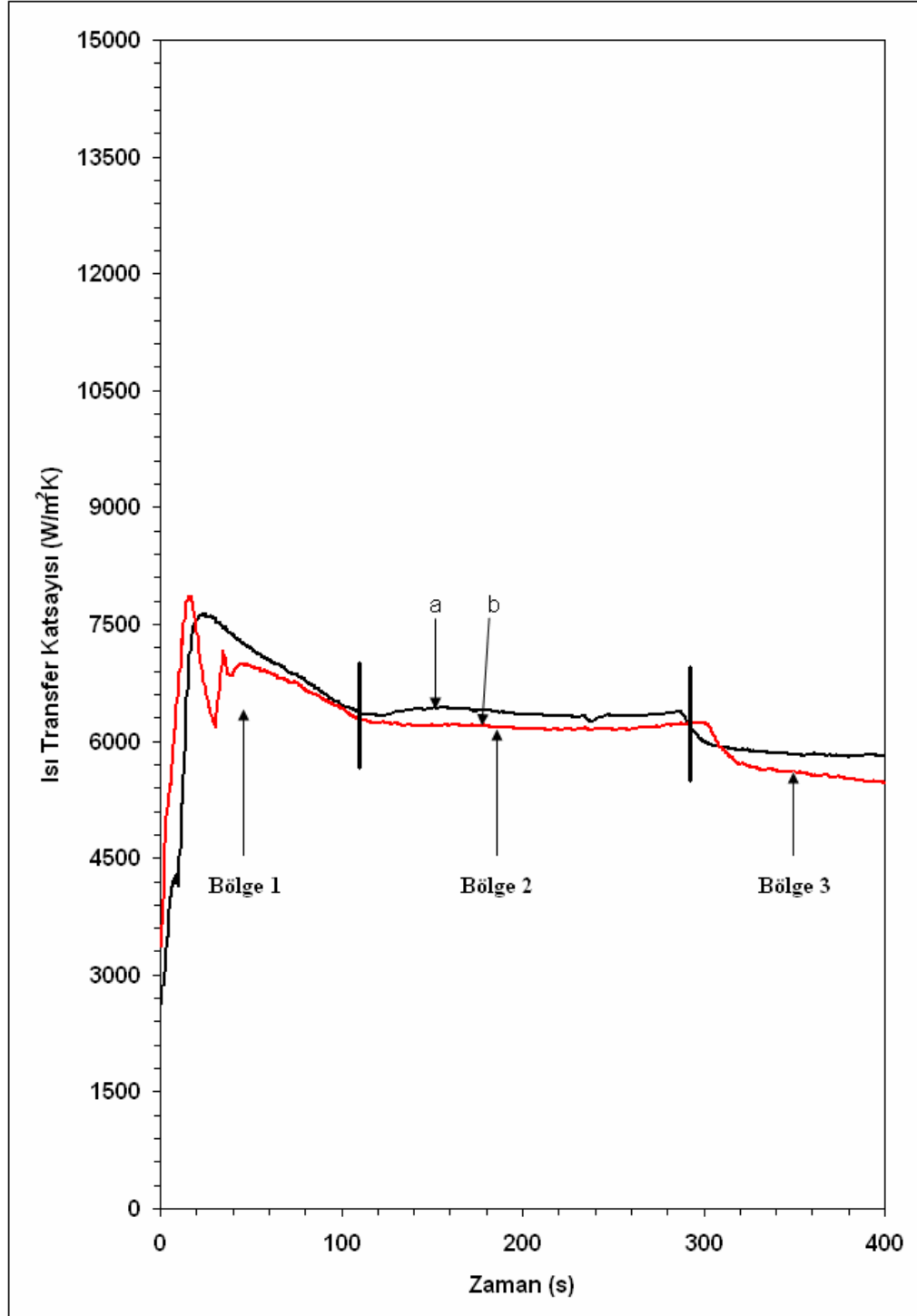
Şekil 5.7. 24 grit H13 soğutucuya karşı hesaplanan döküm-soğutucu ara yüzey ısı transfer katsayıları, a) deney 1, b) deney 2



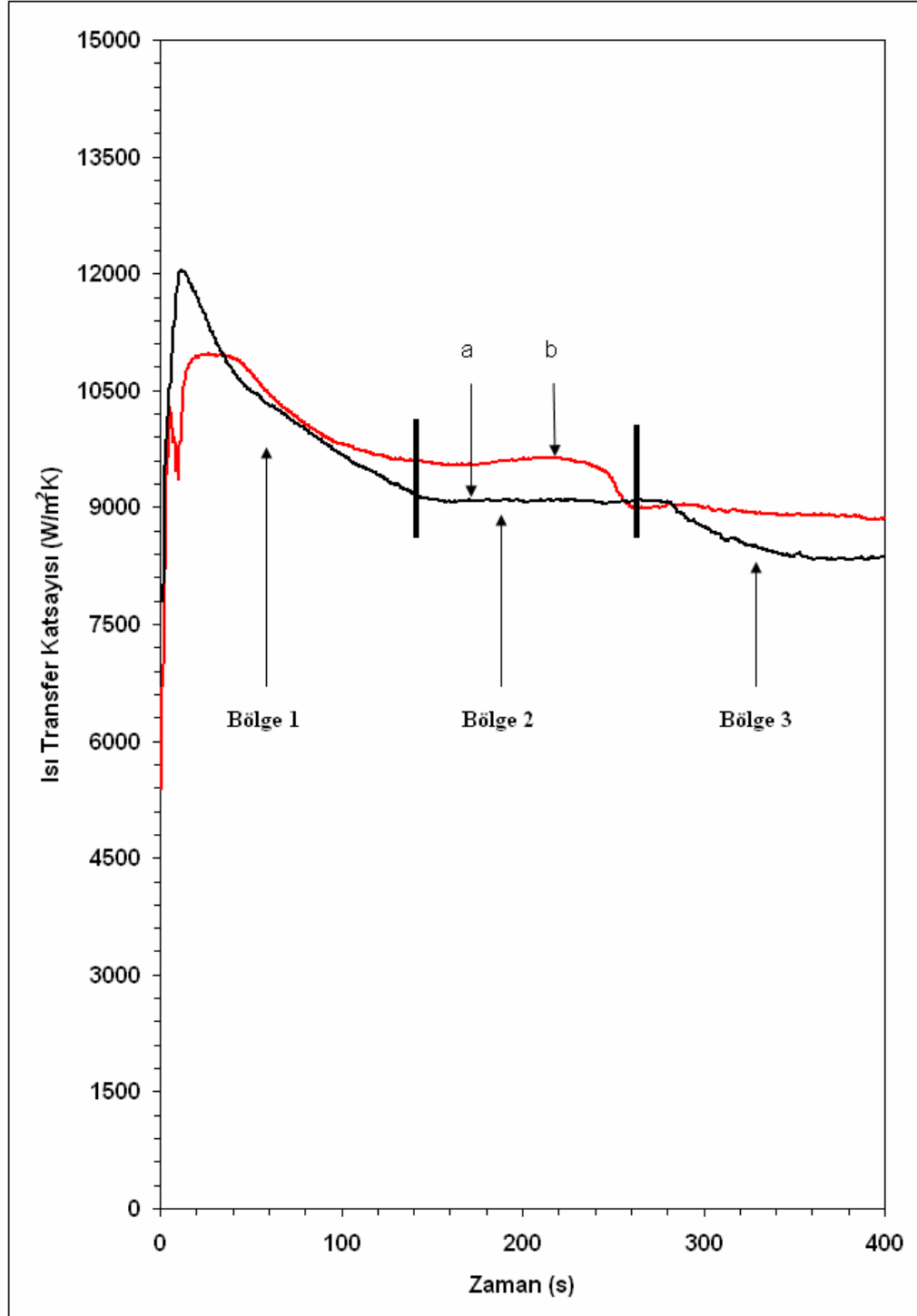
Şekil 5.8. 60 grit H13 soğutucuya karşı hesaplanan döküm-soğutucu ara yüzey ısı transfer katsayıları, a) deney 1, b) deney 2



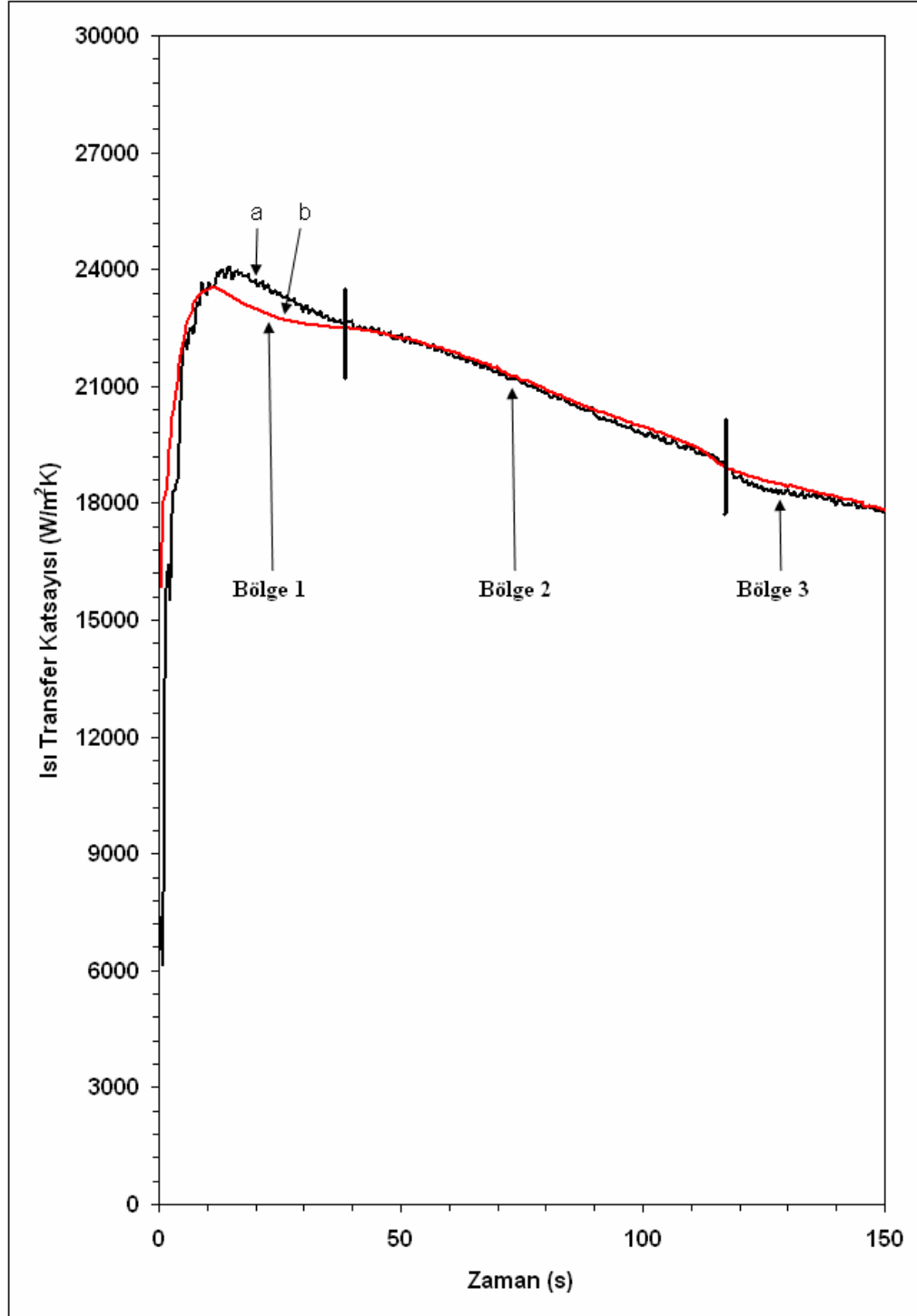
Şekil 5.9. 280 grit H13 soğutucuya karşı hesaplanan döküm-soğutucu ara yüzey ısı transfer katsayıları, a) deney 1, b) deney 2



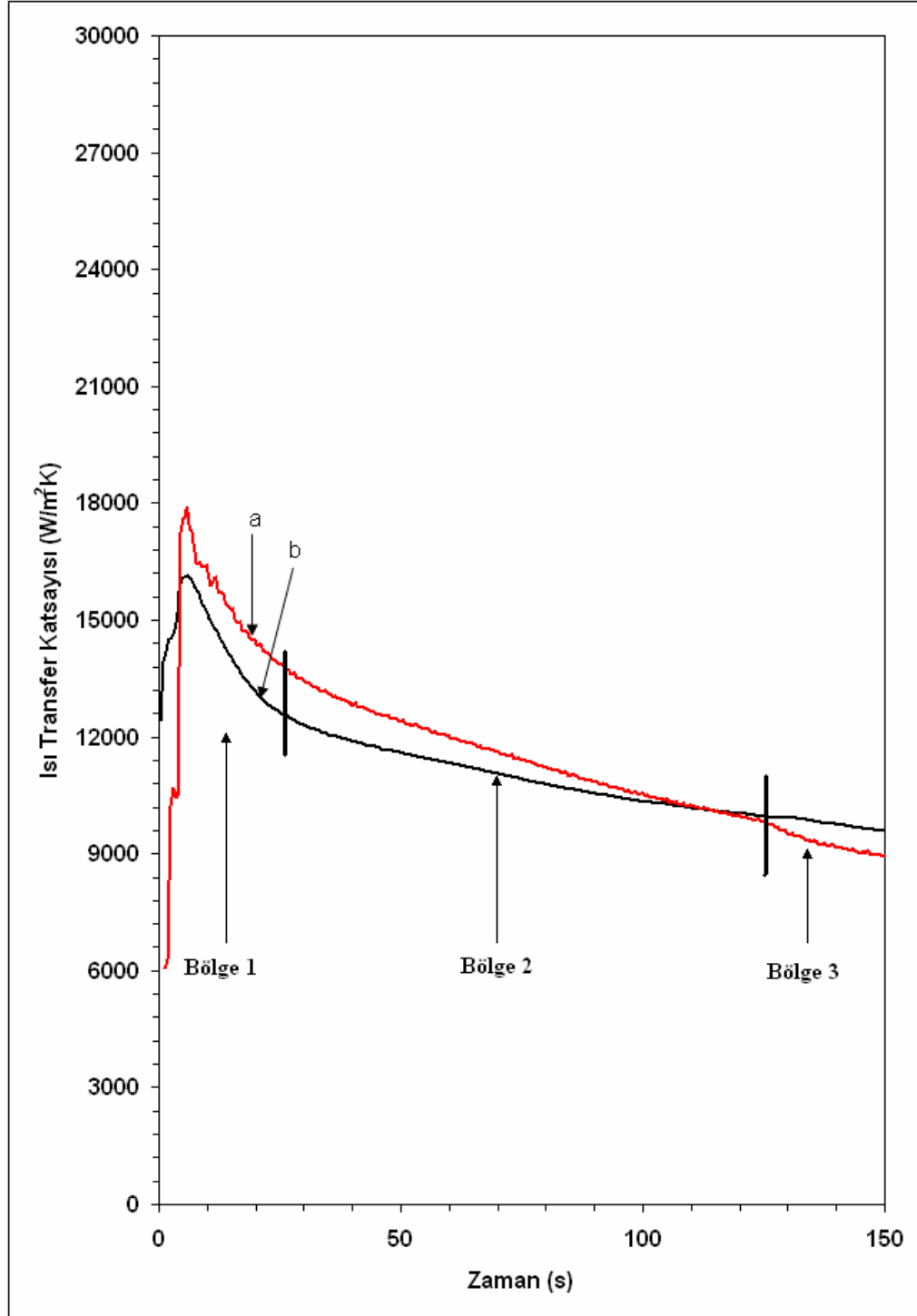
Şekil 5.10. 400 grit H13 soğutucuya karşı hesaplanan döküm-soğutucu ara yüzey ısı transfer katsayıları, a) deney 1, b) deney 2



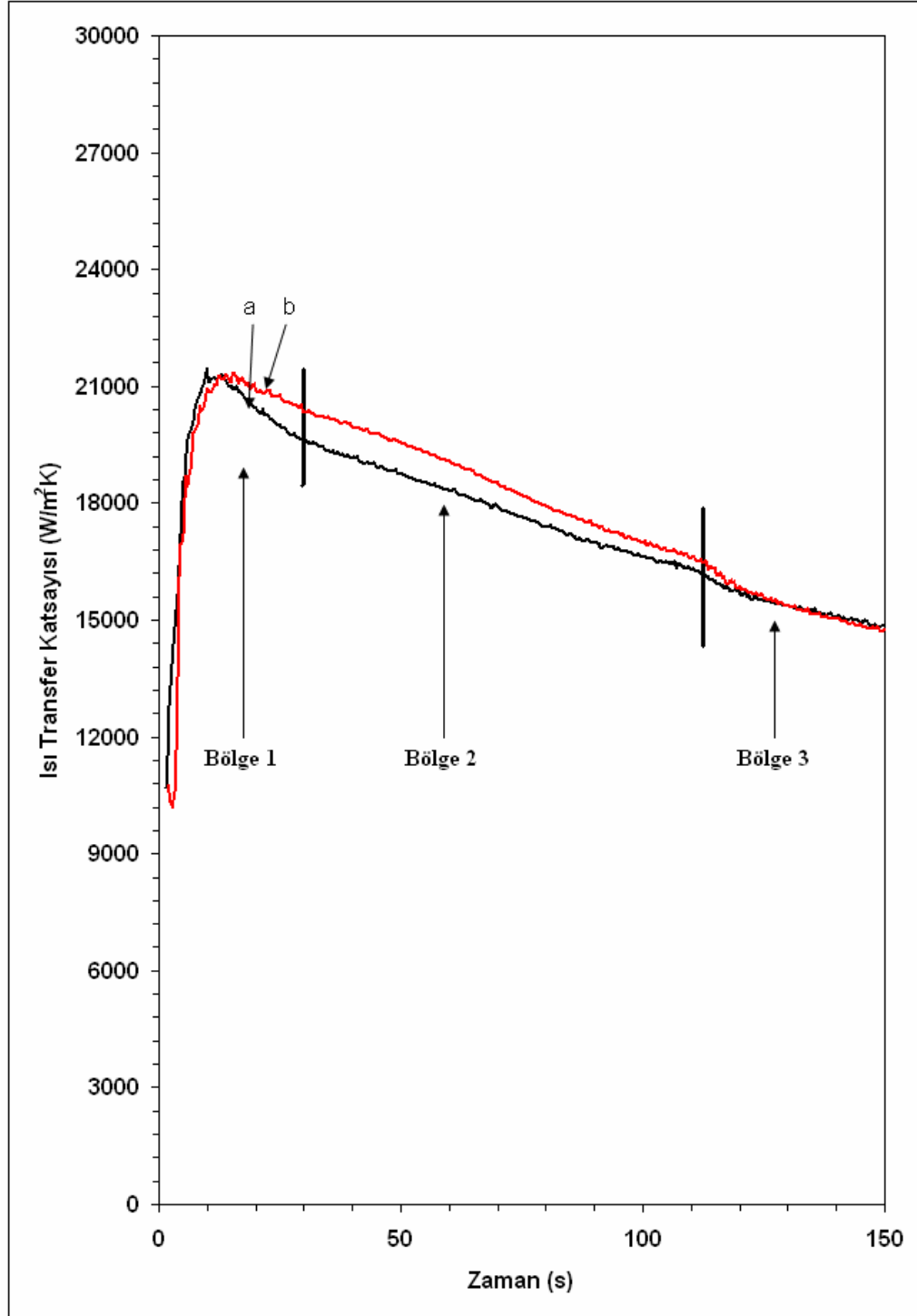
Şekil 5.11. 2400 grit H13 soğutucuya karşı hesaplanan döküm-soğutucu ara yüzey ısı transfer katsayıları, a) deney 1, b) deney 2



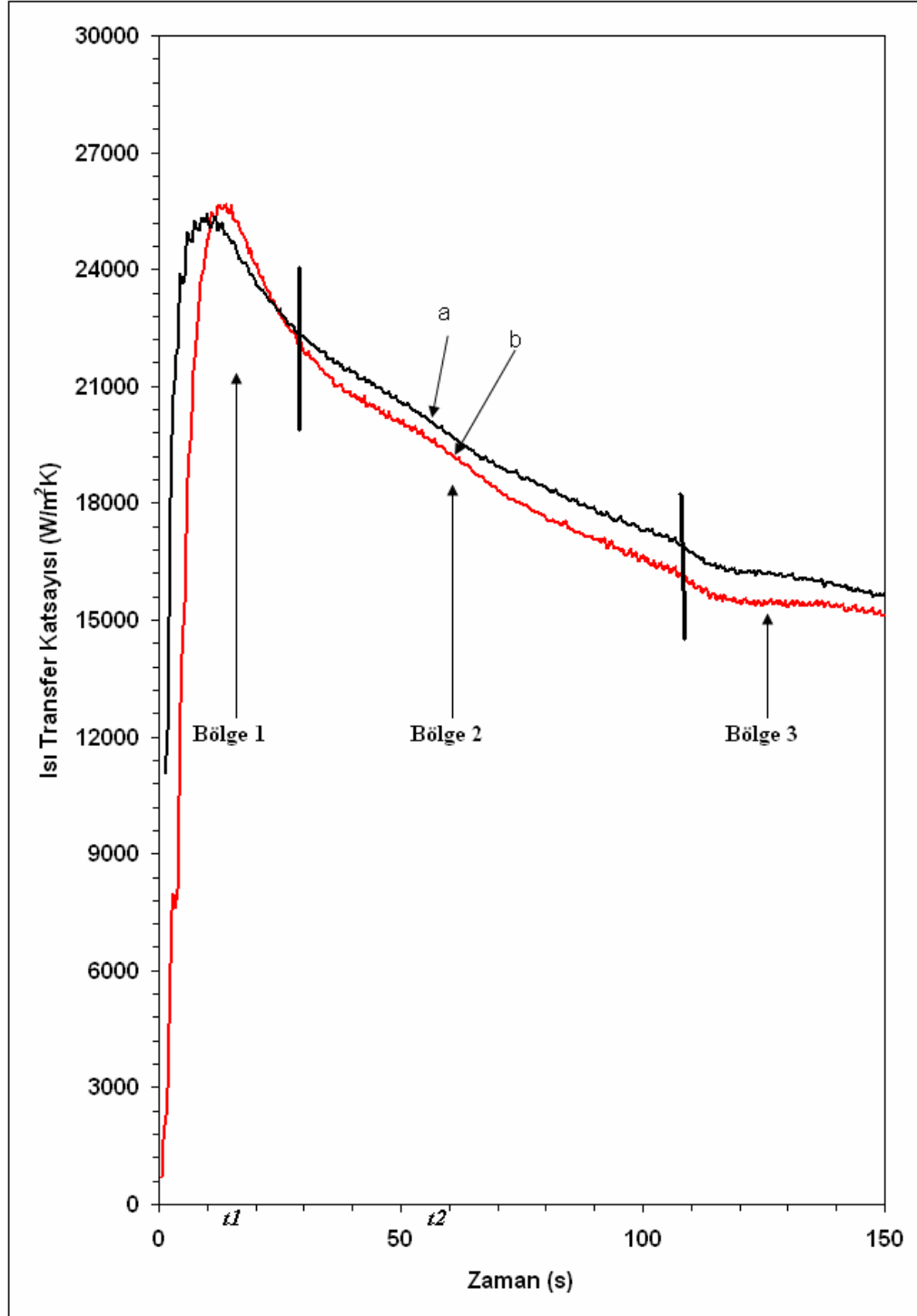
Şekil 5.12. 24 grit bakır soğutucuya karşı hesaplanan döküm-soğutucu ara yüzey ısı transfer katsayıları, a) deney 1, b) deney 2



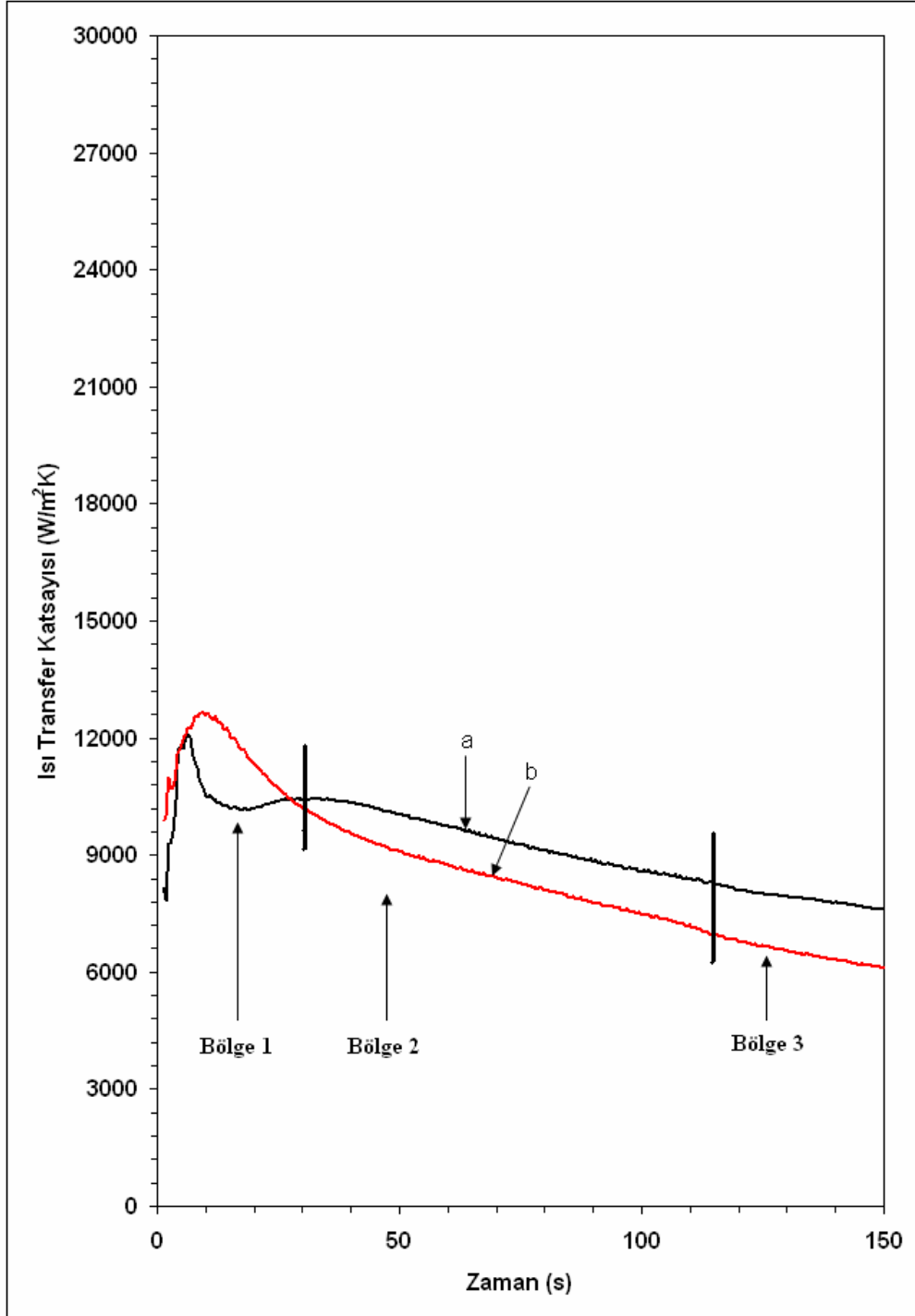
Şekil 5.13. 60 grit bakır soğutucuya karşı hesaplanan döküm-soğutucu ara yüzey ısı transfer katsayıları, a) deney 1, b) deney 2



Şekil 5.14. 280 grit bakır soğutucuya karşı hesaplanan döküm-soğutucu ara yüzey ısı transfer katsayıları, a) deney 1, b) deney 2



Şekil 5.15. 400 grit bakır soğutucuya karşı hesaplanan döküm-soğutucu ara yüzey ısı transfer katsayıları, a) deney 1, b) deney 2



Şekil 5.16. 2400 grit bakır soğutucuya karşı hesaplanan döküm-soğutucu ara yüzey ısı transfer katsayıları, a) deney 1, b) deney 2

6. TARTIŞMA

6.1. Döküm-Soğutucu Ara Yüzeyi

6.1.1. Soğutucu ve döküm parça yüzey pürüzlülüğü değişimi

Bu çalışmada ötektik Al-Si (ETIAL 140) alaşımının yüzeyleri değişik seviyelerde pürüzlendirilmiş H13 sıcak iş takım çeliği ve saf bakır kalıplara karşı katılaştırılması ile oluşan yüzey pürüzlülüğü değişimi ve ısı transfer katsayısındaki değişim araştırılmıştır. Soğutucular kalıbın alt kısmında kullanılmış ve döküm parçanın katılaşması yerçekimine ters yönde gerçekleştirilmiştir.

H13 çelik ve bakır soğutucunun aynı numaralı zımparada mekanik işlem görmesine rağmen yüzey pürüzlülük değerlerinin farklı olduğu Çizelge.5.1’ de görülmektedir. Bakır soğutucunun Ra değerleri H13 çelik soğutucuya göre aynı numaralı zımparalar için yaklaşık olarak iki kat daha fazladır. Bunun nedeni saf bakır (80 HV) ve H13 çeliğin (610 HV) farklı sertlik ve aşınma değerlerine sahip olmalarıdır. Yüzey hazırlama işlemlerinde doğal olarak sertlik değerleri ölçüsünde aynı numaralı zımpara ve aynı şartlar altında her iki malzeme farklı olarak aşınacak ve dolayısıyla da farklı yüzey pürüzlülük değerleri verecektir.

Farklı pürüzlülük değerlerine sahip H13 çelik ve bakır soğutuculara karşı elde edilen döküm yüzeylerin Ra değerlerinin ise birbirinden önemli derecede farklı olmadığı Çizelge 5.2 ve Çizelge 5.3’de görülmektedir. Bakır ve H13 çelik soğutucuların yüzey pürüzlülük değerleri birbirinden farklı olmasına karşın dökümlerin neredeyse tamamında yaklaşık olarak aynı döküm yüzey pürüzlülüğünün elde edilmesi, döküm parça yüzey pürüzlülüğü oluşumunun dökülen kalıbın yüzey pürüzlülüğüne çok fazla bağlı olmadığını göstermektedir. Sıvı metalin döküm anında kalıp malzemesini tam ıslatması ve sıvı metal-kalıp ara yüzeyinde gaz sıkışması gibi sebeplerle herhangi bir

boşluk olmaması durumunda döküm parçanın yüzeyinin kalıp yüzeyini bire bir kopyalaması beklenebilir. Ancak bu durumun pratik uygulamalarda mümkün olmadığı bilinmektedir [36, 93]. Bu çalışmada alınan sonuçlar da bu doğrultuda bir eğim göstermektedir. Bölüm 5.1’de verilen yüzey pürüzlülüğü ile ilgili sonuçlara bakıldığında bunun muhtemel iki nedeni olduğu görülmektedir. Bunlardan birincisi soğutucu-döküm ara yüzeyindeki mikro boşluklarda bulunan gazların sıvı metalin soğutucu yüzeyine temas ettiği anda hücrelerinde hapsolması ve genişmesi ile bağlantılıdır. Ara yüzeyde izole edilmiş olarak hapsolan bu gazlar genişterek henüz yeterince güçlenmemiş döküm kabuğunu döküm içine doğru deforme edebilmektedir. Bunun sonucu olarak döküm yüzeylerinde bazen milimetre ölçülerinde ve çıplak gözle görülebilecek şekilde gaz çukurları oluşmaktadır. Bu çalışmada da soğutucu yüzey pürüzlülüğünün çok yüksek olduğu 24 grit zımpara ile hazırlanmış bakır soğutucu yüzeyinden elde edilen döküm parça yüzeyinde (Şekil 5.1.e) gaz boşlukları oluşmamıştır. Ara yüzeydeki gazın bir miktarının döküm anında nispeten geniş ve derin olan ve muhtemelen soğutucu yüzeyinde bir ağ oluşturmuş pürüzlülük kanallarından dışarı atılmış olabileceği bir miktarının da bu kanallarda kalabileceği muhtemeldir. 2400 zımpara ile hazırlanmış ve en düşük yüzey pürüzlülüğü değerine sahip olan soğutucu yüzeyinden elde edilen döküm yüzeyinin köşelerinde gaz boşluğu görülmezken (Resim 5.2 ve Resim 5.3.a) diğer bölgelerinde çok yoğun gaz boşluğu görülmektedir. Bu durum yukarıda açıklandığı gibi ara yüzeyde sıkışan gazların köşelerden tahliyesinin gerçekleştiğini fakat merkezi bölgelerde gazların tahliyesi için çıkış kanalları bulunmadığını göstermektedir. Döküm parçaların yüzey pürüzlülüğünü tayin eden diğer muhtemel faktörlerin ise sıvı metalin üzerine döküldüğü soğutucu metalinin ıslatabilme yeteneği ile ilişkili olduğu tahmin edilmektedir. Sonuçlar döküm yüzeylerinin soğutucu yüzeylerini bire bir yansıtmadığını göstermektedir. Soğutucu yüzey pürüzlülük değerlerindeki büyük farklara rağmen bu soğutuculara karşı dökülen döküm yüzeylerinin neredeyse aynı pürüzlülük değerlerine sahip olduğu görülmektedir. Bu durum döküm yüzeyleri pürüzlülüğünün soğutucu yüzeylerinden bağımsız olarak oluştuğunu

göstermektedir. Değişik soğutucu yüzey pürüzlülükleri kullanılarak döküm yüzey pürüzlülüklerini araştıran bazı araştırmacılar da bu çalışmadakine benzer sonuçlar rapor etmişlerdir. Örneğin Kayıkçı [4] Al-%4,5Cu alaşımı ile yaptığı çalışmada dökümlerin yüzey pürüzlülüğünün oluşmasında döküm şartlarının soğutucu yüzey pürüzlülüğünden çok daha fazla etkili olduğunu bildirmiş ve soğutucunun altta olduğu ve metalin üstten döküldüğü durumda soğutucunun üstte olduğu ve metalin alttan doldurulduğu durumdan daha yüksek döküm yüzey pürüzlülük değerleri elde etmiştir. Bu çalışmada 2400 numaralı zımpara kullanarak hazırlanan bakır soğutucu yüzeyinin döküm parçaya verdiği yüzey pürüzlülük değeri ($R_a = 2.12 \mu m$) Kayıkçı'nın [4] aynı şartlar altında elde ettiği yüzey pürüzlülük değerine ($R_a = 2.57 \mu m$) çok yakındır. Ayrıca Kayıkçı'nın [4] 280 ve 60 grit zımpara ile hazırlanmış bu çalışmadan farklı olarak düz plaka soğutucu kullanarak elde ettiği döküm parça yüzey pürüzlülük değerleri de bu çalışmadaki sonuçlara yakındır. Yine bu çalışmadan elde edilen pürüzlülük değerleri Kayıkçı [4] ve Muojekwu'nun [36] çalışmalarında elde ettiği $R_a=3,2 \mu m$ 'dan düşük soğutucu yüzey pürüzlülüğünde döküm yüzey pürüzlülüğünün soğutucu yüzey pürüzlülüğünden yüksek olduğunu tersi durumda ise düşük olduğunu rapor ettiği sonuçları ile benzerlik göstermektedirler.

Sonuç olarak döküm parça yüzey pürüzlülüğünün oluşmasında sıvı metalin döküm şartları, sıvı metalin kalıbı ıslatabilme kabiliyeti, alaşım kompozisyonu, ara yüzeyde sıkışan gazların tahliyesi, kalıp malzemesi ve kalıp yüzey pürüzlülüğü etkilidir.

6.1.2. Döküm yüzeyinin deformasyonu

Döküm ve soğutucu yüzey profillerinin üst üste çakıştırılması ile elde edilen ara yüzey profilleri (Şekil 5.1 ve Şekil 5.2) döküm yüzeylerinin soğutucu yüzeyinin nominal olarak şeklini aldığı ve döküm yüzeylerinde herhangi içbükey veya dışbükey bir deformasyonun olmadığını göstermiştir. Ancak döküm yüzey kabuğunun şeklini inceleyen birçok araştırmacı bir metal

soğutucuya karşı katılan döküm kabuğunda içbükey veya dışbükey deformasyonlar oluştuğunu rapor etmişlerdir. Örneğin Niyama [77, 79, 122] soğutucuya karşı katılan metal yüzeyinde oluşan deformasyonun çok güçlü olarak metalin kompozisyonuna bağlı olduğunu bildirmiştir. Niyama [77] ötektik altı bileşime sahip Al-Si alaşımlarında dışbükey (pozitif), ötektik üstü bileşime sahip Al-Si alaşımlarında içbükey (negatif) deformasyon oluştuğunu bildirmesine karşın bu çalışmada olduğu gibi ötektik Al-Si alaşımını kullanarak yaptığı deneylerde döküm yüzeylerinde net olarak pozitif veya negatif deformasyon gözlemleyememiştir. Niyama [122] başka bir çalışmada saf bizmut ve saf kalay metallerinin dökümünde dışbükey deformasyon, Sn-%57Bi alaşımının döküm yüzeyinde ise içbükey deformasyon oluştuğunu ve Sn-%27Bi alaşımında ise herhangi bir deformasyon olmadığını rapor etmiştir. Hallam [52,81] Al-%13Si alaşımında yüzeyi Cr_2O_3 kaplanmış H13 çelik soğutucuya karşı deformasyon olmadığını buna karşın yüzeyi Dycote 140 ile kaplı H13 çelik ve kaplamasız bakır soğutucuya karşı dışbükey deformasyon oluştuğunu rapor etmiştir. Hallam [52,81] yaptığı çalışmalarda soğutucu yüzey profilini son derece düzgün bir yüzey olarak kabul etmiştir. Yapılan bu çalışmada ise soğutucu ve döküm yüzey profilleri ayrı ayrı elde edilerek birbiri ile uyumu incelenmiştir.

6.1.3. Soğutucu malzemesine bağlı döküm ara yüzeyinin mikroyapı ve tane yapısı

Aşırı soğuma şartlarında kalıba ilk temas eden sıvı sıcaklık farkının çok fazla olmasından dolayı kararsız ve difüzyonsuz katılaşmaya maruz kalır ve kalıp yüzeyinde pre-dentritik olarak çekirdeklenir. Daha sonra katılaşma bu pre-dentritik çekirdeklerin üzerinde dentritik büyüme ile devam eder [9,12]. Bakır ve H13 çelik soğutuculara karşı yapılan döküm yüzeylerinde Resim 5.5- Resim 5.8'de görüldüğü gibi pre-dentritik yapı oluşmuştur. Bakır soğutucuya karşı yapılan dökümlerin yüzeyinde pre-dentritik alanlar H13 çelik soğutuculara karşı dökülen döküm yüzeylerine göre daha etkindir. Bu farkın bakırın ısı iletkenliği ve aşırı soğutma kabiliyetinin (supercooling) H13 çeliğe

göre daha yüksek olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. H13 çelik soğutucu üzerinde katılaştıran döküm yüzeyi için hesaplanan soğuma eğrisi (Şekil 5.5) incelendiğinde döküm yüzey sıcaklığı (T_C) ilk 15–20 saniyeden sonra toplam katılma süresince yaklaşık 760 K’ de sabit kalmıştır. Buna paralel olarak soğutucu yüzey sıcaklığı (T_M) da 15–20 saniyeden sonra sabit seyretmektedir. Bu durum soğutucu ve döküm yüzeyinde ısı yoğunluğunun meydana geldiğini ve ısıнын dökümden bakır soğutucuya göre çok daha yavaş iletildiğini göstermektedir. Sonuç olarak döküm yüzeyinde katı difüzyon için yeterli sıcaklık ve süre mevcuttur. H13 çelik soğutucu ile yüzeyine dökülen sıvı metal arasında başlangıçta çok yüksek olan sıcaklık farkından dolayı pre-dentritik yapının oluştuğu fakat daha sonra yüzeyin uzun süre yaklaşık 760 K’ de kalmasından dolayı yüzeyde katı difüzyon yolu ile kararsız yapıdaki pre-dentritik yapı etkisinin azaldığı düşünülmektedir (Resim 5.8). Bakır soğutucuda ise döküm yüzeyinde meydana gelen pre-dentritik yapı katı difüzyonu için uygun şartların oluşmamasından dolayı orijinal yapısını korumuştur (Resim 5.5–Resim 5.7).

24 grit zımpara ile hazırlanan H13 çelik soğutucu üzerinde katılaştıran çiziklerin içine giren dökümlerin yüzeyinde mikro çatlaklar görülmüştür, Resim 5.9. Yalnız 24 grit zımpara ile hazırlanan H13 çelik soğutucu üzerinde katılaştıran dökümlerin yüzeyinde oluşan mikro çatlakların katılma sırasında sıvı metalin statik basıncından kaynaklandığı düşünülmektedir. Çünkü sıvı metal kalıba döküldüğü anda yüzeyde aşırı soğumadan dolayı metal katılaşmaya başlar. Katılaştıran ilk metal kabuğun dayanımı oldukça düşüktür. Katılaşmanın ilerlemesi ile metal kabuğun kalınlığı ve dayanımı artar. Yüzeyde katılaştıran metalin kalınlığının ilerleme hızı kalıbın ısı iletim hızı ile orantılıdır. Soğutucunun altta bulunduğu durumda sıvı metal katılaştıran metal kabuğun üzerine yerçekiminin etkisinden dolayı yüksekliği ile doğru orantılı bir statik basınç uygular. Bu statik basınç etkisini katılaştıran metal kabuğun belirli bir dayanımına kadar gösterir. 24 grit H13 soğutucu yüzeyindeki oyukların içine giren metal katılaştıktan sonra ara yüzeyde sıcaklık çok yavaş düştüğü için bakır soğutucuya göre daha uzun süre statik basınç etkisinde kalmaktadır.

Dolayısıyla bu statik basınç dayanımı son derece düşük olan metal kabuğu 24 grit H13 soğutucu yüzeyinde nispeten derin ve geniş çiziklerin içine daha fazla girmeye zorlaması ile çatlakları oluşturmuştur.

Ötektik Al-Si alaşımı dökümünde normal şartlarda birincil (primer) silisyum kristalleri görünmez. Ancak bu çalışmada kullanılan Al-Si alaşımı hafifçe ötektik üstü Si bileşimindedir. Resim 5.10'da bakır yüzeyinden elde edilen döküm yüzeylerinde birincil silisyum fazı görünmezken H13 soğutucu yüzeyine dökülmüş döküm yüzeylerinde birincil silisyum fazı görülmüştür. Bu durum sıvı metalin ısı iletkenliği H13 çeliğe göre daha yüksek olan bakır soğutucu üzerinde daha aşırı soğuması ile açıklanabilir. Çünkü ara yüzeyden 5 mm mesafede ölçülen metal sıcaklık eğrisinden görüleceği üzere bakır soğutucu üzerinde katılaşan dökümde ötektik duraklama görülmezken (Şekil 5.6, TC4 eğrisi) H13 çelik soğutucu üzerinde katılaşan dökümde 840 K' de ötektik duraklama gözlenmiştir (Şekil 5.5, TC4 eğrisi). Bakır soğutucu üzerinde daha hızlı katılaşmadan dolayı ötektik sıcaklık daha fazla düşmüş ve ötektik nokta daha yüksek Si bileşimine yükselmiştir. Bununla birlikte yüksek soğuma hızı çözelti içindeki çözünen element miktarını arttır ve faz diyagramındaki katı eriyik noktasını soğuma hızına bağlı olarak daha yüksek değerlere kaydırır [1,12]. Bakır soğutucu şartlarında Al-Si alaşımı yüzeyde tam ötektik noktada katılaşmış (Resim 5.11.a) ve H13 soğutucu şartlarında ise ötektik noktanın çok az üzerinde katılaşmıştır (Resim 5.12.a). Niyama [123] Al-%16.8Si alaşımı ile yaptığı akıcılık deneylerinde aşırı soğutma deneylerinde ilk katılaşan metalin ötektik ve daha sonra katılaşan metalin ise ötektik ve birincil silis fazından oluştuğunu ve bunun da aşırı soğumaya bağlı olduğunu bildirmiştir. Hallam [81] de Al-%13 Si alaşımında bakır ve H13 çelik soğutucu şartlarında benzer mikro yapıları belirlemiş fakat bunların nedeni ile ilgili bir açıklama yapmamıştır.

6.2. Zaman-Sıcaklık İlişkileri ve Ara Yüzey Isı Transfer Katsayıları

6.2.1. Zaman-sıcaklık ilişkileri

Dökümlerde ara yüzeyden 37,5 mm mesafede ölçülen ve bilgisayarda sonlu fark yöntemi ile hesaplanan sıcaklık eğrileri (Şekil 5.3 ve Şekil 5.4) arasında iyi bir uyum görülmüştür. Griffiths [47] ısı transferinin belirlenmesinde ölçülen ve hesaplanan sıcaklıklar arasındaki farkın ilk birkaç saniyeden sonra ± 20 °C'den az olması kullanılan malzemelerin termofiziksel özelliklerinin doğru seçildiğini ve kalıpta yapılan yalıtımın yeterli olduğunu belirtmiştir. Bakır soğutucu üzerinde katılan dökümde ara yüzeyden 37,5 mm mesafede ölçülen ve hesaplanan zaman-sıcaklık değerleri arasındaki fark 11 °C ve H13 çelik soğutucu üzerinde katılan dökümden ölçülen ve hesaplanan zaman-sıcaklık değerleri arasındaki fark 16 °C'den az bulunmuştur. Bakır ve H13 çelik soğutucuda ara yüzeyden 37,5 mm mesafede ölçülen ve hesaplanan sıcaklıklar arasındaki fark ise sırası ile 2 °C ve 6 °C'den daha azdır. Her iki soğutucu ile yapılan deneylerde ortak ara yüzeyden 37,5 mm mesafede hem döküm parça ve hem de soğutucudan ölçülen ve hesaplanan sıcaklıklar arasındaki fark Griffiths'in [47] bildirdiği sınırdan daha azdır. Bu sonuçlar malzemeler için kullanılan termofiziksel özelliklerin doğru seçildiği, tek yönlü katılma için yeterli yalıtımın sağlandığı, sıcaklıkların doğru ölçüldüğü ve ısı çift mesafelerinin doğru belirlendiğini göstermektedir.

Şekil 5.5 ve Şekil 5.6'daki zaman-sıcaklık eğrileri incelendiğinde ölçülen sıcaklıklar ile soğutucu (T_M) ve döküm yüzeyleri (T_C) için hesaplanan sıcaklıklar arasında iyi bir uyum olduğu görülmektedir.

İki nokta arasındaki sıcaklık farkının çok veya az olması malzemenin ısı iletim katsayısına bağlıdır. Diğer bir ifade ile döküm-kalıp sistemlerinde soğuma hızı ve dolayısıyla ısı transferi ısı iletiminin en düşük olduğu malzeme tarafından tayin edilir [1]. Bu konu Bölüm 2.1'de detaylı olarak verilmiştir. Çelik soğutucunun ısı iletim katsayısı ötektik alüminyuma göre çok daha

düşüktür, Çizelge 3.3. Şekil 5.5 deki TC1, TC2 ve TC3 numaralı soğutucu sıcaklık eğrileri ile TC4, TC5 ve TC6 numaralı döküm parça sıcaklık eğrileri incelediğinde soğutucudaki sıcaklık farkının çok fazla olduğu görülebilir. Başlangıçta soğutucu soğuk olduğu için sıvı metal kalıba döküldükten sonra kalıp yüzeyi hızlı bir şekilde ısınmış ve kalıba temas eden sıvı metal hızlı katılaşmaya maruz kalmıştır. Fakat H13 çeliğinin ısı iletimi çok düşük olduğu için yüzey sıcaklığının çok hızlı artmasına karşın soğutucunun iç bölgelerine sıcaklık artışı çok yavaş olmuştur. H13 çelik soğutucu üzerinde katılaşan döküm parçanın yüzeye 5 mm mesafesinde (TC4) ölçülen sıcaklık eğrisinden de görüldüğü gibi katılaşma noktasını yaklaşık 10 K düşürmüştür. Buna karşın soğutucunun yüzeye yakın olan bölgesi ısıyı absorbe ettikten sonra ısıyı atamadığı için döküm parçanın üst kısmı nispeten yavaş soğumuştur.

Soğutucu saf bakırın ötektik Al-Si alaşımına göre daha yüksek ısı iletim katsayısına sahip olmasından dolayı döküm metalindeki sıcaklık farkı soğutucudaki sıcaklık farkından daha fazla gerçekleşmiştir (Şekil 5.6). Sıvı metal kalıba döküldükten sonra soğutucu sıcaklıkları hızlı bir şekilde artmıştır. Soğutucunun 75 mm mesafesindeki sıcaklık (TC1) artışının birkaç saniyede gerçekleşmesi bakır soğutucunun ısıyı H13 çelik soğutucuya göre çok daha hızlı ilettiğini göstermektedir. Al-Si dökümde ara yüzeye 5 mm mesafedeki sıcaklık eğrisinde (TC4) herhangi bir yatay seyir görülmemektedir. 37.5 mm mesafede (TC5) kısa süreli yatay seyir ve 75 mm mesafede (TC6) biraz daha uzun süreli yatay seyir görülmüştür.

6.2.2. Ara yüzey ısı transfer katsayıları ve kullanılan soğutucu malzemesi arasındaki ilişki

Elde edilen veriler ara yüzey ısı transfer katsayılarının bakır soğutucularda H13 çelik soğutuculardan daha yüksek olduğunu göstermiştir. Literatürde [28, 29, 32, 36, 65, 124] kalıp malzemesinin ısı iletim özelliğinin artmasıyla ısı transfer katsayısı ve ısı transferinin arttığı bildirilmiştir. Çizelge 3.3' den de görüleceği gibi saf bakırın ısı iletim katsayısı H13 çelikten yaklaşık 12 kat

daha yüksektir. Sıvı metalin katılaşması tamamlanıncaya kadar belirlenen ortalama ısı transfer katsayıları bakır soğutucularda çelik soğutuculardan yaklaşık 3 kat daha yüksektir, Çizelge 5.4. Bu değerler Hallam [81], Taha [26] ve Michel [35]'in bildirdiği çelik-ötektik Al-Si ara yüzey ısı transfer katsayıları değerleri ile benzerlik gösterirken Krishnan [38] ve Lee [2,3], tarafından rapor edilen değerlerden daha yüksektir. Saf bakır soğutucu-döküm ara yüzeyinden elde edilen ısı transfer katsayılarının H13 çeliğe göre daha yüksek çıkması malzemelerin farklı ısı iletim katsayı değerlerinden kaynaklanmaktadır. Bu sonuçlar Hallam'ın [81] bildirdiği bakır soğutuculara karşı dökülen Al-Si alaşımları ve Kayıkcı'nın [4] bildirdiği bakır soğutuculara karşı dökülen Al-%4.5Cu alaşımı için ara yüzey ısı transfer katsayıları ile benzerlik göstermektedir.

Şekil 5.7–Şekil 5.11'de verilen H13 çelik soğutucu ve Şekil 5.12–Şekil 5.16 de verilen bakır soğutucu ötektik Al-Si döküm ara yüzey ısı transfer katsayı eğrileri şekil olarak birbirinden farklı olmasına rağmen üç bölgeden oluştuğu görülmektedir. Kirshnan ve Sharma [38] da ara yüzey ısı transfer katsayısı eğrilerini üç bölgede incelemiştir (Şekil 6.1).

Bölge 1

Her iki soğutucu durumunda ara yüzey ısı transfer katsayısı çok düşük bir değerden başlayarak hızlı bir şekilde en yüksek değere ulaşmıştır (Şekil 6.2 ve Şekil 6.3). Wang ve Matthays [51] bakır soğutucu üzerine sıvı alüminyum damlacığı damlatarak yaptıkları hızlı katılaştırma deneylerinde sıvı durumda ara yüzey ısı transfer katsayısının 80000–100000 W/m²K aralığında olduğunu bildirmişlerdir. Sıvı metal kalıba döküldüğü andan itibaren ara yüzey ısı transfer katsayılarının çok yüksek bir değerden başlayarak azalması gerekirken düşük bir değerden yaklaşık 10–15 s zaman aralığında en yüksek değere ulaşmıştır. Kim ve Lee [2,125] ilk 15 saniyeden daha kısa zaman aralığında döküm yüzeyinin katılaşmasından dolayı sıvı durumda ara yüzey ısı transfer katsayısı karakteristiğinin belirlemenin çok zor olduğunu

bildirmiştir. Ayrıca araştırmacılar ani döküm şartlarından kaynaklanan başlangıçta muhtemel hatalı sıcaklık ölçüm olasılığına dikkat çekmişlerdir. Bu hataların ani olarak sıvı metalin kalıbı doldurması ile ısı çiftlerin sıcaklıkları algılayamaması ve döküm sıvı metalin çalkalanmasından kaynaklandığını belirtmişlerdir. Bu çalışmada da Kim ve Lee'nin belirttiği gibi yaklaşık olarak ilk 15 saniye sonunda ara yüzey ısı transfer katsayıları en yüksek değere ulaşmıştır, Şekil 6.2 ve Şekil 6.3. Bölge 1'deki en yüksek ısı transfer katsayısı değerine kadar olan zaman aralığındaki ısı transfer katsayısı ihmal edilmiştir.

Sıvı metalin kalıbı doldurması sırasında kalıp içinde oluşan çalkalanmadan dolayı soğutucu yüzeyinde sıvı metal katı kabuk oluşturamaz. Döküm işlemi tamamlandığında çalkalanma daha fazla devam etmez ve döküm-soğutucu arasında uyumlu temas oluşur. Sıvı metalden soğutucunun ısıyı çekmeye başlaması ile soğutucu üzerinde ince düzgün bir katı kabuk oluşur (bakınız Bölüm 2.2.1). Ara yüzeyin üzerindeki sıvı metal oluşan katı kabuğa hidrostatik baskı yapar. Bakır soğutucunun yüksek ısı iletkenliğinden dolayı Bölge 1 30 saniye sürmüştür. Ancak daha düşük ısı iletimine sahip olan çelik soğutucuda bölge 1 120 saniyede gerçekleşmiştir. Döküm yüzeyinde oluşan katı kabuk katılaşmanın devam etmesiyle kalınlaşır ve ara yüzeye gelen hidrostatik basınç etkisi azalır. Bölge 1'deki ara yüzey ısı transfer katsayısı soğutucu yüzeyini sıvı metalin ıslatabilme kabiliyeti, döküm sıcaklığı, yüzey pürüzlülüğü, kalıp sıcaklığı, soğutucunun ısı iletkenliği, sıvı metalin çalkalanması ve hidrostatik basınç gibi birçok parametreden etkilenir.

Bölge 2

Soğutucu üzerinde yeterli katı metal kabuk oluştuktan sonra katılaşan metalin çekmesinden dolayı metal ve soğutucu arasında uyumlu temas sona erer ve bölge 2 başlar. Bakır soğutucuda yarı uyumlu temasın devam etmesi ve soğutucunun yüksek ısı iletiminden dolayı ısı transfer katsayısı katılaşma süresince sürekli olarak düşme göstermiştir (Şekil 6.2). Buna karşın ısı

transfer katsayısı çelik soğutucuda katılaşma süresince yaklaşık olarak sabit değerde devam etmiştir. Bunun sebebi çelik soğutucunun bakır soğutucuya göre daha düşük ısı iletim katsayısına sahip olması ve çelik soğutucuda ısı yoğunluğunun neden olduğu soğutucu ve döküm arasındaki sıcaklık farkının azalması (Şekil 5.5) gösterilebilir. İlave olarak soğutucu-döküm ara yüzey temas uyumluluğunun bakır soğutucu-döküm ara yüzeyine göre daha iyidir. Bu bölgede ara yüzey ısı transfer katsayısı üzerinde soğutucu-döküm ara yüzey uyumluluğu, katılaşma yönü, soğutucunun ısı iletim katsayısı ve yüzey pürüzlülüğü, döküm parça yüksekliği ve hacmi ve basınç etkili olan önemli parametrelerdir.

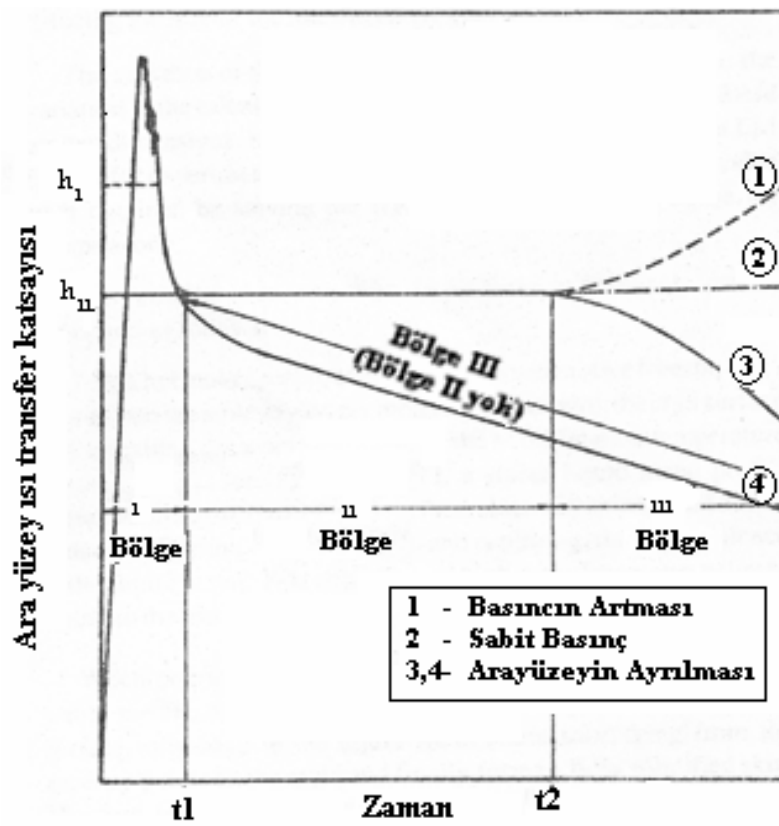
Bölge 3

Bakır soğutucu kalıpta metalin katılaşması tamamlandıktan sonra bakırın yüksek iletkenliğinden dolayı ara yüzey ısı transfer katsayısı sürekli olarak daha düşük değerlere gerilemiştir. Diğer yandan çelik soğutucudaki ara yüzey ısı transfer katsayısı katılaşma tamamlandıktan sonra çok az düşmüş ve soğuma süresince sabit bir değerde devam etmiştir. Bu durum katılaşan metalin çekme etkisi soğutucunun genleşme etkisi tarafından dengelenmesinden kaynaklanmış olabilir. Bu konu 124 numaralı kaynakta detaylı olarak açıklanmıştır.

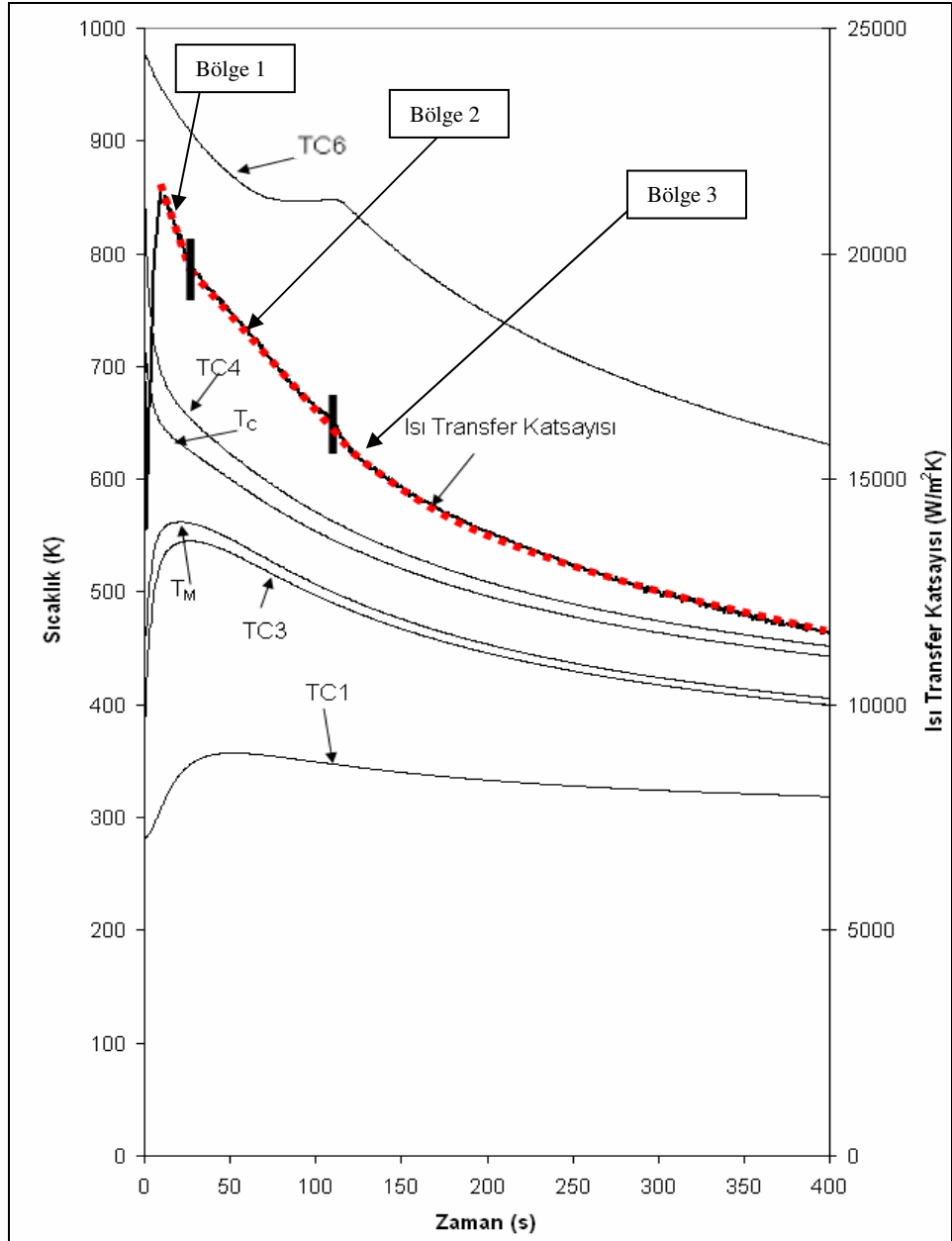
Bölge 3'ün başlangıcındaki ara yüzey ısı transfer katsayısındaki azalma döküm metalinin tamamen katılaşması ile sisteme giren ergime gizli ısısının bitmesi ve dolayısı ile ara yüzeyden geçen ısı transferinin azalması ile de açıklanabilir. Ara yüzey ısı transfer katsayısı transfer olan ısınsın yüzey sıcaklıkları farkına oranıdır. Dolayısı ile ara yüzeyden geçen ısı miktarının artması veya azalması direkt olarak ara yüzey ısı transfer katsayısını etkileyecektir.

Şekil 6.1'de bölge 3'de 3 numara ile verilen ara yüzey ısı transfer katsayısı eğrisi Şekil 6.3'deki çelik soğutucuya karşı katılaşan ötektik Al-Si döküm ara

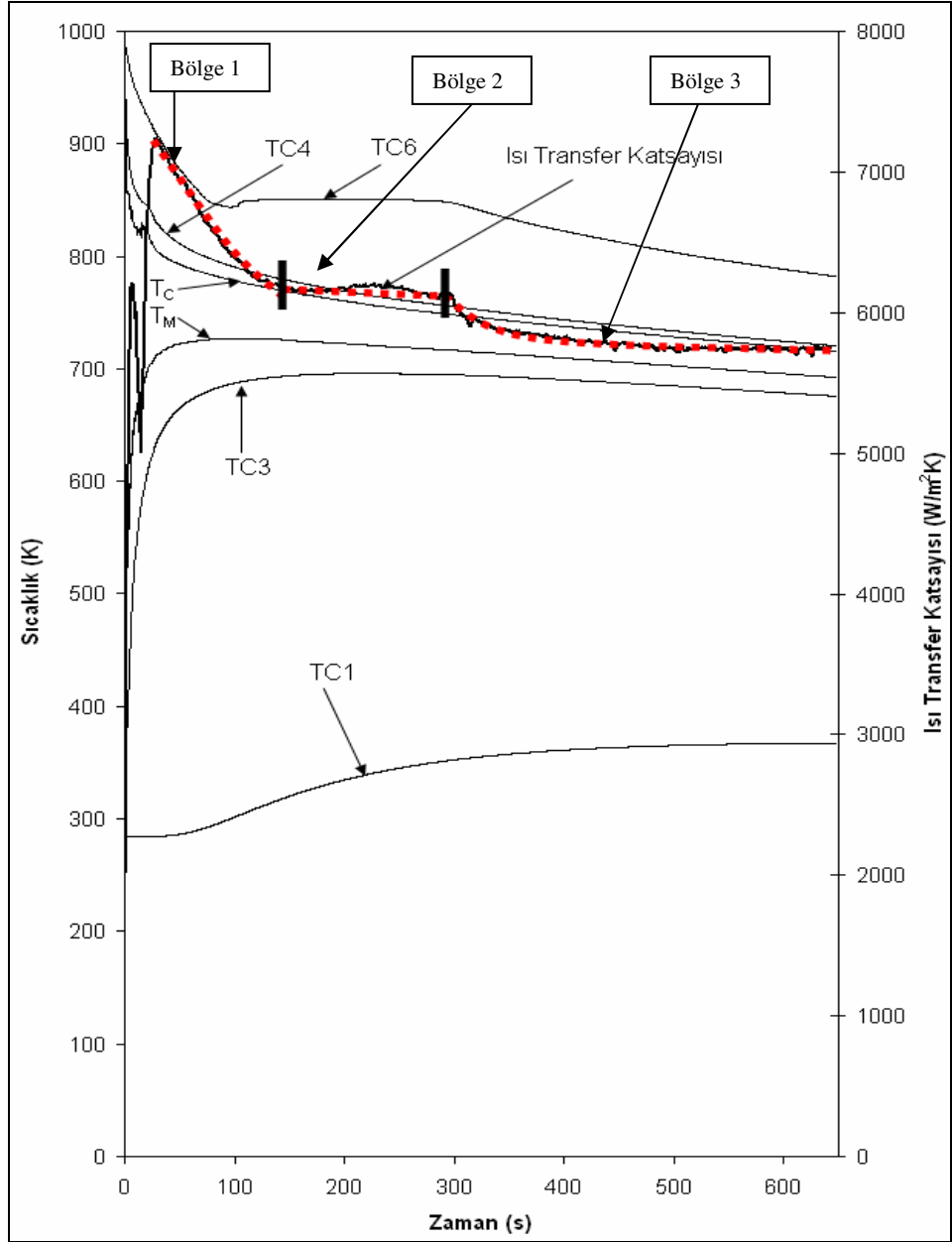
yüzey ısı transfer katsayısı ile benzerlik göstermektedir. Buna karşın bakır soğutucu yüzeyinde katılaştıran ötektik Al-Si döküm ara yüzey ısı transfer katsayısı eğrisi üç bölgeden oluşmasına karşın Şekil 6.1'de bölge 3'de 4 numara ile verilen ara yüzey ısı transfer katsayısı eğrisi ile uyumludur.



Şekil 6.1. İdealize edilmiş ara yüzey ısı transfer katsayısı eğrileri [38]



Şekil 6.2. Bakır soğutucu ve ötektik Al-Si alaşımından ölçülen ve yüzeylerden hesaplanan sıcaklıklar ve bu sıcaklıklar yardımı ile hesaplanan ara yüzey ısı transfer katsayısı



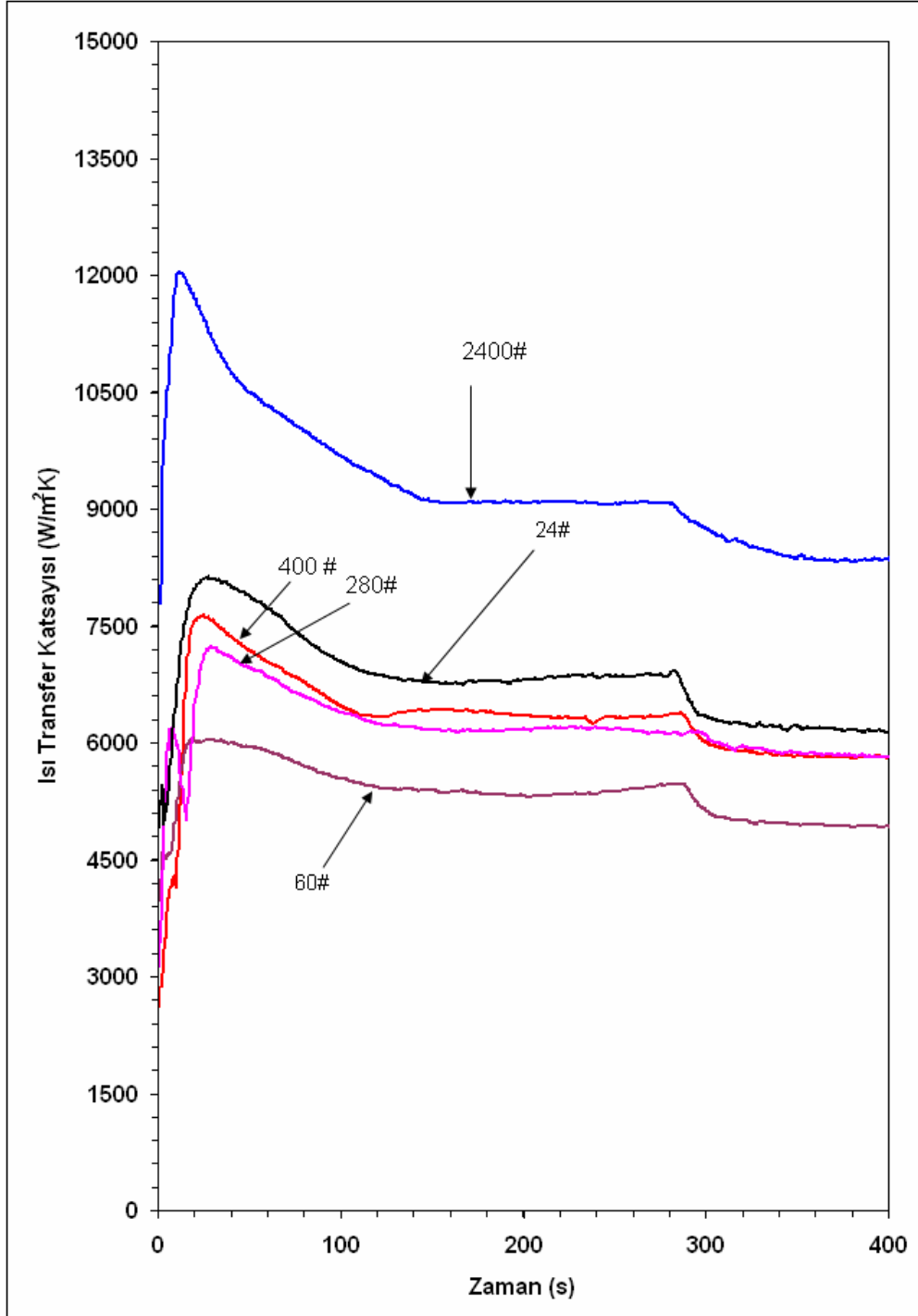
Şekil 6.3. H13 çelik soğutucu ve ötektik Al-Si alaşımından ölçülen ve yüzeylerden hesaplanan sıcaklıklar ve bu sıcaklıklar yardımı ile hesaplanan ara yüzey ısı transfer katsayısı

6.2.3. Soğutucu ve döküm yüzey pürüzlülüğünün ısı transfer katsayısına etkileri

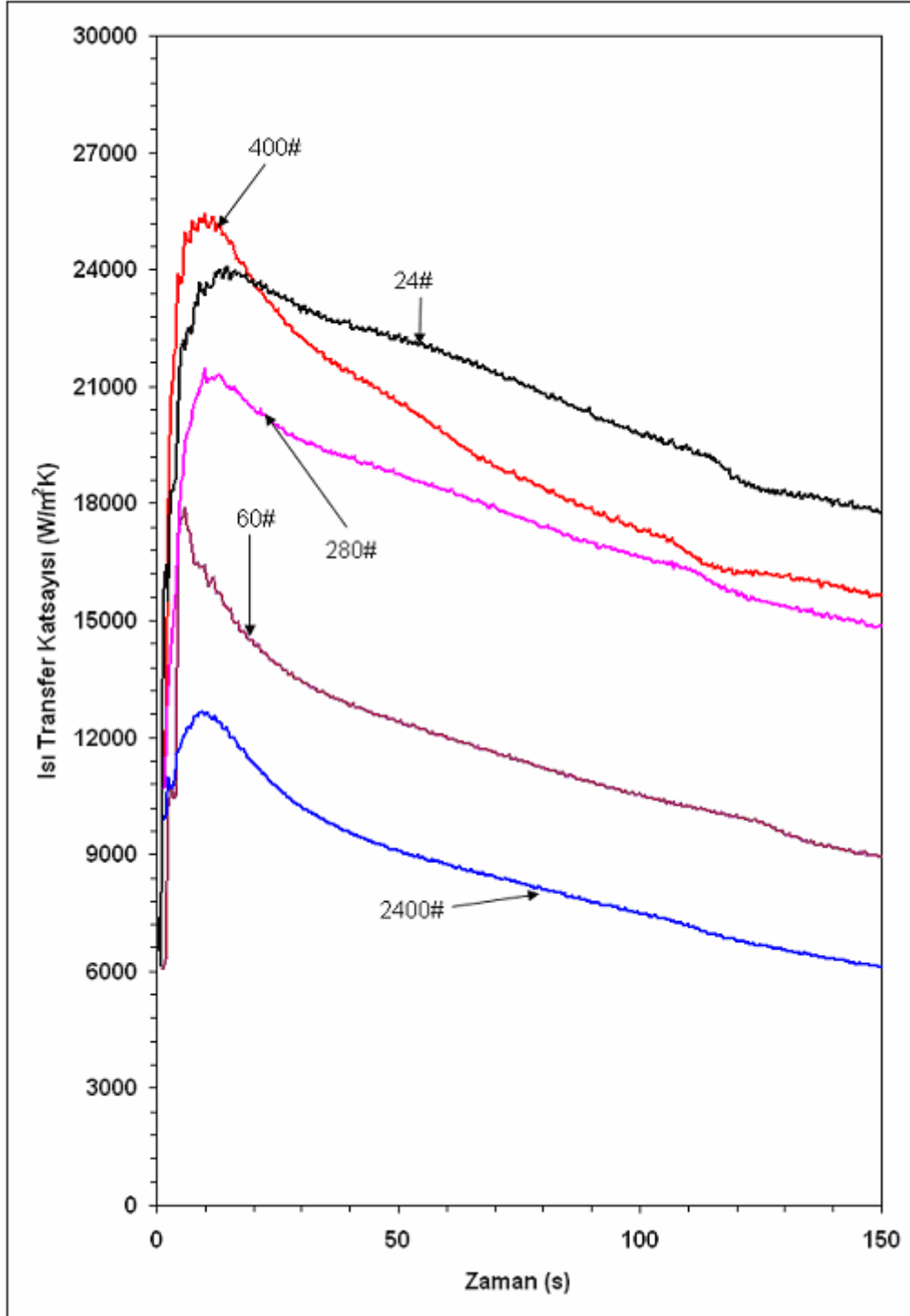
Soğutucu yüzey pürüzlülüğünün ısı transfer katsayısını nasıl etkilediği sorusu henüz tam olarak cevaplandırılamamıştır. Ancak soğutucu yüzey pürüzlülüğünü değiştirerek döküm parçanın katılaşması ve soğuması aşamalarında elde edilen ara yüzey ısı transfer katsayıları gerçek ısı transfer mekanizmalarını anlamamızı sağlayabilir. Bu anlamda yapılan çalışmalar oldukça azdır [4, 26, 36, 51, 71, 72].

Yerçekimi yönüne ters katılaşma şartlarında değişik soğutucu yüzey pürüzlülükleri kullanılarak elde edilen ısı transfer katsayıları, döküm parça yüzey görüntüleri ve ara yüzey profilleri birlikte değerlendirilerek ara yüzey ısı transfer katsayısını etkileyen mekanizmalar tartışılmalıdır. Resim 5.1-Resim 5.4'deki ara yüzey makro yapı fotoğraflarından çok düşük soğutucu yüzey pürüzlülüklerinde ara yüzeyde hava hapsolmesi meydana geldiği buna karşılık çok yüksek pürüzlülüklerde ise döküm metalinin soğutucu yüzeyinde bulunan çiziklerin (kanalların) içine girdiği görülmektedir. Aynı zamanda Şekil 5.1 ve Şekil 5.2'deki yüzey profilleri de döküm parça ve soğutucu yüzeyleri arasında soğutucu yüzey pürüzlülüğüne bağlı ara yüzey teması hakkında genel bir yaklaşım sağlamaktadır.

Şekil 6.4 ve Şekil 6.5'den de görüleceği üzere 24 grit zımpara pürüzlülüğünde elde edilen ısı transfer katsayıları sadece yüzey pürüzlülük değeri ele alındığında beklenen ısı transferi değerlerin üzerinde çıkmıştır. Resim 5.1 ve Resim 5.4'deki döküm yüzeyinden alınan yüzey görüntüleri 24 grit zımpara pürüzlülüğünde sıvı metalin soğutucu yüzeyinde bulunan oyukların içine bir miktar girdiğini göstermektedir. 24 grit zımpara pürüzlülüğünde elde edilen pürüzlülük genişliğinin metalin soğutucu yüzeyinde bulunan kanalları kısmen doldurması için yeterli olduğunu söyleyebiliriz. Holman [16] birbirine temas eden iki yüzey arasında gerçek temas alanı arttıkça ısı transferinin arttığını bildirmiştir.



Şekil 6.4. Değişik yüzey pürüzlülüğünde H13çelik soğutucu kullanılarak elde edilen döküm/soğutucu ara yüzey ısı transfer katsayıları



Şekil 6.5. Değişik yüzey pürüzlülüğünde bakır soğutucu kullanılarak elde edilen döküm/soğutucu ara yüzey ısı transfer katsayıları

24 grit zımpara pürüzlülüğünde soğutucu yüzeyinde bulunan kanalları kısmen dolduran döküm alaşımı temas eden yüzeyler arasındaki gerçek temas alanını arttırmıştır. Bu yüzden, bu çalışmada 24 grit zımpara pürüzlülüğünde beklenenden daha yüksek ısı transfer katsayısı elde edilmesinin gerçek temas alanının artmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Benzer bir tezat da 2400 grit zımpara pürüzlülüğünde hazırlanan soğutucu yüzeylerine karşı yapılan dökümlerden ölçülen ısı transfer değerlerinde görülmektedir. H13 çelik soğutucuda beklenildiği gibi en yüksek ısı transfer katsayısı elde edilmesine rağmen bakır soğutucuda beklenenin aksine 2400 grit soğutucu yüzeyine karşı yapılan dökümde en düşük ısı transfer katsayısı elde edilmiştir. Şekil 5.2.a ve Resim 5.2 birlikte değerlendirildiğinde döküm metali ve bakır soğutucu ara yüzeyinde çok fazla boşluklar meydana geldiği görülmektedir. Döküm yüzeyinin köşelerinde yaklaşık 1 mm'lik bir genişlikte boşluk görünmezken döküm yüzeyinin diğer bütün bölgelerinde çok yoğun boşluklar görülmüştür. Şekil 5.1.a ve Resim 5.3.a'dan da görüleceği gibi benzer durum H13 çelik soğutucu kullanılan döküm yüzeylerinde de meydana gelmiştir. Bu durumun sıvı metalin kalıba dökümü sırasında ara yüzeyde sıkışan gazların ara yüzeyden kaçışını sağlayacak yeterli pürüzlülüğün olmamasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Kayıkçı'da [4] 2400 ve 4000 grit zımpara pürüzlülüğünde ara yüzeyde çok yoğun boşluk meydana geldiğini ve bu boşluklara ara yüzeyde sıkışan gazların sebep olduğunu bildirmiştir. Bakır soğutucu şartlarında elde edilen döküm yüzeyindeki boşluklar (Resim 5.2) birbiri ile bağlantılı ve karmaşık çizgi şeklinde görülürken çelik soğutucu şartlarında oluşan döküm yüzeyindeki boşluklar (Resim 5.3.a) geniş, daha derin ve birbirinden ayrıdır (Şekil 5.1.a). Şekil 5.5 ve Şekil 5.6'daki soğuma eğrileri ve Resim 5.11 ve Resim 5.12'deki ara yüzeye dik kesitte alınan mikro yapı görüntüleri bakır soğutucunun çelik soğutucudan çok daha hızlı bir katılaşma sağladığını göstermektedir. Bakır soğutucu şartlarında hızlı katılaşmadan dolayı ara yüzeyde sıkışan gazların katılaşan metal kabuğu hareket ettirip döküm metalinin içine doğru giremediği

ve dolayısı ile boşlukların çizgisel şekilde oluştuğu düşünülmektedir. Buna karşın Resim 5.9'de döküm yüzeyinde oluşan yırtılmadan da anlaşılacağı üzere H13 çelik soğutucu şartlarında döküm yüzeyinin bakır soğutucuya göre daha uzun bir süre elasto-plastik kaldığı kuvvetle muhtemeldir. Yine bu duruma paralel olarak Resim 5.12'de görülen dentritlerin soğutucuya temas eden yüzeyden başlaması ara yüzeyde bakır soğutucu gibi çok hızlı bir soğuma oluşmadığını göstermektedir. Bütün bu durum ve şartlar göz önünde tutulduğunda 2400 grit zımpara ile yüzeyi pürüzlendirilmiş H13 çelik soğutucu ve döküm parça ara yüzeyinde sıkışan gazların bir araya toplandığı ve çok ince elasto-plastik katı kabuk tabakasını hareket ettirerek döküm parçanın içine ilerlediği düşünülebilir. Aynı zamanda gazlar yukarı doğru hareket ederken gazların boşalttığı alanlar yerçekiminden kaynaklanan sıvı metalin statik basıncından dolayı metal tarafından doldurulduğu söylenebilir (Şekil 5.1.a). Yine Resim 5.3.a döküm yüzeyi ve Resim 5.3.b'de döküm yüzeyinin temas ettiği soğutucu yüzeyinden de görüleceği üzere metalin statik basıncının döküm metali üzerinde bakır soğutucudan daha uzun süre etkili olduğu düşünülebilir. Bu durum 2400 grit H13 soğutucu ve döküm metali arasında boşlukların dışında kalan (Resim 5.3.b açık renkli bölgeler) bölgelerde iki yüzeyin çok iyi temas ettiğini göstermektedir. Sonuç olarak 2400 grit zımpara ile yüzeyi pürüzlendirilmiş çelik soğutucu ve döküm metali ile temas eden gerçek temas alanı bakır soğutucu ile temas eden alandan çok fazla olması ısı transfer katsayısının yüksek çıkmasını sağlamıştır.

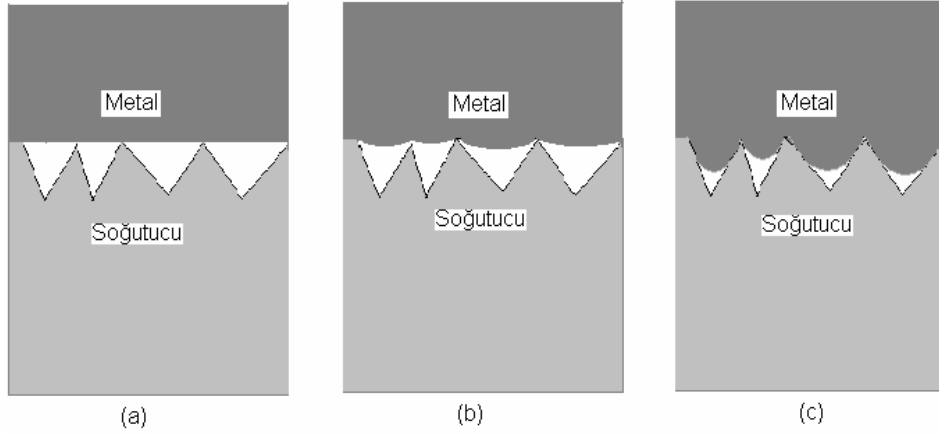
60, 280 ve 400 grit zımpara pürüzlülüğünde hem çelik ve hem de bakır soğutucu için yüzey pürüzlülüğünün artması ile ısı transfer katsayısı azalma göstermiştir. Özellikle her iki durumda 60 grit zımpara ile hazırlanan soğutucu yüzeylerine yapılan dökümlerde belirgin bir düşüş gözlenmiştir (Şekil 6.4 ve Şekil 6.5). 280 ve 400 grit zımpara pürüzlülüğünde pürüzlülük değerlerinin (Çizelge 5.1) birbirine yakın olmasından dolayı ısı transfer katsayılarında da yakın değerler elde edilmiştir. 60 grit zımpara pürüzlülüğünde (Çelik için $Ra=2.47\mu m$, bakır için $Ra=4.2\mu m$) oyuk derinlikleri 280 ve 400 grit zımpara pürüzlülüğüne göre daha fazladır. 24 grit zımpara pürüzlülüğünde olduğu gibi

60 grit zımpara pürüzlülüğünde bu oyukların içine döküm metalinin girememesinden dolayı metal-kalıp teması sadece pürüzlülüklerin tepe noktasında gerçekleşmekte ve gerçek temas alanı azalmaktadır. 60 grit zımparada pürüzlülük derinliklerinin 280 ve 400 grit zımparaya göre çok daha fazla olması ara yüzey ısı transferinde belirgin bir düşüşe sebep olmuş olabilir.

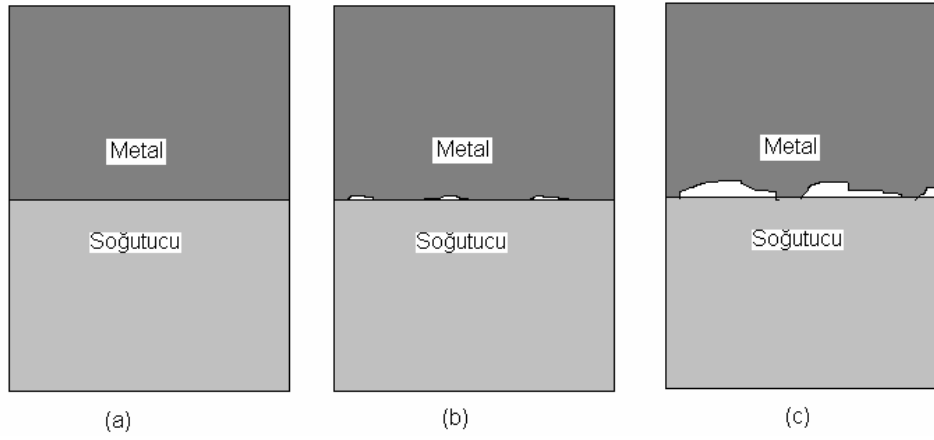
24 grit zımparada metalin boşluklara girmesi ve 2400 grit zımparada ise ara yüzeydeki gazın dışarı tahliyesinin gerçekleşmemesinden dolayı bu pürüzlülük değerleri için ara yüzey ısı transfer katsayıları ihmal edildiğinde 60, 280 ve 400 grit zımpara pürüzlülük aralığında ısı transfer katsayısı ve soğutucu yüzey pürüzlülüğü arasında bir ilişki olduğu Çizelge 5.4, Şekil 6.1 ve Şekil 6.2'de görülmektedir.

Muojekwu [36] ergimiş Al-%7Si alaşımının üzerine üstten bakır soğutucu daldırarak yaptığı çalışmada kullanılan değerlere çok yakın üç farklı Ra (0,018, 0,291 ve 10,56 μm) değerine sahip soğutucular kullanmıştır. Pürüzlülük ve ısı transfer katsayısı arasındaki ilişkiyi ortaya çıkarmak amacıyla yapılan diğer bir çalışma Assar [71] tarafından yapılmıştır. Assar çalışmada 43, 173, 303 ve 866 μm yüzey pürüzlülüğüne sahip izolasyonsuz silindirik çelik kalıp ve saf çinko kullanmıştır. Isı transfer katsayısını ise silindirik koordinatlar için yan duvardan belirlemiştir. Taha [26] 50, 100, 200 ve 400 μm yüzey pürüzlülüğüne sahip izolasyonsuz aynı kalıbın alt, üst ve yan duvarları ile saf Al ara yüzeyinde ısı transfer katsayılarını hesaplamıştır. Wang [51] 0,07 – 7,68 μm yüzey pürüzlülük değerlerine sahip ve 45° açılı bakır kalıba bakır damlası damlatarak aşırı soğuma şartlarında ısı transfer katsayılarını belirlemiştir. Pürüzlülük ve ısı transfer katsayısı arasındaki ilişkiyi araştıran bu araştırmacılar makalelerinde ısı transfer katsayısının yüzey pürüzlülüğünün artması ile arttığını bildirmişlerdir. Diğer taraftan Kayıkcı ve Griffiths [4,72] yüzey pürüzlülüğü ile ısı transfer katsayısı arasında net bir ilişkinin bulunamadığını bildirmişlerdir.

Şekil 6.6 ve Şekil 6.7 incelendiğinde kaba ve düzgün yüzeylerde ara yüzey temasına metal basıncının ve ara yüzeydeki gazın tahliyesinin hangi şartlarda gerçekleştiği daha iyi anlaşılabilir. Isının çıkışı kalıbın alt kısmından sağlandığında yerçekiminin etkisi ile metalin statik basıncı metal-kalıp ara yüzey temasını teşvik eden bir güç uygulaması olarak davranır ve soğutucu yüzeyinde bulunan yeterince geniş kanalların içine sıvı metalin bir miktar girmesini sağlar. Eğer sıvı metalin ıslatması, kanal genişliği ve statik basınç yeterli olursa (24 grit zımpara pürüzlülüğü gibi) metal Şekil 6.6.c'da görüldüğü gibi oyukların içine kısmen girer. Ters yönde ise statik basınç olmadığı için sıvı metalin oyukları doldurması güçleşir. 2400 grit zımpara ile yüzeyi pürüzlendirilmiş çok düzgün yüzeye sahip soğutucu-metal ara yüzeyinde ise ara yüzeyde sıkışan gazların ara yüzeyden tahliyesi Şekil 6.7'de şematik olarak verilmiştir. Isı çıkışı yerçekimine ters yönde olduğu durumda sıvı metal kalıbı doldururken direkt olarak soğutucu yüzeyine düştüğü için gaz ara yüzeyde sıkışır. Gaz çıkışı için yeterli kanalların olmaması ve sıvı metalin statik baskı yapması sonucu ara yüzeyde gaz tahliye olamaz ve gerçek temas alanını azaltır. Geçmişte yapılan çalışmalar genellikle yandan ve üstten katılma şartlarında yapıldığı için çok yüksek ve çok düşük pürüzlülük değerlerinde açıklanan bu sebeplerden dolayı bütün soğutucu pürüzlülük değerleri için pürüzlülüğün artması ile ısı transfer katsayısının arttığı bildirilmiştir. Wang [51] 45° açılı kalıba damlacık damlatmıştır. Bu durum alttan soğutma kabul edilse bile damlanın soğutucu yüzeyine temas eder etmez katılacağı bir gerçektir. Kaba yüzey pürüzlülüğünde damlanın oyukların içine girmesi için ne yeterli statik basınç nede zaman vardır. Çok düzgün yüzeyli soğutucu yüzeyine damlacık bir anda düştüğü için ara yüzeyde gaz boşluğu oluşması mümkün değildir. Taha [26] alttan, üstten ve yandan katılma şartlarında ısı transfer katsayısı hesapladığını bildirmiş fakat yandan ve üstten katılma şartlarında ısı transfer katsayı grafiklerini vermesine rağmen alttan soğutma şartlarında ara yüzey ısı transfer katsayısı grafiklerini vermemiştir, Şekil 2.8.



Şekil 6.6. 24 grit zımpara gibi kaba yüzeylerde metal-kalıp temasının şematik gösterimi. a) üstten, b) yandan ve c) alttan katılaşma



Şekil 6.7. 2400 Grit zımpara gibi çok düzgün yüzeylerde metal-kalıp temasının şematik gösterimi. a) üstten, b) yandan ve c) alttan katılaşma

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

7.1. Sonuç

1. 60, 280 ve 400 grit zımpara pürüzlülük değerleri için ara yüzey ısı transfer katsayısının soğutucu yüzey pürüzlülüğün azalması ile arttığı belirlenmiştir.
2. 24 grit zımpara pürüzlülüğündeki soğutucu yüzeyine dökülen döküm alaşımının yüzeyindeki çiziklerin kısmen içine girdiği tespit edilmiştir. 2400 grit zımpara pürüzlülüğünde ise döküm yüzeyinde yer yer hava sıkışmasının neden olduğu geniş boşluklar görülmüştür. Bu boşlukların bakır soğutucu durumunda çizgisel, çelik soğutucu durumunda ise bir araya toplanmış ve döküm metalinin içine doğru olduğu tespit edilmiştir.
3. 24 grit zımpara ile yüzeyi pürüzlendirilmiş H13 çelik soğutucu yüzeyindeki oyuklara giren metal yüzeyinde mikro çatlaklara rastlanmıştır.
4. 2400 grit zımpara pürüzlülüğünde bakır soğutucu en düşük ısı transfer katsayısı üretirken H13 çelik soğutucu en yüksek ısı transfer katsayısı sağlamış ve her iki döküm yüzeylerinde çok yoğun gaz boşlukları olduğu gözlenmiştir.
5. Bakır ve çelik soğutuculara karşı dökülen Al-%13Si alaşımının soğutucuya temas eden yüzeyinde pre-dentritler görülmüştür. Bu pre-dentritler bakır soğutucuda H13 çelik soğutucuya göre daha net fotoğraflanmıştır.
6. Ara yüzeye dik alınan mikro yapı fotoğraflarında dentritik yapının H13 çelik soğutucu şartlarında ara yüzeyden başladığı, bakır soğutucu

durumunda ise ara yüzeyin yaklaşık 200 μm üzerinde başladığı tespit edilmiştir. Bakır soğutucu durumunda 200 μm ile ara yüzey arasında kalan bölgenin yapısı da eşeksenel dentritik olduğu gözlenmiştir.

7. Bakır soğutucu yüzey pürüzlülüğü 235, H13 çelik soğutucu yüzey pürüzlülüğü 167 kat artmasına karşın bu yüzeylere karşı katılaştıran Al-%13Si alaışımının yüzey pürüzlülüğü birbirine yakın değerlerde elde edilmiştir. Soğutucu yüzey pürüzlülüğü 3,2 μm ' den yüksek olduğunda döküm yüzey pürüzlülüğünün soğutucu yüzey pürüzlülüğünden daha düşük olduğu görülmüştür.
8. H13 çelik soğutucuya temas eden döküm yüzeylerinde birincil silis fazı görülmüştür. Bakır soğutuculara dökülen metal yüzeylerinde ise birincil silis fazı görülmemiştir.
9. Döküm ve soğutucunun birbirine temas eden ara yüzey profilleri çıkartılmış ve Al-%13Si alaışımının soğutucu ile düzgün bir ara yüzey teması sağladığı görülmektedir. Bu profiller üst üste getirildiğinde ara yüzeyde herhangi bir içbükey veya dışbükey deformasyon gözlenmemiştir.
10. Soğuma eğrilerinden bakır soğutucunun H13 çelik soğutucudan yaklaşık iki kat hızlı katılaşma sağladığı ve döküm parça içindeki sıcaklık farkının da daha belirgin olduğu tespit edilmiştir.
11. Bakır soğutucu için ortalama 22000–10000 $\text{W/m}^2\text{K}$, H13 çelik soğutucu için 10000–5500 $\text{W/m}^2\text{K}$ ara yüzey ısı transfer katsayıları hesaplanmıştır.

7.2. Öneriler

1. Bu çalışmada pürüzlülük genişliğinin (S_m) ısı transferini etkileyen çok önemli bir parametre olduğu görülmüştür. Gelecek çalışmalarda soğutucu/kalıp yüzey pürüzlülük genişliğinin ve yüzey pürüzlülüğünün ayrı birer parametre olarak alınıp ara yüzey ısı transferine etkisi araştırılırsa pürüzlülük genişliğinin ara yüzey ısı transfer katsayısına etkisi daha net olarak ortaya çıkartılabilir.
2. 24 ve 2400 grit zımpara pürüzlülüğünde yandan ve üstten soğutucu kullanarak oluşan döküm yüzeylerinin detaylı olarak incelenip ara yüzey ısı transfer katsayısına etkileri araştırılmalıdır.

KAYNAKLAR

1. FLEMINGS. Flemings, M.C., "Solidification Processing", **Mc Graw Hill**, New York, 1-27 (1974).
2. Kim, T.G., Lee, Z.-H., "Time-varying heat transfer coefficients between tube-shaped casting and metal mold", **International Journal of Heat and Mass Transfer**, 40: 3513-3525 (1997).
3. Lee, Z.H., Kim, T.G., Choi, Y.S., "The Movement of the Concave Casting Surface during Mushy-Type Solidification and Its Effect on the Heat-Transfer Coefficient", **Metallurgical and Materials Transactions B**, 29: 1051-1056 (1998).
4. Kayıkcı, R., "Metal-Mold Contact and Heat Transfer during Casting Solidification", PhD, **Manchester Materials Science Centre, University of Manchester and UMIST**, Manchester, 77-181 (1999).
5. Ho, K., Pehlke, R.D., "Metal-Mold Interface Heat Transfer", **Metallurgical Transactions B**, 16: 585-594 (1985).
6. Zuavak, A., "Contribution to the Metal-Mold Interfacial Heat Transfer", **Metallurgical Transaction B**, 22B: 729 (1991).
7. Özdemir S., Atasoy, E., "A New Approach to Feeder Dimensioning", **Cast Metals**, 8: 129-137 (1995).
8. Özdemir, S., "Dökümlerde Besleyicilerin Ölçülendirilmesinde Yeni Bir Yaklaşım", Doktora Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 86-94 (1989).
9. Prates, M., Biloni, H., "Variable Affecting the Nature of the Chill Zone", **Metallurgical Transactions**, 3: 1501-1510 (1972).
10. Fortin, G, Louchez, P, Samuel, F H, Factors controlling heat transfer coefficients at the metal-mold interface during solidification of aluminum alloys: an analytical study, **AFS Transactions**, 100: 863-871 (1992).
11. Ho, K; Pehlke, R D ; "Mechanisms of heat transfer at a metal-mold interface"; **AFS Transactions**, 92: 587-598 (1984).
12. Elliot, R., "Eutectic Solidification Processing", **Butterworths**, London, 1-200 (1983).
13. Wang, G. X., and Matthys, E. F., "Interfacial thermal contact during rapid solidification on a substrate", Heat Transfer 1994, **Proceedings**

of the Tenth International Heat Transfer Conference, Brighton, United Kingdom, 4: 169-174 (1994).

14. Hou, T.X., Pehlke, R.D., "Determination of Mold-Metal Interfacial Heat Transfer and Simulation of Solidification of an Al-%13Si casting", ***AFS Transactions***, 96: 129-136 (1998).
15. Hao, S.W., Zhang, Z.Q., Chen, J.Y., Liu, P.C., "Heat Transfer at the Metal-Mold Interface in Ductile Iron", ***AFS Transactions***, 95: 601-608 (1987).
16. Holman, J.P., "Heat Transfer 8th Edition", ***McGraw-Hill***, New York, 15-100 (1997).
17. Sharma, D.G.R., Krishnan, M., "Simulation of Heat Transfer at Casting Metal-Mold Interface", ***AFS Transactions***, 99: 429-438 (1991).
18. Griffiths, W.D., "Model of the Interfacial Heat-Transfer Coefficient during Unidirectional Solidification of an Aluminium Alloy", ***Metallurgical and Materials Transactions B***, 31: 285-295 (2000).
19. Huang, H., Suri, V.K., El-Kaddah, N., Bery, J.T., "A Free Thermal Conduction Method for Modelling the Heat Transfer Coefficient at the Casting-Mould Interface", ***Proc. Modelling of Casting, Welding and Advanced Solidification Processes VI***, Edited by T.S. Piwonka, V. Voller and L. Katgerman, The Minerals, Metals and Materials Society, Rio de Janeiro, Brazil, 219-226 (1993).
20. Ho, K., Pehlke, R.D., "Transient Methods for Determination of Metal-Mold Interfacial Heat Transfer", ***AFS Transactions***, 91: 689-698 (1983).
21. Isaac, J., Reddy, G.P., Sharma, G.K., "Experimental Investigation of the Influence of Casting Parameters on the Formation and Distribution of Air Gap during the Solidification of Casting in Metallic Molds", ***AFS Transactions***, 93: 29-34 (1985).
22. Nishida, Y., Droste, W., Engler, S., "The Air-gap Formation Process at the Casting-Mold interface and the Heat Transfer Mechanism Through the Air-gap", ***Met. Transactions B***, 17: 833-844 (1986).
23. Sun, R., "Simulation and Study of Surface Conductance for the Heat Flow in The Early Stage of Casting", ***AFS Cast Metal Research Journal***, 6: 105-110 (1970).

24. Tadayan, M.R., Lewis, R.W., "A Model of Metal-Mold Interfacial Heat Transfer for Finite Element Simulation of Gravity Die Casting", ***Cast Metals***, 1: 24-28 (1988).
25. Davies, V.L., "The Heat Transfer in Gravity Die Casting", ***British Foundryman***, 73: 331-334 (1980).
26. 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 castings solidifying in permanent mould, ***Materials Science And Technology***, 17 (9): 1093-1101 (2001).
27. Nishida, Y., Matsubara, H., "Effect of Pressure on Heat Transfer at the Metal Mould-Casting Interface", ***British Foundryman***, 69: 274-278 (1976).
28. Santos, C.A., Quaresma, J.M.V., Garcia, A., "Determination of transient interfacial heat transfer coefficients in chill mold casting", ***Journal of Alloys and Compounds***, 319: 174-186 (2001).
29. Santos, C.A., Siqueira, C.A., Garcia, A., Quaresma, J.V.M., 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).
30. Siqueira, C.A., Cheung, N., Garcia, A., "The columnar to equiaxed transition during solidification of Sn-Pb alloys", ***Journal of Alloys and Compounds***, 351: 126-134 (2003).
31. Peres, M.D., Siqueira, C.A., Garcia, A., "Macrostructural and microstructural development in Al-Si alloys directionally solidified under unsteady-state conditions", ***Journal of Alloys and Compounds***, 381:168-181 (2004).
32. 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", ***Inverse Problems in Science and Engineering***, 12(3): 279-296 (2004).
33. Sá, F., Rocha, O.L., Siqueira, C.A., Garcia, A., "The effect of solidification variables on tertiary dendrite arm spacing in unsteady-state directional solidification of Sn-Pb and Al-Cu alloys", ***Materials Science and Engineering***, A 373: 131-138 (2004).
34. Spinelli, J.E., Rosa, D.M., Ferreira, I.L., Garcia, A., "Influence of melt convection on dendritic spacing of downward unsteady-state

directionally solidified Al–Cu alloys”, ***Materials Science and Engineering***, A 383: 271–282 (2004).

35. Souza, E. N., Cheung, N. and Garcia, A., “The correlation between thermal variables and secondary dendrite arm spacing during solidification of horizontal cylinders of Sn–Pb alloys” ***Journal of Alloys and Compounds***, In Press (2005).
36. Muojekwu, C.A., Samarasekera, I.V., Brimacombe, J.K., Heat transfer and microstructure during the early stages of metal solidification, ***Metallurgical and Materials Transactions B***, 26: 361-382 (1995).
37. Michel, F., Louchez, P. R., Samuel, F. H., “Heat transfer coefficient during solidification of Al-Si alloys: Effects of mold temperature, coating type and thickness”, ***AFS Transactions***, 103: 275-283 (1995).
38. Krishnan, M., Sharma, D.G.R., “Determination of Heat Transfer Coefficient between Casting and Chill in Unidirectional Heat Flow”, ***AFS Transactions***, 102: 769-774 (1994).
39. Krishnan, M., Sharma, D.G.R., “The Effect of Alloy Properties on the Heat Flow across the Casting-Mold Interface”, ***Scripta Metallurgica et Materialia***, 28: 447-451 (1993).
40. Narayan Prabhu, K., Ravishankar, B.N., “Effect of modification melt treatment on casting/chill interfacial heat transfer and electrical conductivity of Al- 13% Si alloy”, ***Materials Science and Engineering A***, A360: 293-298 (2003).
41. Suly, L.J.D., “The Thermal Interface between Casting and Chill Moulds”, ***AFS Transactins***, 84: 735-744 (1976).
42. Prabhu, K.N., Griffiths, W.D., “Assessment of Metal/Mould Interfacial Heat Transfer during Solidification of Cast Iron” ***Third International Conference on Solidification and Gravity***, Miskolc- Hungary, 455-461 (1999).
43. 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).
44. Broucuret, S., Michrafy, A., Dour, G., Heat Transfer and Thermo-Mechanical Stresses in a Gravity Casting Die Influence of Process Parameters, ***Journal of Materials Processing Thecnology***, 110: 211-217 (2001).

45. Woodbury, K. A., Chen, Y., Parker, J. K., Piwonka, T., S., "Measurement of Heat-Transfer Coefficients between Al Castings and Resin-Bonded Molds", ***AFS Transactions***, 106: 705-711 (1998).
46. Woodbury, K.A., Ke, Q, Piwonke, T.S., "Mold-Metal Interfacial Heat Transfer Coefficients during Resin-Bonded Sand Casting of Aluminum A356", ***AFS Transactions***, 108: 259-265 (2000).
47. Griffiths, W.D., "Heat-Transfer Coefficient during the Unidirectional Solidification of an Al-Si Alloy Casting", ***Metallurgical and Materials Transactions B***, 30: 473-482 (1999).
48. Lukens, M.C., Hou, T.X., Pehlke, R.D., "Mold/Metal Gap Formation of Aluminium Alloy 356 Cylinders Cast Horizontally in Dry and Green Sand", ***AFS Transactions***, 98: 63-70 (1990).
49. Lukens, M. C., Hou, T. X., Purvis, A. L., Pehlke, R. D., "Mold-Metal gap formation of Al-%14Si alloy horizontal cylinders cast in chromite molding sand", ***AFS Transactions***, 99: 445-449 (1991).
50. Hines, J.A., "Determination of Interfacial Heat-Transfer Boundary Conditions in Aluminum Low-Pressure Permanent Mold Test Casting", ***Metallurgical and Materials Transactions B***; 35(2): 299-311 (2004).
51. Wang, G.-X., Matthys, E.F., "Experimental determination of the interfacial heat transfer during cooling and solidification of molten metal droplets impacting on a metallic substrate: effect of roughness and superheat", ***International Journal of Heat and Mass Transfer***, 45: 4967–4981 (2002).
52. 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 B***; 35B (4): 721-733 (2004).
53. El-Mahallawy, N. A., Assar, A. M., "Metal-Mould Heat Transfer Coefficient Using End-Chill Experiments", ***Journal of Materials Science Letters***, 7(3): 205-208(1988).
54. Taha, M.A., El-Mahallawy, A.M., Assar, A.W.M., Hammouda, R.M., "Effect of Melt Superheat and Chill Materials on Interfacial Heat Transfer Coefficient in End-Chill Al and Al-Cu Castings", ***Journal of Material Science***, 27: 3467-3473 (1992).
55. Todoroki, H., Lertarom, R., Suzuki, T., Cramb, A. W., "Heat transfer behavior of pure iron and nickel against a water cooled copper mold

during initial stage of solidification Source”, ***Proceedings-Ironmaking Conference***, London, UK, 731-742 (1997).

56. Gafur, M. A., Nasrul Haque, M., Narayan Prabhu, K., “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).
57. Ackermann, P., Heinemann, W., Kurz, W., “Surface quality and meniscus solidification in pure chill cast metals”, ***Arch. Eisenhüttenwes***, 55(1):18 (1984).
58. Kannaiah, P., Narayana, K.L., Roshan, H., “Thermal properties of molding sands: casting-over probe embedded specimen method”, ***AFS Transactions***, 94: 591-600 (1987).
59. Bandyopadhyay, B.P., Joshi, M.D., Chakraborty, P.N., “A transient method of simultaneous measurement of thermal properties of moulding sand using plane heat source”, ***British Foundryman***, 77: 318-321 (1984).
60. Seshadri, M.R., Ramachandran, A., “Mold materials thermal properties”, ***AFS Transactions***, 69: 616-624 (1961).
61. Hartley, J.G., Babcock, D., Berry, J.T., “The Thermal Conductivity of Bentonite-Bonded Molding Sands”, ***AFS Transactions***; 89: 469-476 (1981).
62. Hartley, J.G., Patterson, J.A.L., “The influence of temperature, moisture content and binder content on the conductivity of dried bentonite-bonded zircon and silica sands”, ***AFS Transactions***, 91: 183-190 (1983).
63. Kuba, K., Pehlke, R.D., “Thermal properties of molding sands”, ***AFS Transactions***, 93: 405-414 (1985).
64. Roshan, H.M., Ramachandran, E.G., Ramachandran, A., Seshadri, M.R., “Thermal properties of resin bonded sand”, ***British Foundryman***, 68: 14-20 (1975).
65. Bamberger, M. and Stupel, M.M., “Influence of different chill materials on heat flux and dendrite arm spacing of a356 aluminum alloy casting”, ***Giesserei***, 2: 77-80 (1986).
66. Prasanna Kumar, T. S., Narayan Prabhu, K., “Heat flux transients at the casting/chill interface during solidification of aluminum base alloys”, ***Metallurgical Transactions B***, 22: 717-727 (1991).

67. Meneghini, A., Tomesani L., "Chill material and size effects on HTC evolution in sand casting of aluminum alloys", ***Journal of Materials Processing Technology***, in pres (2005).
68. Gozlan, E., Bamberger, M., "Heat flow and solidification in a metal mould" source, ***Zeitschrift für Metallkunde***, 78(9): 677-682(1987).
69. Srinivasan, M.N., "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(1982).
70. Hallam, C.P., Griffiths, W.D, Butler, N.D., "Interfacial heat transfer between a solidifying aluminum alloy and a "coated die steel", ***Materials Science Forums***, 329-330: 467-472 (2000).
71. Assar, A.M., "Mould surface roughness and interface heat transfer using heat flow model", ***Materials Science and Technology***, 13: 702-704 (1997).
72. Kayıkcı, R., Griffiths, W.D., "The influence of surface roughness on interfacial heat transfer during casting solidification", ***Foundryman***, 92: 267-273 (1999).
73. Morales, A., Glicksman, M.E., Biloni, H., "Influence of mould, wall micro-geometry on casting structure", ***Solidification and Casting of Metals***", London, UK, 184-192 (1979).
74. Griffiths, W.D., "On the measurement of heat transfer coefficients during casting solidification", ***Third Pacific Rim International Conference on Modeling of Casting and Solidification Processes***, Beijeng-China, 64-69 (1996).
75. Richmond, O., Tien, R.H., "Theory of thermal stresses and air- gap formation during the early stages of solidification in a rectangular mold", ***J Mech Phys Solids***, 19(5): 273-84 (1971).
76. Mathew, P. M., Devaal, J.W.; Krueger, P. A., "Thermal conduction model for heat flow through cast lead and a water-cooled stainless-steel container", ***Canadian Metallurgical Quarterly***, 28(3): 271-283 (1989).
77. Dong, S., Niyama, E., Anzai, K. and Matusato, N., "Free deformation of the initial solid layer of some non-ferrous alloys", ***Cast Metals***, 6: 115-120 (1993).

78. Dong, S., Niyama, E., Anzai, K., "Direct observation of shell solidified at melt-chill contact", ***Materials Transactions, JIM***, 35(3): 196-198(1994).
79. Dong, S., Niyama, E., Anzai, K., „Free deformation of initial solid shell of fe-c alloys“, ***ISIJ International***, 35: 730-736 (1995).
80. Liu, W., Wang G X., and Matthys, E.F., “Thermal analysis and measurements for a molten metal drop impacting on a substrate: cooling, solidification and heat transfer coefficient”, ***International Journal of Heat and Mass Transfer***, 38(8): 1387-1395 (1995).
81. Hallam, C.P., “Heat transfer between solidifying aluminium and coated dies”, PDh Transfer Report, ***University of Manchester and UMIST***, Manchester, 69-99 (1998).
82. Hallam, C.P., Butler, E.G., Griffiths, W.D., “Modelling of the interfacial heat transfer between an al-si alloy casting and a coated die steel in modelling of casting”, ***Welding and Advanced Solidification Processes – IX***, Aachen, 159 – 166 (2000).
83. Nyamekye, K., Wei, S., Askeland, D., Voigt, R.C., Pischel, R.P., Rasmussen, W., Ramsay, C., “A review of permanent mold coating and their effect on heat transfer in the mold”, ***AFS Transactions***, 102: 869-876 (1994).
84. Kuo, J.H., Hsu, F.L., Hwang, W.S., Yeh, J.L., Chen, S.J., “Effect of mold coating and mold material on the heat transfer coefficient at the casting/mold interface for permanent mold casting of a356 aluminum alloy”, ***AFS Transactions***, 109: 469-485 (2001).
85. Venkaramani, R., Ravidran, C., “Effects of coating thickness and pouring temperature on thermal response in lost foam casting”, ***AFS Transactions***, 104: 281-290 (1996).
86. Trovant, M., Argyropoulos, S.A., “The implementation of a mathematical model to characterize mold metal interface effects in metal casting”, ***Canadian Metallurgical Quarterly***, 37: 185-196 (1998).
87. Parker, J.K., Piwonka, T.S., “Gap formation in resin-bonded molds”, ***AFS Transactions***, 108: 239-245 (2000).
88. Hwang, J.C., Chuang, H.T., Jong, S.H., Hwang, W.S., “Measurement of heat transfer coefficient at metal-mold interface during casting”, ***AFS Transactions***, 102: 877-883 (1994).

89. Coates, B.L., "Heat transfer of the casting metal/mold interface during solidification", PhD Thesis, **Graduate Department of Materials Science and Engineering, University of Toronto**, Toronto, Canada, 129-192 (2004).
90. Poirier, D., and Poirier, E., "Heat transfer fundamentals for metal casting", **Minerals, Metals & Materials Society**, Pennsylvania, USA, 70–80 (1992).
91. Haddad, O.M., Al-Nimr, M., Silieti, M., "The effect of the gas-gap formation due to shrinkage on the rate of heat transfer during solidification", **Numerical Heat Transfer**, A40: 887- 900(2001).
92. Narayan Prabhu, K., Ashish, A.A., "Inverse modeling of heat transfer with application to solidification and quenching" **Materials And Manufacturing Processes**, 17(4): 469–481 (2002).
93. Phinichka, N., "The Effect of surface tension, superheat and surface films on the rate of heat transfer from an iron droplet to a water cooled copper mold", PhD Thesis, **Carnegie Institute of Technology**, Pittsburgh, Pennsylvania, USA, 163-203 (2001).
94. Krishnan, M., Sharma, D.G.R., "Determination of the interfacial heat transfer coefficient h in unidirectional heat flow by beck's non linear estimation procedure", **Int. Comm. Heat Mass Transfer**, 23(2): 203-214 (1996).
95. Prabhu, K. N., Srinivas, G., Venkataraman, N., "Modelling heat transfer and solidification behaviour of gravity diecast al-cu-si alloy (Im21) plates", **AFS Transactions**, 101: 653-659 (1993).
96. Khan, S., Radvindran, C., Naylor, D., Sharma, D.G.R., "Measurement of interfacial heat transfer coefficient in LFC of a356 al alloy", **AFS Transactions**, 108: 445-452 (2000).
97. Moraru, L., "The heat transfer coefficient during the solidification of aluminum", **Czechoslovak Journal of Physics**, 52(3): 387-393 (2002).
98. Osorio, W.R., Garcia, A., "Modeling dendritic structure and mechanical properties of Zn–Al alloys as a function of solidification conditions", **Materials Science and Engineering A**, A325: 103–111 (2002).
99. Velasco, E., Talamantes, J., Cano, S., Valtierra, S., Mojica, J.F., Colas, R., "Casting-chill interface heat transfer during solidification of an aluminum alloy", **Metallurgical and Materials Transactions B**, 30(4):773-778 (1999).

100. Pohankaa, M., Woodburyb, A.A., "A downhill simplex method for computation of interfacial heat transfer coefficients in alloy casting", ***Inverse Problems in Engng***, 11(5): 409–424 (2003).
101. Kobryn, P.A., Semiatin, S.L., "Determination of interface heat-transfer coefficients for permanent-mold casting of ti-6al-4v", ***Metallurgical and Materials Transactions B***, 32(4): 685-695 (2001).
102. Robinson, D., Palaninathan, R., "Thermal analysis of piston casting using 3-D finite element method", ***Finite Elements in Analysis and Design***, 37(2): 85-95 (2001).
103. Lewis, R. W., Ravindran, K., "Finite element simulation of metal casting", ***Int. J. Numer. Meth. Engng.***, 47: 29-59 (2000).
104. Wills, V.A., McCartney, D.G., "Modelling of dendritic solidification using finite element method", ***Materials Science and Technology***, 8(2): 114-122 (1992).
105. Hetu, J.F., Gao, D.M., Kabanemi, K.K., Bergeron, S., Nguyen, K.T., Loong C.A., "Numerical modeling of casting processes", ***Advanced Performance Materials***, 5: 65–82 (1998).
106. Shepel, S.V., Paolucci, S., "Numerical simulation of filling and solidification of permanent mold castings", ***Applied Thermal Engineering***, 22: 119-248 (2002).
107. Chen, Y.H., Im, Y.T., "Analysis of solidification in sand and permanent mold castings and shrinkage prediction", ***International Journal of Machine Tools & Manufacture***, 30 (2): 175-189 (1990).
108. Venkatesana, A., Gopinathb, V.M., Rajadurairb, A., "Simulation of casting solidification and its grain structure prediction using FEM" ***Journal of Materials Processing Technology***, in press (2005).
109. Usmani, A. S., Cross, J. T., Lewis, R. W., "Finite element model for the simulations of mould filling in metal casting and the associated heat transfer", ***International Journal for Numerical Methods in Engineering***, 35(4): 787-806 (1992).
110. Ke, Q., "Identification of interracial heat transfer between molten metal and green sand by inverse heat conduction method", PhD thesis, ***Graduate School of the University of Alabama***, Tuscaloosa-Alabama, USA, 59-69 (2000).

111. Dargush, G. F., Banerjee, P. K., "Application of the boundary element method to transient heat conduction", ***International Journal for Numerical Methods in Engineering***, 31(6): 1231-1247 (1991).
112. Majchrzak, E., Szopa, R., "Analysis of thermal processes in solidifying casting using the combined variant of the BEM", ***Journal of Materials Processing Technology***, 109: 126-132 (2001).
113. Majchrzak, E., Mochacki, B., Szopa, R., "Application of the boundary element method for the numerical modeling of the solidification of cylindrical and spherical casting", ***Journal of Materials Processing Technology***, 106: 99-106 (2000).
114. Bounds, S., Davey, K., Hinduja, S., "Modelling the pressure die casting process using a hybrid finite-boundary element model", ***International Journal For Numerical Methods In Engineering***, 45: 1165-1185 (1999).
115. El-Mahallewawy, NA., Assar, AM., "Effect of melt superheat on heat transfer coefficient for aluminum solidifying against copper chill", ***Journal of Materials Science***, 26:1729-1733 (1991).
116. Martorano, M.A., Capocchi, J.D.T., "Heat transfer coefficient at the metal-mold interface in the unidirectional solidification of cu-8%sn alloys", ***International Journal of Heat and Mass Transfer***, 43: 2541-2552 (2000).
117. Schimdt, P., Svensson, I.L., "Solidification and heat transfer in permanent mould casting", numerical methods in thermal problems, ***Pineridge Press***, Swansea, UK, III: 236-247 (1991).
118. Schimdt, P., "Heat transfer during filling in die casting processes", ***Materials Science and Engineering A***, 173: 271-274 (1993).
119. Özişik, MN. "Finite difference methods in heat transfer", ***CCR***, Florida, USA, 20-21, 100-110 (1994).
120. Arpacı, VS, Kao, S-H, Selamet, A., "Introduction to heat transfer", ***Prentice Hall***, NJ, USA, 212-214 (1999).
121. Incropera, FP, DeWitt, DP, "Fundamentals of heat and mass transfer", 4 th ed., ***John Wiley&Sons***, New York, USA, 248-252 (1996).
122. Dong, S., Niyama, E., Anzai, K., "Initial solidification of metals as related to formation of surface defects", ***Proceedings of Modeling of Casting and Solidification Processes***, Edited by Niyama, E., Kodama, H., 85-93 (1995).

123. Niyama, E., Anzai, K, Funicular, T, Hiratsuka, S, "Some basic research for thin-wall casting technology", ***Journal of Materials Processing Technology***, 63: 779-783 (1997).
124. Şahin, H. M., Kocatepe, K., Kayıkcı R., **Akar, N.**, "Determination of Unidirectional Heat Transfer Coefficient during Unsteady State Solidification at Metal Chill Interface", ***Energy Conversion and Management***, 47:19-34 (2006).
125. Kim, H-S., Cho, I-S., Shin, J-S.; Lee, S-M., Moon, B-M. "Solidification parameters dependent on interfacial heat transfer coefficient between aluminium casting and copper mould", ***ISIJ International***, 45(2): 192-198 (2005).

ÖZGEÇMİŞ

1973 yılında Karadeniz Ereğli’de doğdu. İlk ve orta eğitimini Ereğli’de tamamladı. 1990 yılında Karadeniz Ereğli Endüstri Meslek Lisesi’ni, 1992 yılında H.Ü. Z.M.F. Alaplı Meslek Yüksek Okulu Döküm Bölümü’nü, 1996 yılında G.Ü. T.E.F. Döküm Öğretmenliği’ni bitirdi. 2000 Şubat döneminde G.Ü. F.B.E. Metal Eğitimi’nde yüksek lisansı tamamladı. Halen Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü’nde doktora yapmaktadır. 1997 Ocak ayında G.Ü. Teknik Eğitim Fakültesi Metal Eğitimi Bölümü’nde Araştırma Görevlisi olarak çalışmaya başladı ve halen bu görevine devam etmektedir. Evli ve iki çocuk babasıdır.