



**T.C.
OSMANİYE KORKUT ATA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Emin ÇELİK

**YENİ BİR KALIP KULLANIMININ VE İKİNCİL
SOĞUTMA İYİLEŞTİRMELERİNİN
ÇELİKLERİN SÜREKLİ DÖKÜM SÜRECİ
ÜZERİNE ETKİLERİNİN İNCELENMESİ: BİR
SANAYİ UYGULAMASI**

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

OSMANİYE – 2019

**T.C.
OSMANİYE KORKUT ATA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**YENİ BİR KALIP KULLANIMININ VE İKİNCİL
SOĞUTMA İYİLEŞTİRMELERİNİN ÇELİKLERİN
SÜREKLİ DÖKÜM SÜRECİ ÜZERİNE ETKİLERİNİN
İNCELENMESİ: BİR SANAYİ UYGULAMASI**

Emin ÇELİK

**MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI**

**OSMANİYE
OCAK-2019**

TEZ ONAYI

YENİ BİR KALIP KULLANIMININ VE İKİNCİL SOĞUTMA İYİLEŞTİRMELERİNİN ÇELİKLERİN SÜREKLİ DÖKÜM SÜRECİ ÜZERİNE ETKİLERİNİN İNCELENMESİ: BİR SANAYİ UYGULAMASI

Emin ÇELİK tarafından Prof. Dr. Mustafa ÜBEYLİ danışmanlığında Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Makine Mühendisliği** Anabilim Dalı'nda hazırlanan bu çalışma aşağıda imzaları bulunan jüri üyeleri tarafından oy birliği/çokluğu ile **Yüksek Lisans Tezi** olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Mustafa ÜBEYLİ
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, OKÜ

Üye: Doç. Dr. Mustafa Serdar KARAKAŞ
Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, KTÜN

Üye: Dr. Öğr. Üyesi Mustafa Murat YAVUZ
Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, OKÜ

Yukarıdaki jüri kararı Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun/...../..... tarih ve /..... sayılı kararı ile onaylanmıştır.

Doç. Dr. Coşkun ÖZALP
Enstitü Müdürü, **Fen Bilimleri Enstitüsü**

Bu tezde kullanılan özgün bilgiler, şekil, çizelge ve fotoğraflardan kaynak göstermeden alıntı yapmak 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunu hükümlerine tabidir.

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, bu çalışma sonucunda elde edilmeyen her türlü bilgi ve ifade için ilgili kaynağa eksiksiz atıf yapıldığını ve bu tezin Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlandığını bildiririm.

Emin ÇELİK



ÖZET

YENİ BİR KALIP KULLANIMININ VE İKİNCİL SOĞUTMA İYİLEŞTİRMELERİNİN ÇELİKLERİN SÜREKLİ DÖKÜM SÜRECİ ÜZERİNE ETKİLERİNİN İNCELENMESİ: BİR SANAYİ UYGULAMASI

Emin ÇELİK

Yüksek Lisans, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Mustafa ÜBEYLİ

Ocak 2019, 107 sayfa

Bu çalışmada, hurdadan çelik üretimi yapılan bir tesiste sürekli döküm sürecinde daha yüksek hıza ulaşmak, üretilen kütük kalitesini iyileştirmek ve üretim esnasında meydana gelen yol kayıplarını önlemek için birincil soğutma ve ikincil soğutma konusunda iyileştirme çalışmaları yapılmıştır. Birincil soğutma konusunda çoklu koniklik ölçüsüne sahip iki farklı kalıp geliştirilmiştir. Aynı zamanda ikincil soğutma konusunda soğutma dağılımları değiştirilmiştir. Yeni kalıp tasarımları ve ikincil soğutma bölgesi değişkenleri ile düşük karbonlu ve peritektik bileşim aralığındaki çelik türlerinin üretimi yapılmıştır. Deneysel çalışmalar sonucunda üretilen kütüklerin katılaşma sonrasındaki makro ve mikro yapıları incelenmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda kalıp ömürlerinin 400 dökümden 600 döküme çıkmış olup yol kayıplarında %90 oranında azalma sağlanmıştır. Ayrıca döküm hızının 4,0 m/dk'ye ulaşması ile deneysel çalışmalar öncesindeki duruma kıyasla %16 civarında üretkenlik artışı sağlanmıştır.

Anahtar kelimeler: Çelik Kütük, Sürekli Döküm, Birincil Soğutma, İkincil Soğutma

ABSTRACT

INVESTIGATION ON THE EFFECTS OF UTILIZATION OF A NEW MOLD AND IMPROVEMENTS IN SECONDARY COOLING ON THE CONTINUOUS CASTING OF STEELS: AN INDUSTRIAL APPLICATION

Emin ÇELİK
M. Sc., Department of Mechanical Engineering
Supervisor: Prof. Dr. Mustafa ÜBEYLİ

January 2019, 107 pages

In this study, improvements in the primary cooling and the secondary cooling stages at an electric arc furnace steel plant have been implemented in the continuous casting process to reach higher casting speed, improve the quality of billets and eliminate the breakouts during the operation. In the primary cooling stage two different molds with multi-tapers have been designed and used. Meanwhile, in the secondary cooling part the cooling scenario has been changed. The experimental long-term productions have been done by using the new mold designs and the new secondary cooling parameters for the casting of low carbon and peritectic steel grades. After completing the casting and solidification operations, the macro and micro observations have been carried out on the billets for their qualification with respect to the operation conditions. According to the experimental results, the mold life has increased from 400 to 600 heats and the breakouts have decreased by 90%. Moreover, the productivity has increased by 16% within high speed casting of 4 m/min.

Keywords: Steel Billet, Continuous Casting, Primary Cooling, Secondary Cooling

Çok kıymetli aileme...

TEŞEKKÜR

Yüksek Lisans tez konumun belirlenerek tez çalışmamın yürütülmesini üstlenen, çalışmalarım süresince değerli bilgi ve tecrübeleriyle katkılarını esirgemeyen danışman hocam Sayın Prof. Dr. Mustafa ÜBEYLİ'ye teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca bölümdeki çalışmalarım süresince beni destekleyen bilgi ve tecrübeleriyle katılarını esirgemeyen Sayın Arş. Gör. Emre ÖZER'e ve Sayın Arş. Gör. Demet ZALAOĞLU'na ayrıca teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmamı tamamlamada yardımcı olan tüm arkadaşlarıma ve eşim Yıldız ÇELİK'e destekleri için minnettarım.

İÇİNDEKİLER

TEZ ONAYI	
TEZ BİLDİRİMİ	
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
İTHAF SAYFASI	iii
TEŞEKKÜR	iv
İÇİNDEKİLER	v
ÇİZELGELER DİZİNİ	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
SİMGELER ve KISALTMALAR	xi
1. GİRİŞ	1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR	3
3. DÜNYADA VE TÜRKİYEDE ÇELİK SEKTÖRÜ	12
3.1. Dünyada ve Türkiye’de Ham Çelik Üretimi	12
3.2. Dünyada ve Türkiye’de Üretim Kapasitesi ve Kapasite Kullanımı	14
4. ÇELİK ÜRETİM SÜRECİ	17
4.1. Cevherden Çelik Üretim Süreci	19
4.2. Hurdadan Çelik Üretim Süreci	19
4.3. Çelik Üretiminde Sürekli Döküm Süreci	20
5. SÜREKLİ DÖKÜM SÜRECİNDE BİRİNCİL SOĞUTMA	23
5.1. Birincil Soğutmada Isı Transferine Etki Eden Unsurlar	23
5.2. Bakır Kalıp Tasarımında Büzülme Unsuru	25
5.3. Bakır Kalıp Tasarımında Çarpılma Unsuru	26
5.4. Bakır Kalıp Tasarımında Köşe Yarıçapı Unsuru	28
6. SÜREKLİ DÖKÜM SÜRECİNDE İKİNCİL SOĞUTMA	31
6.1. İkincil Soğutmada Isı Transferine Etki Eden Unsurlar	31
6.2. Sürekli Döküm Sürecinde İkincil Soğutma Kontrolü	33
6.2.1. Soğutma Şiddetinin Kontrol Edildiği Soğutma Yöntemi	34
6.2.2. Hıza Bağlı Olarak Uygulanan Değişken Soğutma Yöntemi	34
6.2.3. Geri Bildirime Bağlı Olarak Uygulanan Değişken Soğutma Yöntemi	37
6.2.4. Matematiksel Modelleme İle Gerçek Zamanlı Uygulanan Soğutma Yöntemi	37
6.2.5. İkincil Soğutma Bölgesi Kontrolündeki Güncel Yaklaşımlar	38
6.3. İkincil Soğutma Bölgesinde Isı Transferi Yoğunluğunun Hesaplanması	39
7. SÜREKLİ DÖKÜM SÜRECİNDE KATILAŞMA VE İÇYAPI	42

8.	DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	46
8.1.	Deneyisel Çalışmalar Öncesindeki Sorunlar.....	46
8.2.	Kalıp Tasarımı ve İmalatı	50
8.3.	İkincil Soğutma İyileştirmeleri	56
8.4.	Döküm Şartları	61
8.5.	Sertlik Ölçümü.....	67
8.6.	Makro Dağlama	68
8.7.	Mikro Dağlama.....	68
9.	DENEYSEL BULGULAR VE İRDELEME	69
9.1.	Kalıp Ömrü Sonuçları.....	69
9.2.	Üretkenlik ve Yol Kaybı Sonuçları.....	73
9.3.	Genel Ürün Kalitesi Sonuçları.....	78
9.4.	Sertlik Ölçümü Sonuçları	85
9.5.	Makro Dağlama Sonuçları	90
9.6.	Mikro Dağlama Sonuçları.....	95
10.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	99
	KAYNAKLAR	101
	ÖZGEÇMİŞ	107

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. Farklı çelik türleri için öngörülen koniklik ölçüleri (Amitan, vd., 2005)	5
Çizelge 8.1. Deneysel çalışmalar öncesinde ve deneysel çalışmalar sürecinde üretimi yapılan çelik türlerine ait kimyasal bileşim aralıkları.....	47
Çizelge 8.2. İyileştirme öncesinde üretkenlik, döküm hızı ve yol kaybı	47
Çizelge 8.3. Kullanılan kalıp koniklik ölçüleri	51
Çizelge 8.4. Deneysel çalışma öncesinde ve sonrasında ikincil soğutma bölgesinde fıskiye dağılımı	61
Çizelge 8.5. Kullanılan örtü tozlarına ait kimyasal bileşimler.....	64
Çizelge 8.6. Kullanılan tandış püskürtme malzemesinin bileşimi	65
Çizelge 8.7. Kullanılan kalıp yağına ait fiziksel özellikler	66
Çizelge 8.8. Deneysel çalışmalardaki salınım değişkenleri	66
Çizelge 8.9. Çatlak dışındaki kalite kusurları için uygulanan sınırlar	67
Çizelge 9.1. İlk kısa süreli deneysel çalışmalarda yol kaybı durumu	74
Çizelge 9.2. Uzun süreli deneysel çalışmalar sonrasında uzun sürede yol kaybı durumu.....	74
Çizelge 9.3. Deneysel çalışmalar esnasında üretilen çelik kalitelerine ait katıgen ve sıvıgen sıcaklıkları (Thomas, vd., 1987)	75
Çizelge 9.4. Deneysel çalışmalar esnasında döküm sıcaklıklarının dağılımı	75

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 3.1. Çin ve diğer ülkelerdeki çelik üretimi (Worldsteel Association, 2018)	12
Şekil 3.2. Türkiye ve dünyada ham çelik üretiminde hurda kullanımı oranı (BIR, 2018).....	13
Şekil 3.3. Türkiye ve dünyada hurda ithalatı (BIR, 2018).....	14
Şekil 4.1. Demir-çelik üretim süreci (AIST, 2011).....	18
Şekil 4.2. Sürekli döküm makinesinin genel görünümü	22
Şekil 5.1. Katılaşma benzetiminin şematik gösterimi (Wang, 2010b).....	25
Şekil 5.2. Kalıp cidarının soğuk ve sıcak yüzeyindeki sıcaklık ölçümleri (Samarasekera ve Brimacombe, 1984).....	27
Şekil 5.3. Farklı kalıplarda kalıp cidarındaki çarpılma miktarları (Samarasekera ve Brimacombe, 1984).	27
Şekil 5.4. 4 mm köşe yarıçapında katılaşma ve kabuk-cidar teması (Park, vd., 2002).	29
Şekil 5.5. 15 mm köşe yarıçapında katılaşma ve kabuk- cidar teması (Park, vd., 2002).....	30
Şekil 6.1. Hıza bağlı doğrusal soğutma yöntemi (Gilles, 2003)	35
Şekil 6.2. Parabolik soğutma yönteminin uygulanması (Gilles, 2003).....	36
Şekil 6.3. Sayısal analiz yöntemleri kullanılarak oluşturulan katılaşma eğrisi (Chaudhuri, vd., 2010).....	39
Şekil 7.1. Kütük üretiminde meydana gelen kalite kusurları (Samarasekera ve Chow, 2003).....	42
Şekil 7.2. Sürekli döküm sürecinde katılaşma sonrasında meydana gelen tane dağılımı (Bower ve Flemings, 1967).....	45
Şekil 8.1. Deneysel çalışmalar öncesindeki kütük numunesi	48
Şekil 8.2. Kütük döküm makinesinde kalite sorunlarının irdelenmesinde aşamalar (Kumar, vd., 1991).....	49
Şekil 8.3. Uygun kalıp tasarımı için akış şeması (Unamono, vd., 2009).....	51
Şekil 8.4. Kalıp çıkışı rölelerinde yapılan iyileştirmenin görünümü	54
Şekil 8.5. Eski ceket (iki parça) ve yeni ceket (tek parça) görünümü.....	55
Şekil 8.6. Döküm esnasında kalıp-ceket etkileşimi (Unamuno, vd., 2009).....	55
Şekil 8.7. Yeni ceket (tek parça) tasarımı	56

Şekil 8.8. Sıcaklığa bağlı olarak %0,10 C bileşimine sahip çeliğin ısıl iletkenlik değerinin değişimi (Meng ve Thomas, 2003).....	58
Şekil 8.9. Yapılan iyileştirme çalışması öncesindeki (a) ve sonrasındaki (b) ikincil soğutma kademelerinin dağılımları ve mesafeleri.	59
Şekil 8.10: İkincil soğutma bölgesindeki ısı transfer katsayısının değişimi (Shimada ve Mitsutsuka, 1966)	60
Şekil 8.11. Sürekli döküm sürecinin genel görünümü	62
Şekil 8.12. Sürekli döküm sürecinde ikincil soğutma.....	62
Şekil 8.13. Kütük döküm makinesinde ikincil soğutma bölgesi kademeleri	63
Şekil 8.14. Pota ve hazne arasında kullanılan aratüpün görünümü.....	64
Şekil 8.15. Uygulanan tandiş kurutma-ısıtma pratiğine ait zaman-sıcaklık eğrisi.....	65
Şekil 8.16. Döküm makinesinde kullanılan tandiş tasarımı	65
Şekil 8.17. Numune üzerinde Brinell sertlik ölçümü yapılan nokta ve mesafeler (cm)	67
Şekil 9.1. Eski ve yeni kalıp ömrünün karşılaştırması	70
Şekil 9.2. Mevcut Kalıp (sol) ve Kalıp-1 (sağ) aşınma durumları	70
Şekil 9.3. Mevcut Kalıp (sol) ve Kalıp-2 (sağ) aşınma durumları	71
Şekil 9.4. Mevcut ceket (sol) ve yeni ceket (sağ) ile kullanılan kalıpların dış yüzey durumu.....	71
Şekil 9.5: Üretilen kütüklerdeki salınım izleri	78
Şekil 9.6: Üretilen kütük kesitlerinin genel görünümü	79
Şekil 9.7. Kalite C bileşimine sahip 3,0 m/dk döküm hızı ile üretilen kütük kesiti...	80
Şekil 9.8. Kalite A bileşimine sahip 3,5 m/dk döküm hızı ile üretilen kütük kesiti ..	80
Şekil 9.9. Kalite A bileşimine sahip 4,0 m/dk döküm hızı ile üretilen kütük kesiti ..	81
Şekil 9.10. Kalite D bileşimine sahip 3,0 m/dk döküm hızı ile üretilen kütük kesiti	82
Şekil 9.11. Kalite D bileşimine sahip 3,5 m/dk döküm hızı ile üretilen kütük kesiti	82
Şekil 9.12. Kalite B bileşimine sahip 4,0 m/dk döküm hızı ile üretilen kütük kesiti.	83
Şekil 9.13. Kalite C bileşimine sahip 3 m/dk hızla dökülmüş kütük kesiti üzerindeki Brinell sertlik ölçümü değerleri	86
Şekil 9.14. Kalite A bileşimine sahip 3,5 m/dk hızla dökülmüş kütük kesiti üzerindeki Brinell sertlik ölçümü değerleri	86
Şekil 9.15. Kalite A bileşimine sahip 4,0 m/dk hızla dökülmüş kütük kesiti üzerindeki Brinell sertlik ölçümü değerleri	87

Şekil 9.16. Kalite D bileşimine sahip 3,0 m/dk hızla dökülmüş kütük kesiti
üzerindeki Brinell sertlik ölçümü değerleri 88

Şekil 9.17. Kalite D bileşimine sahip 3,5 m/dk hızla dökülmüş kütük kesiti
üzerindeki Brinell sertlik ölçümü değerleri 88

Şekil 9.18. Kalite B bileşimine sahip 4,0 m/dk hızla dökülmüş kütük kesiti
üzerindeki Brinell sertlik ölçümü değerleri 89

Şekil 9.19. Kalite C bileşimine sahip 3,0 m/dk hızla dökülmüş kütük kesitinin makro
dağlama görünümü 90

Şekil 9.20. Kalite A bileşimine sahip 3,5 m/dk hızla dökülmüş kütük kesitinin makro
dağlama görünümü 91

Şekil 9.21. Kalite A bileşimine sahip 4,0 m/dk hızla dökülmüş kütük kesitinin makro
dağlama görünümü 91

Şekil 9.22. Kalite C bileşimine sahip 3,0 m/dk hızla dökülmüş kütük kesitinin makro
dağlama görünümdeki merkez çatlağı ve gaz boşluğu ayrıntıları 92

Şekil 9.23. Kalite A bileşimine sahip 3,5 m/dk hızla dökülmüş kütük kesitinin makro
dağlama görünümdeki merkez çatlağı ve gaz boşluğu ayrıntıları 93

Şekil 9.24. Kalite A bileşimine sahip 4,0 m/dk hızla dökülmüş kütük kesitinin makro
dağlama görünümdeki merkez çatlağı ve gaz boşluğu ayrıntıları 94

Şekil 9.25. Kalite A bileşimine sahip 3,5 m/dk hızla dökülmüş kütük kesitinin kenara
yakın bölgedeki içyapı görünümü (a) 50X (b) 200X..... 96

Şekil 9.26. Kalite A bileşimine sahip 3,5 m/dk hızla dökülmüş kütük kesitinin kenar
ile merkez arasındaki bölgedeki iç yapı görünümü (a) 50X (b) 200X 96

Şekil 9.27. Kalite A bileşimine sahip 3,5 m/dk hızla dökülmüş kütük kesitinin
merkez bölgedeki makro dağlama görünümü (a) 50X (b) 200X..... 96

Şekil 9.28. Kalite A bileşimine sahip 4,0 m/dk hızla dökülmüş kütük kesitinin kenara
yakın bölgedeki içyapı görünümü (a) 50X (b) 200X..... 97

Şekil 9.29. Kalite A bileşimine sahip 4,0 m/dk hızla dökülmüş kütük kesitinin kenar
ile merkez arasındaki bölgedeki iç yapı görünümü (a) 50X (b) 200X 97

Şekil 9.30. Kalite A bileşimine sahip 4,0 m/dk hızla dökülmüş kütük kesitinin
merkez bölgedeki makro dağlama görünümü (a) 50X (b) 200X..... 97

SİMGELER ve KISALTMALAR

A	Yüzey alanı	(m ²)
a	Katsayı	(-)
AB	Avrupa Birliği	(-)
ABD	Amerika Birleşik Devletleri	(-)
AIST	Association for Iron & Steel Technology	(-)
b	Katsayı	(-)
BIR	Bureau of International Recycling	(-)
BOF	Bazık oksijen fırını	(-)
BRIC	Brezilya, Rusya, Hindistan, Çin	(-)
c	Katsayı	(-)
C	Karbon	(-)
C ₀	En düşük debi	(l s ⁻¹)
CO	Karbonmonoksit	(-)
cpm	Dakikadaki salınım sayısı	(-)
Cu	Bakır	(-)
DSTI	Directorate for Science, Technology And Innovation	(-)
EAO	Elektrik ark ocağı	(-)
Fe	Demir	(-)
h	Isı transferi katsayısı	(Wm ⁻² °C ⁻¹)
Mn	Mangan	(-)
n	Eğim	(-)
OECD	Ekonomik Kalkınma ve İşbirliği Örgütü	(-)
P	Fosfor	(-)
Q	Debi	(l s ⁻¹)
q ₀	Isı transferi şiddeti	(W m ⁻²)
S	Kükürt	(-)
Si	Silisyum	(-)
T _l	Sıvıgen sıcaklığı	(°C)
T _s	Katıgen sıcaklığı	(°C)
T _y	Yüzey sıcaklığı	(°C)
T _w	Su sıcaklığı,	(°C)

TÇÜD	Türkiye Çelik Üreticileri Derneği	(–)
TEM	Taramalı elektron mikroskobu	(–)
u	Su hızı	(m s ⁻¹)
V	Döküm hızı	(m dk ⁻¹)
W	Su akışı	(l m ⁻² s ⁻¹)



1. GİRİŞ

Günümüzde kullanılan en yaygın mühendislik malzemelerinden birisi çeliktir. Çelik, sahip olduğu mekanik özellikler, üretilebilirlik ve farklı ısı işlemlere uygunluğu nedeniyle hayatımızın her alanında kullanılmaktadır (Callister ve Retwisch, 2011; Yin, 2009). İnşaat, otomotiv, makine, enerji, gemicilik ve ev eşyaları gibi alanlar çeliğin yaygın olarak kullanıldığı alanlardır (Worldsteel Association, 2012; Yin, 2009).

Çelik, yaygın olmanın ötesinde yüksek dayanımlı, çok yönlü ve sayısız olarak geri dönüştürülebilir olması nedeniyle günümüzde yaygın olmanın ötesinde temel bir malzeme olma özelliği taşımaktadır. Çeliğe olan ihtiyaç zaman içerisinde yüksek miktarda üretimin mümkün olduğu süreçlerin geliştirilmesini zorunlu hale getirmiştir. Sanayi devrimi sonrasında çeliğin kullanıldığı alanların hızlı bir şekilde artması hızlı, uygun maliyetli ve yüksek miktarda üretimin gerçekleştirilebildiği yöntemler üzerinde çalışılmasını zorunlu hale getirmiştir (Worldsteel Association, 2012).

Günümüzde çelik üretimi için kullanılan bazik oksijen fırını (BOF) ve elektrik ark ocağı (EAO) süreçlerinin temelleri 1950'li yıllara dayanmaktadır. Cevherden çok fazla miktarda çelik üretimini mümkün hale getiren BOF ve hurdadan geri dönüşüm ile çelik üretilen EAO süreçleri günümüz çelik üretiminin başlangıç aşamalarını oluşturmaktadır (Worldsteel Association, 2012).

Yüksek miktarda çelik üretiminin mümkün hale gelen süreçlerin geliştirilmesi ile birlikte üretilen sıvı çeliğin yarı ürün haline dönüştürülmesi daha fazla önem kazanmıştır. 1950'li yıllara kadar yarı ürün üretimi sıvı çeliğin kütük (ingot) kalıplara dökülmesi ile gerçekleştirilmiştir. 1950'li yıllardan sonra 1980'li yıllara kadar olan süreçte sürekli döküm sürecinde yaşanan gelişmeler çelik üretimi konusunda oldukça önemli olmuştur. Günümüzde çelik üretiminin %95'inden fazlası sürekli döküm süreci ile gerçekleştirilmektedir. Sürekli döküm süreci yüksek verimlilik ve üretkenlik ile çelik üretimini mümkün hale getirmiştir (Worldsteel Association, 2018).

Sürekli döküm süreci sıvı çeliğin herhangi bir kesintiye uğramadan, belirlenen fiziksel, kimyasal ve iç yapı özelliklerinde yarı ürün üretimini mümkün hale getirmiştir. Sürekli

döküm sürecinin ikincil metalürji ile birlikte son ürün kalitesinde önemli düzeyde etki etmektedir. Bu nedenle gerekli üretkenliğin sağlanması ve istenilen ürün kalitesine ulaşılması için çelik kimyasal bileşiminin uygun aralıkta olması, farklı çelik türlerinin katılma esnasındaki davranışlarının bilinmesi ve sürekli döküm sürecindeki değişkenlerin söz konusu ayrıntılara göre belirlenmesi büyük öneme sahiptir.

Bu çalışmada hurdadan çelik üretimi yapılan bir tesiste bulunan sürekli döküm sürecindeki birincil ve ikincil soğutma aşamalarına yönelik çalışmalar yapılmıştır. Yapılan çalışmalarda iki farklı kalıp tasarımı belirlenerek üretimi gerçekleştirilmiştir. Kalıp-1 tasarımında kalıp koniklik ölçüleri değiştirilerek ürün kalitesi ve üretkenlik konusunda artış sağlanması hedeflenmiştir. Kalıp-1 ile elde edilen sonuçlar ürün kalitesine olumlu etki etmesine karşın üretkenlik artışı bakımından istenilen sonuçları sağlamaması nedeniyle ikincil soğutma bölgesindeki soğutma dağılımında yapılan değişikliklerle birlikte Kalıp-2 tasarlanmıştır. İkincil soğutma bölgesinde yapılan değişikliklerde soğutma şiddetinin ikincil soğutma bölgesi boyunca soğutma şiddetinde parabolik geçiş olacak şekilde sürdürülmesi sağlanmıştır. Birincil soğutma ve ikincil soğutma aşamalarında yapılan iyileştirmelerin üretkenlik ve ürün kalitesi bakımından sonuçları incelenmiştir. Ürün kalitesi bakımından ise alınan numunelerde Brinell sertlik ölçümü yapılarak makro ve mikro dağlama sonuçları irdelenmiştir. Üretkenlik bakımından bakır kalıp aşınmaları, üretim esnasında ulaşılabilen en yüksek döküm hızı ve yol kaybı verileri değerlendirilmiştir.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Yapılan çalışma kapsamında yöntem, uygulama, malzeme ve kimyasal bileşim gibi yönlerden benzer olan çalışmalar araştırılmış olup aşağıda verilmiştir.

Zhu ve Kumar (Zhu ve Kumar, 2007) tarafından yapılan kalıp tasarımı çalışmasında yüksek hızlarda ısı transferinin iyileştirilmesine yönelik olarak döküm esnasında meydana gelen büzülme miktarının modellenmesi yapılmıştır. Çalışmada döküm hızı, döküm sıcaklığı, kalıptaki çalışma mesafesi ve kalıp boyutları gibi etkenler hesaba katılmıştır. Ayrıca doğrusal ısıl genleşme katsayısının çelik kimyasal bileşimindeki karbon miktarına göre değişimi göz önünde bulundurularak içerdiği karbon miktarına göre çelikteki büzülme miktarının farklı olduğu ortaya koyulmuştur. Döküm esnasında artan bakır kalıp cidar sıcaklığına bağlı olarak kalıpta meydana gelen çarpılma miktarı belirlenmiştir. Ancak yapılan çalışma ile belirlenen koniklik ölçülerinin ürün kalitesi ve üretime etkisi ile ilgili herhangi bir ayrıntı üzerinde durulmamıştır (Zhu ve Kumar, 2007).

Wang ve arkadaşları (Wang, vd., 2010a;2010b) birisi yuvarlak diğeri kare olmak üzere iki farklı ölçüt için uygun kalıp tasarımının belirlenmesine yönelik olarak iki boyutlu benzetim çalışması gerçekleştirmişlerdir. Yapılan benzetim çalışmasında 23CrMoV, X42, ST45EQ, 37Mn5V, ER70S6 ve B72LX çelik türlerinin 1,8 m/dk ile 2,9 m/dk arasında değişen döküm hızlarındaki büzülme oranları hesaplanmıştır. Yapılan hesaplamada sıcaklığı bağlı yoğunluk, ısıl iletkenlik, özgül ısı değişkenleri için geçerli denklemler kullanılmıştır. Çalışmada bakır kalıpta meydana gelen çarpılma miktarları göz önünde bulundurulmamıştır. Çalışma sonucuna göre farklı çelik türlerinin üretimi esnasında üç farklı kalıp tasarımı kullanmanın uygun olduğu sonucuna ulaşılmıştır (Wang, vd., 2010a;2010b).

Li ve Thomas (Li ve Thomas, 2003) tarafından %0,27 karbon içeriğine sahip çelik türü için uygun kalıp konikliğinin belirlenmesi üzerine yapılan çalışmada 120x120 mm kesit için oluşturulan büzülme modelinde 1 m/dk ile 4 m/dk arasındaki döküm hızlarında meydana gelen büzülme oranları hesaplanmıştır. Çalışmada %0,27 karbon içeren kimyasal bileşime sahip çelik için kalıp konikliğinin %1,4/m olması gerektiği

sonucuna ulaşılmıştır. Kalıptaki arpılma miktarının kalıp tasarımında göz önünde bulundurulması gereken ve çarpılma miktarının kalıptaki ısı transferi miktarı ile ilişkili olan bir değişken olduğu belirtilmiştir. Kalıp tasarımının ötesinde uygun koniklik değerine sahip kalıbı kullanmanın ısı transferine olumlu yönde etki edeceği ortaya koyulmuştur. Bu kapsamda %1,4/m koniklik değeri ile ısı akışı 90 MJ/m² iken; kalıpta koniklik olmadığı durumda ısı akışı miktarının 10 MJ/m²'e kadar düştüğü sonucuna ulaşılmıştır. Bu nedenle kalıp konikliğinin döküm değişkenlerine uygun olması yüksek döküm hızlarına ulaşılması bakımından önemli olduğu ifade edilmiştir (Li ve Thomas, 2003).

Chow ve arkadaşları (Chow, 2001; Chow, vd., 2002a; 2002b) tarafından yapılan çalışmada kütük döküm makinesinde 120x120 mm kesite sahip kütük üretimi için 3,0 m/dk ile 4,5 m/dk arasındaki döküm hızlarında başarılı bir şekilde kullanılan kalıp tasarlanmıştır. Tasarlanan kalıplarda elik seviyesindeki çarpılmaya ve üretim esnasında meydana gelen büzülmeye bağlı olarak koniklik ölçüleri belirlenmiştir. İkincil soğutma bölgesi ile ilgili ayrıntılar üzerinde durulmamıştır. DeneySEL alışma sonucundaki üretkenlik verileri çalışmadaki gizlilik nedeniyle paylaşılmamıştır. İlk bölümde (Chow, vd., 2002a) kalıptaki ısı transferinin döküm hızı, elik türü, kalıp veya döküm tozu kullanımı gibi etkenlere bağlı olduğu ortaya koyularak üretkenliğin sağlanabilmesi ve gerekli olan ürün kalitesine ulaşılabilmesi için koniklik ölçüsünün önemi ortaya koyulmuştur. İkinci bölümde (Chow, vd., 2002b) farklı elik türleri için katılma esnasında meydana gelen büzüleme ile döküm esnasında kalıpta meydana gelen çarpılma miktarları göz önünde bulundurularak oluşturulan çoklu koniklik ölçülerine sahip kalıp tasarımında birincil soğutmada meydana gelen ısı transferi miktarında artış sağlanmıştır (Chow, 2001; Chow, vd., 2002a; 2002b).

Amitan ve arkadaşları (Amitan, vd., 2005) tarafından kütük döküm makinesinde yüksek hızlarda döküm yapılmasına yönelik olarak uygun kalıp tasarımının belirlenmesi amacıyla değişken döküm hızlarında ve farklı miktarda karbon içeren elik türlerinde meydana gelen büzüleme miktarının hesaplanması konusunda çalışma yapmıştır. Çalışma kapsamında kimyasal bileşim olarak %0,06, %0,09, %0,17, %0,2, %0,38 ve %0,45 karbon içeriğine sahip çelikler için 3,2 m/dk ve 5,0 m/dk döküm hızlarında 130x130 mm kesitteki büzüleme oranları sayısal analiz yöntemi ile

hesaplanmıştır. Birincil soğutmada meydana gelen katılaşmada oluşan kabuk sıcaklığının döküm hızına bağlı olarak çok fazla değişmemesi ve büzülme miktarında çelik türünde yer alan karbon miktarının etkili olduğu büzülme miktarlarının belirlenmesinde ortaya koyulan önemli ayrıntılar olmuştur. Yapılan sayısal analizde döküm hızının 0,4 m/dk artması durumunda katılaşan kabuk sıcaklığının 4 °C civarında arttığı sonucuna ulaşılmıştır. Çalışma sonucunda 3,2 m/dk ve 5,0 m/dk döküm hızlarında farklı çelik türleri için büzülme oranlarına göre öngörülen kalıp tasarımlarına dair ayrıntılar Çizelge 2.1’de yer almaktadır. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda her kalite için 4 farklı koniklik ölçüsü olan kalıp tasarlanmıştır. Tavsiye edilen kalıp tasarımlarındaki koniklik mesafeleri 300 mm, 280 mm, 210 mm ve 210 mm olarak belirlenmiştir. Yapılan tasarımlarda bakır kalıpta meydana gelen çarpılma miktarı göz önünde bulundurulmamıştır (Amitan, vd., 2005).

Çizelge 2.1. Farklı çelik türleri için öngörülen koniklik ölçüleri (Amitan, vd., 2005)

Karbon Miktarı (%)	Kalıp Koniklik Mesafeleri ve Koniklik Miktarlıları (%)			
	1. Koniklik 300 mm	2. Koniklik 280 mm	3. Koniklik 210 mm	4. Koniklik 210 mm
0,06	1,044	0,902	0,585	0,280
0,09	0,484	0,492	0,416	0,353
0,17	1,204	1,015	0,601	0,259
0,20	0,726	0,626	0,392	0,199
0,38	0,485	0,418	0,262	0,134
0,45	0,746	0,644	0,404	0,206

Fukada ve arkadaşları (Fukada, vd., 1999) tarafından yapılan çalışmada EAO bulunan bir tesiste artan üretim kapasitesi ihtiyacını karşılamak amacıyla kütük döküm makinesindeki üretkenliği arttırmaya yönelik iyileştirmeler incelenmiştir. Yapılan iyileştirmelerde yüksek döküm hızına uygun koniklik ölçüleri belirlenerek birincil soğutmadaki değişkenlerde değişiklik yapılmıştır. Değişen koniklik ölçülerine ve artan döküm hızına uygun olarak imalatı yapılan kalıpta köşe yarıçapı ölçülerinde katılaşma esnasında kalıp cidarı ile katılaşan kabuk temasını önleyecek şekilde değişiklik yapılmıştır. Tasarımı yapılan kalıp ve ikincil soğutma bölgesindeki değişikliklerle

birlikte 130x130 mm kesit üretiminde 4,6 m/dk döküm hızına ulaşılmıştır. Kütük döküm makinesinde sağlanan kapasite artışının yanında üretilen paralel kenarlık kusuru görülen kütük miktarında %1,11'den %0,58'e düşüş sağlanmıştır (Fukada, vd., 1999).

Samarasekera ve Brimacombe (Samarasekera ve Brimacombe, 1984) tarafından yapılan çalışmada kütük döküm makinelerinde bakır kalıpların ısı ve mekanik davranışları ele alınmıştır. Çalışma kapsamında farklı döküm ve kalıp değişkenleriyle ilgili kalıp cidarı sıcaklıkları ve kalıptaki çarpılma miktarları arasındaki ilişki ortaya koyulmuştur. Kalıp cidarının kalınlığı, kalıptaki çelik seviyesi, dökülen çeliğin kimyasal bileşimi gibi unsurlar kalıp cidar sıcaklığına etki etmektedir. Çalışmada elde edilen verilere göre farklı boyut ve ölçülerde en fazla çarpılmanın kalıptaki çelik seviyesinin 50-90 mm altındaki mesafede görüldüğünü ortaya koymaktadır (Samarasekera ve Brimacombe, 1984).

Xie ve Yin (Xie ve Yin, 2008) tarafından yapılan çalışmada yüksek döküm hızlarında üç boyutlu olarak kalıpta meydana gelen ısı gerilme olayının sonuçları sonlu elemanlar yöntemi kullanarak irdelenmiştir. Yapılan irdeleme sonucunda kalıp cidarındaki sıcaklığın kalıptaki çelik seviyesinden kalıp çıkışına kadar değişiklik gösterdiği, kalıp cidarı sıcaklığına bağlı olarak meydana gelen çarpılmanın kalıptaki çelik seviyesinin 35-50 mm altında meydana geldiği sonucuna ulaşılmıştır. Bu kapsamda birincil soğutma suyu hızındaki artış ve kalıp cidarının kalınlığının artırılması kalıpta meydana gelen çarpılmayı azaltacak etkenler olduğu belirtilmiştir (Xie ve Yin, 2008).

Park ve arkadaşları (Park, vd., 2002) tarafından yapılan çalışmada kalıptaki köşe yarıçapının katılma sürecine etkisi irdelenmiştir. Çalışma kapsamında kütük döküm makinesinde birincil soğutmada meydana gelen katılma uygun olmayan koniklik ve köşe yarıçapı ölçüsünün şekil kusurlarına neden olduğu ortaya koyulmuştur. Koniklik ve köşe yarıçapı ölçüsü son ürün kalitesinde iyileşme sağlamanın ötesinde kalıp ömründe belirleyici bir etken olarak ön plana çıkmıştır. Kalıptaki köşe yarıçapını arttırmanın son ürünün daha oval kenarlara sahip şekilde üretilmesinde etkili olmasına

karşın artan köşe yarıçapı ile birlikte uygun koniklik ölçüsünü belirlemenin önemli olduğu sonucuna ulaşılmıştır (Park, vd., 2002).

Samarasekera ve Brimacombe (Samarasekera ve Brimacombe, 1982) tarafından yapılan çalışmada kütük döküm üretiminde yaşanan paralel kenarlık sorunlarının birincil soğutma suyu ve kalıp cidarında meydana gelen çarpılma ile ilişkisi incelenmiştir. Yapılan irdelemede birincil soğutma suyunun kalıp cidarını etkin bir şekilde soğutamaması nedeniyle paralel kenarlık sorununun ortaya çıkabileceği, kalıp cidarını etkin bir şekilde soğutmak amacıyla birincil soğutma suyu hızını 11 m/s üzerine çıkarmanın önemli olduğu ortaya koyulmuştur (Samarasekera ve Brimacombe, 1982).

Barella ve arkadaşları (Barella, vd., 2014) yaptıkları çalışmada kütük döküm makinesinde kullanılan kalıpta meydana gelen aşınma konusunu araştırmışlardır. Krom kaplanmış olan 150x150 mm kesitli kalıplarda meydana gelen aşınmanın döküm esnasında ortaya çıkan ısı gerilmeler ve sıvı çelik içeriğindeki yüksek çinko içeriğinden ileri geldiği sonucuna ulaşmışlardır. Çalışma kapsamında kalıptan alınan parçalar taramalı elektron mikroskobu (TEM) ile incelenmiştir. Yapılan görsel incelemede kalıbın üst kısmından 350 mm aşağıda krom kaplamanın hasar gördüğü, kalıbın dış cidarında ise ilgili bölgede döküm anında ortaya çıkan yüksek kalıp cidarı sıcaklığına bağlı olarak renk değişikliği olduğu görülmüştür. Aşınma mekanizmalarının incelendiği çalışmada kalıp ömrü ile ilgili sayısal veriler yer almamaktadır (Barella, vd., 2014).

Cheung ve arkadaşları (Cheung ve Garcia, 2001; Cheung, vd., 2006) yaptıkları çalışmada SAE 1010 çelik türü için sayısal ısı transfer modeli ve yapay zekâ sezgisel sorun çözme tekniğini kullanarak üretkenlik ve ürün kalitesinde artış sağlamışlardır. Bu çalışmada bilgisayar modeli ile metalürjik gereksinimler bir arada bulundurularak iyileştirilmiş soğutma şartlarının oluşturulması mümkün hale getirilmiştir. Bu sayede kütük döküm makinesinde metalürjik boy kısaltılarak kalite sorunu olmayan kütüklerin üretimi sağlanmıştır. Oluşturulan model sonucunda ikincil soğutma bölgesinde yapılan değişiklikler kütük döküm makinesinin üretkenliğini arttırmada etkili olmuştur (Cheung ve Garcia, 2001; Cheung, vd., 2006).

Heard ve Kaell (Heard ve Kaell, 1999) yaptıkları çalışmada sürekli döküm alanındaki gelişmeler doğrultusunda ticari olarak uygulanan yeni teknolojilerin ayrıntılarını ön plana çıkarmıştır. Çalışma kapsamında çatlak oluşumuna elverişli yüksek karbon miktarına sahip çelik türleri için yüksek döküm hızına ulaşılabilmesi amacıyla salınım sistemi, ikincil soğutmada uygulanan soğutma şiddeti ve kalıp boyu ile ilgili ayrıntılar ele alınmıştır. İkincil soğutma bölgesi ile ilgili iyileştirmelerde daha sert soğutmanın yapılabilmesi için kalıp altı sonrasındaki bölgelerde fıskiye sayılarında değişiklikler yapılmıştır. Salınım sistemi, kalıp boyunun 700 mm'den 1000 mm'ye çıkarılması ve ikincil soğutma bölgesindeki değişiklikler ile tüm çelik türlerinin üretim hızında %30 civarında artış sağlanmıştır (Heard ve Kaell, 1999).

Irwing (Irwing, 1993) tarafından yapılan çalışmada ikincil soğutma bölgesindeki soğutma şiddetinin boyuna çatlak üzerine etkisi incelenmiştir. Çalışma kapsamında ikincil soğutma bölgesindeki birinci ve ikinci kademedeki soğutma şiddetlerinde değişiklik yapılarak boyuna çatlak oranındaki değişiklik izlenmiştir. Sonuç olarak ikincil soğutma bölgesindeki ikinci kademenin uygulanan soğutma şiddeti bakımından boyuna çatlak konusunda ilk kademededen daha etkili sonuçlara neden olduğu ortaya konulmuştur (Irwing, 1993).

Zhang ve arkadaşları (Zhang, vd., 2015) yuvarlak kesit üretimi yapılan bir kütük döküm makinesinde yetersiz ikincil soğutmanın gerilme ve sıcaklık üzerine etkisi konusunda çalışma yapmışlardır. Yapılan çalışmada ikincil soğutma bölgesinde kullanılan püskürtme lülelerinin döküm esnasındaki tarama açısının ve soğutma kademelerinde uygulanan soğutma şiddetinin önemli olduğunu ortaya koymuştur. Özellikle ilk kademelerde henüz yeni katılaşmakta olan kabuğun ince olması soğutma şiddetindeki değişikliklerin bağlı olarak ürün kalitesinin önemli düzeyde etkilediği sonucu ortaya çıkmıştır (Zhang, vd., 2015).

Kittaka ve arkadaşları (Kittaka, vd., 2000) tarafından yapılan çalışmada 130x130 mm ölçüte sahip kütüklerde 6 m/dk döküm hızına ulaşılmıştır. Bu çalışmada 800 mm uzunluğunda olan kalıp ve 2 bölgeden oluşan ikincil soğutma bölgesi iyileştirilmiştir. Birincil soğutma bölgesinde koniklik ölçülerinin iyileştirilmesinin yanında kalıp boyu 900 mm'ye çıkartılarak kalıp çıkışında kütüğün ilk katılaşma

şeklini koruması için 2 sıra kalıp çıkışı rölesi eklenmiştir. İkincil soğutma bölgesi ise 2 bölgeden 3 bölgeye çıkarılarak su debisi arttırılmıştır (Kittaka, vd., 2000).

Emi ve Fredriksson (Emi ve Fredriksson, 2005) kimyasal bileşim olarak peritektik dönüşüm aralığındaki çelik türlerinin yassı ürün üretiminde yüksek döküm hızı ile üretilmesi konusunda çalışma yapmışlardır. Yapılan çalışma döküm tozu ile üretilen ve yassı ürün üretim sürecini hedef alması nedeniyle kütük üretimi ile doğrudan karşılaştırmaya uygun olmamasına karşın yüksek döküm hızında peritektik dönüşüm nedeniyle boyuna yüzey çatlağına neden olabilecek sınırlandırmaları kapsamlı şekilde ele almaktadır. Çalışma kapsamında kimyasal bileşim olarak peritektik dönüşüm aralığındaki çeliklerin katılaşmanın başlangıç aşamasında dengesiz katılaşma davranışı nedeniyle yeterli dayanıma sahip kabuk oluşturmaya elverişli olmadığı ortaya koyulmuştur. Dengesiz katılaşma davranışının yanında peritektik dönüşümde ortaya çıkan gerilme boyuna çatlak oluşumunu tetikleyen unsur olarak belirtilmiştir. Kimyasal bileşim olarak peritektik dönüşüm aralığındaki çelik türlerinin yüksek döküm hızında üretilmesi ısı transferinin yetersiz olması ve dengesiz katılaşmanın ortaya çıkma olasılığını arttırması söz konusu olmaktadır. Çalışma sonucunda peritektik dönüşümün tüm çelik türlerinde istenilen yüksek döküm hızına ulaşılmasındaki engel olduğu belirtilmiştir (Emi ve Fredriksson, 2005).

Raudensky ve Horsky (Raudensky ve Hosky, 2005) tarafından yapılan çalışmada Leidenfrost sıcaklığının ikincil soğutmadaki etkisini deneysel olarak incelemişlerdir. Deneysel çalışmada püskürtülen su damlacığının büyüklüğü, basınç, döküm hızı, yüzey sıcaklığı ve su püskürtme lülelerinin konumu gibi etkenlerin Leidenfrost sıcaklığı üzerine etkisi irdelenmiştir (Raudensky ve Hosky, 2005; Raudensky, vd, 2016).

Agarwal (Agarwal, 1979) yaptığı çalışmada orta ve yüksek karbonlu kimyasal bileşime sahip çelik türlerinin 10,8x10,8, 15,2x15,2 ve 20,3x20,3 cm ölçülerinde üretildiği kütük döküm makinesinde merkez çatlaklarının giderilmesine yönelik olarak farklı ikincil soğutma dağılımlarını uygulamıştır. Üç farklı ikincil soğutma bölgesi dağılımının uygulandığı ve sonuçlarının incelendiği çalışmada temel olarak ikincil soğutma kademelerindeki dağılımlarda, püskürtme lülelerinde, su miktarı ve

basıncında değişiklikler yapılmıştır. Son aşamada başarılı olarak uygulanan ikincil soğutma bölgesi dağılımında ilk duruma kıyasla üçüncü kademe mesafesi kısaltılarak alt kademelerdeki lüle sayıları azaltılmıştır. Aynı zamanda püskürtme suyunun basıncı yükseltilerek daha küçük damla boyutuna sahip püskürtme suyunun etkin bir şekilde soğutma yapması mümkün hale getirilmiştir. Yapılan değişiklikler sonucunda merkez çatlakları büyük ölçüde giderilerek 10,8x10,8 cm kesit ölçüsüne sahip kütükte ulaşılabilen en yüksek 3,8 m/dk olmak üzere döküm hızında yaklaşık %50 oranında artış sağlanmışır. Çalışma kapsamında yol kaybı ile ilgili herhangi bir veri paylaşılmamıştır (Agarwal, 1979).

Chaudhuri ve arkadaşları (Chaudhuri, vd., 2010) döküm esnasında kütük yüzey sıcaklığında ikincil soğutma bölgesinde yeniden sıcaklık artışı olmasını önlemek amacıyla programlanabilir mantıksal denetleyici altyapısı ile çalışan ikincil soğutma bölgesi konusunda çalışma yapmışlardır. Yapılan çalışma sonucunda etkin soğutma mesafesinin ve uygulanan soğutma yönteminin ürün kalitesi üzerinde etkili olduğu görölmüşür (Chaudhuri, vd., 2010).

Mamuzic ve arkadaşları (Mamuzic, vd, 2005) kütüklerdeki kalite kusurlarının haddeme sürecine etkisini inceleme konusunda çalışma yapmışlardır. Yapılan çalışmada gaz boşlukları ve çatlakların haddeme ürünlerine olan etkisinin ile olan ilişkilerini incelemişlerdir. Bu kapsamda üretilen kütüklerden örneklemeler yaparak haddeme sürecinde meydana gelebilecek kalite kusurlarını değerlendirilmiştir. Çalışmada üretilen 125x125 mm ölçüdeki kütükten ve haddeme sürecindeki yarı ürünlerden alınan numunelerde makro ve mikro incelemeler yapılarak Brinell ve Vickers sertlik ölçümleri gerçekleştirmişlerdir (Mumuzic, vd, 2005).

Sahoo ve arkadaşları (Sahoo, vd., 2009) yaptıkları çalışmada kütük döküm makinesinde düşük ve orta karbon çelik türlerinin üretiminde elektromanyetik karıştırmada uygulanan farklı akım ve frekans değerlerinin kesit numunesi üzerindeki etkisini ultrasonik ölçüm ve görsel işleme teknikleri kullanarak incelemişlerdir (Sahoo, vd., 2009).

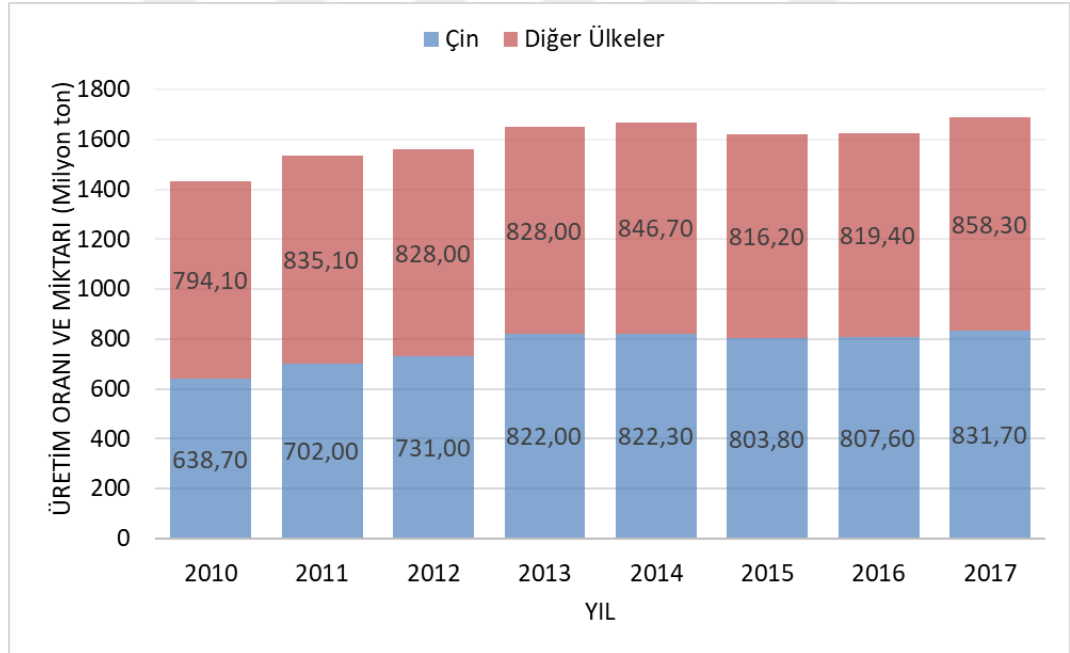
Su ve arkadaşları (Su, vd., 2014) yaptıkları çalışmada yüksek karbon içeriğine sahip kütüklerin sürekli döküm sürecindeki ısı transferi ile merkezde meydana gelen makro ayrışmayı incelemişlerdir. Yapılan incelemede %0,81 karbon içeriğine sahip 160x160 mm ölçüdeki kütüklerde birincil ve ikincil soğutmadaki ısı transfer miktarları belirlenerek ikincil soğutma bölgesinde kütük yüzey sıcaklıkları ölçülmüştür.



3. DÜNYADA VE TÜRKİYE’DE ÇELİK SEKTÖRÜ

3.1. Dünyada ve Türkiye’de Ham Çelik Üretimi

Dünyada çelik üretim miktarı artarak devam etmektedir. Nitekim 2017 yılında dünyadaki toplam ham çelik üretimi bir önceki yıla göre %5 artış göstererek 1.691,2 milyon ton olarak gerçekleşmiştir (Worldsteel Association, 2018). Çin, Japonya, ABD (Amerika Birleşik Devletleri), Hindistan, Güney Kore, Rusya, Almanya ve Türkiye ham çelik üretimi konusunda dünyada en fazla üretimi gerçekleştiren 8. ülke konumundadır. BRIC (Brezilya, Rusya, Hindistan, Çin) ülkeleri dünya ham çelik üretiminin yaklaşık %60’ını; Çin dünya ham çelik üretiminin yaklaşık %50’sini gerçekleştirmektedir. Şekil 3.1’de Çin ile diğer ülkelerin ham çelik üretimine ait karşılaştırma yer almaktadır. Türkiye’nin 2017 yılındaki ham çelik üretimi 37,5 milyon ton olarak gerçekleşmiştir. Ham çelik üretimi 2016 yılına kıyasla %13 oranında artış göstermiştir (Worldsteel Association, 2018).

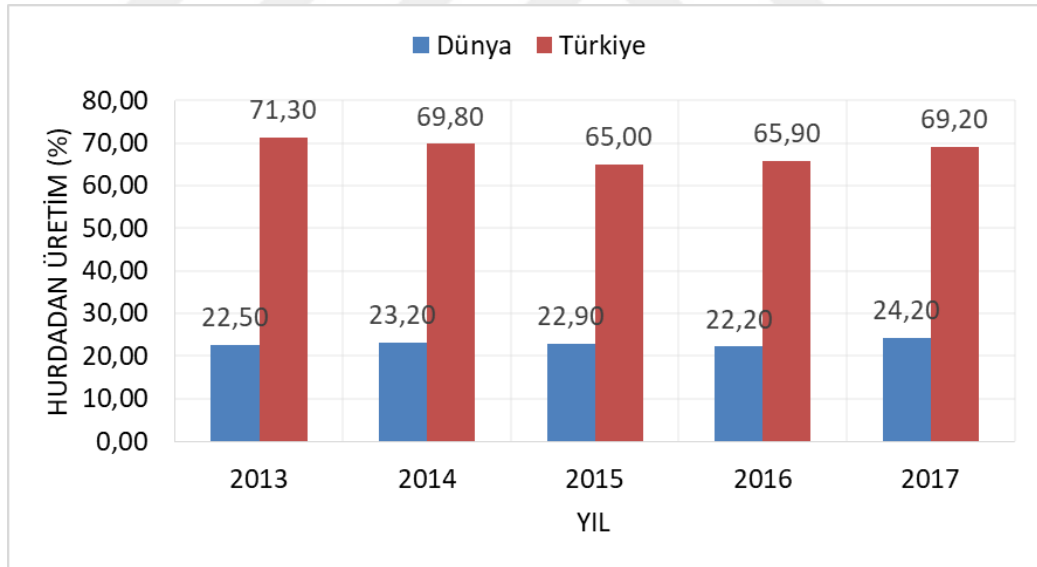


Şekil 3.1. Çin ve diğer ülkelerdeki çelik üretimi (Worldsteel Association, 2018)

Hammadde olarak değerlendirildiğinde 2017 yılında dünyada çelik üretiminin 1 milyar 228 milyon ton ile %72,7’sini cevherden üretim yapılan tesisler; 445 milyon ton ile %26,3’ünü hurdadan üretim yapılan tesisler gerçekleştirmiştir

(Bureau of International Recycling Ferrous Division, 2018) Ancak ülkemizdeki üretim dinamikleri dünyadaki çelik üretimine göre farklılık göstermektedir. Türkiye'nin 2017 yılındaki çelik üretiminin 11,55 milyon ton ile %30,8'ini cevherden üretim yapılan tesisler; 25,95 milyon ton ile %69,2'sini hurdadan üretim yapılan tesisler gerçekleştirmiştir. Türkiye'de 2017 yılındaki ham çelik üretiminde hurda kullanım oranı %80,8'dir. Bu orana yüksek fırın sürecindeki hurda kullanım oranları da dahildir (Bureau of International Recycling Ferrous Division, 2018).

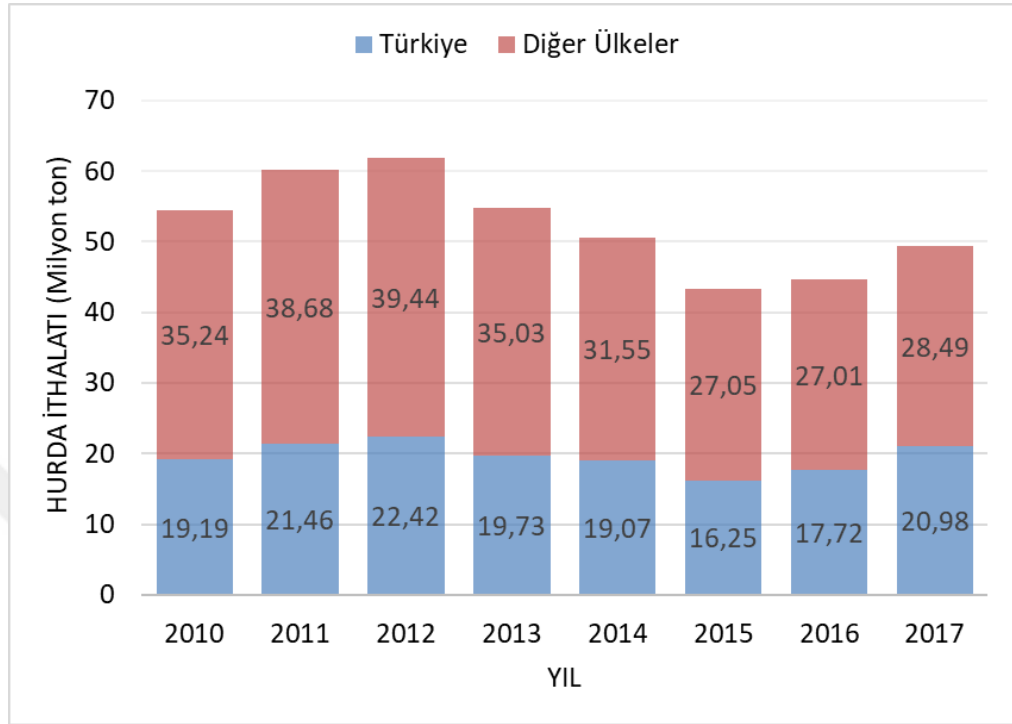
Dünya genelinde ham çelik üretiminde cevherden çelik üretim oranı ortalama %70 civarındadır. Ancak dünya ham çelik üretiminde cevher kullanımındaki ortalamadan farklı olarak ham çelik üretiminde hurdadan üretim yapan tesislerin 2017 yılı itibariyle üretimdeki oranı Türkiye'de %70 ve ABD'de %68 civarındadır (Bureau of International Recycling Ferrous Division, 2018). Şekil 3.2'de Türkiye ve dünyada çelik üretiminde hurdadan üretim yapan tesislerin oranına ait karşılaştırma yer almaktadır (Bureau of International Recycling Ferrous Division, 2018).



Şekil 3.2. Türkiye ve dünyada ham çelik üretiminde hurda kullanımı oranı (BIR, 2018)

Sırasıyla Türkiye, Güney Kore, Hindistan, ABD, Tayvan ve Avrupa Birliği dünyada en fazla hurda ithalatı; Avrupa Birliği, ABD, Japonya, Rusya, Kanada, Çin ve Avustralya dünyada en fazla hurda ihracatı gerçekleştiren ülkelerdir (Bureau of

International Recycling Ferrous Division, 2018). Şekil 3.3'te Türkiye ve dünyadaki hurda ithalatının durumu görülmektedir.



Şekil 3.3. Türkiye ve dünyada hurda ithalatı (BİR, 2018)

3.2.Dünyada ve Türkiye’de Üretim Kapasitesi ve Kapasite Kullanımı

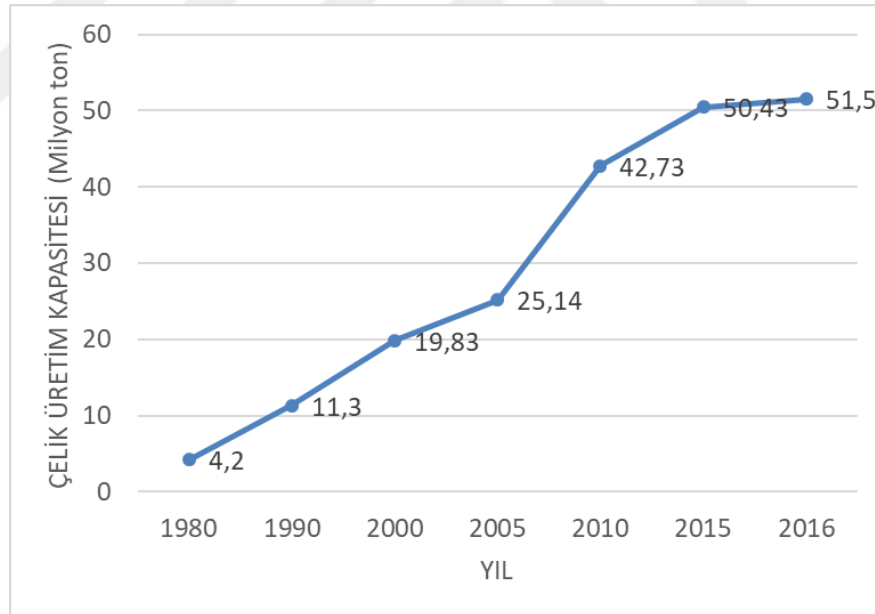
Gelişen üretim teknolojileri sayesinde demir-çelik sektöründe yüksek miktarlarda üretim gerçekleştirilmektedir. Dünya genelinde çelik sektöründeki arz ile talep arasında uyum olmaması belirli dönemlerde çelik üreticilerini ekonomik olarak baskı altına almaktadır. Dünya genelinde yavaş şekilde artan talebe rağmen pek çok ülkede verimlilikle ilgili değerlendirmeler yapılmadan kapasite artışının sağlanması çelik sektöründe yaşanan finansal krizlerin ortaya çıkmasını tetikleyen en büyük etkidir (Christian, 2009).

Dünyada ve Türkiye’de üretim kapasitesi, kurulu kapasitenin kullanım oranı arasındaki uyumsuzluk demir çelik sektörü ile ilgili finansal zorlukları beraberinde getirmektedir. Uzun vadeli planlamaların yapılamaması, dünya genelinde talebin yavaşlaması gibi etkenler sonucunda ortaya çıkan arz fazlasına rağmen yatırımların

sürdürülmesi kapasite kullanım oranının planlanmasındaki önemli eksiklikler arasında yer almaktadır (OECD DSTI, 2015).

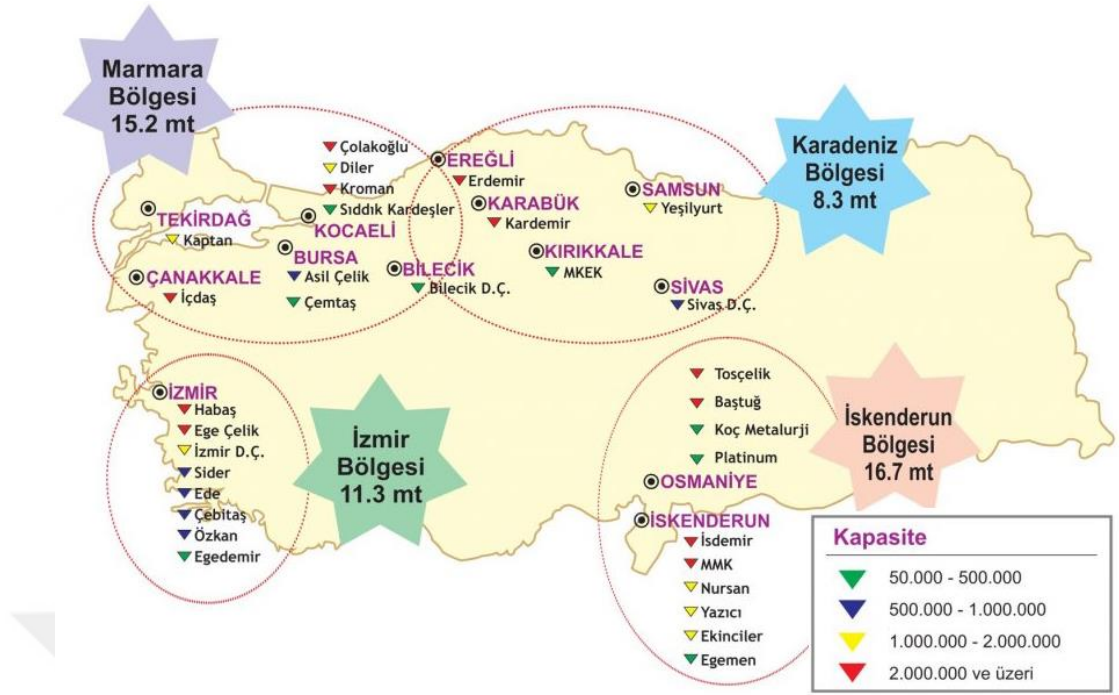
OECD verilerine göre 2013 yılından bu yana artmaya devam eden dünyadaki çelik üretim kapasitesi sadece 2017 yılında bir önceki yıla kıyasla %1,3 düşüş göstererek 2.251.200.000 tona ulaşmıştır. 2018-2020 yılları arasında özellikle Orta Doğu’da tamamlanması planlanan 52 milyon ton üretim kapasitesinde yatırım bulunmaktadır. Ayrıca aynı süreç içerisinde 39 milyon ton üretim kapasitesine sahip tesisin yatırımı ile ilgili planlamalar devam etmektedir (OECD, 2018).

Türkiye Çelik Üreticileri Derneği (TÇÜD) verilerine göre 2016 yılında Türkiye’nin 51,5 milyon ham çelik üretim kapasitesi mevcuttur. Ancak 2017 yılında Türkiye’nin 2017 ham çelik üretimi 37,5 milyon ton olarak gerçekleşmiştir. Şekil 3.4’te Türkiye’nin ham çelik üretim kapasitesinin yıllara göre değişimi yer almaktadır (TOBB, 2016; Worldsteel Association, 2018).



Şekil 3.4. Türkiye’nin ham çelik üretim kapasitesinin değişimi (TOBB, 2016)

Türkiye’deki çelik üretim kapasitesinin dağılımı 15,2 milyon ton Marmara Bölgesi, 8,3 milyon ton Karadeniz Bölgesi, 11,3 milyon ton İzmir Bölgesi ve 16,7 milyon ton İskenderun Bölgesi olarak gerçekleşmektedir. Şekil 3.5’te Türkiye’de bölgelere göre çelik üreticilerinin durumu yer almaktadır.



Şekil 3.5. Türkiye’de bölgelere göre çelik üreticilerinin durumu (TÇÜD, 2018)

Türkiye’de çelik üretim tesisleri genel olarak 4 bölgede toplanmıştır. Ayrıca üretim kapasitesi 1 milyon tonun üzerinde olan 18 çelik üretim tesisi bulunmaktadır. Özellikle İskenderun Bölgesi mevcut tesislerin yanında planlanan yatırımlarla birlikte Türkiye’nin çelik üretiminde lokomotif olma niteliği taşımaktadır.

4. ÇELİK ÜRETİM SÜRECİ

Çelik üretiminde demir cevheri ve hurda olmak üzere temel olarak iki farklı hammadde kullanılır. Cevherden üretim esas olarak yüksek fırın; hurdadan üretim EAO süreciyle gerçekleştirilir. Her iki süreç için en az iki aşama bulunur. Bu aşamalardan ilkinde hammadde olarak kullanılan cevher veya hurdanın ergitilmesi ya da indirgenmesi sağlanır. İkinci aşamada ise sıvı haldeki ham demirin veya çeliğin ikincil metalürji işlemleri gerçekleştirilir. Cevherden çelik üretimi hurdadan çelik üretimine kıyasla çok daha karmaşık ve uzun bir süreçtir. Uygun hammadde kalitesinin sağlanması halinde cevherden veya hurdadan üretimi yapılan çeliklerde istenilen mekanik özellikler elde edilir. Önemli olan nokta çelik üretim sürecinde hammaddeden veya kullanılan oksit giderici elementlerinin uygun olan değerler arasında olmasıdır (Tupkary ve Tupkary, 2018).

Yüksek fırın süreciyle çelik üretiminde demir cevherinden ilk olarak sıvı ham demir elde edilir. Yüksek fırında elde edilen sıvı ham demire hurda ile bazik oksijen fırınına yüklenerek ham çelik üretimi gerçekleştirilir. Eklenen hurda ham demir içerisindeki karbonun oksijen ile yakılması esnasında ortaya çıkan enerjiyi kullanmak ve aynı zaman yüksek sıcaklıklara ulaşılmasını önlemek için kullanılır. Bazik oksijen fırınındaki işlemlerin fırına yükleme ve fırını boşaltma işlemlerinin toplam süresi 40-60 dakika arasındadır (Tupkary ve Tupkary, 2018).

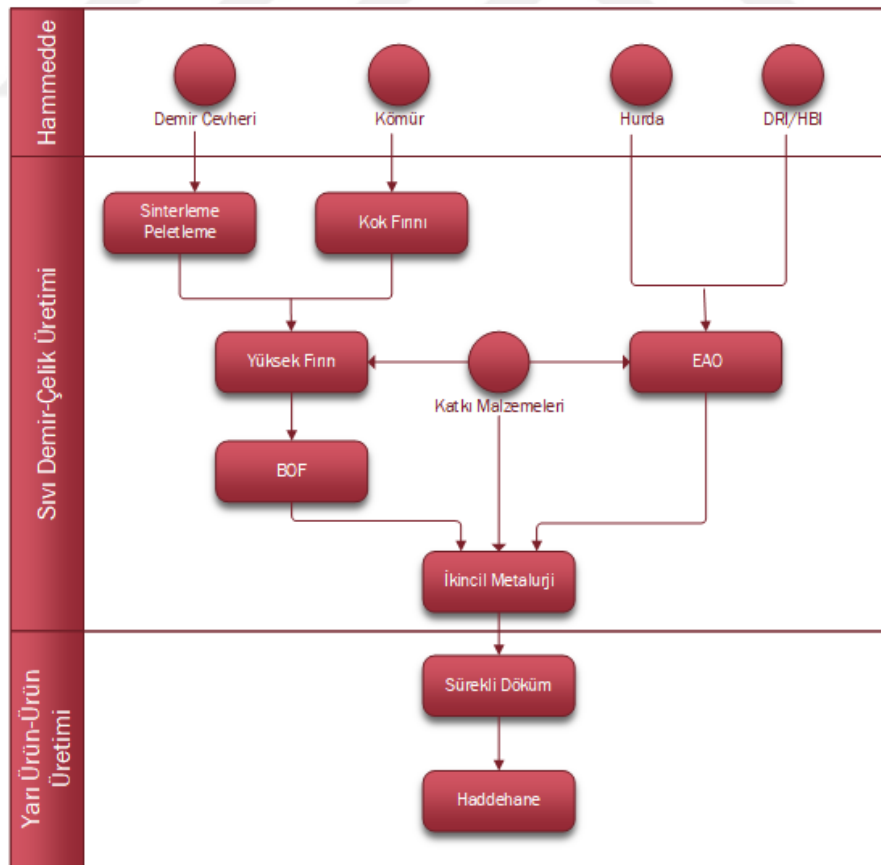
EAO sürecinde hammadde olarak hurda kullanılır. Hurdanın sıvı çelik haline dönüştürülmesi için elektrik arkı (elektrot ve hurda) ve kimyasal enerji kullanılır. EAO sürecinde hurda dışında ham demir ve indirgenmiş demir cevheri (sünger demir veya sıcak briketlenmiş demir) kullanımı söz konusu olabilmektedir. Uygun kapasite ve teçhizata sahip EAO için dökümden döküme süre hammadde ve çelik miktarına bağlı olmakla birlikte genellikle 30-60 dakika arasındadır. Elektrik enerjisinin yüksek maliyeti EAO ile çelik üretiminde karlılığı sınırlayan en önemli etkenler arasında yer almaktadır (Tupkary ve Tupkary, 2018).

Yüksek fırın ve EAO sürecinde elde edilen sıvı ham çelik ikincil metalürji işlemlerine tabi tutularak istenilen kimyasal bileşim ve sıcaklığa getirilir. İkincil metalürji

işlemlerinde gerekli kimyasal özelliklerin elde edilebilmesi için pota ocağındaki işlemlerin ardından vakumda gaz giderme işlemi uygulanabilir (Fruehan, 1998).

İkincil metalürji işlemlerinin ardından istenilen kimyasal bileşim ve uygun sıcaklıktaki sıvı ham çelik sürekli döküm sürecinde yarı ürün haline getirilir. Sürekli döküm sürecinde elde edilen yarı ürün haddeleme süreci ile son ürüne ya da son üründe kullanılabilecek şekle dönüştürülür (Louhenkilpi, 2014).

Haddehaneden sonra elde edilen sac, profil, filmaşın, çubuk veya nervürlü çubuk doğrudan son ürün olarak kullanılabilir. Haddeleme sürecinden sonra üretilen ürünlerin mekanik ve işlenebilirlik özelliklerine göre tel veya boru üretiminde hammadde olarak işlenerek son ürün haline dönüştürülebilir. Şekil 4.1’de demir-çelik üretim sürecinin genel görünümü yer almaktadır (AIST, 2011). Demir-çelik üretim süreçlerini hammadde, sıvı demir-çelik, yarı ürün veya ürün üretim aşamaları olarak sınıflandırabilmek mümkündür.



Şekil 4.1. Demir-çelik üretim süreci (AIST, 2011)

4.1. Cevherden Çelik Üretim Süreci

Cevherden çelik üretimi kok kömürü ve cevherin üretim sürecine uygun hale getirildiği aşamalarla başlar. Kok bataryalarında kömür, içerisindeki safsızlıklardan arındırılır. Peletleme ve sinterleme tesislerinde cevher yüksek fırına uygun hale getirilir. Yüksek fırına hammadde olarak sinter ve pelet halindeki cevher, yakıt olarak kok, cüruf yapıcı olarak kireç ve dolomit yüklenir. Fırına üflenen sıcak hava yakıt olarak fırına yüklenen kokun yanmasını sağlayarak indirgeme işlemi için gerekli olan yüksek sıcaklığa ulaşılmasını ve demir cevherindeki oksijenin indirgenmesi için gerekli olan gazın elde edilmesini sağlar. İndirgenen ham demir fırının alt kısmında toplanır. Bu süreç içerisinde fırına yüklenen kireç ve dolomit cevher içerisindeki safsızlıklarla tepkimeye girerek cüruf oluşmasını sağlar. Sıvı haldeki cüruf ham demir ile birlikte fırının alt kısmında toplanır. Belirli bir yüksekliğe ulaşan ham çelik ve cüruf banyosu döküm deliği açılarak yüksek fırından tahliye edilir (Burgo, 1999).

Yüksek fırından 1 ton sıvı ham demir elde edilmesi için yaklaşık olarak 1,7 ton demir cevherine, 350-550 kg kok veya yakıta, 250 kg kireç veya dolomite ve 1,6-2,0 ton havaya ihtiyaç vardır. Yüksek fırında üretilen 1 ton sıvı ham çelik ile 200-400 kg cüruf, 25-50 kg baca tozu, 2,0-3,0 ton yüksek fırın gazı ortaya çıkar (Burgo, 1999).

Yüksek fırından elde edilen sıvı demir yüksek karbon içeriğine sahiptir. Ham demir olarak adlandırılan bu ürün kükürt giderme ve bazik oksijen fırını süreçlerinden sonra ikincil metalürji işlemlerine tabi tutularak sürekli döküm makinelerinde yarı ürün haline getirilir (Burgo, 1999).

4.2. Hurdadan Çelik Üretim Süreci

Hurdadan çelik üretimi hammadde olarak hurdanın sürecine uygun şekilde hazırlanmasının ardından EAO süreci ile başlar. Geri dönüşüm olarak nitelendirilebilecek olan hurdadan çelik üretimi, cevherden çelik üretimine kıyasla daha dinamik bir süreçtir. EAO sürecinde hurda tipine göre oluşturulmuş hurda bileşimleri ocağa yüklenerek kimyasal ve elektrik enerjisi yardımıyla ergitme işlemi gerçekleştirilir. Ergitme işleminden sonra elde edilen sıvı çelik ikincil metalürji

işlemleri sonrasında uygun kimyasal bileşim ve sıcaklıkla sürekli döküm makinelerinde yarı ürün haline getirilir. EAO süreci ile çelik üretimini makul hale getiren konu yatırım maliyetlerindeki farklılıklardır. Ancak günümüzde çelik üretimindeki yenilikler EAO süreci ile üretilen çeliklerin kalite bakımından BOF ile üretilen çeliklerle rekabet edebilecek düzeye getirmiştir (Jones, vd, 1998).

4.3. Çelik Üretiminde Sürekli Döküm Süreci

Sürekli döküm süreci çelik üretiminde ikincil metalürji işlemlerinin tamamlanmasının ardından sıvı çeliğin yarı ürün haline getirildiği aşamadır. Sürekli döküm süreci üretkenlik, verimlilik ve son ürün kalitesi konusunda sunduğu faydalardan dolayı günümüz çelik üretiminde önemli bir süreçtir. Dünyadaki çelik üretiminin %95'inden fazlası sürekli döküm süreci ile üretilmektedir (Wolf, 2003; Worldsteel Association, 2018).

Çelik üretiminde ergitilen ve ikincil metalürji olarak gerekli işlemlerden geçen sıvı haldeki çeliğin sahip olduğu metalürjik özelliklerinin son ürün elde edilene kadar en iyi şekilde korunması gerekir. Sürekli döküm sürecinde çelik üretiminde kalite kaybı yaşamadan sıvı haldeki çeliğin belirli ısı transferi mekanizmaları ile katılaşmanın sağlanması sonucunda yarı ürün elde edilir (Samarasekera ve Chow, 2003).

Sürekli döküm süreci potadaki sıvı çeliğin üretim esnasında sıvı çeliği sağlayan bir hazne görevi gören tandiş ile başlar. Tandiş sıvı çeliği sağlayan bir hazne olmasının ötesinde sürekli döküm sürecinde sıcaklık kontrolünün yapıldığı, yeniden oksitlenmenin önleildiği ve çok sınırlı bir şekilde ikincil metalürji sürecindeki bazı işlemlerin sürdürüldüğü bir aşama olma niteliği taşır. Pota ile tandiş arasında döküm şartlarına bağlı olarak refrakter bir parça olan aratüp kullanılır. Aratüp akış esnasında sıvı çeliğin yeniden oksitlenmesini ve potadan tandişe akış özelliklerinin iyileştirilmesini mümkün hale getirir (Samarasekera ve Chow, 2003).

Tandişteki sıvı çelik miktarı pota değişimlerinde sürekli döküm sürecinde üretimin devamlılığını sağlar. Sürekli döküm sürecinde üretim hızına bağlı olarak belirli miktarda sıvı çelik tutan tandiştan sonraki aşama ilk katılaşmanın gerçekleştiği ve

birincil soğutma olarak adlandırılan kalıptır. Tandış ile kalıp arasında üretilen ürün kalitesine ve üretim ihtiyaçlarına bağlı olarak pota ve tandış arasındakine benzer şekilde daldırma lülesi kullanılabilir. Daldırma lülesinin kullanılması sıvı çeliğin döküm esnasında yeniden oksitlenmesini önler. Tandıştan kalıba gerçekleşen akış miktarının farklı akış kontrol mekanizmaları ve refrakter parçaları ile kontrol edilmesi mümkündür (Samarasekera ve Chow, 2003).

Sıvı çeliğin kalıba ulaşması ile birlikte sürekli döküm sürecinde katılaşma için gerekli olan ısı transferi başlar. Birincil soğutma olarak adlandırılan aşama olan kalıpta sürekli döküm sürecindeki ilk katılaşma gerçekleşir. Kalıpta gerçekleşen ilk katılaşma sürekli döküm sürecinin daha sonraki aşaması için yeterli dayanımı sağlayacak kabuğun katılaşmasını ve üretilecek ürün için gerekli olan ilk şeklin verilmesini sağlamak bakımından önemlidir. Birincil soğutma aşamasında sıvı çeliğin katılaşmasını sağlamak için gerçekleşmesi gereken ısı transferinin çok az bir miktarı sağlanabilir. Sıvı çeliğin katılaşması için uzunluğun genel olarak 0,7 metre ile 1,2 metre arasında değişen kalıptan sonra ısı transferinin sürdürülmesi gerekir. Bu aşamada katılaşmanın yanında radyoaktif, elektromanyetik veya ısıl kamera yardımı ile kalıptaki çelik seviyesinin sürekli olarak ölçümü söz konusudur (Samarasekera ve Chow, 2003).

Birincil soğutma aşamasının ardından başlayan katılaşma henüz tamamen katılaşmamış fakat belirli bir kabuğa sahip olan ürün üzerine su püskürtülerek ısı transferinin sağlanmasının ardından ikincil soğutma aşaması başlar. İkincil soğutma katılaşmanın sürdürülmesi ve istenilen ürün kalitesine sahip olunması için katılaşma miktarı ile katılaşma esnasındaki gerilmenin kontrol altında tutulması gereken bir aşamadır. İkincil soğutma bölgesinde belirli basınç ve debi şartları ile katılaşma kontrol altında tutulur (Samarasekera ve Chow, 2003; Wolf, 2003). İkincil soğutma bölgesinden çıkan kütükler katılaşmanın tamamen tamamlanmasının ardından kesilmek üzere kesime ve sonrasında tahliye bölgesine gönderilir. Şekil 4.2’de sürekli döküm makinesinin genel görünümü yer almaktadır.



Şekil 4.2. Sürekli döküm makinesinin genel görünümü

5. SÜREKLİ DÖKÜM SÜRECİNDE BİRİNCİL SOĞUTMA

Süreklî döküm sürecindeki en önemli bileşen kalıptır. Sıvı çeliğin kalıba dökülmesinin ardından kalıpta gerçekleşen ısı transferiyle katılaşma başlar. Kalıpta birincil soğutmadan sonra ikincil soğutmanın sonuna kadar süren katılaşmada yeterli dayanımı sağlayacak kabuğun oluşturulması, aynı zamanda mikro çatlak oluşumuna neden olmayacak şekilde gerilmelerin sınır değerlerinin altında tutulmasını mümkün kılacak soğutma şiddetinin uygulanması önemlidir. Birincil soğutma ve ikincil soğutma aşamalarındaki soğutmanın yetersiz olması katılaşmanın tamamlanamamasına, yüzey ve şekil kusurlarına, uygun olmayan içyapı oluşumuna neden olur (Emi, 2003).

5.1. Birincil Soğutmada Isı Transferine Etki Eden Unsurlar

Kalıpta gerçekleşen ısı transferi karmaşık bir olaydır. Ancak süreklî döküm sürecinde kapasite ve ürün kalitesi konularında artan ihtiyaçlar katılaşmanın izlenmesine yönelik çalışmaları bir zorunluluk haline getirmiştir. Süreklî döküm sürecinde katılaşmanın izlenmesi konusundaki ihtiyaçların karşılanabilmesi adına farklı modeller geliştirilmesi için çalışmalar yapılmıştır. Bu kapsamda geliştirilen modellerde birincil soğutmada kullanılan en yaygın yöntem kalıptaki ısı transferi konusundaki fiziksel değişkenlerin incelenmesidir.

Süreklî döküm sürecinde birincil soğutmanın gerçekleştiği kalıpta döküm esnasında oluşan kabuk, sıvı çelik ve kabuğun etrafında salınım hareketi ile yağlama ve ısı transferini sağlayan cüruf ya da yağ bulunur. Kalıpta sağlanabilecek ısı transferinin miktarı ve sınırları çelik türü, döküm sıcaklığı, döküm hızı ve boyut ile ilgilidir. Birincil soğutmada ısı transferine etki eden unsurlar şunlardır (Gilles, 2003);

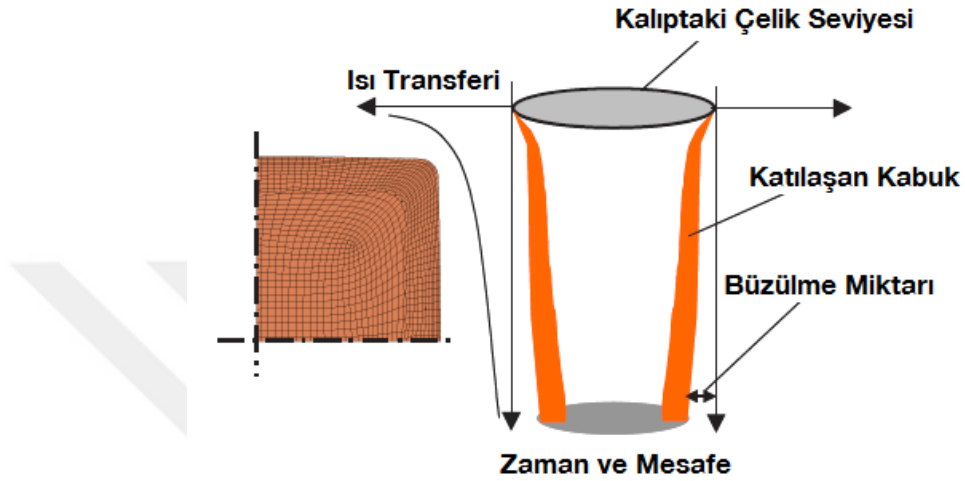
- Döküm hızı
- Yağlama türü
- Salınım değişkenleri
- Kalıp tasarımı
- Kalıp soğutma suyu hızı
- Kalıp soğutma suyu sıcaklığı

- Kalıp seviyesi
- Döküm sıcaklığı
- Kimyasal bileşim
- Kalıptaki aşınma durumu
- Daldırma lülesi tasarımı ve dalma mesafesi
- Kalıba argon püskürtülmesi

Döküm hızı, kimyasal bileşim ve döküm sıcaklığı değişkenlerinin birbiriyle ilişkili olarak uygun şekilde belirlenmesi dökülebilirlik ve ürün kalitesi bakımından önemlidir. Birincil soğutma için çelik türü ve döküm hızı değişkenlerine bağlı olarak bakır kalıp tasarımının değerlendirilmesi, ihtiyaç duyulan üretkenliğin ve son ürün kalitesinin sağlanması için gereklidir. Bu kapsamda kalıp tasarımının yanında salınım değişkenlerinin kalıp seviyesindeki dalgalanmayı en düşük düzeyde tutacak şekilde belirlenmesi, akışla ilgili refrakterlerin (daldırma lülesi) veya akış kontrol teçhizatlarının (durdurucu veya sürgü kontrol sistemi) kullanılması gibi birincil soğutmayı etkileyebilecek diğer değişkenlerin de değerlendirilmesi önemlidir (Gilles, 2003).

Katılma sürecindeki ısı transferi ile birincil soğutma aşamasında kalıp çıkışına doğru katılma kabuk kalınlığı artar ve sıvı faz oranı azalır. Şekil 5.1’de görüldüğü gibi döküm esnasında katılma kabuk ile kalıp arasındaki boşluğun oluşması ve katılma kabuğun kalıp cidarına tam olarak temas etmemesi birincil soğutma aşamasında ısı transferini düşürür (Gilles, 2003; Li ve Thomas, 2003; Thomas, 2002). Kalıp cidarı ile katılma kabuk arasındaki boşluğun fazla olması birincil soğutma aşamasında daha düşük ısı transfer katsayısının ortaya çıkmasına neden olur. (Xin, vd., 2008). Isı transferinin yetersiz olması yol kayıplarının meydana gelmesine ve üretilen kütükte kalite sorunlarının (çatlak, paralel kenarlık ve köşe basıklığı) ortaya çıkmasına neden olur (Gilles, 2003; Li ve Thomas, 2003; Samarasekera ve Chow, 2003; Thomas, 2002). Kalıp cidarı ile katılma kabuk arasındaki boşluğun en aza indirilmesi veya tamamen ortadan kaldırılması için kalıp iç cidarında parabolik veya çoklu koniklik ölçüsüne sahip olması gerekir (Chow ve Samarasekera, 2002; Florio , vd., 2017; Wang, vd., 2010). Kalıp tasarımının iyileştirilmesinin yanında kalıp dış cidarında dolanan su debisi ve basıncı (Emi ve Fredriksson, 2005; Samarasekera ve Brimacombe, 1982)

salınım frekansı ve miktarı, çelik kimyasal bileşimi (Chow ve Samarasekera, 2002) ve yağlayıcı türü (Samarasekera, vd., 1999) birincil soğutmadaki ısı transferi miktarını etkiler. Benzetim çalışmalarında ve kalıp tasarımlarında katılaşma, akış dinamikleri ve ısı transfer mekanizmaları ile ilgili tüm ayrıntılar göz önünde bulundurulmalıdır (Jalali, 2013).



Şekil 5.1. Katılaşma benzetiminin şematik gösterimi (Wang, 2010b)

5.2. Bakır Kalıp Tasarımında Büzülme Unsuru

Sürekli döküm süreci ısı transferi mekanizmaları ile katılaşmanın gerçekleştiği bir süreçtir. Çeliğin katılaşması esnasında her malzemede olduğu gibi büzülme meydana gelir. Meydana gelen büzülme ile çelik hacimsel olarak küçülür. Döküm esnasında kalıpta meydana gelen büzülme kalıp ile katılaşan kabuk arasında boşluk oluşumuna neden olur. (Chow ve Samarasekera, 2002a; 2002b; Fukada, vd., 1999; Li ve Thomas, 2003; Meng ve Thomas, 2003; Wang, vd., 2010a). Meydana gelen büzülme ile ortaya çıkan boşluk kalıpta gerçekleşen ısı transferinde düşüşe neden olur (Florio, vd., 2017).

Demir-çelik üretim sürecinde farklı çelik türlerinin aynı üretim düzeninde dökülmesi, döküm hızının üretim şartlarına içerisinde değişmesi ve tüm bunlara rağmen gerekli ürün kalitesi şartlarının sağlanması söz konusu olmaktadır. Kuramsal olarak en iyi ürün kalitesine ulaşılması için farklı kalıp tasarımlarının kullanımı sürekli döküm süreci için gerekli görülse de uygulamada bu durumu gerçekleştirilebilecek şartların sağlanması oldukça zordur. Sürekli döküm sürecinin endüstriyel olarak uygulanması

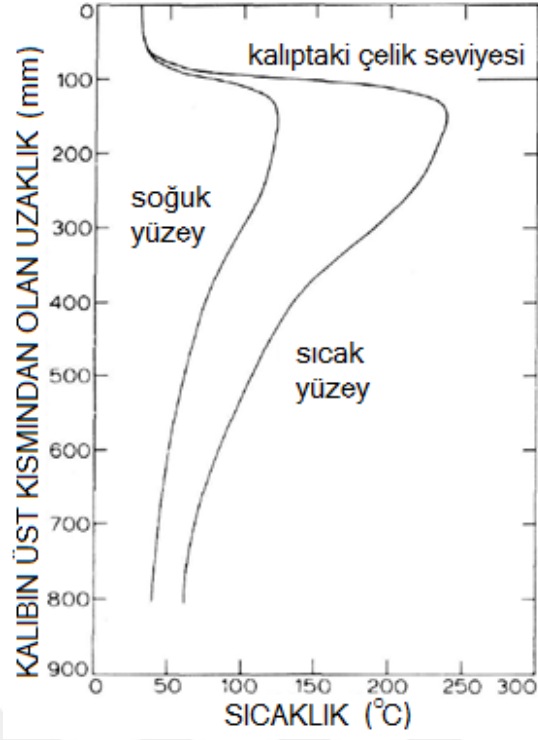
esnasında değişen şartlar göz önünde bulundurularak kabul edilebilir ürün kalitesini sağlayabilecek tek bir kalıp tasarımının kullanılması yaygın bir yaklaşım olarak ön plana çıkmaktadır. Bu nedenle kalıp tasarımında üretilecek çelik türünün kimyasal içeriğinin öncelikli olarak değerlendirilmesi gerekir.

5.3. Bakır Kalıp Tasarımında Çarpılma Unsuru

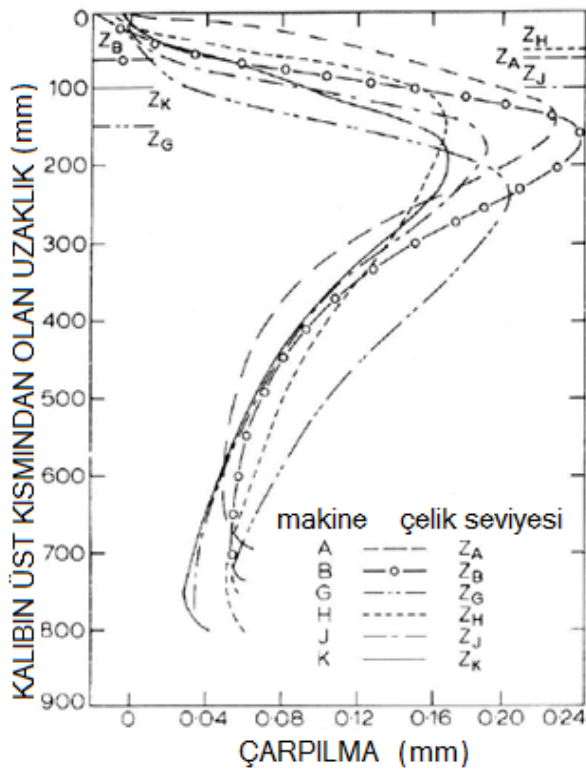
Birincil soğutmada kalıp cidarı ile katılaşan kabuk arasındaki mesafeyi arttıran etkenlerden birisi kalıpta meydana gelen çarpılmadır. Kalıpta meydana gelen çarpılma sıvı çelik ile sürekli temas halinde olan kalıp yüzeyindeki yüksek sıcaklık nedeniyle meydana gelen genleşmeden ileri gelir. Kalıp cidarındaki sıcaklık artışı tüm kalıp boyunca aynı şekilde gerçekteşmez. Kalıptaki çelik seviyesinden başlayarak kalıp çıkışına kadar olan bölgede değişkenlik gösterir (Samarasekera ve Brimacombe, 1984).

Yapılan ölçümlere göre kalıp cidarındaki sıcaklıkların ve çarpılmanın yaklaşık değerler ortaya koyduğu görölmektedir. şekil 5.2 ve 5.3'te kalıp boyunca kalıp cidarındaki sıcak ve soğuk yüzeyde yapılan sıcaklık ölçümleri ve kalıpta meydana gelen çarpılma miktarları görölmektedir. şekil 5.2 ve 5.3'te kalıp cidarında sıcaklığın yüksek olduğu bölgelerde kalıptaki çarpılma miktarının en yüksek değere ulaştığı ön plana çıkmaktadır (Samarasekera ve Brimacombe, 1984).

Döküm anında kalıpta meydana gelen çarpılmada kalıptaki koniklik değerinin uygun olmaması halinde en yüksek çarpılma noktasının öncesinde katılaşan kabuk ile kalıp arasında boşluğun oluşmasına neden olacak eksi koniklik; sonrasında ise artı katılaşma esnasında meydana gelen büzölmede kabuk-kalıp cidarı temasını sağlamak için gerekli olan pozitif koniklik olduğu görölmüştür. Eksi koniklik değerinin %1 ile 3 arasında, pozitif koniklik değerinin %0,4 civarında olduğu Samarasekera ve Brimacombe (Samarasekera ve Brimacombe, 1984) tarafından yapılan çalışma sonuçlarında görölmektedir.



Şekil 5.2. Kalıp cidarının soğuk ve sıcak yüzeyindeki sıcaklık ölçümleri (Samarasekera ve Brimacombe, 1984).



Şekil 5.3. Farklı kalıplarda kalıp cidarındaki çarpılma miktarları (Samarasekera ve Brimacombe, 1984).

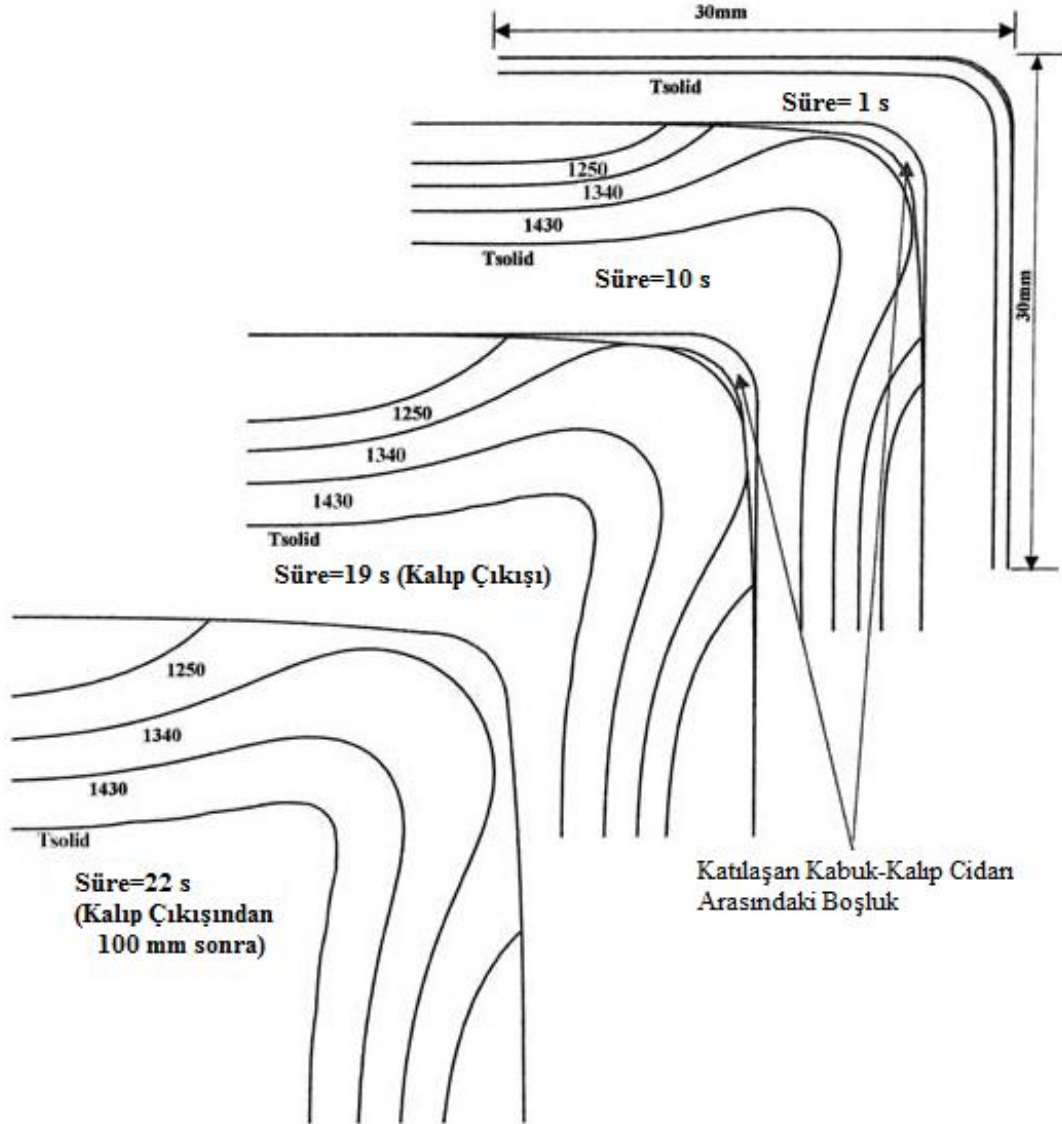
5.4. Bakır Kalıp Tasarımında Köşe Yarıçapı Unsuru

Sürekli döküm sürecinde meydana gelen katılaşma esnasında ortaya çıkan iç gerilme ve büzülme miktarı iç yapıda çatlaklara veya şekil kusurlarına neden olabilir. Bu nedenle kalıp içerisindeki katılaşan kabuk ile kalıp cidarı arasında boşluk oluşmasını önlemenin yanında sıcaklık ve gerilme dağılımının uygun şekilde olması önemlidir. Kütük döküm makinesindeki kalıplarda sıcaklık dağılımını ve katılaşma esnasında meydana gelen gerilmeyi belirli sınırlar dahilinde kontrol altına alabilmek için kalıp köşelerinin yuvarlak olması durumundan faydalanılır. Köşe yarıçapı olarak adlandırılan bu ölçünün katılaşmayı geciktirerek kalıp içerisinde veya kalıp çıkışında boyuna çatlak oluşumuna neden olmayacak kadar küçük, katılaşmadan kaynaklanan gerilmeleri dağıtarak şekil kusurlarının oluşmasını önleyecek kadar büyük olması gerekir (Park, vd., 2002).

Kütük üretiminde edinilen tecrübeler kalıptaki köşe yarıçapı ölçüsünün 3-4 mm'lere indirilmesinin boyuna çatlak oluşumunu önlemede etkili olduğunu ortaya koymaktadır. Fakat köşe yarıçapı ölçüsünün 3-4 mm gibi küçük ölçülere düşürülmesi katılaşma esnasında üretilen ürünün köşelerine yakın bölgelerinde şekil kusuru sorununu beraberinde getirebilmektedir. Bu nedenlerden dolayı özellikle yüksek döküm hızlarında köşe yarıçapı ölçüsünün uygun şekilde belirlenmesi son derece önemlidir (Park, vd., 2002). Köşe yarıçapı ölçüsünün doğru bir şekilde belirlenmesi çelik türüne, döküm hızına, kalıbın koniklik ölçülerine bağlıdır. Uygun köşe yarıçapı ölçüsünün belirlenmesi bakır kalıp üreticileri için her zaman için önemli sorunlardan birisidir.

Park ve arkadaşları (Park, vd., 2002) tarafından yapılan çalışmada kalıp köşe yarıçapı ölçüsünün katılaşma ve sıcaklık dağılımına olan etkisini sayısal analiz yöntemiyle incelenmiştir. Şekil 5.4 ve Şekil 5.5'te farklı sürelerde gerçekleşen katılaşmanın durumu ve kütük kesitindeki sıcaklık dağılımı görülmektedir. Köşe yarıçapının 4 mm'den 15 mm'ye yükseltilmesi köşeye yakın bölgelerde ısı transferinin daha az olmasına ve katılaşmanın daha geç gerçekleşmesine neden olduğu kütük üzerindeki ısı haritası çizgilerinden görülmektedir.

Kalıptaki köşe yarıçapı ölçüsünün fazla olması üretilen kütük şeklinin daha uygun olmasını mümkün hale getirebilir. Fakat köşe yarıçapı ölçüsünün artırılması durumunda kalıp koniklik ölçüsünün iyileştirilmesi, uygun döküm şartlarının sağlanması ve kalıp çıkışındaki röle desteğinin iyileştirilmesi önemlidir (Park, vd., 2002).



Şekil 5.4. 4 mm köşe yarıçapında katılaşma ve kabuk-cidar teması (Park, vd., 2002).

6. SÜREKLİ DÖKÜM SÜRECİNDE İKİNCİL SOĞUTMA

Süreklî döküm sürecindeki en önemli aşama ilk katılaşmanın gerçekleştiği birincil soğutma olarak adlandırılan kalıptır. Kalıpta birincil soğutma ile başlayan katılaşmanın sürdürülebilmesi için ikincil soğutma aşamasında su püskürtmeleri ile soğutmaya devam etmesi gerekir. Katılaşma esnasında meydana gelen gerilmelerin mikro çatlaklara neden olabilecek sınırları aşmaması önemlidir. İkincil soğutma aşamasındaki soğutma miktarının birincil soğutma sonrasında katılaşmanın gerekli kalite özelliklerini sağlayacak şekilde sürdürülmesi gereklidir (Louhenkilpi, 2014).

Birincil soğutma sürecinde katılaşma için gerekli olan ısı transferinin sadece %5'i gerçekleştirilir. Birincil soğutma aşamasında kalıpta gerçekleştirilen ilk katılaşma son ürün kalitesi üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Ancak birincil soğutma aşamasından sonra kalıp çıkışından itibaren katılaşma tamamlanana kadar gerekli ısı transferi şartlarının sağlanması önemlidir (Chaudhuri, vd., 2010).

İkincil soğutma bölgesinde istenilen ürün kalitesinin elde edilmesi ve üretim devamlılığının sağlanması için ikincil soğutma bölgesinin tasarımı ve fiziksel şartları, soğutma kontrolü ve soğutma yöntemlerinin oluşturulması, çatlak oluşumuna etki eden unsurlar ve çatlak oluşum mekanizmaları konusundaki ayrıntılar incelenmelidir.

6.1. İkincil Soğutmada Isı Transferine Etki Eden Unsurlar

Süreklî döküm sürecinde ikincil soğutmadaki değişkenlerin ve ortaya çıkabilecek sonuçların kuramsal olarak öngörülebilmesi oldukça zordur. Pek çok değişkenin ısı transferini etkiliyor olması ikincil soğutma konusunda yapılan çalışmalarla doğrudan sonuç alınmasını zorlu hale getirmektedir zorlaştırmaktadır. İkincil soğutmaya etki eden unsurlar şunlardır (Agarwal, 1979);

- Su debisi
- Su hızı
- Püskürtme lülelerinin açısı
- Yüzey sıcaklığı

- Döküm hızı

Birincil soğutmadaki ısı transferi, ikincil soğutmadaki taşınım ve ışıma yoluyla gerçekleşen ısı transferi sürekli döküm sürecinde döküm kapasitesini belirleyen en önemli etkidir. Bu bölgede yapılacak soğutma hedeflenen ürün kalitesinin elde edilebilmesi bakımından son derece önemlidir. Birincil soğutma bölgesi ile ilgili değişkenler (koniklik, kalıp-ceket etkileşimi ve vb.) büyük oranda döküm öncesinde belirlenir. Bu değişkenlere döküm anında yapılacak değişiklikler (birincil soğutma su debisi ve basıncı, kalıp seviyesinin değiştirilmesi) katılaşma sürecini sınırlı biçimde etkiler (Gilles, 2003).

İkincil soğutma bölgesinde uygulanan soğutma yöntemi yüzey kalitesi ve çatlak oluşumu bakımından belirleyicidir. Önemli olan nokta yüksek soğutma şiddetinin uygulanmasından farklı olarak soğutma şiddetinin kontrol edilebilmesidir. İstenilen ürün kalitesinin elde edilebilmesi, yapılan değişikliklerin irdelenebilmesi ve karşılaştırma yapılabilmesi için uygulanan soğutmanın matematiksel olarak takip edilebilmesi önemlidir. İkincil soğutma bölgesindeki kontroller ve değişkenler birincil soğutma bölgesindeki kontroller ve değişkenler kadar karmaşık yapıda değildir. Çünkü ikincil soğutmadaki değişkenlere döküm anında yapılan müdahalelerin sonuçları etkisi daha fazladır (Gilles, 2003).

İkincil soğutmada soğutma süreci püskürtülen suyun buharlaşması şeklinde gerçekleşir. Oluşan kabuk kütük kesiti içerisinde henüz sıvı halde bulunan çelikten ısı transferinin gerçekleşmesini sınırlandıran etken olarak ön plana çıkmaktadır. Püskürtme suyunun etkisi katılaşan kabuktaki ısı dağılımının değişimiyle ısı transferinin sürdürülmesini mümkün olmasını sağlamaktır (Louhenkilpi, 2014).

İkincil soğutma konusunda yapılabilecek çalışmalar şunlardır (Gilles, 2003; Louhenkilpi, 2014);

- Kabuk kalınlığının döküm hızına ve soğutma şiddetine göre değişimi
- Değişken döküm hızlarda çatlak oluşumunun önlenmesi

- Soğutmanın kesintiye uğradığı bölgelerin en aza indirildiği dağılımların yapılması
- Isı transferi katsayısının her kademe için hesaplanması
- Su dağılımının hesaplanması

Sürekli döküm sürecinde ikincil soğutmadaki su püskürtme işlemi basınç ile püskürtülen suyun lülelerdeki tasarımlar sayesinde sağlanan atomizasyon ile gerçekleşir. Döküm ve ürün şartlarına bağlı olarak hava-su karışımı ile su püskürtme yöntemi kullanılabilir. Hava-su karışımının kullanılması sadece su kullanılmasına kıyasla şu faydaları sağlar (Gilles, 2003);

- Damlacık boyutunun daha homojen olması
- Püskürtme lülesinin açıklığının daha fazla olmasından dolayı tıkanma sorununu azaltma
- Daha az su ve daha düşük soğutma şiddetinin homojen bir şekilde uygulanması
- Yüksek döküm hızlarında ve yüksek soğutma şiddetlerinde daha homojen soğutma yapılması

6.2. Sürekli Döküm Sürecinde İkincil Soğutma Kontrolü

Katılaşma ve soğutma kontrolü sürekli döküm sürecinde son yıllarda hızlı gelişme kaydedilen alanların başında gelmektedir. Matematiksel modellemelerin yaygın olarak kullanılmaya başlandığı bu alanda ortaya çıkan gelişmeler deneme yanılma yoluyla kullanılabilir. Katılaşmanın karmaşık bir süreç olması, katılaşmanın kontrolü için değerlendirilmesi gereken değişken sayısının çokluğu ve karmaşıklığı sürekli döküm sürecinde ikincil soğutma kontrolündeki çalışmaların deneme yanılma yoluyla ilerlemesindeki en önemli etkenlerdir.

Yapılacak çalışmalardaki geri bildirimlerle gerçekleştirilen ikincil soğutma kontrolünde matematiksel modellemelerin kullanılması karşılaştırma yöntemi ile daha hızlı sonuç alınabilmesini mümkün hale getirmektedir. Sürekli döküm sürecinde ikincil soğutma bölgesinin otomatik olarak kontrol edilmesinde kullanılan yöntemler şunlardır (Chaudhuri, vd., 2010; Gilles, 2003);

- Soğutma şiddetinin kontrol edildiği soğutma yöntemi
- Hıza bağlı olarak uygulanan değişken soğutma yöntemi
- Geri bildirimle bağlı olarak uygulanan değişken soğutma yöntemi
- Matematiksel modellemelere göre gerçek zamanlı olarak uygulanan soğutma yöntemi

Kullanılan tüm yöntemlerde ikincil soğutma bölgesi kontrolünde önemli nokta üretilen çelik türüne ve üretim hızına bağlı olarak gerekli soğutmanın sağlanmasıdır.

6.2.1. Soğutma Şiddetinin Kontrol Edildiği Soğutma Yöntemi

Sürekli döküm sürecinde ikincil soğutma bölgesinin kontrolünde kullanılabilecek en basit yöntem soğutma şiddetinin kontrol edildiği soğutma yöntemidir. Bu yöntem değişken olmayan döküm hızları için uygundur. Gerekli soğutma şiddetinin sağlanmasına yönelik olarak su debisinin kontrol edilmesi bu yöntemin temel ilkesidir. Karmaşık olmayan bu yöntemde şiddeti nitelik bakımından “yumuşak soğutma” veya “sert soğutma” olarak adlandırılmaktadır. Yumuşak soğutma ve sert soğutma olarak ifade edilen değerler kütük döküm makinesine göre farklılık gösterir. Ancak genel olarak 0,5 l/kg olarak uygulanan soğutma şiddeti “yumuşak” 1,0 l/kg olarak uygulanan soğutma şiddeti “sert” soğutma olarak ifade edilmektedir. Değişen döküm hızı ve farklı çelik türlerinin ardışık olarak üretilmesi gereksinimi ikincil soğutma bölgesinin kontrolünde bu yöntemi yetersiz kılmaktadır (Chaudhuri, vd., 2010; Gilles, 2003).

6.2.2. Hıza Bağlı Olarak Uygulanan Değişken Soğutma Yöntemi

Hıza bağlı olarak doğrusal veya parabolik soğutma yöntemi oluştururken birbirinden bağımsız olarak kontrol edilebilen farklı bölümlerde hıza bağlı olarak su debisinin ne olacağını belirleyebilmek mümkündür.

Hıza bağlı doğrusal soğutma yönteminde döküm hızı, kimyasal bileşim, boyut bilgileri göz önünde bulundurulur. Bu bilgiler programlanabilir kontrol ünitesi üzerinde değerlendirilerek akış kontrol cihazının kontrol edilmesi sağlanır. Hıza bağlı doğrusal soğutma yöntemleri değişken şartların olmadığı durumlarda makul sonuçlar elde

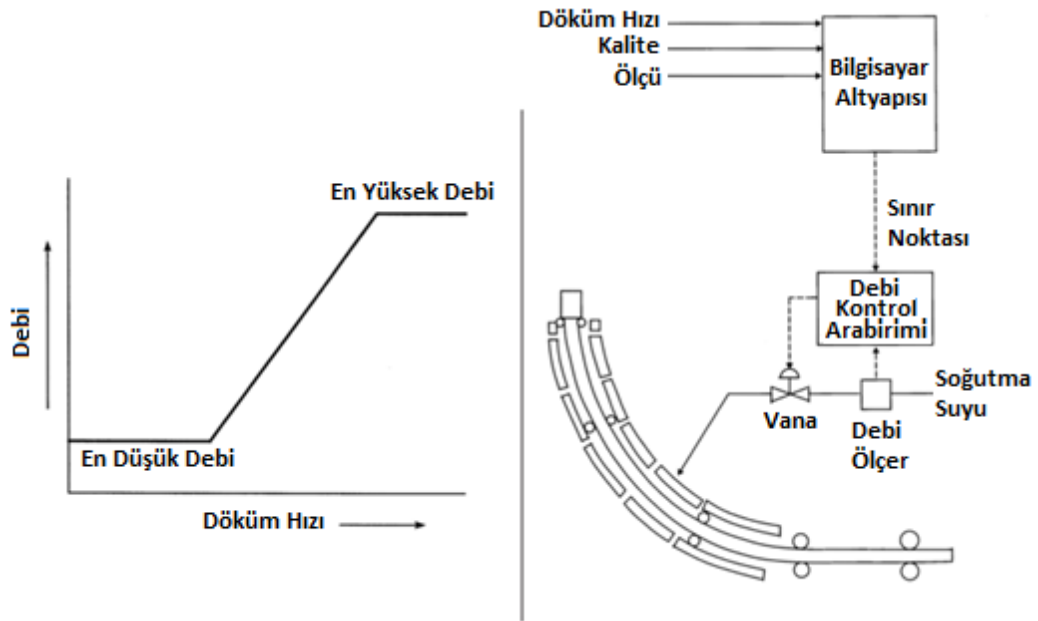
edilmesini mümkün hale getirir. Ancak şartların değişken olması durumunda bu yöntemle ikincil soğutma bölgesinin uygun şekilde kontrolünün sağlanabilmesi güçleşir (Gilles, 2003).

Hıza bağlı doğrusal soğutma yöntemi denklemi denklem (6.1)'de görülmektedir. (Gilles, 2003).

$$Q = c + n \cdot v \quad (6.1)$$

Doğrusal soğutma yönteminde istenilen soğutma şiddeti için su debisinin hesaplanmasında kullanılacak denklem (6.1)'de Q su debisini (l/dk), c ikincil soğutma bölgesindeki en az su debisi miktarının belirlenmesi için kullanılan katsayıyı, n eğimi ve V döküm hızını (m/dk) ifade etmektedir.

İkincil soğutma bölgesinde soğutma kontrolündeki en temel yöntem olan hıza bağlı doğrusal soğutma yöntemi döküm hızında meydana gelen değişikliklerde gerekli tepkiyi gösterebilecek niteliğe sahip değildir. Doğrusal soğutma yöntemi uygulamada soğutma şiddetinin belirlenmesi konusunda tercih edilen en temel yöntemdir. Şekil 6.1'de doğrusal soğutma yönteminin uygulaması görülmektedir.



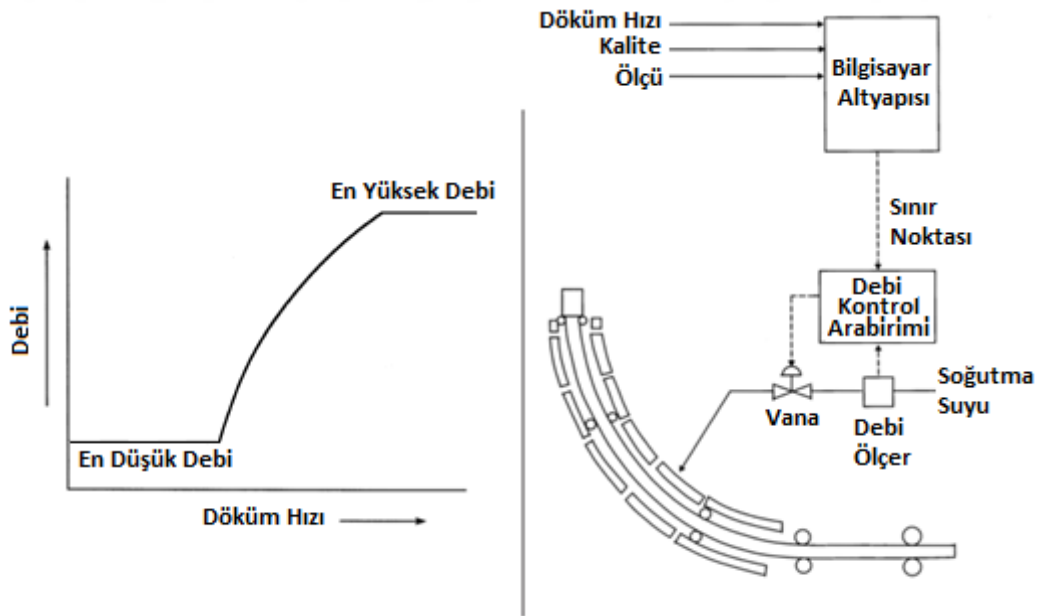
Şekil 6.1. Hıza bağlı doğrusal soğutma yöntemi (Gilles, 2003)

Döküm hızına bağlı olarak uygulanan su debisinin belirlenmesinde daha geniş aralıklı sonuçlar veren bir diğer yöntem hıza bağlı parabolik soğutma yöntemleridir. Hıza bağlı parabolik soğutma yönteminde kullanılan denklem denklem 6.2’de yer almaktadır (Gilles, 2003).

$$Q = av^2 + bv^2 + c \quad (6.2)$$

Parabolik soğutma yönteminde istenilen soğutma şiddeti için su debisinin hesaplanmasında kullanılacak denklem (6.2)’de Q su debisini (l/dk), a, b ve c katsayıları ve v döküm hızını (m/dk) ifade etmektedir.

Parabolik soğutma yöntemi yaygın olarak yassı ürün üretiminde kullanılmaktadır. Fakat uzun ürün üretimi yapılan kütük döküm makinelerinde de uygulanabilmesi mümkündür. Parabolik soğutma yönteminde önemli olan nokta farklı döküm hızlarında elde edilmesi istenen soğutma şiddeti için gerekli su debisini sağlayacak parabolik denklemdeki a, b ve c katsayılarının doğru bir şekilde belirlenmesidir. Şekil 6.2’de parabolik soğutma yönteminin uygulaması görülmektedir (Gilles, 2003).



Şekil 6.2. Parabolik soğutma yönteminin uygulanması (Gilles, 2003)

6.2.3. Geri Bildirime Bağlı Olarak Uygulanan Değişken Soğutma Yöntemi

Geri bildirime bağlı olarak uygulanan değişken soğutma yöntemi sürekli döküm sürecinde ikincil soğutma bölgesinde soğutma şiddetinin kontrolünde kullanılan bir diğer yöntemdir. Bu yöntemde ikincil soğutma bölgesinin farklı noktalarına genellikle üretilen kütüğün yüzey sıcaklığının ölçüldüğü cihazlardan elde edilen veriler geri bildirim olarak uygulanmaktadır. Kütük yüzey sıcaklığının artması durumunda soğutma şiddetinin kontrolünü sağlayan su debisinin miktarı azaltılmakta, azalması durumunda soğutma şiddetinin kontrolünü sağlayan su debisinin miktarı arttırılmaktadır (Agarwal, 1979).

Kuramsal olarak oldukça iyi sonuçlar vermesi beklenen geri bildirime bağlı değişken soğutma yöntemi uygulamada ikincil soğutma bölgesinde kütük yüzey sıcaklığının her zaman tam olarak ölçülememesi, katılaştıran kütük yüzeyi üzerinde oluşan tufal katmanının gerçek yüzey sıcaklığının ölçülmesini zorlaştırması gibi nedenlerden dolayı uygulamada istenildiği şekilde kullanılamamaktadır. Ayrıca çok sayıda yol olan sürekli döküm makinelerinde farklı kademelerde sıcaklık ölçümünü sağlayacak cihazların edinilmesi bu yöntemin uygulanabilirliğini maliyet olarak cazip kılmamaktadır (Agarwal, 1979).

6.2.4. Matematiksel Modelleme İle Gerçek Zamanlı Uygulanan Soğutma Yöntemi

Sürekli döküm sürecinde ikincil soğutmada bölgesinde soğutma şiddetinin kontrol edilmesinde kullanılan en gelişmiş yöntem matematiksel modellemelere göre gerçek zamanlı olarak uygulanan soğutma yöntemidir. Bu yöntemde ısı transferi için geçerli olan matematiksel modellemeler baz alınarak gerçek zamanlı şekilde kütük kesitindeki farklı noktaların ve yüzey sıcaklığının hesaplanması ile katılma için gerekli olan su debisinin uygulanması söz konusu olmaktadır. Döküm başlangıcında ve döküm sonlarındaki değişken durumlara bu yöntemin tam olarak uygulanması yüksek işlem yeteneğine sahip bilgisayar altyapısı gerektirmektedir (Agarwal, 1979).

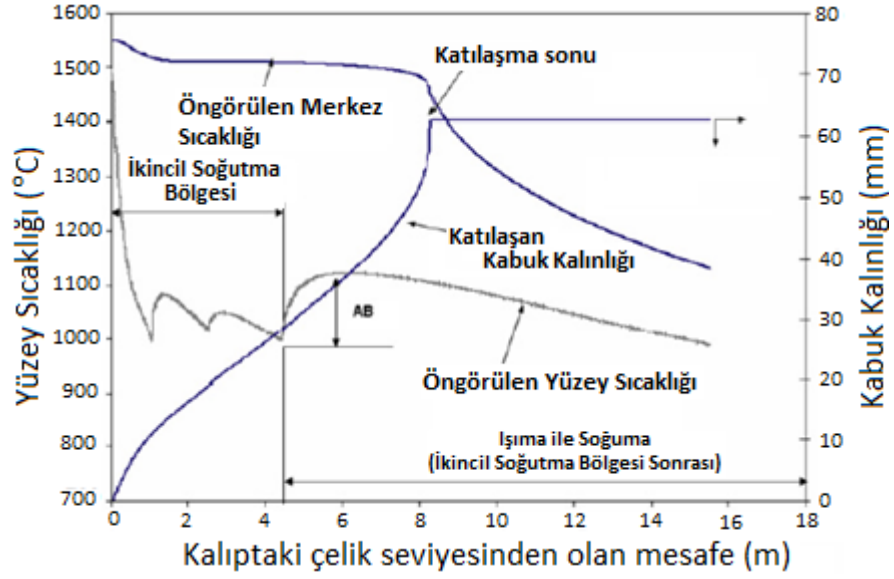
Matematiksel modellemelere göre gerçek zamanlı olarak uygulanan soğutma yöntemi matematiksek yüksek genişlik ve kalınlık oranının olduğu yassı ürün üretiminde

kullanıma uygundur. Yassı ürün üretimindeki şartlar matematiksel modellemelerin basitleştirilmesini mümkün hale getirmektedir (Agarwal, 1979).

6.2.5. İkincil Soğutma Bölgesi Kontrolündeki Güncel Yaklaşımlar

İkincil soğutma bölgesinde soğutma şiddetinin kontrolünde yaygın olarak hıza bağlı soğutma yöntemi kullanılmaktadır. Ancak son yaklaşımlar hıza bağlı soğutma yöntemlerinin kullanımındaki sonuçların öngörülmesini çok daha iyi hale getirmiştir. Geri bildirimle ilgili olarak uygulanan değişken soğutma yönteminin her durumda kullanılamaması, matematiksel model uygulamalarının yüksek miktarda bilgi işlem kapasitesi gerektirmesi ve değişen döküm şartlarına uyum sağlaması için zaman gerekmesi bu yöntemlerin endüstride kullanımını mevcut şartlarda zorlaştırmaktadır (Chaudhuri, vd., 2010; Meng ve Thomas, 2003).

Farklı döküm hızlarında, çelik türlerinde, ikincil soğutma bölgesinde uygulanan soğutma şiddeti ile elde edilecek katılma eğrilerinin oluşturulması yaklaşımı ikincil soğutma bölgesi konusunda büyük fayda sağlamaktadır. Eniyileme çalışmaları, çözümün iyiliğine ilişkin sayısal değer veren hesaplamalar, sinir ağları ve genel algoritmalar uygulanacak soğutma yönteminin vereceği sonuçların karşılaştırılmasını ve uygulama öncesinde değerlendirilmesini mümkün hale getirmektedir. Bu yöntemlerde ikincil soğutma bölgesindeki kademe dağılımları, farklı çelik türleri, değişken döküm sıcaklıkları, su debisi ve boyut gibi değişkenler göz önünde bulundurulmaktadır. Şekil 6.3'te söz konusu yöntemler kullanılarak elde edilen grafik görülmektedir. Grafikte görüleceği üzere kullanılacak farklı sayısal yöntemlerle yüzey sıcaklığının, katılma kabuk kalınlığının ve yüzey sıcaklıklarının soğutma şiddetine göre değişiminin hesaplanabilmesi mümkündür (Chaudhuri, vd., 2010; Meng ve Thomas, 2003).



Şekil 6.3. Sayısal analiz yöntemleri kullanılarak oluşturulan katılaşma eğrisi (Chaudhuri, vd., 2010)

6.3. İkincil Soğutma Bölgesinde Isı Transferi Yoğunluğunun Hesaplanması

Sürekli döküm sürecinde birincil soğutma bölgesinden itibaren oluşan kabuk ile birlikte katı hale dönüşen sıvı çelik miktarının artması nedeniyle ısı transferi katsayısı düşer. Bu nedenle ikincil soğutma bölgesinin aşağı kademelerinde aşırı miktarda su verilmesi daha şiddetli soğutmanın gerçekleşmesini mümkün hale getirmez. Önemli olan nokta soğutmanın sürekli ve katılaşma değişkenlerine uygun olarak sağlanmasıdır.

Soğutma şiddeti endüstriyel uygulamalarda en sade şekli ile birim ağırlığa verilen su miktarı (l/kg) olarak ölçülür. Birim ağırlığa verilen su miktarına göre soğutma şiddetinin belirlendiği uygulamalar parabolik veya doğrusal denklemler ile belirlenen debilerle uygulanır.

İkincil soğutma bölgesindeki ısı transferi şiddetini etkileyen pek çok değişken bulunmaktadır. Ancak yapılan çalışmalarda ısı transferi katsayısı ile birim alana püskürtülen su miktarı arasında yakından ilişki bulunduğu görülmüştür. Isı transferi şiddeti denklem (6.3) kullanılarak hesaplanabilir (Brimacombe, vd., 1984).

$$\dot{q}_0 = hA(T_y - T_w) \quad (6.3)$$

Brimacombe ve arkadaşları (Brimacombe, vd., 1984) tarafından yapılan çalışmadaki belirtilen ısı transferi şiddetinin hesaplanmasında kullanılabilecek denklem (6.3)'te $\dot{q}_0$ püskürtme suyu ile sağlanan ısı transferinin şiddetini (kW/m^2), h püskürtme ısı transfer katsayısını ($\text{kW/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$), A ısı transferinin gerçekleştiği yöne dik yüzey alanını (m^2), T_y dökülen kütüğün yüzey sıcaklığını ($^\circ\text{C}$), T_w püskürtme suyunun sıcaklığını ($^\circ\text{C}$) ifade etmektedir (Brimacombe, vd., 1984).

Sürekli döküm sürecinde ikincil soğutmada meydana gelen ısı transfer katsayısının hesaplanması konusunda farklı çalışmalar yapılmıştır. Yapılan çalışmalar arasında matematiksel modelleme, laboratuvar çalışması ve saha çalışmalarının karşılaştırmalı olarak ele alındığı durumlar bulunmaktadır.

Shimada ve arkadaşları (Shimada ve Mitsutsuka, 1966) $930 \text{ } ^\circ\text{C}$ 'deki karbon çelikten yapılan dikey bir levhayı $38 \text{ } ^\circ\text{C}$ sıcaklığındaki su ile iki taraftan soğutarak ısı transferi katsayısının belirlenmesi konusunda çalışma yapılmıştır. Yapılan çalışmada Leidenfrost sıcaklığı soğutmadaki su miktarının fazla olduğu durumlar için $500 \text{ } ^\circ\text{C}$ olarak alınmıştır. Bu çalışma sonrasında ortaya çıkan ısı transferi katsayısı için denklem (6.4)'teki deneysel bağıntıya ulaşılmıştır. Isı transfer katsayısının artan yüzey sıcaklığı ile düştüğü görülmüştür (Shimada ve Mitsutsuka, 1966).

$$h = 1,57W^{0,55}(1 - 0,0075T_w) \quad (6.4)$$

Shimada ve arkadaşları (Shimada ve Mitsutsuka, 1966) tarafından yapılan çalışmada elde edilen denklem (6.4)'te h püskürtme ısı transfer katsayısını ($\text{kW/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$), W püskürtme su akışını ($\text{l/m}^2\text{s}$), T_w püskürtme suyu sıcaklığını ifade etmektedir.

Muller ve Jeichar (Muller ve Jeschar, 1973) tarafından yapılan çalışmada elektrik ile ısıtılan levhaya her iki taraftan su püskürtüldüğü deney düzeneği kullanılarak ısı transfer katsayısı hesaplanmıştır. $700\text{-}1200 \text{ } ^\circ\text{C}$ arasındaki sıcaklığa kadar ısıtılan levhaya 11 bar basınca sahip suyun püskürtülmesi sonrasında soğumasının incelendiği çalışmada ışıma yoluyla ısı transferi göz ardı edilmiştir. Isı transfer katsayısı kullanılan fiskiyenin çeşidinden bağımsız olarak hesaplanmıştır. Deneysel çalışma sonucunda yüzey sıcaklığının ısı transfer katsayısına etkisinin oldukça sınırlı

olduğu görülmüştür. Bu çalışma sonrasında ortaya çıkan ısı transfer katsayısı için denklem (6.5)'teki deneysel bağıntıya ulaşılmıştır (Muller ve Jeschar, 1973).

$$h = 0,01u + (0,107 + 0,00068u)W \quad (6.5)$$

$$0,3 \leq W \leq 9,0 \frac{l}{m^2}s$$

$$11 \leq u \leq 32 \frac{m}{s}$$

Muller ve Jeichar (Muller ve Jeschar, 1973) tarafından yapılan çalışmada elde edilen denklem (6.5)'te h püskürtme ısı transfer katsayısını (kW/m² °C), W püskürtme su akışını (l/m²s), u (m/s) su hızını ifade etmektedir.

Sasaki ve arkadaşları (Sasaki, vd., 1979) yaptıkları çalışmada 700-1200 °C arası sıcaklığa kadar ısıtılmış dikey paslanmaz levhaya 100-500 mm mesafeden 1,96-4,90 bar arasındaki basınç ve 1,67-41,67 l/m²s aralığında akıdaki suyun püskürtülmesi ile oluşturulan düzenekte ısı transfer katsayısını hesaplamışlardır. Isı transfer katsayısında yüzey sıcaklığının durumu göz önünde bulundurulmuştur. Isı transfer kat sayısının su sıcaklığı ile çok az miktarda değiştiği görülmüştür. Çalışma sonucunda elde edilen deneysel formül denklem 6.6'de yer almaktadır (Sasaki, vd., 1979).

$$h = 708W^{0,75}T_y^{-1,2} + 0,116 \quad (6.6)$$

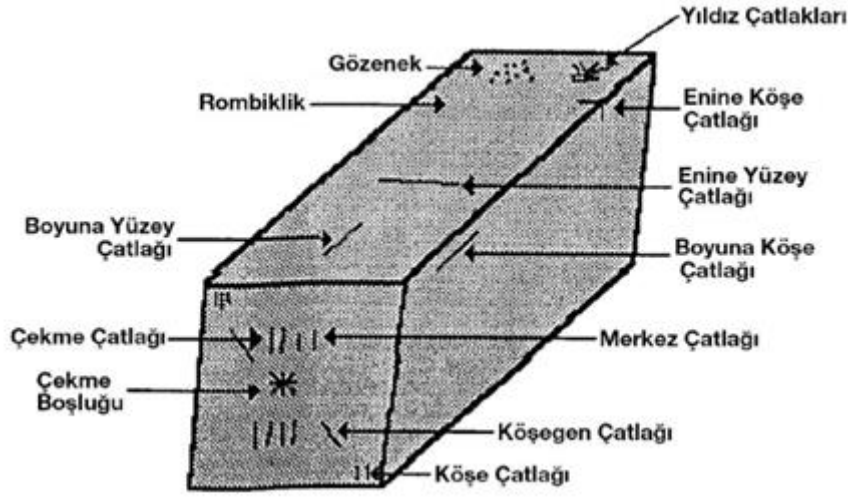
$$700 < T_y < 1200 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$1,67 < W < 41,7 \frac{l}{m^2}s$$

Sasaki ve arkadaşları (Sasaki, vd., 1979) tarafından yapılan çalışmada elde edilen denklem (6.6)'te h püskürtme ısı transfer katsayısını (kW/m² °C), W püskürtme su akışını (l/m²s), T_y dökülen kütüğün yüzey sıcaklığını (°C), T_w püskürtme suyunun sıcaklığını (°C) ifade etmektedir.

7. SÜREKLİ DÖKÜM SÜRECİNDE KATILAŞMA VE İÇYAPI

Sürekli döküm sürecinde birincil ve ikincil soğutma aşamalarında meydana gelen ısı transferi sayesinde sıvı halde bulunan çelik katı hale dönüştürülür. Katılaşmanın sağlanması için uygulanan birincil ve ikincil soğutma değişkenlerin son ürün kalitesine doğrudan etkisi vardır. Uygun değişkenlerin belirlenmemesi üretilen kütük üzerinde farklı içyapı ve şekil kusurlarının meydana gelmesine neden olabilir (Brimacombe, vd., 1984). Şekil 7.1’de kütük üretiminde meydana gelebilecek kalite kusurlarına ait ayrıntılar yer almaktadır (Samarasekera ve Chow, 2003).



Şekil 7.1. Kütük üretiminde meydana gelen kalite kusurları (Samarasekera ve Chow, 2003)

Isı transferi mekanizmaları ile sağlanan katılaşma esnasında çeliğin bileşiminde ve mekanik özelliklerinde bölgesel değişikliklerin meydana gelmesi söz konusudur. Bölgesel değişikliklerin uygun iç yapının oluşumuna imkân sağlayamayacak kadar hızlı gerçekleşmesi veya ikincil metalürji kaynaklı nedenlerden dolayı dökülebilirlikle ilgili şartların uygun olmaması sonucunda üretilen kütükte kalite kusuru meydana gelir (Muller, 2015).

Sürekli döküm sürecinde kalite kusurlarının önlenmesi için şu şartlar sağlanmalıdır;

- Uygun koniklik ölçüsüne ve köşe yarıçapına sahip kalıp kullanmak
- Doğru salınım değişkenleri kullanmak

- Gerekli fiziksel özelliklere sahip yağlayıcı veya döküm tozu ile döküm yapmak
- Çatlağa neden olabilecek kadar yüksek soğutma şiddetinin uygulanmasından kaçınmak
- Mümkünse matematiksel modellemeler ve ısı transfer katsayısı dağılımına bağlı olarak uygun ısı transferi şartlarını tanımlamak
- Isı transferi ile ilgili deneysel bağıntılar ile ilişkilendirmeler yaparak ikincil soğutma bölgesinde gerekli olan su debilerini belirlemek
- İkincil soğutma bölgesinde kullanılan püskürtme lülesi, su basıncı, iki püskürtme lülesi arasındaki ve püskürtme lülesi ile kütük arasındaki mesafe değişkenlerini değerlendirmek (Emi, 2003).

Sürekli döküm sürecindeki değişkenlerin çok fazla olması, katılaşmanın karmaşıklığı uygun birincil ve ikincil soğutma şartlarının doğrudan belirlenmesini neredeyse imkânsız hale getirmektedir. Matematiksel modellemeler ve sayısal analiz çalışmaları katılaşma sürecinde karşılaştırma sayesinde en uygun sonuca daha kısa sürede ulaşılmasını mümkün kılmasına rağmen döküm esnasındaki birincil ve ikincil soğutma değişkenlerinin kesin olarak belirlenmesi yapılan denemelerden sonra mümkün olmaktadır.

Birincil ve ikincil soğutma şartları ile ilgili çalışmalarda uygun yaklaşımlar ortaya koyabilmek için farklı kimyasal bileşimlere sahip çelik türlerinin katılaşma davranışlarının doğru şekilde bilinmesi önemlidir. Nitekim düşük alaşımlı çeliklerde kimyasal bileşimde yer alan karbon miktarı sıvı çeliğin katılaşması esnasındaki davranışına önemli düzeyde etki etmektedir.

Katılaşma sonrasında elde edilen iç yapı, mikro ayrışma, yüksek sıcaklık mukavemeti ve süneklik gibi unsurlar katılaşmada meydana gelen ferrit ve östenit fazlarının oranına bağlıdır (Mazumdar ve Ray, 2001). Peritektik dönüşüm aralığındaki kimyasal bileşime sahip çelik türlerinde katılaşma faz dönüşümleri nedeniyle daha karmaşık şekilde gerçekleşir (Moon, 2015).

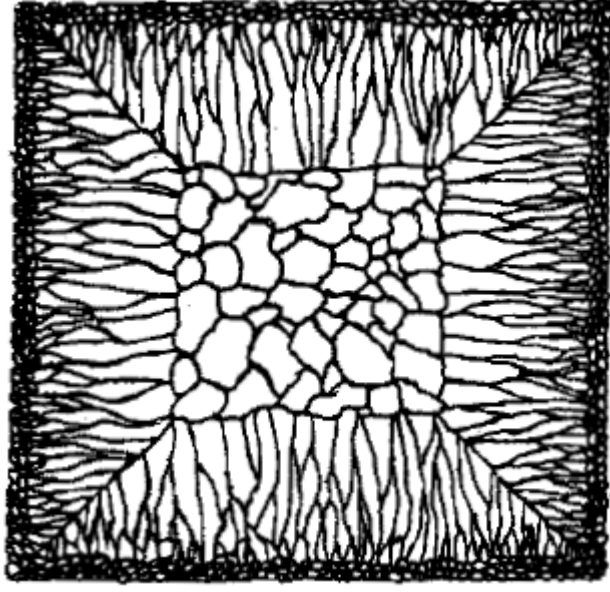
Peritektik dönüşüm aralığındaki çelik türlerinde katılaşmanın bilinen katılaşma sürecinden farklı olması katılaşması esnasında $\text{SIV} + \delta \rightarrow \gamma$ şeklinde meydana gelen

peritektik dönüşümden kaynaklanmaktadır. Peritektik dönüşümün karmaşık ve zor bir tepkime olması nedeniyle peritektik dönüşümün katılaşma üzerine etkisi konusunda yapılan çalışmalar oldukça az ve kısıtlıdır. Moon (Moon, 2015) tarafından yapılan çalışmada peritektik dönüşümün katılaşma sürecine etkisi ve sürekli dökümdeki önemi kapsamlı şekilde ele alınmıştır. Moon, çeliğin katılaşması esnasında meydana gelen peritektik dönüşümün iki farklı bileşen olarak ele alınmasının uygun olduğunu ve bu kapsamda peritektik dönüşümün peritektik tepkime (δ -ferrit+sıvı $\rightarrow\gamma$ -östenit) ve sonrasında peritektik faz dönüşümü (δ -ferrit $\rightarrow\gamma$ -östenit ve sıvı $\rightarrow\gamma$ -östenit) olarak değerlendirilmesinin mümkün olduğunu ortaya koymuştur (Moon, 2015).

Moon (Moon, 2015) tarafından peritektik faz dönüşümü konusunda yapılan çalışma peritektik tepkimenin δ -ferrit/sıvı fazı boyunca ince γ -östenit katmanı oluşması şeklinde meydana geldiği ortaya koyulmuştur. Peritektik dönüşüm esnasında meydana gelen γ -östenit fazı δ -ferrit ve sıvı faza doğru büyüyerek ilerlemektedir. Katılaşma esnasında δ -ferrit fazından γ -östenit fazına dönüşüm önemli düzeyde hacimsel değişimi beraberinde getirmesinden dolayı peritektik dönüşü aralığında yer alan çelik türlerinin katılaşması esnasında önemli miktarda büzülme meydana gelmektedir (Moon, 2015).

Peritektik dönüşüm aralığında yer alan çelik türlerinde katılaşma konusundaki bir diğer sınırlandırma artan soğutma şiddeti ile katılaşma oranının doğru orantılı olarak artmamasıdır (Moon, 2015). Bu nedenle peritektik dönüşüm aralığında bulunan kimyasal bileşime sahip çelik türlerinin sürekli döküm sürecindeki katılaşması esnasında üretim hızı bakımından sınırlandırma söz konusudur (Moon, 2015).

Katılaşma esnasında oluşan tane yapıları ve yönlenmeler sürekli döküm sürecine özgü niteliğe sahiptir. Kütük döküm makinesinde meydana gelen katılaşma sonucunda üretilen kütük kesitlerinin kenar bölgelerinde ince taneli ve rastgele yönlenmiş yapılar görülür. Merkeze doğru tane boyutu büyüyerek taneler eş eksenli olarak yönlenmeye başlar. Tanelerin oluşumu ve kesit üzerindeki genel görünümü simetriktir. Şekil 7.2’de sürekli döküm sürecinde meydana gelen katılaşma ile oluşan tane dağılımı görülmektedir (Bower ve Flemings, 1967).



Şekil 7.2. Sürekli döküm sürecinde katılaşma sonrasında meydana gelen tane dağılımı (Bower ve Flemings, 1967)

8. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu çalışmadaki deneysel çalışmalarda hurdadan çelik üretimi yapılan bir tesiste sürekli döküm sürecinde döküm hızının artırılması, yol kayıplarının azaltılması, mevcut durumda yaşanan kalite sorunlarının en aza indirilmesi ve kalıp ömrünün artırılması için birincil ve ikincil soğutma bölgelerinde iyileştirme çalışmaları yapılmıştır.

Deneysel çalışmalarda birincil soğutma konusundaki iyileştirmelere yönelik olarak Kalıp-1 ve Kalıp-2 olmak üzere iki farklı koniklik ve köşe yarıçapı ölçüsüne sahip kalıp tasarlanmış ve denenmiştir. Krom kaplamaya sahip 150x150 mm ebatında ve 1000 mm uzunluğundaki bakır kalıpların denenmesi ile birlikte ikincil soğutma bölgesinde su dağılımı ile ilgili iyileştirmeler yapılmıştır. İyileştirme çalışmalarının sonuçları alınan kesit numuneleri ile irdelenmiştir.

8.1. Deneysel Çalışmalar Öncesindeki Sorunlar

Hurdadan çelik üretimi yapılan tesisteki sürekli döküm sürecinde iyileştirme çalışmaları öncesindeki kararlı olarak ulaşılabilen üretim kapasitesi en fazla 215 ton/saat olarak tespit edilmiştir. Ayrıca döküm esnasında 150x150 mm kesit üretimi için bir yolda sürdürülebilir en uygun döküm hızının 3,5 m/dk olduğu belirlenmiştir. Üretim kapasitesindeki yetersizlik sorununun yanında üretilen ürünlerde farklı kalite kusurları ile karşılaşmıştır. Üretkenlik sınırlandırmalarının yanında 400 döküm olan kalıp ömrü üretim maliyetlerinin düşürülmesi bakımından iyileştirilmesi gereken konulardan birisi olmuştur. Kalıp ömründeki sınırlamalar, üretkenlik ile ilgili sorunlar, yüksek döküm hızlarında meydana gelen çatlak ve şekil bozuklukları birincil soğutma ve ikincil soğutma ile ilgili değişkenlerin gözden geçirilmesini gerektirmiştir.

Farklı döküm hızlarında üretilen farklı çelik türlerine ait kütüklerde köşe basıklığının 4 mm'ye kadar ulaştığı görülmüştür. Köşe basıklığı sorununun 4 mm'yi aştığı durumlarda çökme, dış bükey ve köşe çatlağı gibi şekil ve iç yapı kusurlarının meydana gelebildiği görülmüştür. Deneysel çalışmalar öncesinde ve deneysel

alışmalar sürecinde üretimi yapılan elik türlerine ait kimyasal bileşim aralıkları izelge 8.1’de yer almaktadır.

Çizelge 8.1. Deneysel alışmalar öncesinde ve deneysel çalışmalar sürecinde üretimi yapılan elik türlerine ait kimyasal bileşim aralıkları

KALİTE	%C	%Mn	%Si	%P	%S	%Cu
A	0,07-0,09	0,32-0,50	0,15-0,20	0,025	0,025	0,35
B	0,08-0,12	0,32-0,60	0,15-0,20	0,025	0,025	0,35
C	0,06-0,08	0,40-0,60	0,15-0,25	0,040	0,040	0,50
D	0,15-0,18	0,50-0,70	0,15-0,25	0,040	0,040	0,50
E	0,22-0,25	1,10-1,40	0,15-0,30	0,040	0,040	0,50
P, S ve Cu değerleri kabul edilen en yüksek değerlerdir.						

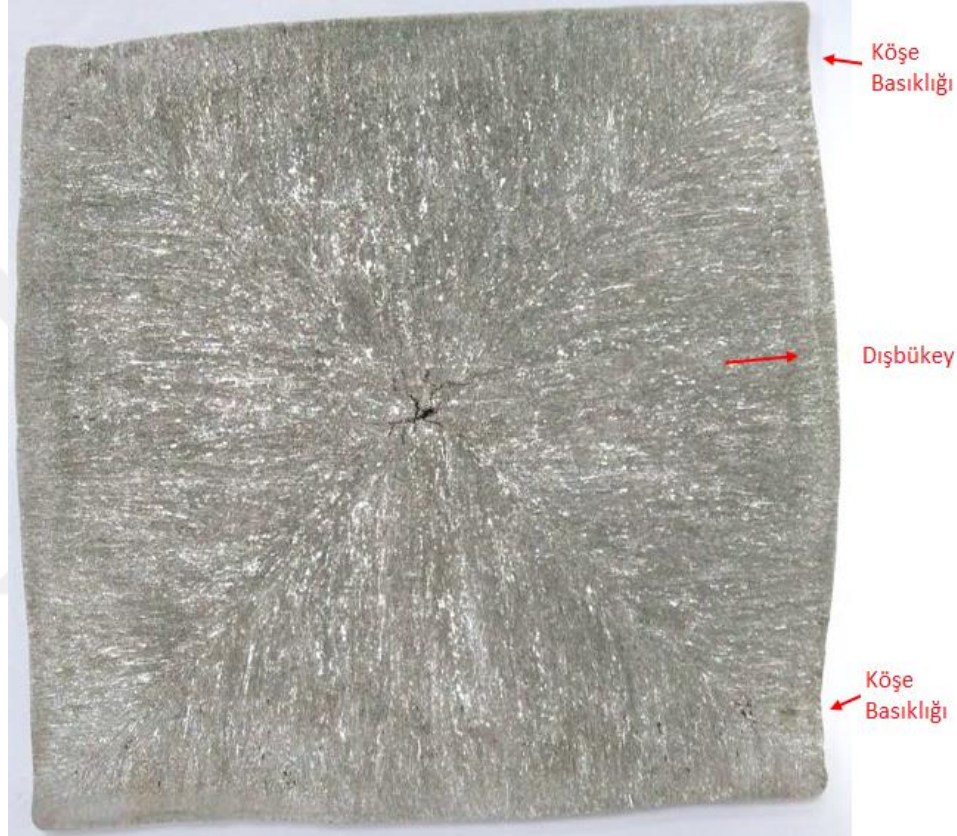
şekil ve i kusurların yanında artan döküm hızı ile birlikte yol kayıplarında artış yaşandığı ve döküm hızındaki artışın kütük döküm makinesi üretkenliğini olumsuz etkilediğı ön plana çıkmıştır. Çizelge 8.2’de deneysel çalışmalar öncesinde 150x150 mm kesit kütük üretimi esnasında ulaşılabilen en yüksek üretkenlik, sürdürülebilir döküm hızı ve üretim sürecinde yaşanılan yol kaybı ayrıntıları grlmektedir. Tablo 6.7’de yer alan % yol kaybı oranı denklem (8.1) ile hesaplanmıştır.

$$Yol\ Kaybı = \frac{Toplam\ Yol\ Kaybı}{Toplam\ Dkm\ Sayısı \times Yol\ Sayısı} \cdot 100 \quad (8.1)$$

Çizelge 8.2. İyileştirme öncesinde üretkenlik, döküm hızı ve yol kaybı

Kalite	Döküm Sayısı	Yol Kaybı	En Yüksek retkenlik (ton/saat)	Sürdürülebilir Döküm Hızı (m/dk)	Yol Kaybı (%)
A	-	-	215	3,5	2,2
B	19	-			
C	170	25			
D	221	30			
E	2	-			
Toplam	412	55			

Birincil ve ikincil soğutma bölgesindeki mevcut şartların ihtiyaç duyulan ürün kalitesine ve üretkenliğe ulaşmada yeterli olmadığı görülmüştür. Şekil 8.1’de deneysel çalışmalar öncesinde 3,5 m/dk döküm hızı ile üretilen 0,06 %C’lu kütük üretimine ait dağlanmış makro numune görülmektedir. Yaşanılan kalite sorunlarının çözülmesi ve üretkenlik artışının sağlanabilmesi için birincil ve ikincil soğutma ile ilgili yeni çalışmalar yapılmasının ihtiyacını ortaya çıkarmıştır.



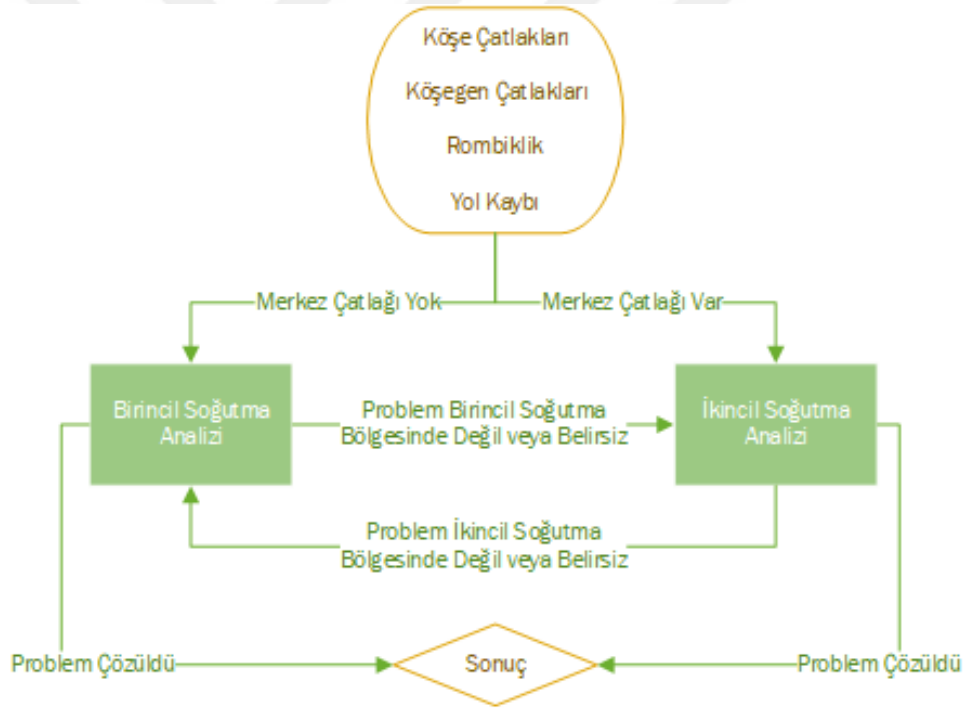
Şekil 8.1. Deneysel çalışmalar öncesindeki kütük numunesi
(Kalite C -3,3 m/dk)

Yapılan iyileştirme çalışmaları kapsamında ilk olarak katılaşmanın başladığı, şekil ve yüzey kalitesi bakımından büyük öneme sahip birincil soğutma ile ilgili değişkenler ele alınmıştır. İhtiyaç duyulan ürün kalitesinin elde edilebilmesi için katılaşmanın başladığı aşamada kalıp tasarımının uygun olması ve ısı transferinin iyileştirilmesi konusundaki etkenler konusunda değerlendirme yapılmıştır. Bu kapsamda öncelikli olarak kütük döküm makinesinde kullanılan eski kalıbın tasarımı ve yaşanan sorunlarla ilişkisi incelenmiştir. Birincil soğutmada kullanılan kalıp tasarımına ait ayrıntıların yaşanan sorunlarla ilişkisinin incelenmesinde öncelikli olarak kalıp

koniklik ölçülerinin döküm şartlarına uygunluğu literatürdeki diğer çalışmalarla karşılaştırmalı olarak ele alınmıştır.

Eski kalıp tasarımının ürün kalitesi ve üretkenlik artışı sağlamasının yanında ömür olarak iyileştirme sağlaması hedeflenmiştir. Bu kapsamda 10.000-12.000 ton/kalıp olan ömür başarımında iyileştirme sağlamak amacıyla kalıp çıkışında yer alan mekanik destek teçhizatlarıyla ilgili çalışma yapılmıştır.

Birincil soğutmaya yönelik iyileştirmeler kapsamında farklı koniklik ölçülerine sahip iki farklı kalıp imalatı, ikincil soğutmaya yönelik iyileştirmeler kapsamında uygulanan soğutma şiddeti ve ısı transfer katsayısının değiştirilmesi için püskürtme suyu dağılımında değişiklik yapılmıştır.



Şekil 8.2. Kütük döküm makinesinde kalite sorunlarının irdelenmesinde aşamalar (Kumar, vd., 1991)

Kumar ve arkadaşları (Kumar, vd., 1991) tarafından kütük döküm makinesinde yaşanan sorunların kök nedenlerinin tespiti konusunda yapılan çalışmada birincil ve ikincil soğutmanın değerlendirilmesi konusundaki aşamalar deneysel çalışmalarda izlenen yol ile benzerlik göstermektedir. Şekil 8.2’de kütük döküm makinesinde

yaşanılan kalite sorunlarının birincil ve ikincil soğutma bakımından irdelenmesindeki ilişki ve aşamalar görülmektedir (Kumar, vd., 1991).

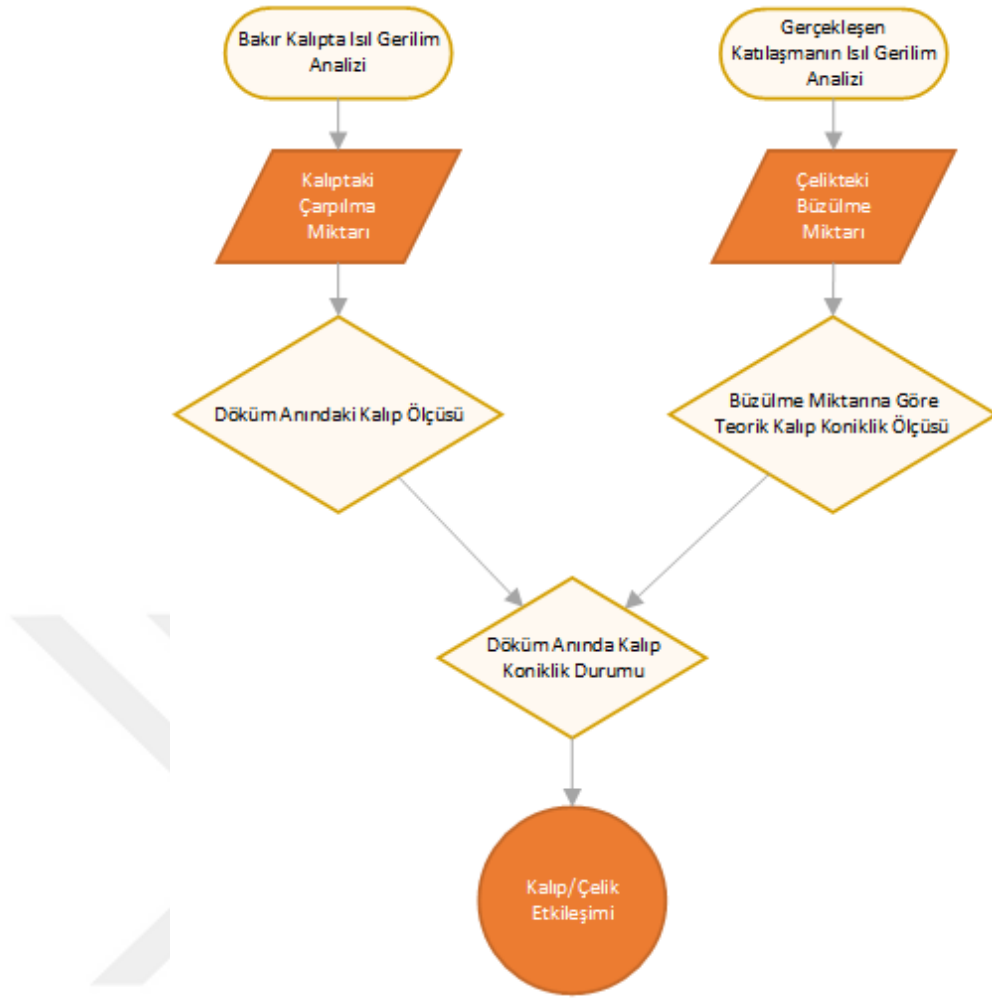
8.2. Kalıp Tasarımı ve İmalatı

Farklı kimyasal bileşime sahip çelik türlerinin, değişik döküm hızlarında dökülmesi esnasında yüksek döküm hızlarına ulaşılabilmesi ve şekil kusurlarının en aza indirilebilmesi için ısı transferinin en iyi düzeyde olmasını sağlayacak en uygun kalıp tasarımının belirlenmesi önemlidir.

Uygun kalıp tasarımının belirlenmesi için büzülme miktarının değerlendirildiği katılaşma analizi ve döküm esnasında kalıpta meydana gelebilecek şekil değişikliklerinin öngörülebilmesi için çarpılma miktarının değerlendirildiği ısıl gerilme analizi olmak üzere iki aşamalı çalışma yapılmalıdır. Çalışmanın ilk aşamasında döküm anındaki değişkenlere bağlı olarak gerçekleşecek katılaşma ile çelikte meydana gelecek büzülme miktarı belirlenmelidir. Ancak bu aşamada belirlenecek büzülme miktarlarını kalıp tasarımında doğrudan kullanmak doğru değildir. Nitekim büzülme oranından hareketle belirlenen koniklik ölçüsünün kalıp cidarının döküm anında çelik ile etkileşimi neticesinde çarpılacak olması nedeniyle aynı şekilde korunması mümkün değildir. Bu nedenle uygun kalıp tasarımının belirlenmesinde ikinci aşama olarak kalıptaki çarpılma miktarı göz önünde bulundurulmalıdır. Şekil 8.3'te uygun kalıp tasarımına ait akış şeması görülmektedir (Unamono, vd., 2009).

Yapılan deneysel çalışmalarda birincil soğutma aşamasında eski kalıp koniklik ölçülerinin değerlendirilmesinde ve yeni kalıplara ait koniklik ölçülerinin belirlenmesinde birinci aşama olarak Amitan ve arkadaşları (Amitan, vd., 2005) tarafından yapılan çalışma sonuçlarında elde edilen büzülme değerleri kullanılmıştır.

İkinci aşama olarak eski veya yeni kalıptaki koniklik ölçülerinin döküm anındaki yaklaşık durumunu değerlendirmede kalıptaki çarpılma miktarları için Samarasekera ve Brimacombe (Samarasekera ve Brimacombe, 1984) tarafından yapılan çalışma sonuçları kullanılmıştır.



Şekil 8.3. Uygun kalıp tasarımı için akış şeması (Unamono, vd., 2009)

Deneysel çalışmalarda ve öncesinde kullanılan eski kalıp, Kalıp-1 ve Kalıp-2'ye ait koniklik mesafeleri ve koniklik değerleri Çizelge 8.3'te yer almaktadır. Kütük döküm makinesinde kullanılan eski kalıpta Çizelge 8.3'te görüldüğü üzere 3 farklı koniklik mesafesi ve koniklik değerleri bulunmaktadır.

Çizelge 8.3. Kullanılan kalıp koniklik ölçüleri

Eski Kalıp	Kalıp mesafe (mm)	0 – 200	200 – 450	450 - 1000	-
	Koniklik (%)	2,5	0,85	0,40	-
Kalıp-1	Kalıp mesafe (mm)	0 - 200	200 – 500	500 - 700	700 – 1000
	Koniklik (%)	2,3	1,1	0,75	0,50
Kalıp-2	Kalıp Mesafe (mm)	0 - 180	180 – 550	550 - 750	750 - 1000
	Koniklik (%)	2,6	1,04	0,78	0,65

Deneyisel çalışmalar öncesinde kullanılan mevcut kalıbın Çizelge 2.1’de Amitan ve arkadaşları (Amitan, vd., 2005) tarafından elde edilen %0,17 karbon içeriğine sahip çelik miktarı için tavsiye edilen ölçüler ile karşılaştırıldığında kalıbın ilk 300 mm’de %1,2 ve 300 mm’lik ilk koniklik bölümünden sonra 280 mm boyunca %1,015 sonraki 210 mm boyunca %0,601 ve son 210 mm’lik kısımda %0,259 koniklik ölçüsüne sahip olmasının uygun olacağı sonucuna ulaşmak mümkündür. Ancak kullanılan eski kalıbın ölçülerinde kalıbın 500 mm seviyesinden sonra olması gerekenden az koniklik ölçüsüne sahiptir. Ayrıca kullanılan kalıpta ilk koniklik mesafesinin Samarasekera ve Brimacombe (Samarasekera ve Brimacombe, 1984) tarafından yapılan çalışma. Doğrultusunda çarpılma miktarının göz önünde bulundurularak kalıptaki çelik seviyesine göre iyileştirilebileceği görülmektedir.

Eski kalıpta koniklik ölçüsünün 500 mm’den sonraki kısımda düşük olması özellikle peritektik faz dönüşümünün olduğu karbon aralığında yer alan çelik türlerinde bakır kalıp cidarı ile katılaşan kabuk arasında boşluğun oluşmasına ve birincil soğutmadaki ısı transferinin etkin şekilde gerçekleşmemesine neden olduğu değerlendirilmiştir.

Çelik türlerindeki büzülme miktarlarının kalıptaki mevcut koniklik ölçüsü ile farklı olması nedeniyle eski kalıp yerine kullanılmak üzere farklı koniklik mesafelerine ve ölçülerine sahip Kalıp-1 tasarlanmıştır. Kalıp-1 tasarımında eski kalıp tasarımındaki koniklik mesafeleri değiştirilerek koniklik ölçüleri arttırılmıştır.

Kalıp-1’e ait koniklik ölçülerinin ve Kalıp-1’in döküm anında çarpılma ile birlikte sahip olduğu öngörülen koniklik değerlerinin katılaşma esnasında meydana gelen büzülme değerlerine daha iyi uygunluk göstermektedir. Kalıp koniklik ölçülerinin döküm şartlarına uygun hale getirilmesi için tasarlanan Kalıp-1, Çizelge 2.1’de Amitan ve arkadaşları (Amitan, vd., 2005) tarafından elde edilen büzülme miktarlarında daha fazla uygunluk gösterdiği görülmektedir. Bu durum birincil soğutmadaki ısı transferinin iyileştirilmesini mümkün hale getirmiştir.

Sürekli döküm sürecinde birincil soğutmada kalıptaki ısı transferi yoğunluğunu ölçmenin en uygun yolu kalıp cidarından ısı transferini sağlamak üzere kalıp cidarı etrafında ısı transferini sağlayan soğutma suyunun giriş ve çıkış sıcaklığını

ölçmektedir. Aynı döküm şartlarında farklı kalıplarla yapılan dökümlerde kalıp suyu giriş ve dönüş sıcaklığındaki farkın fazla olması kalıptaki ısı transferinin daha yoğun olduğunu gösterir. Bu kapsamda eski kalıp ve Kalıp-1 ile döküm esnasında ısı transferinin değerlendirilmesi için birincil soğutmada kullanılan soğutma sularının debi ve sıcaklık farkları izlenmiştir.

Kalıp-1 ile yapılan dökümlerde birincil soğutmada gerçekleştirilen ısı transferi yoğunluğunda iyileştirme sağlandığı, köşe basıklığı sorunlarının belirli bir oranda çözüldüğü fakat köşe basıklığının iyileştirilmesi konusunda hala aşama kaydedilebileceği görülmüştür. Eski kalıbın koniklik ölçülerinin değiştirilmesi sonrasında elde edilen Kalıp-1 ile birincil soğutmada ısı transferi konusunda iyileştirilme sağlanmasına rağmen 4,0 m/dk üzerindeki döküm hızlarında ikincil soğutma bölgesinde yol kayıplarının devam ettiği görülmüştür.

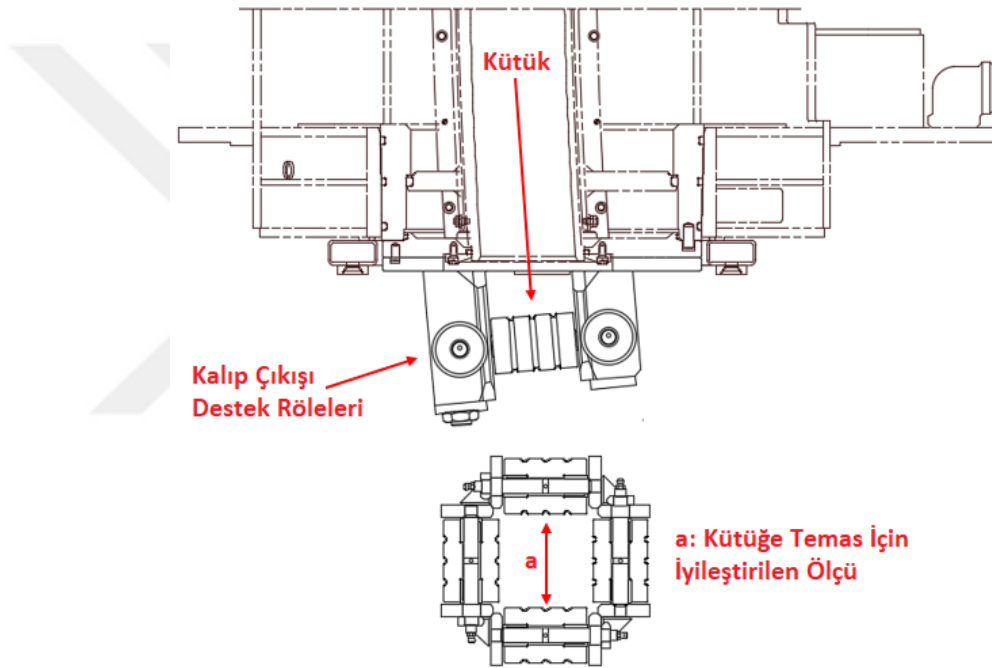
Kalıp-1 ölçüleriyle köşe basıklığı sorunlarının tam olarak çözülmemesi nedeniyle köşe yarıçapı ölçüsünün 1 mm arttırılarak 7 mm olarak belirlenmesi ve koniklik mesafesi ile koniklik ölçülerinin bir miktar daha değiştirilmesi sonucunda Kalıp-2 tasarlanmıştır. Kalıp-2 ile yapılacak dökümlerde birincil soğutma bölgesinde ısı transferinde iyileşme sağlamanın yanında kütük kesitindeki köşe basıklığı sorunlarının tamamen ortadan kaldırılması hedeflenmiştir.

Birincil soğutma bölgesinde kalıp koniklik mesafe ve ölçülerinde yapılan değişikliklerle gerçekleştirilen iyileştirmelerin yanında ısı transferinin arttırılması ve kalıp ömrünün iyileştirilmesi amacıyla Kalıp-2 imalatı ile eş zamanlı olarak birincil soğutma konusunda kalıp ceket ve kalıp çıkışı rölesi konusunda tasarım değişiklikleri, ikincil soğutma konusunda ise soğutma dağılımının değiştirilmesi ile ilgili değişiklik yapılmıştır.

Kalıp-2 imalatının yapıldığı süre içerisinde döküm esnasında kalıbı terk eden kütüğün mekanik olarak desteklenmesini sağlamak ve kalıp çıkışındaki aşınmaları azaltmak için kalıp altı röleleri arasındaki mesafede değişiklik yapılmıştır. Şekil 8.4'te kalıp çıkışındaki destek röleleri arasındaki "a" ölçüsünün azaltılmasına yönelik yapılan iyileştirmeye ait ayrıntı görünmektedir.

Kalıp ceket i ile ilgili yapılan değişiklik döküm esnasında kalıpta meydana gelen çarpılma kaynaklı şekilde değişikliğini en aza indirmek ve soğutma şartlarını iyileştirmek için yapılmıştır. Kalıp ceket i iyileştirmeleri kapsamında mevcut durum şartlarında iki parça olan ve kalıp cidarı ile ceket cidarı arasındaki boşluğun 4 mm olduğu tasarım değiştirilmiştir.

Yeni ceket kalıp cidarı ile ceket cidarı arasındaki boşluk 3,5 mm olacak şekilde ve tek parça olarak tasarlanmıştır. şekil 8.5'te eski ceket ile tasarımı yapılan yeni ceketin iki parça ve tek parça olması durumundaki temel farklılıkları yer almaktadır.



şekil 8.4. Kalıp çıkışı rölelerinde yapılan iyileştirimin görünümi

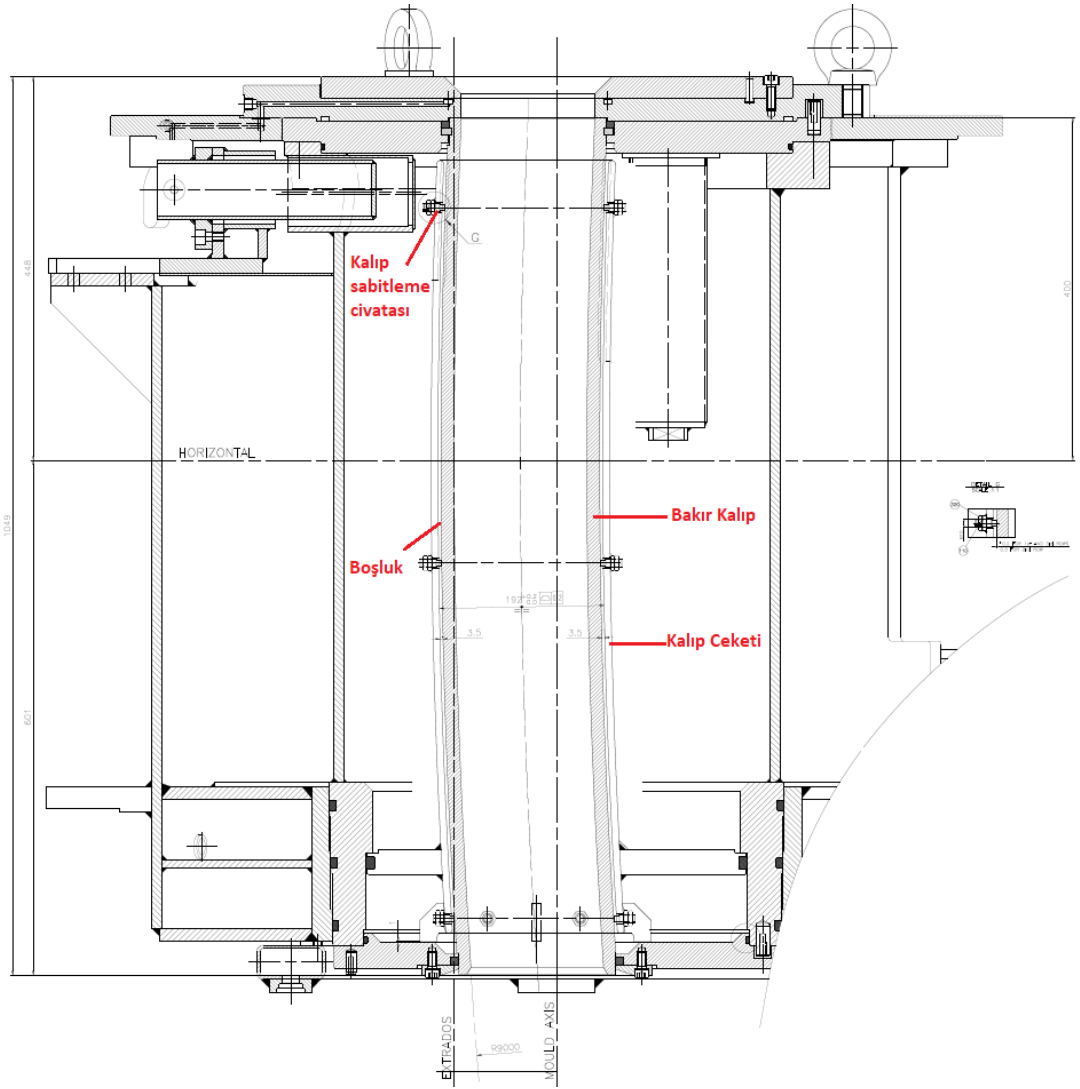
Kalıp ceketinde yapılan değişiklik sayesinde kalıp cidarı etrafındaki dönme hızının artması, döküm esnasında tek parça olan ceketin yüksek su basıncı karşısında daha sağlam olması mümkün hale getirilmiştir. Bu şekilde kalıp ömürlerinin arttırılması ve birincil soğutmadaki ısı transferinin daha iyi hale getirilmesi hedeflenmiştir. şekil 8.6'da döküm esnasında kalıp-ceket etkileşiminde ortaya çıkan deformasyon tahmini görölmektedir. (Unamono, vd., 2009). Bu değerlendirmeler neticesinde tasarlanan yeni cekte ait tasarım ayrıntısı şekil 8.7'de görölmektedir.



Şekil 8.5. Eski ceket (iki parça) ve yeni ceket (tek parça) görünümü



Şekil 8.6. Döküm esnasında kalıp-ceket etkileşimi (Unamuno, vd., 2009)



Şekil 8.7. Yeni ceket (tek parça) tasarımı

8.3. İkincil Soğutma İyileştirmeleri

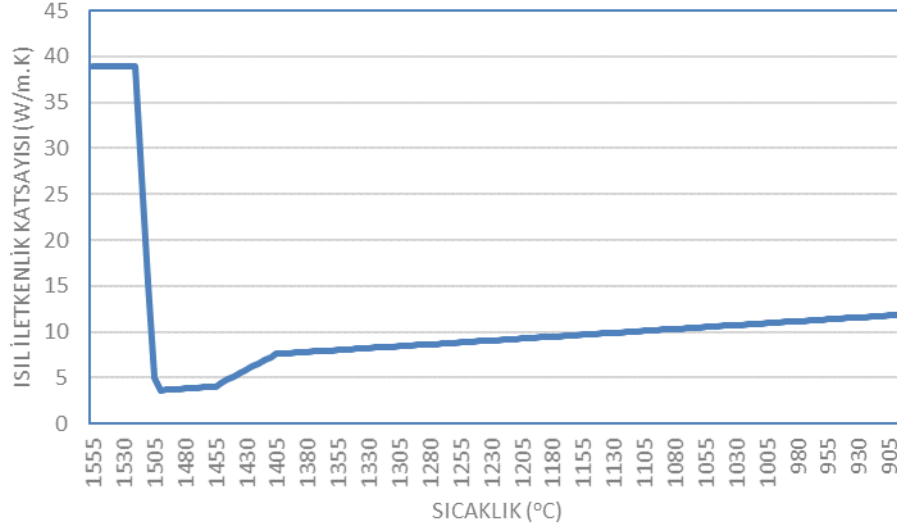
Sürekli döküm sürecinde birincil soğutma bölgesinde gerçekleşen ilk katılaşmanın ardından ısı transferinin ikincil soğutma bölgesinde katılaşma tamamlanana kadar sürdürülmesi gerekir. İkincil soğutma bölgesinde fiskiyele ile püskürtülen su yardımı ile gerçekleşen ısı transferinin döküm esnasında katılaşmanın yeterli hızda olmasını sağlamanın yanında uygun makro ve mikro yapıyı meydana getirecek nitelikte olması büyük öneme sahiptir. Döküm esnasında ikincil soğutma bölgesinde kullanılan su miktarı ve dağılımının gerekli hızda katılaşmayı sağlayabilecek ve bunun yanında şekil kusurlarına neden olmayacak şekilde olması gerekir.

İkincil soğutma bölgesinde soğutma şiddetinin kontrol edilebilmesi için farklı bölgeler bulunur. Sürekli döküm sürecinde ikincil soğutma bölgesinde gerçekleşen ısı transferini belirleyecek soğutma şiddetini kontrol etmek amacıyla farklı bölgelerde uygun su miktarlarının geçişi sağlanır. Uygulanan soğutma yönteminde farklı değişkenlerle değişen döküm hızlarında ve farklı kalitelere üretim yapılabilmesi mümkündür. Uygun yöntemin kullanılmaması veya ikincil soğutma bölgesindeki dağılımın doğru olmaması yol kayıplarına ve kalite sorunlarına neden olur. Yapılan çalışma kapsamında kütük döküm makinesinde üretkenliğin artırılması ve kalite kusurlarının giderilmesi amacıyla soğutma kademelerinin dağılımı ve uygulanan soğutma yöntemi konusunda iyileştirmeler yapılmıştır.

Yapılan deneysel çalışmalar kapsamında Kalıp-1 tasarımı ile birlikte üretilen kütüklerde şekilde kusuru olarak iyileştirme sağlanmıştır. Ancak Kalıp-1 ile yapılan dökümlerde 3,5 m/dk üzerindeki döküm hızlarında ikincil soğutma bölgesinin ilk iki kademesinde yol kayıpları gözlenmeye devam etmiştir. Bu nedenle mevcut soğutma yöntemleri ile elde edilen ısı transfer katsayısının belirlenmesi üzerine çalışma yapılmıştır. Shimada ve Mitsutsuka (Shimada ve Mitsutsuka, 1966) tarafından yapılan çalışmada ısı transferi katsayısının belirlenmesi için elde edilen denklem (6.4) kullanılarak mevcut ikincil soğutma bölgesindeki ısı transferi katsayısı değerlendirilmiştir. Yapılan değerlendirme neticesinde ikincil soğutma bölgesinde uygulanan yöntem ile elde edilen ısı transfer katsayısının ikincil soğutma bölgesinde 2,8-4,4 m mesafe arasında düşüş gösterdiği görülmüştür.

Sürekli döküm sürecinde gerçekleşen ısı transferinde ikincil soğutma bölgesindeki ısı transfer katsayısının yanında sıvı haldeki çeliğin ısı transferindeki önemi ayrıca irdelenmiştir. Yapılan araştırma sonucunda Mazumdar ve Ray (Mazumdar ve Ray, 2001) tarafından yapılan çalışmada ortaya koyulan sıvı çelikteki karbon oranına ve sıcaklığa bağlı ısı transfer katsayısı incelenmiştir. Yapılan incelemede sıvı halde ve yüksek sıcaklıkta bulunan çeliğin ısı iletkenlik katsayısının düşük sıcaklıkta ve katı halde bulunan çeliğe kıyasla daha yüksek olduğu görülmüştür. Şekil 8.8’de çeliğin ısı sıcaklığa bağlı olarak ısı transfer katsayısının değişimi görülmektedir.

İkincil soğutmanın ilk kademelerinde soğutma dağılımından kaynaklanan ısı transferindeki düşüş ve sıvı haldeki çeliğin ısı transfer katsayısının yüksek olması nedeniyle ikincil soğutma bölgesindeki dağılımda değişiklik yapılmasının uygun olacağı değerlendirilmiştir.



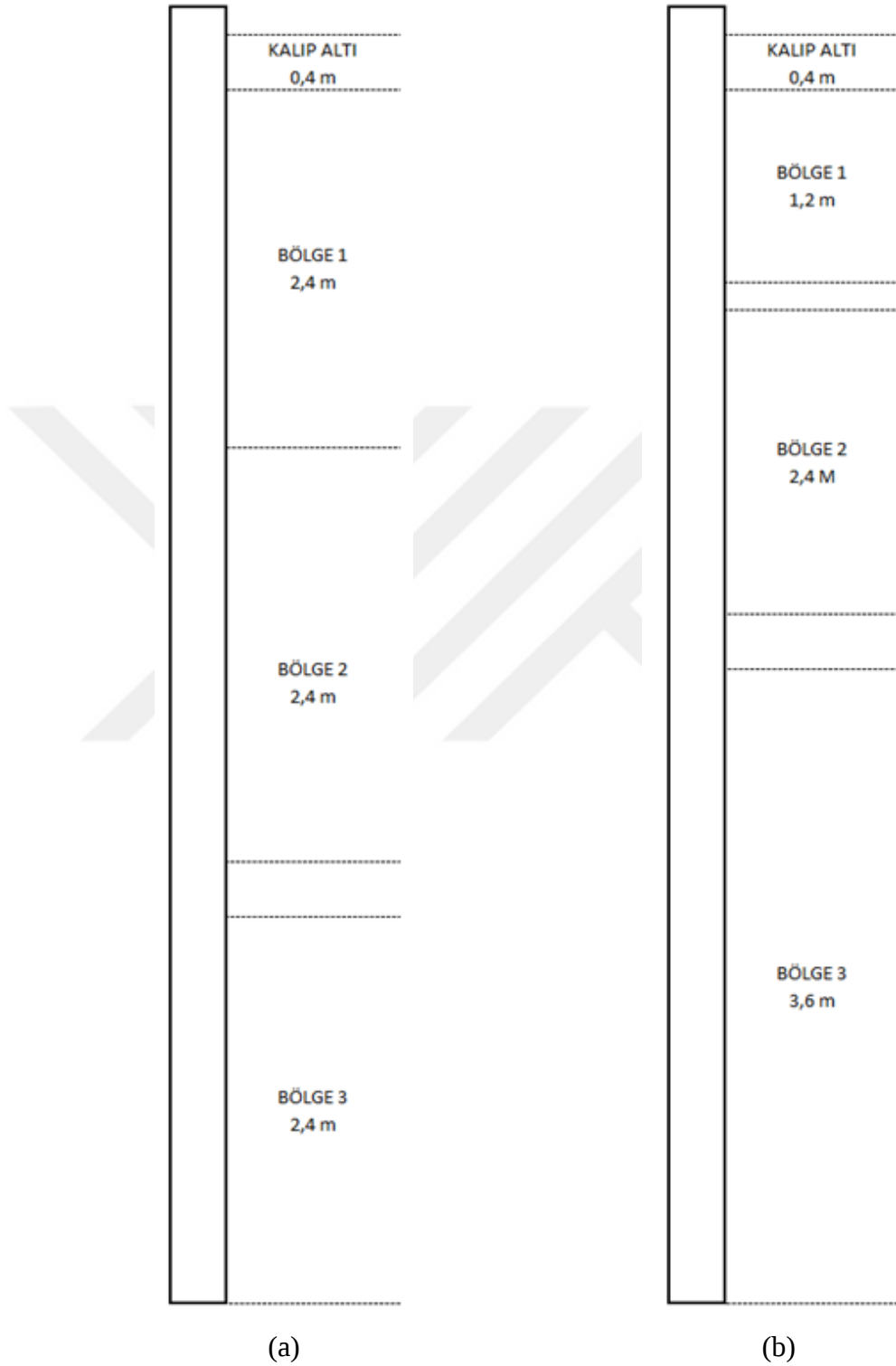
Şekil 8.8. Sıcaklığa bağlı olarak %0,10 C bileşimine sahip çeliğin ısı iletkenlik değerinin değişimi (Meng ve Thomas, 2003)

İkincil soğutma bölgesinde yapılan değişiklikte öncelikli olarak ilk kademede kullanılabilen su miktarının artırılması sağlanmıştır. Bu değişiklik esnasında ikincil soğutma bölgesindeki etkin soğutma mesafesi değiştirilmemiştir. Şekil 8.9'da iyileştirme çalışması öncesinde ve sonrasında ikincil soğutma kademelerinin dağılımları ve mesafeleri yer almaktadır.

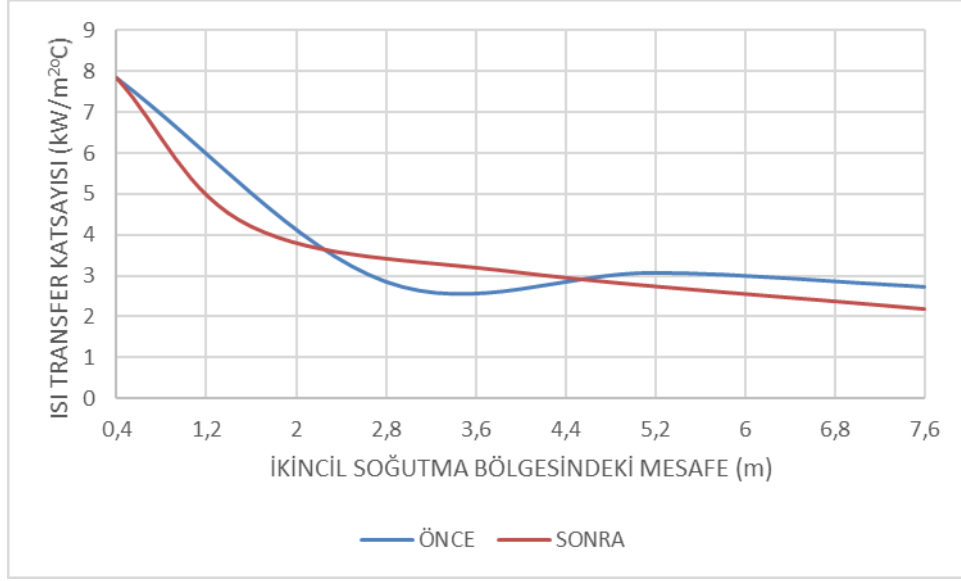
Kademe dağılımında yapılan değişiklik ile birlikte değişken döküm hızlarında gerekli olan soğutmanın uygun su miktarı ile gerçekleştirilebilmesi için soğutma kademelerinde yer alan fiskiye sayılarında değişiklik yapılmıştır. Çizelge 8.4'te deneysel çalışma öncesindeki ve sonrasındaki ikincil soğutma bölgesindeki fiskiye durumu görülmektedir.

İkincil soğutma bölgesinde yapılan değişiklik öncesinde ve sonrasında ikincil soğutma bölgesindeki ısı transfer katsayısının durumu Şekil 8.10'da görülmektedir. İkincil

soğutma bölgesinde yapılan değişiklik ısı transfer katsayısının düşüş göstermeden parabolik olarak değişimini mümkün hale getirmiştir.



Şekil 8.9. Yapılan iyileştirme çalışması öncesindeki (a) ve sonrasındaki (b) ikincil soğutma kademelerinin dağılımları ve mesafeleri.



Şekil 8.10: İkincil soğutma bölgesindeki ısı transfer katsayısının değişimi (Shimada ve Mitsutsuka, 1966)

İkincil soğutma bölgesindeki ilk kademe sonrasındaki bölgelerde yapılan değişikliklerin ürün kalitesine ve yol kayıplarına etkisinin yüksek olması bu bölgede değişiklik yapılmasını zorunlu kılmıştır. Nitekim sürekli döküm sürecinde ikincil soğutma bölgesinin ilk kademelerinde uygulanan soğutma şiddeti ve elde edilen ısı transfer katsayısı yüzey kalitesi ve yol kaybı konusunda büyük etkiye sahiptir. (Cheung, vd., 2006; Heard ve Kaell, 1999; Irwing, 1993). Diğer taraftan ısı transfer katsayısı ile ikincil soğutma bölgesindeki mesafe arasında doğrudan ilişki bulunmaktadır (Santos, vd., 1990). Bu nedenle uygulanacak soğutma yönteminin kademeler arasındaki dağılımı ikincil soğutma bölgesindeki ısı transfer katsayısına doğrudan etki etmektedir.

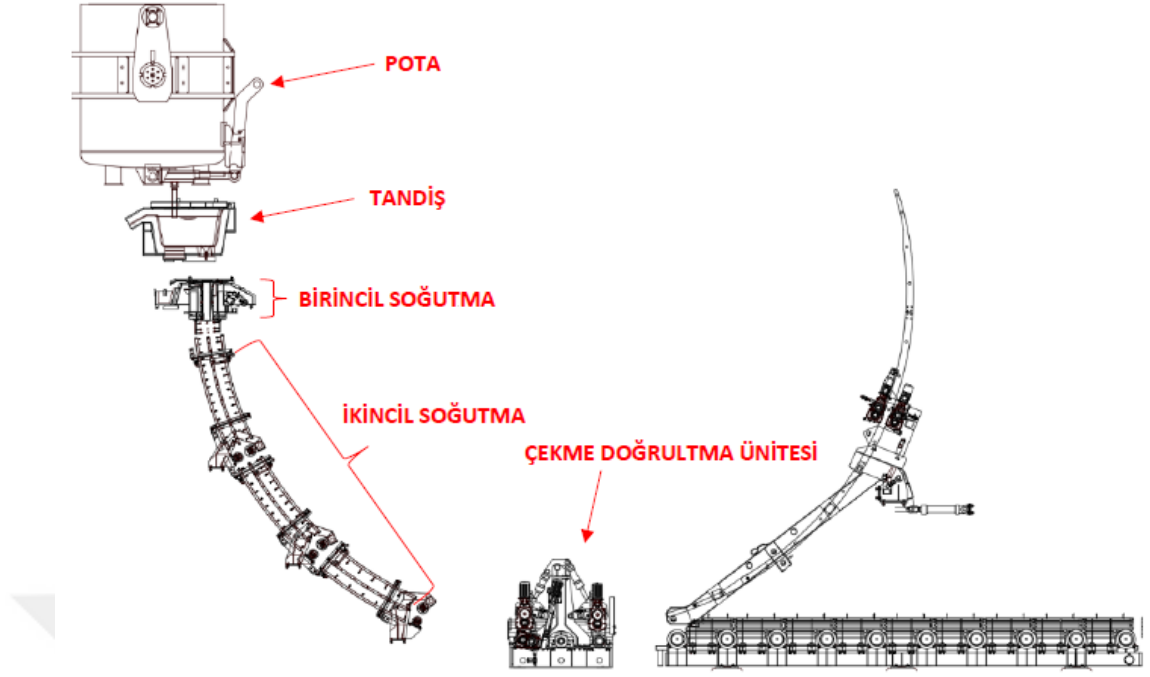
Isı transferinin en iyi şekilde gerçekleşmesi için göz önünde bulundurulması gereken bir diğer etken Leidenfrost etkisidir (Raudensky ve Hosky, 2005). Döküm esnasında ikincil soğutma bölgesinin herhangi bir kademesinde Leidenfrost etkisinin meydana gelmesi ısı transferinin gerçekleşmesini olumsuz yönden etkiler. Bu nedenle püskürtme lüleleri sonrasındaki su damlacıklarının büyüklüğü, su basıncı, kütük yüzey sıcaklığı gibi etkenlerin göz önünde bulundurulması gerekir (Raudensky ve Hosky, 2005). Yapılan değişikliklerle birlikte üst kademelerde kullanılan su miktarının artışı kütük yüzey sıcaklığının yüksekliği de göz önünde bulundurulduğunda etkin ısı transfer mekanizmasının gerçekleştiği Leidenfrost noktası altında kalmayı sağlamıştır.

Çizelge 8.4. Deneysel çalışma öncesinde ve sonrasında ikincil soğutma bölgesinde fiskiye dağılımı

	Kontrol Bölgesi	Soğutma Kademesi	Uzunluk (m)	Lüle Tipi	Lüle Sayısı
İYİLEŞTİRME ÖNCESİ	Kalıp Altı	Kalıp Altı	0,40 m	8065	40 adet (5 Sıra)
	Bölge 1	Kademe 1	1,20 m	5065	48 adet (12 Sıra)
		Kademe 2	1,20 m	5065	48 adet (12 Sıra)
	Bölge 2	Kademe 3	1,20 m	5065	48 adet (12 Sıra)
		Kademe 4	1,20 m	3065	48 adet (12 Sıra)
	Bölge 3	Kademe 5	1,20 m	3065	48 adet (12 Sıra)
		Kademe 6	1,20 m	3065	48 adet (12 Sıra)
İYİLEŞTİRME SONRASI	Kalıp Altı	Kalıp Altı	0,40 m	6065	40 adet (5 Sıra)
	Bölge-1	Kademe 1	1,20 m	6065	48 adet (12 Sıra)
	Bölge-2	Kademe 2	1,20 m	4565	48 adet (12 Sıra)
		Kademe 3	1,20 m	4565	48 adet (12 Sıra)
	Bölge-3	Kademe 4	1,20 m	3065	24 adet (6 Sıra)
		Kademe 5	1,20 m	3065	24 adet (6 Sıra)
		Kademe 6	1,20 m	3065	24 adet (6 Sıra)

8.4. Döküm Şartları

Deneysel çalışmanın yapıldığı kütük döküm makinesinde 150x150 mm ve 130x130 mm kesit ölçüsünde üretim yapılabilen 6 yol bulunmaktadır. Makinenin yarıçap ölçüsü 9000 mm'dir. Kalıp boyu 1000 mm olan makinede kalıp cidarı-ceket arasında birincil soğutma suyunun dolandığı mesafe 4 mm'dir. İkincil soğutma aşamasında birbirinden bağımsız olarak kontrol edilebilen 4 farklı bölge, kalıp altı ile birlikte toplamda 7 soğutma kademesi bulunmaktadır. İkincil metalürji işlemleri tamamlanan potadaki çelik sürekli döküm makinesinde sırasıyla tandış, birincil soğutma, ikincil soğutma ve çekme doğrultma ünitesi aşamalarından geçerek kütük haline dönüştürülür Şekil 8.11'de sürekli döküm sürecindeki aşamaların genel görünümü yer almaktadır.

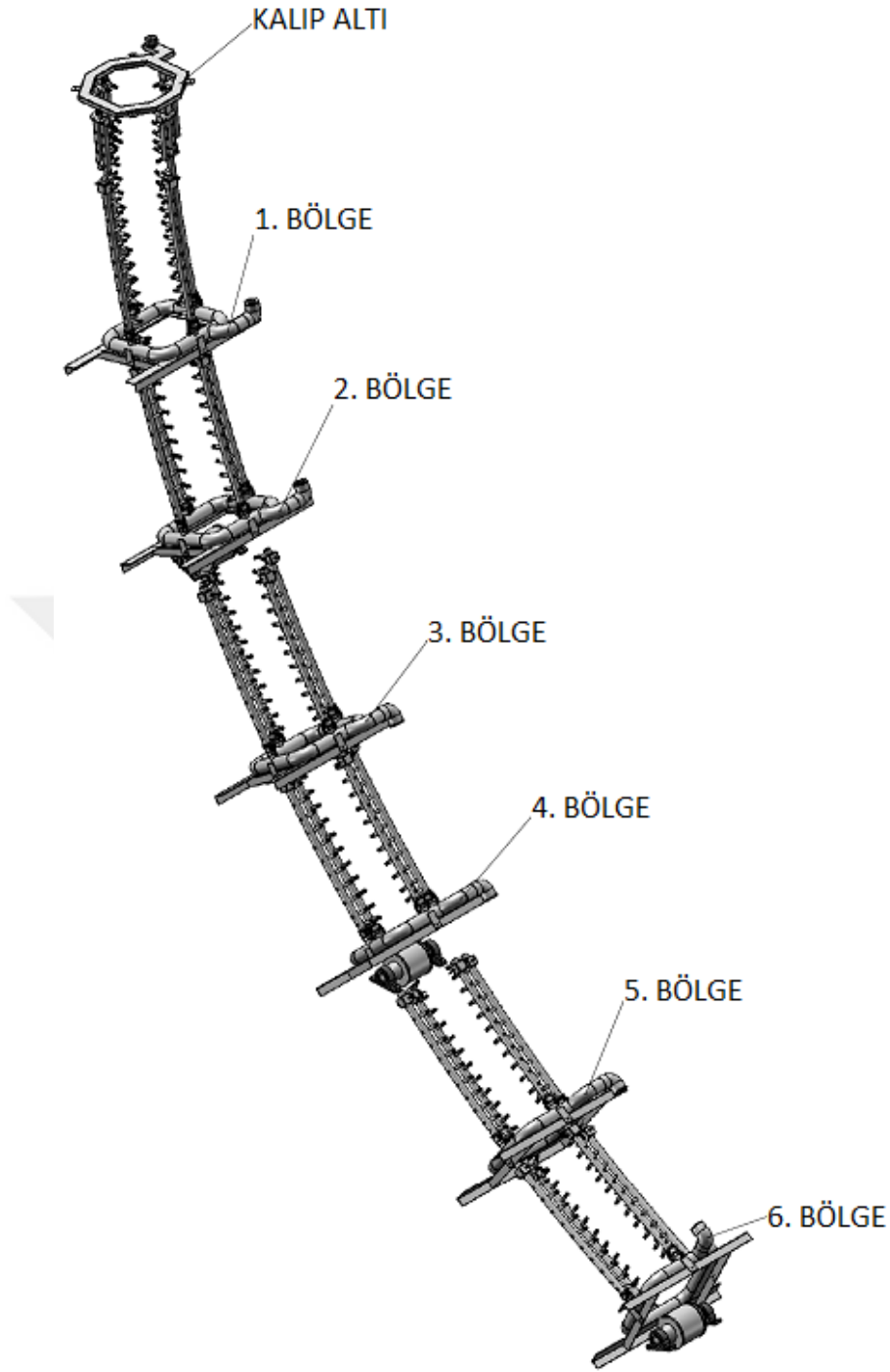


Şekil 8.11. Sürekli döküm sürecinin genel görünümü

Üretimin tamamına yakını açık döküm ile yapılmaktadır. Şekil 8.12 ve 13'te ikincil soğutma bölgesinin döküm anındaki durumu ve şematik tasarımı görülmektedir.



Şekil 8.12. Sürekli döküm sürecinde ikincil soğutma



Şekil 8.13. Kütük döküm makinesinde ikincil soğutma bölgesi kademeleri

Döküm esnasında iş güvenliği, kalitenin iyileştirilmesi ve hazne taban refrakter aşınmalarının kabul edilebilir düzeyde olmasını sağlamak için pota ile hazne arasında aratüp ile çelik akışına perdeleme yapılmaktadır. Şekil 8.14’te deneysel çalışmalar yapıldığı esnada pota ve hazne arasında kullanılan aratüp durumu görülmektedir.



Şekil 8.14. Pota ve hazne arasında kullanılan aratüpün görünümü

İkincil metalürji işlemleri tamamlanmış çeliğin döküm esnasında yeniden oksitlenmesini önlemek için cüruf yapıcı olarak iki farklı örtü tozu kullanılmaktadır. Çelik ile temas eden katmanda Al_2O_3 -CaO esaslı bazik özellikli, çelik ile temas eden örtü tozunun üzerindeki katmanda ise SiO_2 esaslı asidik özellikli örtü tozu kullanılmaktadır. Çizelge 8.5'te kullanılan örtü tozlarına ait kimyasal bileşim ayrıntıları yer almaktadır.

Çizelge 8.5. Kullanılan örtü tozlarına ait kimyasal bileşimler

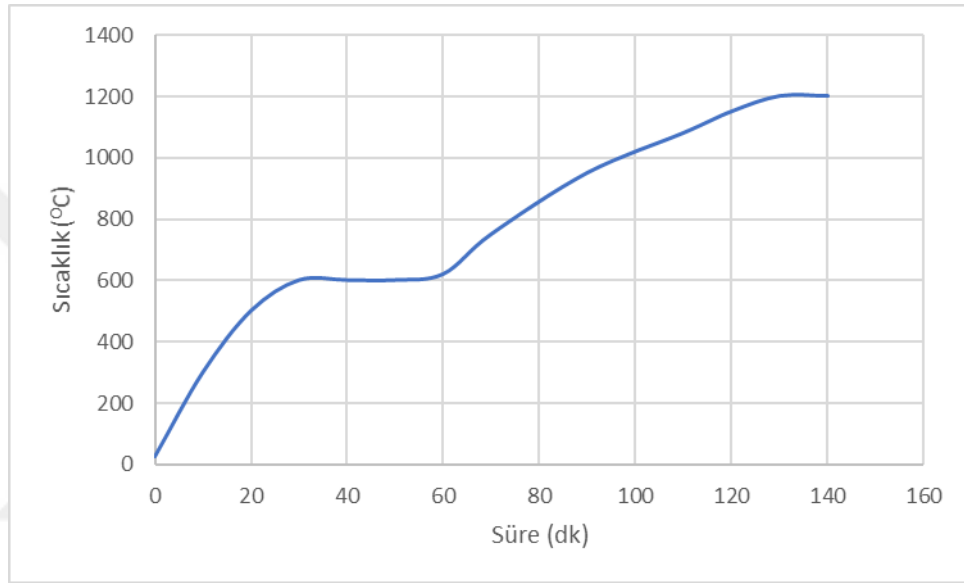
Örtü Tozu Türü	Bileşen (%)					
	CaO	MgO	Al_2O_3	SiO_2	Fe_2O_3	C
Bazik Örtü Tozu	58,60	3,40	31,60	-	-	-
Asidik Örtü Tozu	-	-	1,50	95,00	0,65	2,85

Tandişlerde yüksek döküm alınmasına yönelik olarak çalışma astarının oluşturulmasında manyezit esaslı refrakter malzemesi kullanılmaktadır. Tandişlerde ürün kalitesinin iyileştirilmesi ve refrakter ömrünün en yüksek düzeye ulaştırılabilmesi için ön ısıtma uygulanmaktadır. Şekil 8.15'te planlanan üretim esnasında uygulanan tandiş kurutma-ısıtma yöntemine ait zaman-sıcaklık eğrisi görülmektedir. Manyezit

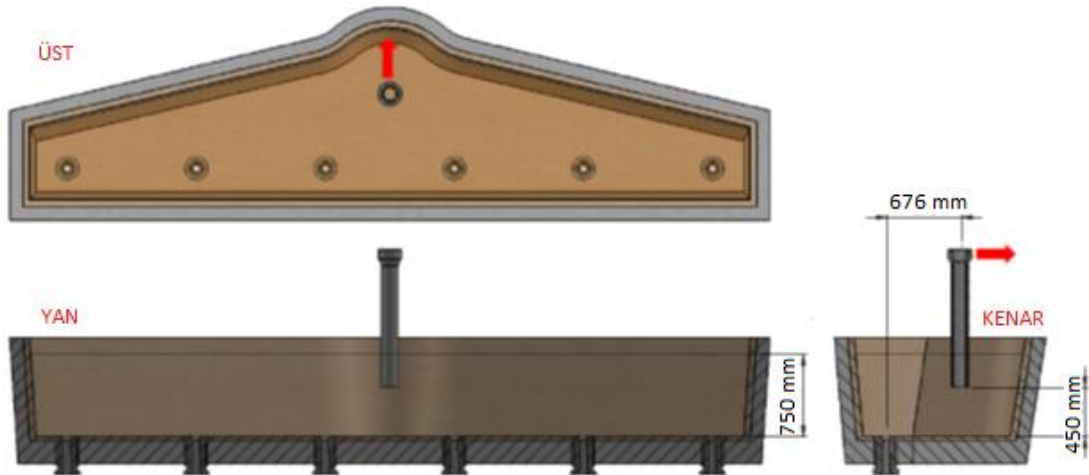
esaslı refrakter malzemesine ait kimyasal özellikler Çizelge 8.6’da yer almaktadır. Şekil 8.16’da döküm makinesinde kullanılan delta tip tandiçe ait tasarım görülmektedir.

Çizelge 8.6. Kullanılan tandiç püskürtme malzemesinin bileşimi

Bileşen (%)				
MgO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO
80-85	7	4	2	3



Şekil 8.15. Uygulanan tandiç kurutma-ısıtma pratiğine ait zaman-sıcaklık eğrisi



Şekil 8.16. Döküm makinesinde kullanılan tandiç tasarımı

Açık döküm ile yapılan kütük üretiminde kalıpta ısı transferi özelliklerinin iyileştirilmesi, katılaşan kabuğun kalıp cidarına yapışmasının önlenmesi için kalıp yağı kullanılması gerekir. Kullanılan kalıp yağı yüksek sıcaklıkta fiziksel özelliklerini kaybetmeyecek nitelikte olmalı ve katılaşan kabuğun kalıba yapışmasını önlemenin yanında ısı transferine olumlu yönde etki etmelidir. Bu amaçla kütük döküm üretimi esnasında parlama sıcaklığı yüksek tam sentetik kalıp yağı kullanılmıştır. Çizelge 8.7’de kütük döküm makinesindeki üretim esnasında kullanılan kalıp yağına ait fiziksel özellikler yer almaktadır.

Çizelge 8.7. Kullanılan kalıp yağına ait fiziksel özellikler

Fiziksel Özellik	Değer
Yoğunluk (g/cm³)	0,916
Parlama Sıcaklığı (°C)	>300
Viskozite (mm²/s)	38,5 (40 °C)
Nem (%)	<0,05

Sürekli döküm sürecinde yüzey kalitesinin ve ısı transferinin iyileştirilmesi, katılaşan kabuğun kalıp cidarına yapışmasının önlenmesi için kalıpta belirli bir salınım uygulanır. Salınım mesafesi, frekans olarak ifade edilen dakikadaki salınım sayısı (cpm) ve kalıbın döküm yönündeki kütükten ne kadar hızlı aşağıya indiğini ifade eden NST (Negative Strip Time) bu konudaki önemli ölçütlerdir. Çizelge 8.8’de deneysel çalışma süreci boyunca uygulanan salınım değişkenleri görülmektedir.

Çizelge 8.8. Deneysel çalışmalardaki salınım değişkenleri

Salınım Boyu (mm)	11
Frekans (cpm)	3,0 m/dk – 150 3,5 m/dk – 175 4,0 m/dk – 200
NST (s)	0,11

Merkez çatlağı, köşe çatlağı, köşe basıklığı ve paralel kenarlık üretilen kütüklerde görülen kalite kusurlarıdır. Çizelge 8.9’da çatlak dışında şekil bozukluğu ile ilgili kalite kusurları için belirlenen sınırlar yer almaktadır. Çatlak kusurlarında kenar-köşe

çatlaklarında için 10 mm'den az olan, merkez çatlaklarında uzunluğu 20 mm ve fazla olan çatlaklar karantina altına alınmaktadır.

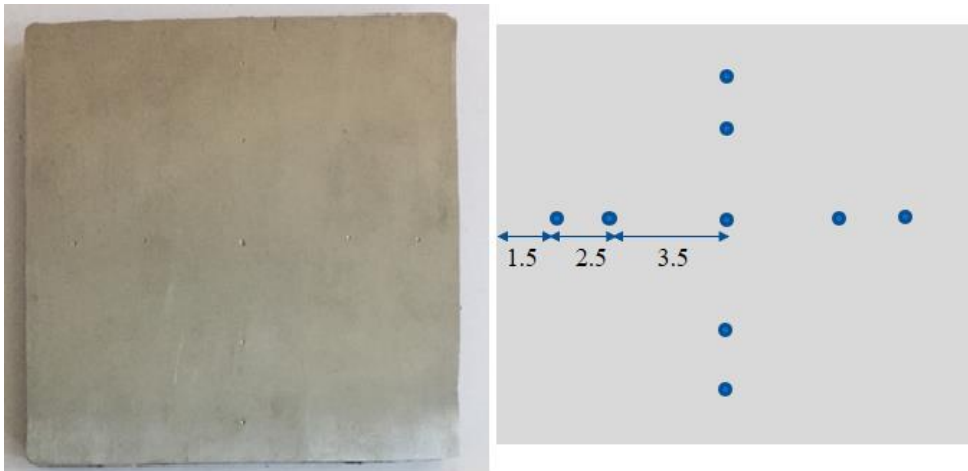
Çizelge 8.9. Çatlak dışındaki kalite kusurları için uygulanan sınırlar

Kalite Kusuru	Açıklama
Boyut Toleransı, mm	± 2
Paralel Kenarlık, %	3
Köşegen Ölçüsünde Farklılık, mm	≤ 10
Köşe Basıklığı, mm	≤ 3

Deneysel çalışmalar kapsamında ürün kalitesinin ve kalıp başarımının belirlenmesi amacıyla yeni kalıp ve iyileştirilmiş ikincil soğutma bölgesi dağılımı ile değişken döküm hızlarında çok sayıda döküm yapılmıştır. Üretilen kütükler gözle kontrolün yanı sıra makro, mikro ve sertlik ölçümleri yapılarak incelenmiştir.

8.5. Sertlik Ölçümü

Deneysel çalışmalarda üretilen kütüklerden kesit numuneleri alınmıştır. Kesitlerin son şekil bakımından uygunluğu görsel olacak incelenmiştir. Alınan numunelerin yüzey taşlama sonrasında ASTM E10-18 (ASTM, 2018) standardına göre 2,5 mm çapında 187,5 kg yükü kütük kesiti üzerinde Şekil 8.17'de görülen farklı noktalarda Brinell sertlik ölçümleri yapılmıştır.



Şekil 8.17. Numune üzerinde Brinell sertlik ölçümü yapılan nokta ve mesafeler (cm)

8.6. Makro Dağlama

Daha sonra ASTM E340-5 (ASTM, 2015) standardına göre 70 °C sıcaklıktaki %50 HCl + %50 H₂O çözelti içerisinde dağlanan numunelerde makro incelemelerde bulunulmuştur. Yapılan makro dağlamada katılaşma yönlenmeleri gözlemlenmiştir.

8.7. Mikro Dağlama

Makro dağlamanın ardından kütük numunesi üzerindeki farklı bölgelerden alınan parçalar %2 nital çözeltisi ile dağlanarak mikro yapıları incelenmiştir.



9. DENEYSEL BULGULAR VE İRDELEME

Deneysel çalışmalar kapsamında birincil soğutma ve ikincil soğutma konusunda yapılan iyileştirme çalışmalarının üretim ve ürün kalitesi üzerine etkisi irdelenmiştir. Yapılan değerlendirmede Kalıp-2 ve iyileştirilen soğutma bölgesi ile yapılan üretimlerdeki verimlilik ve ürün kalitesi sonuçları şu veriler ile değerlendirilmiştir;

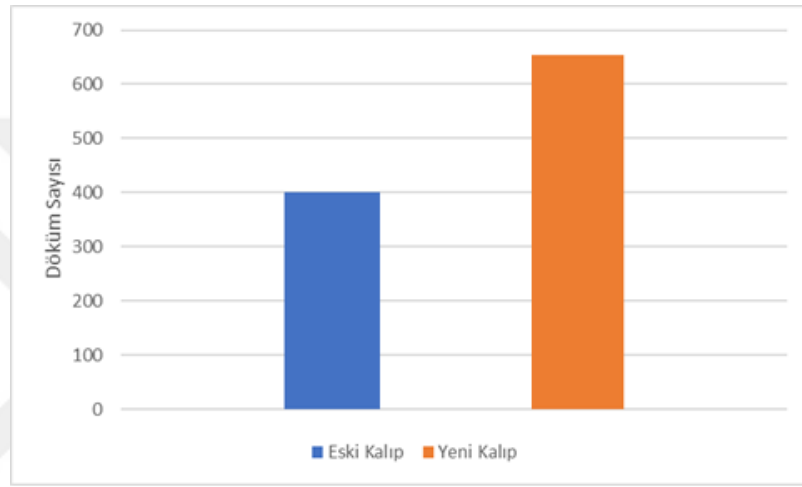
- Kalıp ömrü, yol kaybı ve döküm hızı
- Sertlik
- Makro yapı
- Mikro yapı

9.1. Kalıp Ömrü Sonuçları

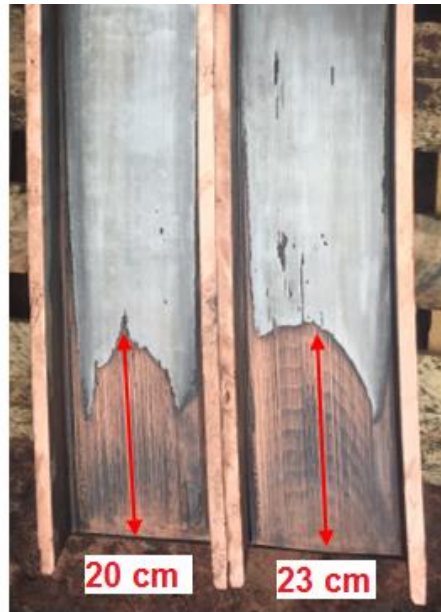
Deneysel çalışmalar öncesinde eski kalıba ait aşınma başarımının 400 döküm civarında olduğu görülmüştür. Farklı koniklik ölçüleriyle ilk olarak tasarlanan kalıp olan Kalıp-1 ile eski kalıp benzer aşınma başarımı göstermiştir. Ancak Kalıp-2 ile yapılan deneysel çalışmalarda kalıp aşınma başarımının 654 döküme kadar ulaştığı görülmüştür. Kalıp-2'nin koniklik ölçülerinde artış olmasına rağmen ceket ve kalıp çıkışı röleler konusunda yapılan iyileştirmeler aşınma başarımının artmasında etkili olmuştur. Şekil 9.2'de Eski Kalıp (400 döküm) ve Kalıp-1'in (400 döküm); Şekil 9.3'te Kalıp-1 (400 döküm) ve Kalıp-2'nin (654 döküm) ait aşınma durumu görülmektedir. Kalıp-2 ürün kalitesindeki iyileşmenin yanında ceket ve kalıp çıkışı desteği konusunda yapılan iyileştirmelerle Eski Kalıp ve Kalıp-1'e kıyasla yaklaşık %50 oranında daha iyi ömür başarımı ortaya koymuştur. Şekil 9.1'de eski ve yeni kalıp ömrünün karşılaştırılması yer almaktadır.

Kalıp çıkışı rölelerinin döküm esnasında kütüğe daha fazla destek sağlaması kalıp çıkışında aşınmaya neden olan mekanik etkiyi en aza indirmiştir. Bu sayede katılacak kabuğun neden olduğu aşınmanın azaltılması için iyileştirme sağlanmıştır. Ceket konusunda yapılan iyileştirme birincil soğutmanın daha etkin şekilde yapılmasını mümkün hale getirmiştir. Bakır kalıpta soğutmanın daha etkin şekilde yapılması hem üretkenlik hem de kalıp ömrüne olumlu yönde etki etmiştir. Şekil 9.4'te eski ceket ve

yeniden tasarlanan ceket ile kullanılan 400 dökümdeki (eski kalıp) ve 620 dökümdeki (Kalıp-2) dış yüzeyleri görülmektedir. Eski ceket ile kullanılan kalıbın dış yüzeyinde meydana gelen kararma iyileştirme öncesinde birincil soğutmanın etkin bir şekilde yapılamadığını ortaya koymaktadır. Kalıbın soğutma şartlarının yeterli olmaması kalıbın dış cidarında renk değişimine neden olmaktadır (Barella, vd., 2014). Ceketin daha sağlam yapıda 3,5 mm boşluğa sahip bir şekilde tasarlanması birincil soğutma aşamasında kalıp dış cidarının daha etkin şekilde soğutulmasını mümkün hale getirdiği görülmüştür.



Şekil 9.1. Eski ve yeni kalıp ömrünün karşılaştırması



Şekil 9.2. Mevcut Kalıp (sol) ve Kalıp-1 (sağ) aşınma durumları



Şekil 9.3. Mevcut Kalıp (sol) ve Kalıp-2 (sağ) aşınma durumları



Şekil 9.4. Mevcut ceket (sol) ve yeni ceket (sağ) ile kullanılan kalıpların dış yüzey durumu

Burden ve arkadaşları (Burden, vd, 1977) tarafından yapılan çalışmada alınan döküm sayısına bağlı olarak kalıp koniklik ölçüsünde eksi koniklik olarak değişim meydana geldiği ve kalıp çelik seviyesinin olduğu bölgede çarpılma olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Bu nedenle kalıp ömrünün yol kaybı verileri ile birlikte değerlendirilmesi önemlidir. Kalıp tasarımı, malzeme seçimi, kaplama türü ve döküm şartları kalıp ömründe belirleyici olan etkenlerdir. Nitekim sertleştirilmiş bakır üzerine yapılan 3 mm kalınlığındaki nikel kaplama ile kalıp konikliğinde herhangi bir değişiklik olmadan 500-600 dökümlere, krom kaplama ile 370 dökümlere ulaştığı görülmüştür (Nakano, vd, 1977; Lucenti, 1969). Kalıp ömrü verisi sürekli döküm sürecinde kalıbın kullanım süresi boyunca koniklik ölçüsünün değişmeden kaldığından emin olmak amacıyla alınan döküm sayısının yol kaybı değerleri ile birlikte karşılaştırılması gerekir. Bu çalışmada ulaşılan düşük yol kaybı oranı ve kalite kusurlarının en aza inmesi kalıp koniklik ölçüsünün kalıp ömrü boyunca döküm şartlarına uygun şekilde korunduğuna işaret ettiği değerlendirilmiştir.

Sürekli döküm makinelerindeki çalışma şartları, bakır kalıp imalatında kullanılan bakır türü ve bakır kalıp tasarımı kullanılan bakır kalıbın başarımı üzerinde büyük etkiye sahiptir. Ancak hangi koşulda olursa olsun bakır kalıpta meydana gelen şekil değişikliği ve aşınma miktarı alınan döküm sayısı ile doğru orantılıdır. Kalıpta meydana gelen şekil değişikliğinin özellikle çelik seviyesinde kalıbın süneklik değerini aşması kalıbın üst kısmında çatlakların meydana gelmesine neden olur. Diğer taraftan kalıp çıkışındaki aşınmanın sınır değerlerini aşması kalıbın koniklik ölçüsünün kaybolmasına neden olur. Birincil soğutma suyu sıcaklığının yüksek, su hızının düşük ve bakır kalıbın mekanik olarak desteklenmemesi kalıp ömründe düşüşe neden olan en önemli etkenlerdir (Samarasekera, 1978).

Wang ve arkadaşları (Wang, vd., 2010a; Wang, vd., 2010b) yaptıkları çalışmada sürekli döküm sürecinde meydana gelen büzülmeye göre 182 mm yuvarlak ve 165 mm kare ölçüye sahip kalıplar için parabolik koniklik ölçüsü belirlemişlerdir. Yapılan deneysel çalışmalarda yuvarlak kalıplar için kalıp ömrünün 200 dökümden 322 döküme çıkarmayı başarmışlardır. Yapılan çalışmada kare kalıplar için deneysel çalışmalar henüz tamamlanmadığından dolayı ulaşılan en yüksek kalıp ömrü belirtilmemiştir (Wang, vd., 2010a; Wang, vd., 2010b).

Bu çalışmada kalıp koniklik ölçülerinin arttırılmasına rağmen kalıp çıkışındaki destek rölelerindeki ara mesafenin döküm esnasında kütüğü destekleyecek ve ceket tasarımının daha etkin soğutma sağlayacak şekilde değiştirilmesi kalıp ömrünün arttırılmasında etkili olmuştur. Yapılan değerlendirmelerde kalıp ömründe en iyi düzeyde iyileştirme sağlanması için kalıp koniklik ölçüsünün yanında birincil soğutma şartlarının ve kalıp çıkışı rölelerinin irdelenmesi gerektiği sonucuna ulaşılmıştır.

9.2. Üretkenlik ve Yol Kaybı Sonuçları

Yapılan çalışmada iyileştirme sağlanan en önemli konu yol kayıplarının azaltılması ve döküm hızının arttırılması olmuştur. Deneysel çalışmalar öncesinde Mevcut kalıp ve Mevcut soğutma bölgesi ile yapılan dökümlerde yol kaybı oranı %3 civarında gerçekleştiği ve her bir yol için 150x150 mm kesit üretiminde ulaşılabilen en yüksek döküm hızının 3,5 m/dk olduğu görülmüştür.

Kısa süreli olarak Kalıp-1 ve mevcut soğutma bölgesi ile yapılan üretimlerde şekil kusuru bakımından iyileştirme sağlanmasına karşın yol kaybı ve ulaşılabilir en yüksek döküm hızı konusunda iyileştirme sağlanamamıştır. Kalıp-2 ve iyileştirilen soğutma bölgesi ile yapılan üretimlerde ise yol kaybının %0,2'ye kadar düşmesi ve 150x150 mm kesit üretiminde ulaşılabilen döküm hızının 4,0 m/dk olması sağlanmıştır.

Deneysel çalışmalar sonrasında uzun süreli olarak Kalıp-2 ve iyileştirilen soğutma bölgesi ile yapılan üretimlerde yol kaybının ortalama %0,32 olarak gerçekleştiği görülmüştür. Son olarak iyileştirme çalışmasının yapıldığı sürekli döküm makinesinde üretkenliğin 215 ton/saat'ten 250 ton/saate ulaşması sağlanmıştır. Çizelge 9.1'de deneysel çalışmalar öncesinde, Kalıp-1 ve mevcut soğutma bölgesi ve Kalıp-2 ve iyileştirilmiş soğutma bölgesi ile yapılan üretimlerde meydana gelen yol kayıpları yer almaktadır.

Çizelge 9.1. İlk kısa süreli deneysel çalışmalarda yol kaybı durumu

KALİTE	ESKİ KALIP*		KALIP-1**		KALIP-2***	
	DÖKÜM SAYISI	YOL KAYBI	DÖKÜM SAYISI	YOL KAYBI	DÖKÜM SAYISI	YOL KAYBI
A	-	-	64	2	128	1
B	19	-	-	-	-	-
C	170	25	136	16	184	2
D	221	30	139	9	112	2
E	2	-	2	-	1	-
TOPLAM	412	55	341	25	425	5

*Mevcut Kalıp ve Mevcut soğutma Bölgesi

**Kalıp-1 ve Mevcut Soğutma Bölgesi

***Kalıp-2 ve İyileştirme Sonrası Soğutma Bölgesi

Birincil soğutma aşamasında soğutma suyu şartlarının iyileştirilmesi ve döküm şartlarına uygun koniklik değerlerinin belirlenmesi şekil kusurlarının ortadan kaldırılmasında etkili olduğu değerlendirilmektedir. Nitekim Çizelge 9.2’de deneysel çalışmalar sonrasında uzun süreli olarak yapılan üretimlerdeki yol kaybı sayıları yer almaktadır. Üretim esnasında döküm sıcaklığının sıvıgen sıcaklığının 25-35 °C üstü olması hedeflenmiştir. Katıgen ve sıvıgen sıcaklıkları denklem (9.1) ve denklem (9.2) eşitlikleri kullanılarak hesaplanmıştır (Thomas, vd., 1987). Çizelge 9.3’te çelik kalitelerine ait katıgen ve sıvıgen sıcaklıkları yer almaktadır. Çizelge 9.4’te üretim esnasındaki döküm sıcaklıklarının dağılımı görülmektedir.

Çizelge 9.2. Uzun süreli deneysel çalışmalar sonrasında uzun sürede yol kaybı durumu

KALİTE	DÖKÜM SAYISI	YOL KAYBI	YOL KAYBI ORANI (%)
A	735	11	0,25
B	432	5	0,19
C	672	13	0,32
D	636	15	0,39
E	44	2	0,76
TOPLAM	2519	45	0,30

$$T_l = 1537 - 88(\%C) - 8(\%Si) - 5(\%Mn) - 30(\%P) - 25(\%S) - 4(\%Ni) - 1,5(\%Cr) - 5(\%Cu) - 2(\%Mo) - 2(\%V) - 18(\%Ti) \quad (9.1)$$

$$T_s = 1535 - 200(\%C) - 12,3(\%Si) - 6,8(\%Mn) - 124,5(\%P) - 183,9(\%S) - 4,3(\%Ni) - 1,4(\%Cr) - 4,1(\%Al) \quad (9.2)$$

Çizelge 9.3. Deneysel çalışmalar esnasında üretilen çelik kalitelerine ait katıgen ve sıvıgen sıcaklıkları (Thomas, vd., 1987)

	A	B	C	D	E
Sıvıgen (°C)	1525	1523	1524	1516	1507
Katıgen (°C)	1507	1503	1506	1488	1470

Kütük döküm makinesinde yapılan üretimlerde üretim ve kalite sorunlarının çözümünde birincil ve ikincil soğutmanın bir arada iyileştirilmesi Kalıp-2 ile yapılan üretimlerde önemli düzeyde üretkenlik artışı sağlamıştır. Soğutma kademesinin ilk aşamalarında soğutma şiddetinin artırılması ve daha sonraki aşamalarda parabolik olarak herhangi bir düşüş yaşanmadan soğutma şiddetinin kontrol edilmesi boyuna çatlak sonrasında meydana gelen kanamaların azaltılmasında etkili olmuştur.

Çizelge 9.4. Deneysel çalışmalar esnasında döküm sıcaklıklarının dağılımı

Döküm Sıcaklığı Aralığı	Çelik Kaliteleri (%)				
	A	B	C	D	E
Sıvıgen <T ≤ Sıvıgen + 15	1	0	1	0	2
Sıvıgen + 15 <T ≤ Sıvıgen + 25	15	17	10	17	3
Sıvıgen + 25 <T ≤ Sıvıgen + 35	52	55	50	58	36
Sıvıgen + 35 <T	32	28	39	25	59

Irving (Irving, 1993) tarafından yapılan çalışmada ikincil soğutma bölgesinin ilk aşamalarında uygulanan soğutma şiddetinin çatlak oluşumuna etkisi irdelenmiştir. Çalışma kapsamında yassı ürün üretilen sürekli döküm makinesinde altı ayı aşkın süre ikincil soğutma bölgesinin ilk iki kademelerindeki soğutma şiddetlerinin değiştirildiği altı farklı durum değerlendirilmiştir. Ortalama döküm hızının 1 m/dk olduğu durumda ikincil soğutma bölgesinin ilk kademelerinde soğutma şiddetinin özellikle ikincil kademe için çok yüksek veya düşük olmamasının sürekli döküm sürecinde çatlak oluşumunda etkili olduğu görülmüştür. Altı farklı soğutma uygulamasında soğutma

şiddeti ilk kademe için 0,101 l/kg'dan 0,091 l/kg'a ikinci kademe için 0,166 l/kg'dan 0,133 kg'a düşürülmüştür. Yapılan değişikliklerde ikincil soğutma bölgesinde uygulanan 0,166 l/kg ve 0,133 l/kg soğutma şiddetlerinde yüzey kusuru görünen ürün oranının sırasıyla yüzde 60 ve yüzde 70 civarında olduğu izlenmiştir (Irving, 1993). Bu çalışmada da ikincil soğutma bölgesindeki soğutma şiddetinin birincil soğutma bölgesinden geçiş esnasında daha uygun olmasının sağlanması çatlak oluşumunu ve yol kaybını önlemede etkili olduğu değerlendirilmiştir.

Kittaka ve arkadaşları (Kittaka, vd, 2000) tarafından yapılan çalışmada "HS-Mold" ile 150x150 ve 130x130 mm ölçüte sahip kütüklerde sırasıyla 4,6 m/dk ve 6,0 m/dk döküm hızlarına ulaşmayı başarmışlardır. Çalışma kapsamında döküm hızına uygun koniklik ölçüleri, kalıp çıkışındaki çarpılma durumunun önlenmesi için kalıp çıkışı rölelerinin tasarımı ve ikincil soğutma bölgesindeki dağılım ile soğutma şiddeti konusunda değişiklik yapılmıştır. Yapılan değişiklikler kapsamında daha önce 800 mm olan kalıp boyu 900 mm olarak değiştirilmiştir. Uygun koniklik ölçüleri belirlenmiştir. Ayrıca daha önce kalıp çıkışında olmayan iki sıra kalıp çıkışı rölesi eklenmiştir. Bu kapsamda kalıp çıkışındaki röleler döküm esnasında henüz katılaşmanın ilk aşamalarında kütüğün şeklini korumasındaki etkisi irdelenmiştir. İkincil soğutma bölgesinde daha önce 2 kademe olan dağılım 3 kademeye çıkarılmış ve kullanılan su miktarı 1.200 l/dk'dan 2.200 l/dk'ya çıkarılmıştır. Gerçekleştirilen değişiklikler sonucunda 6 m/dk döküm hızına ulaşılabilmesi mümkün olmuştur. Bu çalışmada da benzer olarak dökülen çelik türlerine ve döküm hızına uygun koniklik ölçüleri belirlenmiştir. Kalıp çıkışındaki rölelerin tasarımı iyileştirilerek kütüğün desteklenmesi sağlanmıştır. Ayrıca ikincil soğutma bölgesinin ilk kademelerinde ikincil soğutma suyunun etkin şekilde kullanılmasının sağlanması ikincil soğutma iyileştirmeleri bakımından benzerlik göstermektedir. Nitekim, Kittika ve arkadaşları (Kittika, vd, 2000) 1000 mm kalıp boyu ile 150x150 mm ölçüte sahip kütük üretiminde kuramsal olarak ulaşılabilen en yüksek döküm hızının 4,5 m/dk olduğunu belirlenmişlerdir. Deneysel çalışmalarda sürdürülebilir en yüksek döküm hızı olan 4,0 m/dk'nın kuramsal olarak ulaşılabilen üretkenlik konusunda üst sınıra yakın olduğunu söylemek mümkündür.

Fukada ve arkadaşları (Fukada, vd., 1999) tarafından yapılan çalışmada “HS-Mold” ile ilgili yapılan çalışmaların ikincil soğutma ve üretilen kütüklerdeki kalite kusurlarının karşılaştırılması ayrıntılı şekilde ele alınmıştır. Çalışma kapsamında daha önce 3,8 m/dk olan döküm hızının 4,8 m/dk’ya yükseltilmesinde ikincil soğutma bölgesindeki yüksek basınçlı su püskürtülmesi işleminin etkili olduğu görülmektedir. Kalıp tasarımı ve ikincil soğutma bölgesindeki değişikliklerle birlikte döküm hızı artırılmasına rağmen yol kaybı oranının %0,4’ten %0,2’ye düşmesi ön plana çıkmaktadır. Bu çalışmada da birincil soğutma ve ikincil soğutma ile ilgili iyileştirme çalışmalarının bir arada yürütülmesi ürün kalitesinin ve üretkenliğin artırılmasında etkili olmuştur.

Chow (Chow, 2001) tarafından yüksek döküm hızı ile yüksek kalitede kütük üretilmesine yönelik olarak kapsamlı bir çalışma yapılmıştır. Yapılan çalışmada farklı tesislerde 4 farklı deneme gerçekleştirilmiş ancak sadece bir tesiste elde edilen sonuçlar paylaşılmıştır. Yapılan kalıp tasarımı ile 120x120 mm ölçüde 4,5 m/dk döküm hızına ulaşılmıştır. Kalıp tasarımının yapılmasında kalıbın döküm anında meydana gelen çarpılması göz önünde bulundurularak dökülen çelik türüne ve döküm hızına göre uygun koniklik ölçüsünün belirlenmesi sağlanmıştır. Kalıbın döküm anında sıcaklığa bağlı olarak ortaya çıkan çarpılma miktarının belirlenmesi için kalıp cidarından sıcaklık ölçümü yapılmıştır. Yapılan ölçüm sonucunda kalıp cidarı sıcaklığının kalıptaki çelik seviyesine ve döküm hızına bağlı olarak 100 mm’ye kadar en yüksek değerlere ulaştığı görülmüştür. Kalıp cidarından yapılan ölçüm sonucunda belirlenen sıcaklıkların kullanılması ile kalıpta meydana gelen çarpılmanın 0,2 mm ile 0,4 mm arasında olduğu belirlenmiştir. Bu değerler Samarasekera ve Brimacombe tarafından belirlenen çarpılma miktarları ve mesafeleri ile büyük oranda benzerlik göstermektedir (Samarasekera ve Brimacombe, 1984; Chow, 2001). Kalıptaki çarpılma miktarları göz önünde bulundurularak kalite sorunları yaşanmadan yüksek döküm hızına ulaşılabilmesi için dört aşamalı koniklik ölçüsüne sahip kalıp tasarımı yapılmıştır. Yapılan bu çalışmada da döküm anında ortaya çıkan çarpılma miktarı, kalıptaki çelik seviyesinin mesafesi ve döküm hızı göz önünde bulundurularak yapılan tasarım yüksek döküm hızına ulaşılmasında etkili olmuştur. Tasarlanan kalıbın dört aşamalı koniklik ölçüsüne sahip olması Chow (Chow, 2001) tarafından yapılan çalışma ile benzerlik göstermektedir.

9.3. Genel Ürün Kalitesi Sonuçları

Deneyisel çalışmalar kapsamında üretilen kütüklerin yüzey kalitesi ve şekilde kusuru bakımından son durumu görsel olarak incelenmiştir. Yapılan incelemede üretilen kütüklerdeki salınım izlerinin düzenli ve uygun olduğu görülmüştür. Şekil 9.5 ve 9.6'da üretilen kütüklerdeki salınım izleri ve ürün genel görünümü yer almaktadır. Üretilen kütüklerde üretim sonrasında yapılan görsel incelemede salınım izlerinde düzensizlik olmadığı görülmüştür. Üretilen kütüklerin kesit görünümünde aynı şekilde herhangi bir şekil kusuru görülmemiştir. Üretilen kütüklerin döküm hızı aralığı 3,0-4,0 m/dk arasında değişmektedir.



Şekil 9.5: Üretilen kütüklerdeki salınım izleri



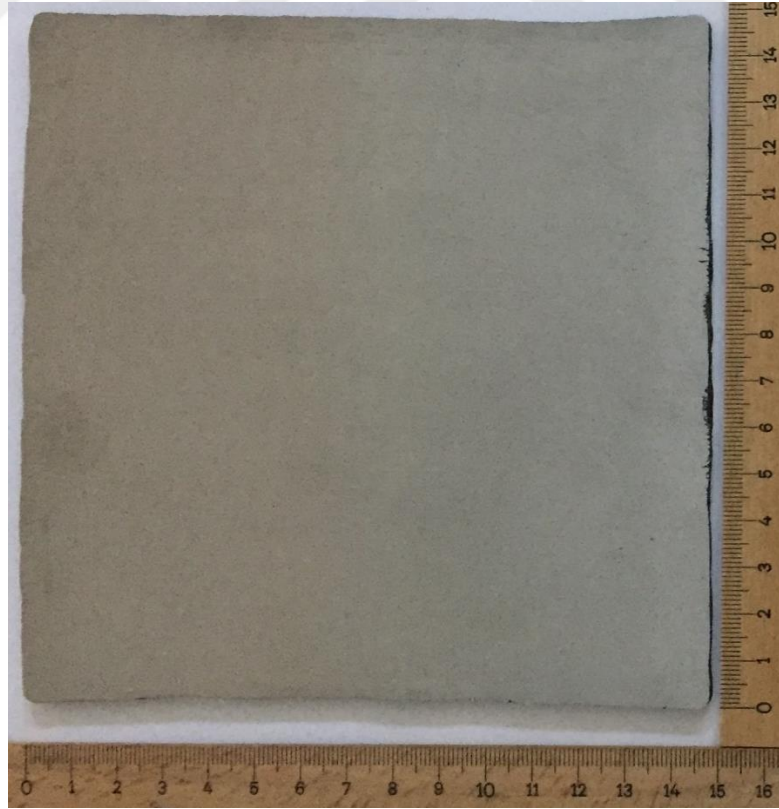
Şekil 9.6: Üretilen kütük kesitlerinin genel görünümü

Deneysel çalışmalarda üretim sonrasındaki genel incelemenin ardından kütüklerden sertlik, makro ve mikro inceleme için kesit numuneleri alınmıştır. Alınan kesit numunelerinde ilk olarak üretilen kütüğün şekil kusuru (paralel kenarlık, köşe basıklığı, vb.) bakımından durumu değerlendirilmiştir.

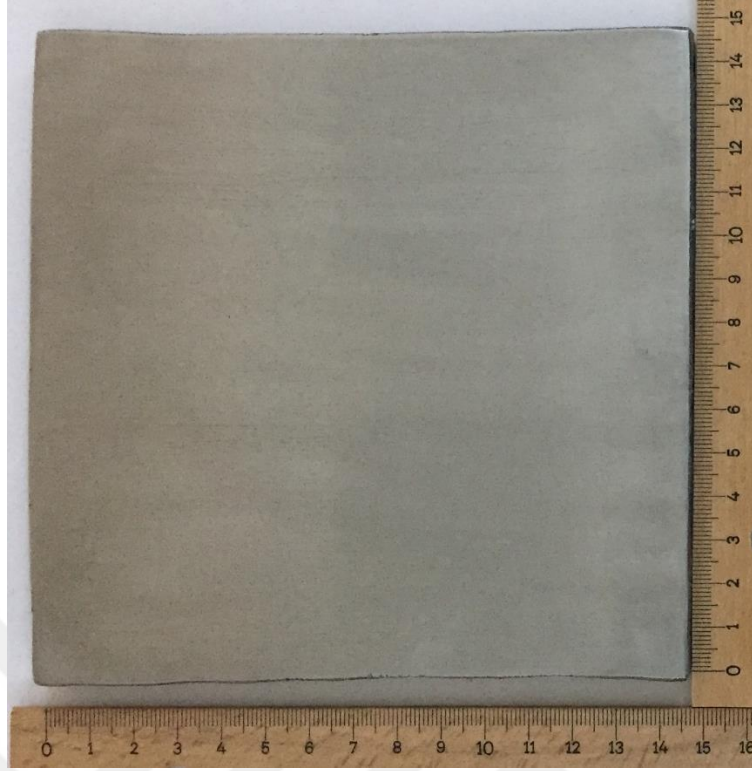
Yapılan alınan numunelerde yapılan genel değerlendirmede kütük kesitlerinin deneysel çalışmalar öncesinde çok daha iyi durumda olduğu, 4 m/dk döküm hızında üretilen kütükler dahil olmak üzere kesit numunesinde şekil kusuru (paralel kenarlık, köşe basıklığı, vb.) bulunmadığı görülmüştür. Şekil 9.7’de Kalite A kimyasal bileşimine sahip çelik için 3,0 m/dk Şekil 9.8 ve Şekil 9.9’da Kalite A kimyasal bileşimine sahip çelik için 3,5 m/dk ve 4,0 m/dk ile döküm hızı ile üretilen kütüklere ait kesit numuneleri görülmektedir. Numune kesitlerinde artan döküm hızına rağmen şekil kusuru bakımından neredeyse kusursuz bir kütük kesiti elde edildiği görülmektedir. Kalıp-2 için belirlenen koniklik ölçülerinin Kalite A çelik türünde 4,0 m/dk döküm hızına kadar istenilen kalitede kütük üretimini mümkün hale getirmiştir. Birincil soğutma bölgesinde ile ikincil soğutma bölgesinde yapılan iyileştirmeler ulaşılan döküm hızının sürdürülebilir olmasını sağlamıştır.



Şekil 9.7. Kalite C bileşimine sahip 3,0 m/dk döküm hızı ile üretilen kütük kesiti

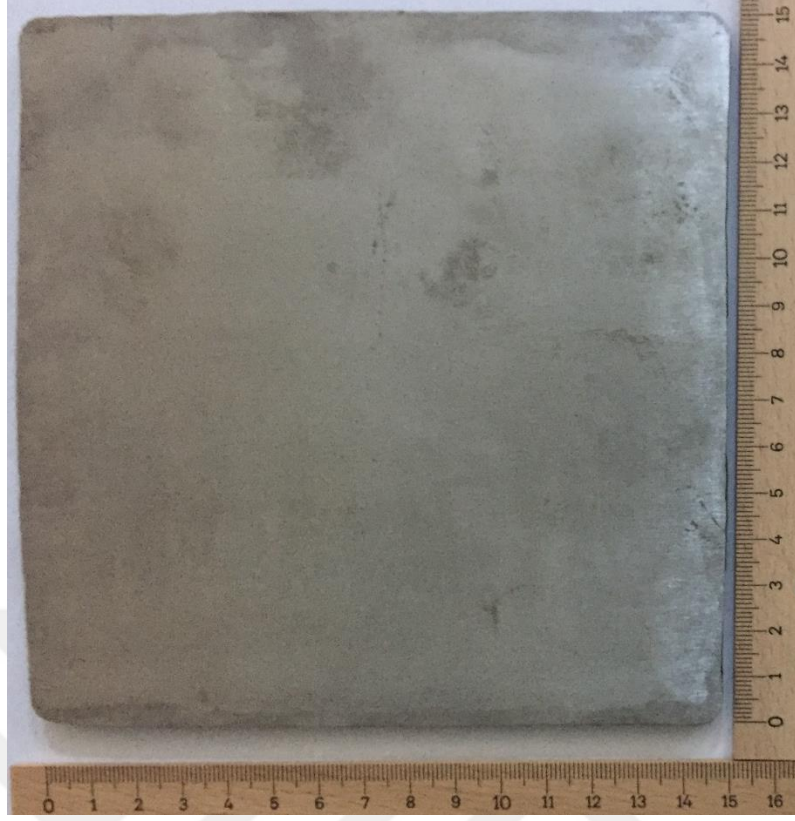


Şekil 9.8. Kalite A bileşimine sahip 3,5 m/dk döküm hızı ile üretilen kütük kesiti

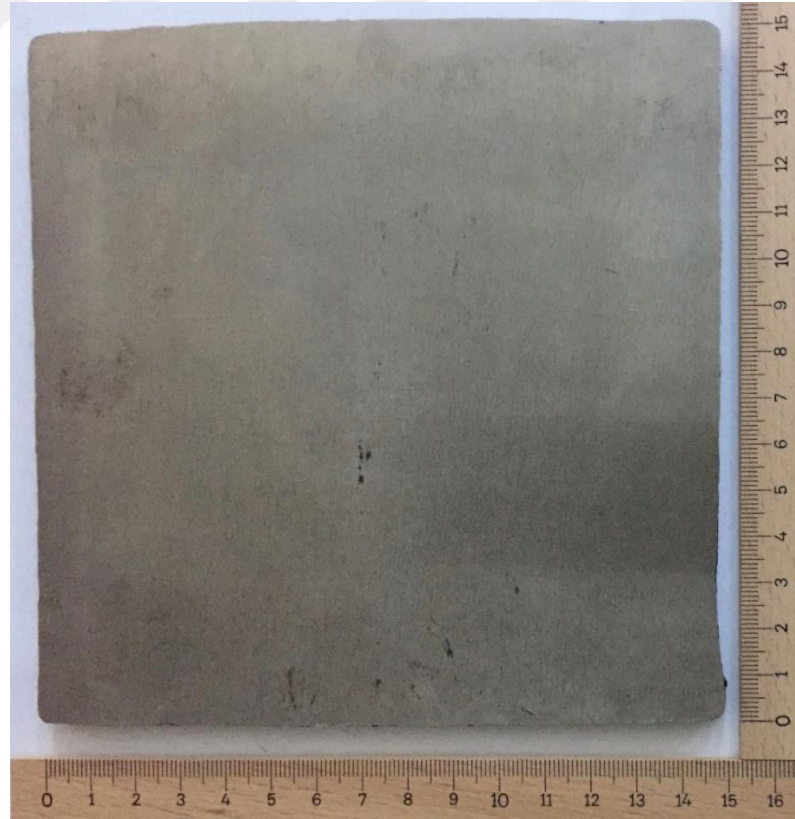


Şekil 9.9. Kalite A bileşimine sahip 4,0 m/dk döküm hızı ile üretilen kütük kesiti

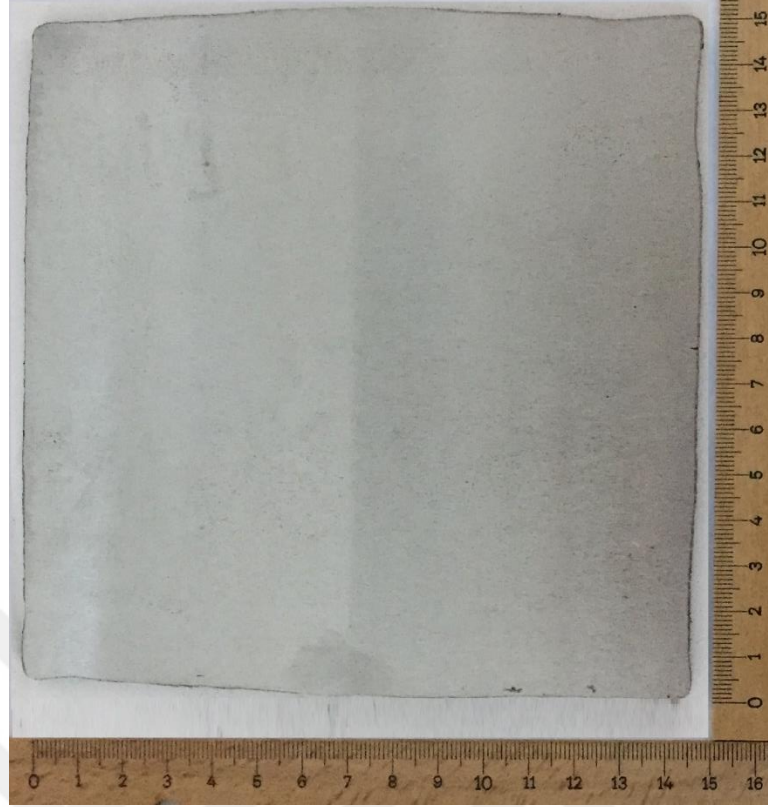
Deneysel çalışmalar kapsamında düşük karbon içeriğine sahip çelik türlerinin yanında peritektik dönüşüm aralığındaki çelik türlerinin döküm hızına bağlı olarak şekil kusuru bakımından elde edilen sonuçlar irdelenmiştir. Bu kapsamda Şekil 9.10 ve Şekil 9.11 Kalite D kimyasal bileşimine sahip çelik için sırasıyla 3,0 m/dk, 3,5 m/dk ve Şekil 9.12’de Kalite B bileşimine sahip 4,0 m/dk ile döküm hızı ile üretilen kütüklere ait kesit numuneleri görülmektedir. Kalite D ve Kalite B bileşimine sahip kütüklerin farklı hızlardaki kesit numunelerinde şekil kusurlarının peritektik dönüşüm aralığındaki çelik türleri için de yok denecek düzeye indirildiği görülmüştür. Nitekim Kalite A, Kalite B ve Kalite D kütüklerine ait kesit numuneleri karşılaştırıldığında Kalite D kütüklerinin kesit olarak şekil kusurunun ortaya çıkmaya daha elverişli olduğu görülmektedir. Peritektik dönüşüm ve peritektik döküm şartları nedeni ile bu durumun beklenen bir sonuç olduğu değerlendirilmiştir. Şekil 8.1’de deneysel çalışmalar öncesinde 3,3 m/dk döküm hızında Kalite C kütüğüne ait kesit numunesinin şekil kusuru bakımından durumu incelendiğinde deneysel çalışmalar sonrasında önemli düzeyde iyileşme sağlandığı görülmüştür.



Şekil 9.10. Kalite D bileşimine sahip 3,0 m/dk döküm hızı ile üretilen kütük kesiti



Şekil 9.11. Kalite D bileşimine sahip 3,5 m/dk döküm hızı ile üretilen kütük kesiti



Şekil 9.12. Kalite B bileşimine sahip 4,0 m/dk döküm hızı ile üretilen kütük kesiti

Uygun kalıp tasarımının ve köşe yarıçapının kullanılması kütük kesitlerindeki şekil kusurlarının giderilmesinde belirleyici unsur olduğu değerlendirilmiştir. Nitekim peritektik dönüşüm aralığındaki bileşime sahip dökümlerde meydana gelen büzülme düşük karbonlu çelik türlerine kıyasla daha fazla olduğu için kalıp köşeleri ile katılan kabuk arasında meydana gelen boşluğun daha fazla olmasından kaynaklanmaktadır.

Fukada ve arkadaşları (Fukada, vd., 1999) tarafından yapılan çalışmada benzer şekilde uygun koniklik ölçüleri belirlenerek ve ikincil soğutma bölgesi değişiklikler yapılarak 130x130 mm kesit üretiminde 4,6 m/dk döküm hızına başarılı şekilde ulaşılması bu değerlendirmeyi doğrular niteliktedir. Kullanılan kalıbın uygun koniklik ölçüsüne sahip olması üretkenliğin yanında şekil kusuru olmaması bakımından önemli olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Bu çalışmada ürün kalitesinin iyileştirilmesi ve üretkenliğin artırılması için birincil ve ikincil soğutma etkenleri bir arada değerlendirilmiştir.

Agarwal (Agarwal, 1979) tarafından yapılan çalışmada şekil kusurlarının ortaya çıkmaması ve merkez çatlaklarının ortadan kaldırılması için farklı ikincil soğutma

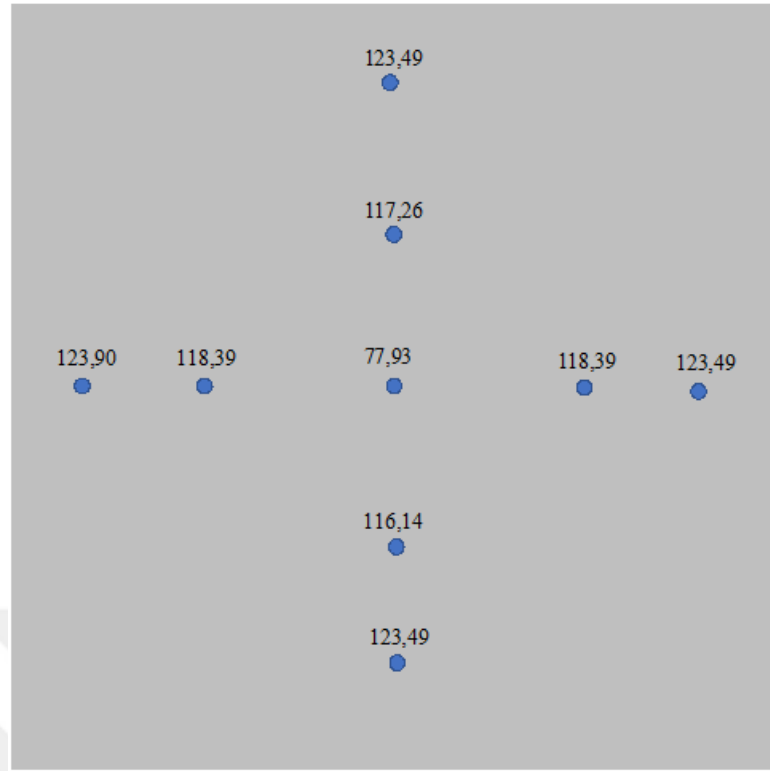
bölgesi tasarımları denenmiştir. Yapılan çalışma kapsamında ikincil soğutma bölgesindeki üçüncü kademenin mesafesi kısaltılarak yukarı kademelerde kütük yüzeyindeki sıcaklığın artışı önlemek için uygun soğutma şiddeti uygulanmıştır. Ayrıca aşağı kademelerdeki püskürtme lülesi sayıları düşürülmüştür. İkincil soğutma suyunun etkin şekilde kullanılması sayesinde iyileştirme öncesinde 1,57 l/kg olan soğutma şiddeti önce 1,09 l/kg'a ardından 1,02 kg/l'ye düşürülmüştür. Mevcut çalışmada da ikincil soğutma bölgesindeki birinci kademe ile ikinci kademe geçişi esnasında uygun olmayan ısı transfer katsayısı geçişi sorununun çözülmesi için kullanılan su miktarının dağılımı değiştirilmiştir. Çalışma öncesinde merkez çatlakları ile ilgili önemli bir sorun yaşanmamasına karşın sonuç olarak üretkenlik artışı ile birlikte ürün kalitesinde önemli bir iyileşme sağlamıştır. İkincil soğutma bölgesindeki dağılımın ürün kalitesinin ötesinde üretkenliğe olumlu düzeyde etki ettiği sonucuna ulaşılmıştır.

Chaudhuri ve arkadaşları (Chaudhuri, vd., 2010) yaptıkları çalışmada döküm esnasında kütük yüzey sıcaklığının ikincil soğutma bölgesinde yeniden sıcaklığının artmasını önlemek amacıyla programlanabilir mantıksal denetleyici altyapısı ile çalışan ikincil soğutma bölgesi konusunda çalışmışlardır. Yaptıkları çalışmada bilgisayar altyapısının yanında fiziksel olarak ikincil soğutma bölgesindeki püskürtme lülelerinde değişiklikler yapılmıştır. İyileştirme öncesindeki bilgisayar üzerinden kontrol edilemeyen veya ölçülemeyen kalıp altı bölgesi, bölge 1 ve bölge 2'nin birbirinden bağımsız olarak kontrol edildiği ve bölge 2'nin iki ayrı kademedan oluştuğu durumdan bölge 3'ün eklenmesi ile birlikte tüm bölgelerdeki soğutma bölgesinin birbirinden bağımsız olarak ölçüldüğü ikincil soğutma bölgesi dağılımı oluşturulmuştur. İyileştirme sonrasında etkin soğutma mesafesi 4 m'den 8 m'ye çıkarılmıştır. Yapılan değişiklikler sonrasında değişken döküm hızlarında uygun su debisinin kullanılması köşe ve merkez çatlaklarının olmadığı, paralel kenarlık sorunlarının yaşanmadığı kütükler üretilmesini mümkün kılmıştır. Bu çalışmada da benzer şekilde katılaşmanın ilk anlarında ikincil soğutma bölgesinde kontrolün daha hassas şekilde yapılması sağlanmıştır. Bu sayede 4,0 m/dk'ya ulaşan döküm hızlarında kalite sorunu yaşanmadan kütük üretiminin mümkün olduğu düşünülmektedir.

Heard ve arkadaşları (Heard ve Kaell, 1999) tarafından yapılan çalışmada birincil soğutma aşamasında kalıp boyu 700 mm'den 1000 mm'ye arttırılmıştır. İkincil soğutma bölgesindeki su miktarının 600 l/dk'dan 2020 l/dk'ya, su basıncının 6 bar'dan 12 bar'a yükseltilmesi ve soğutma kademe sayısı, püskürtme lülelerindeki artış ile düşük karbonlu çeliklerde 150x150 mm boyut için 3,5 m/dk döküm hızına ulaşılmıştır. Salınım sisteminde yapılan değişiklikler ile artan salınım sayısı ile yüzey kalitesinde önemli iyileşme olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Salınım sisteminde yapılan değişiklik sayesinde düşük karbonlu çeliklerde döküm esnasında 380 cpm'e kadar ulaşılmıştır. Salınım sayısının 360 cpm ve salınım boyunun 6 mm olduğu durumda salınım izi derinliğinin kaybolduğu görülmüştür (Heard ve Kaell, 1999). Bu çalışmada da 4,0 m/dk için 200 cpm olan salınım sayısının yüzey kalitesi bakımından sınırlandırıcı bir unsur olduğu değerlendirilmektedir. Salınım sistemindeki iyileştirme ve salınım sayısındaki artışın yüzey kalitesi bakımından önemli düzeyde etki edeceği düşünülmektedir.

9.4. Sertlik Ölçümü Sonuçları

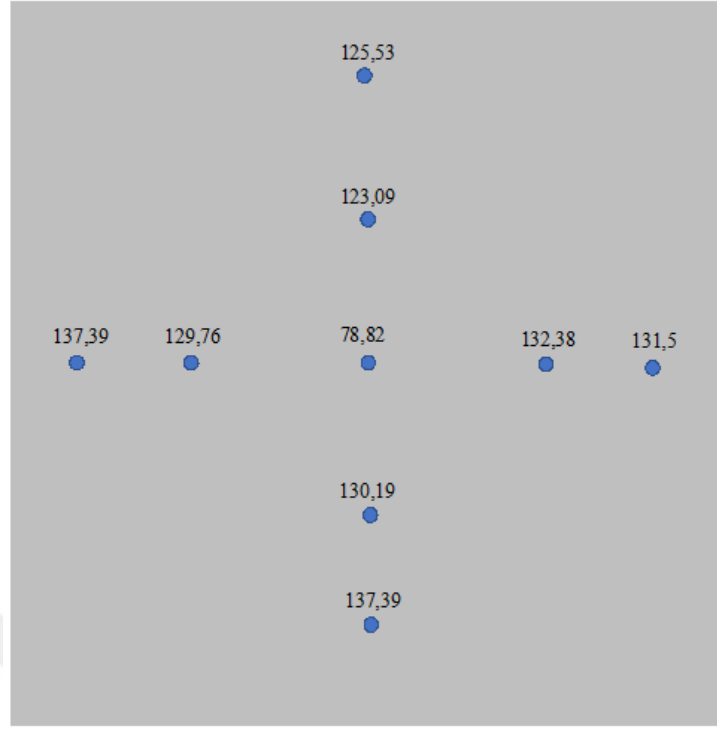
Deneyisel çalışmalar sonrasında alınan kesit numuneleri üzerindeki farklı noktalardan sertlik ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 9.13'te Kalite C bileşimine sahip çelik için 3,0 m/dk, Şekil 9.14 ve Şekil 9.15'te Kalite A bileşimine sahip çelik için 3,5 m/dk ve 4,0 m/dk döküm hızı ile üretilen kütüklerde yapılan sertlik ölçüm sonuçları görülmektedir. Yapılan değerlendirmede numunelerden aynı noktalardan alınan sertlik sonuçlarının kenarlardan merkeze doğru benzer şekilde düşüş gösterdiği görülmüştür.



Şekil 9.13. Kalite C bileşimine sahip 3 m/dk hızla dökülmüş kütük kesiti üzerindeki Brinell sertlik ölçümü değerleri

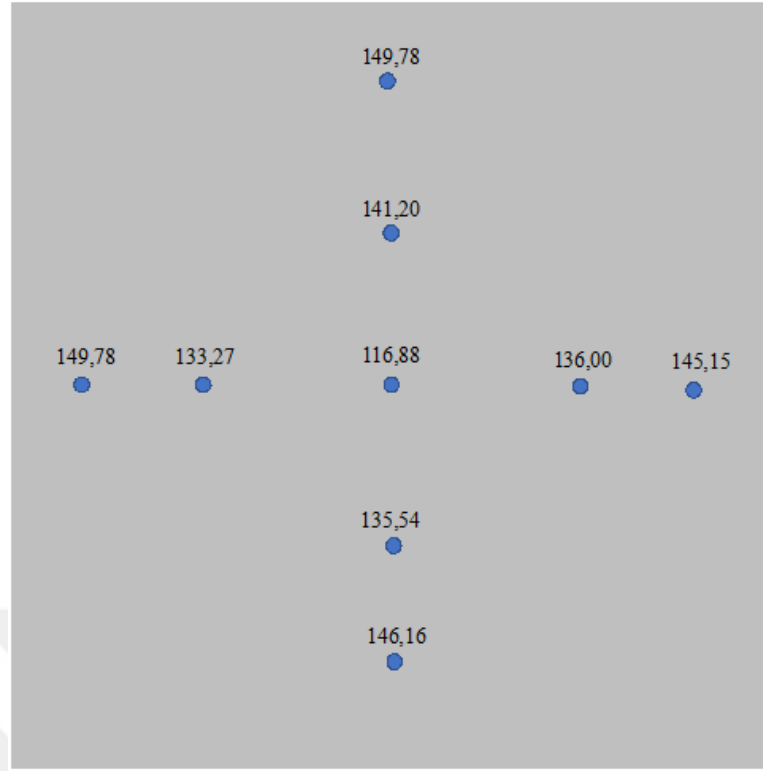


Şekil 9.14. Kalite A bileşimine sahip 3,5 m/dk hızla dökülmüş kütük kesiti üzerindeki Brinell sertlik ölçümü değerleri

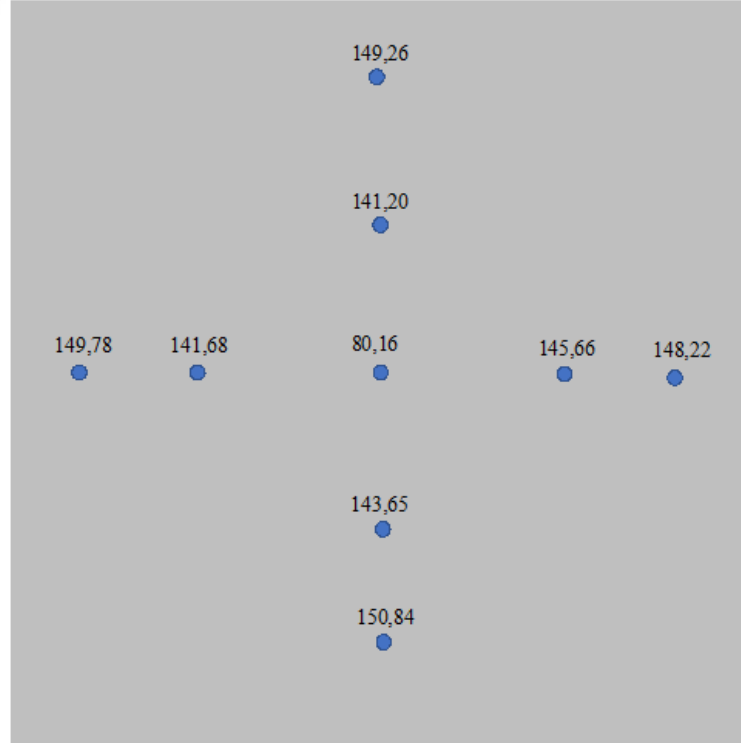


Şekil 9.15. Kalite A bileşimine sahip 4,0 m/dk hızla dökülmüş kütük kesiti üzerindeki Brinell sertlik ölçümü değerleri

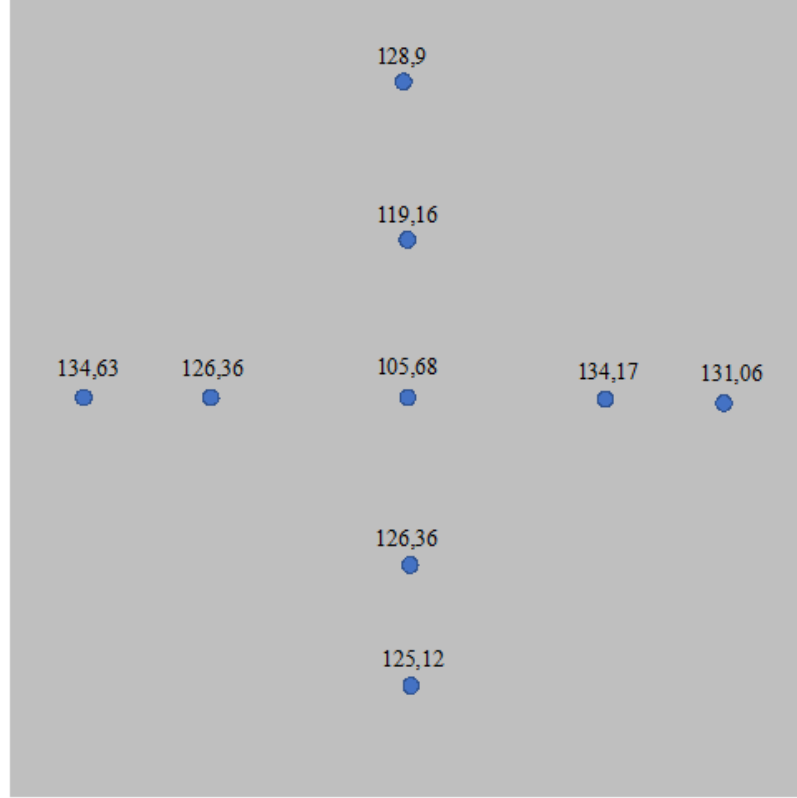
Şekil 9.16 ve Şekil 9.17’de Kalite D bileşimine sahip çelik için 3,0 m/dk ve 3,5 m/dk döküm hızı ile üretilen kütüklerdeki sertlik ölçüm değerleri görülmektedir. Ölçüm sonuçlarının Şekil 9.9 ve 9.10 ile benzer değişimleri gösterdiği ancak artan karbon miktarı nedeniyle sertlik değerlerinin beklendiği şekilde Kalite D için daha yüksek olduğu değerlendirilmiştir. Şekil 9.18’de Kalite B bileşimine sahip çelik için 4,0 m/dk döküm hızı ile üretilen kütükteki sertlik ölçüm değerleri yer almaktadır. Kalite B için sertlik değerlerinin çelik türündeki karbon miktarına bağlı olarak Kalite D’den daha düşük olduğu görülmüştür. Peritektik dönüşüm aralığında karbon içeren kimyasal bileşime sahip kütük numunelerinde yapılan sertlik ölçümlerinin düşük karbon içeriğine sahip kütük numunelerinde yapılan sertlik ölçümlerine benzer şekilde kenardan merkeze doğru düşüş gösterdiği görülmüştür.



Şekil 9.16. Kalite D bileşimine sahip 3,0 m/dk hızla dökülmüş kütük kesiti üzerindeki Brinell sertlik ölçümü değerleri



Şekil 9.17. Kalite D bileşimine sahip 3,5 m/dk hızla dökülmüş kütük kesiti üzerindeki Brinell sertlik ölçümü değerleri



Şekil 9.18. Kalite B bileşimine sahip 4,0 m/dk hızla dökülmüş kütük kesiti üzerindeki Brinell sertlik ölçümü değerleri

Yapılan ölçümler sonrasında sertlik ölçümünde sertlik ölçümlerinde merkezden kenara doğru elde edilen sertlik değerlerinde artış olduğu görülmüştür. Bu durumun döküm esnasında meydana gelen katılaşma yönlenmesi ve tane boyutu ile doğrudan ilişkisi bulunmaktadır. (Mizoguchi, 2003). Merkezdeki sertlik değeri düşüşünün katılaşmanın son aşamasında meydana gelen çekme boşluğu nedeniyle fazla olduğu değerlendirilmiştir. Düşük döküm hızında kenarlara yakın bölgelerde ince taneli dağılımın fazla olması nedeniyle aynı noktalarda yapılan sertlik ölçümlerinde düşük hızla dökülmüş kütük kesit numunesi üzerinde daha yüksek sertlik değeri ölçüldüğü gözlemlenmiştir. Döküm esnasında merkez boşluğu oluşma eğiliminin kütük numune kesitinde merkezdeki sertlik ölçümlerinde belirleyici nitelikte olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Mamuzic ve arkadaşları (Mamuzic, vd, 2005) yaptıkları çalışmada 125x125 mm ölçüdeki kütüklerde meydana gelen kalite kusurlarının haddeleme sürecinde meydana gelebilecek kalite kusurları ile ilişkilerini incelemişlerdir. Bu kapsamda üretilen %0,16 karbon içeriğine sahip kütüklerden alınan numunelerde yapılan Brinell sertlik

ölçümlerinde sertlik değerin kenar noktalarda 150'den merkezde doğru 109'a düştüğü görülmüştür. Bu çalışmada da benzer kimyasal bileşime sahip Kalite D numunelerinin kenar bölgelerde yakın sertlik sonuçları verdiği, merkezdeki ölçümün çekme boşluğunun miktarına bağlı olarak daha yüksek olduğu görülmüştür.

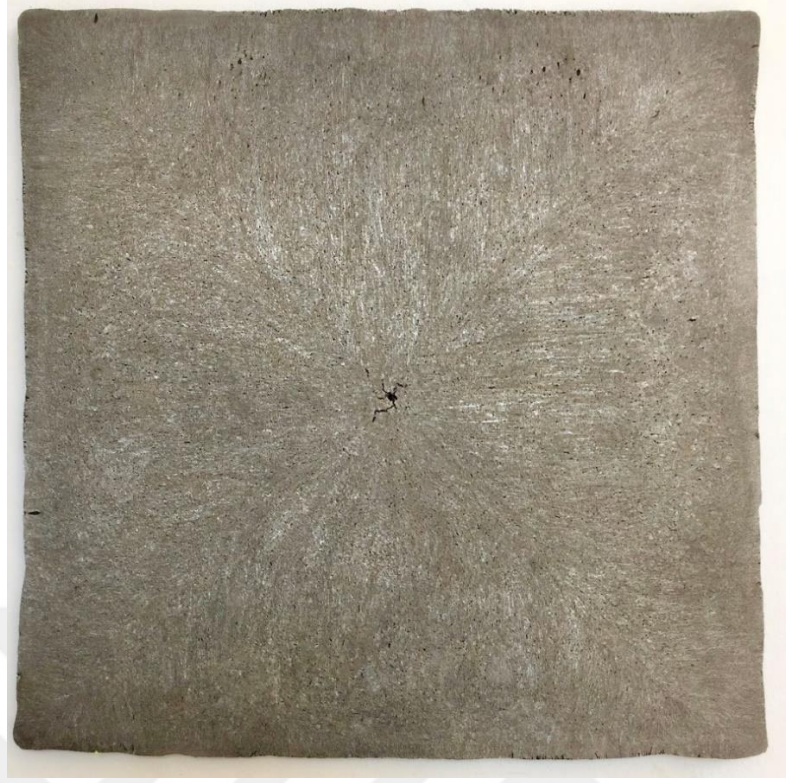
9.5. Makro Dağlama Sonuçları

Deneysel çalışmalar sonrasında alınan numunelerde düşük karbon aralığındaki çelik türlerine ait numuneler makro dağlama sonrasında incelenmiştir. Yapılan incelemede dağlanmış numunelerde dağlama öncesinde görülmeyen katılaşma yönlenmesi, çatlak ve gaz boşlukları gibi ayrıntıların izlenmesi hedeflenmiştir.

Şekil 9.19'da Kalite C bileşimine sahip 3,0 m/dk döküm hızı ile üretilmiş, Şekil 9.20 ve 9.21'de Kalite C bileşimine sahip 3,5 ve 4,0 m/dk döküm hızı ile üretilmiş kütüklerden alınmış kesitlere ait dağlanmış numune fotoğrafları görünmektedir.



Şekil 9.19. Kalite C bileşimine sahip 3,0 m/dk hızla dökülmüş kütük kesitinin makro dağlama görünümü



Şekil 9.20. Kalite A bileşimine sahip 3,5 m/dk hızla dökülmüş kütük kesitinin makro dağlama görünümü

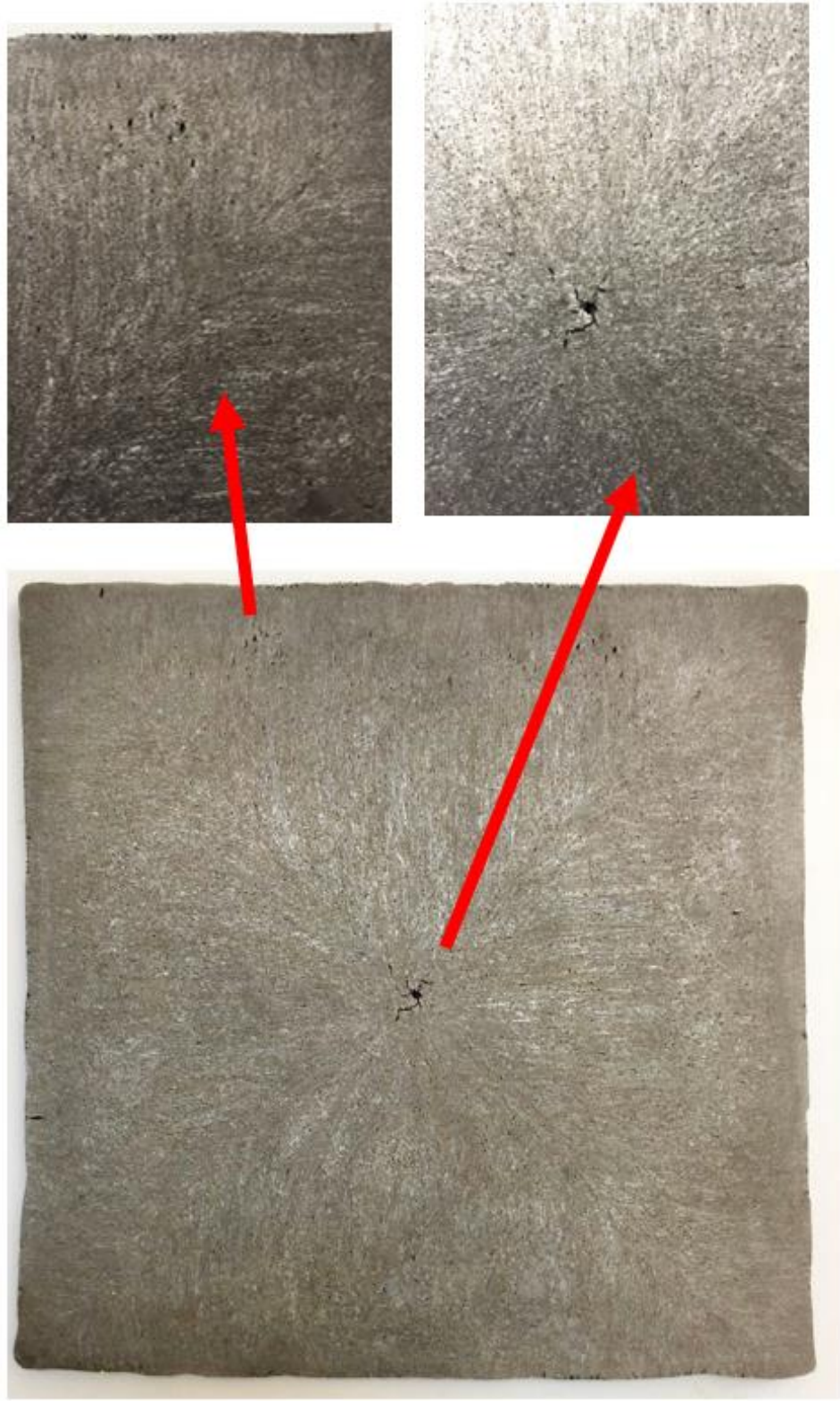


Şekil 9.21. Kalite A bileşimine sahip 4,0 m/dk hızla dökülmüş kütük kesitinin makro dağlama görünümü

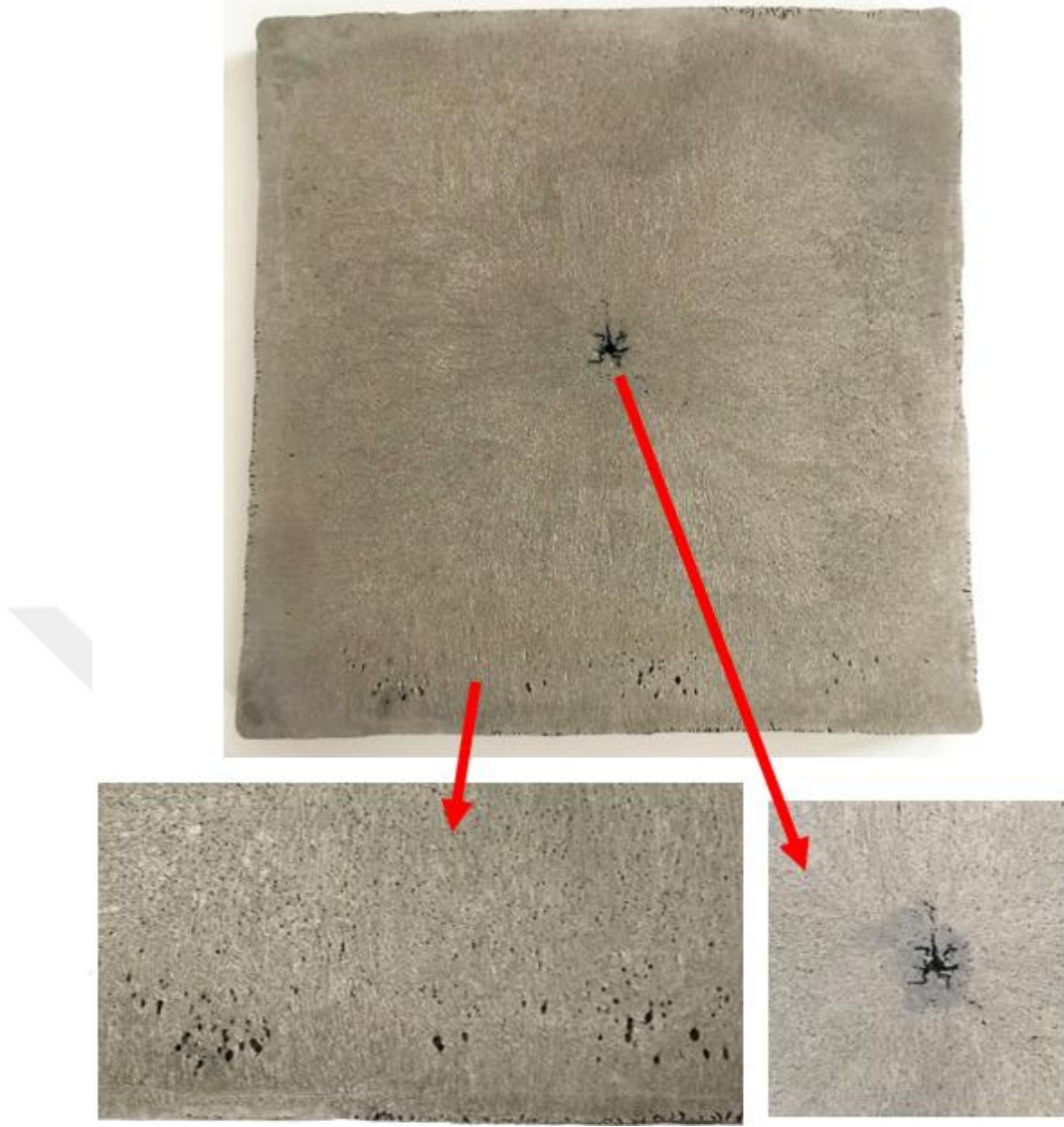
Şekil 9.22’de Kalite C bileşimine sahip 3,0 m/dk hızla dökülmüş kütük kesitinin, Şekil 9.23 ve Şekil 9.24’te Kalite C bileşimine sahip 3,5 ve 4,0 m/dk döküm hızı ile üretilmiş kütüklerden alınmış kesitlere ait makro dağlama numunelerinde yer alan gaz boşlukları ve merkez çatlaklarının durumu ayrıntılı olarak gösterilmiştir.



Şekil 9.22. Kalite C bileşimine sahip 3,0 m/dk hızla dökülmüş kütük kesitinin makro dağlama görünümdeki merkez çatlağı ve gaz boşluğu ayrıntıları



Şekil 9.23. Kalite A bileşimine sahip 3,5 m/dk hızla dökülmüş kütük kesitinin makro dağlama görünümdeki merkez çatlağı ve gaz boşluğu ayrıntıları



Şekil 9.24. Kalite A bileşimine sahip 4,0 m/dk hızla dökülmüş kütük kesitinin makro dağlama görünümdeki merkez çatlağı ve gaz boşluğu ayrıntıları

Kesit numunelerinin makro dağlaması sonrasında genel olarak merkezde çatlak ve kenara yakın bölgelerde kılcal çatlaklar ile hafif gaz boşlukları olduğu görülmüştür. Makro dağlama sonrasında görünen gaz boşlukları açık döküm yapılması nedeniyle ortaya çıktığı değerlendirilmiştir. Merkez çatlakları katılaşmanın son aşamasında meydana gelen çekme boşlukları ve döküm sıcaklığı ile döküm hızı ilişkili olarak meydana geldiği düşünülmektedir. Ayrıca dağlama numunelerinin tamamında kenarlardan merkeze doğru katılaşma yönlenmeleri ayırt edilebilmektedir.

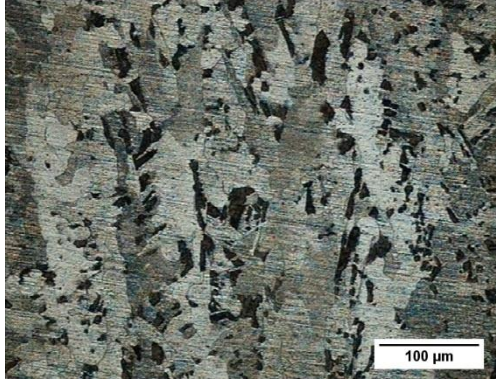
Sahoo ve arkadaşları (Sahoo, vd., 2009) yaptıkları çalışmada kütük döküm makinesinde düşük ve orta karbon çelik türlerinin üretiminde elektromanyetik karıştırmada uygulanan farklı akım ve frekans değerlerinin kesit numunesi üzerindeki etkisini ultrasonik ölçümler ve görsel işleme teknikleri kullanarak incelemişlerdir. Yapılan çalışma sonucunda 280 A ve 3,5-4 Hz frekans değerinde kütük kesitlerindeki kusurların en iyi duruma ulaştığı görülmüştür. Benzer şekilde bu çalışmada da yüksek döküm hızında üretilen kütüklerde ayrışma ve merkez boşluklarının en aza indirilmesi için elektromanyetik karıştırma uygulamanın verimli sonuçlar verebileceği değerlendirilmiştir. Ancak yapılan çalışmada incelenen kütüklerin üretiminde elektromanyetik karıştırma kullanılmamıştır.

Su ve arkadaşları (Su, vd., 2014) yaptıkları çalışmada yüksek karbon içeriğine sahip kütüklerin sürekli döküm sürecindeki ısı transferi ile merkezde meydana gelen makro ayrışmayı incelemişlerdir. Çalışmada 1,70 ile 1,90 m/dk arasında değişen döküm hızlarında alınan numunelerde üretilen kütüklerdeki çekme boşluğunun artan döküm hızı ve döküm sıcaklığı ile daha yoğun şekilde görüldüğü sonucuna ulaşılmıştır. Bu çalışmada da ulaşılan döküm hızı göz önünde bulundurulduğunda meydana gelen çekme boşluğunun kabul edilebilir düzeyde olduğu değerlendirilmektedir.

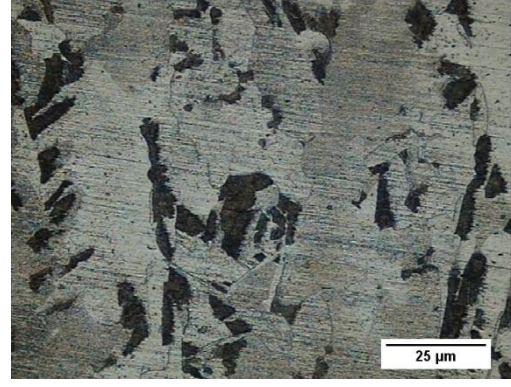
9.6. Mikro Dağlama Sonuçları

Deneyisel çalışmalar sonrasında alınan kesit numunelerinin farklı bölgelerinden kesilen parçalar %2 nital çözeltisi ile dağlanarak mikro yapı bakımından incelenmiştir. Yapılan incelemede farklı noktalardaki tane boyutları ve faz yapılarının izlenmesi hedeflenmiştir.

Şekil 9.25, Şekil 9.26 ve Şekil 9.27’de da Kalite C bileşimine sahip 3,5 m/dk döküm hızı ile üretilmiş kütük kesitinin farklı bölgelerinden alınan numunelerden alınan iç yapılar görülmektedir.

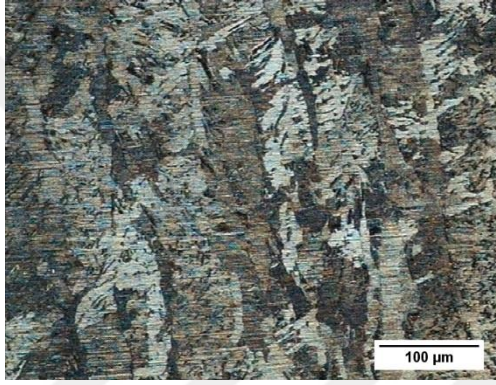


(a)

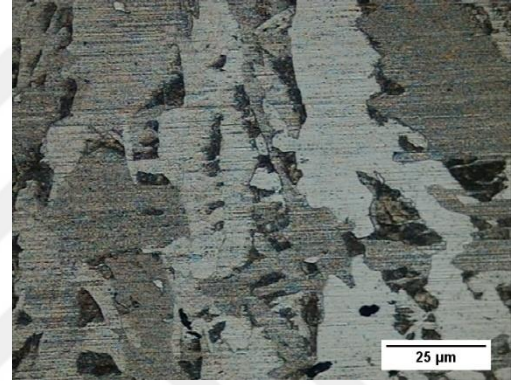


(b)

Şekil 9.25. Kalite A bileşimine sahip 3,5 m/dk hızla dökülmüş kütük kesitinin kenara yakın bölgedeki içyapı görünümü (a) 50X (b) 200X

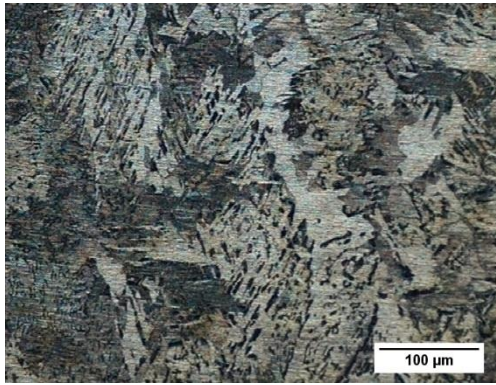


(a)

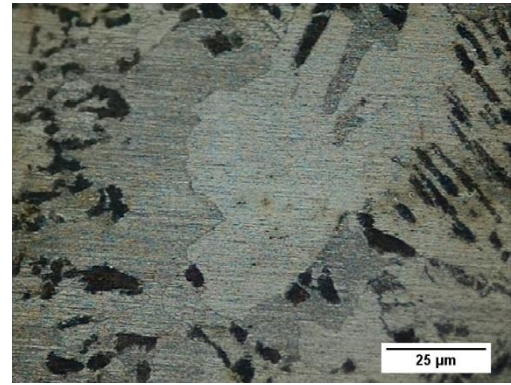


(b)

Şekil 9.26. Kalite A bileşimine sahip 3,5 m/dk hızla dökülmüş kütük kesitinin kenar ile merkez arasındaki bölgedeki iç yapı görünümü (a) 50X (b) 200X



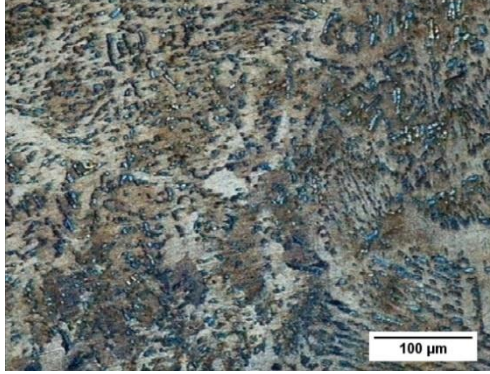
(a)



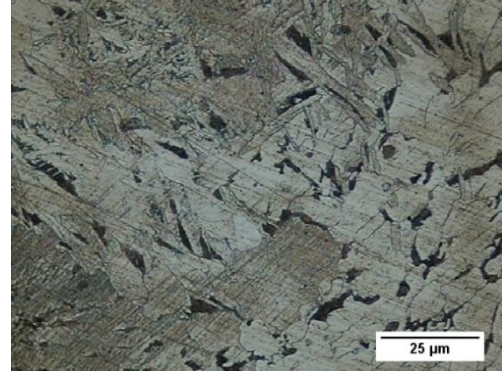
(b)

Şekil 9.27. Kalite A bileşimine sahip 3,5 m/dk hızla dökülmüş kütük kesitinin merkez bölgedeki makro dağılım görünümü (a) 50X (b) 200X

Şekil 9.28, Şekil 9.29 ve Şekil 9.30'da Kalite C bileşimine sahip 3,5 ve 4,0 m/dk döküm hızı ile üretilmiş kütük kesitlerinin farklı bölgelerinden alınan numunelerden alınan iç yapılar görülmektedir.

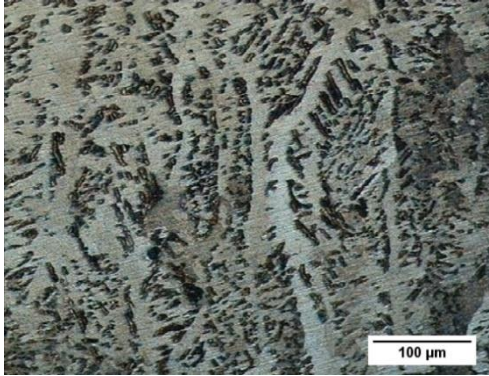


(a)

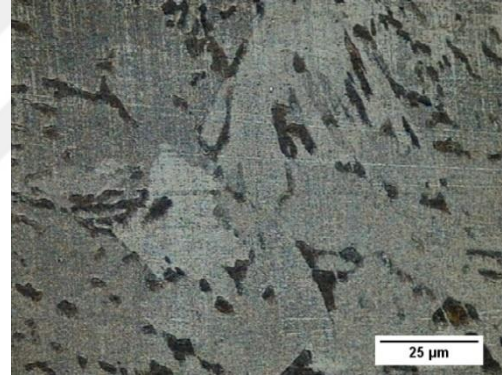


(b)

Şekil 9.28. Kalite A bileşimine sahip 4,0 m/dk hızla dökülmüş kütük kesitinin kenara yakın bölgedeki içyapı görünümü (a) 50X (b) 200X

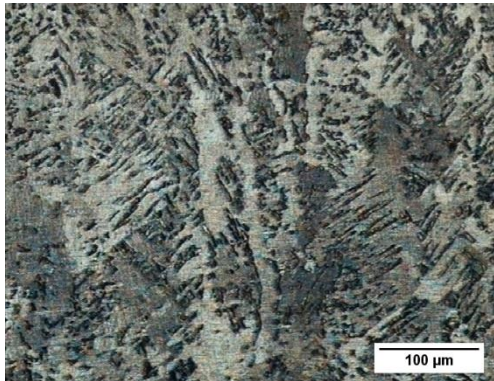


(a)

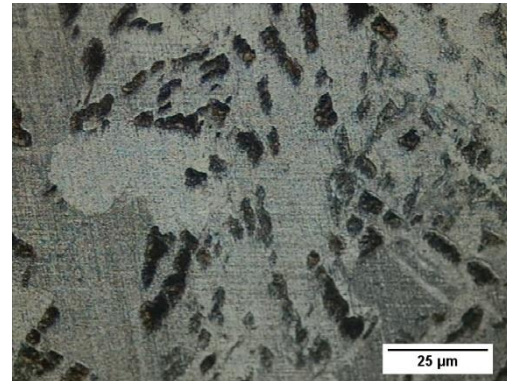


(b)

Şekil 9.29. Kalite A bileşimine sahip 4,0 m/dk hızla dökülmüş kütük kesitinin kenar ile merkez arasındaki bölgedeki iç yapı görünümü (a) 50X (b) 200X



(a)



(b)

Şekil 9.30. Kalite A bileşimine sahip 4,0 m/dk hızla dökülmüş kütük kesitinin merkez bölgedeki makro dağılım görünümü (a) 50X (b) 200X

Yapılan mikro incelemede tane boyutlarının merkeze doğru daha iri hale geldiği ve artan karbon oranı ile birlikte ferritik faz oranının azaldığı görölmüşür.



10. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışma kapsamında hurdadan çelik üretimi yapılan bir tesiste döküm kapasitesinin arttırılması ve son ürün kalitesinin iyileştirilmesine yönelik olarak sürekli döküm sürecinde birincil ve ikincil soğutma ile ilgili iyileştirme çalışmaları yapılmıştır. Yapılan iyileştirme çalışmalarının sonuçları üretilen kütüklerden alınan kesit numuneleri incelenerek irdelenmiştir.

Birincil soğutma ile ilgili yapılan çalışmalarda Kalıp-1 ve Kalıp-2 olmak üzere iki farklı kalıp denenmiştir. Kalıp-2 için döküm şartlarına ve üretilen çelik türlerine göre belirlenen koniklik ve köşe yarıçapı ölçüleri olumlu sonuçlar vermiştir. Kalıp-2 ile yapılan deneysel çalışmalarda eş zamanlı olarak ikincil soğutma bölgesindeki soğutma dağılımında değişiklik yapılmıştır.

Kalıp-2 ve ikincil soğutma bölgesindeki yeni soğutma dağılımı ile kütük döküm makinesindeki yol kayıplarında %90 oranında düşüş sağlanmıştır. Yapılan iyileştirme çalışmaları yol kayıplarının azaltılmasının yanında 4,0 m/dk döküm hızı ile daha önceki duruma kıyasla %16 civarında üretkenlik artışı sağlanarak döküm yapılmasını mümkün hale getirmiştir. Kütük üretiminde 150x150 mm ölçütte ulaşılan hız kuramsal olarak ulaşılabilir döküm hızı sınırına yakındır. Daha yüksek döküm hızlarına ulaşılabilmesi için kalıp boyunun arttırılması, daha fazla salınım sağlanacak şartların oluşturulması ve ikincil soğutma bölgesinde mekanik olarak kütüğün desteklenmesi gerekir.

Artan üretkenlik ve döküm hızı ile birlikte ürün kalitesinde şekil kusurları bakımından iyileşme sağlandığı görülmüştür. Yapılan görsel incelemeler, sertlik ölçümleri, makro ve mikro dağlamalar iyileştirmeler sonrası kapasite artışının yanında daha iyi ürün kalitesinin elde edildiğini ortaya koymaktadır.

Üretim ve ürün kalitesi ile birlikte kalıp ömrünün arttırılması çalışmalarda elde edilen bir diğer önemli sonuç olmuştur. Daha önce 400 döküm olan ortalama kalıp ömrü yapılan iyileştirmeler sonrasında 650 döküme ulaşmıştır. Ceket ve kalıp çıkışındaki rölelerdeki iyileştirme çalışmaları kalıp ömrünün arttırılmasında etkili olmuştur.

Deneysel çalışmalar kapsamında Kalıp-1 ile yapılan üretimlerin istenilen sonucu verememesi nedeniyle kütük döküm makinesinde üretkenlik artışının sağlanması ve şekil kusuru ile ilgili sorunların çözülmesi için birincil ve ikincil soğutma çalışmalarının birlikte ele alınması gerektiği sonucuna ulaşılmıştır. Köşe basıklığı sorununun üretilen kalite ve döküm hızına göre kullanılan kalıp konikliğinin ve köşe yarıçapı ölçüsünün uygun olmamasından kaynaklandığı görülmüştür. İkincil soğutma bölgesindeki soğutma şiddeti dağılımının yüksek döküm hızlarına ulaşmada etkili olduğu düşünülmektedir.

Alınan numuneler üzerinde yapılan incelemelerde beklendiği kenar bölgelerden merkeze doğru tane boyutlarında büyüklük ve yönlenme bakımından farklılaşma olduğu görülmüştür. Yapılan sertlik ölçümlerinde kenardaki rastgele ince tane boyutlarından merkezdeki eş eksenli iri tane boyutuna doğru meydana gelen değişiklik nedeniyle sertlik değerlerinde düşüş olduğu görülmüştür.

KAYNAKLAR

- Agarwal, K. P., Case study of spray design for a continuous billet caster, University of British Columbia, Yüksek Lisans Tezi, 114, 1979.
- AIST, Technology roadmap research program for the steel industry, Washington, 2011.
- Amitan V., Kravtsov V., Sheludchnko V., Mass N., Birukov A., Kabanets A., Development of optimal inner mould shape for high capacity billet continuous casting machines, Metal 2005, 1-7, Hradec nad Moravicí, Çek Cumhuriyeti, 24-26 Mayıs 2005.
- ASTM E10-18: Standard test method for Brinell Hardness of metallic materials, USA 2018.
- ASTM E340-5: Standard practice for macroetching metals and alloys, ASTM International, USA, 2015.
- Barella, S., Gruttadauria, A., Mapelli, C., Mombelli, D., Investigation of failure and damages on a continuous casting copper mould, Engineering Failure Analysis, 36, 432-438, 2014.
- Bower, T. F., Flemings, M. C., Formation of the chill zone in ingot solidification, Transactions of the Metallurgical Society of AIME, 239, 216-219, 1967.
- Brimacombe, J.K., Agarwal, P.K., Hibbins, S., Prabhaker, B., Spray cooling in the continuous casting of steel, (Editors: Brimacombe, J.K., Samarasekera, I.V., Lait J.E.), Continuous Casting Volume Two - Heat Flow, Solidification and Crack Formation, Iron and Steel Society of AIME, Warrendale, ABD, 109-122, 1984.
- Burden, M. H., Funnell, G.D., Whitaker, A. G., Young, J. M., Solidification and casting conference proceedings, The Metals Society, 1977.
- Bureau of International Recycling Ferrous Division, World steel recycling in figures 2013-2017, Brussels, 2018.
- Burgo, J.A., The manufacture of pig iron in the blast furnace, (Editor: Wakelin, D. H.), The Making Shaping and Treating of Steel: Ironmaking Volume, The AISE Steel Foundation, USA, 1999.
- Callister W. D., Retwisch D.G., Materials science and engineering. John Wiley & Sons Inc., USA, 2011.

- Chaudhuri, S., Singh R. K., Patwari, K., Majumdar, S., Ray, A. K., Singh, A. K. P., Neogi, N., Design and implementation of an automated secondary cooling system for the continuous casting of billets, *ISA Transactions*, 49(1), 121-129, 2010.
- Cheung, N., Garcia, A., The use of a heuristic search technique for the optimization of quality of steel billets produced by continuous casting, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 14 (2), 229-238, 2001.
- Cheung, N., Santos, C.A., Spim, J.A., Garcia, A., Application of a heuristic search technique for the improvement of spray zones cooling conditions in continuously cast steel billets, *Applied Mathematical Modelling*, 30 (1), 104-115, 2006.
- Chow, C., The effects of high speed casting on the mould heat transfer, billet solidification and mould taper design of continuously cast steel billets, *The University of British Columbia Department of Metals and Materials Engineering, Yüksek Lisans Tezi*, 164, 2001.
- Chow C., Samarasekera I.V., High speed continuous casting of steel billets part 1: general overview, *Ironmaking and Steelmaking*, 29(1), 53-60, 2002.
- Chow C., Samarasekera I.V., Walker B.N., Lockhart G., High speed continuous casting of steel billets part 2: Mould heat transfer and mould design. *Ironmaking and Steelmaking* 29(1), 61-69, 2002.
- Christian, J. M., The effects of the financial crisis on metals markets. CPM Group, 2009.
- Emi, T., Fredriksson, H., High-speed continuous casting of peritectic carbon steels, *Materials Science and Engineering A*, 413, 2005.
- Emi, T., Surface defects on continuously cast strands, (Editor: Cramb, A. W.), *The Making Shaping and Treating of Steel: Casting Volume*, The AISE Steel Foundation, USA, 2003.
- Florio B.J., Vynnycky M., Mitchell S.L., O'Brien S.B.G., On the interactive effects of mould taper and superheat on air gaps in continuous casting. *Acta Mechanica*, 228 (1), 2017.

- Fruehan R. J., Overview of steelmaking processes and their development, (Editor: Fruehan, R. J.), The Making Shaping and Treating of Steel: Steelmaking and Refining Volume, The AISE Steel Foundation, 1-12, USA, 1998.
- Fukada, N., Marukawa, K., Abe, K., Anda, Ta., Development of mold (HS-Mold) for high speed casting, Canadian Metallurgical Quarterly, 38 (5), 337-346, 1999.
- Gilles, H.L., Primary and secondary cooling control, (Editor: Cramb, A. W.), The Making Shaping and Treating of Steel: Casting Volume, The AISE Steel Foundation, Pittsburgh, USA, 2003.
- Heard, R., Kaell, N., Technological developments for high speed casting of sensitive steel grades, Canadian Metallurgical Quarterly, 38 (5), 331-335, 1999.
- Irving, W. R., Continuous casting of steel, The University Press, Great Britain, 1993.
- Jalali, P. N., Analysis of different continuous casting practices through numerical modelling, KTH Royal Institute of Technology Division of Applied Process Metallurgy, Yüksek Lisans Tezi, 25, 2013.
- Jonas, J.A.T., Electric furnace steelmaking, (Editor: Freuhan, R. J.), The Making Shaping and Treating of Steel: Steelmaking Volume, The AISE Steel Foundation, USA, 1998.
- Kittaka S., Uehara M., Sato T., Higashi H., High speed casting mold for billet caster (NS Hypermold), Nippon Steel Technical Report, No:82, Japan, 2000.
- Kumar, S., Meech, I., Smarasekera, I.V., Brimacombe, J.K., Knowledge engineering an expert system to trouble-shoot quality problems in the continuous casting of billets, IFAC Proceedings Volumes, 25 (17), 95-102, 1991.
- Li C., Thomas B.G., Ideal taper prediction for billet casting, ISSTech Steelmaking Conference, 685-701, Indianapolis-USA, 27-30, April 2003.
- Louhenkilpi, S., Continuous casting of steel, (Editor: Seetharaman, S.), Treatise on Process Metallurgy Industrial Processes, Elsevier, Oxford, UK, 2014.
- Mamuzic, I., Longauerova, M., Strkalj, A., The analysis of defects on continuous cast billets, Metallurgija, 44 (3), 2005.
- Mazumdar, S., Ray, S.K., Solidification control in continuous casting of steel, Sadhana, 26 (1-2), 179-198, 2001.
- Meng, Y., Thomas, B. G., Heat transfer and solidification model of continuous slab casting: CON1D, Metallurgical and Materials Transactions B, 34 (5), 685-705, 2003.

- Mizikar, E., Spray cooling investigation for continuous casting machines based of billets and blooms, *Iron and Steel Engineer*, 47 (6), 269-277-1970.
- Mizoguchi, S., Structural control of casting, (Editor: Cramb, A. W.), *The Making Shaping and Treating of Steel: Casting Volume*, The AISE Steel Foundation, Pittsburgh, USA, 2003.
- Moon, S. C., The peritectic phase transition and continuous casting practice, University of Wollongong Faculty of Engineering and Information Sciences, Doktora Tezi, Avustralya, 161, 2015.
- Muller, H., Jeschar, R., Untersuchung des warmeubergangs and einer simulierten sekundarkuhlzone beim stranggiessverfahren, *Arch Eisenhüttenwes*, 44, 1973.
- Muller, C. E., Precipitation during continuous casting, Technical University of Berlin Process Sciences, Doktora Tezi, Berlin, 130, 2015.
- OECD Directorate for Science Technology and Innovation Steel Committee, Recent developments in steelmaking capacity, 2018.
- Park, J.K., Thomas, B. G., Smarasekera, I.V., Analysis of thermomechanical behaviour in billet casting with different mould corner radius, *Ironmaking and Steelmaking*, 29 (5), 2002.
- Raudensky, M., Horsky, J., Secondary cooling in continuous casting and Leidenfrost temperature effects, *Ironmaking and Steelmaking*, 32 (2), 2005.
- Raudensky, M., Tseng, A. A., Horsky, J., Recent developments of water and mist spray cooling in continuous casting of steels, *Metallurgical Research & Technology*, 113 (5), 2016.
- Sahoo, P. P., Kumar, A., Halder, J., Raj, M., Optimisation of electromagnetic stirring in steel billet caster by using image processing technique for improvement in billet quality, *ISIJ International*, 47 (4), 2009.
- Samarasekera I.V., Brimacombe J.K., The continuous-casting mould, *International Metals Review*, 6, 286-300, 1978.
- Samarasekera I.V., Brimacombe J.K., Evolution or revolution? – A new era in billet casting. *Canadian Metallurgical Quarterly*, 38 (5), 347-362, 1999.
- Samarasekera I.V., Chow C., Continuous casting of steel billets, (Editor: Cramb, A. W.), *The Making Shaping and Treating of Steel: Casting Volume*, The AISE Steel Foundation, Pittsburgh, USA, 2003.

- Samarasekera I.V., Brimacombe J.K., The influence of mold behavior on the production of continuously cast steel billets, *Metallurgical Transactions B*, 13B (1), 105-116, 1982.
- Samarasekera I.V., Brimacombe J.K., Thermal and mechanical behaviour of continuous-casting billet moulds, (Editors: Brimacombe, J. K., Samarasekera, I. V., Lait, J.E.), *Continuous Casting Volume Two - Heat Flow, Solidification and Crack Growth*, The Iron and Steel Society of AIME, USA, 59-72, 1984.
- Santos, C.A., Garcia, A., Frick, R. C., Spim, J.A., Evaluation of heat transfer coefficients along the secondary cooling zones in the continuous casting of steel billets, *Inverse Problems in Science and Engineering*, 14 (6), 687-700, 2005.
- Sasaki, K., Sugitani, Y., Kawasaki, M., Heat transfer in spray cooling on hot surface, *Tetsu-to-Hagane*, 65 (1), 90-96, 1979.
- Shimada, M., Mitsutsuka, M., On heat transfer coefficient by forced water cooling to carbon steel, *Tetsu-to-Hagane*, 52, 1643-1650, 1966.
- Su, W., Wang, W., Luo, S., Jiang, D., Zhu, M., Heat transfer and central segregation of continuously cast high carbon steel billet, *Journal of Iron and Steel Research*, 21 (6), 2014.
- T.C Kalkınma Bakanlığı, Onuncu kalkınma planı 2014-2018 Demir Çelik Çalışma Grubu Raporu, Ankara-2014.
- “TÇÜD – Çelik Haritası” Erişim adresi: <http://celik.org.tr/harita/#!> Erişim Tarihi: 05.11.2018.
- Thomas, B. G., Samarasekera, I. V., Brimacombe, J.K., Mathematical model of the thermal processing of steel ingots: Part I Heat Flow Model, *Metallurgical and Materials Transactions B*, 18B (1), 119-130, 1987.
- Thomas B.G., Modeling of the continuous casting of steel—Past, present, and future, *Metallurgical and Materials Transactions B*, 33 (6), 795-812, 2002.
- Wang, T. M., Cai, S. W., Xy, J., Dy, Y.Y., Zhu, J., Xy, J.J., Li, T.J., Mould taper optimization for continuous casting steels by numerical simulation. *China Foundry*, 7 (1), 61-67, 2010.
- Wang, T. M., Cai, S. W., Xy, J., Dy, Y.Y., Zhu, J., Xy, J.J., Li, T.J., Continuous casting mould for square steel billet optimised by solidification shrinkage simulation. *Ironmaking & Steelmaking*, 37 (5), 341-346, 2010.

- Tupkary, R. H., Tupkary V. R., Modern steel making handbook, MLI Handbook Series, USA, 2018.
- Unamuno, I., Ciriza, J., Gotti, A., Ridolfi, M. R., Chown, A., Tscheuschner, C., Solimould: enhanced as-cast product quality by optimised mould taper design, European Commission Research Fund for Coal and Steel, Luxemburg, 2009.
- Wolf M.M., Historical Aspects and Key Technologies, (Editor: Cramb, A. W.), The Making Shaping and Treating of Steel: Casting Volume, The AISE Steel Foundation, Pittsburgh, USA, 2003.
- World Steel Association, World steel in figures 2018, Brussels Belgium, 2018.
- World Steel Association, White book of steel, Brussels Belgium, 2012.
- Xie Y. M., Yin, S.R., Three dimensional thermal stress analysis of mould during high speed casting of steel, J. Strain Analysis, 43 (7), 565–568, 2008.
- Xin, L., Yong, C., Houfa, S., Thermomechanical behaviour in continuous bloom casting with different mold tapers, Tsinghua Science and Technology, 13 (5), 2008.
- Yin R., Metallurgical Process Engineering, Metallurgical Industry Press, China, 2009.
- Zhang, J., Chen, D. F., Zhang, C. Q., Wang, S. G., Hwang, W. S., Han, M. R., Effects of an even secondary cooling mode on temperature and stress fields of round billet continuous casting steel, Journal of Materials Processing Technology, 222, 315-326, 2015.
- Zhu L.-G., Kumar R.V., Modelling of steel shrinkage and optimisation of mould taper for high speed continuous casting, Ironmaking and Steelmaking, 34(1), 76-82, 2007.

ÖZGEÇMİŞ

1. Adı Soyadı : Emin ÇELİK

2. Doğum Tarihi : 10.08.1989

3. Öğrenim Durumu : Lisans

Derece	Bölüm/Program	Okul/Üniversite	Bitirme Yılı
Lise	Fen Bilimleri	İstiklal Makzume Anadolu Listesi	2007
Lisans	Metalurji ve Malzeme Mühendisliği	Karadeniz Teknik Üniversitesi	2011

4. İş Tecrübesi:

Görev Unvanı	Görev Yeri	Yıl
Sürekli Dökümler İşletme Mühendisi	Tosçelik Profil ve Sac Endüstrisi A.Ş.	2012-2017
Satış Mühendisi	Vesuvius İstanbul Refrakter Tic. San. A.Ş.	2017-