



**İSKENDERUN TEKNİK**

**ÜNİVERSİTESİ**

**MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK  
LİSANS  
TEZİ**

**SÜREKLİ SLAB DÖKÜM PROSESİNDE  
DÖKÜM PARAMETRELERİNİN KALIP  
SÜRTÜNMESİNE ETKİSİNİN  
İNCELENMESİ**

**Hakan KAPUSUZ**

**MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ  
ANABİLİM DALI**

**MAYIS 2019**



**SÜREKLİ SLAB DÖKÜM PROSESİNDE DÖKÜM PARAMETRELERİNİN  
KALIP SÜRTÜNMESİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

**Hakan KAPUSUZ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MAYIS 2019**

Hakan KAPUSUZ tarafından hazırlanan "SÜREKLİ SLAB DÖKÜM PROSESİNDE DÖKÜM PARAMETRELERİNİN KALIP SÜRTÜNMESİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ" adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile İskenderun Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

**Danışman:** Prof. Dr. Selçuk MISTIKOĞLU

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, İskenderun Teknik Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum/~~onaylamıyorum~~.

**Başkan:** Prof. Dr. Hakan YAVUZ

Makine Teorisi ve Dinamiği Anabilim Dalı, Çukurova Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum/~~onaylamıyorum~~.

**Üye:** Dr. Öğr. Üyesi Ersin BAHÇECİ

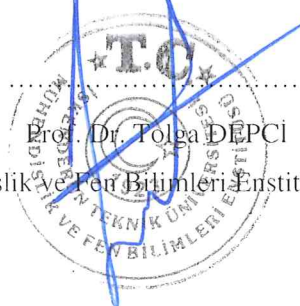
Metalürji ve Malzeme Mühendisliği, İskenderun Teknik Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum/~~onaylamıyorum~~.

Tez Savunma Tarihi: 29/05/2019

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

Prof. Dr. Tolga DEPCI  
Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

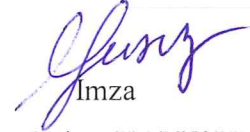


## ETİK BEYAN

İskenderun Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez üzerinde Yükseköğretim Kurulu tarafından hiçbir değişiklik yapılamayacağı için tezin bilgisayar ekranında görüntülendiğinde asıl nüsha ile aynı olması sorumluluğunun tarafıma ait olduğunu,
- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

  
İmza

Hakan KAPUSUZ

29/05/2019

SÜREKLİ SLAB DÖKÜM PROSESİNDE DÖKÜM PARAMETRELERİNİN KALIP  
SÜRTÜNMESİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ  
(Yüksek Lisans Tezi)

Hakan KAPUSUZ

İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Mayıs 2019

ÖZET

Bu çalışmada çeliğin sürekli slab döküm prosesinde kullanılan döküm parametrelerinin kalıp sürtünme kuvvetine olan etkilerinin incelenmesi amaçlanmıştır. Döküm parametrelerinin doğru ayarlanabilmesi için sürtünme kuvveti mekanizması ile döküm parametreleri arasındaki ilişkilerin bilinmesi gereklidir. Kalıp ile katılan kabuk arasında gerçekleşen sürtünme kuvvetinin diğer bir deyişle kalıp sürtünme mekanizmasının kontrolü; kalite, üretkenlik ve verim noktalarında işletmeler açısından çok önemli bir yere gelmektedir. Tez çalışması kapsamında osilasyon sehpasına yerleştirilen ivme ölçer ve osilasyon silindirlerinden gelen basınç verileri kullanılarak negatif ve pozitif sıyırma zamanlarındaki maksimal kalıp sürtünme kuvvetleri ölçülmüş ve yorumlanmıştır. Denemelerde özellikle döküm hızı ile sürtünme kuvveti arasında güçlü bir bağ olduğu bulunmuştur. Bununla birlikte döküm tozuna ait spesifik özelliklerin kalıp sürtünmesi üzerinde çok büyük etkisi olduğu anlaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler : Sürekli döküm, slab, kalıp sürtünmesi

Sayfa Adedi : 89

Danışman : Prof. Dr. Selçuk MISTIKOĞLU

ANALYSIS THE EFFECT OF CASTING PARAMETERS ON MOULD FRICTION IN  
CONTINUOUS SLAB CASTER

(M. Sc. Thesis)

Hakan KAPUSUZ

ISKENDERUN TECHNICAL UNIVERSITY  
ENGINEERING AND SCIENCE INSTITUTE

May 2019

ABSTRACT

In this study, it is aimed that analyzing the effect of casting parameters on mould friction in continuous steel slab caster on mould friction force. It is essential to know between the mould friction mechanism and casting parameters to set parameters properly. To set casting parameters The control of the friction force emerging from mould and solidifying shell interaction named mould friction is very important from the point of view of quality, productivity and yield for plant operators. Within the scope of the thesis, the maximal mold friction forces at negative and positive strip times were measured and interpreted by using the accelerometer and pressure data from oscillation cylinders placed on the oscillation table. It has been found that there is a strong relationship between the casting speed and friction force. Additionally it has been found that the specific properties of the casting powder have a great influence on the mould friction.

Key Words : Continuous casting, slab, mould friction

Page Number : 89

Supervisor : Prof. Dr. Selçuk MISTIKOĞLU

## TEŞEKKÜR

Yüksek Lisans tez konusunun belirlenmesinde, araştırılması ve yazımı sırasında sahip olduğu bilgi birikimi ve tecrübesi ile çalışmayı yönlendiren ve her türlü yardımı esirgemeyen danışmanım Prof. Dr. Selçuk MISTIKOĞLU' na ve ayrıca katkılarından dolayı Mehmet Ali GÜVENÇ' e saygı ve teşekkürlerimi sunarım. Öğrenim hayatım boyunca maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen kıymetli eşim Gamze KAPUSUZ ve kızım Defne KAPUSUZ' a teşekkür ederim. Çalışmalarım sırasında katkı ve desteklerini esirgemeyen değerli çalışma arkadaşım Elektrik ve Elektronik Mühendisi Hasan ERSEN' e çok teşekkür ederim. Ayrıca tüm deneysel çalışmaları yürütme imkânı bulduğum ve halen çalışmakta olduğum İskenderun Demir Çelik A.Ő' ye teşekkürlerimi sunarım.

## İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET .....	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER .....	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xiv
RESİMLERİN LİSTESİ.....	xvi
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xv
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Önceki Çalışmalar .....	4
2. SÜREKLİ SLAB DÖKÜM PROSESİ VE KALIP SÜRTÜNMESİ .....	15
2.1. Kalıp Sürtünme Mekanizması.....	23
2.1.1. Kuru Sürtünme.....	26
2.1.2. Akışkan Sürtünme (Sıvı Sürtünme).....	29
2.2. Slab Kalıp Sürtünme Mekanizması Kontrolü .....	32
2.3. Kalıp Sürtünmesi Mekanizması ve Döküm Parametreleri İlişkisi .....	36
2.3.1. Döküm Hızı.....	40
2.3.2. Döküm Tozunun Kalıp Sürtünmesine Etkisi .....	41
2.3.3. Salınım Karakteristiğinin Kalıp Sürtünmesine Etkisi.....	42
2.3.4. Çelik Kimyasal Analizinin Kalıp Sürtünmesine Etkisi .....	45
2.3.5. Kalıp Boyutsal Ölçülerinin Kalıp Sürtünmesine Etkisi.....	46
2.3.6. Sıvı Çelik Sıcaklığının Kalıp Sürtünmesine Etkisi.....	48
2.3.7. Kalıp Seviyesinin Kalıp Sürtünmesine Etkisi.....	49
2.3.8. Kalıp Tasarımın Kalıp Sürtünmesine Etkisi .....	50



	<b>Sayfa</b>
3. YÖNTEM .....	51
3.1. Yöntem .....	51
3.1.1. Negatif Sıyırma Süresindeki Maksimum Sürtünme Kuvveti .....	56
3.1.2. Pozitif Sıyırma Süresindeki Minimum Sürtünme .....	56
3.1.3. 1. Deney: Döküm Hızının Kalıp Sürtünmesine Etkisi .....	57
3.1.4. 2. Deney: Slab Kalıp Genişliğinin Kalıp Sürtünmesine Etkisi .....	57
3.1.5. 3. Deney: Döküm Tozu Değişiminin Kalıp Sürtünmesine Etkisi .....	58
3.1.6. 4. Deney: Kalıp Seviye Değişiminin Kalıp Sürtünmesine Etkisi .....	59
3.1.7. 5. Deney: Kalıp Osilasyon Strok Mesafesinin Kalıp Sürtünmesine Etkisi ..	60
4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA .....	61
5. SONUÇ VE ÖNERİLER .....	76
KAYNAKLAR .....	78
EKLER .....	83
ÖZGEÇMİŞ .....	88

## ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 1.1. 100 yıllık sürede sürekli döküm prosesindeki mihenk taşları .....	2
Çizelge 3.1. Slab döküm makinesi teknik özellikleri .....	54
Çizelge 3.2. Deneyde kullanılan sabit değişkenler .....	57
Çizelge 3.3. Deneyde kullanılan sabit değişkenler .....	58
Çizelge 3.4. Döküm tozu deneyinde kullanılan sabit değişkenler .....	58
Çizelge 3.5. Denemelerde kullanılan farklı tipte döküm tozlarına ait özellikler .....	59
Çizelge 3.6. Kalıp seviye oranı deneyinde kullanılan sabit değişkenler.....	59
Çizelge 3.7. Kalıp osilasyon strok mesafesi deneyinde kullanılan sabit değişkenler .....	60
Çizelge 4.1. Tanımlayıcı istatistik verileri .....	65
Çizelge 4.2. Kalıp seviye oranı değişimine oluşan sürtünme kuvveti değerlerinin tanımlayıcı istatistik verileri .....	71

## ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1.1. Kalıp sürtünme dengesi .....	14
Şekil 2.1. H. Bessemer'e ait potada a)çelik yapımı ve b)sürekli döküm çizimleri [1]....	15
Şekil 2.2 Sürekli Döküm Makinesi yandan görünüm [2] .....	17
Şekil 2.3. Sürekli Döküm Ürünleri Kesit Görünümleri [2] .....	19
Şekil 2.4. Sürekli slab döküm prosesinde çeliğin kalıp bölgesindeki temsili çizimi [48] .....	24
Şekil 2.5. Zamana bağlı statik ve dinamik sürtünme kuvveti [51] .....	26
Şekil 2.6. Sürtünme mekanizması sırasındaki kayma ve yapışma fazları [52].....	27
Şekil 2.7 Farklı özellikte yüzey profilleri: a) çıkıntılı yüzey profili, b) normal yüzey profili [50] .....	28
Şekil 2.8. Stribeck eğrisine göre 4 farklı yağlama bölgesi [54].....	30
Şekil 2.9 Tipik bir rulman yatağında Stribeck eğrisine göre karşılan 3 rejim: a) akışkan yağlama, b) karışık yağlama ve c) sınır yağlaması durumlarını göstermektedir [56] .....	32
Şekil 2.10. Akışkan içerisindeki T kayma gerilmesi [55].....	34
Şekil 2.11. Katılaştıran slab kabuğu ve kabuk arasında oluşan yağlama bölgeleri [42] ....	35
Şekil 2.12. Halliday tarafından ortaya konan negatif sıyırma kavramı [60].....	37
Şekil 2.13. Menisküsün katılma evreleri: a) normal durum b) menisküs katılması c) taşma durumu [61] .....	38
Şekil 2.14. Döküm tozu ve yağın kalıp sürtünmesi yönüyle karşılaştırılması-kütük döküm [62].....	39
Şekil 2.15. Negatif ve pozitif sıyırma zamanına bağlı döküm tozu tüketimi [64] .....	44
Şekil 2.16. Kalıbın aşağı ve yukarı yönlü bir çevrim hareketi sırasında oluşturduğu negatif ( $t_N$ ) sıyırma zamanı .....	45
Şekil 2.17. Slab kalıp ölçüleri ve dar yüzey konikliği [6] .....	47
Şekil 2.18. Sıvı çelik sıcaklığının kalıp sürtünme kuvvetine etkisi [17].....	48
Şekil 3.1. Osilasyon silindirine ait a) şematik çizim ve b) resim .....	52

Şekil 3.2. Hidrolik silindirden gelen basınç verileri .....	53
Şekil 3.3. Sinüsoidal hareket eden kalıbın bir çevrim süresi içindeki negatif ve pozitif sıyırma zamanlarındaki sürtünme kuvvetleri [6] .....	56
Şekil 4.1. Döküm hızının maksimum sürtünme kuvvetine ( $t_N$ negatif sıyırma süresi boyunca) etkisi .....	66
Şekil 4.2. Döküm hızının minimum sürtünme kuvvetine ( $t_P$ pozitif sıyırma süresi boyunca) etkisi .....	66
Şekil 4.3. Slab genişliğinin maksimum sürtünme kuvvetine ( $t_N$ negatif sıyırma süresi boyunca) etkisi .....	68
Şekil 4.4. Slab genişliğinin minimum sürtünme kuvvetine ( $t_P$ pozitif sıyırma süresi boyunca) etkisi .....	69
Şekil 4.5. Döküm tozunun maksimum sürtünme kuvvetine ( $t_N$ negatif sıyırma süresi boyunca) etkisi .....	70
Şekil 4.6. Döküm tozunun minimum sürtünme kuvveti'ne ( $t_P$ pozitif sıyırma süresi boyunca) etkisi .....	70
Şekil 4.7. Kalıp seviyesinin maksimum sürtünme kuvvetine ( $t_N$ negatif sıyırma süresi boyunca) etkisi .....	72
Şekil 4.8. Kalıp seviyesinin minimum sürtünme kuvveti'ne ( $t_P$ pozitif sıyırma süresi boyunca) etkisi .....	72
Şekil 4.9. Kalıp strok mesafesinin maksimum sürtünme kuvveti'ne ( $t_N$ Negatif Sıyırma Süresi boyunca) etkisi .....	74
Şekil 4.10. Kalıp strok mesafesinin minimum sürtünme kuvveti'ne ( $t_P$ pozitif sıyırma süresi boyunca) etkisi .....	74
Şekil 4.11. Maksimum sürtünme kuvvetinin ( $t_N$ negatif sıyırma süresi boyunca) strok mesafesine göre değişimi .....	84

**RESİMLERİN LİSTESİ**

<b>Resim</b>	<b>Sayfa</b>
Resim 2.1. Allegheny Ludlum tesisinde sürekli çelik döküm: a) çizim ve b) döküm kotu görünümü [3] .....	16
Resim 2.2. Slab yırtılması sonrası geriye kalan içi boşalmış slab kovani .....	20
Resim 2.3. Sürekli döküm prosesinde slab kalıbı ve menisküs bölgesi [5].....	21
Resim 3.1. Tipik bir ivmeölçer ve elemanları [66].....	51
Resim 3.2. Çalışmada kullanılan ivmeölçerin a) dış ve b) iç görünümleri .....	52
Resim 4.1. Zor koşullara maruz kalan a) ivmeölçer ve b) basınç ölçüm sensörleri .....	62
Resim 4.2. İvmeölçeri koruyucu paslanmaz çelik kutu .....	62
Resim 4.3. Yeni tip koruyucu kutular ve montaj aşaması .....	63
Resim 4.4. Çalışma bölgesinden uzaklaştırılan basınç sensörleri.....	63

## SİMGELER VE KISALTMALAR

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

<b>Simgeler</b>	<b>Açıklamalar</b>
<b>F</b>	Sürtünme kuvveti
<b>F<sub>Statik</sub></b>	Statik sürtünme kuvveti
<b>F<sub>Kinetik</sub></b>	Kinetik sürtünme kuvveti
<b>F<sub>k</sub></b>	Kuru sürtünme kuvveti
<b>μ</b>	Sürtünme katsayısı
<b>μ<sub>s</sub></b>	Statik sürtünme katsayısı
<b>μ<sub>k</sub></b>	Kinetik sürtünme katsayısı
<b>W</b>	Uygulanan yük
<b>P<sub>ortam</sub></b>	Ortam basıncı
<b>Pa</b>	Pascal
<b>λ</b>	Yağlama oranı
<b>h<sub>0</sub></b>	Sıvı film kalınlığı
<b>R<sub>q</sub></b>	Birleşik ortama yüzey pürüzlülüğü
<b>T</b>	Kayma gerilmesi
<b>dV</b>	Akışkan içindeki hız değişimi
<b>dh</b>	Akışkanın tabakaları arasındaki mesafe değişimi
<b>Pa.s</b>	Pascal. Saniye
<b>cP</b>	Santipuz
<b>°C</b>	Santigrat derece
<b>F<sub>s</sub></b>	Akışkan sürtünme kuvveti
<b>A</b>	Yüzey alanı
<b>m<sup>2</sup></b>	Metre kare
<b>η</b>	Viskozite
<b>V<sub>k</sub></b>	Slab döküm kalıp osilasyon hızı
<b>V<sub>d</sub></b>	Döküm hızı
<b>m/dk</b>	metre/dakika
<b>d<sub>s</sub></b>	Sıvı döküm tozu kalınlığı

**Simgeler****Açıklamalar**

<b>H</b>	Sıvı çeliğin kalıp içindeki ferromstatik basıncı
<b>t<sub>N</sub></b>	Negatif sıyırma zamanı
<b>t<sub>P</sub></b>	Pozitif sıyırma zamanı
<b>t<sub>toplam</sub></b>	Kalıbın 1 çevrim süresi
<b>f</b>	Kalıp salınım frekansı
<b>h</b>	Kalıp strok mesafesi
<b>dk<sup>-1</sup></b>	1 dakikadaki sayı
<b>t</b>	Süre
<b>sn</b>	Saniye
<b>a</b>	Modifikasyon oranı
<b>mm</b>	Milimetre
<b>P<sub>1</sub></b>	Silindir giriş basıncı
<b>P<sub>2</sub></b>	Silindir çıkış basıncı
<b>A<sub>1</sub></b>	Silindir giriş piston yüzey alanı
<b>A<sub>2</sub></b>	Silindir çıkış piston yüzey alanı
<b>x</b>	Piston hareket mesafesi
<b>F<sub>silindir</sub></b>	Silindirin uyguladığı net kuvvet
<b>Bar</b>	Bar basınç birimi
<b>m</b>	Kütle
<b>a</b>	Kalıba ait ivme
<b>ΣF</b>	Kalıbı hareket ettiren toplam kuvvet
<b>R<sup>2</sup></b>	Regresyon analizinde bağımlı değişkeni ölçme gücü
<b>Q1</b>	Veri setindeki ilk çeyrek değeri
<b>Q3</b>	Veri setindeki üçüncü çeyrek değeri

<b>Simgeler</b>	<b>Açıklamalar</b>
<b>C</b>	Karbon
<b>Mn</b>	Mangan
<b>F<sub>N</sub></b>	Negatif sıyırmadaki en büyük sürtünme kuvvetini
<b>F<sub>P</sub></b>	Pozitif sıyırmadaki en büyük sürtünme kuvvetini
<b>δ</b>	Demirin yüksek sıcaklıktaki allotropu

<b>Kısaltmalar</b>	<b>Açıklamalar</b>
<b>OECD</b>	Ekonomik Kalkınma ve İşbirliği Örgütü
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	Alüminyum oksit
<b>TOC</b>	Kalıp üst genişliği
<b>BOC</b>	Kalıp alt genişliği
<b>Csp</b>	Dar yüzey miller arası mesafe
<b>SEN</b>	Daldırma nozulu
<b>Co60</b>	Kobalt 60 izotopu
<b>PLC</b>	Programlanabilir Mantıksal Denetleyici



## 1. GİRİŞ

Metalin döküm ile katılaştırılması insanoğlu için önemli bir dönüm noktası olmuş ve medeniyetin şekillenmesinde önemli rol oynamıştır. Görece kararsız haldeki sıvı çeliğin kararlı katıya dönüşümü sürecinde insanoğlu gerek silah yapımında gerek süs eşyası yapımında büyük heyecan yaşamıştır. 20. yüzyıl ortalarında ingot şeklinde yapılan döküm sonraki proseslere gönderilmek için büyük enerjiler harcanmasına sebep olmakta idi. Enerji kaybını azaltmak için çalışmalar sürekli olarak devam etmiştir. İlk sürekli döküm patenti çizimleri 1840'lara kadar uzansa da ticarileşmesi için bazı teknolojik gelişmelere ihtiyaç duyuluyordu.

1856 kitlesel çelik üretimi için devrim olmuştur. Henry Bessemer potada çelik yapımını keşfetmiş ve bununla birlikte çelik üretimi yoğunluk kazanmıştır [1]. Sürekli döküm, seri üretim gerçekleştirmek adına sıvı çeliğin endüstrileştirilmiş katılaştırma yöntemidir. Sürekli döküm prosesi diğer katılaştırma proseslerine göre yüksek yatırım maliyeti gerektiren ancak düşük işletim maliyetine sahip bir metottur. Başlangıçta yalnızca pirinç gibi demir dışı metallerin sürekli dökümü gerçekleştirildi. Sürekli döküm getirdiği avantajların yanı sıra birçok problemi de beraberinde getirdi. Daha yüksek sıvı metal sıcaklığı, katı içerisindeki daha düşük termal difüzyon oranı, görece daha yavaş katılma oranı bunlardan yalnızca bazılarıydı. Tüm bunlara rağmen bazı ilerlemeler kaydedildi ve II. Dünya Savaşı sonrası dönemde ticari olarak yapılabilirliği kanıtlandı yani ilk tasarımıdan neredeyse 1 yüzyıl sonra [2].

Çelik için ilk deneysel uygulamalar ilk defa Amerika Birleşik Devletlerinde yapılmıştır. Örneğin ilk deneme 1946 yılında Babcock&Wilcox tesisi Pensilvanya eyaletinde yapılmıştır. Hemen sonra diğer pilot uygulama Allegheny Ludlum tesisi Newyork eyaletinde yapılmıştır [3].

Tüm bu gelişmelere rağmen ilk ticari kullanım Kanada da Atlas Steel Ltd. tesisinde gerçekleşmiştir. Amerika'da ki ilk ticari kullanıma geçilmesi için bir 9 yıl daha beklenmesi gerekti. Virjinya eyaletinde ki Roanoke Electric Steel Corp. tesisinde 1962'de ilk ticari uygulamaya geçilmiştir. 1960'lı yılların sonuna doğru bazik oksijen fırınlarındaki gelişmelere paralel, sürekli döküm yöntemi gelişmiş ülkelerde ingot dökümünün yerini almaya başlamıştır. Bu durum Amerika'da biraz gecikmeli olmuştur. Bunda en büyük rolü

ülkede hali hazırda yoğun olarak bulunan maliyetli ingot döküm tesisleridir. Dünya genelinde şu an için toplam çelik üretimi içindeki payı %90 seviyelerindedir. 1970'lerde bu değer % 4 civarında olduğu kabul edilmektedir [1].

İngot döküme kıyasla sürekli döküm daha az enerji tüketimine olanak sağlar. Bunun dışında daha yüksek verim, daha iyi ürün kalitesi ve daha fazla ürün elde edilmesi diğer avantajlarıdır. Zaman içerisinde farklı kesitlerde üretim olanakları oluşmuştur. Kütük, slab, blum, profil bunlardan en bilinenleridir [2]. Sms Siemag, Danieli ve Primetals dünyada pazara hakim durumdaki üretici firmalardır. Tesislerin yatırım maliyeti tesisin kapasite ve teknolojik özelliklerine göre 200 milyon dolar seviyelerine kadar çıkabilmektedir.

Her bir yarı mamul üretimi için gerekli olan teknoloji farklı olmakla birlikte temel prensip aynıdır. Teknolojik gelişmeye paralel ana hedef yarı mamul üretmekten nihai mamul üretmeye kaymaktadır. Günümüzde doğrudan şerit üretimi sınırlı oranda gerçekleşmektedir.

Çok dar kesitlerden çok geniş kesitlere yarı mamul denilen malzemeler sürekli döküm yoluyla üretilmektedir. Buda nihai ürüne ulaşmak için daha az enerji sarf edilmesi anlamına gelmektedir. Bununla birlikte son yıllara kadar yarı mamul üretilmekteyken bilim ve teknolojiye paralel nihai döküm proseslerinin ticarileşmesi tüm dünyanın gündemindedir ve bu konuyla ilgili sınırlı sayıda bazı ticari uygulamalar bile yapılmaktadır.

Çalışan personel sayısındaki azalma, daha az ekipman ihtiyacı, daha az bakım ihtiyacı, daha az yardımcı malzeme tüketimi, enerji tasarrufu, daha az emisyon nihai ürün dökme yolunda itici kuvvetlerdir.

Sürekli Dökümün ilk taslaklarından ilk ticari uygulamasına kadar geçen 100 yıllık sürede bazı patentler önemli mihenk taşı olmuştur (Çizelge 1.1.) [1].

Çizelge 1.1. 100 yıllık sürede sürekli döküm prosesindeki mihenk taşları

Yıl	Mucit	Buluş
1856	Bessemer	İkiz Tambur şerit dökümü(deneme)
1856	Bessemer	Stoperli tandış, açık uçlu kalıp

Çizelge 1.1. (Devam) 100 yıllık sürede sürekli döküm prosesindeki mihenk taşları

1858	Goeransson	Stoperli pota
1859	Bessemer	Pota taretı (kule)
1885	Lewis	Pota sürgü sistemi(tasarım)
1886	Atha	Kuklalı dikey tip kütük döküm makinesi
1889	Daelan	Kesme sistemli dikey kütük döküm makinesi (tasarım)
1915	Rowley	Bükmeli ve doğrultmalı tip kütük döküm makinesi
1921	Van Ranst	Kalıp osilasyonu (tasarımı)
1933	Junghans	Kalıp osilasyonu ve daldırma tüpü
1936	Junghans	Çevrimiçi ebat değişimi (deneme)
1938	Junghans/Rossi	Tandış ısıtma, cüruf tutma, ikincil soğutma sistemi
1939	Williams	Slab döküm için role destek sistemi
1944	Bardin	Büyük blum ve slab döküm için kalıp plakası
1947	Harter	Monitör ile kalıp faaliyeti yürütme ve otomatik kalıp seviye kontrolü
1947	Rossi	İnce slab dökümü için huni kalıp (tasarım)
1949	Junghans	Kalıp içerisinde elektromanyetik karıştırma
1950	Tarquinee	Çevrimiçi ebat değişim özellikli yüksek üretim kapasiteli döküm makinesi

Sürekli döküm prosesinde ilk gelişmelerde özellikle verimi artıracak çelikler üzerinde yoğunlaşıldığı görülmektedir. Ayrıca düşük pota kapasiteleri düşük miktardaki ürün çıktısıyla daha uyumluydu. Kabul edilebilir yüzey kalitesine sahip kaynar çeliğin sürekli döküm yöntemi ile üretimi için birçok başarısız girişim gerçekleşti. Bu yüzden erken dönem slab üretimi yalnızca Mn/Si ile öldürülmüş çelik kaliteleri ile sınırlı kaldı. Çeliğin Alüminyumla öldürülmesi ve yüzey kalitesindeki gelişmelerle birlikte daha geniş slab üretiminin önü açıldı. Bu anlamda çelik rafinasyonu ve ikincil metalürji alanındaki gelişmeler sürekli döküm makinelerinde hem üretkenliği hem de ürün kalitesini olumlu yönde etkilemiş oldu. Çelik üretim tarafındaki gelişmelerle birlikte sürekli döküm makinelerinde de teknolojik gelişmeler yaşanıyor. Zaman içerisinde farklı özellikte farklı ihtiyaçlara cevap veren birçok döküm makinesi kurulmuştur. Dünya genelinde kurulan sürekli döküm tesisleri birbirinden yapısal olarak farklılık göstermektedir [4]. Kurucu firmalar kurulan ve işleme alınan her tesisle birlikte yeni tecrübeler elde etmekte ve bir sonraki tesiste bu tecrübeler ışığında iyileşme yoluna gitmektedir. Rulman tipinden,

kullanılan gres yağı çeşidine kadar hemen hemen her ekipmanda ve işletme pratiklerinde benzer yola başvurulmaktadır.

Bunlardan dikey makineler kısıtlı boyları nedeni ile üretim miktarını sınırlıyordu ya da yatay tasarımlı makinelerde kalıp içindeki aşırı sürtünmeden kaynaklı döküm hızı sınırlanıyordu. Bunun yanında her bir makine tipi meydana çıkardığı ürünü kalite yönüyle de etkiliyordu. Bundan sonraki tüm konular çelik ve çeliğin sürekli dökümü hakkında bilgiler içerecektir. Okuyucunun bunu göz önünde bulundurması önemlidir.

Teknolojik gelişmelere paralel sürekli döküm prosesinde de iyileşmeler yaşanmıştır. Hareketli kalıbın icadıyla birlikte kalıbın döküm prosesinin kalbi olduğu bir kere daha anlaşılmıştır. Kalıbın osilasyon hareketi sırasında hareketli slab arasında oluşan sürtünme kuvvetinin kontrolü prosesin kontrolü için büyük öneme sahip olduğu anlaşılmıştır.

### **1.1. Önceki Çalışmalar**

Sürekli döküm prosesi sırasında kalıp ve katılaşmakta olan yüzey arasında meydana gelen sürtünme mekanizması özelinde ilgili bir takım çalışmalar önceki dönemlerde yapılmıştır. Geçmiş dönemde farklı araştırmacılar tarafından yapılan sürekli döküm prosesinde kalıp sürtünmesine etki mekanizması odağındaki çalışmalar aşağıda belirtilmiştir:

Mills, Fox, Thackray ve Li (2004) “The Performance and Properties of Mould Fluxes” adlı çalışmada döküm tozunun fiziksel ve kimyasal yapısının sürekli döküm prosesine ve kalıp sürtünmesine olan etkisini ele almışlardır [7].

Thomas (2005) “Modeling of Continuous Casting Defects Related to Mold Fluid Flow” adlı çalışmada kalıp içerisindeki sıvı çeliğin akışını modelleyip ilk katılaşmanın ve yüzey kusurlarının oluşumunu açıklayan çalışma yapmıştır [8].

Cobelli, Grundy ve Feldhaus (2011) “Fast Casting Of 150sq Billets – Boost Of Productivity” adlı çalışmada 5 kanallı 150 mm. kare kesitte üretim yapan bir sürekli döküm tesisinde üretim hızını artırmak için yapılan değişimleri kalıp sürtünmesi kavramını içerecek şekilde ele alan çalışma yapmıştır [9].

Wang, Wang ve Yao (2013) “Online Measurement For Transient Mold Friction Based On The Hydraulic Oscillators Of Continuous-Casting Mold” adlı çalışmada hidrolik olarak çalışan slab döküm tesisindeki durum ele alınmıştır. Deneysel çalışmada osilasyon silindirinden elde edilen basınç değişimlerine bağlı sürtünme kuvveti hesaplanmış ve buna bağlı çevrimiçi çalışan model geliştirilmiştir [10].

Zhang ve Wang (2016) “Study of Solidification and Heat Transfer Behavior of Mold Flux Through Mold Flux Heat Transfer Simulator Technique: Part I. Development of the Technique” adlı çalışma iki bölümlük bir çalışma olup sürekli slab döküm tesisi kalıbı deneysel olarak simüle edilmiştir. Çalışmanın devamında ilk katılaşma ve yağlayıcı konumundaki ergimiş sıvı döküm tozuna ait film tabakası detaylı olarak ele alınmıştır [11].

Zhang ve diğerleri (2016) “Mold Simulator Study of the Initial Solidification of Molten Steel in Continuous Casting Mold: Part 11. Effects of Mold Oscillation and Mold Level Fluctuation” adlı çalışma bir önceki çalışmanın ikinci kısmı olup sürekli döküm kalıbı simüle edilmiş kalıp seviye oynaması, osilasyon frekansı ve hareket mesafesinin sıvı döküm tozu üzerindeki etkisini de içine alan deneysel bir çalışma yapmıştır [12].

Ma, Wang, Zang, Yao, Zhang ve Ye (2008) “Mould Oscillation Monitoring With Hydraulic Oscillators In Slab Continuous Casting” adlı çalışmada sürekli slab döküm kalıbının yaptığı osilasyon hareketinin kalite ve proses güvenliği açısından önemini açıklanmışlardır. Slab kalıbına osilasyon hareketi yaptıran hidrolik silindirlerdeki pistonun yer değiştirmesi ve hidrolik kuvvet ölçülmüştür. Elde edilen sinyallerle kalıbın yaptığı hareketi yüksek çözünürlükle modellemişlerdir. Çalışmanın devamında kalıbı 2 taraftan hareket ettiren silindirlerin uyguladığı kuvvetlerin farklı olduğu bunun ise nedeninin geometrik merkez ile kütle merkezi arasındaki farktan oluştuğunu belirtmişlerdir [13].

Jeursen ve Mijnaerds (1993) “Speed Control Of A Continuous Casting Machine Using A Street Of Coupled Dc-Motors At Hoogovens Ijmuiden” adlı çalışmada slabı hareket ettiren tahrikli motorlardaki senkronizasyon bozukluğunun slabın döküm hızına olan etkisi ele alınmış ve çözüm önerilerini içeren çalışma yapılmıştır [14].

Qin, Zhu ve Zheng (2010) “Study Of The Forecasting Of Molten Steel Breakouts Based On The Frictional Force Between Mould And Slab Shell” adlı çalışmada hidrolik olarak

çalışan bir slab döküm tesisi kalıbında silindirden gelen basınç değerleri ve silindir pozisyonları kullanılarak kalıp sürtünmesi hesaplanmıştır. Makalenin devamında elde edilen sürtünme değerinin boyuna yüzey çatlağı ve slab yırtılması sırasındaki değişimi incelenmiştir [15].

Wang, Si ve Zhao (2011) "Application of Adaptive Wavelet Thresholding Algorithm in Mould Friction Signal Denoising" adlı çalışmada kalıp sürtünmesini esas alan slab yırtılma ikaz sistemi anlatılmıştır. Sürtünme sinyalindeki gürültünün, modelin başarısını etkilediği belirtilmiş ve gürültü azaltan yeni bir model sunulmuştur [16].

Sahoo ve Basu, "Use of Artificial Neural Network to Determine the Effect of Different Casting Parameters on Mould Friction in a Continuous Slab Caster" adlı çalışmada kalıp sürtünmesine etki eden belirli parametreler incelenmiştir. Daha sonra elde edilen sürtünme değeri ve bağımsız değişken konumundaki parametreler yapay sinir ağı ile modellenmiştir [17].

Tirian ve Pinca (2009) "Applications of Neural Networks in Continuous Casting" adlı çalışmada kalıp içerisinde 48 adet sensörden gelen sıcaklıklar yapay sinir ağı yöntemi kullanılarak modellenmiştir. ıktı olarak slab yüzeyinde çatlak olup olmaması seçilmiştir. Yapay sinir ağı eğitildikten sonra veri seti ile test edilmiş ve çok yüksek başarı elde edilmiştir [18].

Meng ve Thomas (2003) "Interfacial Friction-Related Phenomena in Continuous Casting with Mold Slags" adlı çalışmada sıvı döküm tozu ve katı döküm tozunuda içerecek şekilde 3 ayrı model sonlu farklar metoduyla kurulmuştur. 3 model de gerçek saha verileriyle kıyaslanmış ve başarılı bulunmuştur. Modelde sıvı ve katı formdaki döküm tozunun yağlama, sürtünme ısı transferine olan etkileri detaylı olarak verilmiştir [19].

Xinyang, Xudong, Yong, Man, Li ve Shihong. (2007) "The Shell Surface Force Caused by Mould Friction during Slab Continuous Casting" adlı çalışmada kalıp sürtünmesindeki periyodik dalgalanmaların sebebini araştırmışlardır. Döküm boyunca, döküm hızı değişimlerinde ve osilasyon şeklinin değişmesindeki kalıp sürtünme davranışı incelenmiştir [20].

Wang, Zhang, Yao, Ma ve Zhang (2014) “Effect Of Casting Process On Mould Friction During Wide, Thick Slab Continuous Casting” adlı çalışmada döküm sıcaklığı, slab genişliği, kalıp seviyesi, çelik kalitesi, döküm tozu, osilasyon şeklinin kalıp sürtünmesi üzerine olan etkisi geniş ve kalıp slab üretimi sırasında deneysel çalışmalarla incelemişlerdir. Çalışmada hidrolik silindirle hareket eden kalıptan gelen basınç sensörleri kullanılmıştır [21].

Wang, Yao, Du, Fang, Zhang ve Chen (2007) ”Online Measurement and Application of Mould Friction in Continuous Slab Casting” adlı çalışmada kalıp sürtünmesi kalıbı hareket ettiren elektrik motorlarının çektiği güç yarımı ile hesaplamışlardır. Elde edilen değeri slab yırtılması ve yüzey çatlağı öncesi davranışı incelemek üzere kullanmışlardır. Çalışmanın devamında yapay sinir ağı kurulmuş erken uyarı sistemi kurulmuştur [22].

Ma ve diğerleri (2010) “Mould Lubrication and Friction Behaviour with Hydraulic Oscillators in Slab Continuous Casting” adlı çalışmada döküm sırasında kalıpla katılaştıran yüzey arasındaki yağlamanın çevrimiçi izlemek için model yapmışlardır. Kalıbı hareket ettiren silindirlere gelen basınç ve pozisyon değerlerini kullanarak kalıp sürtünmesini hesaplamışlardır. Çalışmanın devamında osilasyon şeklinin ve döküm hızının kalıp sürtünmesine olan etkisi incelenmiştir. Ayrıca sistemin slab yırtılma ikaz sistemi olarak ta kullanılabileceği sonucuna varmışlardır [23].

Ma ve diğerleri (2009) “Experiment and Analysis of Transient Mould Friction with Hydraulic Oscillators for Slab Continuous Casting” adlı çalışmada kalıp sürtünmesini hidrolik silindirlere gelen basınç verilerini kullanarak çevrimiçi çalışan bir sistem elde etmişlerdir. Çalışmanın devamında periyodik kalıp sürtünmesini ve osilasyon şeklinin kalıp sürtünmesine olan etkisini incelemişlerdir [24].

Ma ve diğerleri (2008) “Experimental Research on Effect of Control Model on Lubrication for Slab Continuous Casting Mould” adlı çalışmada döküm hızını yükseltmenin döküm tozu tüketimini azalttığını, bununla kalıpla katılaştıran çelik yüzeyi arasındaki yağlamayı azalttığını belirtmişlerdir. Çalışmanın devamında yağlama seviyesinin çevrimiçi izlenmesi için kalıp sürtünmesini hesaplamışlardır. Döküm hızındaki değişimlerin kalıp sürtünmesine olan etkisi ortaya konulmuş ve kalıbın bir çevrimdeki kalıp sürtünme mekanizmasını incelenmiştir [25].

Ridal, Morris, Normanton ve Scholes (2007) “Effect Of Melting, Refining and Casting on Product Quality and Properties” adlı konferans raporunda çelik yapım süreci, sürekli döküm süreci ve pazar durumu hakkında bilgi vermişlerdir. Sürekli döküm prosesi noktasında boyuna yüzey çatlağının kalıp içi sürtünme ile bağlantılı olduğunu belirtmişlerdir [26].

Araki ve Ikeda (1999) “Optimization of Mold Oscillation for High Speed Casting — New Criteria for Mold Oscillation” adlı çalışmada kalıp ve katılaşılan çelik yüzey arasında yeterli ve homojen bir yağlamanın yüksek döküm hızı için önemli olduğunu belirtmişlerdir. Çalışmada kalıp içi yağlamada döküm tozu tüketimine etki eden osilasyon parametrelerini incelemişler ve deneysel çalışma yürütülmüştür. Sonuç kısmında en uygun yağlama koşullarının elde edilmesi için yağlama indeksi matematiksel olarak ortaya konulmuştur [27].

Langer, Jelali ve Bennani (2005) “Extension Of Advanced Monitoring And Control Techniques At Continuous Casting Process” adlı çalışmada çok geniş kapsamlı bir çalışmayı farklı ülkelerden katılımcılarla yürütmüşlerdir. Çalışmanın ana amacını sürekli döküm prosesinin sürekliliği garanti altına almak ve kaliteyi artırmak olarak belirtmişlerdir. Çalışmada farklı tesislerde deneysel çalışmalar yürütülmüş ve tesisteki operatöre makineleri işletme ve kalite noktasında karar vermede yardımcı olacak kalıptan gelen gerçek zamanlı verilerle çevrimiçi çalışan sistem kurulmuş ve sonuçları paylaşılmıştır. Kalıp konikliği, döküm hızı, osilasyon özellikleri ve kalıp ömrü çevrim içi izlemeye alınmıştır [28].

Valigi ve Antonelli (2001) “Influence of an Inadequate Lubrication in the Mould and a Proposal of a Sticking Detection System” adlı çalışmadan yağlayıcı konumundaki döküm tozunun önemini anlatmışlardır. Kalıp ve katılaşılan çelik yüzey arasında yetersiz yağlamanın kalıp içerisindeki sürtünme dengesini bozduğunu bunun sonucunda yapışma tipi kütük yırtılmasının tetiklendiği sonucuna varmışlardır. Çalışmanın devamında kalıp içerisinden gelen sıcaklık verileri yapay sinir ağları kullanılarak kütük yırtılmasını engellemek için erken uyarı sistemi olarak kullanılmıştır [29].

Hebi, Man, Huiying ve Dacheng (2006) “3D Stress Model with Friction in and of Mould for Round Billet Continuous Casting” adlı çalışmada yuvarlak kütük üretiminde kalıp içi



sürtünmeyi matematiksel olarak 3 boyutlu modellemişlerdir. Çalışma kalıp içi sürtünme ve yağlama noktasında birçok veri sağlamıştır. Araştırmacılar çalışma sonucunda kalıp ve katılaşılan yüzey arasındaki; temas durumunun, yağlayıcı film tabakasının kalınlığının, hava boşluğunun, kalıp konikliğinin, kalıp deformasyonunun kalıp içinden gelen sıcaklık verileri ile izlenebildiğini ortaya koymuşlardır. Ayrıca kalıp üst bölgelerindeki sıvı yağlamadan kaynaklı sürtünmenin katılaşılan kabuk üzerinde, kalıp alt bölgelerinde katı-katı temasından kaynaklı sürtünmenin ise kabuk üzerinde önemli derecede etki ettiğini sonucuna varmışlardır [30].

Fornasier, Lena ve Vecchiet (2014) “Q-Map: A New Advanced System For Mould Phenomena Detection And Analysis” adlı çalışmada slab döküm prosesinde çevrimiçi çalışan model geliştirmişlerdir. Modelin slab yırtılma ikaz sistemi boyuna yüzey çatlağı, kalıp içi yağlama-sürtünme durumu ve kalite noktasında uyarı, alarm ve bilgi verebildiği deneysel verilerle gösterilmiştir. Model görsel bir arayüze sahip olup Danieli firması tarafından Q-Map olarak isimlendirilmiştir [31].

Faries, Rawson, Rose ve Bugdol (1991) “Mould Coatings For Continuously Cast Billet Production” adlı çalışmada 140 mm. kare kesit sürekli kütük üretim tesisinde kullanılan farklı tüp kalıp kaplamalarının kalite üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Çalışmanın bir bölümünde kalıp içerisindeki sürtünme ve yağlama koşullarının incelenmesi için ivmeölçerler kullanılarak kalıp ve katılaşılan yüzey arasındaki sürtünme ölçülmüş ve farklı tip kaplamaların değerlendirilmesi yapılmıştır [32].

Blazek ve Saucedo (1990) “Characterization of the Formation, Propagation, and Recovery of Sticker/Hanger Type Breakouts” adlı çalışmada kütük döküm prosesinde meydana gelen yapışma tipi ve askı tipi yırtılmanın gelişimini ve ilerlemesini anlatmışlardır. Yırtılmanın sebebi yüksek döküm hızı, ani döküm hızı değişimi, ani kalıp seviyesi değişimi ve kalıpla katılaşılan yüzey arasındaki yetersiz yağlama olarak gösterilmiştir. Kalıp içi sürtünmenin çevrim içi olarak izlenmesinin etkisiz olduğu bunun yerine bakır kalıp yüzeyindeki sıcaklık değişimlerini izlemenin daha kullanışlı olduğunu belirtmişlerdir. Çalışmalarını deneysel verilerle desteklemişlerdir [33].

Yao, Li ve Fang (2015) “Motion Stability Analysis Of Non-Sinusoidal Oscillation Of Mold Driven By Servomotor” adlı çalışmada non-sinüsoidal hareket kabiliyeti olan bir

kalıp tanıtımını yapmışlardır. Normal sinüs eğrisi dışında osilasyon hareketi kabiliyet olan kalıbın bir çevrim içinde gerçekleştirdiği hareketin hızlanma ve yer değiştirme karakteri incelenmiş ve matematiksel olarak ortaya konmuştur. Geleneksel sinüs eğrisi ile hareket eden kalıplara göre non-sinüsoidal şekilde osilasyon hareketi yapan kalıpların daha üstün performans sergilediği sonucuna varmışlardır [34].

Wang, Yao, I. Zhang, X. Zhang ve Chen (2013) “Optimization of Oscillation Model for Slab Continuous Casting Mould Based on Mould Friction Measurements in Plant Trial” adlı çalışmada slab üretimi prosesinde kalıp ile katılaşılan yüzey arasındaki yağlama ve sürtünmenin kalıbın hareket özelliği olan osilasyon şekline bağımlı olduğu ortaya koymuşlardır. Çalışmanın devamında non sinüsoidal dahil farklı osilasyon şekilleri ile denemeler yürütülmüş ve kalıp sürtünmesi temel alınarak optimum döküm tozu tüketimini meydana getiren parametreler belirlenmiştir [35].

Mills ve Däcker (2017) “The Casting Powders Book” adlı çalışmada döküm tozunun sürekli döküm prosesine olan etkisini ele almışlardır. Döküm tozunun üretim aşaması, kimyasal ve fiziksel yapısı detaylı olarak anlatılmıştır. Daha sonra döküm tozunun sürekli döküm prosesi sırasındaki eriyip katılaşılan kabuk ile kalıp arasından sızarak inmesi teorik ve deneysel olarak ele alınmıştır. Çalışmanın devamında kalıp ve katılaşılan yüzey arasında beklenen düzeyde bir yağlama ve sürtünme sağlanması için gerekli döküm parametreleri teorik ve deneysel verilere dayanarak belirlenmiştir [36].

Ma, Peng, Gui ve Wang (2015) “Transient Mould Friction Based on the Wavelet Theory” adlı çalışmada slab kalıbı ve katılaşılan yüzey arasındaki etkileşimden kaynaklı sürtünme değerini farklı üretim koşullarında zaman bazlı ölçüp kayıt altına almışlardır. Daha sonra elde edilen zaman bazlı kalıp sürtünme sinyalini zaman frekans ekseninde incelemişlerdir. Farklı döküm hızı ve osilasyon şartlarında kalıp sürtünmesine ait değişimleri incelemişlerdir. Dalgacık dönüşümü ile incelenen kalıp sürtünmesi sinyalinin slab yırtılması gibi anormal durumlardan önce değişime girdiğini gösterilmişlerdir [37].

Yong, Wang, Peng, Gui ve Bohan (2016) “Analysis of Mold Friction in a Continuous Casting Using Wavelet Entropy” adlı çalışmada ileri sinyal işleme yöntemleri ile kalıp sürtünmesi verisi işlenmiştir. Çalışmada dalgacık dönüşümü ve sinyal entropisi bir araya getirilmiş olup kalıp sürtünmesi sinyaline uygulanmıştır. Slab yırtılması gibi anormal

döküm koşullarında sinyalin düzensizliğine bağlı elde edilen kalıp sürtünmesi değerinin ön uyarı verdiği deneysel çalışmalarla ortaya konulmuştur [38].

Ma, Fang, Ding ve Wang (2018) “Analysis of Mold Friction in a Continuous Casting Using Wavelet Transform” adlı çalışmada kalıp sürtünmesinin kalıpla katılaşılan yüzey arasındaki yağlama durumunu gösteren önemli bir parametre olduğu belirtilmiştir. Çalışmada slab döküm kalıbından elde edilen kalıp sürtünmesi değeri sürekli ve ayırık dalgacık dönüşümü ile zaman-frekans ekseninde incelenmiştir. Slab yırtılması, daldırma nozulu kopması, ani hız değişimi, osilasyon şeklinin değişmesi gibi anormal döküm şartları oluşması durumunda ayırık dönüşümle analiz edilen kalıp sürtünmesi sinyalinin erken uyarı verdiğini göstermişlerdir [39].

Ma ve diğerleri (2008) “Investigations on the Transient Mould Friction Force in Slab Continuous Casting based on Fast Fourier Transformation” adlı çalışmada slab döküm prosesinde kalıpla katılaşılan yüzey arasındaki sürtünme büyüklüğü kalıbı hareket ettiren hidrolik silindirlere gelen basınç değerini kullanarak ölçmüşlerdir. Hem döküm varken elde edilen değer hemde döküm yokken boşta salınım yapan kalıba ait sürtünme değerleri ölçülmüştür. Elde edilen sinyal FFT dönüşümüne alınmış ve sonuçları incelenmiştir. Çalışmada kalıp ve katılaşılan yüzey arasındaki yağlama koşulları frekans ekseninde incelenmiştir. Slab yırtılması öncesi kalıp sürtünme sinyali frekans ekseninde bazı değişimler gösterdiği bulunmuştur [40].

Suzuki, Mizukami, Kitagawa, Kawakami, Uchida ve Komatsu (1991) “Development of a New Mold Oscillation Mode for High-speed Continuous Casting of Steel Slabs” adlı çalışmada slab döküm makinelerinde yüksek döküm hızlarında kalıp sürtünmesinin artmasına bağlı slab yırtılması meydana geldiğini belirtmiş ve sürtünmeyi azaltacak osilasyon şeklini belirlemişlerdir. Çalışmada slab kalıbının döküm sırasında geleneksel sinüs eğrisi ile 1 çevrim içindeki hareket özelliği incelenmiş ve kalıp sürtünmesi formülize edilmiştir. NKK Fukuyama adlı tesiste gerçekleştirilen deneysel çalışmada non sinüsoidal eğri ile hareket eden kalıp kullanılmış ve kalıp sürtünmesinin azaldığını ispat etmişlerdir. Çalışmanın sonuç kısmında slabın yüzey kalitesinde herhangi bir değişim gözlenmediği ilave edilmiştir [41].

Wang, Kong, Du, Liu, Zang ve Yao (2014) “Prediction on Lubrication and Friction of Mold Flux Based on Inverse Problem in a Continuous Slab Casting Process” adlı çalışmada slab kalıbı içerisindeki yağlamanın ve katılaşmanın dolaylı yoldan anlaşılabilmesi için matematiksel bir çerçeveye oturttukları deneysel çalışma yürütmüşlerdir. Çalışmada kalıp yüzeyinden ısıt çiftler sayesinde gelen sıcaklık bilgileri kullanılarak kalıp ve katılaştıran yüzey arasındaki bölgesel ısıl haritayı çıkarmışlardır. Elde edilen harita ile kalıp içerisindeki yağlamanın hangi seviyede olduğunu ve sıvı çeliğin katılma istikrarını ortaya koymuşlardır [42].

Itoyama, Washio, Nishikawa, Yamanaka, Tanaka ve Fujii (1988) “Reduction of Friction Force in Mold and Prevention of Sticking Type Breakout for High Speed Continuous Casting of Slabs” adlı çalışmada slab kalıbı ve katılaştıran yüzey arasındaki kalıp sürtünmesini yük hücresi kullanarak ölçülmüşlerdir. Elde edilen kalıp sürtünmesi sinyalini kullanarak en uygun döküm tozu ve osilasyon şeklini belirlemişlerdir [43].

Stephens, Seher, Link, Sormann, Ridolfi, Vito ve diğerleri (2009) “Castdesmon: Improvement, Control And Prediction Of Cast And Rolled Product Quality By The Development Of An Understanding Of How The Casting Machine Design And Condition Affects Solidification And The Development And Application Of Novel Engineering Monitoring Techniques” adlı çalışmada çok uluslu bir proje yürütülmüştür. Farklı ülkelerden katılımcılar, farklı tesislerde sürekli döküm prosesi odağında teorik verilerle desteklenen deneysel bir çalışma yürütülmüştür. Araştırma sırasında farklı tesislerdeki kalıplardan veri alıp karşılaştırmak için kalıplara sensör yerleştirmiş ve sonuçlar incelenmiştir. Döküm hızı, kalıp seviyesi, kalıp konikliği, kalite gibi sürekli döküm parametrelerinin kalıp sürtünmesi, kalite ve proses üzerindeki etkilerini araştırmışlardır [44].

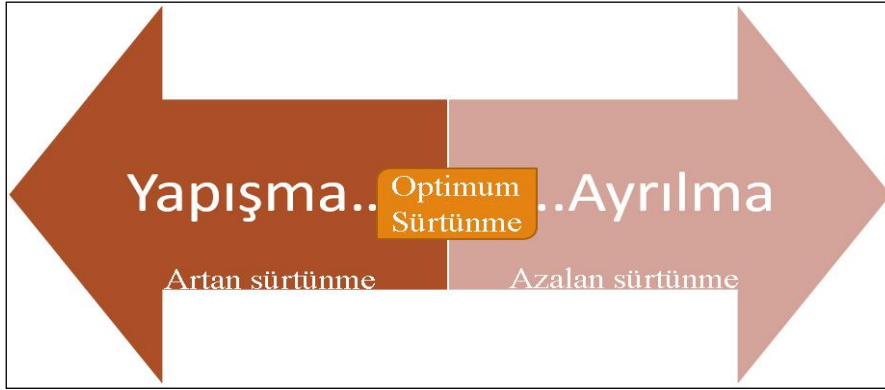
Ma, Wang, Fang ve Gui (2016) “Discussion and Analysis on Measurement Methods for Mould Friction During High Efficiency Continuous Casting” adlı çalışmada 2 ayrı kalıp sürtünmesi elde etme yöntemini karşılaştırmışlardır. Birinci metotta slab üretimi sırasında kalıbın hareket için yaptığı işi baz alırken diğerinde kalıbı hareket ettiren hidrolik silindirlere gelen basınç değerlerini kullanmışlardır. Çalışmanın devamında döküm hızı değişimi sırasında her 2 yöntemi kullanarak elde edilen sonuçları kıyaslamışlardır [45].

Deng, Zhang, Wang ve Q. Wang (2018) “Study of Mold Oscillation Parameters and Modes on Slag Lubrication in Slab Continuous Casting” adlı çalışmada slab kalıbı ile katılan yüzey arasında en uygun yağlama koşullarını sağlayan osilasyon şeklini seçmek için bir model kurmuşlardır. Model çok fazlı olup yağlayıcı madde konumundaki sıvı döküm tozunun osilasyon hareketi sırasında kalıpla katılan yüzey arasına girmesini kurgulamaktadır. Çalışmanın devamında en uygun yağlama durumu için optimum osilasyon koşullarının belirlenmiştir. Değerlendirme aşamasında kalıpla katılan yüzey arasına sızan sıvı döküm tozu kalınlığı, döküm tozu tüketimi miktarı ve menisküs seviyesindeki ısı transferi dikkate alınmıştır [46].

Yang, Meng ve Zhu (2013) “Experimental Study on Mold Flux Lubrication for Continuous Casting” adlı çalışmada araştırmacılar kalıpla katılan yüzey arasındaki yağlayıcı maddenin osilasyon hareketi sırasındaki davranışını incelemek için bir düzenek kurmuşlardır. Çalışmada belirli özelliklerde yağ kullanılmıştır. Non sinusoidal hareket dâhil farklı osilasyon şekilleri sırasında yağın kenarlardan sızma davranışını incelemişlerdir. Sızmanın en fazla iki negatif sıyırma zamanı arasında kalan zaman diliminde gerçekleştiği sonucuna varmışlardır [47].

Günümüzde verim ve kalitedeki sürekli artış beklentisi yeni teknolojilerin, insan müdahalesinden çok otomatize edilmiş dar toleransla çalışan çevrimiçi sistemlerin geliştirilmesini zorunlu kılmaktadır. Slab üretim prosesinde makinenin kalbi olarak nitelendirilen bakır kalıplar kalıp sürtünmesinin meydana geldiği yer olarak tanımlanmaktadır.

Sürtünmenin kontrol edilmesi tesisin sürekliliği, kalite ve verim için son derece önemlidir. Bu verimin sürekli takip edilmesi daralan günümüz pazarında önemli bir faktör olarak kendini öne çıkarmaktadır. Çalışmanın sayısal verilere dayanması onu daha güvenilir ve bilimsel yapmaktadır. Slab döküm tesisinin işletilmesi noktasında ihtiyaç duyduğu birçok döküm parametresi olduğu düşünüldüğünde bunların kalıp sürtünmesi üzerindeki etkisinin bilinmesi gündeme gelmektedir. Daha az sürtünme her zaman tercih noktası olsa da optimum noktayı yakalamak konusunda işler zorlaşmaktadır. Şekil 1.1’de optimum sürtünme koşulları ve verilmiştir.



Şekil 1.1. Kalıp sürtünme dengesi

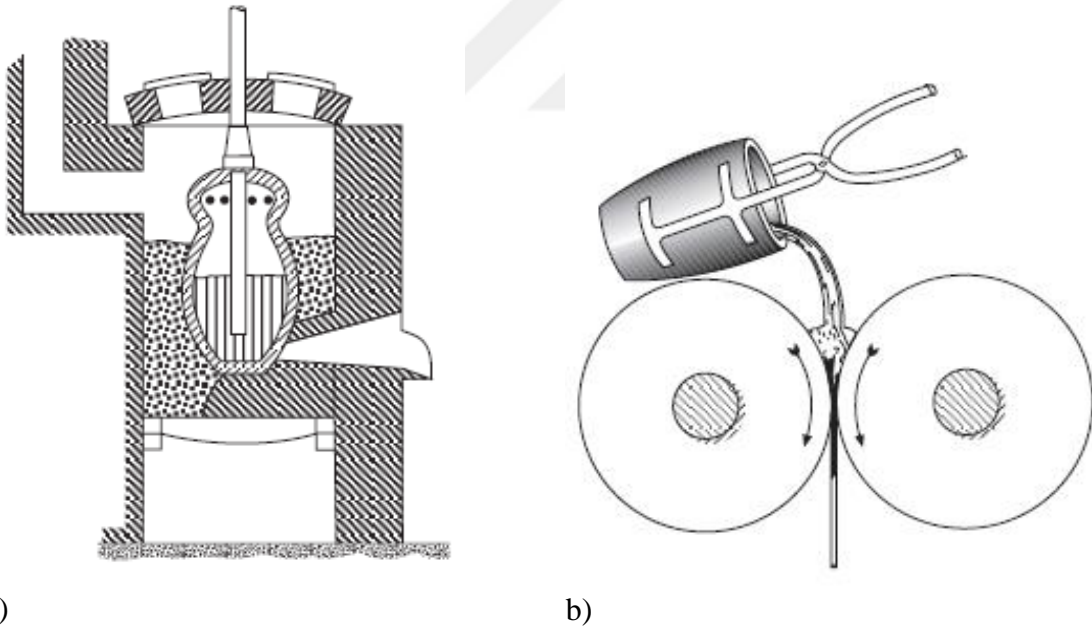
Yeni çelik kalitelerinin dökümü, yeni döküm tozlarının piyasaya girmesi kalıp içerisindeki dengeleri değiştireceğinden bunlara uygun döküm hızların yeniden ayarlanması vb. bir konu iç içe girmektedir. Bu iç içe girmiş durumda kalıp sürtünmesinin izlenmesi karar verme noktasında işletmelere katkı sağlamaktadır. Yanlış döküm parametresi seçiminde en kötü senaryoda slab yırtılması meydana gelebilmekte ve neticesinde katılaşmış ilk kabuk içerisindeki sıvı çelik makine içerisine kontrolsüzce akmakta ve geriye yalnızca katılaşmış ilk kabuk kalmaktadır.

Önceki çalışmalardan da görüleceği üzere çalışmalar genellikle kalıp sürtünmesinin elde edilme yöntemi üzerine yoğunlaşmış ve sonrasında sınırlı sayıda döküm parametresi incelenmiştir. Özellikle kalıbı hareket ettiren hidrolik silindirlere gelen basınç bilgisi kullanılmış ve akabinde döküm hızı ve osilasyon şeklini belirleyen faktörler özelinde çalışılmıştır. Bu tez çalışmasını diğer çalışmalardan farklı kılan çeliğin sürekli slab döküm prosesinde kalıpla katılaştıran yüzey arasında meydana gelen sürtünmeye etki eden olası tüm döküm parametrelerinin sebepleri ile birlikte detaylandırılması, kalıp sürtünmesinin elde edilme yönteminin farklılığı ve tasarlanan deneysel çalışmalara ait verilerin Minitab® 18.1 istatistiksel veri analizi programı kullanılarak incelenmesidir. Daha önceki çalışmaların büyük kısmı yalnızca tek bir ortalama sürtünme değeri üzerinden yapılırken mevcut çalışmadan kalıbın bir çevrim içindeki negatif ve pozitif sıyırma zamanlarında oluşan sürtünme kuvvetleri dikkate alınmıştır.

## 2. SÜREKLİ SLAB DÖKÜM PROSESİ VE KALIP SÜRTÜNMESİ

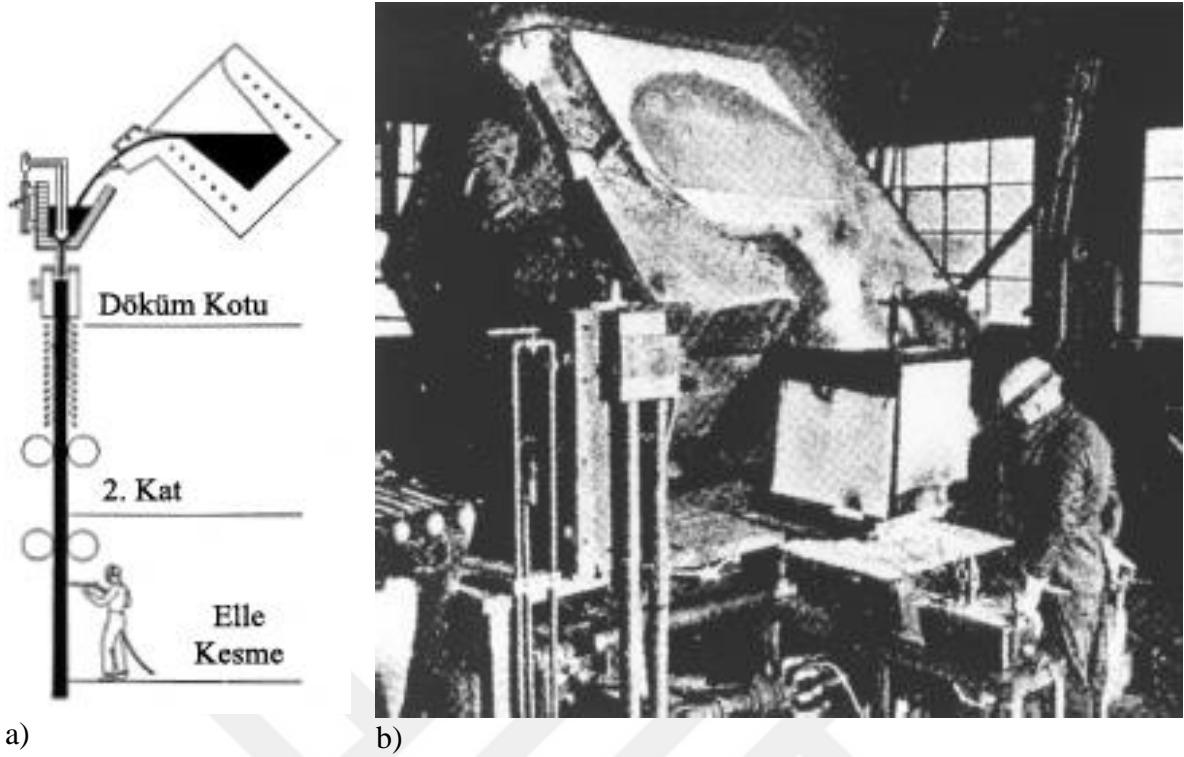
Sürekli döküm prosesinin gelişmesi tarihsel olarak gelişmesi noktasında ana problemlerden bir tanesi sıvı çeliğin sıcaklık kontrolüydü. Bu durum özellikle küçük kapasiteli potalarda veya uzun döküm sürelerine sahip sürekli döküm makinelerinde ön plana çıkmaktadır. Erken dönem sürekli döküm makineleri doğrudan fırından besleniyordu ve bu durum büyük ölçekli üretim için uygun değildi.

İlk sürekli döküm patenti çizimleri (Şekil 2.1.) 1840'lara kadar uzansa da ticarileşmesi için bazı teknolojik gelişmelere ihtiyaç duyuluyordu. Bessemer'in ilk taslak çizimlerinde sürekli döküm prosesi 2 tambur arasında sıvı madenin dökülmesi şeklinde tasvir edilmiştir. Burada tambur soğutucu bir kalıp görevi görmekte ve aşağıdan katılmış malzemenin çıkması gösterilmektedir. Tamburlar sürekli olarak dönerek akan madenin aşağı yönde belirli bir hızda ilerlemesini sağlamaktadır.



Şekil 2.1. H. Bessemer'e ait potada a) çelik yapımı ve b) sürekli döküm çizimleri [1]

İngot dökümden sürekli döküm prosesine geçiş için uzunca bir süre beklenmesi gerekti. Bessemer'in ilk çizimlerinden neredeyse 100 yıllık bir beklemeden sonra ilk sürekli döküm makineleri kurulmaya başlandı. İlk pilot uygulamalardan Allegheny Ludlum tesisi Newyork eyaletinde yapılmıştır (Resim 2.1.) [3].



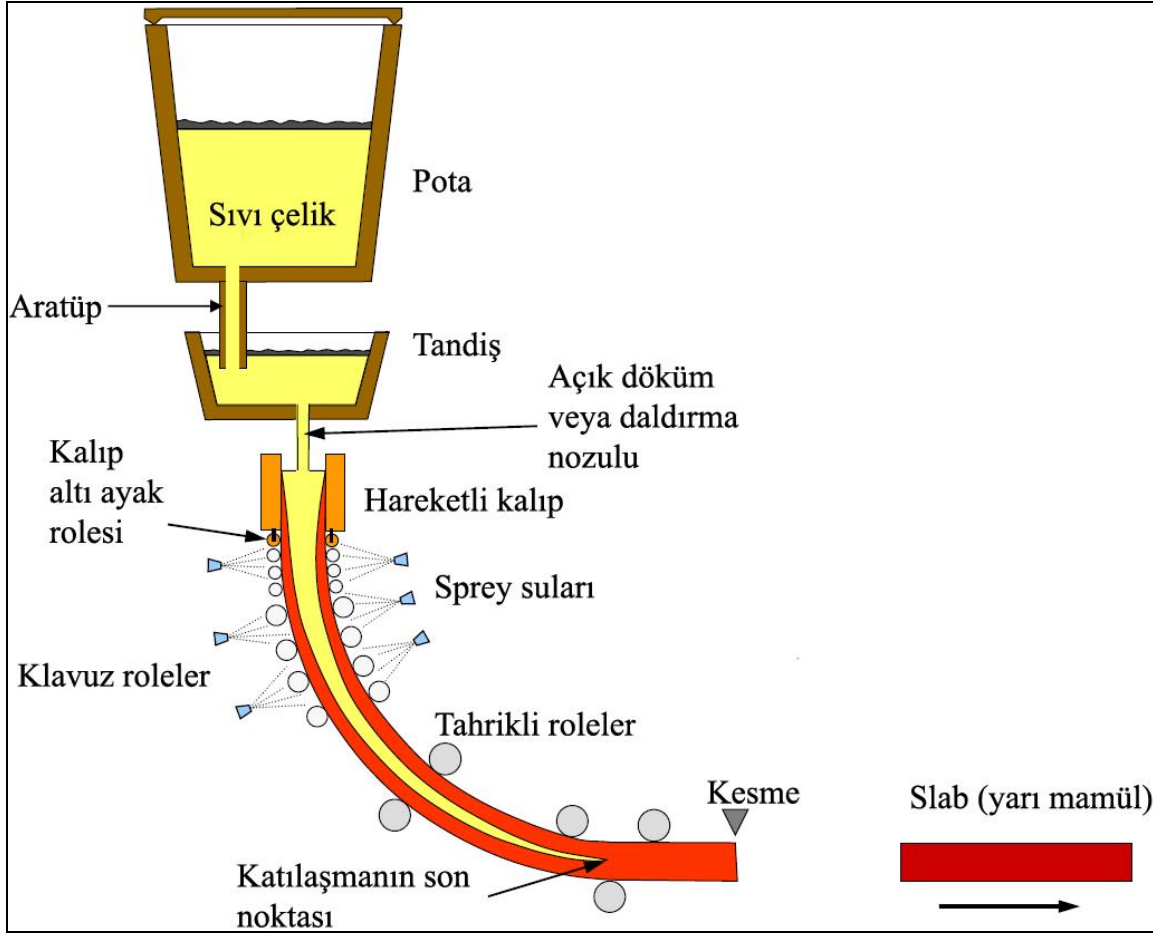
Resim 2.1. Allegheny Ludlum tesisinde sürekli çelik döküm: a) çizim ve b) döküm kotu görünümü [3]

Pota sürgü sistemleri, tandiştir sürgü sistemleri, stoper mekanizmaları, büyük kapasiteli tandiştirler ve refrakter malzemelerindeki gelişmeler beraberinde sürekli döküm makinelerinde kalite ve sürekliliği artırmıştır. Refrakter yüksek sıcaklık uygulamalarına dayanıklı çoğunlukla  $Al_2O_3$ ,  $SiO_2$  bileşenli malzemelerdir. Bazı durumlarda karbon esaslı malzemelerde kullanılmaktadır.

Genel hatları ile bir çok sürekli döküm makinesi ortak ekipmanlar barındırır (Şekil 2.2.) [2]. Ekipman ve yardımcı elemanlar bazında en önemlileri aşağıdaki şekilde sıralanır:

- Taret (Kule)
- Tandistir (Tekne)
- Kalıp
- Osilasyon sehpası
- Destek ve klavuz roleleri
- Tahrikli röleler
- Sprey sistemi
- Kesme makinesi
- Soğutma suyu
- Hidrolik sistemler
- PLC sistemleri





Şekil 2.2. Sürekli Döküm Makinesi yandan görünüm [2]

Sürekli slab döküm prosesin akışında sıvı çelik dolu pota taret üzerine vinç yardımı ile taret (kule) kollarına oturtulur. Dökümün dizi halinde sürekli olarak devam edebilmesi için taretin iki pota konumu vardır. Buna ilaveten taret kaldırma ve ağırlık ölçüm ekipmanları ile donatılmıştır. Günümüzde tipik bir taret elektro-mekanik motorlarla döndürülür. Enerji kesilmesi vb. acil durumlarda ise basınçlı gaz yardımıyla döndürülür. Aşırı ısı kaybını önlemek ve güvenlik için genellikle taret üzerinde pota kapağı bulundurulur.

Pota altındaki delik refrakter malzeme, yapısındaki sürgü sistemi ile açıp kapanabilir. Genellikle hidrolik bir mekanizma ile kontrol edilen sürgü sistemi potadan tandişe çelik akışını kontrol eder. Fazla açılması tandişin taşmasına az açılması ise dökümün bitmesine neden olmaktadır. Bu nedenle sürgü sisteminin girdi çıktı kütle dengesini belirli bir aralıkta tutması gereklidir. Eski sürekli döküm makinelerinde sürgü sistemi operatör marifetiyle kontrol edilirken günümüzde otomatik olarak kontrol mekanizmaları kullanılmaktadır. Bazı hallerde potadan tandişe cürufu engellemek için cüruf ikaz sistemleri

kullanılmaktadır. Akustik veya elektromanyetik esasa göre çalışan bu ekipmanlar çelik yerine cüruf gelemeye başladığı anda sürgü sitemini kapatarak çelik içerisinde istenmeyen inklüzyon<sup>1</sup> oluşumları belirli dereceye kadar engellenebilmektedir [1].

Sürgü kontrolü ile potadan tandişe aktarılan çelik kapalı bir ortam içerisinde gönderilir. Aratüp denilen refrakter malzeme bu iş için kullanılır. Yüksek sıcaklığa dayanıklı çoğunlukla Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> malzeme esaslıdır.

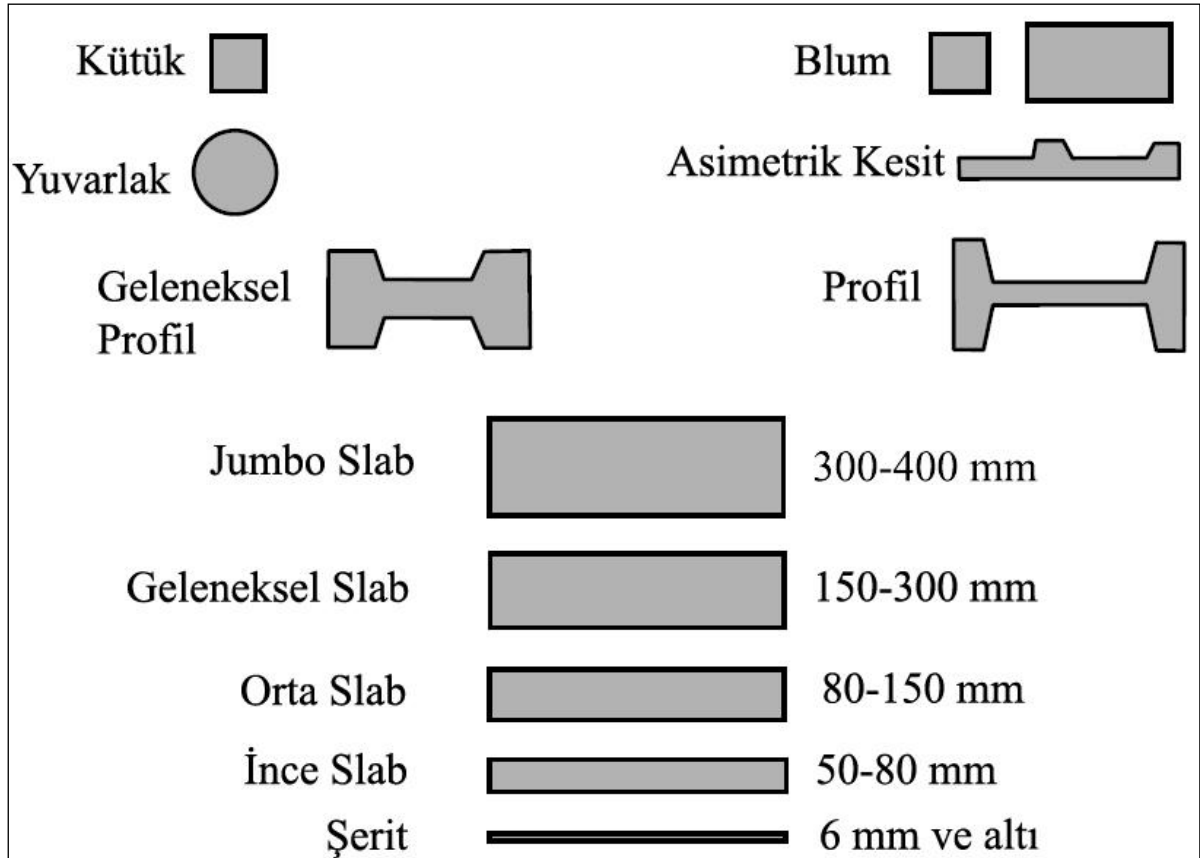
Tandiş sıvı çeliği potadan kalıba aktaran ve sürekli dökümün devamını sağlayan rezervuar görevi gören ekipmandır. Dış yapısı çelik iç yapısı ise refrakter malzemedir. Tandışte belirli özelliklerde kapak ve kalıba sıvı çelik akışını kontrol eden stopper mekanizmasından oluşur. Modern makinelerde döküm aralarını hızlı geçmek ve duruş zamanlarını kısaltmak için döküm katında 2 adet tandişle çalışılır. Her bir tandiş kendi tartım sistemine ve kaldırma mekanizmasına sahiptir. Tandışleri taşıyan tandiş arabaları belirli hareket kabiliyetine sahip olup döküm ve park pozisyonları arasında hareket edebilirler. Park pozisyonlarında tandiş içerisindeki refrakter malzemeleri sıvı çelikle temas ettiklerinde termal şoktan korumak ve sıvı çelik sıcaklığını düşürmemek için ısıtma istasyonları bulunur.

Döküm operatörü kalıbın yanında pozisyonlanır ve stopper kontrol mekanizmasını kontrol eder. Operatör müdahalesinin en az olduğu modern makinelerde kalıp seviye kontrol sistemi bulunur. Stopper elektrik motoru ya da hidrolik sistem yardımı ile hareket ettirilir ve tandiştan çelik içerisine girecek olan sıvı çelik miktarını kontrol eder. Sıvı çeliğin akış miktarı kalıp içindeki seviyeyi belirlemektedir.

Potan tandişe akarken aratüp malzemesinde olduğu gibi tandiştan kalıba çelik akarken de sıvı çelik refrakter malzeme içerisinde akışını sürdürür. Yüksek sıcaklığa ve aşınmaya dayanıklı Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> esaslı bu malzeme daldırma nozulu olarak adlandırılır. Kalıp içerisinde ilk katılaşmasını gerçekleştiren sıvı çelik farklı şekillerde üretilebilmektedir. Kütük, slab, blum, profil bunlar arasında ticari olarak en bilinenleridir (Şekil 2.3.) [2]. Teknolojik gelişmeyle birlikte yarı mamulden nihai ürüne doğru üretim teknolojisi değişmektedir.

---

<sup>1</sup> Inklüzyon çelik içerisinde istenmeyen her türlü sülfid, oksit ve nitrür vb. yapıları ifade etmektedir.



Şekil 2.3. Sürekli Döküm Ürünleri Kesit Görünümleri [2]

Salınım halindeki kalıp bazı tesislerde çevrimiçi ebat değişim özelliğine sahiptir. Döküm sırasında veya döküm olmadığı durumlarda servo motorlar sayesinde hızlıca ebat değiştirmeye yardımcı olur.

Modern makineler artık standart olarak slab yırtılma önleme sistemine sahiptir. Bunun için kalıp içerisinde slab yüzey sıcaklığını kontrol eden ısı çiftleri (thermocouple) monte edilir. Belirli bir algoritma ile yüzeydeki sıcaklıklar izlenir ve alarm durumu oluşturulur.

Teknolojik gelişmeyle birlikte ısı çifti yerine farklı uygulamalarda kullanılmaya başlamıştır. Fiber optik teknoloji kullanılarak yapılmış uygulamalar dünyadaki yerini almaktadır. Bu sayede ısı çifti kullanımı sırasında ortaya çıkan problemler minimize edilmektedir. Kanama sonrası geriye kalan boş kabuk kovan Resim 2.2’de verilmiştir.



Resim 2.2. Slab yırtılması sonrası geriye kalan içi boşalmış slab kovanı

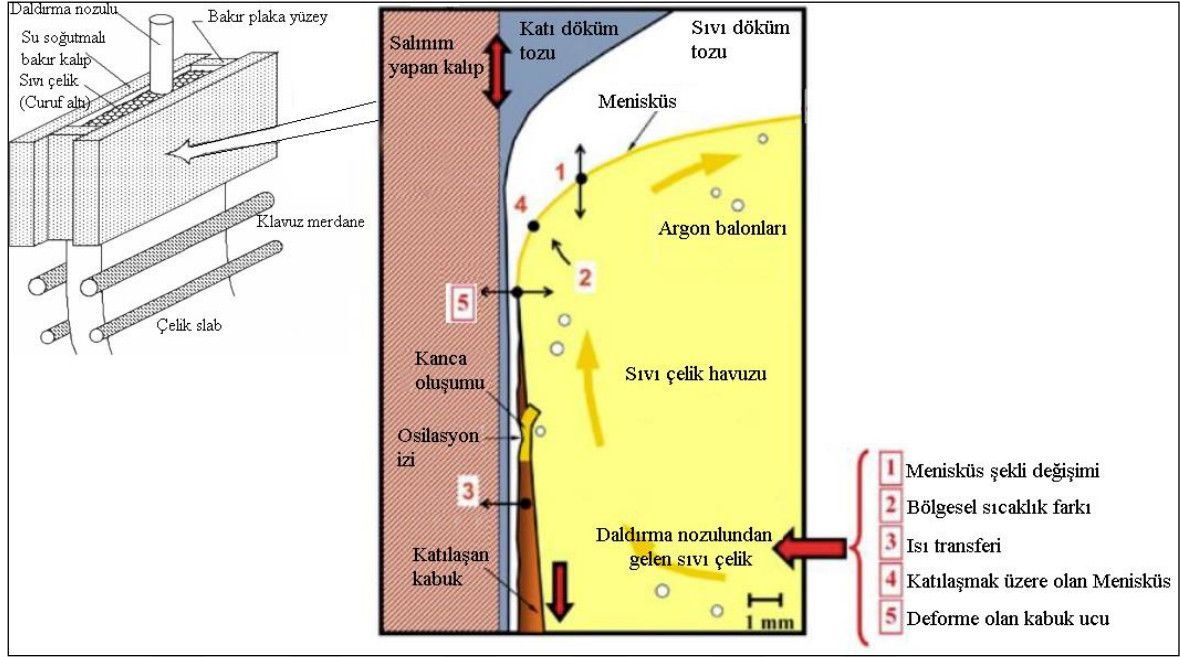
Erken dönem sürekli döküm makinelerinde sabit hareket etmeyen kalıplar kullanılmaktaydı. Bu tip makinelerde döküm süreside kısa olmaktadır. Bununla birlikte 20. yüzyılın ortalarında hareketli rezonans halindeki kalıbın kullanılması ile inanılmaz sonuçlar elde edilmeye başlandı. Bazı tesisler kalıbını elektrik motoru yardımı ile hareket ettirirken bazıları hidrolik yardımı ile aynı işi yapmaya başladılar. Her birinin belirli avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır. Salınım hareketi yapan kalıbın belirli şekillerde kullanımı sürekli döküm prosesinde neredeyse devrimsel sonuçlar doğurmuştur:

- Yaprak yayların kullanım ile çok hassas çalışma aralığı,
- Düşük salınım kütlesi, daha az enerji tüketimi daha iyi performans,
- Kısa strok ve düşük frekans değerlerinde daha az osilasyon izi derinliği,
- Sabit negatif sıyırma oranı için dinamik strok,
- Kalıpla slab arasında sürekli yağlama için dinamik dalga şeklinin ayarlanması,

Kalıbın birim zamanda yaptığı salınım sayısı frekans, kalıbın aşağı-yukarı yönde hareket ederken en alt ve en üst noktalar arasındaki mesafeye ise kalıp strok mesafesi denilmektedir.

Kalıbı hareket ettiren osilasyon sehпасıdır ve kalıbın monte edildiği yer olup en üst segmentin üzerine hizalanmaktadır. Hareket halindeki kalıba su transferi basit esnek bağlantılar ile sağlanmaktadır.

Resim 2.3'te kalıbın temsili bir görünümü ve kalıpla katılaşılan yüzey arasındaki ortam verilmiştir [5].



Resim 2.3. Sürekli döküm prosesinde slab kalıbı ve menisküs bölgesi [5]

Kalıp sonrasında makinede segmentler bölgesi gelmektedir. Makinenin tasarımına göre kalıplar dik ve belirli yarıçapta kavisli olabilmektedir. Kalıbın dik olarak başladığı tesislerde segment bölgesinin üst taraflarında belirli yarıçapa kavis başlar devam eder ve daha sonra kavis ortadan kalkarak yatay pozisyona gelir. Sıvı çelik kalıp içerisinde katılaşmaya başladığında orta kısmı hala sıvı olarak yolculuğuna segment içerisinde devam eder. Segmentler birçok klavuz röleden oluşan bir yapıdır. İçerisi sıvı çelik, dışı katılaşmış olan slab klavuz röleler arasında tahrikli röleler yardımı ile belirli bir hızda ilerler. Kavisin başladığı segmentlerde slab eğilmeye başlar sabit yarıçapta hareketine devam eder ve doğrultma segmentlerinde geldiğinde ise bu defa ters yönde eğilerek slab doğrultulur. Bu sayede kavisli haldeki slab hat çıkışında düz hale getirilmiş olur. Hat çıkış slablar kesilmeden önce mutlaka katılaşmasını tamamlaması gerekir. % 100 katılaşma işleminin tamamlandığı bu noktaya metalürjik uzunluk adı verilir ve makine tasarımından çelik kalitesine, döküm hızına kadar birçok parametreye bağlıdır.

Günümüz modern slab döküm makineleri merkezi segregasyonu<sup>2</sup> önlemek için yumuşak haddeleme denilen kabiliyete sahiptir. Burada segmentler arasından için sıvı haldeki slab geçerken belirli miktarlarda sıkıştırılır ve slab ortasında oluşan segregasyon büyük ölçüde

<sup>2</sup> Segregasyon katılaşmakta olan alaşım elementlerince zengin sıvı fazdaki çözünmüş elementlerin bünne dışına atılması olayıdır. Segregasyon istenmeyen, tamamen yok edilemeyen ancak azaltılabilen kaliteyi etkileyen bir olaydır.

engellenmiş olur. Segregasyon katılaşmakta olan çelik malzemenin içerdiği farklı alaşım elementlerinden ötürü demir dışındaki elementlerin katıdan sıvı bölgelere atılmasıdır. En son katılaştıran bölge segregasyonun en yoğun görüldüğü yer merkez bölgesidir. Ezme yapılabilmesi için katılaşmanın segment içerisinde tamamlandığı noktanın tam tespiti büyük önem taşımaktadır. Tüm yumuşak ezme işleminin nerede yapılacağı buna göre belirlenmektedir. Hatalı tespitler iç çatlaklara, kalıp seviye oynamalarına neden olabilir. Katılaşma noktası tespiti için sonlu elemanlar yönetimi gibi modeller kullanılabilirken FeS çivi çakma gibi pratik yöntemlerle de doğrulama yapılabilmektedir.

Slabın kalıp içerisinde ilk katılaşması bakır plaka üzerinden ısının suya iletilmesi şeklinde gerçekleşmektedir. Buraya birincil soğutma denilmektedir. Segment bölgesi içerisinde soğutulması ise doğrudan su püskürtülmesi ile gerçekleşmektedir. Burada yapılan soğutma işlemine ise ikincil soğutma denilmektedir. Slabın düzgün ve arzu edildiği gibi soğutulması için segment içerisinde klavuz röleler arasından su fıskiyeleleri kullanılmaktadır. Suyu atomize edip yüzey alanının artırılması için modern slab döküm makinelerinde suyla birlikte basınçlı hava da verilmektedir. Bu sayede az suyla hem daha fazla soğutma yapılabilmekte hem de Leidenfrost<sup>3</sup> etkisi minimize edilmektedir. Buharlaştıran su emme fanları yardımı ile atmosfere atılmaktadır.

Döküme başlamak için kalıp altından bir bar (kukla) kalıp ortasına kadar getirilir ve bir tıkaç gibi kalıp alttan kapatılır. Döküm başladığında bu bar da slabla birlikte aşağıya doğru çekilir ve hattan çıkarılır. Döküm devam ettiği sürece bu bara ihtiyaç kalmaz. Son segmentten düz olarak çıkan slab slab gazlı kesme makinelerine iletilir. Burada sonraki tesislerin ihtiyaçlarına göre belirli uzunluklarda oksijen, doğalgaz, LPG veya Hidrojen yardımı ile kesilebilir. Kesme sırasında kesim bölgesinde oluşan erimiş çapaklar meydana gelir. Çapak giderme makinesine giren slablar burada kalıntılarından tıraşlanır. Tıraşlama sonrası her bir slaba kimlik kazandırmak amacıyla bir dizi numara atanır ve slab artık kimlik kazandırılmış olur. Herhangi bir kusur veya farklı bir durumda slab bu numara ile tespit edilmiş olur dolayısı ile slabın üretimine ilişkin tüm kayıtlara ulaşılabilir. IATF 16949 otomotiv standardı gereği izlenebilirlik için de ayrıca önem taşımaktadır.

---

<sup>3</sup> Sıvının kaynama sıcaklığı üstünde gaz fazına geçmesine bağlı ısı transfer hızının önemli ölçüde düşmesi olayı

## 2.1. Kalıp Sürtünme Mekanizması

Buraya kadar çeliğin slab formunda sürekli döküm yöntemi ile üretilmesi için başlangıçtan günümüze kronolojik gelişimi genel hatlarıyla verilmiş daha sonra da tipik bir sürekli slab döküm makinesi tanıtılmıştır. Çalışmanın ana konusunu ilgilendiren olan kalıp bölgesine daha yakın bakıldığında birçok fiziksel ve kimyasal olayın gerçekleştiği görülmektedir (Şekil 2.4.) [48].

Başlangıç kabuk oluşumu slab yüzey kalitesinde karar verici rol oynarken, kabuğun kalınlaşması slab yırtılmasını engellemekte ve tesis üretkenliğini garanti altına almaktadır. Isı transferinin ve sürtünmenin kontrol altında tutulmasının büyük işlevi vardır.

Kalıp ile katılan yüzey arasında gerçekleşen sürtünme mekanizmasına gelmeden sürtünme kavramının açıklanması uygun olacaktır. Sürtünmenin kurallarına ilişkin ilk tarihsel bilgiler Leonardo Da Vinci kayıtlarında karşımıza çıkmaktadır. Bununla birlikte daha sonraki dönemlerde Amontons, Coulomb, Bowden ve Tabor isimli şahısların katkıları bulunmaktadır.

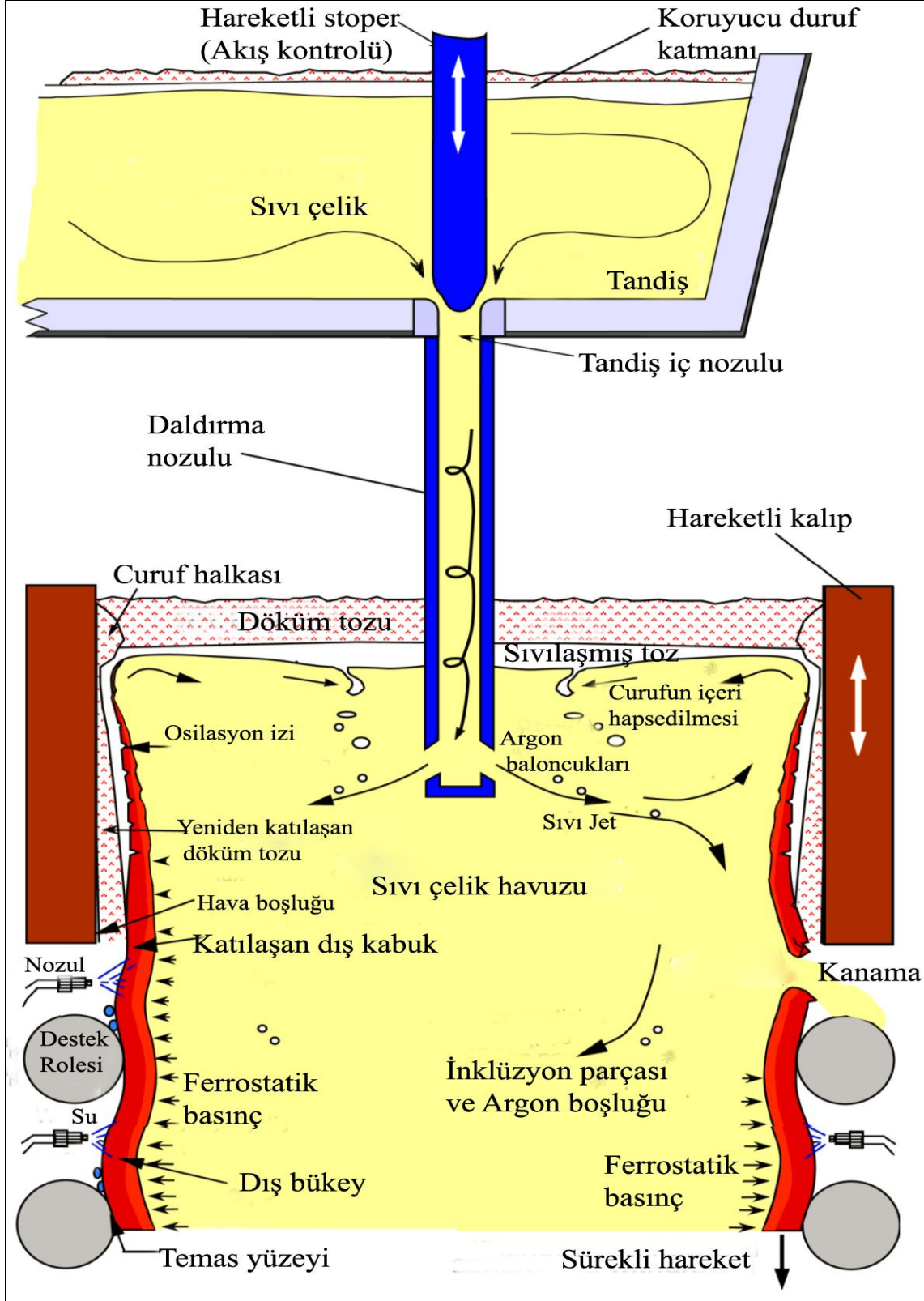
Sürtünme malzemenin özelliği değil sistemin bir tepkisidir. Eğer iki katı yüzey kimyasallardan ve yüzeye tutunmuş maddelerden arındırılmış hale getirilirse sürtünme yüksek olacaktır. Yüzeydeki kirlenmeler ya da ince film tabakaları sürtünmeyi etkiler. İyi yağlanmış yüzeylerde genellikle zayıf adezyon kuvvet ve sürtünme kuvveti gözlemlenir [49]. Adezyon kuvvet farklı yüzeylerin birbirleri ile olan yapışma yatkınlığını gösterir.

Herhangi bir sistemde sürtünme kuvveti iyi ya da kötü sonuçlar doğurabilir. Sürtünme olmadan yolda yürümek, yolda araba sürmek, trende seyahat etmek ya da nesnelere yakalamak imkânsız hale gelirdi.

Özellikle bazı uygulamalarda sürtünmenin maksimize olması arzulanır. Örnek olarak motorlu araçların fren ve debriyaj sistemleri verilebilir.

Öte yandan birçok kayar ve döner ekipmanlarda sürtünme istenmeyen bir durum haline gelmektedir. Örneğin hemen hemen tüm üretim proseslerinde karşımıza çıkan rulmanlar buna en güzel örnek olarak verilebilir. Bu uygulamalarda sürtünme kontak noktalarında

aşınmaya ve enerji kaybına neden olmaktadır. Bu gibi durumlarda ise sürtünme minimize edilmeye çalışılmaktadır.



Şekil 2.4 Sürekli slab döküm prosesinde çeliğin kalıp bölgesindeki temsili çizimi [48]



Bununla birlikte bazı uygulamalarda ise sürtünmenin sabit olması istenir, özellikle kalite kontrol elemanlarına ait uygulamalar buna örnek verilebilir. Tekstil fabrikasında olduğu gibi sürekli aynı kalitede kumaş üretimi için sürtünme kuvvetinin belirli limit dışına çıkmasının istenmediği prosesler de mevcuttur [50].

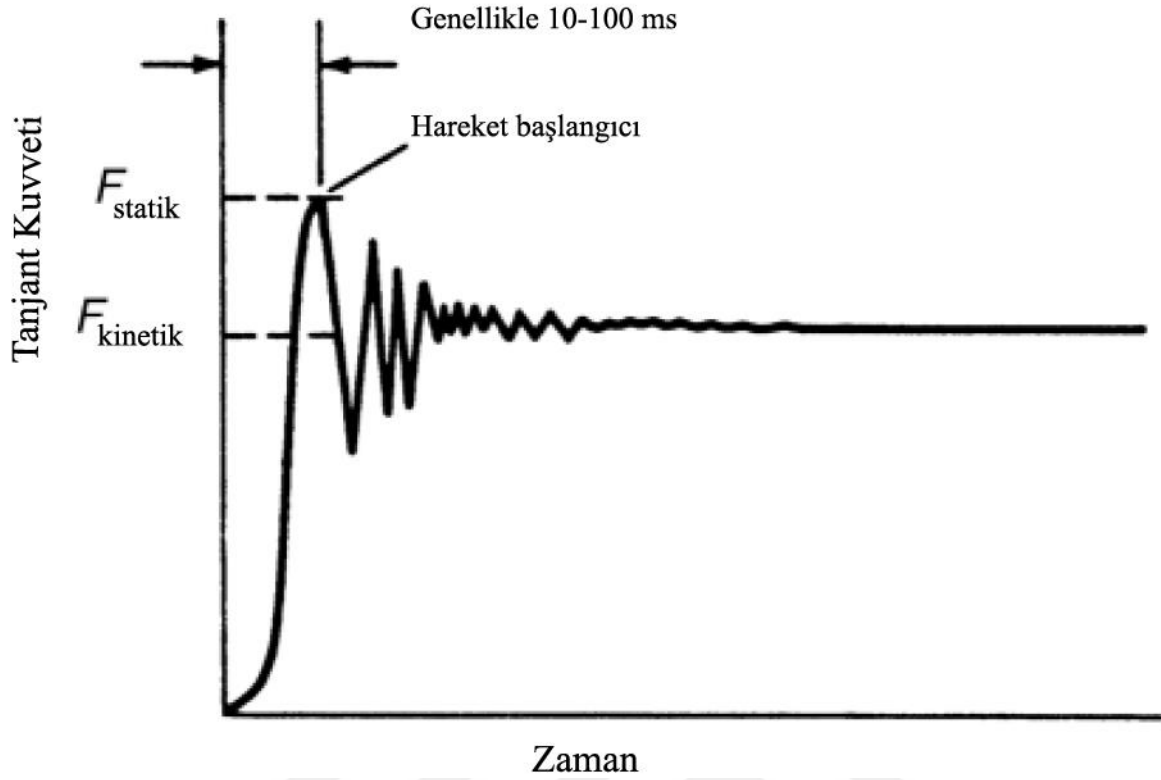
Kalıbın üst bölgelerinde Şekil 2.4'de [48] görülebileceği üzere kalıpla katılaştıran yüzey doğrudan temas etmemektedir. Sıvı haldeki döküm tozu yağlayıcı malzeme olarak görev yapmaktadır. Kalıbın daha alt bölgelerinde ise katı-katı teması olmakta ve farklı bir sürtünme mekanizması bu bölgede hakim olmaktadır. Bu nedenle kalıp içerisinde genel hatlarıyla iki farklı sürtünme mekanizması gerçekleşmektedir.

Bu bölümde önce sürtünme mekanizması hakkında genel hatlarıyla okuyucuya bilgi verilecek ve daha sonrasında sürekli slab döküm prosesinde kalıp içerisinde gerçekleşen olaylar ile bağlantısı kurulacaktır.

Bir katı yüzeyi başka bir yüzey ile temas halindeyken hareket etmeye karşı gösterilen direnç sürtünme kuvveti ( $F$ ) olarak ifade edilir. Burada tanımlanan hareket kayma ya da yuvarlanma olabilir. Harekete ters yöndeki bu kuvvet sürtünme kuvveti olarak tanımlanır. Kuru sürtünme ve akışkan sürtünmesi olmak üzere sıklıkla karşılaşılan 2 tip sürtünme çeşidi bulunmaktadır.

Coulomb sürtünmesi de denilen kuru sürtünme olayı kuru yüzeyler hareket halindeyken ya da biri diğerine göre hareket halindeyken kontak kuvvetinin tanjant elemanını tarif eder. Akışkan sürtünmesi ise iki yüzey arasındaki bir akışkan içerisinde birbirine göre farklı hızlarla hareket eden katmanlar arasındaki kontak kuvvetinin tanjant elemanını tarif eder.

Eğer katı bir gövdeye kuvvet uygulanır ve hareket etmesi istenirse hareketin başladığı noktadaki gerekli tanjant kuvvetine statik sürtünme ( $F_{Statik}$ ) adı verilir. Bu noktada hareketin başlaması birkaç milisaniye alacaktır. Hareketin sürdürülebilmesi için gerekli kuvvete kinetik ya da dinamik sürtünme kuvveti ( $F_{Kinetik}$ ) ismi verilir. Statik sürtünme kuvveti ( $F_{Statik}$ ) kinetik sürtünme kuvvetinden ( $F_{Kinetik}$ ) büyüktür (Şekil 2.5.) [51].



Şekil 2.5. Zamana bağlı statik ve dinamik sürtünme kuvveti [51]

### 2.1.1. Kuru Sürtünme

Katı-katı kontağı sonucu oluşan kuru sürtünmeyle ilgili olarak 3 ana kural verilir [49–51]: Birinci kural  $F_k$  yani iki katı yüzey arasındaki sürtünme kuvvetinin, uygulanan yükü ( $W$ ) doğru orantılı olduğu Eş. 3.1’de verilmektedir:

$$F_k = \mu \cdot W \quad (2.1)$$

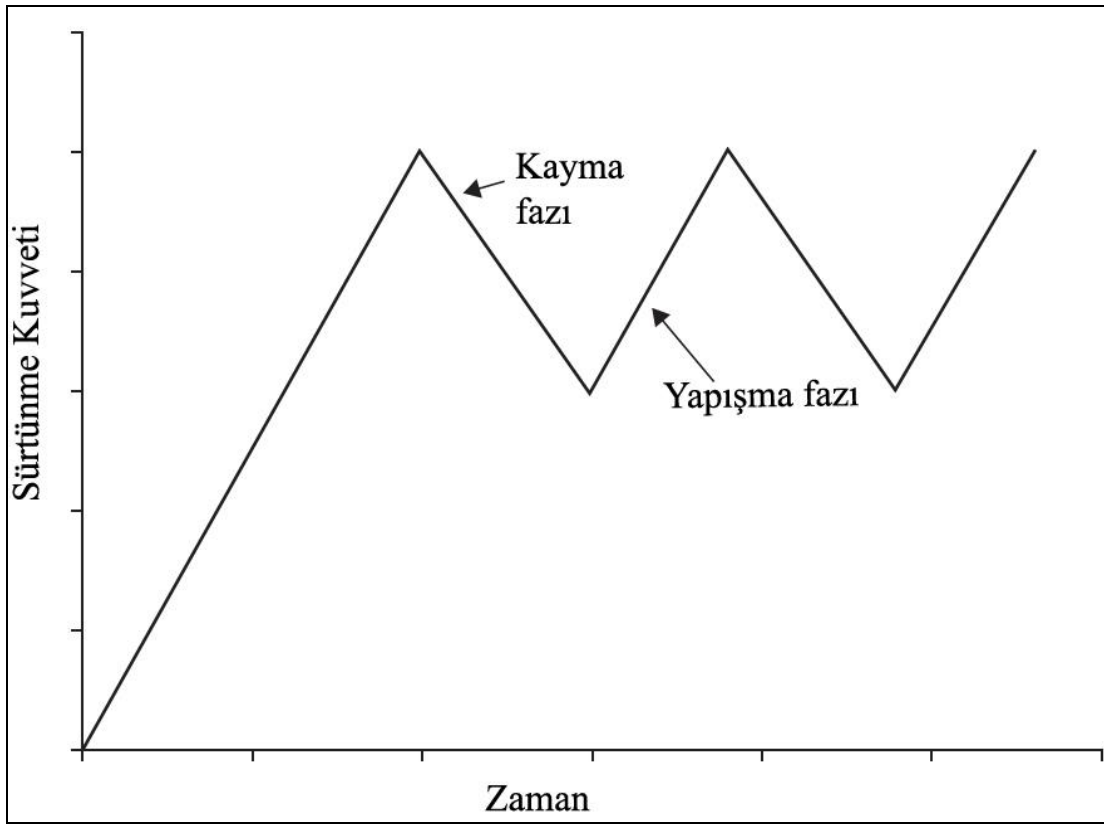
Eş. 2.1’ de verilen  $\mu$  katsayısı uygulanan yükten bağımsız olan statik sürtünme  $\mu_s$  veya kinetik sürtünme  $\mu_k$  katsayısını belirtmektedir.

İkinci kural ise sürtünme kuvvetinin (ya da sürtünme katsayısının) iki gövdenin görünür yüzeyi alanından bağımsız olmasıyla ifade edilir. Bu nedenle temas halindeki iki gövde, fiziksel büyüklüklerinden bağımsız olarak aynı sürtünme katsayılarına sahiptir.

Bu iki kuralın dışında bazen 3. bir kural da eklenebilmektedir. Bu kurala göre kinetik sürtünme kuvveti (ya da sürtünme katsayısı) hareket başladığı anda kayma hızından bağımsızdır. 3. Kural bu şekilde olsa da bazı durumlarda bu kural doğru olmamaktadır.

Bazı durumlarda artan hızla birlikte sürtünmenin arttığı bilinmektedir. Bu durumun artan hızla birlikte aşınmadan kaynaklı oluşan partiküllerin neden olduğu düşünülmektedir [49].

Birbirine göre hareket halindeki iki yüzey arasında sürtünme kuvvetinin olduğu bilinmektedir. Burada gerçekleşen kayma olayı sürekli değildir. Bunun yerine hareket titremelerden oluşmaktadır. Metalik yüzeyler arasındaki yapışma ani bir kayma hareketinin sonuçlanmasına kadar devam eder (Şekil 2.6.) [52]. Genel olarak yapışma sadece kayma hızı 0 olduğunda gerçekleşir.

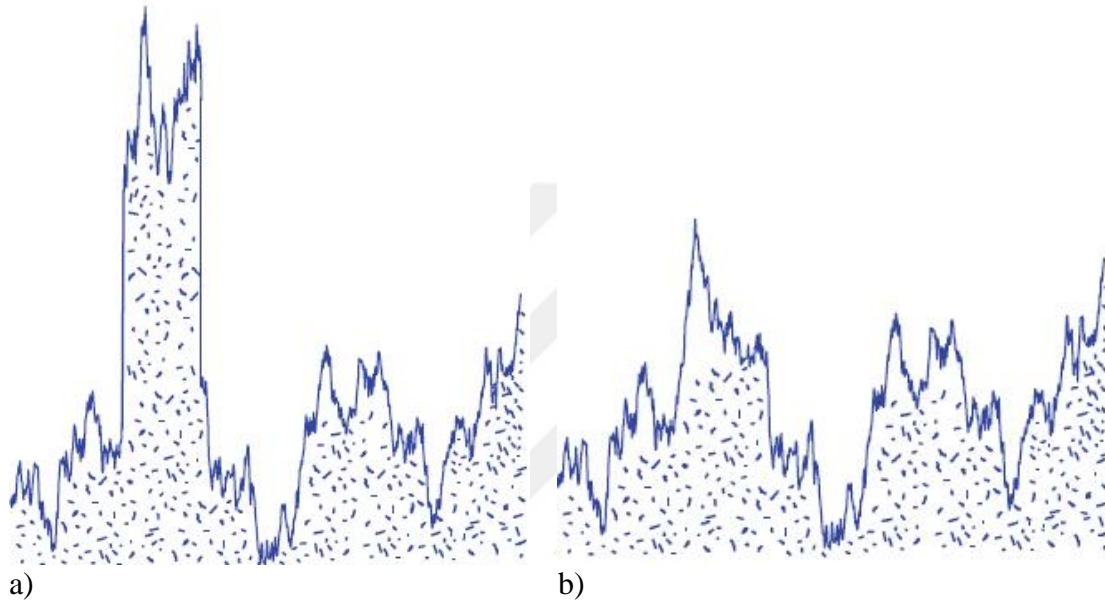


Şekil 2.6. Sürtünme mekanizması sırasındaki kayma ve yapışma fazları [52]

Daha sonra yüzeyler tekrar birbirine yapışır ve proses bu şekilde kendini tekrar eder. Temasın gerçekleştiği yüzeyler birbiri ile aynı cins metal malzeme olduğunda bu durum biraz farklılık göstermektedir. Sürtünme kuvvetinde büyük dalgalanmalar olur ancak bunlar önceki açıklamaya göre oldukça yavaş ve düzensizdir. Aynı cins metal yüzeylerdeki ortalama sürtünme kuvveti farklı metal yüzeylere göre daha büyüktür. Kayma ve yapışma hareketinin frekansının artan hızla birlikte arttığı gözlemlenmiştir. Bununla birlikte bazı durumlarda bu salınım hareketinin durduğu da görülmüştür [52]

Kayma ve yapışma fazları denemelerin yürütüldüğü çalışmalarda (Bkz. EKLER) net bir şekilde görülebilmektedir.

Genel tabir ile yüzey pürüzlülüğü diğer bir deyişle yüzeyin durumu sürtünme kuvvetinin büyüklüğü üzerinde etkilidir. Mikroskobik düzeyde yüzey üzerindeki girinti ve çıkıntıların dağılımı ve büyüklüğü sürtünme kuvvetine etki etmektedir (Şekil 2.7.) [50].



Şekil 2.7 Farklı özellikte yüzey profilleri: a) çıkıntılı yüzey profili, b) normal yüzey profili [50]

Yüzeyle ait profilin ortalama yüksekliği, karekök ortalaması ve maksimum yüksekliği gibi değerleri çıkarılarak yüzey pürüzlülüğü hakkında veri elde edilir. İki yüzey arasında gerçekleşen sürtünmenin büyüklüğünün görünür yüzey alanından bağımsız olması da buradan gelmektedir. Gerçekte temas eden noktalar sadece belirli noktalar olmakta ve sürtünmeden yalnızca bu noktalarda gerçekleşmektedir. Birçok kişi pürüzsüz düz yüzeylerin daha iyi kaydığı düşünür. Bu durumda tamamen pürüzsüz ve temiz iki yüzey bir biri ile temas halinde olsaydı ne olurdu diye düşündüğümüz de karşımıza soğuk kaynak denilen olay gelmektedir. Bu durumda iki malzeme birbirine bağlanmaktadır. Bu basit örnek sürtünmenin tüm görünür yüzeyde olması durumunda ne nedenle büyük olabileceğini göstermektedir. Görüldüğü gibi yaygın inanın tersine mükemmel pürüzsüzlükte iki yüzey birbiri üstünde kolayca kaymayıp aksine birbirine soğuk kaynak şeklinde kenetlenip birleşmektedir [49].

İki yüzey vakum altında ( $P_{ortam} < 10^{-8}$  Pa) bir araya geldiğinde iki yüzey arasındaki atomlar bir araya gelir. 20 Angstrom<sup>4</sup> mesafede ilk Van Der Waals<sup>5</sup> kuvvetleri görünmeye başlar, mesafe 2 Angstrom altına indiğinde ise tamamen metalik bağlar kurulur ve bahsi geçen soğuk kaynak gerçekleşmiş olur [53].

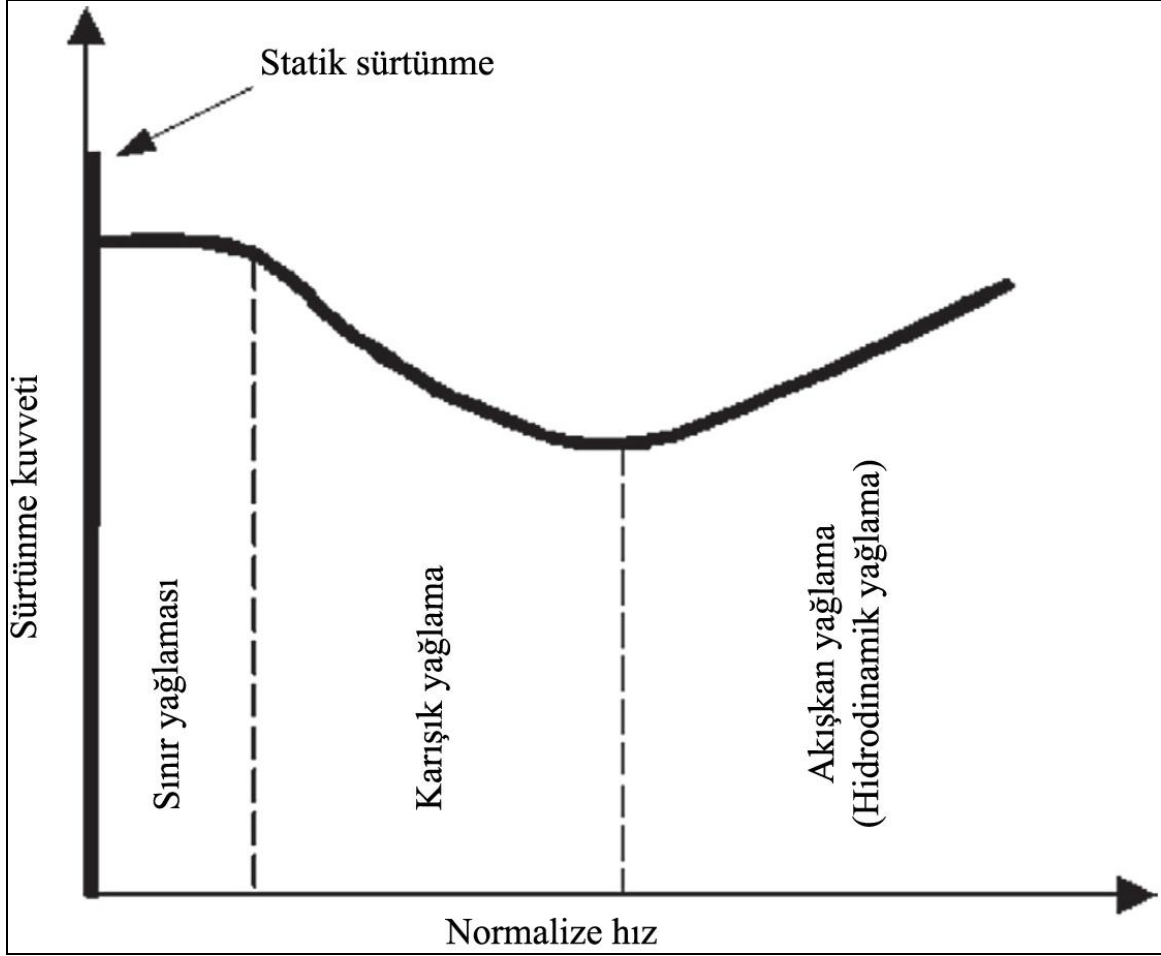
### 2.1.2. Akışkan Sürtünme (Sıvı Sürtünme)

Bir önceki bölümde kuru sürtünme diğer bir deyişle akışkan tabakanın bulunmadığı yüzeyler arasındaki sürtünme incelenmiştir. Buna karşında birçok mühendislik uygulaması su, nem ya da yağ gibi yağlayıcı sıvı maddelerin olduğu hareketli ekipmanlardan oluşmaktadır. Kontak halindeki yüzeyler arasında su ya da gres yağ gibi yağlayıcı eleman konumunda ince akışkan film tabakasının varlığında gerçekleşen sürtünme kuvvetine akışkan sürtünmesi denir.

Boru içerisinde akan su ile boru arasında oluşan sürtünme kuvveti buna örnek verilebilir. Ya da hareketli iki yüzey arasındaki gres yağı da bu duruma örnek verilebilir. Bir akışkanın başka bir akışkana göre hareketi de bu çeşit bir sürtünmedir ancak bu çalışmanın dışında kalmaktadır. Şekil 2.8'de verildiği gibi akışkan sürtünmesinde temel olarak 4 farklı bölgeden söz edilebilir; 1) statik sürtünme, 2) sınır yağlaması, 3) karışık yağlama (katı-katı ve akışkan sürtünmesi bir arada), 4) tamamen akışkan yağlaması (Hidrodinamik yağlama) [54].

<sup>4</sup> Angstrom atom altı seviyede kullanılan mesafe ölçü birimidir. 1 Angstrom  $10^{-10}$  metreye eşittir.

<sup>5</sup> Van der Waals kuvvetleri moleküler seviyedeki zayıf fiziksel bağlardır. Örneğin Gecko kertenkelelerinin düz yüzeyde tutunmasını sağlayan ayaklarındaki çok sayıda olan mikro çıkıntılar ile duvar arasında oluşan bağ kuvveti.



Şekil 2.8. Stribeck eğrisine göre 4 farklı yağlama bölgesi [54]

Stribeck<sup>6</sup> eğrisi rulman dizaynında ve farklı yağlama şartlarının olduğu durumların açıklanmasında sıklıkla kullanılmaktadır. Yüksek basınç altında ya da akışkan elemanın viskozitesinin ve hızının düşük olduğu durumlarda yüzeyler temas edebilir hale gelir. Bu durum sürtünmenin artmasına neden olur [55].

İki yüzey arasında bir akışkan film tabakasının olduğu yüzeyi ele alındığında 4 olası yağlama bölgesini karşılaştırmak için Eş. 2.2 kullanılır:

$$\lambda = \frac{h_0}{R_q W} \quad (2.2)$$

Burada  $\lambda$ , ortalama sıvı film kalınlığının ( $h_0$ ) her iki yüzeyin birleşik ortalama pürüzlülüğüne ( $R_q$ ) oranını ifade etmektedir [54].  $W$  ise uygulanan yükü ifade etmektedir.

<sup>6</sup> Alman mühendis Richard Stribeck bir çok deney gerçekleştirerek hız değişiminin sürtünme kuvvetine olan etkisini ortaya koyan grafiği (Bkz. Resim 3.4.) oluşturmuştur.

Statik sürtünme kuvveti hareketin başlatılması için gerekli tanjant kuvvetini ifade etmektedir. Bununla birlikte statik sürtünme kuvveti hızla bağımlı değildir.

İkinci bölge olan sınır yağlamasına ince film yağlaması da denilmektedir.  $\lambda < 1$  olduğu durumlarda çok düşük hızda bu çeşit yağlama gerçekleşmektedir. Buradaki hız katı yüzeyler arasında film tabakası oluşturacak kadar yeterli değildir. Bu nedenle bu bölgede akışkan yağlaması tam olarak baskın değildir. Uygulanan yük yüzey tarafından taşınır ve sürtünme tamamen yüzeydeki yağlayıcı moleküllerin özelliğine bağlıdır. Tipik olarak 0,06 ile 0,1 arasında değişmektedir. Film tabakası olmadığı zaman bu değerler 0 ile 0,4 arasında çıkmaktadır. Hatta belli durumlarda 1,0'a kadar çıktığı da görülmüştür. Bu bölgede atomik seviyede düz olan yüzeyleri birkaç akışkan molekül tarafından ayrılabilir. Ara yüzeydeki akışkana ait özelliklerden erime noktası, makaslama mukavemeti ve sertlik bahsi geçen sürtünme bölgesinde akışkanın hacimsel özelliklerinden daha önemlidir. Bu bölgedeki sürtünme çoğunlukla kuru sürtünme mekanizmasındaki gibi bir özellik gösterir [51][54].

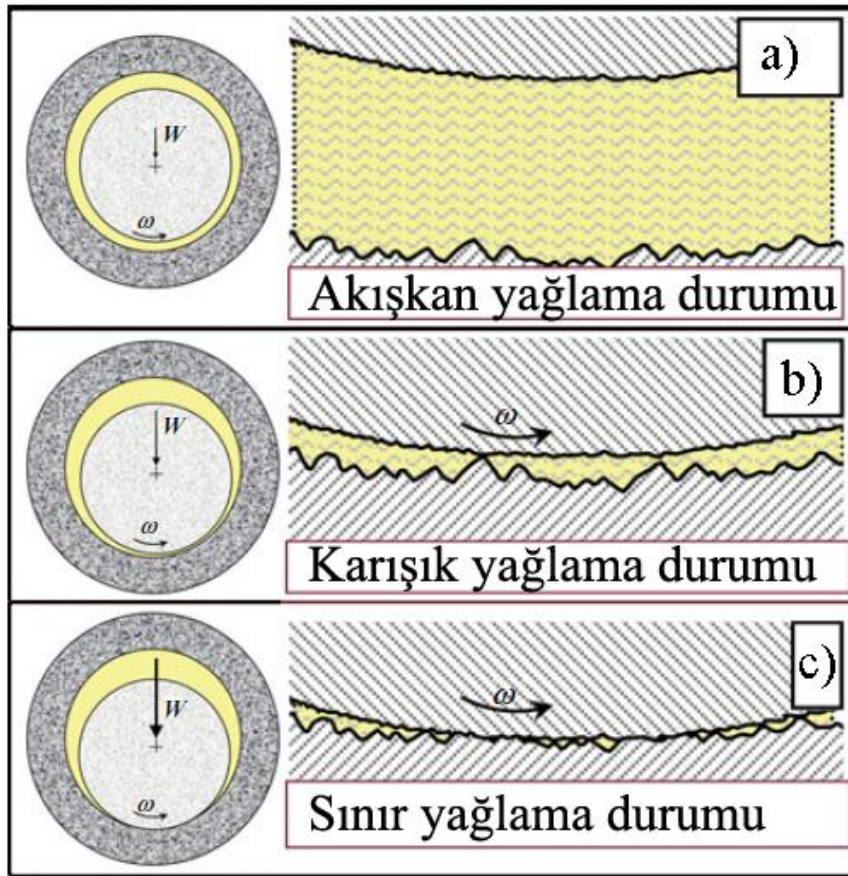
Stribeck eğrisine göre üçüncü bölge karışık yağlamanın olduğu alanı ifade etmektedir.  $1 \leq \lambda < 3$  olduğu durumlar bu bölge ile ifade eder. Uygulanan yükün bir bölümü akışkan tarafından taşınırken bir bölümünde etkileşim halindeki katı yüzeyler tarafından paylaşılır. Diğer bir deyişle iki farklı sürtünme mekanizması bu bölgede hüküm sürmektedir. Birbirine temas eden yüzeyler sürtünmeyi artırırken ara yüzdeki yüzeye tutunmuş akışkan tabaka sürtünmeyi azaltır. Ara yüz kısmen hidrodinamik kuvvetlerin kısmen de kontak kuvvetlerinin etkisi altındadır. Akışkanın bir kısmı basınç nedeni ile dışarı sızabilir ancak viskozite ve ıslatmanın etkisiyle içeride bir miktar akışkan kalır. Bu bölgedeki hakim olan sürtünme mekanizmasında akışkanın viskozitesi, hareketin hızı, basınç ve kontak geometrisi önemli rol oynar. Viskozite ya da hız arttıkça film tabakası kalınlaşacak bunun sonucunda sürtünme katsayısı düşecektir. Yüzey pürüzlülüğü, geometrik yapısı oluşan film tabakasının kalınlığında etkilidir dolayısıyla yağlama performansında belirleyicidir. Karışık yağlamanın olduğu durumlarda akışkan tabakanın kalınlığı genellikle 30 nm ile 3µm arasındadır. Uygulamada bazı ilave maddeler akışkana eklenebilir. Bunlar akışkana istenilen özelliklerin kazandırılması için ilave edilmektedir. Bazı kaynaklar ince film yağlaması, kısmi akışkan yağlaması isimleri de verilmektedir [51, 54] [56].

Dördüncü rejim ise tam akışkan yağlaması olan hidrodinamik yağlama oluşturmaktadır. Katı yüzeylerin teması burada tamamen elimine edilmiştir. Süreç tamamen akışkanın

özellikleri ile kontrol edilir.  $3 < \lambda < 10$  olduğu durumları ifade eder. Bu şartlar altındaki yağlamada katı yüzeyler birbirlerinden basınçlandırılmış halde bulunan akışkan tarafından uzaklaştırılır [54].

Endüstriyel uygulamada yüksek yük kapasitesine sahip rulmanlar yüksek hızlardaki çalışma koşullarını yüksek viskozite değerine sahip akışkanlara borçludur [51].

Bu rejim altında hüküm süren yağlama koşulları ideal yağlama olarak kabul edilmektedir. Ara yüzdeki kalın akışkan tabakası katı yüzeylerin yüzey pürüzlülüğü sorununu ortadan kaldırmaktadır. Sürtünme katsayısı 0,001'lere kadar küçülebilmektedir (Şekil 2.9.) [56].



Şekil 2.9 Tipik bir rulman yatağında Stribeck eğrisine göre karşılan 3 rejim: a) akışkan yağlama, b) karışık yağlama ve c) sınır yağlaması durumlarını göstermektedir [56]

## 2.2. Slab Kalıp Sürtünme Mekanizması Kontrolü

Birbirine göre hareketli nesnelere arasında yağlayıcı maddelerin kullanımı sürtünmeyi azalttığı bilinmektedir. Yağlama mekanizmasının kontrolü sadece yağlayıcı maddenin



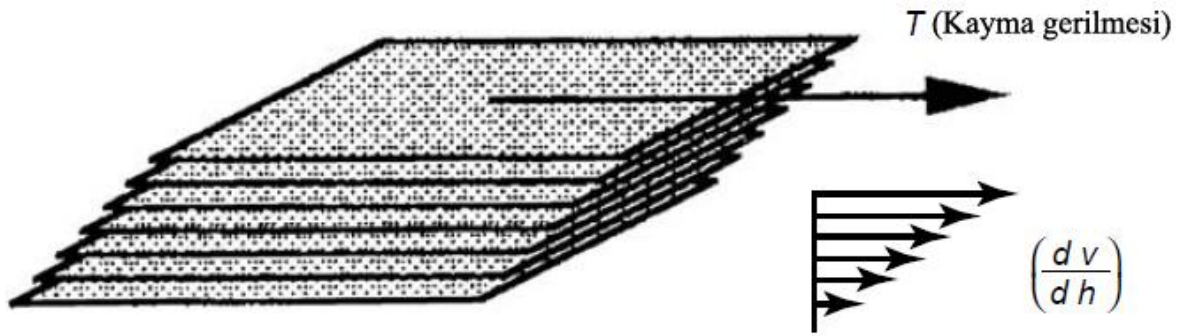
seçimini ve formülasyonunu içermez. Kontak geometrisinin tasarımı, yağlayıcının dağıtımını, filtrelenmesi durumlarını da içerir. Yağlayıcı madde katı, sıvı ya da gaz olabilir. Katı yağlayıcılar ince bir film tabakası formunda ya da toz şeklinde olabilmektedir [55]. Yağlayıcı madde OECD<sup>7</sup> tarafından şu şekilde ifade edilir: iki yüzey arasına kasıtlı olarak konulmuş sürtünmeyi ve aşınmayı azaltıcı madde. Bu tanıma göre bir maddenin yağlayıcı eleman olarak kabul görmesi için kasıtlı bir şekilde kullanılması gereklidir. Bazı malzemeler kaygan olarak tanımlanabilir ve bu haliyle sürtünmeyi azaltır. Ancak OECD tanımına göre bu çeşit maddeler yağlayıcı sınıfında yer almamaktadır. Kaygan madde olup yağlayıcı madde olarak kabul edilmeyenlere örnek olarak sabun, teflon, deniz suyu, yağlı kâğıt verilebilir. Bununla birlikte sürtünmeyi azaltmak için kullanılan manyetik alan kayganlaştırıcı olarak kabul görebilir. Ancak manyetik alan madde olmadığı için yağlayıcı madde olarak sınıflandırılmaz. Sürtünmeyi azaltmasının yanında yağlayıcı maddelerin diğer bazı görevleri de vardır. Isı çıkarımı, aşınma engelleyici, aşınma sonucu oluşan parçaların uzaklaştırılması, korozyon engelleme, biyolojik oluşumları engelleme yağlayıcı elamanın diğer önemli görevlerinden bazılarıdır. Yağlayıcı maddeler muhteviyatına eklenen ilave katkı maddeleri ile farklı özellikler kazanabilir [57].

Yağlayıcı madde tarafından ortamda gerçekleşen sürtünme kuvveti azaltılabilmektedir. İki tip yağlama mekanizması bulunmaktadır. Bunlardan ilki tam yağlayıcı olup hareketli yüzeyler birbirinden yağlayıcı madde tarafından tamamen ayrılır ve kontak kesilir. Hidrodinamik ve hidrostatik yağlama olarak daha sonra kendi içinde gruplanır. Hidrodinamik yağlamada filmin kalınlığı yüzeylerin birbirlerine göre olan rölatif hareketi tarafından belirlenir. Diğer taraftan hidrostatik yağlamada ise film kalınlığı dış basınçlandırma ile belirlenir. İkinci tip yağlama olan kısmi ya da eksik yağlamada ise yüzeyler birbiri ile temas edip kontak noktaları oluşturabilir [55, 57].

Sıvı yağlayıcılar için viskozite terimi büyük bir öneme sahiptir. Viskozite dinamik ya da kinematik olarak ifade edilebilmektedir. Dinamik viskoziteye mutlak viskozite de denilmektedir. Mutlak ya da dinamik viskozite kesme ya da kayma gerilmeleri sonucu akışkanın harekete karşı direncini ifade eder. Kinematik viskozite ise mutlak viskozitenin yoğunluğa oranını ifade eder. Alt tarafı sabit üst tarafı serbest halde olan katmanlardan oluşan bir akışkan düşünelim. Eğer üst yüzeye makaslama kuvveti uygulanırsa değişim hızının film tabakası kalınlığı oranıyla gösterilir ( Şekil 2.10.) [55].

<sup>7</sup> OECD Ekonomik Kalkınma ve İşbirliği Örgütü

Viskozite Eş. 2.3 ile tarif edilmektedir:



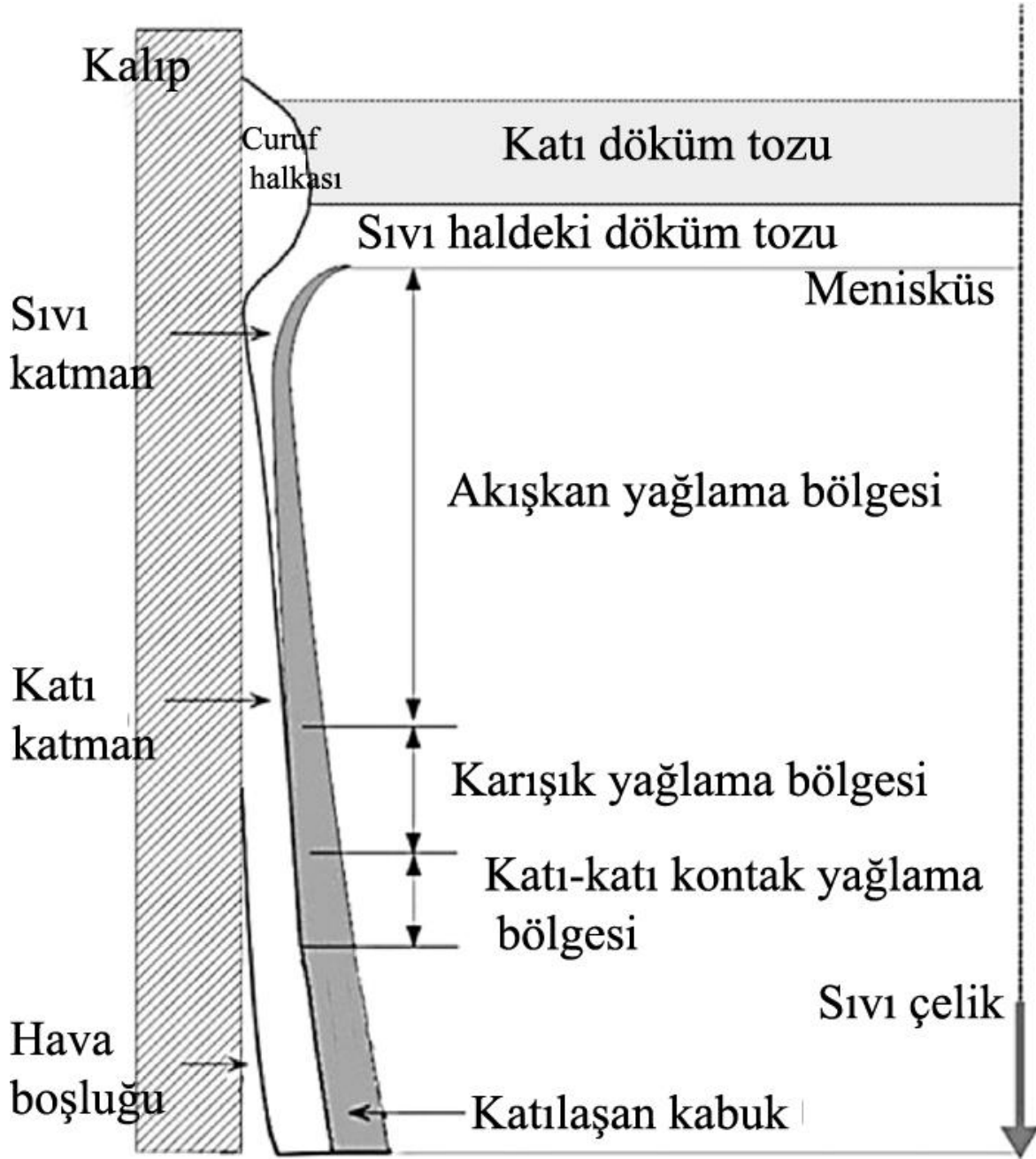
Şekil 2.10. Akışkan içerisindeki T kayma gerilmesi [55]

$$\text{Viskozite} = \frac{\left(\frac{\text{Kuvvet}}{\text{Alan}}\right)}{\left(\frac{\text{Uzunluk}}{\text{Zaman}}\right)/(\text{Uzunluk})} = \left(\frac{\text{Kuvvet}}{\text{Alan}}\right) \times \text{Zaman} \Rightarrow \text{Pa.s} \quad (2.3)$$

S/ birim siteminde mutlak viskozite Paskal.saniye (*Pa.s*) olarak ifade edilir. Bazı durumlarda Santipuzaz (*cP*) şeklinde de verilebilmektedir. 1 *cP*=0,001 *Pa.s* şeklinde eşitlik vardır. Kinematik viskozite mutlak viskozitenin yoğunluğa oranı olduğu daha önce belirtilmişti. Bu durumda birimi mm<sup>2</sup>/s olmaktadır [55].

Akışkanların viskozitesi sıcaklıkla birlikte düşer yani ters orantılıdır. Bu nedenle yağlayıcı madde seçiminde çalışma koşulları mutlaka göz önüne alınmalıdır.

Sürekli döküm prosesinde yağlayıcı madde olarak kullanılan döküm tozu oda sıcaklığında katı halde iken çelik üretim prosesi sıcaklığında (1500 °C) sırasında sıvı forma geçmektedir. Bu haliyle özellikle kalıbın üst bölgelerinde yağlayıcı madde olarak görev görmektedir. Kalıbın alt bölgelerinde ise soğuma nedeniyle sıvı haldeki döküm tozu bu bölgeye ulaşamamaktadır. Katılaştıran döküm tozu kalıp ile kabuk arasında yer almaktadır. Buna bağlı olarak katı katı kontak sonucunda sürtünme meydana gelmektedir (Şekil 2.11.) [42].



Şekil 2.11 Katılaşılan slab kabuğu ve kabuk arasında oluşan yağlama bölgeleri [42]

Kütük döküm prosesinde yağlayıcı malzeme olarak sentetik yağ veya döküm tozu kullanılabilir. Ancak slab üretim prosesinde yüzey alanının geniş olmasından ötürü yalnızca döküm tozu kullanılmaktadır. Hangi marka veya özellikte olursa olsun tüm döküm tozlarından beklenen belirli ortak özellikler bulunmaktadır. Sıvı çeliğin havayla temas eden üst yüzeyinin yeniden oksitlenmesini engellemek, menisküs bölgesinde termal izolasyon sağlayarak donmayı engellemek, kalıp ile katılaşılan yüzey arasına sızarak bu

bölgede oluşan sürtünmeyi azaltmak ve son olarak katılaştan kabuktan kalıba doğru olan ısı transferini kontrol etmek.

### 2.3. Kalıp Sürtünmesi Mekanizması ve Döküm Parametreleri İlişkisi

Slab belirli bir döküm hızı ile aşağı yönde ilerlerken salınım halindeki kalıp yüzeyi ile arasında bir sürtünme kuvveti oluşmaktadır. Bu olay sürekli döküm prosesi terminolojisinde kalıp sürtünmesi olarak adlandırılmaktadır. Kalıp içerisindeki sıvı çeliğin katılaşmaya başlamasıyla dış yüzeyinde bir kabuk meydana gelmektedir. Kalıbın üst bölgesinde sıvı çelik yüzeyine eklenen katı haldeki döküm tozu sinterleşip<sup>8</sup> eriyerek yani sıvı hale geçerek aşağı yönde hareket eden katılaşmaya başlayan kabukla kalıp arasına sızar. Sızan sıvı haldeki döküm tozu slab kabuğu ve kalıp arasındaki bölgeye sıvanır. İki katı yüzey (kalıp ve dışı katılaşmış slab kabuğu) arasına sızan sıvı haldeki döküm tozu burada oluşan sürtünme kuvvetinin büyüklüğünü belirler. Bu süreçte kalıpta aşağı ve yukarı yönde sürekli bir salınım hareketi yapmaktadır (Bkz. Resim 3.7.) [42].

Sürekli slab döküm kalıbında meydana gelen sıvı yada akışkan sürtünme kuvveti Eş. 2.4 ile ifade edilir [7, 58, 59]:

$$F_s = \frac{A \cdot \eta \cdot (V_k - V_d)}{d_s} \quad (2.4)$$

Döküm sürecinde iki plaka arasında gerçekleşen sıvı sürtünme kuvvetinin büyüklüğüne ( $F_s$ ) birçok döküm parametresi etki etmektedir. Toplam yüzey alanı  $m^2$  ( $A$ ), sıvı haldeki araya sızmış döküm tozunun viskozitesi  $Pa.s$  ( $\eta$ ) ve kalınlığı  $m$  ( $d_s$ ), kalıbın anlık hızı  $m/dk$  ( $V_k$ ), döküm hızı yani katılaştan slabın hızı  $m/dk$  ( $V_d$ ) birimleri ile ifade edilmektedir. Bu parametreler kalıp üst bölgesinde hüküm süren akışkan sürtünme mekanizmasına yön veren faktörlerdir. Ancak bu parametrelerde kendi altında birçok parametreye bağlıdır. Bir parametreyi değiştirmek başka bir parametrenin değişmesine neden olmaktadır.

Kalıbın üst bölgelerinde sıvı yağlama sürtünmesi hakimken kalıbın alt bölgelerinde sıvı cüruf tabakası erişemediğinden katı haldeki döküm tozu ve katı haldeki slab yüzeyi teması kurulur. Bu nedenle sürtünme kuvveti, sıvı haldeki yağlayıcı maddenin eksikliğinde bu

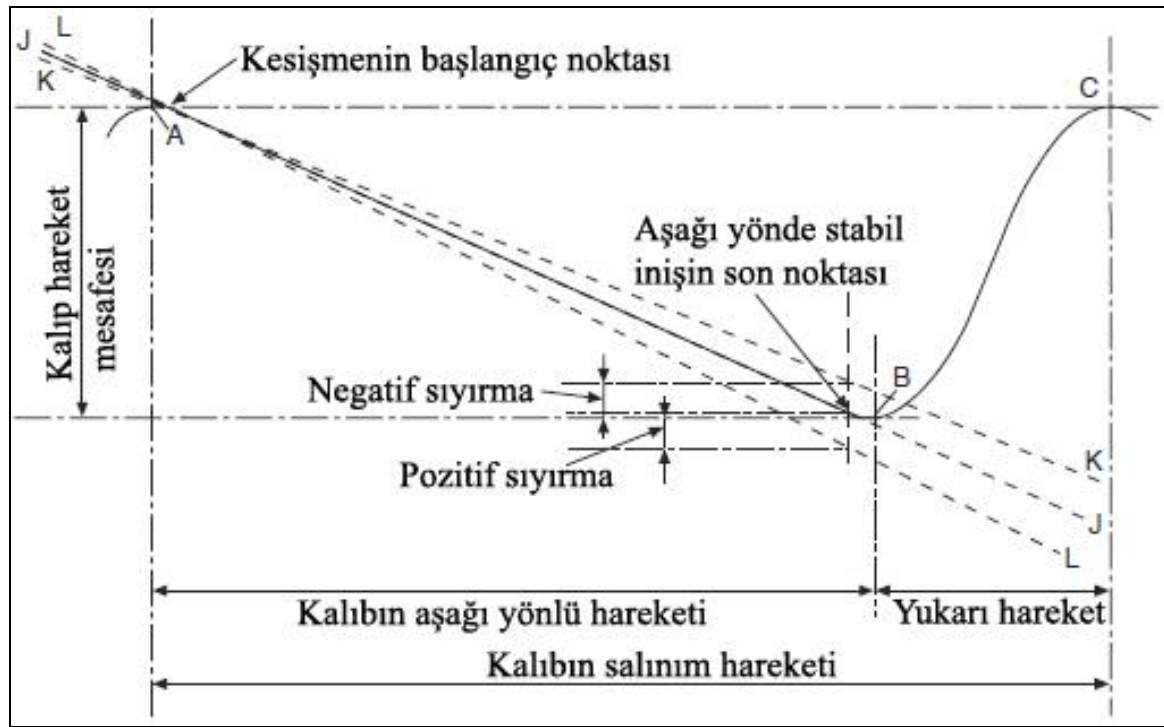
<sup>8</sup> Sinterleşme döküm tozunun ısı yardımıyla malzemenin birbirine erimeden bağlanması olayıdır.

bölgede artmaktadır. Katı-katı kontağı sonucu oluşan sürtünme Eş. 2.5'teki haliyle verilir [7, 58, 59]:

$$F_k = \eta_k \cdot H \quad (2.5)$$

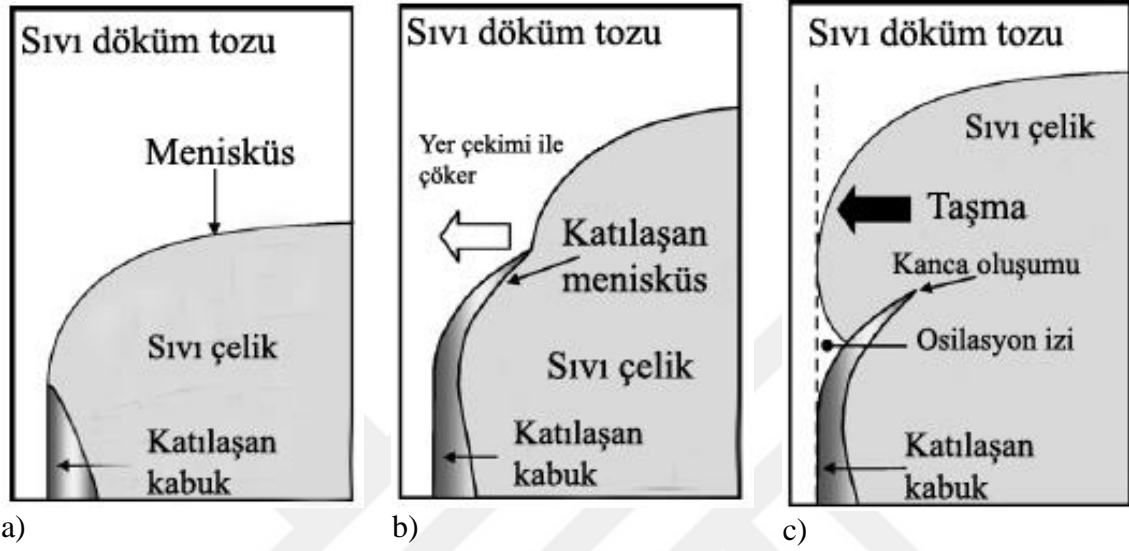
Katı yüzeyler arasındaki kontak sonucu oluşan sürtünme kuvveti ( $F_k$ ) kalıp içerisindeki sıvı çeliğin ferrostatik basıncına ( $H$ ) ve sürtünme katsayısı ( $\eta_k$ ) ile orantılıdır.

Tarihsel olarak erken dönem slab döküm makinelerinde hareketsiz, salınım yapmayan kalıpların katılaşıp kabuk ile kalıp bakır plakaları arasındaki ısı transferini iyileştirdiği düşünülüyordu. Hatta Jung-hans-Rossi tipi osilasyon hareketine sahip kalıplarda bile aşağı yönde harekette slab ve kalıbın hızı aynı oluyor ve toplam hareketin neredeyse  $\frac{3}{4}$  üne kadar uzanıyordu. Bu durum yağlayıcının (döküm tozu bu durumda) araya sızmasını engellerken, Halliday 'in geliştirdiği negatif sıyırma kavramı hareketli kalıp teknolojisinde büyük fark yarattı [1]. Buradaki fark diğer hareketli kalıplardan farklı olarak kalıp aşağı yönlü hareketinde belirli bir sürede kanal içindeki slabdan daha hızlı hareket ediyordu (Şekil 2.12.) [60].



Şekil 2.12. Halliday tarafından ortaya konan negatif sıyırma kavramı [60]

Kalıp seviye kontrolünün henüz olgunlaşmadığı bu dönemlerde negatif sıyırma kavramı slab yırtılmasının önlenmesi noktasında hayati bir değere kavuştu. Çünkü kalıp içerine tandışten akan sıvı çeliğin kontrol edilememesi seviye dalgalanmalarına neden olmakta ve nihayetinde menisküsteki taşmalardan ötürü kabuk oluşmaktadır (Şekil 2.13.) [61].

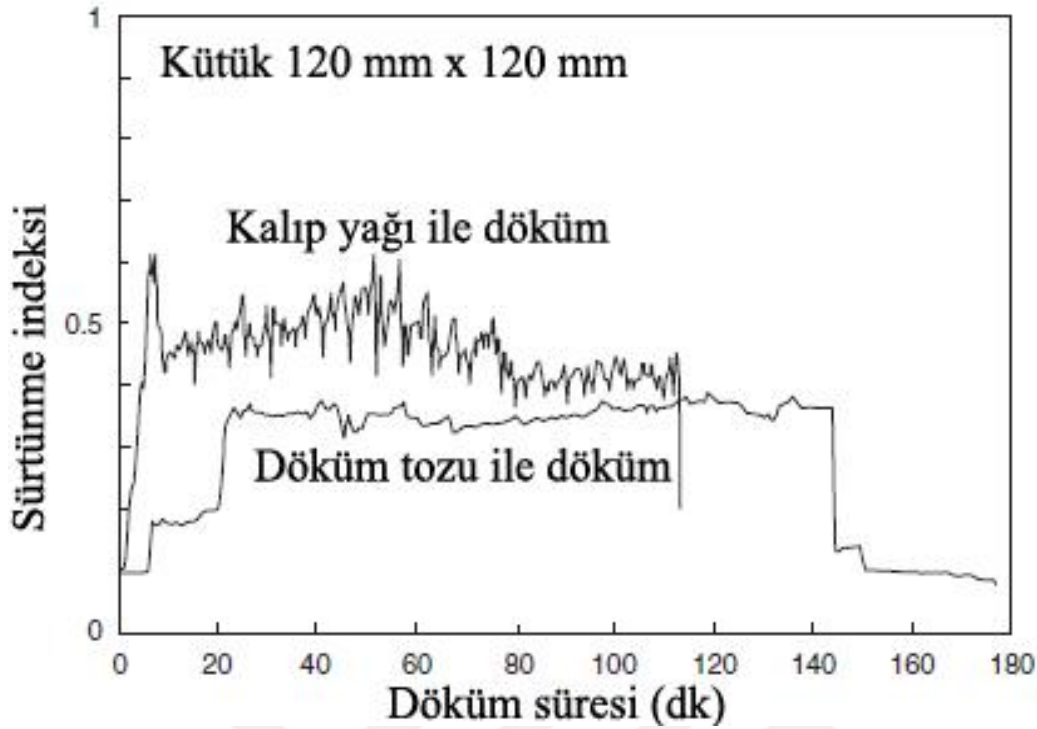


Şekil 2.13 Menisküsün katılma evreleri: a) normal durum b) menisküs katılması c) taşma durumu [61]

Taşmalardan kaynaklı menisküs seviyesindeki katılma bölgede kalıp sürtünmesinin etkisi ile yırtılmakta ve slab yırtılmalarına neden olmaktadır. Kullanılan yağın parlama noktası kalıp yüzey sıcaklığından düşük olduğu sürece yağlayıcı olarak yağ kullanılması biraz etkin bir çözüm olmuştur. Aksi halde yüzey sıcaklığı yağın parlamasına ve özelliğini yitirmesine neden olmaktadır. Bu ihtiyaçlar ince duvarlı kalıpların önünü açtı. Yine de döküm tozunun yağlayıcı eleman olarak kullanılması onun daha efektif olduğunu kanıtladı.

Şekil 2.14'te verildiği üzere döküm tozunun kullanımı sırasında oluşan kuvvetlerin daha stabil olması, düşük sürtünme kuvvetlerinin olduğu ortamı oluşturması ve yüzeyde kaliteyi artırması döküm tozunun önemini artırmıştır [62].

Döküm tozu muhteviyat olarak çoğunlukla % 40 CaO, % 30 SiO<sub>2</sub>, % 5 C ve kalan miktarları döküm tozunun özelliğine göre diğer oksitler oluşturur. CaO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> oranı ile baziklik oranı ifade edilir. Bu özellik onun ısı transfer özelliğini belirtmektedir.



Şekil 2.14. Döküm tozu ve yağın kalıp sürtünmesi yönüyle karşılaştırılması-kütük döküm [62]

Döküm tozuna geçilmesiyle birlikte kalıp seviye (Optik ya da radyometrik) sisteminin sıvı çelik üstündeki döküm tozu tabakasını ölçmede yetersiz kaldığı görüldü. Katı döküm tozu altındaki sıvı haldeki döküm tozu havuzunun belirli bir derinlikte istikrarlı halde kalması yeterli yağlama için büyük önem sahip olduğu anlaşılmıştır. Yağlamanın stabil olması bölgedeki sürtünme kuvvetlerinin belirli aralıkta olması için büyük önem taşımaktadır. Kalıp bakır plakaları ile katılan slab yüzeyi arasında meydana gelen sürtünme mekanizmasına birçok döküm parametresi etki etmekte olup bunlardan en önemlileri şunlardır:

- Çelik kalitesi(kimyasal analiz),
- Sıvı çelik sıcaklığı,
- Döküm tozu tipi,
- Daldırma nozulu ve pozisyonu,
- Kalıp salınımı karakteristiği,
- Kalıp seviyesi,
- Sıvı çelik akış paterni,
- Döküm hızı,
- Elektromanyetik karıştırıcı ve elektromanyetik frenleme,
- Kalıp konikliği,
- Kalıp - yüzey arası ısı transferi,
- Kalıp döküm sayısı,
- Kalıp- segment geçiş ölçüsü,

- Sürekli döküm makinesi tasarımı.

Kalıp içerisinde meydana gelen sürtünme olayının kompleks yapıda ve sürekli olarak değişmesinde dolayı akışkanın viskozitesi ve yüzey durumları ile hesaplanması mümkün değildir. Bu nedenle kalıbı hareket ettiren sehpanın hareket özellikleri incelenerek oluşan sürtünme kuvvetleri bulunulabilir.

Endüstriyel uygulamalarda farklı şekilde uygulamalar kullanılmaktadır [17, 33, 45]:

- Kalıp üzerine ivmeölçer konulup hesaplama yapılması,
- Elektrik motorlu sistemlerde motor gücünün ölçülmesi,
- Yük hücreleri kullanılması,
- Hidrolik osilasyon sehpasından gelen basınç geri beslemesi.
- Teknolojik ilerleme ve talep doğrultusunda yeni yöntemler de geliştirilmektedir.

Mevcut çalışmada ivmeölçer esaslı olmak üzere hidrolik osilasyon sehpasından gelen basınç geri bildirimini ile nihai sonuca ulaşılmış metot kullanılacaktır.

### 2.3.1. Döküm Hızı

Kalıp sürtünmesinin kalıp ile slab yüzeyi arasındaki etkileşimin sonucu olduğu çok iyi bilinen bir gerçektir. Bu etkileşime etki eden birçok parametre bulunmaktadır. Döküm hızı bunlar içinde önemli olanlarından biridir.

Döküm hızı çeliğin kalıp içerisinde birim zamanda çıkış hızını genellikle m/dk cinsinden ifade etmektedir. Kalıp içerisinde dıştan içe doğru katılaşmaya başlayan sıvı çelik sürekli dökümün sağlanması adına kalıp altından tahrikli röleler ile çekilmektedir. Proses açısından basit gibi gözükmesine rağmen belki de sürekli döküm prosesinde neredeyse her şeyi etkileyen en önemli parametre döküm hızıdır. Birim zamanda döküm hızı arttığı zaman aynı malzemeyi soğutmak için gerekli su miktarı da artacaktır. Katılaşma hızı değişeceğinden katılaşan çelik yapı içerisinde tane boyutu, makro ve mikro segregasyon şeklide değişecektir. Birim zamanda tüketilen sıvı çelik miktarı değişeceğinden döküm sıcaklığı da değişecektir. Kalıp içerisine giren malzemenin kontrolü zorlanacağından kalıp seviyesi de kontrol edilemeyecektir.

Döküm hızı arttığı zaman kullanılan döküm tozu miktarı artmasına rağmen birim yüzeye düşen yağlayıcı madde miktarı azalmaktadır. Nihayetinde döküm tozu tüketimi



azalmaktadır. Bundan ötürü kalıp ile katılmış çelik yüzey arasındaki yağlanma zayıflamaktadır. Bu durum sürtünmenin artmasıyla sonuçlanmaktadır. Eş. 2.4'te belirtildiği gibi döküm hızı ( $V_d$ ) artıkça pay büyüyeceğinden sürtünme kuvveti de artacaktır. Ayrıca döküm hızının artması sıvı cüruf kalınlığını azaltacağından Eş. 2.4'te payda küçülecektir, buna bağlı olarak oluşan sürtünme kuvveti küçülecektir.

Ayrıca yüksek döküm hızı daha küçük çekilme boşluğuna neden olacağından bu durum temas yüzeyinin artmasına diğer bir deyişle sürtünmenin artmasına neden olacaktır.

Döküm hızı ve kalıbın osilasyon şekli arasında çok sıkı bir ilişki vardır, kalıp içerisinde meydana gelen rölatif hareket yağlamaya doğrudan etki etmektedir. Kalıp hızı ve döküm hızı arasındaki etkileşim ayrıca osilasyon hareketi bölümünde incelenecektir.

### **2.3.2. Döküm Tozunun Kalıp Sürtünmesine Etkisi**

Döküm süresince daldırma nozulundan sıvı çelik kalıp içerisine aktarılırken kalıp içerisine dolan sıvı çeliğin yüzeyi atmosfere açık hale gelmektedir. Döküm süresince bir operatör yardımıyla yada otomatik bir ekipman vasıtasıyla döküm tozu slab döküm prosesinde kalıp üzerine eklenir. Çeliğin sıvı olduğu sıcaklıklarda temas yüzeyinde katı haldeki döküm tozu sıvı hale geçmektedir. Sıvı haldeki döküm tozunun üst tarafı ise yeni eklenen katı haldeki döküm tozuyla kaplıdır. Sıvı çelikle temas halindeki sıvı döküm tozu slabın aşağı yönlü hareketiyle birlikte kalıpla katılan çelik arasına sürekli olarak sızar.

Aşağı doğru kenarlardan akan döküm tozunun yerine sürekli olarak döküm tozu eklenmesi ve sıvı döküm tozu havuzunun belirli bir seviyede tutulması yeterli yağlama için gereklidir. Hem slabın aşağı yönlü hareketi hem de kalıbın osilasyon hareketi nedeniyle oluşan sürtünmenin belirli seviyede tutulması döküm tozunun en önemli görevlerinden biridir.

Döküm tozu slabın dış yüzeyinde katılmış kabuk ile kalıp duvarı arasındaki yağlamayı sağlayacak olan sıvı film tabakasını oluşturur. Döküm tozunun fiziksel ve kimyasal özelliklerinin kalıp sürtünmesi üzerinde çok büyük bir etkisi vardır. Döküm tozunun davranışı tozun viskozitesine, bazikliğine ( $\text{CaO/SiO}_2$  oranı), erime hızına ve bazı önemli (Erime, yumuşama) sıcaklık değerlerine bağlıdır.

Eş. 2.4'te görülebileceği üzere viskozite ( $\eta$ ) arttıkça kesirde payın büyümesine bağlı sürtünme kuvveti de artmaktadır. Kalıbın üst bölgelerinde akışkan sürtünmesi kuralları geçerli iken kalıbın bittiği bölgelerde kuru sürtünme kuralları geçerlidir. Çünkü bu bölgelere kadar sıvı haldeki döküm tozu ulaşamaz. Bu nedenle bu bölgede döküm tozunun viskozitesinden çok yüzey profili öne çıkmaktadır.

Döküm tozunun fiziksel ve kimyasal özelliklerinin dışında neredeyse tüm slab döküm parametreleri yağlamaya bir şekilde etki eder ve katkıda bulunur. Döküm hızı,  $Al_2O_3$  içeriği, osilasyon şekli vb. birçok parametre döküm tozunun davranışına etki eder. Diğer bir deyişle sıvı haldeki döküm tozu tüketimini değiştiren her parametre yağlamaya dolayısıyla sürtünmeye etkilidir. Kullanım noktasında ana ihtiyaç olarak; sıvı cüruf havuzu - erime dengesi, iyi bir cüruf sızması ve ısı transferinin kontrolü öne çıkmaktadır.

Bazı durumlarda potadan tandişe geçen cüruf buradan kanala geçebilmektedir. Özellikle döküm sonlarında tandiş seviyesinin düşmesine bağlı tandiş içerisinde birikmiş olan cüruf kanala girebilmektedir. Bu durum kanal geçen cürufün miktarına bağlı olarak döküm tozunun viskozite gibi özelliklerini değiştirmektedir. Bu durum döküm tozunun yağlama özelliğini istenmeyen yönde değiştirme dolayısı ile kalıp ile katılaşmakta olan kabuk arasındaki sürtünmeyi artırmaktadır. Bu durum slab yırtılması denilen olaya kadar gidebilmektedir [63].

### **2.3.3. Salınım Karakteristiğinin Kalıp Sürtünmesine Etkisi**

Kalıbın aşağı ve yukarı yönde osilasyon hareketi yapması kalıp ve slab arasında rölatif bir hareketin oluşmasına neden olmaktadır. Kalıp hareketi bir sinüs fonksiyonu oluşturmaktadır. Sinüs dalgasının karakteristiği sıvı cürufün sızma şekline(döküm tozu) diğer bir deyişle yağlamaya etki edip sürtünmeyi düşürmektedir.

Yağlama açısından kalıbın aşağı yukarı hareketi sırasında 2 önemli faz bulunmaktadır. Her bir fazın uzunluğu yağlamaya etki etmektedir. Kalıbın 1 tam çevriminde kalıbın rölatif hareketinden kaynaklı kalıp sürtünmesi de iki farklı fazda değişmekte sabit kalmamaktadır.

İlk faz ( $t_N$ ) negatif sıyırma zamanı olarak isimlendirilmektedir. Bu evrede kalıp içerisindeki sıvı cüruf kalıp duvarı ile katılmış kabuk arasına sızmaktadır. Bu süre boyunca ( $t_N$ ) katılmış slab kabuğuna pozitif yönlü basma kuvveti uygulanmaktadır. Negatif sıyırma zamanı Eş. 2.6 ile ifade edilir:

$$t_N = \left( \frac{60}{\pi \cdot f} \right) \cdot \arccos \left( \frac{V_d}{\pi \cdot h \cdot f} \right) \quad (2.6)$$

$$t_{toplam} = t_P + t_N \quad (2.7)$$

Kalıbın birim zamandaki çevrim sayısı  $f$  ( $dk^{-1}$ ), kalıbın aşağı ve yukarı yönde hareketi sırasında aldığı mesafe  $h$  (m), döküm hızı ise  $V_d$  (m/dk) ile gösterilmiştir.

Diğer evre ise ( $t_P$ ) pozitif sıyırma zamanı olarak isimlendirilmektedir. Eş. 2.7’de verildiği gibi toplam çevrim süresinde geriye kalan bölgeyi ifade etmektedir. Bu evrede katılmış kabuğa daha önceden sızmış olan sıvı cüruf ile birlikte çekme kuvveti uygulanır. Kalıbın 1 çevrim süresi içinde negatif sıyırma zamanı dışında kalan zaman dilimidir. Sürekli döküm tesislerinde genellikle bu süre toplam çevrim süresinin % 60-80 arasında bir değer almaktadır.

Negatif sıyırma zamanı kalıbın hızının döküm hızını geçtiği noktada başlayıp kalıbın yavaşlaması sonrası döküm hızına eşitlendiği noktada sonlanmaktadır (Şekil 2.6.). Bu süre boyunca kalıp aşağı yönde hareket etmekte olup iyileşme zamanı olarak da isimlendirilmektedir. Bu zaman diliminde kalıp, katılan kabuk yüzeyine çekme kuvveti yerine basma kuvveti uygulamaktadır. Sürekli döküm tesislerinde genellikle bu süre toplam çevrim süresinin % 20-40 arasında bir değer almaktadır. Referans olması bakımından % 34 değeri slab döküm tesislerinde sıklıkla kullanılan bir orandır.

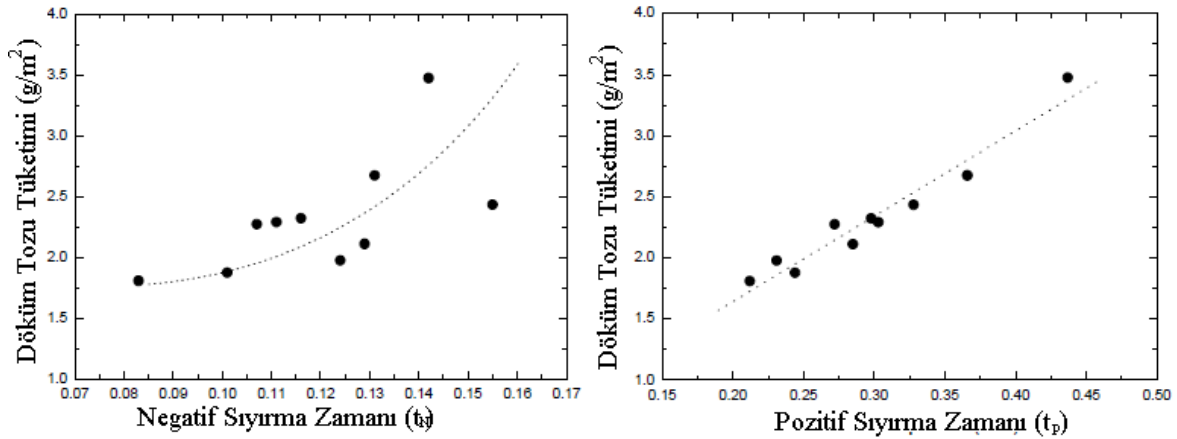
Basit sinüs hareketi yapan kalıplarda sinüs eğrisi 2 parametre belirlemektedir (Eş. 2.8):

$$V_k = h \cdot \pi \cdot f \cdot \cos(2\pi ft) \quad (2.8)$$

Bunlardan ilki kalıbın hareketi sırasında aldığı mesafeyi ( $h$ ) diğeri ise frekansdır ( $f$ ).  $V_k$  ise kalıbın anlık döküm hızını ifade etmektedir. Mesafe birimi mm frekans ise  $dk^{-1}$ ’dir. Kalıp hızı ise m/dk cinsinden ifade edilmektedir. Bu iki parametre ( $h$ ,  $f$ ) ile sinüs

eğrisi dolayısıyla negatif sıyırma zamanı ve pozitif sıyırma zamanları ve oranları değiştirilebilir. Dolayısıyla döküm tozunun içeri sızma miktarı ile kalıpla slab arasındaki rölatif hız değişmiş olacaktır. Şekil 2.15'te değişen  $t_N$  ve  $t_P$ 'lere bağlı döküm tozu tüketimi verilmiştir [64].

Bununla birlikte literatürde salınım frekans, strok ve modifikasyon oranının döküm tozu tüketimine etkisinde fikir birliğine varılamamıştır. Proseste çok farklı değişkenlerin olması ortak bir görüş birliğine varılmasını güçleştirmektedir [36]. Döküm tozu tüketimi araya sızan akışkan döküm tozu kalınlığını etkilediğinden doğrudan bölgedeki kalıp sürtünmesini de etkilemektedir. Ancak yaygın görüş frekansla ters, strok ve bozulma oranı ile doğru orantılı olduğudur.

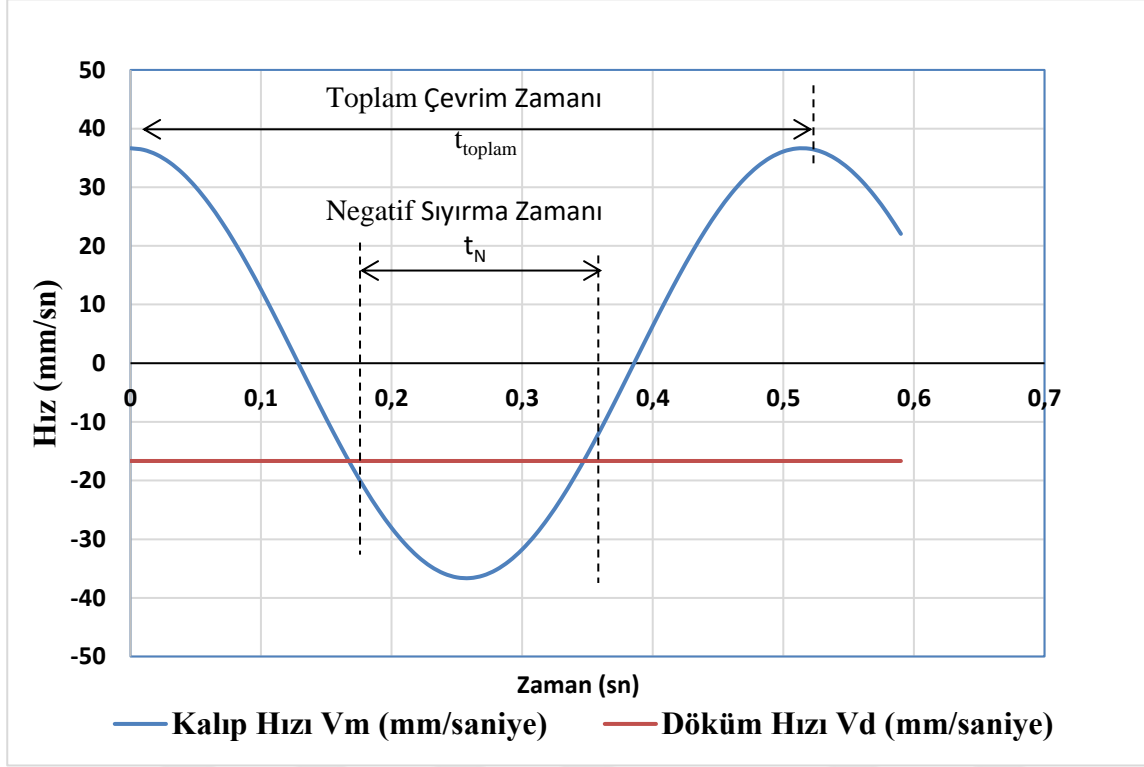


Şekil 2.15. Negatif ve pozitif sıyırma zamanına bağlı döküm tozu tüketimi [64]

Nihayetinde kalıpla slab arasındaki sürtünme etkilenmiş olacaktır. Döküm tozunun tüketim hızı erime hızından fazla olursa kenarlardan yeterince yağlayıcı madde sızamaz ve sürtünme artar. En kötü senaryoda slab yırtılmasına ya da diğer bir deyişle kanamaya neden olur. Tersisi durumda ise yani erime hızı tüketim hızından fazla olursa kalıpta toz fazlalığı oluşur ve buda dengesiz toz katılaşmalarına sebep olur.

Döküm hızı 1 m/dk olan, 6 mm strok mesafesinde frekansı 117 dk-1 olan slab döküm kalıbının hız eğrisi ve buna karşılık gelen negatif sıyırma zamanı eğrisi Şekil 2.16'da görülebilir. Sinüs eğrisi çizen kalıp ile sabit döküm hızı altındaki slab etkileşiminde negatif sıyırma zamanı ( $t_N$ ) 0,18 sn olarak gerçekleşmiştir.

Yağlayıcı madde durumundaki döküm tozunun kalıp hareketi sırasında kalıpla katılan kabuk arasına sızma mekanizması konusunda fikir birliğine varılmış değildir.



Şekil 2.16. Kalıbın aşağı ve yukarı yönlü bir çevrim hareketi sırasında oluşturduğu negatif ( $t_N$ ) sıyırma zamanı

Bazı döküm tesislerinde  $h$  ve  $f$  parametrelerinin dışında 3. parametrenin kullanımına imkân sağlanmıştır. Burada kalıbın hareketi sırasındaki hızı değiştirilerek sinüs eğrisi dışında farklı eğrilerin elde edilmesi sağlanır. Dolayısı ile farklı sürtünme şartları oluşturulmuş olur. Bu 3. parametreye bozulma ya da modifikasyon oranı ( $\alpha$ ) denir. Normal sinüs eğrisini izleyen slab döküm tesislerinde kalıbın aşağı ve yukarı yönde çıkış hızları bir birine eşittir. Ancak gelişen teknoloji ile kalıbın bir çevrim içinde aşağı ve yukarı yöndeki hızı değiştirilerek farklı döküm pratikleri elde edilebilmektedir.

#### 2.3.4. Çelik Kimyasal Analizinin Kalıp Sürtünmesine Etkisi

Kalıp içerisindeki sürtünmenin davranışı çeliğin kimyasal içeriği ile doğrudan ilgilidir. Özellikle slab döküm prosesinde karbon oranı büyük öneme sahiptir. Yüksek sürtünme kuvveti ve büyük dalgalanmalara özellikle peritektik çelik kalitelerinde katılma sonrası hızlı faz dönüşümü nedeni ile rastlanmaktadır. Yüksek karbonla birlikte sürtünmenin daha

stabil olduğu görülmektedir. Buna rağmen bazı araştırmalarda bunun tersi duruma da rastlanmaktadır.

Demir karbon ikili faz diyagramında özellikle %0,08 ile %0,23 karbon içeren çelikler peritektik faz dönüşümünün yaşandığı aralığı kapsamaktadır. 3 fazın (sıvı çelik,  $\delta$  ferrit<sup>9</sup> ve östenit<sup>10</sup>) bir arada temas halinde olduğu sıvı ve ferrit fazın östenite dönüştüğü reaksiyonu kapsamaktadır. Bu gruba giren çelikler katılaşıırken oluşan büzülmeyle ilaveten peritektik faz dönüşümünden kaynaklı büzülmede içerirler. Bu nedenle diğer kalite çeliklere göre daha fazla çekilme oluştururlar [65]. Bu durum kabukla kalıp arasında boşluk oluşturacağından kalıp içerisindeki sürtünme kuvvetlerini de etkilemektedir. Çekilme çok ani ve dengesiz olduğundan yüksek kalitede üretimi özel koşullar altında yapılabilmektedir.

Sıvı haldeki çelik ve sıvı haldeki ergimiş döküm tozu birbiri ile sürekli olarak etkileşim halindedir. Ergimiş döküm tozuna ait; viskozite, baziklik, katılma sıcaklığı bölgedeki sürekli etkileşim nedeni ile çeliğin kimyasına bağlı olarak değişebilmektedir. Akışkan içeriğindeki  $Al_2O_3$  miktarındaki değişim sıvı döküm tozunun katılma sıcaklığı, viskozitesini ve bazikliğini değiştirmektedir. Diğer bir deyişle çeliğin kimyasal içeriği sıvı haldeki döküm tozunun yağlama özelliğini değiştirmektedir. Kalıp ile kabuk arasına kalıbın hareketi nedeni ile sürüklenmiş sıvı film tabakası sürtünmeyi kontrol ederken katılmış olan döküm tozu tabakası ise ısı transferini kontrol etmektedir (Bkz. Şekil 2.4.)

Sıvılaştıran malzeme ve çelik arasındaki dinamik etkileşim nedeni ile ortamın kontrolü son derece güç hale gelmektedir.

### 2.3.5. Kalıp Boyutsal Ölçülerinin Kalıp Sürtünmesine Etkisi

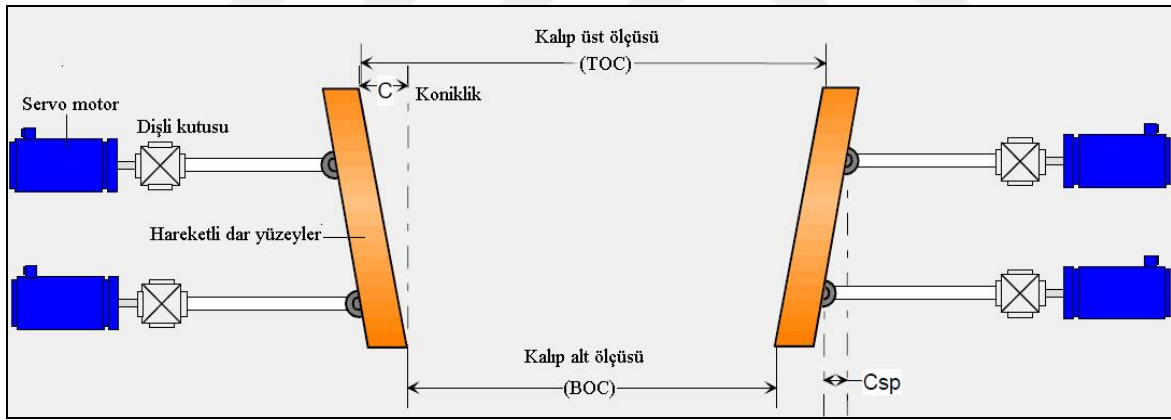
Kalıp içerisinde kalıp ile katılmış kabul arasındaki etkileşimin büyüklüğü doğrudan temas yüzeyi ile orantılı değildir. Daha çok temas halindeki yüzeylerin durumu ile alakalıdır. Ancak tüm yüzey durumu sabit tutulduğunda artan yüzey alanının sürtünme kuvvetini artıracığı düşünülebilir. Slab kalıp genişliği herhangi bir nedenle (sipariş durumu, müşteri talebi, tesis farklılığı vb.) büyüdükçe hareket halindeki yüzey alanı artacaktır. Teorik olarak diğer faktörler sabit tutulduğunda temas yüzeyinin artmasına bağlı

<sup>9</sup> Yüksek sıcaklıkta kararlı olan demir fazı.

<sup>10</sup> Çeliklerde 912 °C ile 1394 °C arasındaki demir karbon fazı.

kalıp ile katılaşmış kabuk arasındaki sürtünme de artacaktır. Ancak deneysel bazı çalışmalar bunun tersi bazı durumların da olduğunu göstermiştir [21].

Sıvı haldeki çelik katılaşmaya başladığında kimyasal içeriğine bağlı olarak çekilmekte yani hacmi azalmaktadır. Özellikle kalıbın dar yüzeylerinin görece daha uzun olmasından ötürü katılaşma sonucu oluşan çekilme boşluğunun uygun miktarda döküm tozu ve kalıp konikliği ile desteklenmesi gerekmektedir. Aksi halde en kötü senaryoda uygunsuz yağlamaya bağlı olarak sürtünmenin artışından kaynaklı yırtılma olayı meydana gelebilmektedir. Dar yüzeylerdeki koniklik döküm tesisin özelliklerine bağlı olarak otomatik ya da manuel ayarlanabilmektedir (Şekil 2.17.) [6]. Teknolojik gelişmelere bağlı olarak kalıpların koniklik özellikleri de değişmektedir. Lineer koniklik yerine çoklu koniklik seviyelerinde kalıplar da üretimdeki yerini zamanla almaktadır. Yapılan çalışmalar göstermiştir ki katılaşma hızı kalıp boyunca aynı seviyede devam etmemektedir. Katılaşma hızında farktan dolayı çekilme boşluğu değişeceğinden yeni döküm makinelerinde çoklu koniklik uygulaması hızla pazardaki payını yükseltmektedir.



Şekil 2.17. Slab kalıp ölçüleri ve dar yüzey konikliği [6]

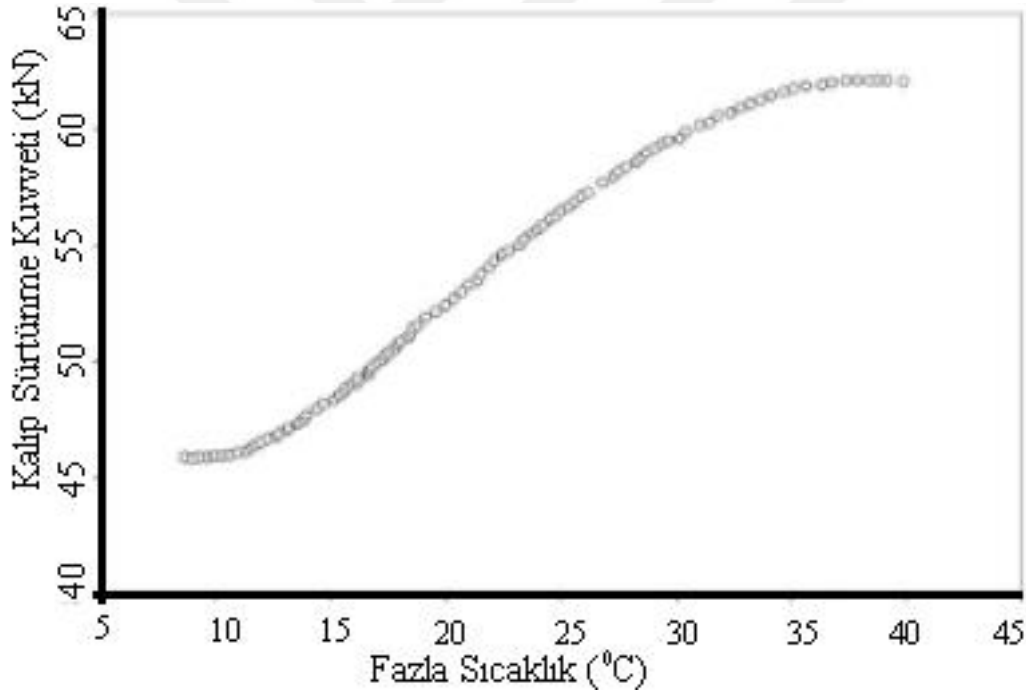
Kalıbın üst genişliği ve alt genişliği arasındaki farka koniklik denilmektedir. Genellikle %1 civarı koniklik sıvı çeliğin katılaşması sırasındaki çekmeyi telafi etmek için uygulanmaktadır. Örneğin genişlik 1000 mm ise 10 mm koniklik uygulanır. Yani kalıbın alt yüzeyi arasındaki mesafe 990 mm olarak döküm alınmaktadır.

Dünya genelinde kullanılan farklı türde konikliğe sahip kalıplar bulunmaktadır: tekli, çoklu, parabolik, müşteriye özel. Kalıp içerisinde konikliğin gerekenden fazla ayarlanması yağlamanın azalıp sürtünmenin aşırı artmasına neden olacağı iyi bilinen bir gerçektir.

Diğer taraftan yetersiz koniklik yetersiz ısı transferi sağlayıp uygunsuz katılaşmaya yol açacaktır.

### 2.3.6. Sıvı Çelik Sıcaklığının Kalıp Sürtünmesine Etkisi

Sıvı haldeki çelik yoğunluk ve derinliğine bağlı olarak kabuktan kalıp yüzeyine doğru Ferrostatik basınç uygulamaktadır. Çeliğin fazla ısısının yüksek olması durumunda katılaşmış kabuk kalınlığı incelediğinden ferrostatik kuvvet nedeni ile kabuk yüzeye daha fazla itilecektir. Bu nedenle aynı şartlar altında daha yüksek sıcaklığa sahip sıvı çelik geç katılma nedenine bağlı olarak daha yüksek sürtünme kuvvetine neden olacaktır. Tata Steel firmasında yapılmış bir çalışma sonucuna göre sıvı çelik sıcaklığı ile kalıp sürtünmesi arasındaki ilişki Şekil 2.18’de verilmiştir [17].



Şekil 2.18. Sıvı çelik sıcaklığının kalıp sürtünme kuvvetine etkisi [17]

Çelik sıcaklığı ayrıca döküm tozunun viskozitesini de değiştirmektedir. Buna bağlı olarak kalıp içerisindeki yağlamanın davranışı da değişecektir.



### 2.3.7. Kalıp Seviyesinin Kalıp Sürtünmesine Etkisi

Sıvı çeliğin kalıp içerisindeki seviyesi kalıp sürtünmesi yüzey alanından ötürü ilişkilidir. Kalıp seviyesi yükseldiğinde yani kalıp içerisindeki sıvı çelik doluluğu arttığında kalıp yüzeyi ile temas eden yüzey artacaktır. Ancak daha önceki bölümlerde belirtildiği gibi sürtünme kuvvetini asıl artıran öge görünür yüzey alanından çok temas eden yüzeylerinin fiziksel özelliğidir. Bununla birlikte kalıp seviyesinin artması ferrostatik basıncı artıracığından kabuğun yüzeye daha fazla itilecek dolayısıyla sürtünme artmış olacaktır. Ferrostatik basınç kalıp içerisindeki sıvı çeliğin derinliğine bağlı olarak yer çekimi nedeniyle katılaştan kabuğa uyguladığı basınçtır.

Bununla birlikte ani döküm hızı değişimi ya da kalıp-kabuk boşluğuna giren sıvı cürufun homojenliğini bozan etkenler kalıp seviyesinde dalgalanmalara neden olabilmektedir.

Eğer sıvı cüruf film tabakası kalıp yüzeyine eşit ve orantılı dağılmaz ise yüzeyde eşit olmayan yağlama ve buna bağlı olacak farklı kalınlıkta kabuk oluşacaktır. Bu durum en kötü senaryoda slab yırtılmasına neden olabilmektedir.

Daldırma nozulundan (SEN) çıkan sıvı çelik akış şeklinin çifte-halka denilen yapıda olması optimum döküm şartı için gereklidir. Su modelleri göstermektedir ki kalıp yüzeyindeki çeliğin hızı ve kalıp seviyesindeki dalgalanma bu akış şeklinde küçülmektedir. Tıkanma, Argon gazı enjeksiyonu, daldırma nozulu (SEN) dizaynı ve kalıp içerisindeki pozisyonu, tandiş akış kontrol elemanının cinsi ve kabiliyeti (stoper, sürgü sistemi ), tandiş içerisindeki sıvı çeliğin yüksekliği, elektromanyetik kuvvetler kalıp içerisindeki sıvı çelik akışını etkileyen diğer bazı önemli parametrelerdir. Akış şeklinin kontrol edilmesi dolaylı yoldan sürtünmeyi de etkilemektedir.

Kalıp seviye kontrolünün ölçümü noktasından bakıldığında elektromanyetik ölçüm yöntemi radyometrik (Co60 izotopu) ölçüm yönteminden daha iyi sonuçlar verdiği bilinmektedir. Bu durum doğal olarak yağlamanın dolayısıyla sürtünmenin istikrarlı olmasını sağlamaktadır.

### 2.3.8. Kalıp Tasarımın Kalıp Sürtünmesine Etkisi

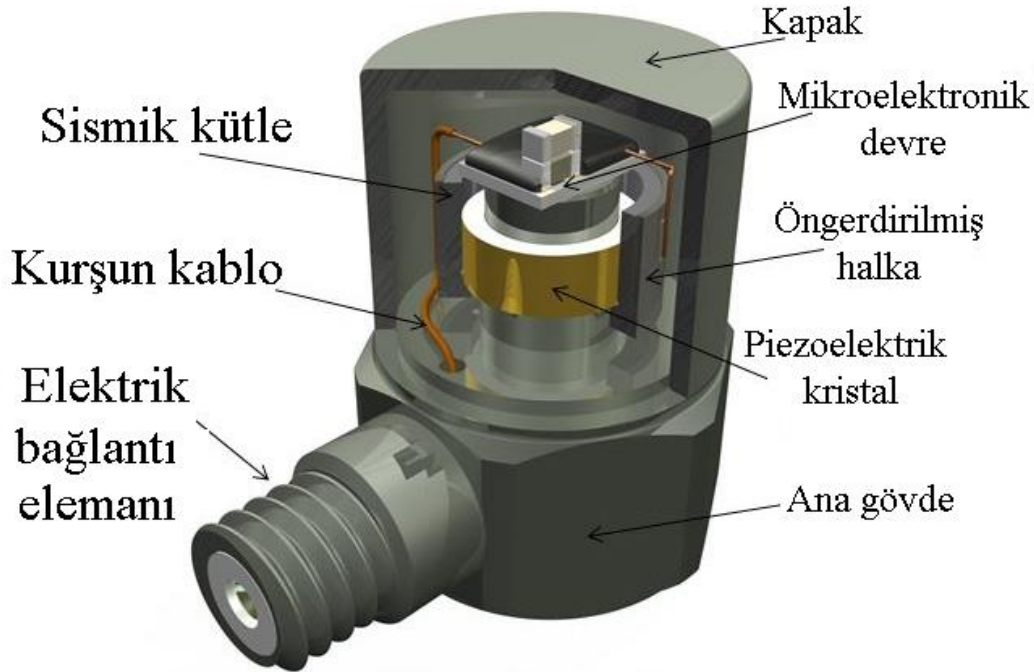
Sıvı çelik içerisindeki ısının alınması kalıp içerisinde geçen soğutma suyu ile yapılmaktadır bu su sürekli olarak belirli kimyasal ve fiziksel özellikte akmaktadır. Suyu ait debi, basınç, kimyasal analiz, sıcaklık sıvı çelikten ısı çıkarımını kontrol eden özelliklerdir. Ayrıca osilasyon yapan ekipmanın toplam kütlesi, kalıbın yüzey kaplaması, ekipmanların hizalanmasındaki ayarsızlıklar, hareketli parçaların bakım durumu, osilasyon hareketi yapan ekipmanlardaki yayın özelliğine bağlı olarak fazla yada az iş yapılmasını sağlayarak sürtünmeye etki etmektedir. Bunlar aynı tesis içinde sürekli değişiklik göstermediğinden farklı tesisler için karşılaştırma yaparken bu faktörlerin göz önüne alınması uygun olacaktır. Özellikle deneme yürütülmesi noktasında kalıp özelliklerini değiştirmek potansiyel sonuçları itibari ile fazla riskli olduğundan deneme kapsamına alınmamıştır. Katılma sırasında sürtünme yükselmesine bağlı olarak slab yırtılması (kanama) olayı meydana gelirse tüm sıvı çelik makine içerisindeki ekipmanlara akabilmektedir.

### 3. YÖNTEM

#### 3.1. Yöntem

Slab formunda katılaşmakta olan sıvı çelik ile kalıp arasındaki etkileşimin kalıp sürtünmesini meydana getirdiği Bölüm 2 'de detaylı olarak verilmiştir. Burada meydana gelen sürtünme kuvveti ivmeölçer esaslı bir metot kullanılarak yapılmaktadır. 4 adet ivmeölçer kalıbı hareket ettiren sehpa üzerine monte edilmiştir. Çalışmada 3 eksenli ivmeölçer kullanılmıştır.

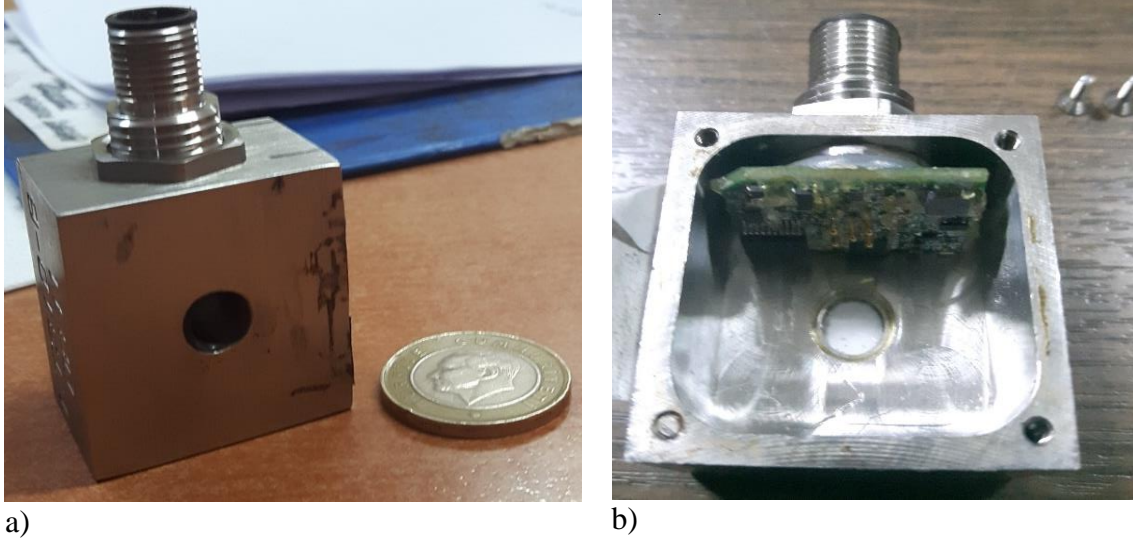
İvmeölçerler prensip olarak sismik bir kütle ve piezoelektrik<sup>11</sup> malzemeden meydana gelmektedir (Resim 3.1.) [66]. En dışta ekipmanı toz, su vb çevresel etkilerden koruyacak bir hazne vardır.



Resim 3.1. Tipik bir ivmeölçer ve elemanları [66]

Kalıbın aşağı yukarı yönlü hareketi ivmeölçer içinde hareket eden sismik kütlenin piezoelektrik malzemeye kuvvet uygulaması sonucu gerilim oluşmasını sağlar. Oluşan bu gerilimden kablo vasıtasıyla bir panoya aktarılır ve sinyaller gürültülerden arındırılmak üzere filtrelenir. Sistemde kullanılan ivmeölçer Resim 3.2'de verilmiştir.

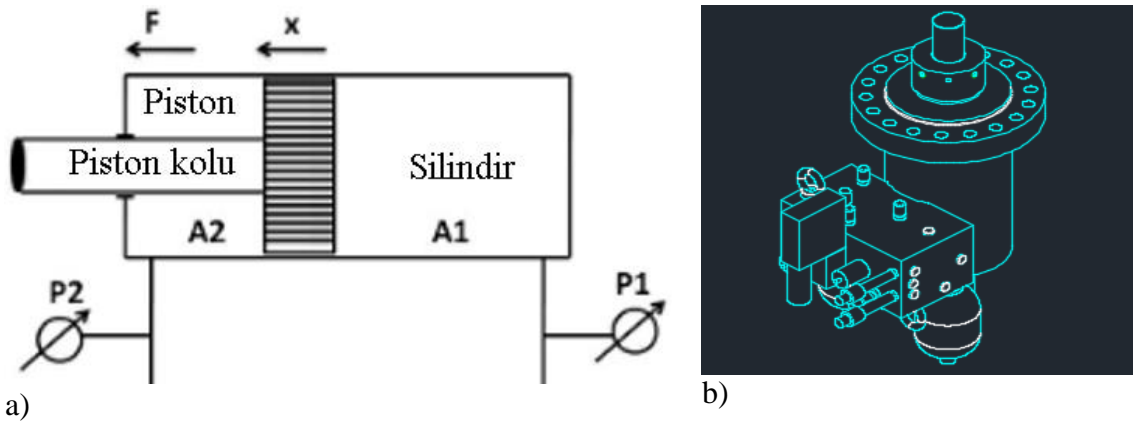
<sup>11</sup> Üzerine yük uygulandığında gerilim üreten yarı iletken malzeme.



Resim 3.2. Çalışmada kullanılan ivmeölçerin a) dış ve b) iç görünüşleri

İvmeölçerler kalıp üzerinde hareket halinde iken genellikle 2,5 Volt gerilim üretmektedirler.

İvmeölçer ile benzer şekilde osilasyon sehpasını hareket ettiren hidrolik silindirdeki giriş ve çıkış basınçları elektrik sinyaline dönüştürülerek aynı panoya iletilir (Şekil 3.1.) [6].

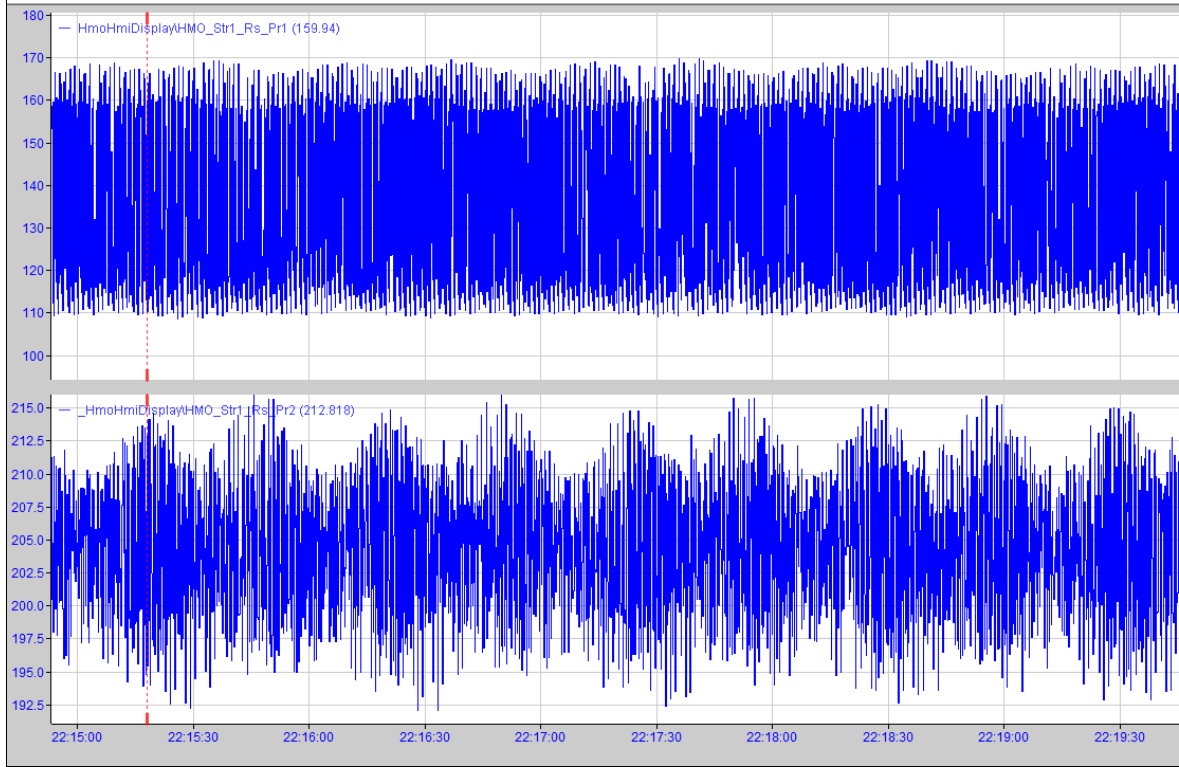


Şekil 3.1. Osilasyon silindirine ait a) şematik çizim ve b) resim

Daha sonra sistem bilgisayarına hesap yapılmak üzere veriler iletilir. Sisteme ait bilgisayar birimi sahadan gelen ivmeölçere ait bilgiler ile basınç bilgilerini işleyerek sürtünmeye dönüştürür. Silindir içerisinde uygulanan kuvvet aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$F_{\text{silindir}} = P1.A1 - P2.A2 \quad (3.1)$$

$P1$  ve  $P2$  silindir içerisindeki odaların basıncını gösterirken  $A1$  ve  $A2$  i ise pistonlara ait yüzey alanını gösterir. Şekil 3.2’de sisteme ait analiz bilgisayarına çevrimiçi gelen  $P1$  ve  $P2$  basınç değerlerinin bar cinsinden örnek değerleri görülmektedir. Görülebileceği üzere kalıbın kütlesi nedeniyle aşağı ve yukarı yönde ihtiyaç duyulan basınç farklılık göstermektedir. En küçük 108 bar değeri görülürken en yüksek ana hat basıncı olan 216 bar görülmüştür.



Şekil 3.2. Hidrolik silindirden gelen basınç verileri

Soğuk test denilen dökümün olmadığı durumda sistem boşta çalıştırılarak sistemin döküm olmadan önceki ne kadar sürtünme yaptığı kayıt edilir. Aslında dökümün olmadığı durumlarda slabda olmayacağı için kalıp içerisinde bir sürtünme gerçekleşmez. Ancak hareketli makine elemanlarının kontak noktalarındaki sürtünme kuvveti etkisini döküm şartlarında elimine etmek için soğuk durumdaki makine elemanlarına bağlı sürtünme kuvveti hesaplanır. Döküm durumunda bu değer hesaplanan değerden çıkarılarak net sürtünme elde edilmiş olur. Buradaki değer doğrudan sürtünme kuvvetini vermemektedir. Elde edilen bu değer ivmeölçer yardımıyla elde edilen kuvvet hesabı içerisinde kullanılmaktadır. Newton’un 2. yasasına göre:

$$\Sigma F = m \cdot a \quad (3.2)$$

Burada  $\Sigma F$  kalıbı hareket etmek için gerekli toplam kuvveti ifade ederken  $a$  kalıbın sensörler ile ölçülen ivmesini gösterir. Toplam kütleye karşılık  $m$  ise hidrolik yardımıyla salınım yaptırılan tüm kütleleri ifade eder. Bunlar; kalıp, osilasyon sehpası, kalıp içerisinden geçen su gibi alt elemanların toplam ağırlığından oluşur. Pratik olarak kalıp içerisinde slabın etrafından akan sıvı haldeki döküm tozunun fiziksel ve kimyasal özellikleri tam olarak bilinemeyeceği için dolaylı yoldan sürtünmenin hesaplanması işletmeler için büyük kolaylık sağlamaktadır.

Özetle kalıbın hareketi sırasındaki oluşan ivme bilgisi ve hareketli toplam kütle bilindiğinden Newton'un 2. Yasasına göre kuvvet hesaplanır. Daha sonra kalıbı hareket ettiren hidrolik silindirdeki basınç değişimi de bilindiğinden döküm varken ve yokken uygulanan kuvvet bir önceki ifade de kullanılır ve sistemin hareketi için kullanılan net kuvvet Newton cinsinden ifade edilmiş olur. Sonucun pozitif olması basma, negatif yönlü olması ise çekme yönünde sürtünme kuvveti oluştuğunu göstermektedir.

Bakır kalıp ile katılaştıran slab yüzeyi arasında oluşan sürtünme kuvvetinin daha iyi anlaşılabilmesi için değerlendirmeler aşağıda detayları verilen 2 farklı sonuç üzerinden yapılmıştır. Tüm değerler Newton biriminden olacak şekilde ayarlanmıştır. Kalıp üzerinde 4 ayrı ivmeölçer bulunmaktadır. Tüm ivmeölçerler ayrı ayrı veri toplamaktadır. Konuyu basitleştirmek adına yalnızca bir sensörden gelen veriler baz alınarak çalışma sürdürülmüştür.

Deneyleerin yürütüldüğü slab döküm makinesinin teknik özellikleri Çizelge 3.1'de verilmiştir. Her deney öncesinde sabit değişkenler tablo şeklinde verilmiştir.

Çizelge 3.1. Slab döküm makinesi teknik özellikleri

<b>Makine Özelliği</b>	<b>Açıklama</b>
Makine tipi	Dikey eğimli
Kalıp boyu	900 mm
Kalıp tipi	Dikey

Çizelge 3.1. (Devam) Slab döküm makinesi teknik özellikleri

Kalıp ölçüleri	1 000 - 2 050 mm arası değişken genişlik
Slab boyu	5 000 – 12 000 mm
Ebat değişimi	4 servo motorlu çevrimiçi ebat değişimi
Osilasyon tipi	Yaprak yaylı hidrolik osilasyon
Osilasyon kapasitesi	2,2 – 7,0 mm arası strok boyu 50 – 350 çevrim/dk frekans
Segment sayısı	13
İkincil Soğutma	Hava ve su karışıklı
Tahrikli role	14 adet tahrikli motor
Makine kontrol şekli	PLC

Slab döküm kalıbı aşağı ve yukarı yönde sürekli hareket etmektedir. Bu sayede sıvılaşılan döküm tozu kalıp ile katılana yüzey arasından sızmakta ve yağlayıcı görevi görmektedir. Döküm sırasında bu hadiseler cereyan ederken yüzeyler arasında sürtünme kuvveti oluşmaktadır. Kalıbın hareketi sırasında 1 sn içinde oluşan sürtünme kuvvetlerine ait veri setinden daha önceden belirlenmiş algoritmaya göre atamalar yapılır.

Elde edilen veriler Minitab® 18.1 istatistiksel veri analizi programı kullanılarak yorumlanmıştır. Elde edilen veriler ışığında regresyon analizi yapılmıştır. Regresyon eşitlikleri verilerek ilişki ortaya konulmuştur. Regresyon istatistik biliminde girdi ile çıktı arasında ilişki kuran model olarak tanımlanabilir. Regresyon sonucunda elde edilen matematiksel denklemin gücü  $R^2$  değeri ile ölçülür.  $R^2$  değeri büyüdükçe girdi ile çıktı arasındaki ilişki o kadar büyük demektir. Bazı durumlarda lineer ilişki varken bazı durumlarda ikinci dereceden ilişkiler yakalanabilmektedir.

Tanımlayıcı istatistik verileri deney sonucunda elde edilen verilere uygulanmıştır. Sonuçlar çizelgelerde paylaşılmıştır. Ortalama, standart sapma, minimum, maksimum,  $Q1$   $Q3$  değerleri çizelgelerde belirtilmiştir. Ortalama değeri tüm verilere ait aritmetik ortalamayı; standart sapma verilerin ortalama etrafındaki dağılımını; minimum ise veri setindeki en küçük değeri; maksimum değeri ise veri setindeki en büyük değeri ifade

etmektedir.  $Q1$  ve  $Q3$  değerleri sırasıyla veri setindeki ilk çeyrek ve 3. çeyrekteki verileri ifade etmektedir.

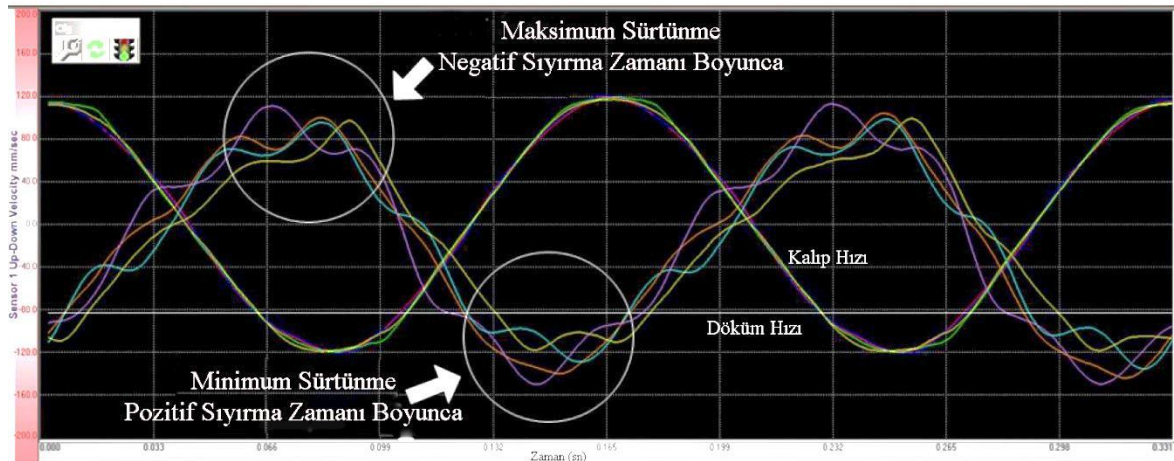
Deneyle 2 farklı sürtünme kuvvetine ait değerinin karşılaştırılması ile yürütülmüştür. Bunlar sırasıyla negatif sıyırma süresindeki maksimum sürtünme ve pozitif sıyırma süresindeki minimum sürtünme değerleridir. Büyüklüklerin pozitif ve negatif olmaları onların maksimal yani elde edilen değerlerin en uç noktaları olduğu anlamına gelmektedir.

### 3.1.1. Negatif Sıyırma Süresindeki Maksimum Sürtünme Kuvveti

Kalıp aşağı yönde hareket ederken döküm hızını geçtiği andan itibaren negatif sıyırma zamanı başlamış olur. Kalıp yavaşlamaya başlayıp döküm hızından daha yavaş edinceye kadar geçen bu süreye negatif sıyırma zamanı olarak isimlendirilir. Bu süre içerisinde kalıp ile katılan yüzey arasında hesaplanan en büyük sürtünme kuvveti değeri Negatif Sıyırma Süresindeki Maksimum Sürtünme Kuvveti olarak atanır ve arşivlenir (Şekil 3.3.)

### 3.1.2. Pozitif Sıyırma Süresindeki Minimum Sürtünme

Kalıbın osilasyon hareketi sırasında negatif sıyırma zamanı dışında kalan zamana pozitif sıyırma zamanı denir. Bu süre boyunca elde edilen en küçük sürtünme kuvveti değeri Pozitif Sıyırma Süresindeki Minimum Sürtünme Kuvveti olarak atanır ve arşivlenir (Şekil 3.3.) [6]



Şekil 3.3. Sinüsoidal hareket eden kalıbın bir çevrim süresi içindeki negatif ve pozitif sıyırma zamanlarındaki sürtünme kuvvetleri [6]

Deney tasarımı kurulan kalıp sürtünmesine etki eden faktörlerden döküm hızı, slab kalıp genişliği, döküm tozu, kalıp seviye oranı ve kalıp osilasyon strok mesafesi kullanılarak



yapılan deneye ait veriler ve sonuçları paylaşılmıştır. Bununla birlikte diğer faktörleri de içeren genel bir değerlendirme sonuç kısmında yapılacaktır.

### 3.1.3. 1. Deney: Döküm Hızının Kalıp Sürtünmesine Etkisi

Döküm hızı kütük, slab, blum olmak üzere tüm döküm makinelerindeki en temel ve önemli faktörlerden birisidir. Döküm hızı bir dakikada makineden çıkan slabın boyunu ifade etmektedir. Buradaki değişim birim zamanda tüketilen döküm tozu miktarını, kalıp içerisindeki kabuğun kalınlığını, ikincil soğutmanın hızını, kalıp osilasyon frekansını doğrudan etkilemektedir. Deney sırasında sabit tutulan değişkenler Çizelge 3.2’de verilmiştir.

Çizelge 3.2. Deneyde kullanılan sabit değişkenler

Sabit Değişkenler	Değer
Çelik kimyasal analizi	%0,05 C, %0,02 Mn
Döküm Tozu	A marka
Kalıp ölçüleri	1230 mm genişlik
Kalıp dar yüzey konikliği	%1,0
Kalıp seviyesi	%75
Kalıp strok mesafesi	6,5 mm

### 3.1.4. 2. Deney: Slab Kalıp Genişliğinin Kalıp Sürtünmesine Etkisi

Slab kalıp genişlik ölçülerinin sürtünme üzerine olan etkisi incelenmiştir. Kalıp genişliği sabit olup 225 mm’dir ve hiçbir şekilde değiştirilememektedir. Kalıp genişliği 4 adet servo motor yardımıyla döküm sırasında müşteri isteği doğrultusunda değiştirilebilmektedir. Bu kapsamda Çizelge 3.3’de verilen sabit döküm şartlarında 1230 ve 1280 mm olmak üzere 2 farklı kalıp genişliğinde sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Çizelge 3.3. Deneyde kullanılan sabit değişkenler

Sabit Değişkenler	Değer
Çelik kalitesi	%0,046 C, %0,024 Mn
Döküm tozu	A marka
Döküm hızı	1,4 m/dk
Kalıp dar yüzey konikliği	%1,0
Kalıp seviyesi	%75
Kalıp strok mesafesi	5,5 mm

### 3.1.5. 3. Deney: Döküm Tozu Değişiminin Kalıp Sürtünmesine Etkisi

İşletmelerde içeriği değişen farklı tipte döküm tozları kullanılmaktadır. Döküm tozu cinsi ve çeliğin kimyasal analizi arasında belirli sınırlamalar olduğu için deney yalnızca 2 döküm tozu ile sınırlı tutulmakla beraber sonuçlar döküm tozunun kalıp sürtünmesi üzerindeki etkisinin anlaşılması için yeterli sonuçları vermektedir. Seçilen 2 marka döküm tozu dünya pazarında lider konumundaki firmalarca üretilmekte ve yoğun olarak kullanılmaktadır.

Farklı firmaya ait farklı özelliklerde döküm tozu Çizelge 3.4’de verilen sabit döküm koşullarında denenmiştir.

Çizelge 3.4. Döküm tozu deneyinde kullanılan sabit değişkenler

Sabit Değişkenler	Değer
Çelik kalitesi	%0,09 C,
Kalıp ölçüleri	1280 mm genişlik
Kalıp dar yüzey konikliği	%1,0
Döküm hızı	1,0 m/dk
Kalıp seviyesi	%75
Kalıp strok mesafesi	5,5 mm

Kalıp ile katılaşılan kabuk arasına sızarak bölgedeki sürtünme mekanizması kontrol eden döküm tozları sürekli döküm parametreleri içinde çok önemli bir yere sahiptir. Yağlama özelliğinin dışında ısı transferi hızını da kontrol ederek çatlak oluşumunda önemli bir yere sahiptir. Özellikler peritektik grup çeliklerin üretiminde döküm tozu seçimi önemli bir yere sahiptir. Döküm tozu seçiminde viskozite, baziklik oranı ve erime sıcaklığı belirleyici teknik özellikler olarak öne çıkmaktadır. Bahsi geçen özelliklerin dışında elek analizi değeri, kimyasal içerik, yığın yoğunluğu, termal iletkenlik, yansıma özelliği döküm tozlarına ait önemli özelliklerdir. Ancak ticari uygulamalarda bu veriler çoğunlukla paylaşılmaz. Bunun yerine araştırma geliştirme uygulamalarında kullanılır.

Ticari isimlerini vermemek için firmalara ait tozlar A ve B olarak isimlendirilmiştir. Çalışma sırasında döküm prosesinde kullanılan döküm tozlarına ait teknik özellikler Çizelge 3.5’de verilmiştir:

Çizelge 3.5. Denemelerde kullanılan farklı tipte döküm tozlarına ait özellikler

<b>Döküm Tozu</b>	<b>1300 °C’deki Viskozite (Pa.s)</b>	<b>CaO/SiO<sub>2</sub> Oranı (Baziklik Oranı)</b>	<b>Erime Noktası (°C)</b>
A	0,22	0,85	1100
B	0,20	1,21	1195

### 3.1.6. 4. Deney: Kalıp Seviye Değişiminin Kalıp Sürtünmesine Etkisi

Sıvı çeliğin kalıp içerisindeki doluluk miktarının bir göstergesi olan kalıp seviye yüzdesi bir çok bakımdan önemlidir. İlk katılaşmanın miktarı ve karakteri bu aşamada gerçekleşir. Denemelerde iki farklı kalıp seviyesi ile çalışılmış ve sonuçlar incelenmiştir. Çalışma Çizelge 3.6’da verilen sabit döküm koşullarında yürütülmüştür.

Çizelge 3.6. Kalıp seviye oranı deneyinde kullanılan sabit değişkenler

<b>Sabit Değişkenler</b>	<b>Değer</b>
Çelik kalitesi	%0,15 C, %1,3 Mn

Çizelge 3.6. (Devam) Kalıp seviye oranı deneyinde kullanılan sabit değişkenler

Kalıp ölçüleri	1755 mm genişlik
Kalıp dar yüzey konikliği	%1,0
Döküm hızı	1,2 m/dk
Döküm tozu	B marka
Kalıp strok mesafesi	5,0 mm

### 3.1.7. 5. Deney: Kalıp Osilasyon Strok Mesafesinin Kalıp Sürtünmesine Etkisi

Kalıbın aşağı ve yukarı yönlü sürekli hareketi sırasında kalıbın aldığı mesafenin sürtünme kuvveti üzerine etkisi incelenmiştir. 2 farklı strok değerinde deneme yürütülmüştür. 5,0 mm ve 6,5 mm değerleri diğer döküm şartları sabit (Çizelge 3.7.) tutulurken karşılaştırılmıştır.

Çizelge 3.7. Kalıp osilasyon strok mesafesi deneyinde kullanılan sabit değişkenler

Sabit Değişkenler	Değer
Çelik kalitesi	%0,10 C
Kalıp ölçüleri	2015 mm genişlik
Kalıp dar yüzey konikliği	%1,0
Döküm hızı	1,0 m/dk
Döküm tozu	B marka
Kalıp seviyesi	%75

#### 4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bazı faktörler teorik olarak ele alınmış ve deneysel çalışmalar tesis imkânlarından dolayı yapılamamıştır. Bununla birlikte tüm faktörler hakkında önceki çalışmalarda elde edilen bulgular paylaşılmıştır. Tüm bunlara ilave olarak tesisteki çalışanların tecrübesi bu alanlarda paylaşılmıştır. Sensör teknolojilerinin gelişmesine ve uygulama alanlarının artmasına paralel ilişkiler daha net kurulabilecektir. Teknolojik gelişmelere paralel çevrimiçi izleme sistemleri ile tesislerdeki tüm ekipmanların mevcut durumlarının izlenmesi tam faktöriyel testlerin yapılmasına imkân sağlayacaktır.

Çeliğin kimyasal içeriği, kalıp konikliği, sıvı çelik sıcaklığı, kalıp özellikleri de farklı zorunluluklardan dolayı deney tasarımına dâhil edilememişlerdir. Sırasıyla döküm hızı, kalıp genişliği, döküm tozu cinsi, kalıp seviye oranı, kalıp osilasyon strok mesafesi deney tasarımı yapılabilen değişkenlerdir. Deneysel çalışma 5 aşamada yürütülmüştür.

Bununla birlikte osilasyon şeklinin belirleyen kalıp frekans değeri hız ile doğrudan bağıntılı olduğundan ayrıca deney tasarımı proses güvenliği nedeniyle yapılamamıştır. Çünkü döküm hızı ile frekans arasındaki ilişki bozulduğunda negatif sıyırma zamanı ve pozitif sıyırma zamanları bozulduğundan kanama riski ortaya çıkmaktadır. Benzer durum non-sinüsoidal harekete sebep olan bozulma oranı içinde geçerlidir.

Sürekli salınım halindeki kalıp ile katılaştıran slab kabuğu arasındaki etkileşim sonucu oluşan sürtünme kuvvetinin ölçümü amaçlı yürütülen çalışmadan bazı problemlerle karşılaşmıştır. Çalışma ortamı yüksek sıcaklık, buhar, korozif etkiler gibi çok ağır şartlar altında olduğundan ekipmanların servis ömrü kısalmaktadır (Resim 4.1.). İvmeölçerlerin kullanılacak ortama göre izolasyon özelliği artırılmaktadır. Doğal olarak ölçüm yapılacak eksen sayısı, ekipman hassasiyeti ve koruma özellikleri ivmeölçerlerin maliyetini değiştirmektedir.



a)



b)

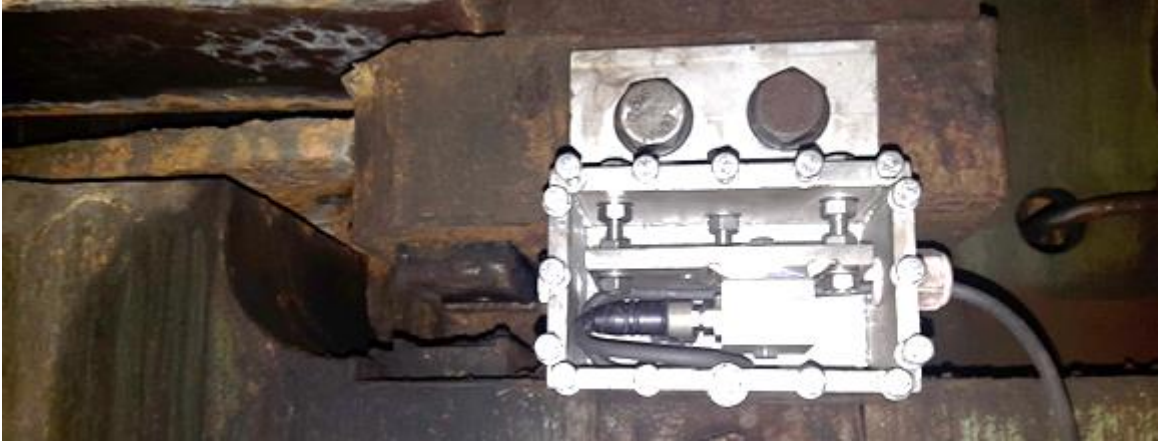
Resim 4.1. Zor koşullara maruz kalan a) ivmeölçer ve b) basınç ölçüm sensörleri

Denemeler sırasında zor çalışma koşulları nedeniyle bölgede ivmeölçer ve basınç sensörleri sürekli arızalanmakta ve ciddi maliyetler oluşturmaktaydı. Ancak yapılan iyileştirmeler ile ivmeölçer kapalı bir hazne içerisine konulmuş ve sensörler buhar, korozif etkiler ve diğer toz gibi dış etiklerden korunmaya çalışılmıştır (Resim 4.2.).



Resim 4.2. İvmeölçeri koruyucu paslanmaz çelik kutu

Ancak bir süre sonra bu korumanın da yeterli olmadığı görülmüş ve daha farklı bir koruma zırhı imal edilerek sensörler osilasyon sehpası üzerine monte edilmiştir (Resim 4.3.).



Resim 4.3. Yeni tip koruyucu kutular ve montaj aşaması

Benzer şekilde basınç zor şartlar altında çok sık arızalanan basınç transdüseri bölgeden uzaklaştırılmış ve servis ömrü uzatılmıştır (Resim 4.4.).

İvmeölçer sensörler belirli aralıklarla kalibre edilmelidirler. Aksi halde yanlış sonuçlar ortaya koyabilmektedirler. Bu aralık ekipmanın maruz kaldığı çevresel koşullarla yakından ilgilidir.



Resim 4.4. Çalışma bölgesinden uzaklaştırılan basınç sensörleri

Bununla birlikte sensörlerden gelen kablolar başka enerji hatlarından uzak tutulması gerekmektedir. Harici güç kaynakları kablo üzerinde gürültü yaratarak sinyalde bozulmalara ve yanlış hesaplara yol açabilmektedir.

Burada hesaplanan değerin niceliği belirli bir hata payını içermektedir. Bu değeri farklı bir tesisin verileri ile kıyaslamak okuyucuyu hataya götürecektir. Burada önemli olan sistemin kendi içinde kıyaslama yapmaya imkân tanınmasıdır. Çünkü sürtünmeye etki eden bir parametre a firmasında kullanılmazken b firmasında kullanılabilir ve sonuçlar tamamen farklı çıkabilir. Yine de aynı tesis içinde kıyaslama yapmak kaydıyla hesaplamada kullanılmayan bir parametre diğer tüm karşılaştırmalarda olmayacağı için sorun teşkil etmeyecektir. Bu da döküm hızı artırmada, parametre optimizasyonunda ve yeni malzeme denemelerinde önemli bir yere sahiptir.

Firmaların kalıp sürtünme kuvveti hesapları know-how içerdiğinden teorik olarak nasıl yapıldığı bilinmesine rağmen hesaplamaların tüm detaylarına hakim olmak mümkün görünmemektedir.

Deney tasarımları tam faktöriyel olacak şekilde yürütülemediği. Yani tüm parametrelerin birlikte değiştiği deney tasarımları işletme mecburiyetlerinden dolayı yapılamamıştır. Proses ve kalite güvenliği açısından yalnızca belirli parametreler üzerinden deneyler tasarlanmıştır.

Döküm hızı, kalıp genişliği, döküm tozu cinsi, kalıp seviyesi, kalıp strok mesafesi deney tasarımı yapılabilen değişkenlerdir. Döküm hızı hariç diğer faktörlerin sürekli değişmesi yerine yalnızca 2 adet olmasına bağlı dağılım grafiği kullanılmamış bunun yerine aralık dağılım grafiği tercih edilmiştir. EKLER bölümünde deneysel çalışmalarda kullanılan verilerin zaman eksininde dağılımı ayrıca verilmiştir.

Bununla birlikte osilasyon şeklinin belirleyen kalıp frekans değeri hız ile doğrudan bağıntılı olduğundan ayrıca deney tasarımı proses güvenliği nedeniyle yapılamamıştır. Çünkü döküm hızı ile frekans arasındaki ilişki bozulduğunda negatif sıyırma zamanı ve pozitif sıyırma zamanları bozulduğundan kanama riski ortaya çıkmaktadır. Benzer durum non-sinüsoidal harekete sebep olan bozulma oranı içinde geçerlidir.



Çeliğin kimyasal içeriği, kalıp konikliği, sıvı çelik sıcaklığı, kalıp özellikleri de farklı zorunluluklardan dolayı deney tasarımına dâhil edilememişlerdir.

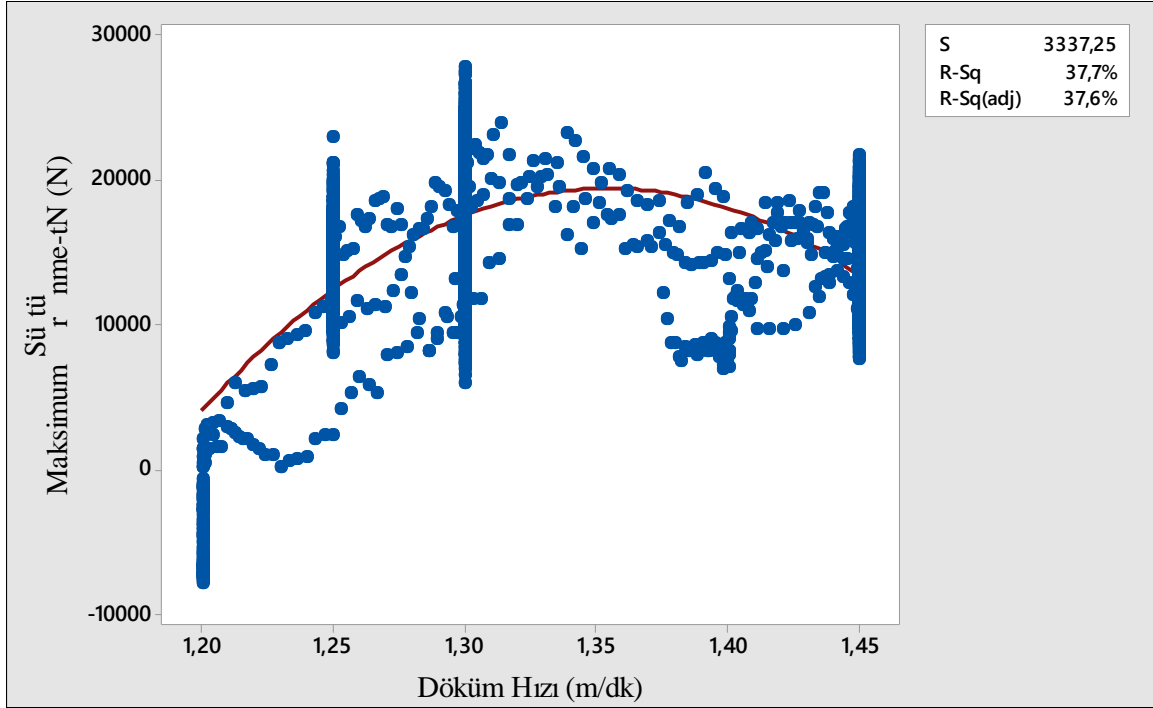
1. deney sonrasında görüldüğü üzere döküm hızı ile kalıp sürtünme mekanizması arasında doğrudan ilişki olduğu görülmüştür.

Çizelge 3.2'deki sabit değişkenler kullanılarak yapılan deneme sonucunda elde edilen verilerin tanımlayıcı istatistik verileri Çizelge 4.1'de sunulmuştur.

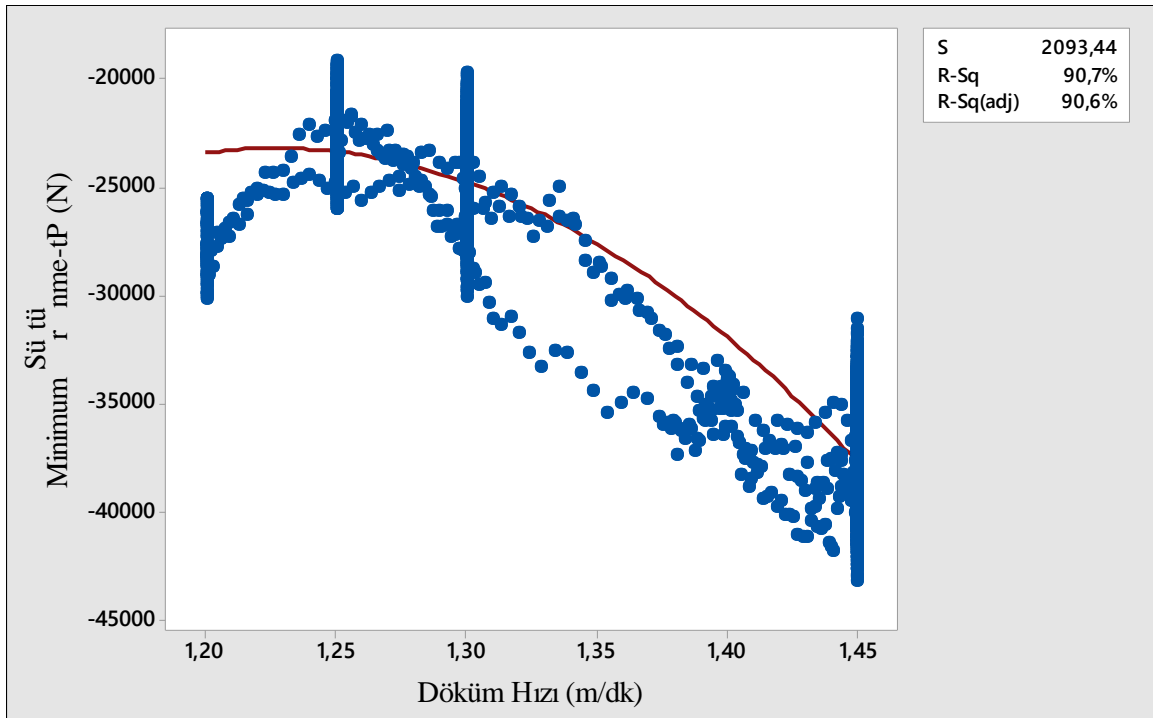
Çizelge 4.1. Tanımlayıcı istatistik verileri

Değişken	Ort.	St. Sapma	Min.	Q1	Q3	Mak.
Döküm Hızı (m/dk)	1,3412	0,0865	1,2000	1,2500	1,4500	1,4500
Maks. Sürtünme- $t_N$ (N)	14518	4226	-7837	12251	16867	27863
Min. Sürtünme- $t_p$ (N)	-29160	6846	-43174	-36265	-23264	-19133

Deney sonrasında döküm hızı değişime bağlı elde edilen maksimal sürtünme kuvvetleri Şekil 4.1 ve Şekil 4.2 'de verilmiştir. Ayrıca her bir grafik içinde elde edilen regresyon modelinin grafiği üzerinde kırmızı çizgi ile gösterilmiş ve regresyon modelinin  $R^2$  değeri grafik yanında verilmiştir.



Şekil 4.1. Döküm hızının maksimum sürtünme kuvvetine ( $t_N$  negatif sıyırma süresi boyunca) etkisi



Şekil 4.2. Döküm hızının minimum sürtünme kuvvetine ( $t_P$  pozitif sıyırma süresi boyunca) etkisi

Buna göre negatif ve pozitif sıyırma zamanlarındaki maksimal sürtünme kuvvetlerine ait regresyonlar aşağıdaki denklemlerle ifade edilir:

$$F_N = - 1167510 + 1753051.V_d - 647268.V_d^2 \quad (4.1)$$

Eş. 4.1'de  $F_N$  negatif sıyırma süresindeki maksimum sürtünme kuvvetini ifade etmektedir.  $V_d$  ise döküm hızına karşılık gelmektedir. Görülebileceği üzere ikinci dereceden bir bağıntı elde edilmiş ve %37,65  $R^2$  (Bkz. Şekil 4.1.) elde edilmiştir.

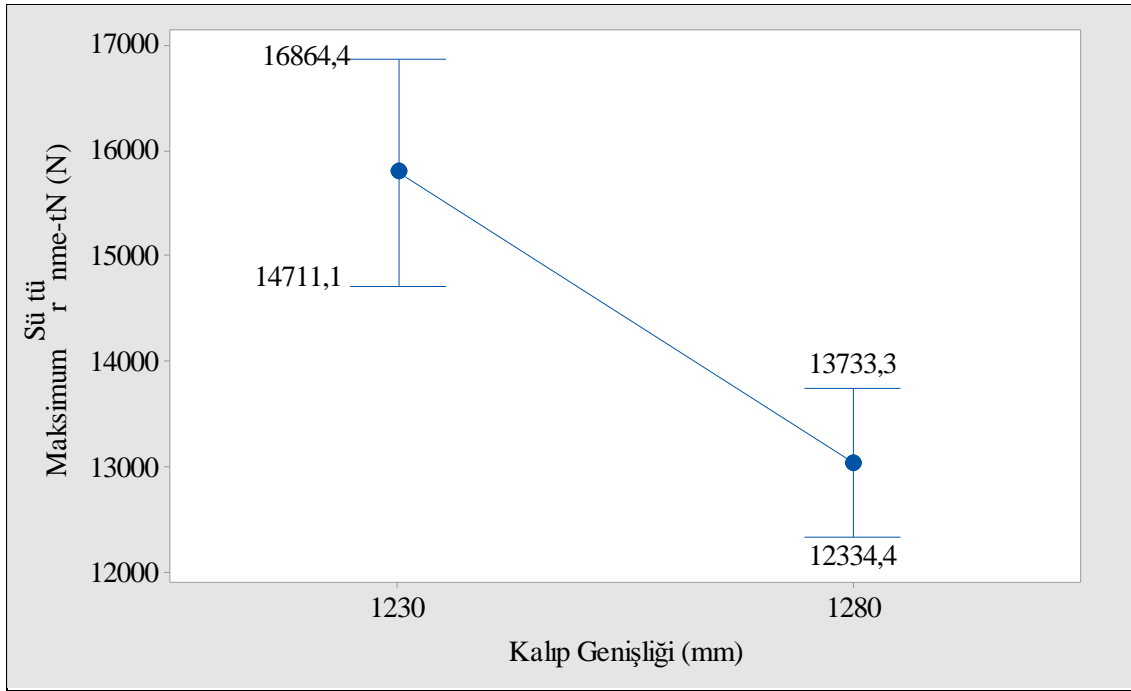
$$F_P = - 461604 + 714576.V_d - 291172.V_d^2 \quad (4.2)$$

Eş. 4.2'de  $F_P$  pozitif sıyırma süresindeki minimum sürtünme kuvvetini ifade etmektedir.  $V_d$  ise döküm hızına karşılık gelmektedir. Görülebileceği üzere ikinci dereceden bir bağıntı elde edilmiş ve %90,65  $R^2$  (Bkz. Şekil 4.2.) değeri elde edilmiştir. Regresyonun değerinin bu kadar yüksek çıkması sürtünme kuvvetinin döküm hızı ile son derece bağıntılı olduğunu kanıtlamaktadır.

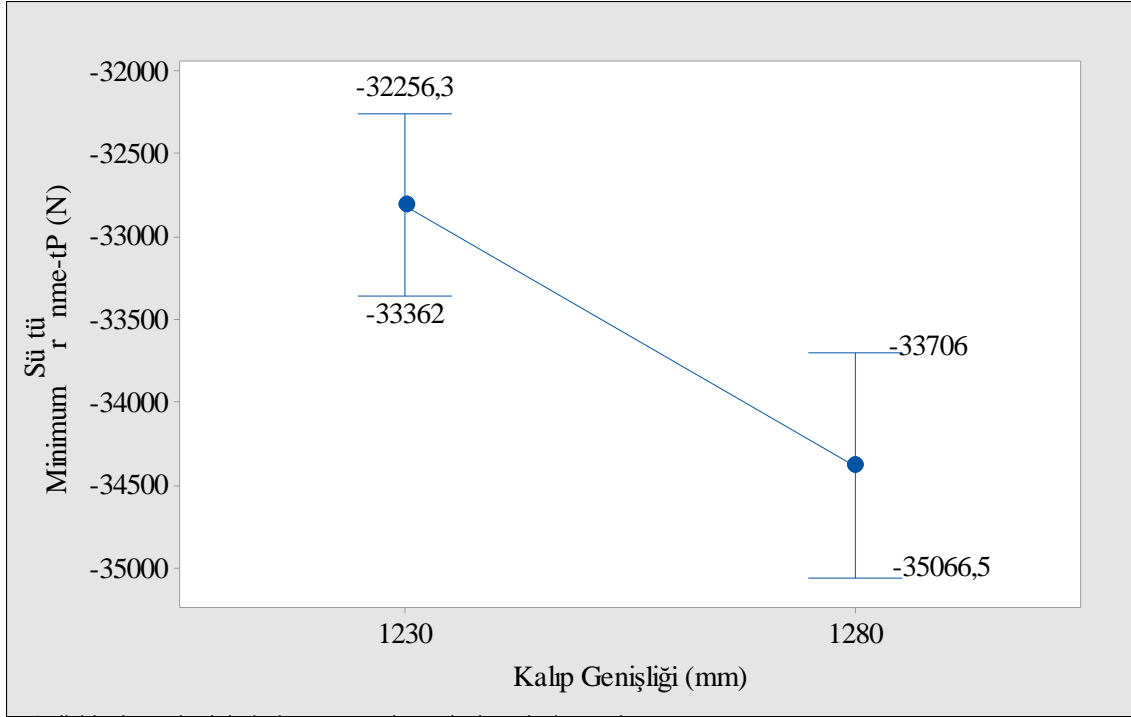
Farklı döküm hızlarının 2 farklı sürtünme kuvveti üzerindeki etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Buna göre döküm hızının her bir kalıp sürtünme değeri üzerinde ikinci dereceden denklem ile etkileşim içinde olduğu görülmüştür. Yani döküm hızı değişimi kalıp sürtünme kuvvetlerini de değiştirmektedir. Aynı döküm şartları içerisinde kalıp ile katılaştıran yüzey arasında gerçekleşen sürtünme iki farklı karakteristik sergilediği görülmektedir. 1,3 m/dk döküm hızı burada ön plana çıktığı görülmektedir. Sürtünme kuvvetlerindeki bu değişimin sebebi kesin olmamakla birlikte döküm tozunun davranışı ile ilgili olabileceği düşünülmektedir. Şekil 4.1'de görüleceği üzere 1,3 m/dk'ya kadar döküm hız artışında maksimum sürtünme kuvveti'nin ( $t_n$  negatif sıyırma süresi boyunca) arttığı daha sonrasında ise artan döküm hızıyla birlikte nispeten değişmediği görülmektedir. Şekil 4.2'de 1,25 m/dk'ya kadar döküm hız artışında minimum sürtünme kuvvetinin ( $t_p$  pozitif sıyırma süresi boyunca) mutlak değer olarak azaldığı buna karşın 1,25 m/dk döküm hızından sonra tekrar büyüdüğü görülmüştür. Maksimum sürtünme kuvvetinin ( $t_n$  negatif sıyırma süresi boyunca) ise belirli bir hızdan sonra çok değişmediği buna karşın minimum sürtünme kuvvetinin ( $t_p$  pozitif sıyırma süresi boyunca) daha fazla etkilendiği görülmüştür. Kalıp sürtünme kuvveti tanım gereği döküm hızı ( $V_d$ ) arttıkça eşitlikte pay büyüyeceğinden sürtünme kuvveti de arttığı deneysel olarak da ispat edilmiştir (Bkz. Eş.

2.4). Elde edilen bulgular ışığında kalıp sürtünme kuvvetlerinin arttığı (1,2 ile 1,3 m/dk döküm hızı aralığında) deneyin gerçekleştirildiği şartlarda zorunlu kalınmadığı takdirde döküm hızının ayarlanmamasına karar verildi.

Yapılan 2. deney sonrasında Şekil 4.3 ve Şekil 4.4 elde edilmiştir. Genişlik faktörünün sürekli değişmesi yerine yalnızca 2 adet olmasına bağlı dağılım grafiği kullanılmamış bunun yerine ortalama aralık dağılım grafiği tercih edilmiştir.



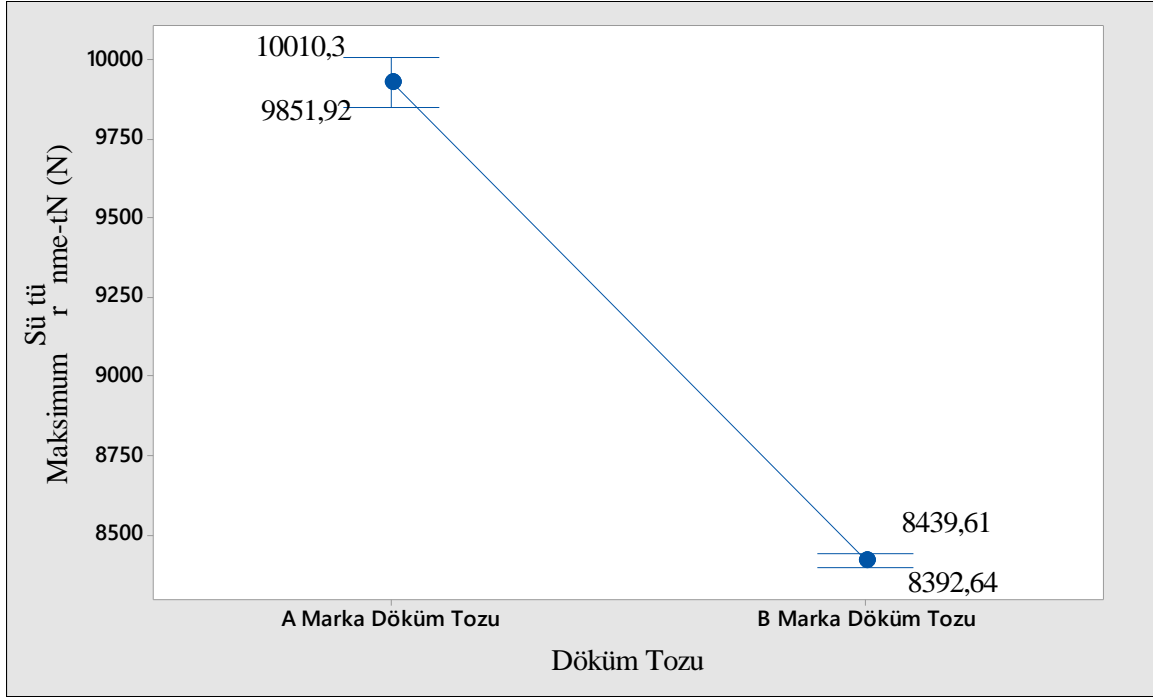
Şekil 4.3. Slab genişliğinin maksimum sürtünme kuvvetine ( $t_N$  negatif sıyırma süresi boyunca) etkisi



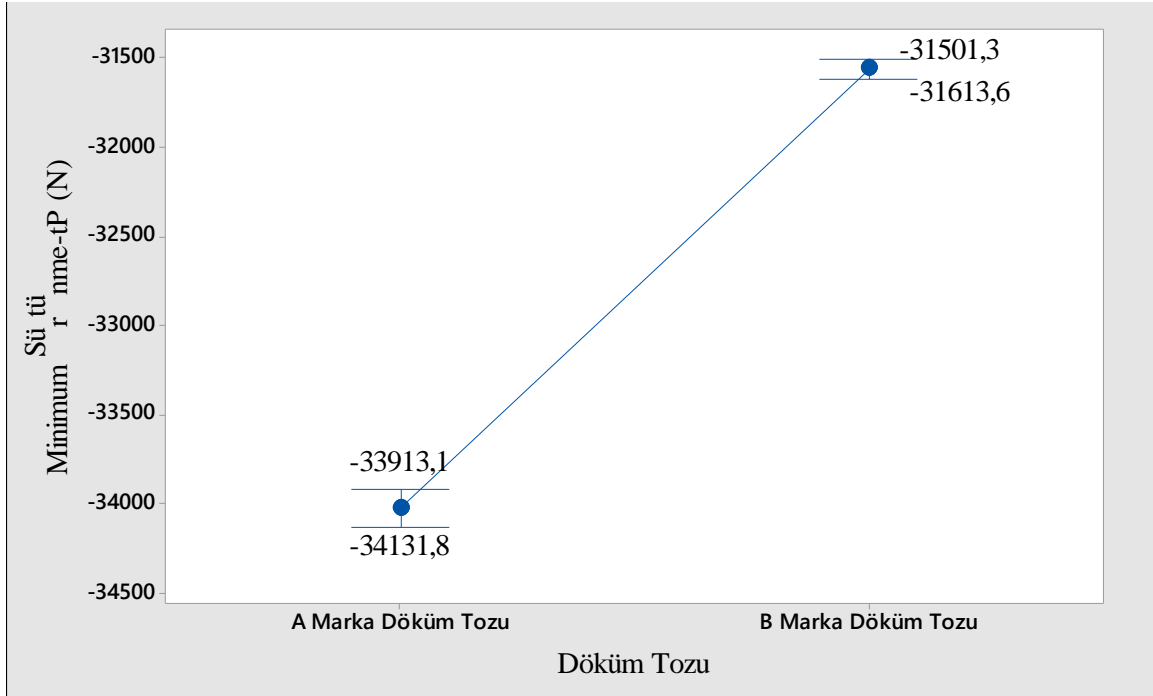
Şekil 4.4. Slab genişliğinin minimum sürtünme kuvvetine ( $t_p$  pozitif sıyırma süresi boyunca) etkisi

2. deney de elde edilen Şekil 4.3 incelendiğinde ebat 1230 mm'den 1280 mm'ye büyürken ortalama maksimum sürtünme kuvvetinin ( $t_n$  negatif sıyırma süresi boyunca) azaldığı sonucuna varılmıştır. Bununla birlikte artan ebatla birlikte minimum sürtünme kuvveti'nin ( $t_p$  pozitif sıyırma süresi boyunca) eksi yönde küçülürken mutlak değer olarak arttığı Şekil 4.4'te verilen grafikte görülmektedir. Bölüm 2.1.1'de sürtünme kuvveti ile görünür yüzey alanının doğrudan ilişkisi olmadığı daha önceki bölümlerde açıklanmıştı. Bunun yerine temas eden yüzeylerin yüzey özelliklerinin kuru sürtünmede ön plana çıktığı bilinmektedir [49–51]. Ancak yüzey özellikleri sabit olduğu düşünüldüğünde artan genişlik temas halindeki yüzey alanını artıracığından toplam sürtünme kuvvetinin de artması beklenmektedir. Deney sonucunda negatif sıyırma süresince oluşan sürtünme kuvveti azalması beklenmeyen bir sonuç olurken pozitif sıyırma süresince oluşan artan sürtünme kuvveti beklenen bir sonuç olarak karşımıza çıkmaktadır.

3. deney sonrasında döküm tozu çeşidine göre maksimum ve minimum sürtünme kuvvetlerinin etkisini içeren grafik Şekil 4.5 ve Şekil 4.6'da sunulmuştur.



Şekil 4.5. Döküm tozunun maksimum sürtünme kuvvetine ( $t_n$  negatif sıyırma süresi boyunca) etkisi



Şekil 4.6. Döküm tozunun minimum sürtünme kuvveti'ne ( $t_p$  pozitif sıyırma süresi boyunca) etkisi

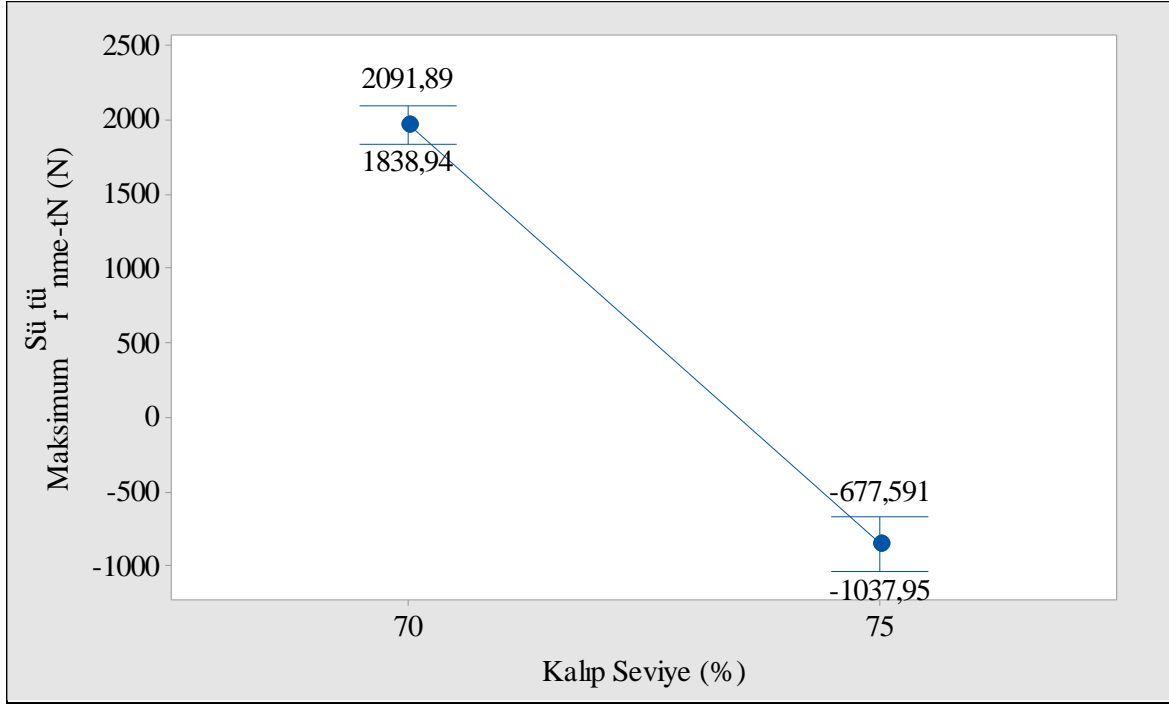
3. deney tasarımında döküm tozu değişimi sonrası Şekil 4.5 ve Şekil 4.6'da verildiği üzere pozitif ve negatif sıyırma zamanlarında oluşan maksimal sürtünme kuvvetlerinde de

değişim olmuştur. B marka döküm tozuna geçildiğinde sürtünme kuvvetlerinde azalma görülmüştür. Döküm tozu viskoziteleri neredeyse eşitken B marka döküm tozunda baziklik oranı ve erime noktasının yükseldiği görülmektedir. Baziklik oranının, kalıp ile katılaşmakta olan yüzey arasındaki ısı transferini kontrol ettiği bilinen bir gerçektir [7]. Tüm bu çıkarımlara ilave olarak A marka döküm tozu (EK-1) kullanımı sırasında stabil olmayan sürekli değişen bir davranış sergilemiştir. Bu durum operasyonel ve kalite anlamında istenmeyen bir durumu ortaya çıkarmıştır. Tüm deney sonuçları incelendiğinde döküm tozunun özelliklerine bağlı olarak beklenen sonuçlar elde edilmiştir.

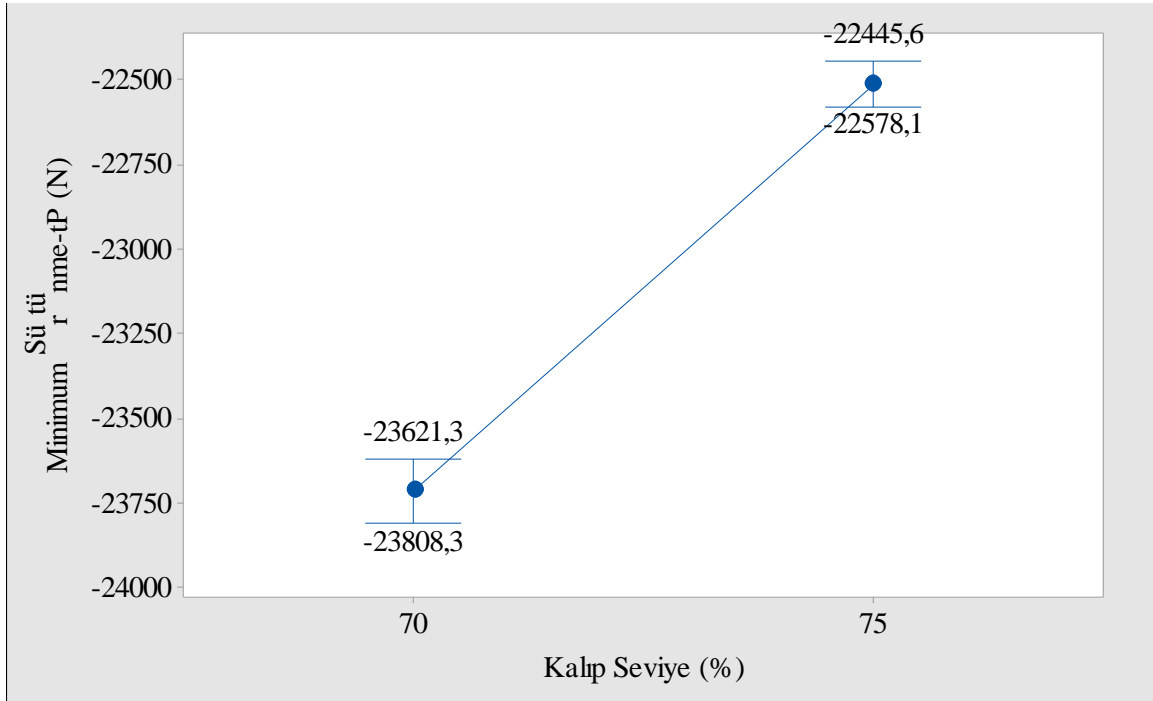
2 farklı kalıp seviye oranında gerçekleştirilen deney sonrasında Şekil 4.7 ve Şekil 4.8'deki grafikler elde edilmiştir. Negatif sıyırma süresince elde edilen sürtünme kuvvetinin deney sırasında büyüklüğünün yön değiştirmesine bağlı olarak sonuçların daha iyi incelenmesi için Çizelge 4.2'de sonuçların tanımlayıcı istatistik bilgileri verilmiştir

Çizelge 4.2. Kalıp seviye oranı değişimine oluşan sürtünme kuvveti değerlerinin tanımlayıcı istatistik verileri

Değişken	Kalıp Seviye Oranı (%)	Ortalama (N)	Standart Sapma (N)	Minimum (N)	Maksimum (N)
Maksimum Sürtünme Kuvveti- $t_N$	70	1965,4	2223,8	-6652,9	7163,8
	75	-857,8	3168,0	-7558,7	6037,9
Minimum Sürtünme Kuvveti- $t_P$	70	-23715	1644	-30147	-19458
	75	-22512	1165	-26387	-19116



Şekil 4.7. Kalıp seviyesinin maksimum sürtünme kuvvetine ( $t_n$  negatif sıyırma süresi boyunca) etkisi

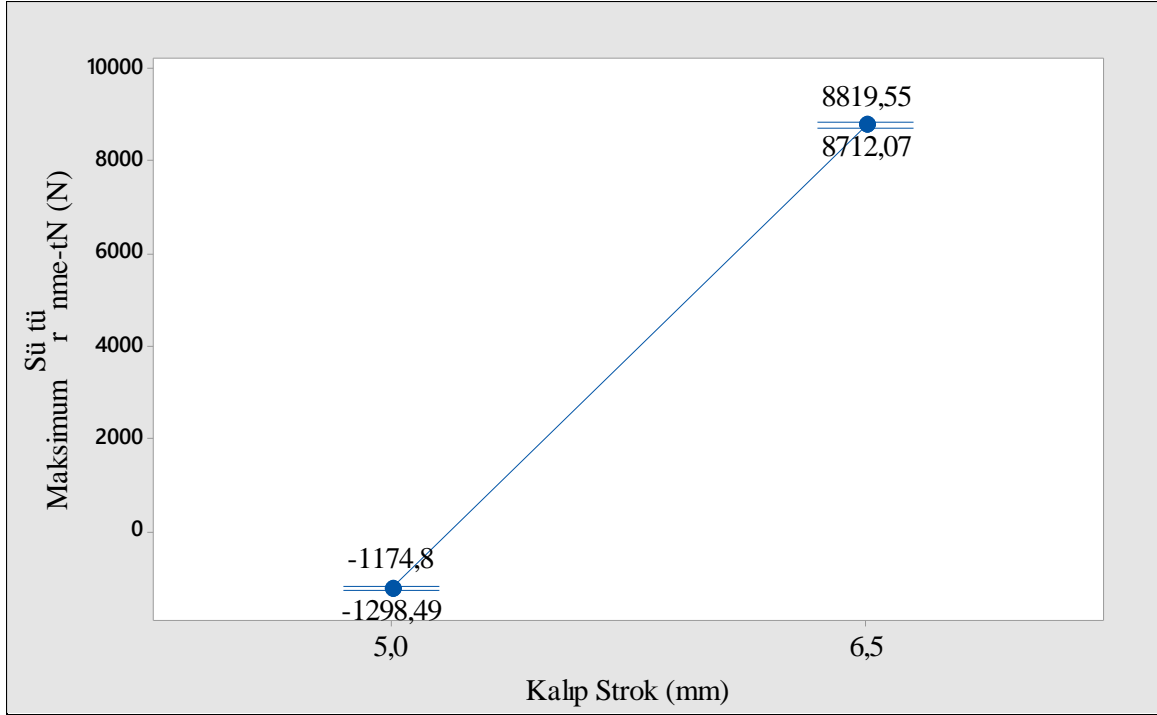


Şekil 4.8. Kalıp seviyenin minimum sürtünme kuvveti'ne ( $t_p$  pozitif sıyırma süresi boyunca) etkisi

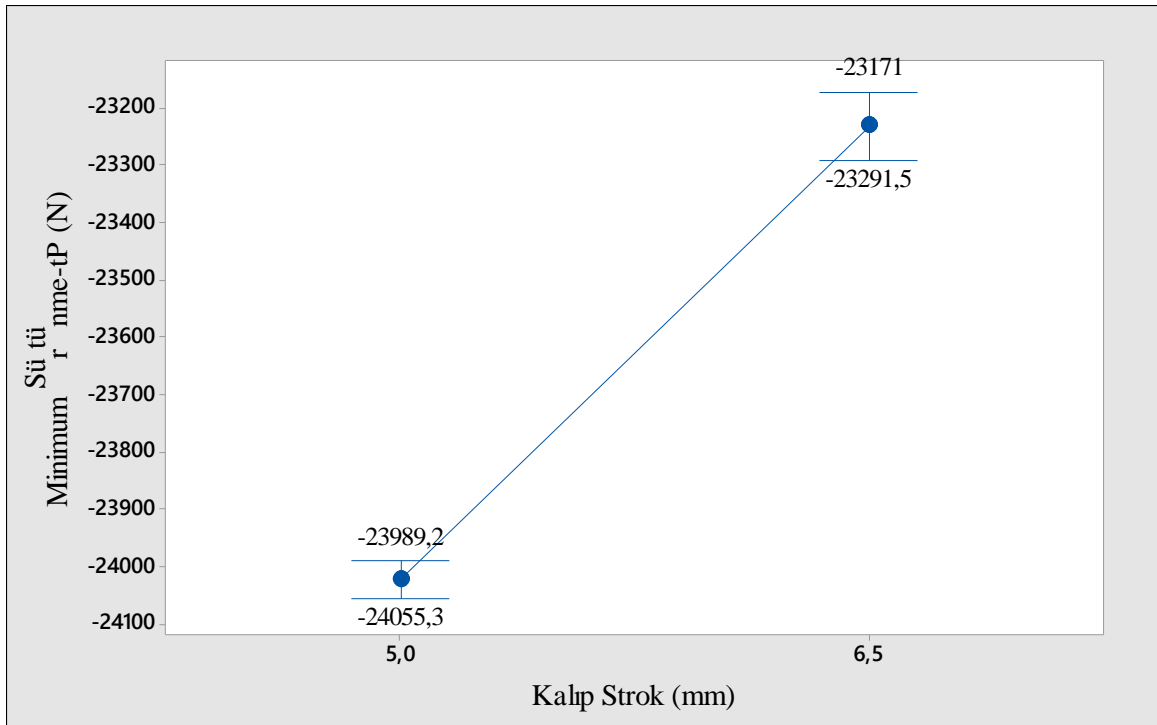


4. deney tasarımı kalıp seviye oranı %70'den %75'e çıkarken maksimal kalıp sürtünme kuvvetlerinin negatif (Bkz. Şekil 4.7.) ve pozitif (Bkz. Şekil 4.8.) sıyırma zamanlarında kısmi olarak düştüğü görülmüştür. Bu durum önceki çalışmalara ters olmakla birlikte proses içerisinde sabit tutulamayan ve öngörülemeyen (operatör faktörü gibi) başka bir faktörden de kaynaklanmış olabilir. EK-2 'de anlık verilerin zaman eksinden dağılımı her iki kalıp seviye oranında görmek mümkündür. Burada ilginç olan başka bir konu ise maksimum sürtünme kuvveti ( $t_n$  negatif sıyırma süresi boyunca) ortalama değerinin pozitiften negatif tarfa geçmesidir. Yani sürtünme kuvveti yön değiştirmiştir. Negatif sıyırma süresi boyunca ortalama maksimum sürtünme kuvveti kalıp seviye oranı 1965,4 N seviyelerinden, -857,8 N seviyelerine düşmüştür (Bkz. Çizelge 4.2.). Bu durum kuvvetin basmadan çekme yönüne kaydığını belirtir ki bu işletme pratiği açısından istenmeyen bir durumdur. Negatif sıyırma süresinin iyileşme zamanı olduğu, bu süre boyunca çatlayan kabuğun kendini onarmak için fırsat bulduğu bilinmektedir. Daha net sonuçların elde edilebilmesi için daha uzun süreli ve daha radikal denemelerin yürütülmesi gereklidir. Örneğin kalıp seviyenin % 50 ile % 80 olacağı bir deney. Bununla birlikte proses güvenliği için kalıp seviyenin etkisinin araştırılması noktasında radikal deneyler yürütülemediği. Kalıp seviyesinin %70'den çok farklı olması kanama riskinin ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Bu durum ise tesis güvenliğini tehlikeye atmaktadır. Elde edilen bulgular ışığında kalıp seviyenin %75 seviyesinde çalışılmasına karar verilmiştir.

5. deney sonucunda kalıp osilasyon strok mesafesinin maksimum ve minimum sürtünme kuvvetleri üzerindeki etkisi Şekil 4.9 ve Şekil 4.10 'da sunulmuştur.



Şekil 4.9. Kalıp strok mesafesinin maksimum sürtünme kuvveti'ne ( $t_N$  Negatif Sıyırma Süresi boyunca) etkisi



Şekil 4.10. Kalıp strok mesafesinin minimum sürtünme kuvveti'ne ( $t_P$  pozitif sıyırma süresi boyunca) etkisi

5. ve son deney tasarımında Şekil 4.9’da verildiği üzere kalıbın aşağı ve yukarı yönde aldığı mesafeyi gösteren strok değerinin 5,0 mm’den 6,5 mm’ye yükselmesi ile maksimum sürtünme kuvveti ( $t_n$  negatif sıyırma süresi boyunca) dramatik bir yükselişe geçmiştir. Bununla birlikte Şekil 4.10’da minimum sürtünme kuvvetindeki ( $t_p$  pozitif sıyırma süresi boyunca) mutlak değer olarak kısmi bir azalma olduğu sonucuna varılmıştır. Görülebileceği üzere kalıbın osilasyon şeklini belirleyen 3 parameterden biri olan kalıp strok mesafesi (diğer ikisi frekans ve osilasyon bozulma oranı) kalıp ile katılan yüzey arasındaki sürtünme kuvvetini doğrudan etkilemektedir. Sürtünme kuvvetlerinin EK-1 Şekil 1.1 ve Şekil 1.2’de zaman ekseninde incelendiğinde strok değişimi ile birlikte değiştiği anlar belirgin bir şekilde görülmektedir. Elde edilen bulgular ışığında mevcut strok mesafesi ile kalıp içinde beklenen durum elde edilemez ise daha yüksek strok mesafesi ile çalışılma kararı verilmiştir.



## 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Döküm hızı artışı ile maksimum sürtünme kuvvetinin ( $t_n$  negatif sıyırma süresi boyunca) ve minimum sürtünme kuvvetinin ( $t_p$  pozitif sıyırma süresi boyunca) birlikte artış gösterdiği görülmüştür.

Slab genişliği artışı ile maksimum sürtünme kuvvetinin ( $t_n$  negatif sıyırma süresi boyunca) azaldığı buna karşın minimum sürtünme kuvvetinin ( $t_p$  pozitif sıyırma süresi boyunca) artış gösterdiği görülmüştür. Proses sürekliliği noktasında 1,2 ile 1,3 m/d döküm hızı aralığından mümkün olduğunca uzak durulması sonucuna varılmıştır.

Döküm tozu özelliklerinden baziklik oranı ve erime sıcaklığı yükseldiğinde her 2 fazda (negatif ve pozitif sıyırma süreleri) gerçekleşen ortalama sürtünme kuvvetlerinin azaldığı görülmüştür. Bununla birlikte düşük baziklik oranı ve erime sıcaklığı olan döküm tozu kullanımı sırasında stabil olmayan bir davranış elde edilmiştir.

Kalıp seviye oranı yükseldiğinde her 2 fazda (negatif ve pozitif sıyırma süreleri) gerçekleşen ortalama sürtünme kuvvetlerinin azaldığı görülmüştür. Proses güvenliği noktasında % 75 kalıp seviye oranı ile çalışılması sonucuna varılmıştır.

Kalıp strok mesafesi maksimum sürtünme kuvvetinin ( $t_n$  negatif sıyırma süresi boyunca) arttığı buna karşın minimum sürtünme kuvvetinin ( $t_p$  pozitif sıyırma süresi boyunca) kısmi bir azalma eğilimi gösterdiği görülmüştür. Bulgular ışığında kalıp içinde kalıp sürtünmesi noktasında beklenen düzeyde performans elde edilemez ise daha yüksek strok mesafesi ile çalışma kararı verilmiştir.

Tez çalışması kapsamında slab kalıp sürtünme mekanizmasına etki eden döküm parametreleri incelenmiştir. Bir sonraki çalışmada mevcut çalışma ekseninde döküm parametre optimizasyonu yapılması uygun olacaktır. Bununla birlikte deneyler sırasında tüm veriler zaman ekseninde incelenmiş ve mevcut durum analizi yapılmıştır. Gelişen yeni yöntemler ile elde edilen sürtünme kuvvetlerinin frekans ekseninde incelenmesi ile farklı sonuçlar elde edilebilmektedir. Son yıllara kadar veriler yalnızca ya zaman ekseninde ya da frekans ekseninde (Fourer Dönüşümü) incelenebilmektedir. Özellikle dalgacık entropisi (Wavelet Entropy) olarak adlandırılan yöntem ile veriler zaman ve frekans ekseninde eş zamanlı olarak incelenebilmektedir. Gelen sinyaller frekans bantlarına ayrılarak her bir

banttaki düzensizlikler belirli bir matematiksel kurala göre zaman ekseninde incelenmektedir. Beyin sinyallerinden, makine arızalarına kadar birçok alanda kullanımı genişlemektedir. Yöntem sayesinde mevcut zaman eksenli analizin çok ötesinde veriler elde edilebilmektedir. Kalite ve prosesle ilgili anormallikler önceden tespit edilebilmektedir. Bir sonraki çalışma olarak bu durum incelenebilir.



## KAYNAKLAR

1. Birat, J.-P., Chow, C., Emi, T., Emling, W. H., Fastert, H. P. ve Fitzel, H. (2003). *The Making , Shaping and Treating of Steel, Casting Volume* (11.th.). Pittsburgh: The AISE Steel Foundation.
2. Szekeres, E. S. (y.y.). *Continuous Casting Systems-An Introduction*.
3. D.I. Brown. (1951). Continuous Steel Casting Steel Plot Plant Proves Successful. *Iron Age*, 168(12), 113–118.
4. Birat, T. J. P. ve Larrecq, M. (y.y.). Casting and Solidification. İçinde *The Book of Steel* (ss. 1185–1206).
5. Vynnycky, M. (2018). Applied Mathematical Modelling of Continuous Casting Processes: A Review. *Metals*, 8(11), 928. doi:10.3390/met8110928
6. Anonim (2019).
7. Mills, K. C., Fox, A. B., Thackray, R. P. ve Li, Z. (2004). The Performance and Properties of Mould Fluxes. İçinde *VII International Conference on Molten Slags Fluxes and Salts*.
8. Thomas, B. G. (2006). Modeling of Continuous Casting Defects Related to Mold Fluid Flow. *Aist Transactions*, 3(5).
9. Cobelli, P., Grundy, A. N., Feldhaus, S., Hsu, Y. C., Lo, C. H. ve Lin, C. H. (2015). *Fast Casting of 150sq Billets-Boost of Productivity*.
10. Wang, X., Wang, Z. ve Yao, M. (2013). Online measurement for transient mold friction based on the hydraulic oscillators of continuous-casting mold. *Metallurgical and Materials Transactions B: Process Metallurgy and Materials Processing Science*, 44(6), 1499–1508. doi:10.1007/s11663-013-9919-4
11. Liu, Y., Wang, W., Ma, F. ve Zhang, H. (2015). Study of Solidification and Heat Transfer Behavior of Mold Flux Through Mold Flux Heat Transfer Simulator Technique: Part I. Development of the Technique. *Metallurgical and Materials Transactions B: Process Metallurgy and Materials Processing Science*, 46(3), 1419–1430. doi:10.1007/s11663-015-0318-x
12. Zhang, H. ve Wang, W. (2016). Mold Simulator Study of the Initial Solidification of Molten Steel in Continuous Casting Mold: Part II. Effects of Mold Oscillation and Mold Level Fluctuation. *Metallurgical and Materials Transactions B: Process Metallurgy and Materials Processing Science*, 47(2), 920–931. doi:10.1007/s11663-015-0579-4
13. Ma, Y., Wang, X. D., Zang, X. Y., Yao, M., Zhang, L. ve Ye, S. H. (2008). Mould oscillation monitoring with hydraulic oscillators in slab continuous casting. *Ironmaking & Steelmaking*, 35(5), 396–400. doi:10.1179/174328108x318338
14. Jeursen, H. ve Mijnders, H. (1993). *Speed Control of a Continuous Casting*

*Machine Using a Street of Coupled DC-Motor at Hoogovens Ijmuiden.* Amsterdam.

15. Qin, X., Zhu, C. ve Zheng, L. (2010). Study of the Forecasting of Molten Steel Breakouts Based on the Frictional Force Between Mould and Slab Shell. İçinde *2010 International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering, MACE2010* (ss. 2593–2596). doi:10.1109/MACE.2010.5536840
16. Wang, H. J., Si, X. F. ve Zhao, Z. Q. (2011). Application of Adaptive Wavelet Thresholding Algorithm in Mould Friction Signal Denoising. İçinde *2011 3rd International Workshop on Intelligent Systems and Applications, ISA 2011 - Proceedings*. doi:10.1109/ISA.2011.5873312
17. Sahoo, P. P. ve Basu, S. (y.y.). *Use of Artificial Neural Network to Determine the Effect of Different Casting Parameters on Mould Friction in a Continuous Slab Caster*. India.
18. Ovidiu Tirian, G. ve Pinca, C. B. (2009). *Applications of Neural Networks in Continuous Casting*.
19. Meng, Y. ve Thomas, B. G. (2003). *Interfacial Friction-Related Phenomena in Continuous Casting with Mold Slags*. ISS-AIME.
20. Xinyang, Z., Xudong, W., Yong, M., Man, Y., Li, Z. ve Shihong, Y. (2008). The Shell Surface Force Caused by Mould Friction during Slab Continuous Casting. *ISIJ International*, 48(2), 170–174. doi:10.2355/isijinternational.48.170
21. Wang, X., Zhang, S., Yao, M., Ma, H. ve Zhang, X. (2013). Effect of Casting Process on Mould Friction During Wide, Thick Slab Continuous Casting. *Ironmaking & Steelmaking*, 41(6), 464–473. doi:10.1179/1743281213y.0000000148
22. Wang, X. D., Yao, M., Du, B., Fang, D. C., Zhang, L. ve Chen, Y. X. (2007). Online Measurement and Application of Mould Friction in Continuous Slab Casting. *Ironmaking & Steelmaking*, 34(2), 138–144. doi:10.1179/174328107x155295
23. Ma, Y., Wang, X. D., Zang, X. Y., Yao, M., Zhang, L. ve Ye, S. H. (2009). Mould Lubrication and Friction Behaviour with Hydraulic Oscillators in Slab Continuous Casting. *Ironmaking & Steelmaking*, 37(2), 112–118. doi:10.1179/030192309x12549935902347
24. Wang, X. D., Zang, X. Y., Ma, Y., Yao, M., Zhang, L. ve Ye, S. H. (2008). Experiment and Analysis of Transient Mould Friction with Hydraulic Oscillators for Slab Continuous Casting. *Ironmaking & Steelmaking*, 36(2), 157–160. doi:10.1179/174328107x203921
25. Ma, Y., Wang, X. D., Zang, X. Y., Yao, M., Zhang, L. ve Ye, S. H. (2008). Experimental Research on Effect of Control Model on Lubrication for Slab Continuous Casting Mould. *Ironmaking & Steelmaking*, 35(3), 164–168. doi:10.1179/174328108x284552
26. Ridal, K. A., Morris, P. F., Normanton, A. S. ve Scholes, A. (2007). Effect of Melting, Refining and Casting on Product Quality and Properties. *Ironmaking &*

- Steelmaking*, 34(6), 449–457. doi:10.1179/174328107x225198
27. Araki, T. ve Ikeda, M. (1999). Optimization of Mold Oscillation for High Speed Casting — New Criteria for Mold Oscillation. *Canadian Metallurgical Quarterly*, 38(5), 295–300. doi:10.1016/S0008-4433(99)00024-5
  28. Langer, M., Jelali, M., Toledo, G. A. de, Courcuera, J. C. ve Piancaldini, R. (2007). *Extension of Advanced Monitoring and Control Techniques at Continuous Casting Process*. Luxembourg.
  29. Valigi, M. C. ve Antonelli, M. (y.y.). *Influence of an Inadequate Lubrication in the Mould and a Proposal of a Sticking Detection System*. İtaly.
  30. Hebi, Y., Man, Y., Huiying, Z. ve Dacheng, F. (2006). 3D Stress Model with Friction in and of Mould for Round Billet Continuous Casting. *ISIJ International*, 46(4), 546–552. doi:10.2355/isijinternational.46.546
  31. Fornasier, M., Lena, M. ve Vecchiet, F. (2014). Q-Map: A New Advanced System For Mould Phenomena Detection And Analysis. İçinde *European Continuous Casting Conference* (ss. 313–321). Austria.
  32. Faries, F., Rawson, J., Rose, A. ve Bugdol, M. (1996). *Mould Coatings for Continuously Cast Billet Production* (C. EUR 15749). United Kingdom.
  33. Blazek, K. E. ve Saucedo, I. G. (2008). Characterization of the Formation, Propagation, and Recovery of Sticker/Hanger Type Breakouts. *ISIJ International*, 30(6), 435–443. doi:10.2355/isijinternational.30.435
  34. Yao, Y., Li, J. ve Fang, Y. (2015). Motion Stability Analysis of Non-Sinusoidal Oscillation of Mold Driven by Servomotor. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 28(6), 1269–1276. doi:10.3901/cjme.2015.0714.093
  35. Wang, X. D., Yao, M., Zhang, L., Zhang, X. B. ve Chen, S. H. (2013). Optimization of Oscillation Model for Slab Continuous Casting Mould Based on Mould Friction Measurements in Plant Trial. *Journal of Iron and Steel Research International*, 20(1), 13–20. doi:10.1016/S1006-706X(13)60038-2
  36. Mills, K. C. ve Däcker, C. Å. (2017). *The casting powders book. The Casting Powders Book*. doi:10.1007/978-3-319-53616-3
  37. Ma, Y., Peng, C., Gui, W. ve Wang, F. yin. (2015). Transient Mould Friction Based on the Wavelet Theory. *Journal of Iron and Steel Research International*, 22(9), 785–794. doi:10.1016/S1006-706X(15)30072-8
  38. Yong, M., Fangyin, W., Cheng, P., Wei, G. ve Bohan, F. (2016). Analysis of Mold Friction in a Continuous Casting Using Wavelet Entropy. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 47(3), 1565–1572. doi:10.1007/s11663-016-0614-0
  39. Ma, Y., Fang, B., Ding, Q. ve Wang, F. (2018, Ocak 22). Analysis of Mold Friction in a Continuous Casting Using Wavelet Transform. *Metallurgical and Materials Transactions B: Process Metallurgy and Materials Processing Science*, ss. 1–11. Springer Boston. doi:10.1007/s11663-018-1168-0



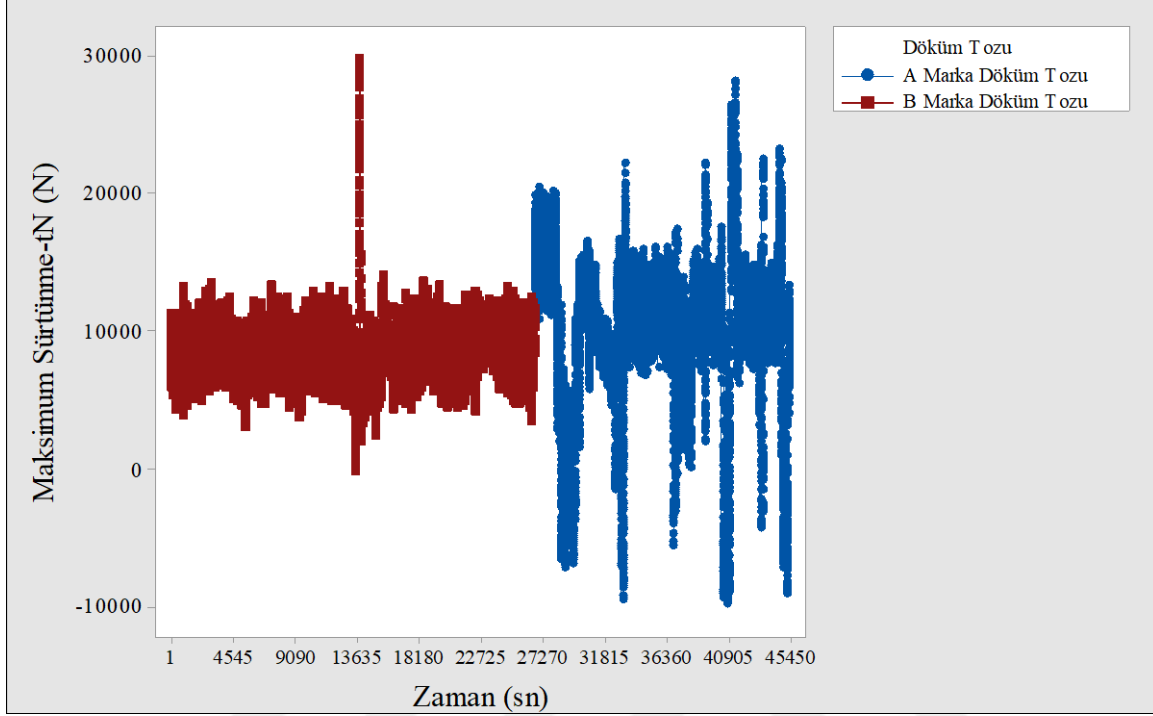
40. Ma, Y., Wang, X., Zang, X., Yao, M., Zhang, L. ve Ye, S. (2009). Investigations on the Transient Mould Friction Force in Slab Continuous Casting based on Fast Fourier Transformation. *Steel Research International*, 80(3), 235–240. doi:10.2374/SRI08SP097
41. Suzuki, M., Mizukami, H., Kitagawa, T., Kawakami, K., Uchida, S. ve Komatsu, Y. (2008). Development of a New Mold Oscillation Mode for High Speed Continuous Casting of Steel Slabs. *ISIJ International*, 31(3), 254–261. doi:10.2355/isijinternational.31.254
42. Wang, X., Kong, L., Du, F., Liu, Y., Zang, X. ve Yao, M. (2014). Prediction on Lubrication and Friction of Mold Flux Based on Inverse Problem in a Continuous Slab Casting Process. *ISIJ International*, 54(12), 2806–2812. doi:10.2355/isijinternational.54.2806
43. Itoyama, S., Washio, M., Nishikawa, H., Yamanaka, H., Tanaka, S. ve Fujii, T. (2017). Reduction of Friction Force in Mold and Prevention of Sticking Type Breakout for High Speed Continuous Casting of Slabs. *Tetsu-to-Hagane*, 74(7), 1274–1281. doi:10.2355/tetsutohagane1955.74.7\_1274
44. European Commission. (2009). *Castdesmon: Improvement, Control And Prediction Of Cast And Rolled Product Quality By The Development Of An Understanding Of How The Casting Machine Design And Condition Affects Solidification And The Development And Application Of Novel Engineering Monit.* Belgium.
45. Ma, Y., Wang, F., Fang, B. ve Gui, W. (2016). Discussion and Analysis on Measurement Methods for Mould Friction during High Efficiency Continuous Casting. (ISM3E), 146–149. doi:10.2991/ism3e-15.2015.38
46. Deng, Y., Zhang, Y., Wang, Q. ve Wang, Q. (2018). Study of Mold Oscillation Parameters and Modes on Slag Lubrication in Slab Continuous Casting. *Jom*, 70(12), 2909–2916. doi:10.1007/s11837-018-3028-4
47. Yang, J., Meng, X. ve Zhu, M. (2014). Experimental Study on Mold Flux Lubrication for Continuous Casting. *Steel Research International*, 85(4), 710–717. doi:10.1002/srin.201300232
48. Thomas, B. G. (2004). Continuous Casting ( Metallurgy ). İçinde *Yearbook of Science and Technology* (ss. 1–6). New York: McGraw-Hill.
49. Landes, F. P. (2016). *Applications to Friction*. France: Springer International Publishing. doi:10.1007/978-3-319-20022-4
50. Booser, R. (2010). *CRC Handbook of Lubrication. CRC Handbook of Lubrication (C. II)*. doi:10.1201/9781420050448
51. Bhushan, B. (2013). *Introduction to Tribology, Second Edition. Introduction to Tribology, Second Edition*. doi:10.1002/9781118403259
52. Carlos, J. ve Correa, J. (2014). *Parameter Identification and Monitoring of Mechanical Systems Under Nonlinear Vibration*. Woodhead Publishing.

53. Szeri, A. Z. (2010). *Fluid Film Lubrication* (2nd editio.). Cambridge University Press. doi:10.1017/CBO9780511782022
54. Chen, G. S. (2014). *Handbook of Friction-Vibration Interactions*. Woodhead Publishing.
55. Blau, P. J. (2008). *Friction Science and Technology: From Concepts to Applications* (Second Edi.). CRC Press.
56. Wang, Q. J. ve Chung, Y.-W. (Ed.). (2013). Mixed Lubrication. İçinde *Encyclopedia of Tribology*. Springer US.
57. OECD. (2014). *Lubricants and Lubricant Additives*. Paris.
58. LI, L., JI, C., WANG, X. ve DENG, X. (2015). Process and Quality Control during High Speed Casting of Low Carbon Conventional Slab. *Iron and Steel Research, International*, 22(1), 1–9.
59. Mazumdar, S. ve Ray, S. K. (2001). Solidification Control in Continuous Casting of Steel. *Sadhana*, 26(April), 179–198.
60. Halliday, I. M. D. (1959). Continuous Casting at Barrow. *Journal of Iron and Steel Institute*, (191), 121–163.
61. Shin, H.-J., Kim, S.-H., Thomas, B. G., Lee, G.-G., Park, J.-M. ve Sengupta, J. (2006). Measurement and Prediction of Lubrication, Powder Consumption, and Oscillation Mark Profiles in Ultra-low Carbon Steel Slabs. *ISIJ International*, 46(11), 1635–1644. doi:10.2355/isijinternational.46.1635
62. Stel, J. van der, Rabenberg, J. M., Cornelissen, M. C. M. ve Cijssouw, J. (1991). Oil Lubrication and Shrouding for Billet Casting. İçinde *Proceedings 1st European Conference on Continuous Casting, Vol II* (ss. 2.377–2.386). Florence, Italy.
63. Kapusuz, H., Güvenç, M. A. ve Mıstıkoğlu, S. (2017). Ladle Slag Detection Technologies in Continuous Casting Process. İçinde *International Advanced Researches Engineering Congress* (ss. 420–424). Osmaniye.
64. Shin, H. J., Lee, G. G., Kang, S. M., Kim, S. H., Choi, W. Y., Park, J. H. ve Thomas, B. G. (2005). Effect of Mold Oscillation on Powder Consumption and Hook Formation in Ultralow-Carbon Steel Slabs. *Iron and Steel Technology*, 2(9), 56–69.
65. Moon, S. (2015). *The peritectic Phase Transition and Continuous Casting Practice*. Ph.D. Dissertation.
66. *Tipik ivmeölçer*. (2018). Tarihinde adresinden erişildi <http://www.pcb.com/contentstore/mktgcontent/webimages/resources/techsupport/IC-P-accel1.jpg>

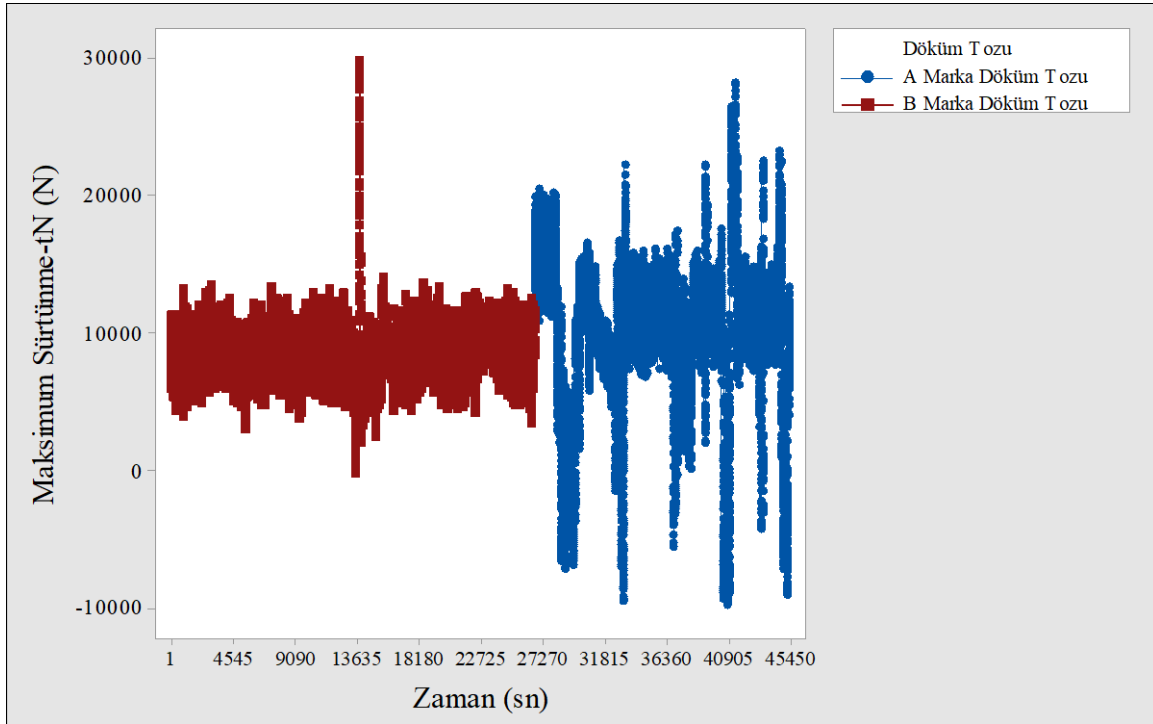


**EKLER**

EK-1. Döküm tozu markası değişimine bağlı sürtünme kuvvetlerinin zaman ekseninde değişimi

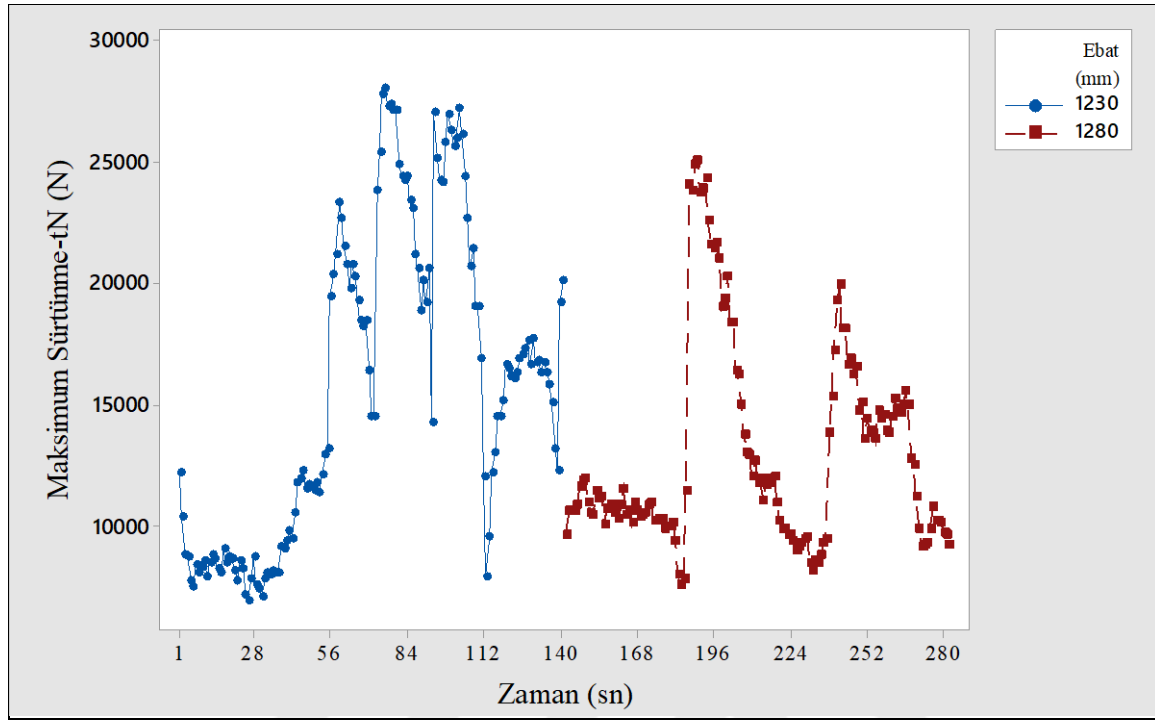


Şekil 1.1. Maksimum sürtünme kuvvetinin ( $t_N$  negatif sıyırma süresi boyunca) strok mesafesine göre değişimi

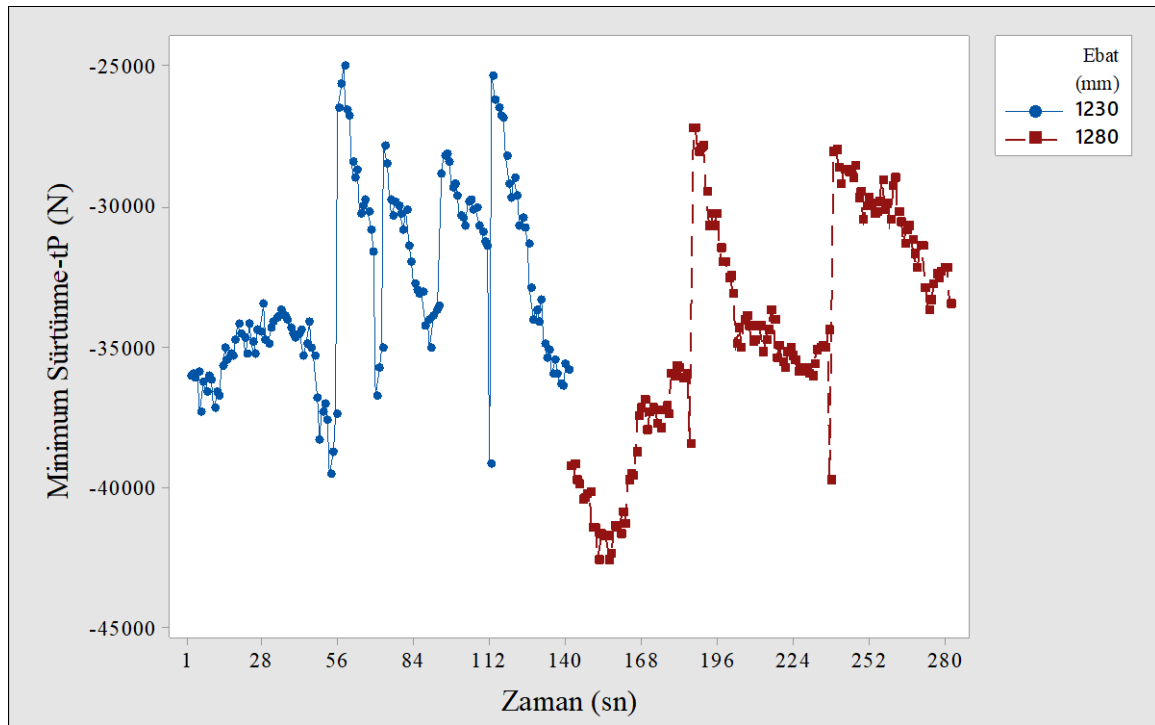


Şekil 1.2. Minimum sürtünme kuvvetinin ( $t_P$  pozitif sıyırma süresi boyunca) strok mesafesine göre değişimi

EK-2. Slab genişliği değişimine bağlı sürtünme kuvvetlerinin zaman ekseninde değişimi

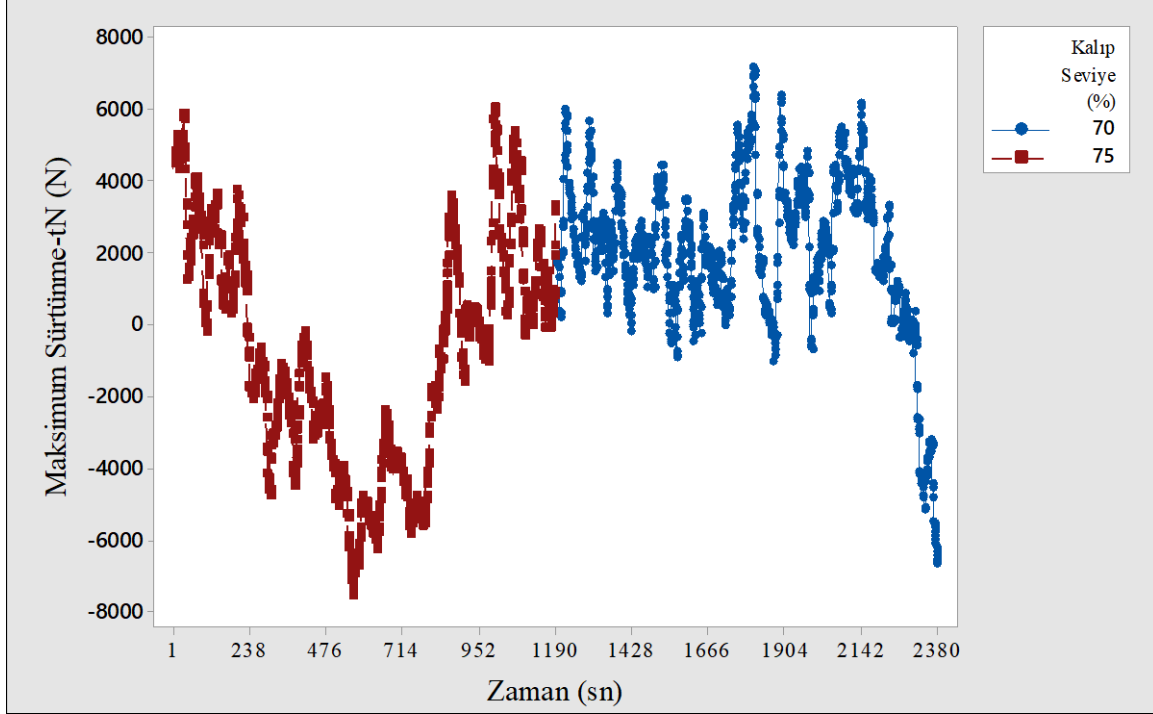


Şekil 1.3. Maksimum sürtünme kuvvetinin ( $t_N$  negatif sıyırma süresi boyunca) strok mesafesine göre değişimi

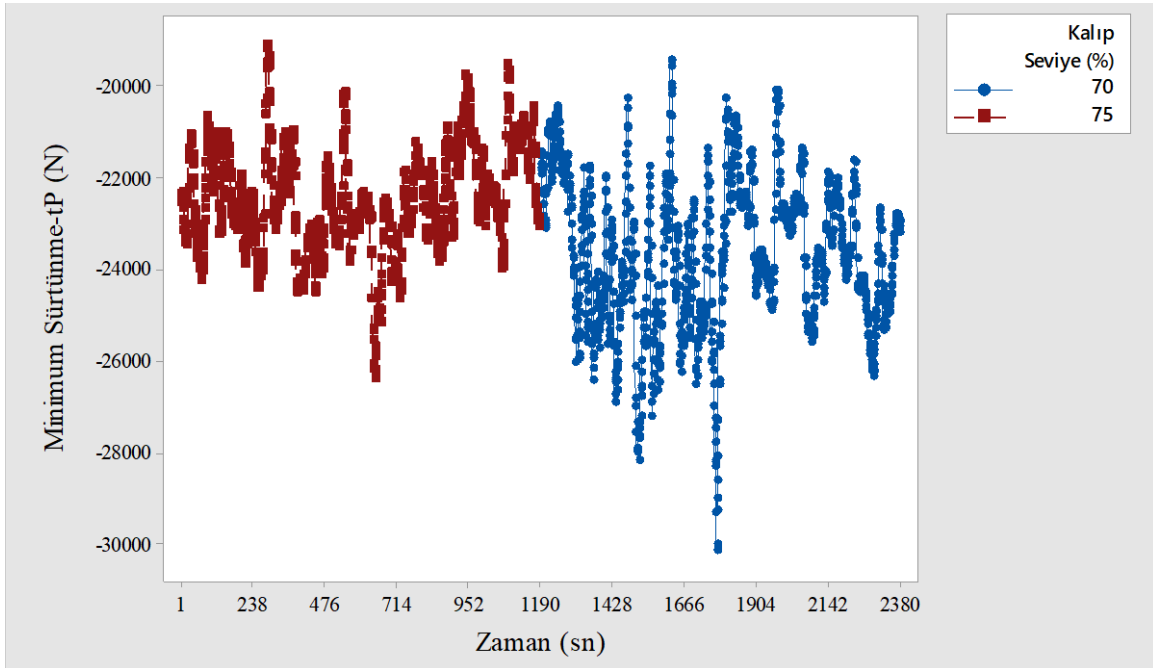


Şekil 1.4. Minimum sürtünme kuvvetinin ( $t_P$  pozitif sıyırma süresi boyunca) strok mesafesine göre değişimi

EK-3. Kalıp seviye değişimine bağlı olarak sürtünme kuvvetlerinin zaman ekseninde değişimi

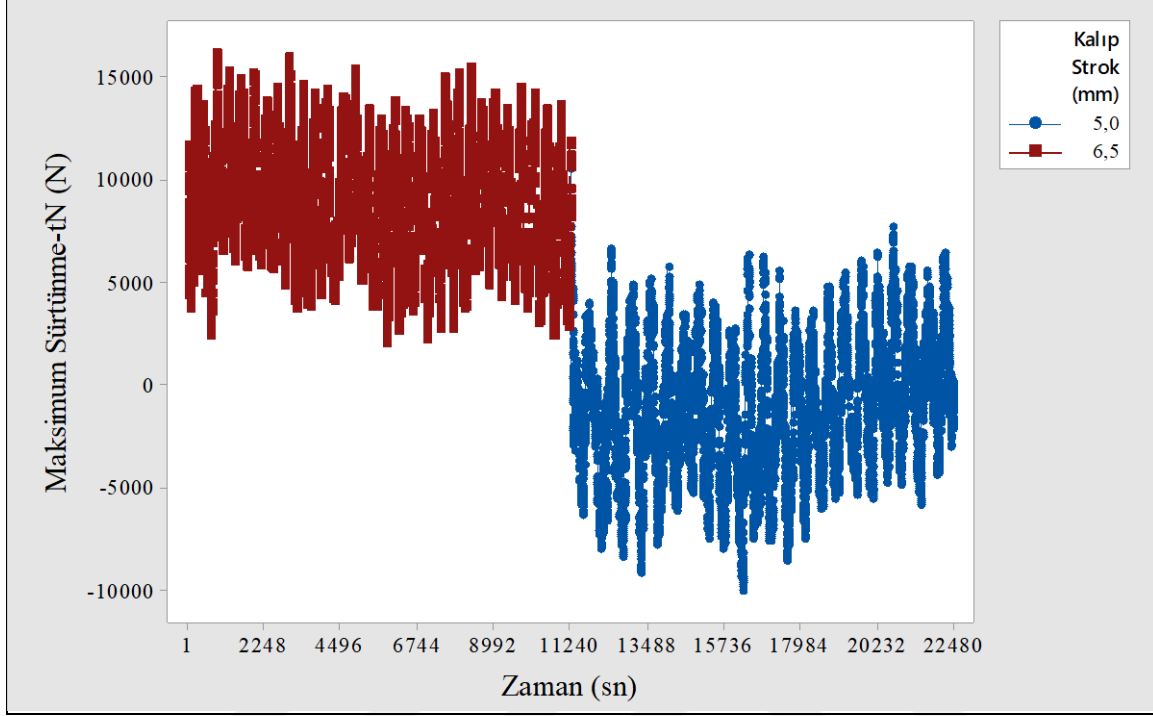


Şekil 1.5. Maksimum sürtünme kuvvetinin ( $t_N$  negatif sıyırma süresi boyunca) strok mesafesine göre değişimi

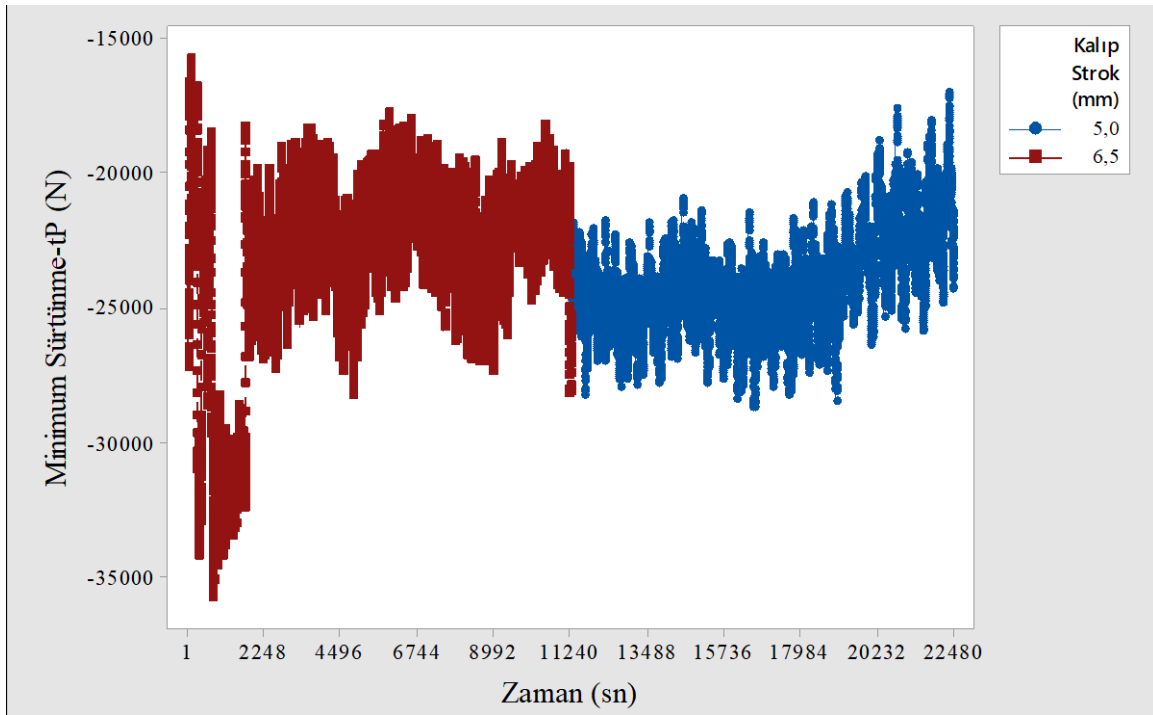


Şekil 1.6. Minimum sürtünme kuvvetinin ( $t_P$  pozitif sıyırma süresi boyunca) strok mesafesine göre değişimi

EK-4. Kalıp strok değişimine bağlı olarak sürtünme kuvvetlerinin zaman ekseninde değişimi



Şekil 1.7. Maksimum sürtünme kuvvetinin ( $t_N$  negatif sıyrma süresi boyunca) strok mesafesine göre değişimi



Şekil 1.8. Minimum sürtünme kuvvetinin ( $t_P$  pozitif sıyrma süresi boyunca) strok mesafesine göre değişimi

## ÖZGEÇMİŞ

### Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : KAPUSUZ, Hakan  
 Uyuğu : T.C.  
 Doğum tarihi ve yeri : 18.04.1982, Çorum  
 Medeni hali : Evli  
 Telefon : 0 (542) 686 61 81  
 Faks : 0 (326) 202 00 00  
 e-mail : hkapusuz@gmail.com



### Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Yüksek lisans	İskenderun Teknik Üniversitesi / Makine Mühendisliği	2019
Lisans	İstanbul Teknik Üniversitesi / Metalürji ve Malzeme Mühendisliği	2007
Lise	Çorum Atatürk Lisesi	2001

### İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2017-Halen	İSDEMİR A.Ş.	Başmühendis
2008-2017	İSDEMİR A.Ş.	Mühendis

### Yabancı Dil

İngilizce

### Yayınlar

Kapusuz, H ve Mıstıkoğlu, S. (2017). Analysis of the Effect of the Continuous Slab Casting Parameters on Mould Friction. içinde *Third International Iron and Steel Symposium (UDCS'17)* (ss. 483–487). Karabük.

Kapusuz, H., Güvenç, M. A., ve Mıstıkoğlu, S. (2017). Ladle Slag Detection Technologies in Continuous Casting Process. İçinde *International Advanced Researches Engineering*



*Congress* (ss. 420–424). Osmaniye.

Kapusuz, H. ve Mıstıkoğlu, S. (2017). Sürekli Slap Dkm Prosesi. *Makina Tek.*

### **Hobiler**

Dağ yürüyüşü, el ileri





**TEKNOVERSİTE**



teknoversite **AYRICALIĞINDASINIZ**

**İSTE**

