



**T. C.
NECMETTİN ERBAKAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**DERİN ÇEKME PROSESİNDE
FLANŞ VE RADYÜS BÖLGELERİNDE
SÜRTÜNME KATSAYILARININ
DENEYSEL OLARAK BELİRLENMESİ
Muhammet Mustafa ARAP
YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

Eylül-2014

KONYA

Her Hakkı Saklıdır.

TEZ KABUL VE ONAYI

Muhammet Mustafa Arap tarafından hazırlanan “**DERİN ÇEKME PROSESİNDE FLANŞ VE RADYÜS BÖLGELERİNDE SÜRTÜNME KATSAYILARININ DENEYSEL OLARAK BELİRLENMESİ**” adlı tez çalışması.../.../... tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan

Prof. Dr. H.Selçuk HALKACI

Danışman

Yrd. Doç. Dr. Murat DİLMEÇ

Üye

Yrd. Doç. Dr. Ahmet CAN

İmza

.....

.....

.....

.....

FBE Müdürü

Bu tez çalışması Necmettin Erbakan Üniversitesi BAP Koordinatörlüğü tarafından 141319002 nolu proje ile desteklenmiştir.

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I here by declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

.....

Muhammet Mustafa ARAP

22.09.2014

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

DERİN ÇEKME PROSESİNDE FLANŞ VE RADYÜS BÖLGELERİNDE SÜRTÜNME KATSAYILARININ DENEYSEL OLARAK BELİRLENMESİ

Muhammet Mustafa ARAP

Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Murat DİLMEÇ

2014, 88 Sayfa

Jüri: Yrd. Doç. Dr. Murat DİLMEÇ

Prof. Dr. H. Selçuk HALKACI

Yrd. Doç. Dr. Ahmet CAN

Derin çekme prosesi için yapılan analizlerde kalıbın flanş ve radyüs bölgeleri için genellikle tek bir sürtünme katsayısı alınmaktadır. Gerçekte bu bölgelerin sac malzeme ile olan sürtünme katsayıları birbirinden farklıdır. Farklı bölgeler için tek bir sürtünme katsayısı alınması gerçekten uzak analizler yapılmasına neden olacaktır.

Bu tez çalışmasında, derin çekme prosesini etkileyen önemli parametrelerden olan sürtünme katsayısı, flanş ve radyüs bölgeleri için deneysel olarak belirlenmiştir. Bu amaçla bu bölgelerdeki sürtünme katsayılarının her ikisini de belirleyebilecek bir aparat tasarlanıp imal edilmiştir. Yapılan testler sonucunda, flanş ve radyüs bölgelerinin sac malzeme ile sürtünme katsayıları birbirinden önemli ölçüde farklı elde edilmiştir. Bu durumda derin çekme analizlerinde, flanş ve radyüs bölgeleri için malzeme ile kalıplar arasında farklı sürtünme katsayılarının kullanılmasının gerçeğe yakın sonuçlar vereceği ve bu sayede kalıp tasarımında ve proses analizlerinde deneme yanılma yönteminde kaybolan zaman, iş gücü ve maliyetin azaltılabileceği sonucuna varılmıştır. Ayrıca bu tez çalışmasında, derin çekme prosesinde flanş ve radyüs bölgesi ile sac malzeme arasındaki sürtünme katsayılarına etki eden parametreler ANOVA analizi yöntemi ile incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, flanş ve radyüs bölgeleri için yağlayıcının oldukça etkili bir parametre olduğu tespit edilmiştir. Kuru sürtünme durumunda sürtünme katsayısı 0.38 gibi yüksek bir değerde iken, 2 adet PE + WISURA marka yağlayıcı kullanılması durumunda sürtünme katsayısı 0.07 değerlerine kadar düşmektedir. Yağlayıcının etkisinden başka, flanş bölgesi ve radyüs bölgesi için yüzey pürüzlülüğü, baskı plakası kuvveti ve çekme hızının etkisinin olmadığı, ancak radyüs bölgesi için kalıp radyüsünün sürtünme katsayısı üzerinde az da olsa etkisinin olduğu belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: ANOVA, Derin çekme prosesi, Sürtünme katsayısı,

ABSTRACT

Master Thesis

AN EXPERIMENTAL INVESTIGATION ON DETERMINATION OF COEFFICIENTS OF FRICTION AT THE FLANGE and THE RADIUS REGIONS IN DEEP DRAWING PROCESS

Muhammet Mustafa ARAP

Necmettin Erbakan University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Engineering

Advisor: Assist. Prof. Dr. Murat DİLMEÇ

2014, 88 Pages

Jury: Assist.Prof.Dr Murat DİLMEÇ

Prof. Dr. H. Selçuk HALKACI

Assist.Prof.Dr Ahmet CAN

Generally a single friction coefficient is taken into account for the flange and radius regions of the mold during the conducted analyses for the deep drawing process. In the reality, friction factor of these regions related with sheet metal material is different from the aforementioned one. Utilization of a single friction factor for different regions would lead to performing of unreal analyses.

In this master thesis study, flange and radius regions friction coefficients as one of the most important parameters affecting deep drawing process were determined experimentally. An apparatus was designed and implemented in order to detect both friction coefficients in aforementioned regions. After the tests, it was realized that the friction coefficients to be determined are different from each other at a considerable rate. By the help of the determined friction coefficients for flange and radius regions contacting to sheet metal material, it was concluded that deep drawing analyses can yield more accurate results, and hence time, work power and money consumption because of trial and error process can be eliminated during mold design and process analyses. Additionally parameters affecting flange and radius regions friction coefficients contacting to sheet metal material were examined via ANOVA analysis method. According to the results, lubricants are found to be an effective parameter for the flange and radius regions. Dry friction coefficient was measured as 0.38 while it decreased to 0.07 when two PE + WISURA lubricant were applied. Other than the effects of lubricant, surface roughness, pressure plate force and drawing speed were found to have no effect for flange and radius regions however a small effect of mold radius was detected to be effective for radius region in respect of friction coefficient.

Key words: ANOVA, Coefficient of Friction, Deep drawing process

ÖNSÖZ

Derin çekme prosesiyle şekillendirme işlemi, birçok sektörde kullanılan soğuk sac şekillendirme yöntemlerinin başında gelir. Otomotiv, beyaz eşya sektörleri başta olmak üzere seri üretim teknolojisinin kapsamına giren sac metal parçaların bir çoğu bu proses kullanılarak üretilmektedir.

Geçmiş yıllarda sac kalıpların tasarımı uzun sürmekte ve parçaların üretimi sırasında meydana gelen kalıp hataları deneme yanılma yöntemi ile giderilmeye çalışılmaktaydı. Teknolojinin ilerlemesiyle birlikte, sac kalıpların henüz üretimi yapılmadan önce, bilgisayarda prosesin simülasyonu yapılarak ortaya çıkabilecek hataları önceden tahmin etme çalışmaları artış göstermiştir. Bu sayede deneme yanılma yönteminde kaybolan zaman, iş gücü ve maliyet azaltılabilmektedir. Proses simülasyonunun yapılabilmesi için, üretilecek iş parçasının kalıplarının şekil ve boyutlarına ve malzeme özelliklerine ek olarak, sonlu elemanlar programına kalıp ile sac malzeme arasındaki sürtünme katsayılarının da tanıtılması zorunludur. Doğru bir simülasyona ulaşmak için takım geometrisi, malzeme davranışı ve sürtünme gibi birçok parametreden oluşan girdilerin gerçek koşullara yakın olarak belirlenmesi gerekmektedir. Geometri ve malzeme davranışı, geometrik tasarım ve numune testleriyle elde edilirken, sürtünme katsayısı için genellikle literatürdeki değerler esas alınmaktadır. Halbuki derin çekme prosesinde sürtünme katsayılarının gerçek koşullara uygun olacak şekilde deneysel olarak belirlenmesi daha doğru simülasyonlar yapılmasını sağlayacaktır. Ayrıca flanş ve radyüs bölgeleri ile sac malzeme arasındaki sürtünme katsayılarının ayrı ayrı belirlenmesi simülasyonlardan daha gerçekçi sonuçlar elde edilmesini sağlayacaktır. Böylece kalıp tasarımında ve proses analizlerinde deneme yanılma yönteminde kaybolan zaman, iş gücü ve maliyet azaltılabilecektir.

Bu tez çalışmasında, derin çekme prosesini etkileyen önemli değişkenlerden olan sac malzeme ile kalıplar arasındaki sürtünme katsayıları, flanş ve radyüs bölgeleri için deneysel olarak belirlenmiştir. Bu amaçla bu bölgelerdeki sürtünme katsayılarının her ikisini de belirleyebilecek bir aparat tasarlanıp imal edilmiştir. Geliştirilen sürtünme test aparatının en önemli özelliği, önceki test cihazlarından farklı olarak, iki test metodunu bir aparatta içermesidir. Bu özellik sayesinde, testlerin yapılması hem zaman

açısından, hem de baskı plakası ve kalıp radyüsünün sac malzeme ile olan sürtünme katsayılarının aynı anda belirlenebilmesi özelliğiyle maliyet açısından kazanç sağlanmıştır.

Necmettin Erbakan Üniversitesi BAP Koordinatörlüğü'nün 141319002 nolu BAP tez projesi kapsamında verdiği destek için de teşekkürlerimi sunarım.

Değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren başta danışmanım Yrd. Doç. Dr. Murat DİLMEÇ'e ve bu çalışmada büyük destekleri olan Prof. Dr. H. Selçuk HALKACI'ya ve Araştırma Görevlisi Mevlüt TÜRKÖZ'e en içten teşekkürlerimi sunarım.

Gösterdikleri sabır, anlayış ve destekle her zaman yanımda olan aileme çok teşekkür ederim.

Muhammet Mustafa ARAP

KONYA-2014

İÇİNDEKİLER

ÖZET	v
ABSTRACT	vi
ÖNSÖZ	vii
İÇİNDEKİLER	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR	xii
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	5
2.1. SÜRTÜNME DAVRANIŞI	5
2.1.1. <i>Kuru sürtünme teorileri</i>	6
2.1.2. <i>Coulomb (amontons) kanunu</i>	6
2.2. ŞEKİLLENDİRME PROSELERİNDE SÜRTÜNMENİN ÖNEMİ	7
2.3. SÜRTÜNME DAVRANIŞINA ETKİ EDEN FAKTÖRLER	9
2.3.1. <i>Normal kuvvet</i>	10
2.3.2. <i>Kayma hızı</i>	10
2.3.3. <i>Yağlayıcı</i>	10
2.4. DERİN ÇEKMEDE SÜRTÜNME KATSAYISINI BELİRLEMEK İÇİN KULLANILAN TESTLER	11
2.4.1. <i>Düz kalıp simülatörü</i>	12
2.4.2. <i>Radyal şerit çekme testi</i>	13
2.4.3. <i>Şerit derin çekme deneyi</i>	14
2.4.4. <i>Draw-bead simülatörü</i>	15
2.4.5. <i>Test prensiplerinin gözden geçirilmesi</i>	16
2.5. DERİN ÇEKME PROSESİNDE SÜRTÜNME KATSAYISININ TESPİTİ İÇİN KULLANILAN TEST CİHAZLARI	16
2.5.1. <i>Radyal şerit çekme simülatörü deney cihazı</i>	17
2.5.2. <i>Euler denklemi (kasnak denklemi)</i>	18
2.5.3. <i>Düz kalıp simülatörü test cihazı</i>	18
2.6. LİTERATÜR ANALİZİ	20
3. MATERYAL VE METOT	21
3.1. SÜRTÜNME TEST APARATININ GELİŞTİRİLMESİ	21

3.1.1. Üst gövde	24
3.1.2. Alt gövde	25
3.1.3. Sac malzeme çekme elemanı	26
3.1.4. Radyüs sürtünme elemanı	27
3.1.5. Düz sürtünme elemanı	27
3.1.6. Yük hücresi bağlantı ara parçası	28
3.1.7. Destek pimleri	29
3.1.8. Denge sacı	29
3.1.9. Yardımcı saclar	30
3.1.10. Yük hücreleri.....	30
3.2. DENEY TASARIMI	33
3.3. SÜRTÜNME TESTLERİNİN YAPILMASI	36
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA	42
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	52
5.1.SONUÇ	52
5.2 ÖNERİLER	53
KAYNAKLAR	55
EKLER	57
EK-A) SÜRTÜNME OLAYLARI VE SÜRTÜNMEYE ETKİ EDEN PARAMETRELER	58
A. 1. Sürtünme kavramı.....	58
A. 2. Sürtünme olayları.....	58
A.3. Sürtünme katsayısını etkileyen parametreler	62
EK-B) FLANŞ VE RADYÜS BÖLGELERİNİN SAC MALZEME İLE ARASINDAKİ SÜRTÜNME KATSAYILARINA AİT EĞRİLER	
.....	69
B.1. Test 1.....	69
B.2. Test 2.....	70
B.3. Test 3.....	71
B.4. Test 4.....	72
B.5. Test 5.....	73
B.6. Test 6.....	74
B.7. Test 7.....	75
B.8. Test 8.....	76
B.9. Test 9.....	77
B.10. Test 10.....	78

<i>B.11. Test 11</i>	79
<i>B.12. Test 12</i>	80
<i>B.13. Test 13</i>	81
<i>B14. Test 14</i>	82
<i>B15. Test 15</i>	83
<i>B.16. Test 16</i>	84
<i>B.17. Test 17</i>	85
<i>B.18. Test 18</i>	86
EK-C) DIN 19704'E GÖRE ÇELİK-ÇELİK MALZEME ARASINDAKİ SÜRTÜNME KATSAYISI DEĞERİ.....	87
ÖZGEÇMİŞ	88

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

μ	Sürtünme katsayısı
FT	Çekme kuvveti
FN	Normal kuvvet
FP	Proses kuvveti
FBP	Baskı plakası kuvveti
μ_T	Alt baskı ile blok arasındaki sürtünme katsayısı
e	Eksantriklik
L	Uzunluk
d	Çap
θ	Teta açısı

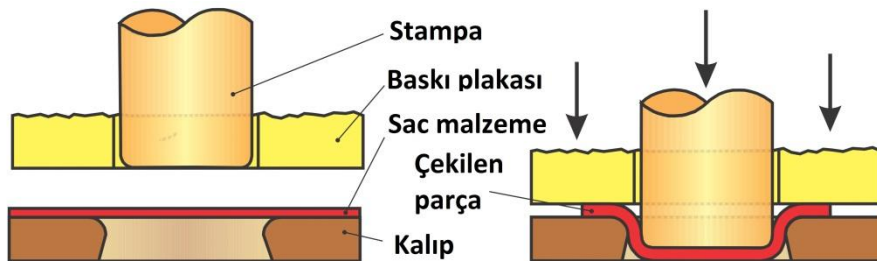
Kısaltmalar

BP	Baskı plakası
N	Normal
ANOVA	Analysis of variance
HNC	Hydraulic numeric control
F	Flanş
r	Radyüs
S/N	Sinyal gürültü oranı
PE	Polietilen

1. GİRİŞ

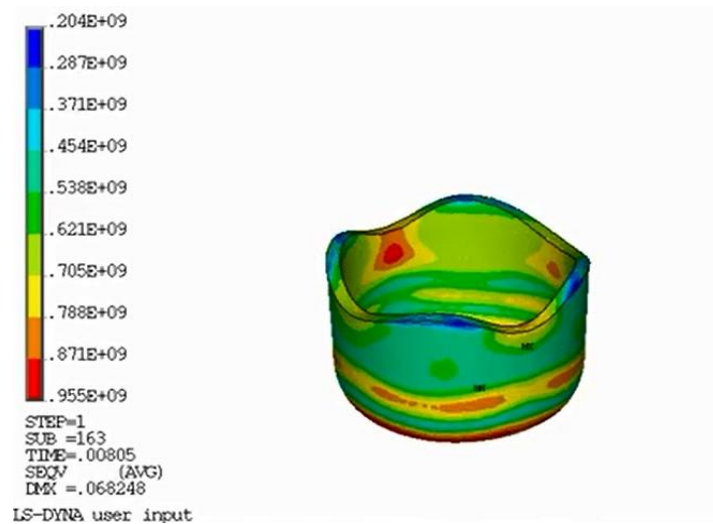
Derin çekme prosesiyle şekillendirme işlemi, birçok sektörde kullanılan soğuk sac şekillendirme yöntemlerinin başında gelir. Otomotiv, beyaz eşya sektörleri başta olmak üzere seri üretim teknolojisinin kapsamına giren sac metal parçaların yaklaşık %99'u kalıplama ile üretilmektedir. Her bir parça için kalıpların tasarlanması ve imalatı; sac malzemenin geometrik karmaşıklığı ve şekillendirme parametrelerinin belirlenmesinin zorluğu nedeniyle fazlaca zaman kaybına yol açmaktadır. Özellikle bazı büyük boyutlu parçalar (otomotiv kaportaları, savunma sanayisinde kullanılan büyük gövdeler vb.) için kalıp tasarımı ve imalatı ve metal sacın şekillendirilmesi çok büyük altyapı ve yatırım maliyeti gerektirmektedir (Schneider ve ark., 2008).

Derin çekme prosesi, endüstride sac metal malzemeleri şekillendirmek için sıklıkla kullanılan bir şekillendirme yöntemidir ve düz bir metalik sac malzemeden üç boyutlu derin bir kap elde etme veya bir kabı daha küçük boyutlu benzer bir parçaya dönüştürme işlemi olarak tanımlanır (Şekil 1.1) (Schuler, 1998). Bu proseste sac malzeme bir stampa yardımıyla kalıp içerisine doğru kontrollü şekilde çekilmektedir. Bu sırada flanş bölgesindeki malzemenin buruşmaması için baskı plakası ile flanş bölgesindeki sac malzemeye bastırılır. Uygulanan baskı kuvveti sabit olabildiği gibi değişken de olabilmektedir. Bu kuvvet, flanş bölgesindeki sac malzemenin buruşmasını önleyecek kadar fazla ve sac malzemenin kalıp içerisine akışına müsaade edecek kadar az olmalıdır (Çetin, 2005).



Şekil 1.1. Derin çekme prosesi (Schuler, 1998)

Derin çekme prosesinde, sac malzeme flanş bölgesinde baskı plakaları arasından ve kalıp radyüsü bölgesinde kayarak kalıp içerisine çekilir. Belirli şartlar altında, bu kayma işlemi malzeme ve takım arasında sürtünmeye neden olur. Bu sürtünme durumu da derin çekme prosesine önemli ölçüde etki eder. Sürtünme olayı, parçanın imal edilebilirliğine, son ürünün görünümüne etki eder. Başarılı bir derin çekme prosesi için kalıp ve stampa radyüsü, baskı plakası kuvveti, yağlama gibi ayarlanması gereken çok sayıda parametre vardır. Bu parametrelerin deneme yanılma yöntemi ile belirlenmesi hem zaman alıcı hem de yüksek maliyetli olduğundan, şekillendirme prosesinin gerçekleştirilmesinden önce sonlu elemanlar yöntemi (FEM: Finite Element Method) kullanılarak analizler yapılması ve proses parametrelerinin tahmin edilmesi gerekmektedir (Şekil 1.2). Bir çok sac metal şekillendirme uygulamalarında takım ve proses tasarımı gibi işlemler simülasyonlar ile sağlanmaktadır. Bu simülasyonlar matematiksel formüller, analitik veya nümerik yaklaşımlardan oluşur (Haar, 1996). Daha gerçekçi bir simülasyon yapabilmek için takım geometrisi, malzeme davranışı ve sürtünme gibi birçok parametreden oluşan girdilerin belirlenmesi gerekmektedir. Geometri ve malzeme davranışı, geometrik tasarım ve numune testleriyle elde edilirken, sürtünme etkisinin analizlere tam olarak tanıtılması için de sürtünme katsayılarının belirlenmesi gerekir (Hosford ve Caddell, 2007). Ayrıca sürtünme katsayısını doğru olarak belirlemedeki en önemli gereklilik, sürtünme testlerinin gerçek prosese yüksek derecede benzerlikle yapılmasıdır. Üretimde kullanılan yağ çeşidi, takım malzemesi ve iş parçası malzemesinin testlerde kullanılması bu gerekliliğin yerine getirilmesi için önemlidir (Haar, 1996).



Şekil 1.2. Derin çekme prosesinin simülasyonu

Gerçeğe daha yakın simülasyonlar yapmak için takım geometrisi, malzeme davranışı ve sürtünme gibi parametrelerin gerçek koşullara yakın olarak belirlenmesi gerekmektedir. Yapılan simülasyonlarda sürtünme katsayısı için genellikle literatürdeki değerler alınmaktadır. Bu da simülasyonların gerçekten uzaklaşmasına neden olacaktır. Sürtünme katsayılarının gerçek koşullara uygun olarak belirlenmesi daha doğru simülasyonlar yapılmasını sağlayacaktır. Ayrıca flanş ve radyüs bölgeleri ile sac malzeme arasındaki sürtünme katsayılarının ayrı ayrı belirlenmesi simülasyonlardan daha gerçekçi sonuçlar elde edilmesini sağlayacaktır. Böylece kalıp tasarımında ve proses analizlerinde deneme yanılma yönteminde kaybolan zaman, iş gücü ve maliyetin azaltılabilecektir (Marciniak ve ark., 2002).

Bu tez çalışmasında, derin çekme prosesini etkileyen önemli parametrelerden flanş ve radyüs bölgelerinin sac malzeme ile arasındaki sürtünme katsayıları deneysel olarak belirlenmiştir. Testlerin gerçekleştirilebilmesi için, her iki bölge ile sac malzeme arasındaki sürtünme katsayılarını belirleyebilecek bir aparat tasarlanıp imal edilmiştir. Bu aparat sayesinde, hem flanş hem de radyüs bölgelerinin sac malzeme ile arasındaki sürtünme katsayıları aynı anda belirlenebilmiştir. Böylece, testlerin yapılmasında zaman ve maliyet açısından kazanç sağlanmış olacaktır. Ayrıca, sürtünme flanş ve radyüs bölgesi ile sac malzeme arasındaki sürtünme katsayılarına etki eden parametreler ANOVA (Analysis of variance) analizi yöntemi ile incelenmiştir. Sürtünme katsayılarının her iki bölge için de deneysel olarak belirlenmesiyle daha gerçekçi analizler yapabilecektir.

İlk olarak, kaynak araştırması bölümünde, sürtünme kavramı, sürtünme çeşitleri ve sürtünme teorileri hakkında bilgiler verilmiştir. Sürtünme katsayısına etki eden faktörlerden bahsedildikten sonra, literatürde rastlanan sürtünme katsayısı ölçümü test metotları anlatılmıştır.

Üçüncü bölümde, sürtünme katsayısı belirleme testlerin gerçekleştirilebilmesi için, derin çekme prosesindeki flanş ve radyüs bölgeleri ile sac malzeme arasındaki sürtünme katsayılarını aynı anda belirleyebilecek aparat tasarımı ve imalatı anlatılmıştır. Sonra, derin çekme prosesinde flanş ve radyüs bölgesi ile sac malzeme arasındaki sürtünme katsayılarına etki eden parametreler incelenmiştir. Bunun için uygulanacak deney tasarımı yöntemi ve değerlendirme için kullanılan ANOVA analizi yönteminin uygulanışı anlatılmıştır.

Dördüncü bölümde, derin çekme prosesinde flanş ve radyüs bölgeleri için deney tasarımı yöntemine göre yapılan testler sonucu elde edilen kuvvetler sonucunda yöntem

kısmında verilen eşitliklere göre hesaplanan sürtünme katsayısı değerleri verilmiştir. Sonra, sürtünme katsayısına etki eden parametreleri ve düzey değerlerini belirlemek amacıyla uygulanan ANOVA analizi yöntemiyle elde edilen sonuçlar verilerek parametrelerin etkisi tartışılmıştır.

Tezin beşinci bölümünde ise, tez çalışmasından elde edilen sonuçlar ve yapılması önerilen çalışmalar verilmiştir.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Sürtünme Davranışı

Sürtünme; katı yüzeylerin, sıvı tabakaların veya temas halindeki malzeme yüzeylerinin bağıl hareketine karşı koyan direnç kuvveti olarak tanımlanır. Sürtünme kuvveti, temel bir kuvvet değildir ve elektronlar, protonlar ve moleküller gibi yüklü parçacıklar arasındaki elektromanyetik kuvvetlerden oluşur. Bu nedenle sürtünme kuvveti, Newton'un birinci kanunuyla hesaplanamaz, ancak deneysel yöntemlerle belirlenebilir (Haar, 1996).

Temas halindeki yüzeyler birbirine göre bağıl hareket ettiğinde, iki yüzey arasındaki sürtünme, kinetik enerjiyi termal enerjiye veya ısı enerjisine dönüştürür. Kinetik sürtünmeyi yüzeyler arasındaki kimyasal yapıların yapısı teşkil etmektedir. Bununla birlikte yüzey pürüzlülüğü ve yüzeylerin temas alanı, mikro ve nano boyuttaki cisimler için kinetik sürtünmeyi etkilemektedir (Kong ve ark., 1996).

Sürtünme kanunu ile ilgili,

1. Sürtünme kuvveti, cisme uygulanan yükü doğru orantılıdır. (Amontons'un 1. Kanunu)

2. Sürtünme kuvveti, cisimlerin temas ettiği alandan bağımsızdır. (Amontons'un 2. Kanunu)

3. Kinetik sürtünme kayma hızından bağımsızdır. (Coulomb Sürtünme Kanunu)
temel kanunlar vardır.

Sürtünme, kuru sürtünme, akışkan sürtünmesi, yuvarlanma sürtünmesi ve iç sürtünme olarak dört grupta incelenebilir. Bu tez çalışmasında metal-metal teması incelendiğinden burada sadece kuru sürtünme anlatılmıştır.

Kuru sürtünme, temas halindeki iki katı yüzeyin bağıl hareketine olan direnç kuvvetidir. Diğer bir ifadeyle iki katının yağlanmamış yüzeyi kayma halinde veya kaymaya hazır halde birbirlerine temas ediyorsa kuru sürtünmeden söz edilir. Temas yüzeylerine teğet olan sürtünme kuvveti, hem iki malzeme arasında kayma başlayana kadar ve hem de kayma başladıktan sonra oluşur. Kuvvetin yönü daima harekete veya başlayacak olan hareket yönüne zıttır. Kuru sürtünme, statik ve dinamik sürtünme

olmak üzere ikiye ayrılır. Statik sürtünme hareket etmeyen yüzeyler arasında olur. Dinamik sürtünme hareketli yüzeyler arasında olur.

Kayma veya harekete başlama noktasına kadar olan bölge, statik sürtünme aralığı adını alır ve sürtünme kuvvetinin değeri denge denklemleriyle belirlenmiştir.

2.1.1. Kuru sürtünme teorileri

Sürtünme, bir dış kuvvetin etkisi altında bir cisim hareket ederken veya diğer cismin yüzeyine göre harekete eğilimde iken, iki cismin arasındaki ortak sınıra teğetsel olan direnç kuvvetidir. Günümüzde kullanılan üç temel teori; Amontons veya Coulomb Kanunu, Sabit Sürtünme Kanunu ve Adezyon Teorisidir.

2.1.2. Coulomb (amontons) kanunu

Kragelski ve Shchedrov 1956 ve Deryagin 1963'ye göre, kuru sürtünme hakkında temel düzenlemeleri formüle eden ilk kişi 15. Yüzyılın sonlarında İtalyan bilimci Leonardo da Vinci'dir. 1699 yılında, Fransız fizikçi G. Amontons deneysel çalışmalarında Leonardo da Vinci'nin elde ettiği sonuçlara varmıştır.

Elde ettiği matematiksel ifade şu şekildedir;

$$F = \mu N \quad (2.1)$$

Burada,

F; Katı cisimlerin bağıl hareketine olan direnç, sürtünme kuvveti

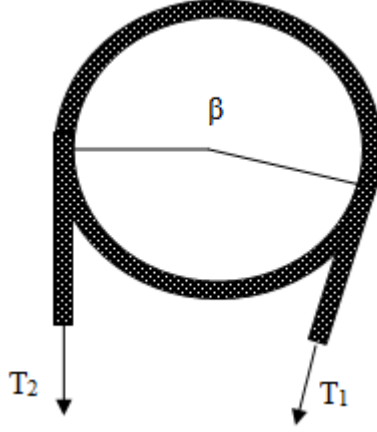
N; Sürtünme yüzeyi üzerindeki normal yük.

μ ; Sürtünme katsayısı (bütün cisimler için, Leonardo da Vinci'ye göre $\mu=0.25$;

Amontons'a göre $\mu=0.3$)

Bu kanunun varsayımlarının kabulü ve özgünleştirilmesi için sonraki yıllarda çalışmalar olmuştur. Bunlar arasında İsveçli Matematikçi L. Euler, silindire karşı oluşan sürtünme kuvvetinin yanı sıra, silindirik yüzey boyunca sürtünmeli esnek cisimlerin hareketini dikkate alan bir eşitlik geliştirmiştir (Şekil 2.1). Eşitlik şu şekildedir:

$$T_1 = T_2 e^{\mu\beta} \quad (2.2)$$



Şekil 2.1. Silindir üzerinde sürtünmenin şematik gösterimi

Burada,

T_1, T_2 ; Silindir çevresindeki esnek cisimlerde oluşan çekme kuvvetleri

$e = 2.718$; doğal logaritma

μ ; Sürtünme katsayısı.

β ; silindirle esnek cismin temasta olduğu sarım açısı

dır.

Euler Eşitliği, günümüzde çoğu uygulamalarda kullanılmaktadır. Sac derin çekmede sürtünme katsayısını ölçen test cihazı dahil olmak üzere, kayış transmisyonu, bant freni gibi aletlerin hesaplamalarında kullanılmaktadır (Haar, 1996; Kong ve ark., 1996).

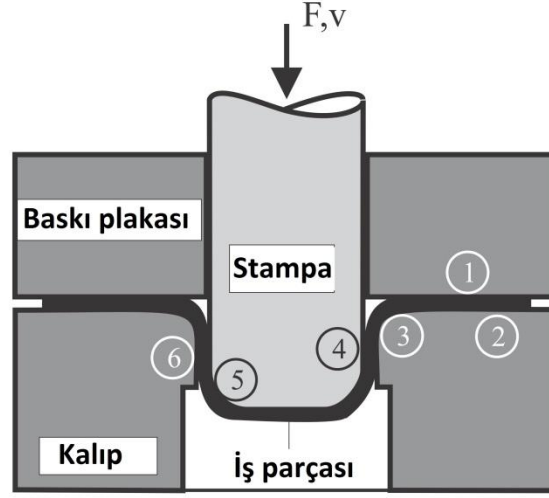
2.2. Şekillendirme Proseslerinde Sürtünmenin Önemi

Sürtünme sac metal şekillendirme proseslerinde plastik deformasyon üzerinde etkili olan en önemli faktörlerden birisidir. Birçok şekillendirme prosesinde, daha fazla şekillendirilebilirlik elde etmek amacıyla, yağlayıcılar kullanılarak metal-metal arasındaki sürtünme katsayısı düşürülmeye çalışılmaktadır. Ayrıca daha fazla şekillendirilebilirlik sağlanmasının yanı sıra, sürtünmenin fazla olması parçanın yüzey kalitesini olumsuz etkileyebileceğinden dolayı da, yağlayıcı kullanılarak sürtünmenin azaltılması yapılabilmektedir (Hao ve ark, 1999).

Geçmiş yıllarda sac kalıpların tasarımı deneme yanılma yoluyla yapılmakta ve uzun süreler almaktaydı. Teknolojinin gelişmesiyle birlikte, sac kalıplar üretilmeden önce, bilgisayarda prosesin simülasyonu yapılarak meydana gelebilecek hatalar önceden tahmin edilerek önlemler alınması çalışmaları artmaktadır. Bu sayede deneme yanılma yönteminde kaybolan zaman, iş gücü ve maliyet azaltılabilmektedir (Andersson, 2004; Haar, 1996). Prosesin simülasyonunun yapılabilmesi için, üretilecek iş parçasının kalıplarının şekil ve boyutlarına ve malzeme özelliklerine ihtiyaç vardır. Bu parametrelere ek olarak, sonlu elemanlar programına kalıplar ile sac malzeme arasındaki sürtünme katsayılarının da tanıtılması zorunludur (Haar, 1996). Gerçeğe yakın simülasyonlar yapabilmek için takım geometrisi, malzeme davranışı ve sürtünme gibi parametre değerlerinin gerçek koşullara yakın olarak belirlenmesi gerekir (Kong ve ark., 1996). Kalıp geometrisi ve malzemenin mekanik özellikleri, geometrik tasarım ve numune karakterizasyon testleriyle elde edilmektedir. Ancak, sac metal şekillendirme proseslerinde en etkili parametrelerden birisi olan sürtünme katsayısı için genellikle literatürdeki değerler alınmaktadır (Haar, 1996). Bu da gerçek değerlerden uzaklaşılmasına neden olacaktır. Sac şekillendirme proseslerinde sürtünme katsayılarının deneysel olarak gerçek koşullara uygun olacak şekilde belirlenmesi gerçek durumlara daha yakın simülasyonlar yapılmasını sağlayacaktır. Böylece kalıp tasarımında ve proses analizlerinde deneme yanılma yönteminde kaybolan zaman, iş gücü ve maliyetin azaltılabilecektir (Andersson, 2004).

Sac ve kalıplar arasındaki sürtünme kuvvetleri, proses performansına ve oluşturulacak parçaya önemli ölçüde etki etmektedir. Bu sürtünme davranışı, sac metal şekillendirme proseslerinin simülasyonunda tek ve proses boyunca sabit bir sürtünme katsayısı kullanılmaktadır. Bu şekilde bir kabul yapılması, gerçek sürtünme davranışı için son derece kötü bir yaklaşımdır (Haar, 1996). Derin çekme prosesinde farklı temas bölgelerindeki sürtünme kuvvetleri ile şekillendirme sırasında sac malzeme akışının etkileyebilmektedir. Her bir sac şekillendirme bölgesi için farklı sürtünme temas durumları oluşabilir. Her bir temas durumu için farklı sürtünme davranışları oluşabilmektedir. Bu durum sac şekillendirme proseslerinde kabul edilemeyecek değişimlere sebep olabilir. Bu değişimler de parçanın istenilen şekilde üretilmesine yol açacaktır (Kong ve ark., 1996). Örneğin derin çekme prosesinde farklı bölgelerde (Şekil 2.2.) farklı sürtünme davranışları olması muhtemeldir. Farklı bölgeler için farklı sürtünme katsayılarının belirlenmesi daha güvenilir simülasyonlar yapılmasını

sağlayacaktır. Böylece kalıp tasarımı veya proses modellenmesinde deneme yanılma ortadan kaldırılmış olacaktır (Haar, 1996).



Şekil 2.2. Derin çekme prosesindeki bölgeler (Haar, 1996)

2.3. Sürtünme Davranışına Etki Eden Faktörler

Sac metal şekillendirme proseslerinde sürtünme karakteristikleri birçok parametreden etkilenir. Sürtünme katsayısına etki eden parametreler aşağıda verilmiştir:

1. Normal kuvvet
2. Kayma hızı
3. Yağlayıcı
4. Sıcaklık
5. Takım malzemesi
6. Takım yüzeyi
7. Takım pürüzlülüğü
8. Sac malzemesi
9. Sac yüzeyi

olarak sıralanabilir (Marciniak ve ark., 2002; Colgan ve Monaghan, 2003; Turkoz ve ark., 2011). Bu parametrelerden bazıları aşağıda anlatılmıştır.

Sürtünme olayı ve sürtünme katsayısına etki eden parametreler Ek-A'da verilmiştir.

2.3.1. Normal kuvvet

Genelde proseslerde üç tane temas bölgesi tanımlanmaktadır. Bunlardan birincisi sac metalin baskı plakası ve kalıp arasına sıkıştırıldığı bölgedir. Rijit bir baskı plakası için, temas basıncı flanşın dış tarafıyla sınırlıdır. Esnek bir baskı plakası için, temas basıncı geniş bir bölgeye yayılır. İkinci bölge ise kalıp omzunun civarındaki iş parçası ve takım arasındaki temas basıncının olduğu yerdir. Stampa kuvveti büyük ölçüde buraya karşılıklı etki etmektedir. İlave olarak, malzeme kalıp omzuna girerken veya terk ederken iş parçası eğilmekte veya şekil değiştirmektedir. Üçüncü bölge stampa burnunda tanımlanır. Burada kalıp omzu bölgesindeki aynı durumlar söz konusudur. Genelde, normal kuvvet baskı plakasının kontrol edilmesiyle ayarlanır. Ancak normal kuvvetin dağılımı sac malzeme davranışının ve parça geometrisi ile belirlenebilir (Colgan ve Monaghan, 2003).

2.3.2. Kayma hızı

Kayma hızı Sommerfeld sayısının bileşenlerinden biridir. Derin çekmede kayma hızı büyük ölçüde stampa hızına bağlıdır. Bahsedilen hız, baskı plakası ile kalıp arasında ve kalıp omzu üzerinden malzeme kayması için gerekli olan hızdır. Burada, kayma hızı yaklaşık olarak stampa hızına eşittir.

Ayrıca, metal şekillendirme prosesinde formasyon enerjisinin tamamı ısıya dönüşür. Proses eğer yüksek hızlarda meydana gelmezse, ısınma meydana gelir. Sonuç olarak, iş parçası sıcaklığı artar. Bu da yağın viskozitesini azaltır. Böylece, stampa hızındaki artma, ısının oluşumu engellenerek uzama oranını artıracaktır. Bu uzama oranıyla birlikte iş parçasının hareketine karşı sürtünme azalacaktır (Haar, 1996).

2.3.3. Yağlayıcı

Metal şekillendirme proseslerinde yağlamanın yapılmasındaki esas amaç metal-metal temasını minimuma indirmektir. Çünkü metalik temas sonunda aşınma malzeme kaybına neden olacaktır. Yağlama yapılarak iş parçası ve takım arasındaki sürtünme kuvvetleri azaltılır.

Yağlayıcının viskozitesi, sürtünme şartlarında hidrodinamik yağlamaya etki eden başlıca özelliktir. Sınır yağlama ise iş parçası ve takım malzemesi arasında fiziksel veya kimyasal bağ oluşturmak için yağlayıcı özelliğine bağlıdır. Bir yağlayıcı, hidrodinamik yağlama için gereklilikleri sağlayamayacak durumda olduğu zaman, bu durum, yağlayıcı filmiyle malzemedeki pürüz uçları arasındaki bağın kopmasına ve metalik temasa sebep olacaktır. Bu da sürtünme katsayısının artmasına, nihai ürün kalitesindeki düşüşe ve takım ömrünün azalmasına sebep olacaktır. Viskoziteye sıcaklık ve basınç parametreleri etki etmektedir. Sıcaklıkla viskozite azalmakta ve artan basınçla viskozite artmaktadır (Colgan ve Monaghan, 2003; Haar, 1996).

Ayrıca, iş parçası malzemeleri aynı sınıftan olsa da sürtünme özelliklerinin aynı olmayabilmektedir (Colgan ve Monaghan, 2003).

2.4. Derin Çekmede Sürtünme Katsayısını Belirlemek İçin Kullanılan Testler

Literatürde, sac metal şekillendirme proseslerinde sürtünme katsayısını belirlemek amacıyla çeşitli testler geliştirilmiştir. Sürtünme katsayısını doğru olarak belirlemedeki en önemli gerekliliklerden birisi, sürtünme testlerinin gerçek prosese büyük ölçüde benzerlik gösterecek koşullarda yapılmasıdır. Sürtünme testleri yapılırken, üretim proseslerinde kullanılan yağ çeşidi, takım malzemesi ve iş parçası malzemesinin kullanılması bu gerekliliğin yerine getirilmesinde önemli bir etkidir. Bunun yanı sıra derin çekme prosesinde farklı bölgeler için de farklı sürtünme davranışlarının belirlenmesi de oldukça önemlidir (Wang ve ark., 1996; Wang ve Wagoner, 1993).

Literatürde verilen sürtünme katsayısı ölçümü testleri üç gruba ayrılabilir:

- Tek aşamalı ölçüm – Sürtünme katsayısı kuvvetlerin ölçümüyle doğrudan hesaplanır.
- İki aşamalı ölçüm – Sürtünmenin yokluğunda ve sürtünmenin varlığında testler yapılır ve sürtünme katsayısı bu iki testin farkından hesaplanır.
- Sürtünme katsayısı, sensör gibi cihazlarla direkt elde edilir.

Doğru bir sürtünme testi için olması gereken gereklilikler;

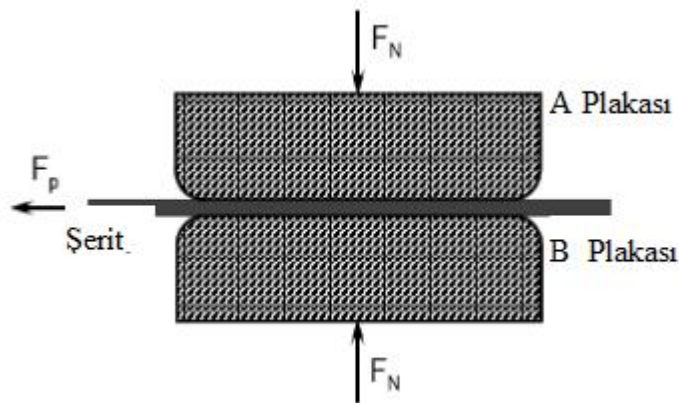
- Test koşulları, derin çekme prosesindeki koşullarla mümkün olabildiğince yakın olmalıdır.
- Plastik deformasyon için model gerekli değildir ve malzeme davranışı hakkında varsayım yapılmamalıdır.
- Sürtünme katsayısı, sadece aynı testte elde edilmelidir.

Bu gereklilikler sağlanırsa, testten gözlemlenen sürtünme katsayısının üretim hattındaki gerçek sürtünme katsayısına olabildiğince yakın olduğu beklenebilir. Bununla birlikte, genel amaçlı test yapmak için test malzemesini sac malzemeden bir parça olarak imal etmek gerekir (Wang ve Wagoner, 1993; Haar, 1996; Wang ve ark., 1996).

Sac metal şekillendirme proseslerinde sürtünme katsayısını belirlemek amacıyla geliştirilen testler aşağıda anlatılmıştır.

2.4.1. Düz kalıp simülatörü

Wojtowicz (1955) tarafından geliştirilen düz kalıp simülatörü testi, sürtünme simülasyonunda genişçe kullanılan testlerden birisidir (Şekil 2.3). Emmens (1988) ve Blümel ve Stoewahse (1998) de düz kalıp simülatörü ile ilgili yoğun araştırmalar yapmışlardır.



Şekil 2.3. Düz kalıp simülatörü (Wojtowicz, 1955)

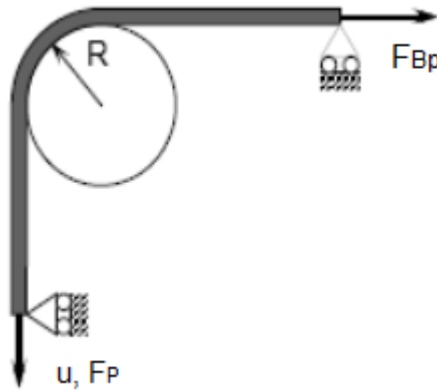
Bu testin avantajı basitliğidir ve ortalama sürtünme katsayısı, çekme kuvveti F_p ve normal kuvvet F_N ölçüldüğünde kolayca hesaplanır. Ayrıca, bu testte, çekme hızı ve temas basıncı istenilen seviyeye çok iyi bir şekilde ayarlanabilmektedir. Testin

dezavantajı ise, derin çekme prosesindeki gibi, sacın kalıp içerisine çekilmesinden dolayı oluşan yığın plastik deformasyonun olmamasıdır. İlave olarak, her bir noktada beklenen üniform şartları elde etmek zordur (Wang ve Wagoner, 1993; Haar, 1996).

Düz kalıp simülasyonunun tasarımıyla ilgili olarak, Emmens (1988) tarafından kalıpların düzgün olarak hizalanması, kalıpların elastik deformasyonu durumlarını, düz kalıp simülasyonunun uygulamalarındaki sınırlayıcı faktör olarak belirtmiştir.

2.4.2. Radyal şerit çekme testi

Şerit çekme deneyinde, bir şerit kalıp omzu üzerinden çekilir (Şekil 2.4). Şerit R yarıçapına sahip ve F_p kuvvetinin uygulandığı kalıp omzu üzerinden u sabit hızıyla çekilir. Şeritin diğer tarafında, bir geri-çekme kuvveti (F_{Bp}) uygulanır. Bu geri-çekme kuvvetini şerit üstüne uygulamak için çeşitli metotlar mevcuttur. Örneğin bir draw-bead veya bir hidrolik sistem.



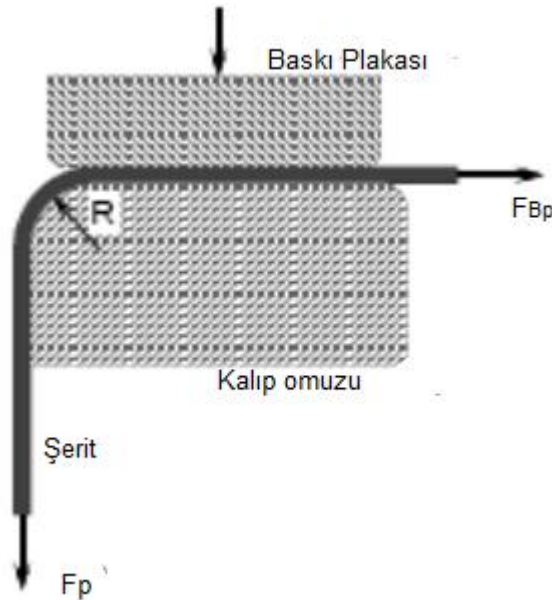
Şekil 2.4. Radyal şerit çekme deneyi (Viorel ve Dumitru, 2003)

Bu deneyin avantajı, tek taraflı temasın olması ve kalıba şeridin uyumunun iyi olmasıdır. Üstelik, sürtünme katsayısı, deformasyon modeli veya malzeme davranış modelleri kullanmadan sadece bir deneyin yapılmasıyla elde edilir. İş parçası ve takım arasındaki bağıl hız oldukça sabittir ve çok iyi şekilde istenilen düzeye getirilebilir.

Deneyin dezavantajı ise, şeridin geniş bir parçasında yığın plastik deformasyonun olmaması, temas bölgesindeki yerel temas basıncının büyük boyutta değişmesi ve ortalama temas basıncının sadece belirli bir aralıkta kontrol edilebilir olmasıdır.

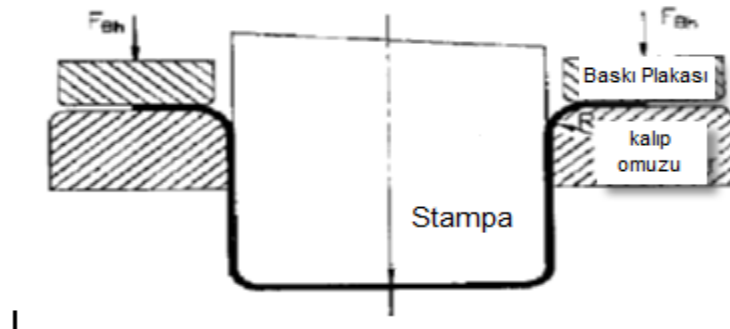
2.4.3. Şerit derin çekme deneyi

Bu test, aslında şerit çekme deneyi ve düz kalıp simülasyonunun bir kombinasyonu olan test yöntemidir, flanş ve omuz bölgelerindeki sürtünme etkilerini simule eder (Şekil 2.5).



Şekil 2.5. Şerit derin çekme deneyi (Viorel ve Dumitru, 2003)

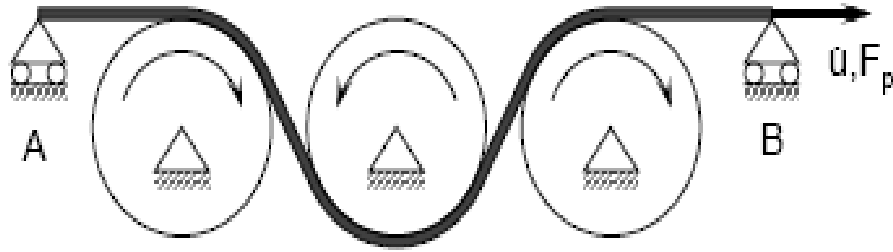
Genelde, bu tip deneyin avantajları ve dezavantajları, bu deneyi oluşturan bileşen deneylerin avantaj ve dezavantajlarından gelir ve aynılarıdır. İlave olarak, bu deney tipinin avantajı, kalıp omzu etrafındaki eğme etkilerinin, gerçek derin çekme prosesi durumunda olduğu gibi kalıbın düz kısmında sacın serbest bırakılmasını sağlayan flanşa kuvvetin uygulanılmasıdır. Şekil 2.6'da şerit derin çekme deneyi gösterilmektedir.



Şekil 2.6. Şerit derin çekme testi (Sniekers, 1996)

2.4.4. Draw-bead simülatörü

Draw-Bead simülatörü, orijinal olarak Nine tarafından geliştirilmiştir, özellikle otomotiv endüstrisine dayalı Kanada ve ABD’ de genişçe kullanılan sürtünme testidir.



Şekil 2.7. Draw-Bead simülatörü (Viorel ve Dumitru, 2003)

Şekil 2.7. draw-bead simülatörü deneyinin prensibini vermektedir. Deney şeridi, gerçek üretimdeki takımda bulunan çıkıntılara benzeyen üç tambur (radyus) üzerinden çekilir. Tamburlar dönebilir veya sabit olabilir. B noktasında şerit üzerinde yatay deplasman (yer değiştirme) mevcutken, A noktasında şeridin dikey deplasmanı (yer değiştirmesi) bastırılır. B noktasındaki bu yatay deplasmandan dolayı, tamburlar sabitken, şerit tamburlar boyunca kaymaya başlayacaktır. Tamburlar serbestçe döndüğünde, şeridin sürtünme içermediği varsayılır. Maalesef, eğme-eğmeme operasyonlarının sonucu olarak, takım/şerit ara yüzünde hız farkına neden olan şerit incilmesi meydana gelir.

Test iki aşamalı olup,

1. Tamburların sabit olduğu test aşaması ve
2. Tamburların döner olduğu test aşamasından oluşur.

Bu iki deneydeki farklılıkların, sürtünmedeki farklılıklardan meydana geldiği düşünülür. Bununla birlikte, bu test, temas açısının yaklaşık 180 derece olduğu üç katlı radyal şerit çekme testi gibi dikkate alınabilir. (Wagoner ve ark., 1994)

2.4.5. Test prensiplerinin gözden geçirilmesi

Önceki paragraflarda özgün özelliklerinin kısa tanımlamalarıyla çeşitli sürtünme testleri verilmiştir. Bu deneylerin daha detaylı bir analizi, bir radyus boyunca veya iki düz yüzey arasında kaymadan oluşan iki temel prensibin olduğunu gösterir.

Kaymanın her iki tipi (iki yüzey arasında kayma ve bir radyus boyunca kayma), yığın plastik deformasyon veya yerel plastik deformasyonla birleşmiş olabilir. Bunu göz önüne alarak şu gözlemler yapılabilir:

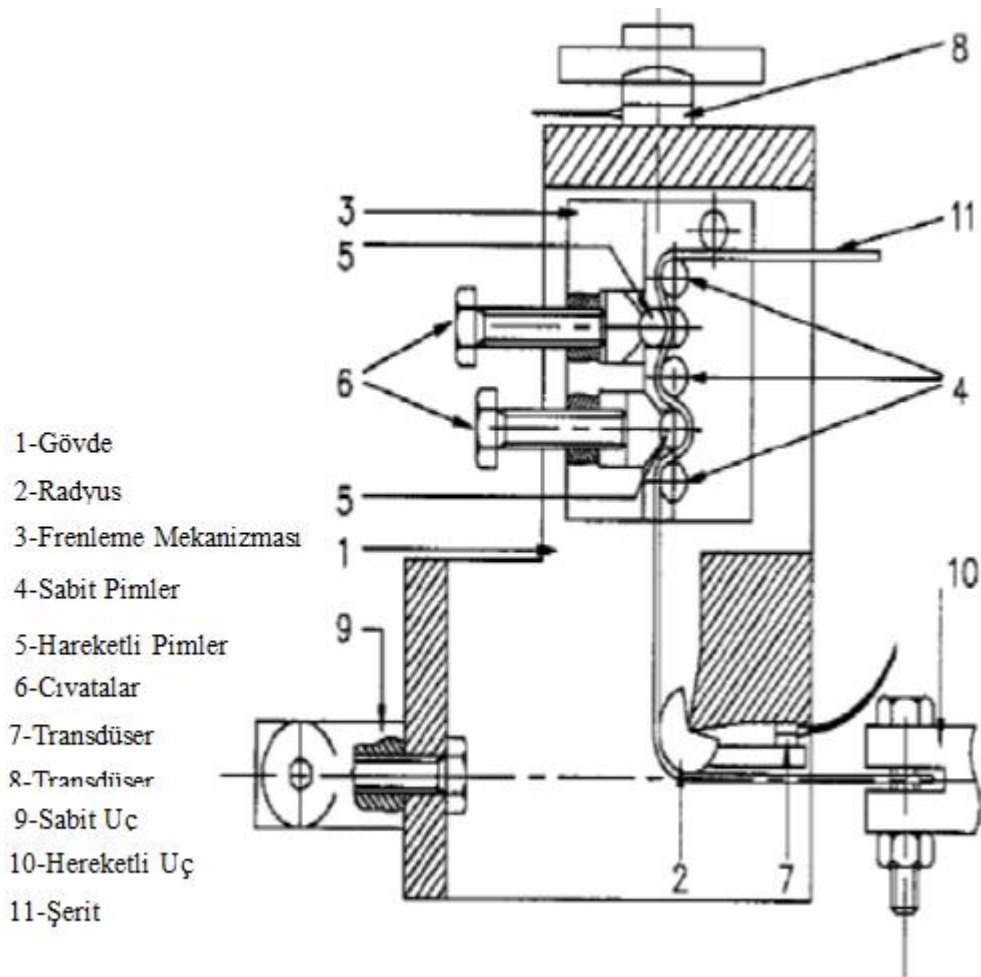
- Düz kalıp simülatörü deneyinde, yığın plastik deformasyon veya yerel plastik deformasyon ile kaymanın birleşmesi zor elde edilir; ama deney malzemesinde ön-gerilme ve ön-uzama mümkündür.
- Draw-Bead Simülatörü, artan geri-çekme kuvveti ile üç katlı radyal şerit çekme deneyi olarak görülebilir. Artan geri-çekme kuvvetlerinin sonucu olarak hesaplanan sürtünme katsayısı üç farklı durum üzerinden ortalama değer olabilir.
- Şerit çekme deneyi, düz kalıp simülatörü ile radyal şerit çekme deneylerinin birleşmesi olarak dikkate alınabilir.
- Şerit gerdirme deneyi, geri-çekme tarafına şeriti sıkıştırmak için gerekli büyüklükte bir geri-çekme kuvvetli radyal şerit çekme deneyi olarak hesaba katılabilir.

2.5. Derin Çekme Prosesinde Sürtünme Katsayısının Tespiti için Kullanılan Test Cihazları

Bölüm 2.4'te, sürtünme testi için radyal şerit çekme deneyi ve düz kalıp simülatörü adlarında iki temel tipe azaltılabilen derin çekme prosesi için genelde bilinen sürtünme testleri hakkında bilgi verildi. Bölüm 2.5'de, seçilen deney metotlarının teknik detaylarıyla birlikte ölçümlerin teknik düzenleme, veri prosesi gibi kısımlarıyla ilgilidir.

2.5.1. Radyal şerit çekme simülatörü deney cihazı

Şekil 2.8’de detaylı bir şekilde deney düzeneğini göstermektedir.



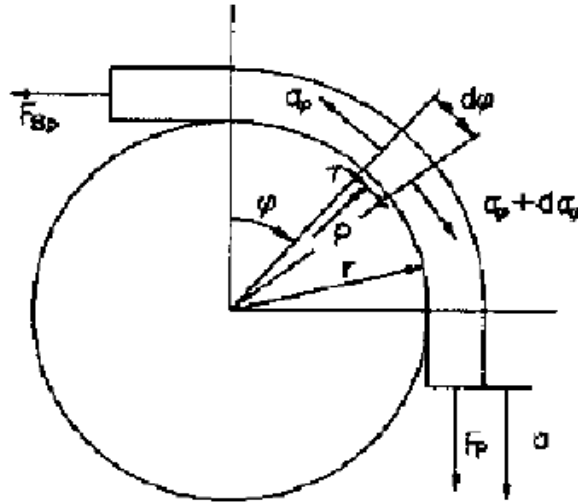
Şekil 2.8 Radyal Şerit Çekme Aparatı (Sniekers ve Smits, 1995)

Sistem, başlıca bir gövde (1), geri-çekme kuvvetini indüklemek ve çekme radyusu için bir frenleme aleti (3)’ den oluşur. Şerit 11 numaralı elemandır. Frenleme aleti draw-bead hareketine dayalıdır. Hareketli pimler, bu bölgede belirli bir deformasyon için şeride kuvvet uygulayan cıvatalar aracılığıyla ayarlanabilir. Bunun sonucu olarak, sistem frenleme mekanizması harekete geçerken şerit sürtünme içerir, geri-çekme kuvveti radyus üzerinden çekilmekte olan malzemeye uygulanır. Frenleme aleti aracılığıyla çekilen malzemenin gerçek deney bölgesine girmesine olanak sağlanmaz.

Bu sistemde, 7 ve 8 numaralı transdüser ve çekme cihazının dinamometresi ile üç kuvvet ölçülür.

2.5.2. Euler denklemi (kasnak denklemi)

Radyüsten çıkıştaki proses kuvveti F_P aktifken, kalıp radiusuna sacın girişindeki kuvvet, geri-çekme kuvveti F_{Bp} 'dir. Yaygın kullanılan kasnak(Euler) denkleminde, kalınlık sabit olarak farzedilir, bu da kuvvet oranlarıyla gerilme oranlarının değişebileceğini ima eder (Şekil 2.9). Denklem;



Şekil 2.9. Kuvvet dengesi (Sniekers, 1996)

$$\mu = \frac{1}{\theta} \ln \frac{F_P}{F_{Bp}} \quad (2.3)$$

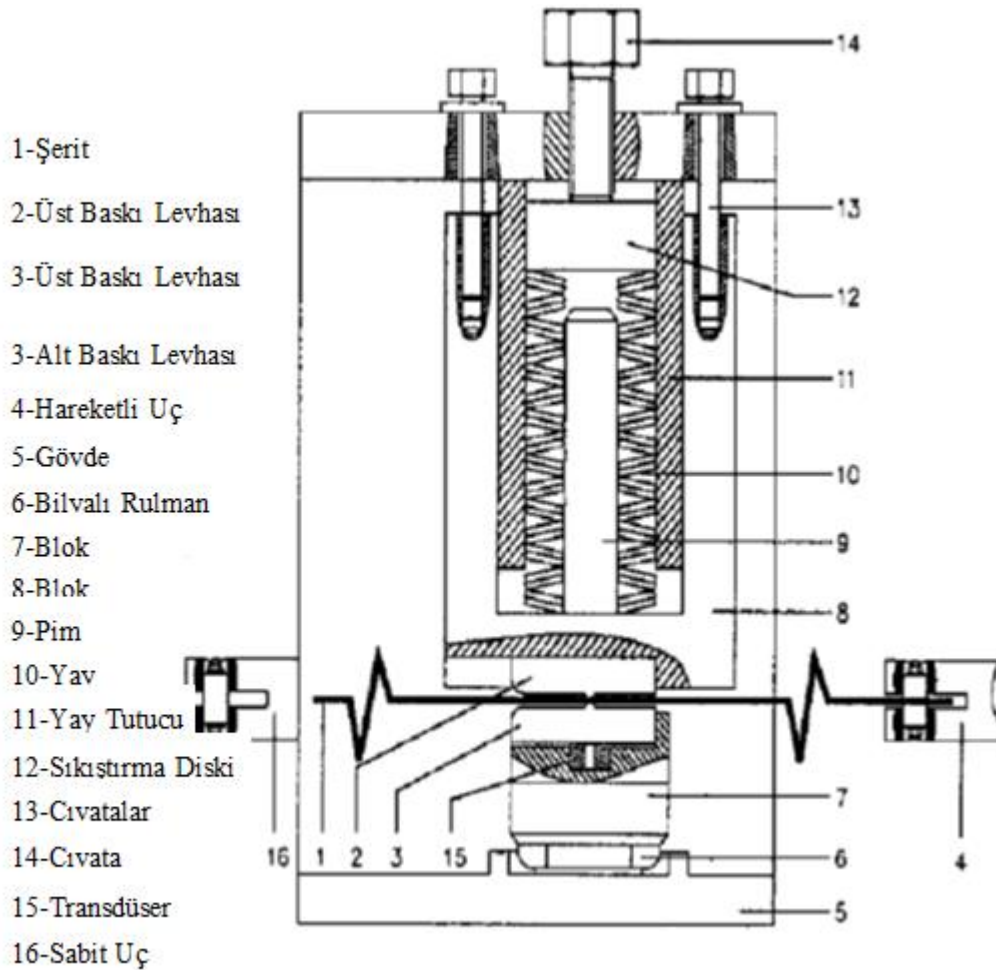
Bu metodun dezavantajı, analizin metali zar gibi davranan metal varsaymasıdır. Örneğin; malzeme bükülmeye karşı direnç göstermez, bu ip veya halat için doğrudur ama küçük radyuslar üzerinden çekilen çelik saçlar için doğru değildir.

Euler Denklemi herhangi bir temas açısı için geçerlidir. Bütünleyici yaklaşım ise sadece temas açısının 90 derece olduğu durumlarda geçerlidir. Teorik bakış açısı olarak, bütünleyici yaklaşımın Euler (kasnak) denkleminde daha geçerli olduğu görülmektedir.

2.5.3. Düz kalıp simülasyonu test cihazı

Şekil 2.10'da test düzeneği detaylı bir şekilde gösterilmektedir. Şerit (1), çekme cihazını hareketli ucu tarafından üst (2) ve alt (2) baskı levhaları arasından çekilir. Alt baskı levhası, bilyalı yatak içinde bir miktarda dönebilen blok(7) tarafından tutulur. Bilyalı yatak gövde (5) içinde montajlıdır. Üst baskı levhası yayın(10)kuvvetini

uyguladığı blok içindedir. Yay bir pim (9) yardımıyla merkezlenir. ve yay tutucusunda (11) kayar. Blok üstelik yay tutucusu üzerinden de kayar. Yay, bir cıvata (14) ile hareket ettirilebilen sıkıştırma diski (12) tarafından sıkıştırılır. Bütün bloku kaldırmak için cıvatalar (13) kullanılır.



Şekil 2.10. Düz kalıp simülatörü (Sniekers, 1996)

Proses kuvveti F_p çekme cihazının sabit ucundaki (16) dinamometresi tarafından ölçülür, ve normal kuvvet F_N alt baskı plakası üstündeki transdüser (15) yardımıyla ölçülür.

2.6. Literatür Analizi

Sürtünme katsayısını teorik olarak hesaplanması amacıyla geliştirilen birçok modelden bazısı, kimi malzemeler için başarılı tahminlerde bulunsa da tüm malzemeler için sürtünme katsayısını bire bir tahmin eden bir model yoktur. Bu nedenle hem radyüs hem de flanş bölgesindeki sürtünme katsayısını elde etmede kullanılacak deney düzeneği ile elde edilen verilerin en güvenilir şekilde simülasyon programlarında kullanılabilir.

Literatürde derin çekme prosesinde iş parçası malzemesi ile flanş ve radyüs arasındaki sürtünme katsayısının belirlenmesi için çeşitli aparatlar geliştirilmiştir. Ancak bu bölgeler için sürtünme katsayısının tek bir aparatla belirlendiği çalışmaya rastlanmamıştır. Ayrıca derin çekme prosesinde sürtünme katsayısının tespiti ile ilgili çalışmalar sınırlıdır ve özellikle farklı bölgeler için sürtünme katsayısına etki eden parametreler irdelenmiştir. Bu çalışmada sürtünme testlerinin gerçekleştirilebilmesi için, derin çekme prosesinde radyüs ve flanş bölgeleri ile sac malzeme arasındaki sürtünme katsayıları aynı anda belirleyebilecek bir aparat tasarlanıp imal edilmiştir. Böylece farklı bölgeler için farklı sürtünme katsayıları belirlenmesiyle daha gerçekçi analizler yapılabilecek ve ayrıca aynı anda her iki bölgenin de sac malzeme ile sürtünme katsayısının belirlenebilmesiyle, testlerin yapılmasında zaman ve maliyet açısından kazanç sağlanmış olacaktır. Ayrıca sürtünme katsayısına etki eden kalıp radyüsü, yüzey pürüzlülüğü, baskı plakası kuvveti, hız ve yağlayıcı faktörlerinin etkisi incelenmiştir.

3. MATERYAL VE METOT

Bu tez çalışmasında, derin çekme prosesinde flanş ve radyüs bölgelerinin sac malzeme ile arasındaki sürtünme katsayıları deneysel olarak belirlenmiştir. Bu amaçla, flanş ve radyüs bölgeleri ile sac malzeme arasındaki sürtünme katsayılarını belirleyebilecek bir aparat tasarlanıp imal edilmiştir. Bu aparat sayesinde, hem flanş hem de radyüs bölgelerinin sac malzeme ile arasındaki sürtünme katsayıları aynı anda belirlenebilmiştir. Ayrıca bu tez çalışmasında, sürtünme flanş ve radyüs bölgeleri ile sac malzeme arasındaki sürtünme katsayılarına etki eden parametreler ANOVA analizi yöntemi ile incelenmiştir. Prosesi etkileyecek parametreleri belirleyebilmek için yapılacak testler, Taguchi deney tasarımı metodu uygulanarak gerçekleştirilmiştir.

Tez çalışmasındaki temel adımlar aşağıdaki gibi özetlenebilir.

1. Sürtünme test aparatının geliştirilmesi
2. Deney tasarımı
3. Sürtünme testlerinin yapılması

Bu adımlarla ilgili detaylar aşağıda verilmiştir.

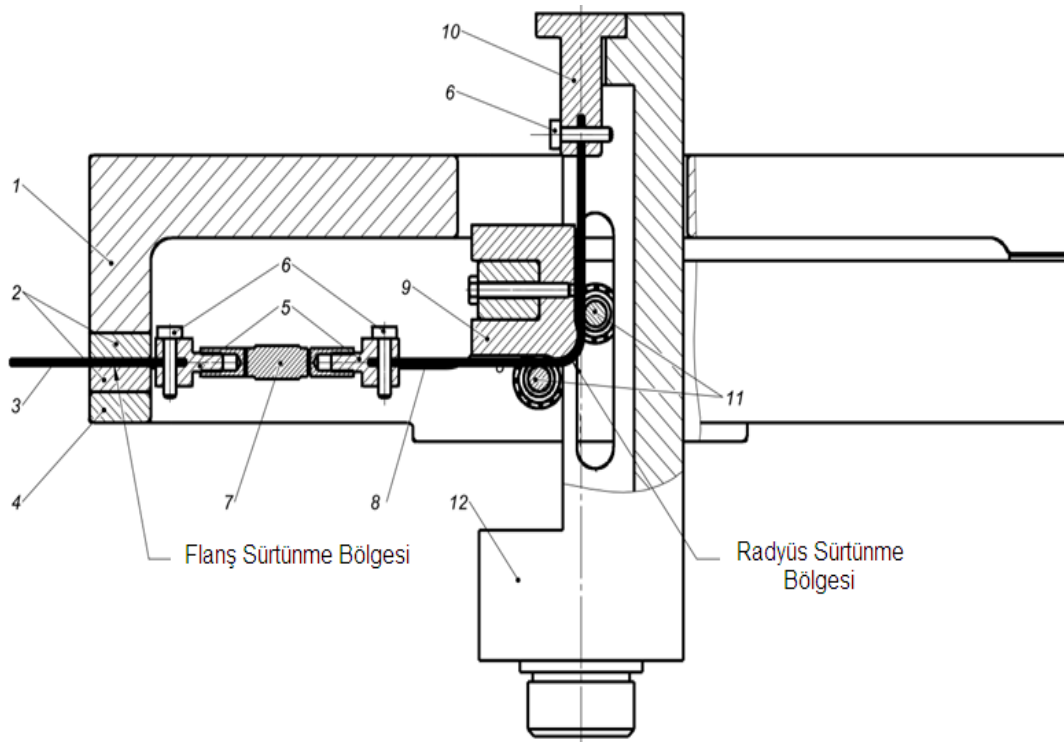
3.1. Sürtünme Test Aparatının Geliştirilmesi

Sürtünme katsayısı belirleme testlerinin gerçekleştirileceği pres, , HNC (Hydraulic Numeric Control) kontrol ile sağlanabilmektedir. Ancak, presteki baskı plakası ve stampa kuvvetlerinin ölçümü için kullanılan mevcut yük hücreleri 600 ve 800 kN kapasitelidir. Halkacı ve ark. 2013'de yaptırmış olduğu sac şekillendirme proseslerindeki sürtünme katsayılarının belirlenmesine yönelik Şekil 3.1.'de görülen test aparatında, flanş ve radyüs bölgelerindeki sürtünme katsayıları yeterli hassasiyette ölçülemez. Çünkü aparatın kullanılacağı HNC kontrollü presteki yük hücreleri 600 ve 800 kN kapasiteli olup testlerde gerekli olan 10 kN veya daha az kuvvetleri yeterli hassasiyet ölçememektedir. Testlerin yapılması esnasında kontrol ünitesine girilen değerden ziyade yük hücresinde okunan değerler dikkate alınmıştır. Tarafımızca yapılan ön sürtünme testlerinde, sürtünme testlerinin gerçekleştirileceği 10 kN veya daha az

baskı plakası kuvvetleri için, baskı plakasındaki yük hücresi kullanılarak, flanş ve radyüs bölgelerinde yeterli hassasiyette ölçüm yapılamadığı görülmüştür. Stampa için yapılan ölçümler yeterli hassasiyette elde edilebilmiştir. Baskı plakasındaki kuvvetin hassas olarak elde edilememesi, flanş ve radyüs bölgeleri için düz sac (3) ve radyüslü sac (8) elemanlarındaki kuvvetlerin doğru olarak belirlenememesine neden olmaktadır. Bu hassasiyeti presin mevcut yük hücresine girilen değer ile HBM markalı U93 mikro yük hücresinde okunan değerlerin farklı olması geliştirilen test aparat ünitesi ile daha gerçekçi sonuçlar alınabildiğini göstermektedir.

Bu tez çalışmasında, baskı plakası kuvvetinin hassas olarak belirlenebilmesi için, sürtünme testi için gerekli ve yeterli olan küçük kuvvetleri yüksek hassasiyette ölçebilecek ve sisteme gelecek eksenel yüklerden etkilenmeyecek bir mini yük hücresi kullanılmıştır.

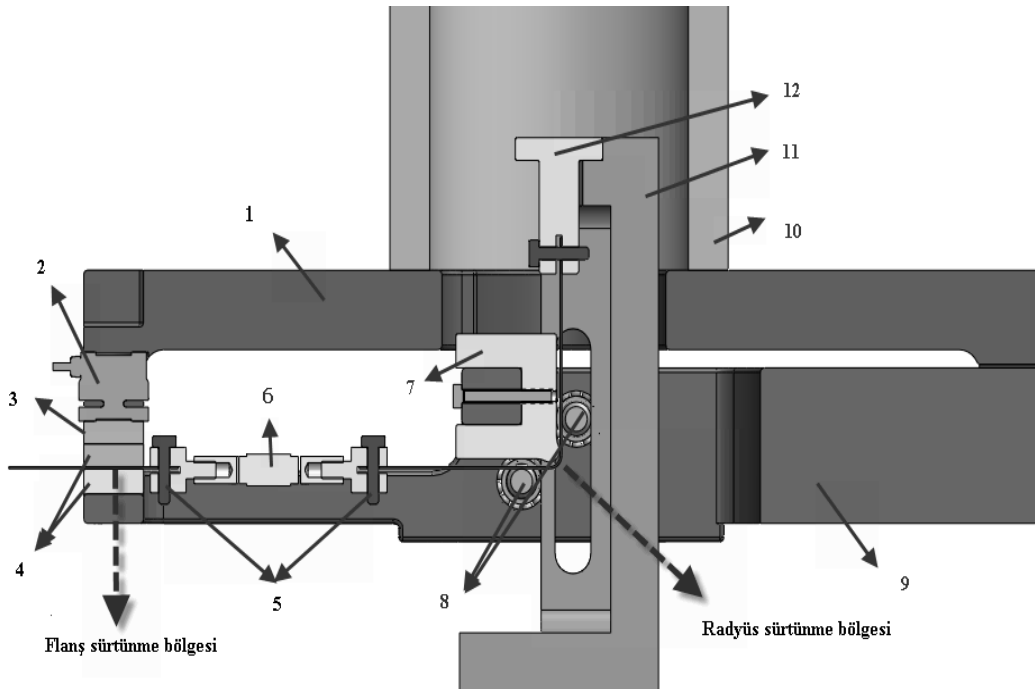
Test aparatı, üst gövde (1) ve flanş sürtünme elemanı (2) parçalarına yeni yük hücresi monte edilecek şekilde yeniden tasarlanmıştır (Şekil 3.2.). Ayrıca stampa stroğundan tam olarak faydalanılabilmesi amacıyla üst gövde (1) parçasının tablaya bağlantı bölgesi de yeniden tasarlanmıştır. Bunlara ilave olarak, test düzeneğinde görülen bazı olumsuzlukları gidermek, işlem kolaylığı ve iyileştirme amaçlı bir dizi değişikliklere gidilerek bazı parçalar yeniden tasarlanarak imal ettirilmiştir. Böylece test aparatı baskı plakası tarafından uygulanan kuvvetleri yeterli hassasiyette ölçecek tarzda geliştirilmiştir.



1. Üst gövde
2. Flanş sürtünme elemanı
3. Düz sac malzeme
4. Alt gövde
5. Bağlantı elemanı 1
6. Bağlantı elemanı pimi
7. Yük hücresi
8. Radyüslü sac malzeme
9. Radyüs sürtünme elemanı
10. Bağlantı elemanı 2
11. Destek pimi
12. Stampa

Şekil 3.1. Sürtünme test aparatı (Halkacı ve ark. 2013)

Aşağıda, önce geliştirilen parçalar anlatılmış, sonra da test aparatının diğer parçaları tanıtılmıştır.



1. Üst gövde
2. Baskı tipi mini yük hücresi
3. Yük hücresi bağlantı ara parçası
4. Flanş alt ve üst sürtünme elemanı
5. Bağlantı pimi
6. Çekme yük hücresi
7. Radyüs sürtünme elemanı (çene)
8. Radyüs destek pimi
9. Alt gövde
10. Ara eleman
11. Sac çekme elemanı
12. Bağlantı elemanı

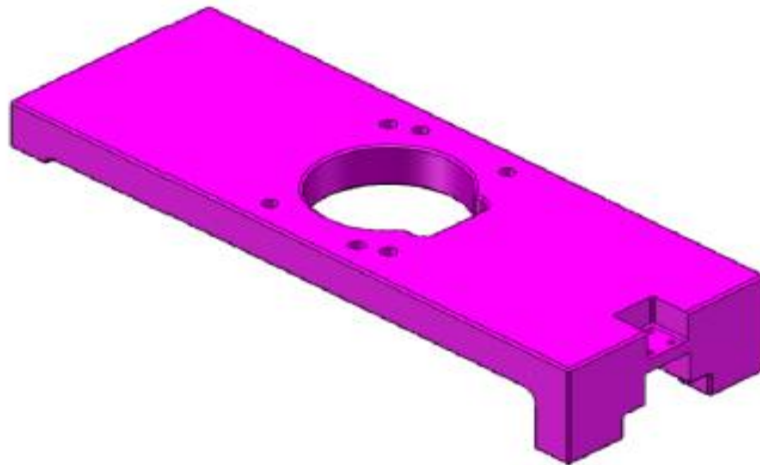
Şekil 3.2. Sürtünme test aparatının modifikasyondan sonraki hali

3.1.1. Üst gövde

Mevcut aparatın üst gövde (1), 600 kN kapasiteli yük hücresinin bağlı olduğu baskı plakası montaj edilmiş durumdadır. Bu durumda sürtünme testlerinin gerçekleştirileceği nispeten düşük baskı plakası kuvvetleri hassas olarak ölçülememektedir. Yeni mini yük hücresinden alınan kuvvet değerlerinin HNC kontrol sistemiyle kontrolü sonucunda, baskı kuvvetlerinin hassas olarak ayarlanması planlanmıştır. Bu amaçla, yeni yük hücresinin, üst gövde (1) veya alt gövdeye (4) monte edilmesi gerekli olmuştur. Flanş sürtünme elemanları (2) vasıtasıyla düz sac malzeme (3) üzerine etki eden baskı kuvvetleri ölçülecektir. Böylece pres alt tablasında bulunan 600 kN yük hücresinin hassas olmaması durumu ve pres sütunlarındaki

sürtünme kuvveti belirsizlikleri ortadan kaldırılmıştır. Yeni mini yük hücresi katalogları incelenerek gerekli montaj kuralları dikkate alınarak üst gövde (1) yeniden tasarlanarak imal edilmiştir. Böylece sac malzeme üzerine etki eden baskı kuvvetleri 10 kN'a kadar yükleri yeterli hassasiyette ölçülebilmektedir.

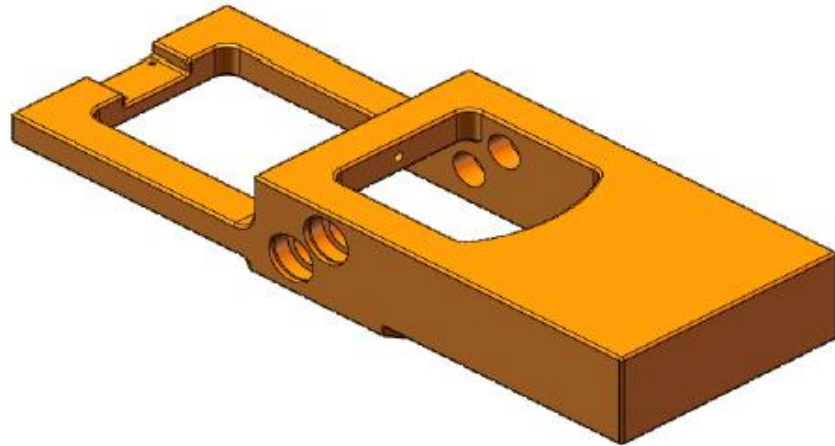
Üst gövde (1), St 52 malzemedan imal edilmiştir. Başlangıçta yük hücresi olmadan alınan baskı plakası kuvvetleri farklılık göstermesi neticesinde daha hassas ölçüm yapılması düşünülen yük hücresinin rahat geçebileceği kadar iki taraflı cep açılmıştır. Yapılan değişikliklerin ardından imalatına geçilen üst gövde, kütük malzemedan freze tezgâhında talaş kaldırmak suretiyle imal edilmiştir. Ayrıca pres tezgahında yapılan değişiklik neticesinde pres üst blok ile bağlantısında stampanın ilerlemesine izin vermediğinden üst blok ile üst gövde arasına ara silindir parçası için delikler açılmıştır. Üst gövdenin modifikasyondan sonraki hali Şekil 3.3.'te verilmiştir.



Şekil 3.3. Modifiye edilen üst gövde

3.1.2. Alt gövde

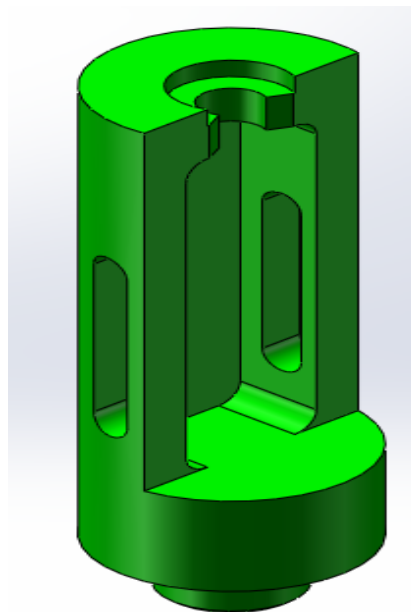
St52 malzemedan üretilmiş olan alt gövde, alt kısmındaki dairesel form yardımı ile sıkı geçme suretiyle tabla üzerine sabitlenerek, dairesel ve düz sürtünme yüzeylerinin monte edilmesi sağlanmıştır. Alt gövdede bulunan rulmanlar sayesinde, sac malzemenin radyüs sürtünme elemanı üzerinde düzgün olarak sürtünmesi sağlanmıştır. Alt gövde aşağıda Şekil 3.4.'te gösterildiği gibidir.



Şekil 3.4. Sürtünme aparatının alt gövdesi

3.1.3. Sac malzeme çekme elemanı

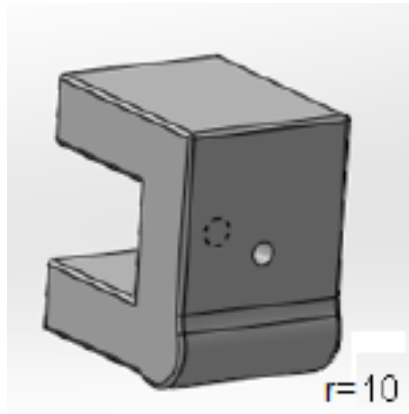
Yardımcı elemanlar vasıtasıyla bağlanan şerit malzemeyi çekmeye yarayan bu parçada iç kısmında dairesel sürtünme yüzeyi için çalışma alanı sağlamak amaçlı yapılmış olan dikdörtgen kanal bulunmaktadır. Ayrıca yan yüzeylere, alt gövdede rulman ile desteklenen pimlere uygun iki kanal bulunmaktadır. ST 52 malzemedeki olan şerit çekme elemanı Şekil 3.5’de gösterildiği gibidir.



Şekil 3.5. Şerit çekme elemanı tasarımı ve yapılan değişiklikler

3.1.4. Radyüs sürtünme elemanı

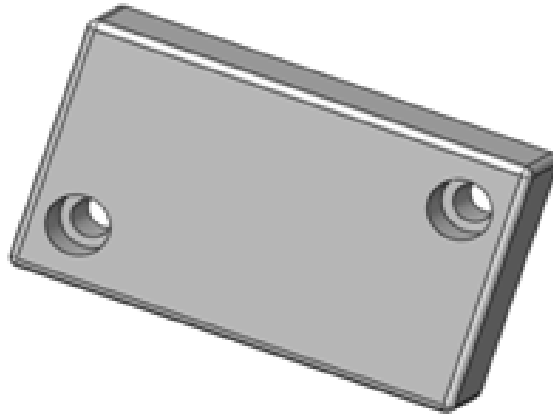
Derin ekme proseslerinde, radyüslü yüzeyleri temsil eden radyüs sürtünme elemanı, alt gövdedeki bağlantı yerine uygun olacak ve sac malzeme çekme elemanına bağlanan sacın düz olarak yukarı çekilmesini sağlayacak Şekilde tasarlanıp imal edilmiştir. Sürtünme katsayısına etki eden parametreleri araştırmak amacıyla, derin çekmede sıklıkla kullanılan 5, 7 ve 10 mm olmak üzere üç farklı radyse sahip radyüs sürtünme elemanı kestirilmiŐtir (Şekil 3.6). Radyüs yüzey pürüzlülüğü hepsinde aynı olup 0,8µm olarak ölçülmüştür. Kesilen parçalar istenildiği takdirde yalnızca radyüs yarıçapı deėiŐtirilerek 2 mm ile 37,5 mm arasındaki yarıçaplarda deney yapma imknı sağlayabilmektedir. Parçalar elektro erozyon tezgâhında istenen toleranslara uygun olarak kesilmiştir. Testin gerçek koşullara benzemesi için bu parçalar, kalıp malzemesine, mekanik özelliklerine ve yüzey pürüzlülüğüne uygun olarak imal edilmiş ve yüzeyleri sertleŐtirilmiŐtir.



Şekil 3.6. Dairesel sürtünme çeneleri

3.1.5. Düz sürtünme elemanı

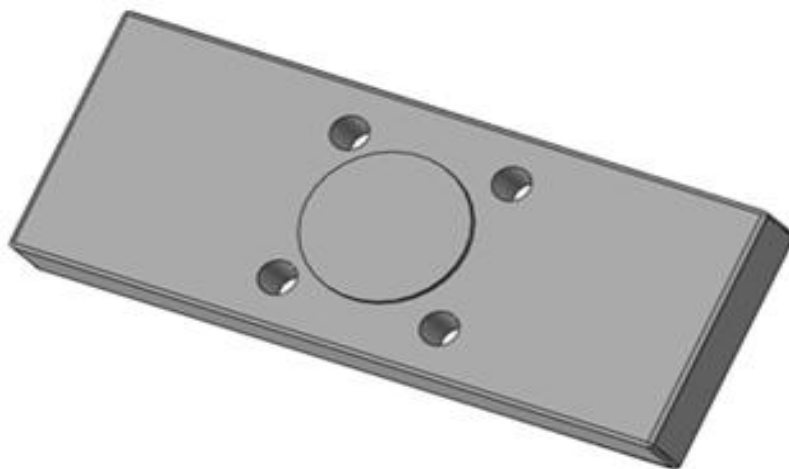
Düz sürtünme elemanı, derin çekme prosesinde flanş bölgesindeki sürtünme davranışını belirlemek amacıyla, sürtünme test aparatında sac malzemenin çekilirken srtneceği parçadır (Şekil 3.7). Bu parça, sürtünme testi sırasında kuvvetin sadece sac malzemeye uygulanmasını sağlamaktadır ve üst kalıba montajı da bu gereksinimi sağlayacak Şekilde yapılmıştır. Bu parça radyüs sürtünme elemanları gibi kalıpla aynı özellikte ve freze tezgâhında imal edilmiş ve yüzeyi sertleŐtirilmiŐtir.



Şekil 3.7. Düz sürtünme alt ve üst elemanı

3.1.6. Yük hücresi bağlantı ara parçası

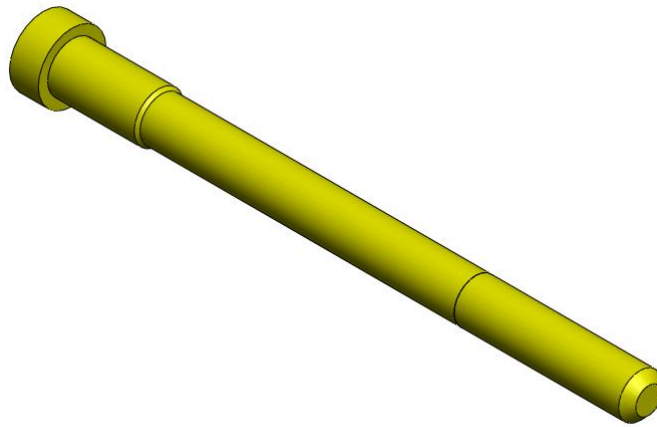
Baskı plakasının altına yerleştirilen baskı tipi mini yük hücresinin düz sürtünme elemanına gelen baskı kuvvetini ölçecek şekilde üst gövdeye monte edilmesi gerekir. Yük hücresi direk olarak sürtünme elemanına bağlandığı zaman, yük hücresinin vidaları sürtünme olayının gerçekleşeceği kısımlara gelmektedir. Bu durum sürtünme davranışını etkileyeceğinden, montaj sırasında bir ara parça kullanılmasına karar verilmiştir. Şekil 3.8.'de görülen bu ara parça sayesinde, bağlantı deliklerinin sac malzemenin sürtünme bölgesine gelmemesi sağlanmış ve bu sayede testler düz sürtünme yüzeyinde gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.8. Düz sürtünme alt ve üst elemanı

3.1.7. Destek pimleri

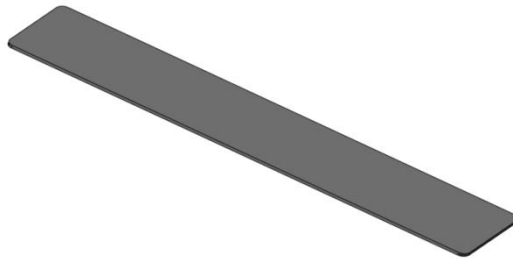
Test sırasında, radyüs sürtünme elemanının temas noktasında sac malzemeler eğilmektedir. Sac malzemeyi eğmeye çalışan kuvveti dengelemek amacıyla Şekil 3.9.'da görülen destek pimleri tasarlanmıştır. Destek pimleri Şekil 3.2.'de görüldüğü gibi radyüs sürtünme elemanının her iki tarafına da yapılmıştır. Elbette bu destek pimleriyle sac malzeme arasında belirsizliğe neden olacak bir sürtünme kuvveti oluşmamalıdır. Bunu sağlamak için, tasarlanan destek pimleri alt gövdeye monte edilen rulmanlar yardımıyla serbest olarak dönebilecek şekilde bir tasarım yapılmıştır. Kademeli olarak tasarlanan mil ortasındaki fatura ölçüsü sayesinde, farklı kalınlıklardaki sac malzemelere çekme işlemi yapılmasına imkan vermektedir.



Şekil 3.9. Destek pimleri

3.1.8. Denge sacı

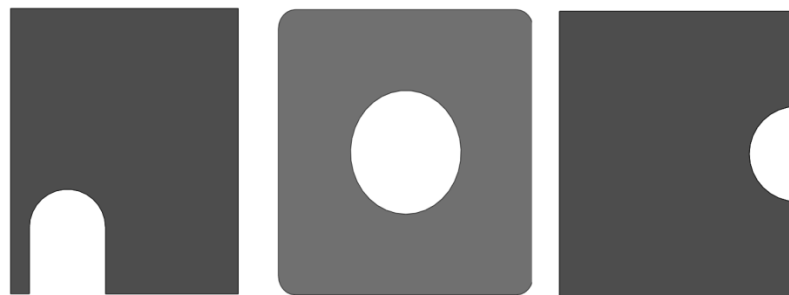
Sürtünme testlerinde, sac malzeme alt ve üst gövdede bağlı olan düz sürtünme yüzeyleri arasına yerleştirilir ve önce malzeme baskı plakası kuvveti ile sıkıştırılır. Bu durumda kalıbın diğer tarafında sac kalınlığı kadar bir açıklık meydana gelir. Baskı plakası kuvvetinin homojen olarak uygulanabilmesi için, bu boşluğa uygun kalınlıkta kesilmiş denge sacı yerleştirilmiştir ve bu sayede kalıbın her iki tarafının da tablaya teması sağlanarak dengeli bir baskı kuvveti sağlanmıştır.



Şekil 3.10. Denge sacı

3.1.9. Yardımcı saclar

Sürtünme test aparatı, 3 mm'ye kadar farklı kalınlıklarda sacların sürtünme testleri yapılacak şekilde tasarlanıp imal edilmiştir. Parçaların tasarımı 3 mm sac malzeme göz önüne alınarak tasarlandığı için, bu tez çalışmasında 1 mm sac malzeme kullanıldığı için sürtünme testi yapılırken birtakım yardımcı saclara ihtiyaç duyulmuştur. Test sırasında çekilen sac malzemelerin yatay ve düşey konumlarını koruması ve radyüs sürtünme elemanının yüzeyinde 90° kavrama açısının sağlanması gereklidir. Bu yatay ve düşey konumu sağlamak için ince saclar çekilirken 3 mm'ye olan fark kadar yardımcı saclar; düz sürtünme yüzeyi altına, radyüs sürtünme elemanının alt gövdeyle olan temas yüzeyi ile alt gövde arasına ve bağlantı elemanlarında sac malzemelerin altlarına konulmuştur.

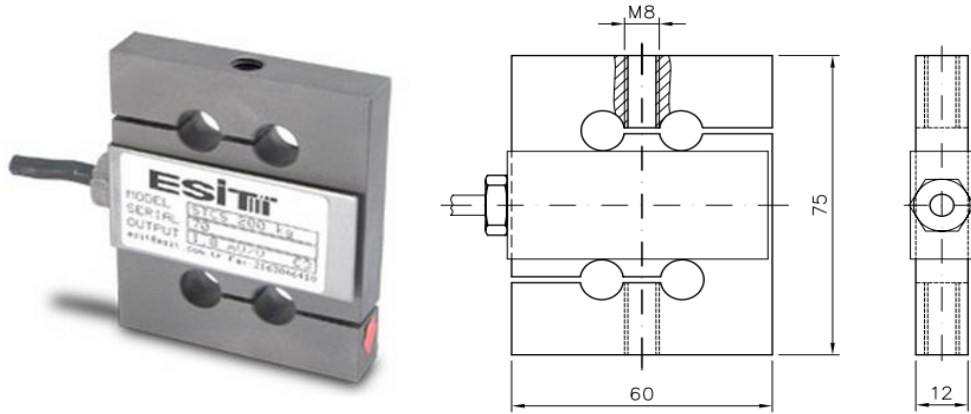


Şekil 3.11. Yardımcı saclar

3.1.10. Yük hücreleri

Baskı plakası kuvvetinin hassas olarak belirlenebilmesi amacıyla, sürtünme testi için gerekli ve yeterli olan küçük kuvvetleri yüksek hassasiyette ölçebilecek ve sacın

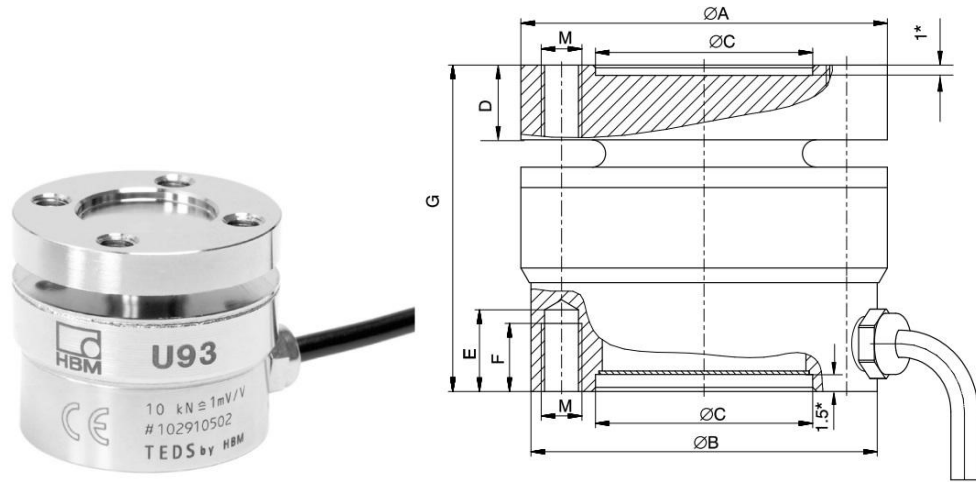
çekilmesinden dolayı ortaya çıkacak aksel yüklerden etkilenmeyecek Esitir marka STCS 500 daN C3 modelli çekme ve basmaya müsaade eden mini yük hücresi kullanılmıştır (Şekil 3.12). Mini yük hücresinden alınan kuvvet değerlerinin HNC kontrol sistemiyle kontrolü sonucunda, baskı kuvvetlerinin hassas olarak ayarlanabilmektedir. Bu mini yük hücresi, Şekil 3.2.'de görüldüğü gibi, üst gövde (1) veya alt gövdeye (4) monte edilmiştir. Bu sayede flanş sürtünme elemanları (2) vasıtasıyla düz sac malzeme (3) üzerine etki eden baskı kuvvetleri ölçülmüştür. Bu sayede, pres alt tablasında bulunan 600 kN yük hücresinin hassas olmaması durumu ve pres sütunlarındaki sürtünme kuvveti belirsizlikleri giderilmiştir ve sac malzeme üzerine etki eden baskı kuvvetleri 10 kN'a kadar yükleri yeterli hassasiyette ölçülebilmektedir. Seçilen yük hücresi daha çok basmaya müsaade eden ancak çekmeye maruz kalan yerlerde de yanal kuvvetleri de uygulanan kuvvetin %80 oranında taşıyabilmektedir.



Tipi	Kapasite	Minimum hassasiyet	Max. Güvenli aşırı yük
STCS 500	500 daN	50 g	750 daN

Şekil 3.12. Çekme kuvveti ölçümü için kullanılan yük hücresi

Hem flanş hem de radyüs bölgeleri için gerekli olan üzerindeki kuvvetlerin ölçülmesi gerekir. Bu kuvvetler, Şekil 3.2.'de görüldüğü gibi, flanş ve radyüs bölgesi için kullanılan sac malzemelerin uçlarına bağlanan çekme tipi bir yük hücresi ile ölçülmüştür. Bu yük hücresi, çekme kuvvetleri hesap edilerek HBM U93 modeli 10kN'luk yük hücresi seçilmiştir (Şekil 3.13.).



Nominal kuvvet	ØA	ØB	ØC ^{H8}	D	E	F	G	ØK ^{+0.1}	M
10 kN	35	33	18	6.2	9	7	30.5	26	M5

* Müsaade edilebilir merkezleme derinliği

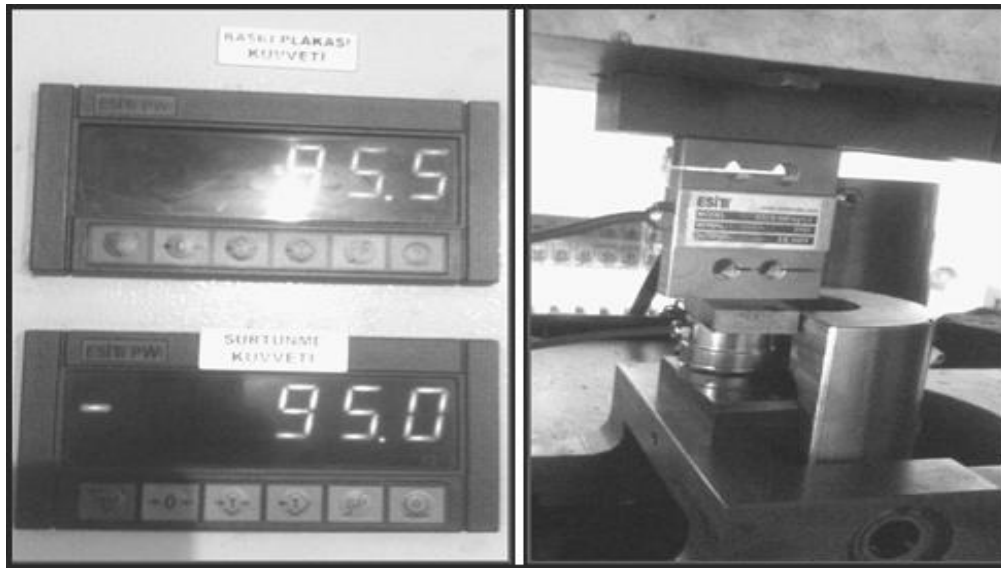
Şekil 3.13. Baskı plakası kuvveti ölçümü için kullanılan HBM firmasının mini yük hücresi

Yük hücrelerinin kalibrasyon işlemi kılavuzlarında belirtildiği gibi yapılmıştır. Yük hücresinin doğrulama işleminde, ağırlığı belli parçalar yük hücresi üzerine konularak ekrandan doğru değerler ölçüldüğü görülmüştür (Şekil 3.14.)



Şekil 3.14. Yük hücrelerinin üzerine 5 kg kütle konularak kontrol ünitesinde doğrulanması

Daha güvenilir bir doğrulama yapmak için, kullanılan iki yük hücresini paralel bağlı konumda üst üste koyarak preste baskı yapılmıştır ve ekranda iki yük hücresinin de değerlerinin aynısının elde edilmesi sağlanmıştır (Şekil 3.15.).



Şekil 3.15. Yük hücrelerinin seri konumlu yerleştirilerek preste sıkıştırılması ile kontrol ünitesinde doğrulanması

3.2. Deney Tasarımı

Testlerde, proses parametrelerini kısa süre içinde ve ekonomik olarak doğru bir şekilde belirlemek için de istatistiksel deney tasarımı metotlarının uygulanması kaçınılmazdır. Böylece proses parametreleri, daha az sayıda deney yaparak, kısa zamanda ve uygun maliyetle belirlenebilir.

Taguchi yöntemi farklı parametrelerin, farklı seviyeleri arasından en iyi kombinasyonu saptamak için kullanışlı bir yöntemdir. Her bir parametrenin, her bir seviyesini içeren tüm kombinasyonlar için oldukça fazla deneysel çalışma yapılması gereken durumlarda Taguchi yönteminde ortogonal dizi tablosu kullanılarak (Çizelge 3.1) çok daha az sayıda deneysel çalışmayla sonuca ulaşmak mümkündür.

Taguchi metodunda tasarım kalitesi (robust design) 3 temel sürece dayanmaktadır. Bunlar ;

- Dikey dizilim (orthogonal arrays)
- Sinyal-gürültü oranı (S/N ratio)
- Kayıp fonksiyonu (loss function)“ dur.

Taguchi kayıp fonksiyonu olarak bilinen ve aynı zamanda gürültü oranı (S/N-Sinyal/Noise ratio) fonksiyonu olarak da ifade edilen 3 farklı amaca uygun fonksiyon

bulunmaktadır. Buna göre, amacın “en küçük en etkili”, “en büyük en etkili” ve “nominal en etkili” olmasına göre hesaplanır. Proje kapsamında en büyük en etkili denklemi kullanılarak S/N oranları hesaplanmıştır.

En yüksek(büyük) en iyi olduğu durumda:

$$S/N = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (3.1)$$

Eşitliklerde y_i : Performans yanıtının i : gözlem değeri, n : bir denemedeki test sayısı, y :Gözlem değerlerinin ortalaması varyansını ifade etmektedir.

Çizelge 3.1. Reçete tablosu

		SEVİYE SAYISI											
		2		3		4		5					
PARAMETRE SAYISI	P=2	S=2		P=2	S=3		P=2	S=4		P=2	S=5		
	P=3	S=2	L4	P=3	S=3	L9	P=3	S=4		P=3	S=5		L25
	P=4	S=2		P=4	S=3		P=4	S=4	L' 16	P=4	S=5		
	P=5	S=2		P=5	S=3		P=5	S=4		P=5	S=5		
	P=6	S=2	L8	P=6	S=3		P=6	S=4		P=6	S=5		
	P=7	S=2		P=7	S=3	L18	P=7	S=4		P=7	S=5		
	P=8	S=2		P=8	S=3		P=8	S=4		P=8	S=5		
	P=9	S=2		P=9	S=3		P=9	S=4	L' 32	P=9	S=5		
	P=10	S=2	L11	P=10	S=3		P=10	S=4		P=10	S=5		
	P=11	S=2		P=11	S=3	L27				P=11	S=5		
	P=12	S=2		P=12	S=3					P=12	S=5		
	P=13	S=2		P=13	S=3								
	P=14	S=2	L16	P=14	S=3								
	P=15	S=2		P=15	S=3								
	P=16	S=2		P=16	S=3								
	P=17	S=2		P=17	S=3								
	P=18	S=2		P=18	S=3								
	P=19	S=2		P=19	S=3	L36							
	P=20	S=2		P=20	S=3								
	P=21	S=2		P=21	S=3								
	P=22	S=2		P=22	S=3								
	P=23	S=2		P=23	S=3								
	P=24	S=2											
	P=25	S=2											
	P=26	S=2	L32										
	P=27	S=2											
	P=28	S=2											
	P=29	S=2											
	P=30	S=2											
	P=31	S=2											

Bu tez çalışmasında, hem baskı plakası hem de kalıp radyüsü için sürtünme katsayısının aşağıda belirtilen parametrelere göre değişimi incelenmiştir. Bu parametreler;

1. Yağlayıcı
2. Hız
3. Kalıp yüzey pürüzlülüğü
4. Baskı plakası kuvveti
5. Kalıp radyüsü

olarak seçilmiştir.

Belirlenen probleme uygun ortogonal dizi seçiminde, öncelikle faktör grubunun toplam serbestlik derecesine bakılacaktır. Toplam serbestlik derecesi dizilerden hangisine uygunluk sağlıyorsa o tercih edilecektir.

Faktör grubunun toplam serbestlik derecesi; gruptaki tüm faktörlerin ve etkileşimlerin ayrı ayrı serbestlik dereceleri toplamıdır. Toplam serbestlik derecesi en fazla, seçilecek olan dizinin deneme sayısından bir eksik olabilir.

Tasarlanan deneyde, toplamda 5^3 (125) adet yapılması gerekirken, Taguchi yöntemi ile 5 faktör 3 seviye için L18 matrisi kullanılarak 18 deney yapılmıştır. Her deneyden üç tekrar olacak şekilde gerçekleştirilmiştir.

Parametreler için 1, 2 ve 3 olmak üzere üç düzey değeri belirlenmiştir. Bu çalışmada parametrelere ait seçilen düzey değerleri Çizelge 3.2’de verilmiştir.

Çizelge3.2. Taguchi L18 modeli için faktörler ve seviyeleri

Kod	FAKTÖRLER	Seviye		
		1	2	3
A	Kalıp radyüsü (mm)	5	7	10
B	Kalıp yüzey pürüzlülüğü (μm)	0,211	0,484	2,33
C	Hız, mm/dk	0,5	1,5	4,5
D	Baskı plakası kuvveti (daN)	250	500	750
E	Yağlayıcı	kuru	2PE +Wisura sıvı	Parafin +2PE

Yapılacak her bir deneyde ayarlanacak parametre değerleri, reçete tablosu yardımıyla belirlenir. Çizelge 3.3’de bu çalışmaya ait reçete tablosu verilmiştir. Gerçekleştirilen deneylerden sonra veriler varyans analizi ile S/N değerleri ve grafiği oluşturulur. Veri Analizi sağlanarak katkı oranları üzerinde durularak parametreler içerisinde etkili olanlar gözlemlenir ve yorumlanır. Katkı oranı yüksek çıkan değer daha etkili, düşük çıkan değerler ise etkisinin az olduğu tahminine varılır.

Çizelge 3.3. Reçete tablosu

Test No	A mm	B (μm)	C (mm/dk)	D (daN)	E
1	5	0,211	0,5	100	Kuru
2	5	0,484	1,5	180	Wisura sıvı+2PE
3	5	2,33	4,5	260	Parafin+2PE
4	7	0,211	0,5	180	Wisura sıvı+2PE
5	7	0,484	1,5	260	Parafin+2PE
6	7	2,33	4,5	100	Kuru
7	10	0,211	1,5	100	Parafin+2PE
8	10	0,484	4,5	180	Kuru
9	10	2,33	0,5	260	Wisura sıvı+2PE
10	5	0,211	4,5	260	Wisura sıvı+2PE
11	5	0,484	0,5	100	Parafin+2PE
12	5	2,33	1,5	180	Kuru
13	7	0,211	1,5	260	Kuru
14	7	0,484	4,5	100	Wisura sıvı+2PE
15	7	2,33	0,5	180	Parafin+2PE
16	10	0,211	4,5	180	Parafin+2PE
17	10	0,484	0,5	260	Kuru
18	10	2,33	1,5	100	Wisura sıvı+2PE

Etkilerin istatistiksel önemi çizilen doğruya göre belirlenir. Parametre veya etkileşim bu doğruya ne kadar uzak ise o kadar etkilidir. Yakın olan noktaların temsil ettiği parametreler proseste etkisi olamayan veya ihmal edilebilecek parametrelerdir.

3.3. Sürtünme Testlerinin Yapılması

Bu çalışmada malzeme olarak AISI 304 paslanmaz çelik malzemenin derin çekme prosesinde kalıp malzemeler ile olan sürtünme katsayısı belirlenmiştir. Testler Çizelge 3.3'deki reçete tablosuna göre gerçekleştirilmiştir. Deneysel tasarım metodunun test koşullarına göre gerçekleştirilmiştir.

Sürtünme testleri Şekil 3.16'da görülen deney presinde yapılmıştır. Prese ait teknik özellikler Çizelge 3.4'te verilmiştir.

Çizelge 3.4. Sürtünme testlerinin yapıldığı prese ait temel özellikler

Baskı plakası kuvveti, ton	60 ±5 daN hassasiyet
Stampa kuvveti, ton	60
Stampa stroğu, mm	300 0,01 mm hassasiyetle kontrol
Baskı plakası stroğu, mm	300
Stampa hızı, mm/dk	0-250 ±6 mm/dk hassasiyet
Tabla boyutu, mm	760x1040
Güç, kW	11



Şekil 3.16. Sürtünme testlerinin gerçekleştirildiği pres

Testlerde flanş sürtünme bölgesinde, sürtünme elemanı ile sac malzeme arasındaki, radyüs sürtünme bölgesinde ise kalıp köşe radyüsü ile sac malzeme arasındaki sürtünme katsayısı belirlenmiştir. Presin sac malzeme üzerine uygulamış olduğu baskı plakası kuvveti (F_{BH}), HNC kontrol sistemiyle kontrol edilen baskı tipi mini yük hücresi ile ve çekme kuvvetini (F_T) çekme yük hücresi yardımı ile ölçülmektedir. Bu bilgiler ile flanş bölgesindeki sürtünme katsayısı;

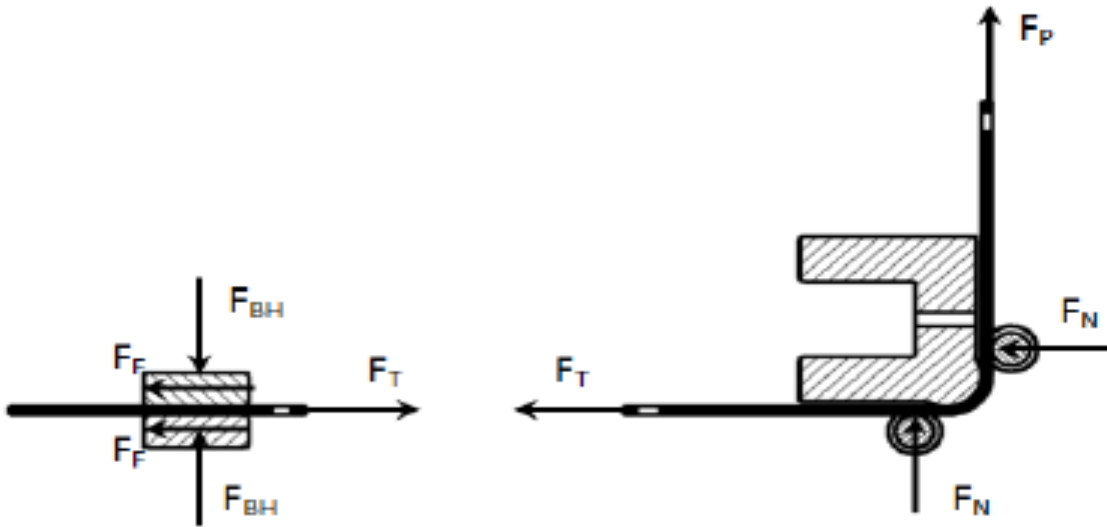
$$\mu = \frac{F_T}{2F_{BH}} \quad (3.2)$$

eşitliğinden hesaplanmıştır.

Test sırasında stampada oluşan kuvvet, stampa kuvvetini ölçen mevcut yük hücresi ile hassas olarak ölçülebilmektedir. Stampada oluşan proses kuvvetini (F_P) ve sac malzemenin radyüs üzerinde çekilmesi sonucu oluşan çekme kuvvetini (F_T) kullanarak radyüs sürtünme bölgesindeki sac malzeme ile olan sürtünme katsayısı

$$\mu = \frac{1}{\theta} \ln \frac{F_P}{F_T} \quad (3.3)$$

Euler denkleminde hesaplanmıştır. Flanş ve radyüste bölgelerinde oluşan kuvvetler Şekil 3.17’de gösterildiği gibidir.



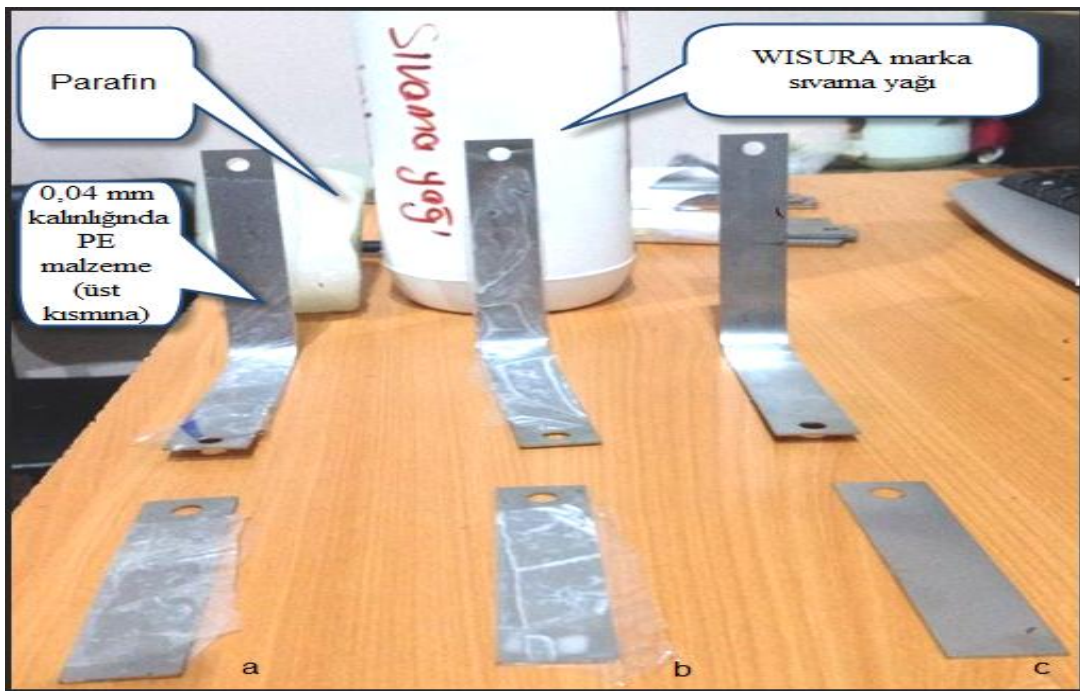
Şekil 3.17. Flanş ve radyüs bölgelerinde oluşan kuvvetler (Halkacı ve ark., 2013)

Testlerde iş parçası malzemesi olarak, kimyasal bileşimi ve mekanik özellikleri Çizelge 3.5’de verilen 1 mm kalınlığında AISI 304 paslanmaz çelik sac malzeme kullanılmıştır. İş parçası ve test düzeneği üzerindeki yağ ve kir tabakaları test öncesi mekanik yöntemlerle temizlenmiştir.

Çizelge 3.5. Deney numunelerinin kimyasal bileşimi ve mekanik özellikleri

Bileşim (% Ağırlık)	C	Mn	P	S	Si	Cr	Mo	Ni	Cu
	0.08	2.00	0.04	0.030	1.00	19	0.20	10.5	0.02
Mekanik Özellikler	Akma (Mpa)		Çekme (MPa)		% Uzama	% Kesit Daralması		Elastisite Modülü (GPa)	
	290		570		55	65		250	

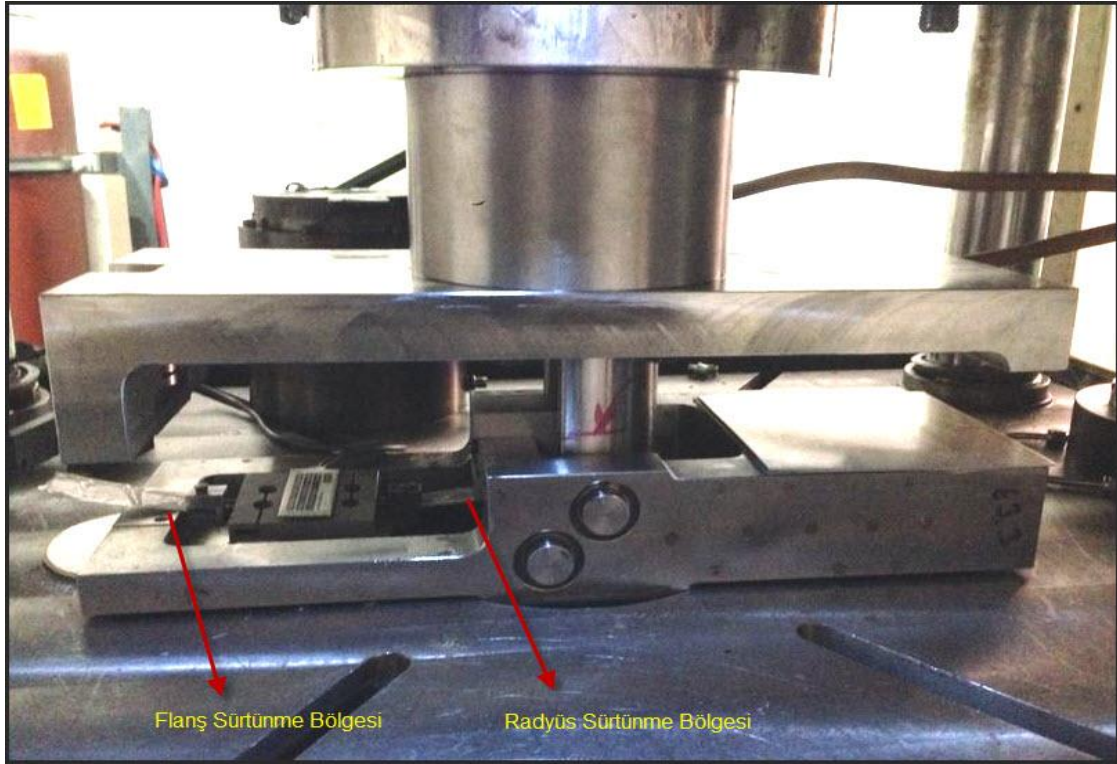
Test yapılmadan önce numuneler Şekil 3.18’de görüldüğü gibi hazırlanmıştır.



Şekil 3.18. Test numunelerin a) parafin üzerine poşet b) sıvama sıvısı üzerine poşet c) kuru olarak hazırlanma işlemi

AISI 304 Çelik malzemeler radyüs bölgesi için 15x200 mm ve flanş bölgesi için 15x130 mm ebatlarında hassas kesim ile kesilmiştir. Flanş bölgesini için bir delik açılmış olup aynı işlem radyüs bölgesi için de iki adet delik delinmiştir. Kesimi tamamlanan numuneler radyüs bölgelerine göre 90 derece olacak şekle getirilmiştir. Ardından kuru, Wisura sıvama sıvısı ile birlikte PE poşet ve parafin ile birlikte PE poşet ile hazır hale getirilmiştir.

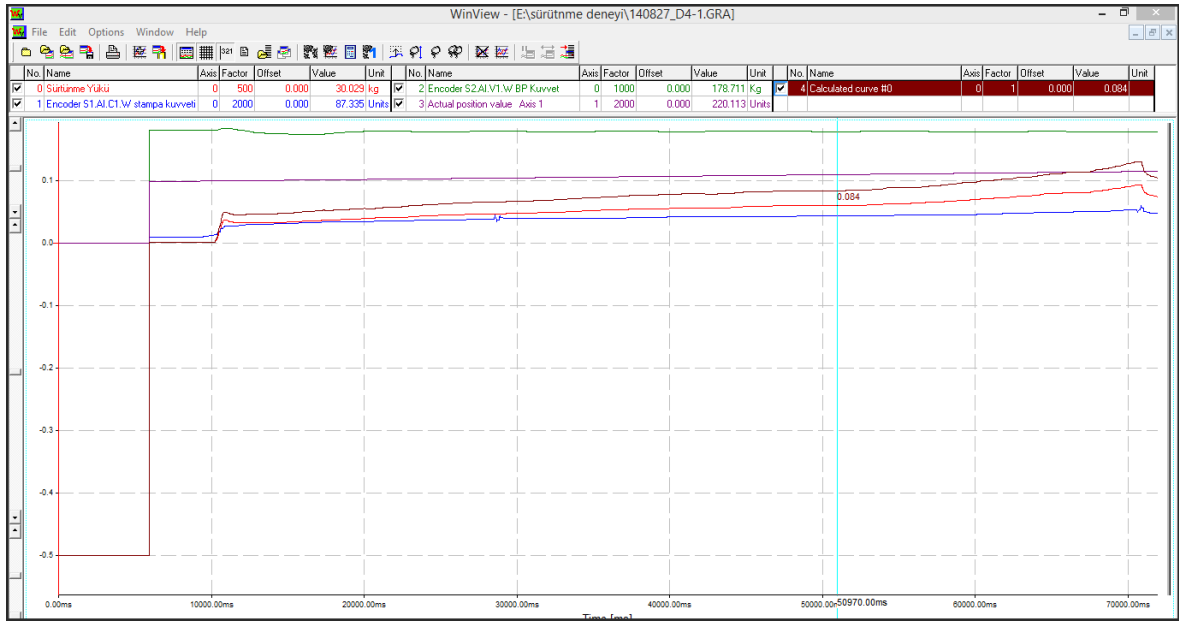
Hazırlanan numuneler test düzeneği üzerine Şekil 3.19’da görüldüğü üzere yerleştirilmiştir.



Şekil 3.19. Sac malzemelerinin sürtünme test aparatı üzerine yerleştirilmesi işlemi

Numuneler yerleştirilmeden önce deney durumuna göre yağlanmıştır. Sonra baskı plakası kuvveti istenilen kuvvette bastırıldıktan sonra, stampa belirli hızlarda ilerlemiştir. HNC kontrol sayesinde istenilen kuvvetler hassas olarak ayarlanabilmiş ve stampa konumu sınırlandırılarak sistem korumaya alınmıştır. Böylece sürtünme testleri gerçekleştirilmiştir.

AISI 304 malzemenin sürtünme katsayısının belirlenmesi için tasarlanıp imal edilen sürtünme test aparatının montaj işlemi sağlandıktan sonra, hem çekme hem de basma yük hücrelerinde okunan değerleri, çift etkili preste bağlı bulunan HNC kontrol ünitesinden direkt bilgisayar ortamından elde edilen verileri, winview yazılımı ile değerleri tespit edilmiştir (Şekil 3.20).

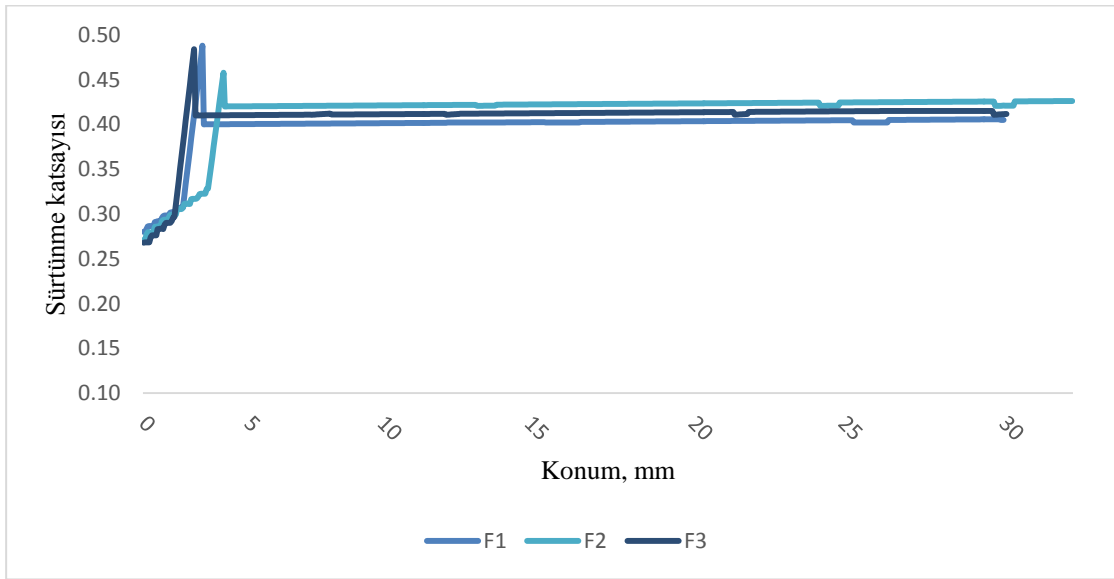


Şekil 3.20. Winview yazılım ile elde edilen eğriler

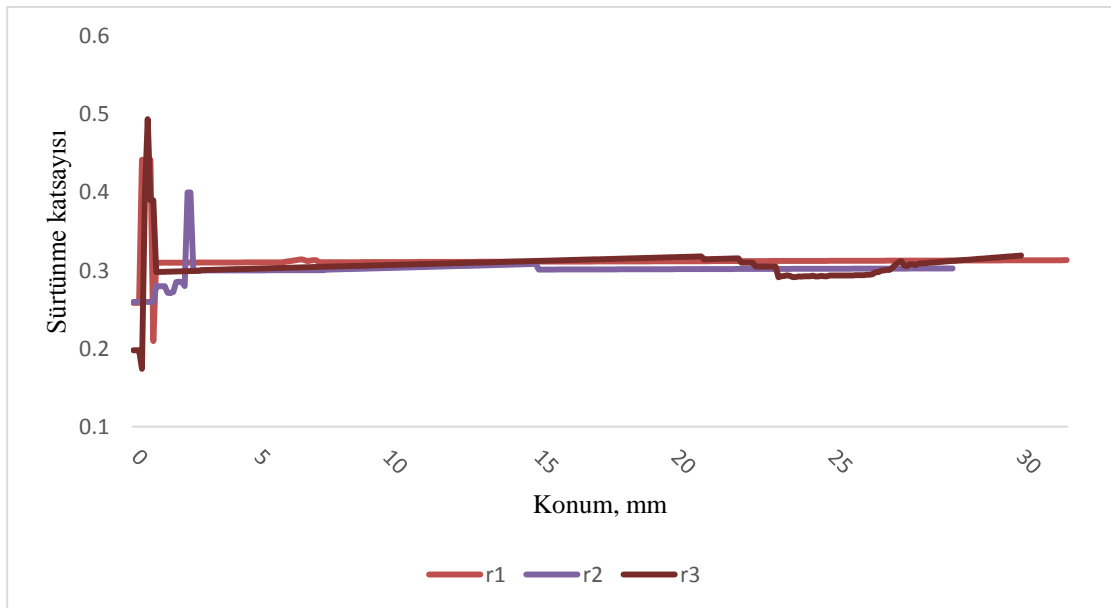
Winview yazılımı ile elde edilen veriler Excel ortamına alınarak her bir deney için eğriler elde edilmiştir. Her bir deneyin dinamik sürtünme katsayısı elde edilmiştir. Elde edilen sürtünme katsayılarının her bir tekrarları için ortalamaları alınmıştır. Alınan ortalama sürtünme katsayıları Çizelge 4.1’de gösterilmiştir.

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Yapılan çalışmada flanş ve radyüs bölgeleri ile sac malzeme arasındaki kuru sürtünme durumlarına ait tipik eğriler Şekil 4.1 ve 4.2’de gösterildiği gibidir. testlerde elde edilen sürtünme katsayısına ait eğriler aşağıdaki test numaralarına göre verilmiştir. Grafik üzerinde f harfi ile flanş ve r harfi ile de radyüs kısmında oluşan sürtünme katsayılarına ait eğrileri temsil etmektedir. Elde edilen tüm eğriler Ek-B’de verilmiştir.

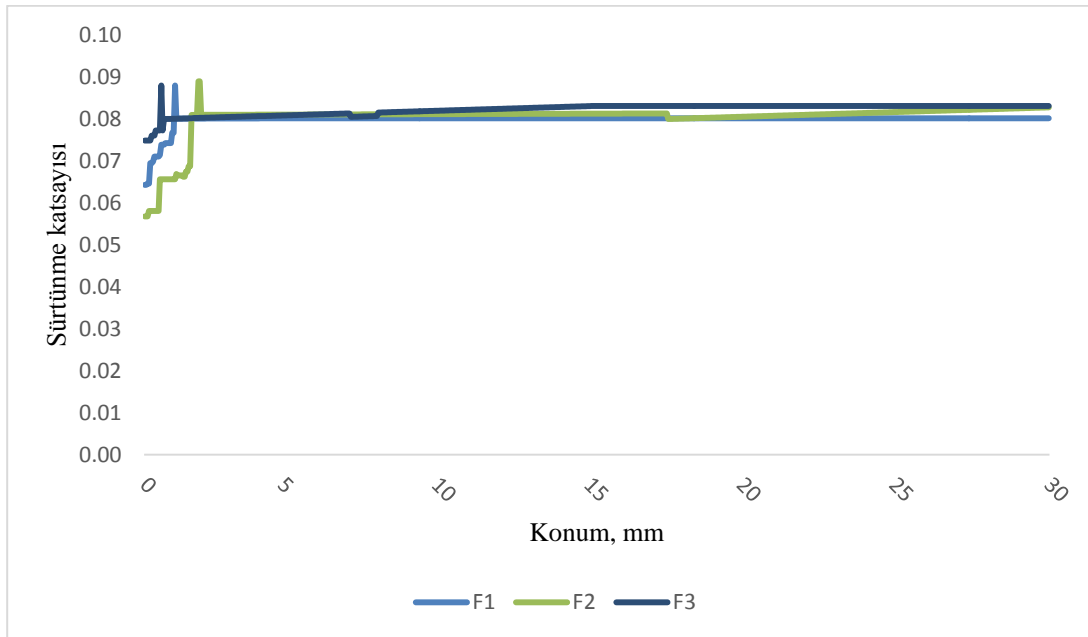


Şekil 4.1. Sac malzeme ve flanş bölgesindeki kuru sürtünme katsayısı eğrisi (Sac malzeme AISI 304 ile Kalıp malzeme AISI 4140)

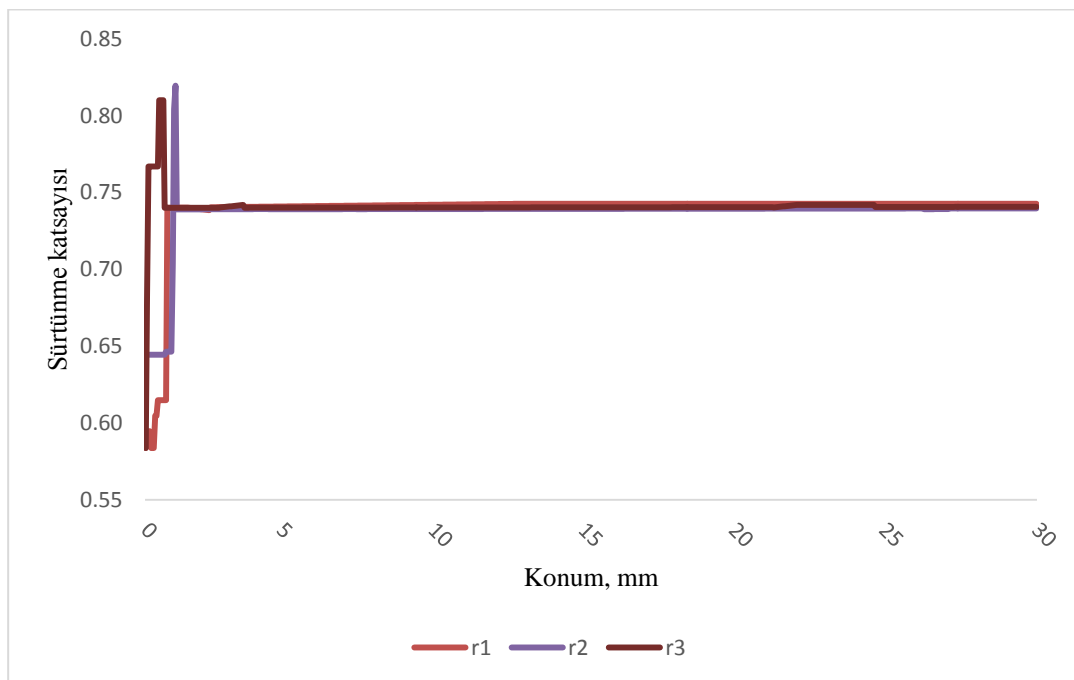


Şekil 4.2. Sac malzeme ve radyüs bölgesindeki kuru sürtünme katsayısı eğrisi (Sac malzeme AISI 304 ile Kalıp malzeme AISI 4140)

Ayrıca yapılan çalışmada flanş ve radyüs bölgeleri için visura sıvama sıvısı ile birlikte polietilen poşetli sac malzeme arasındaki durumlarına ait tipik eğriler Şekil 4.3 ve 4.4’de gösterildiği gibidir.

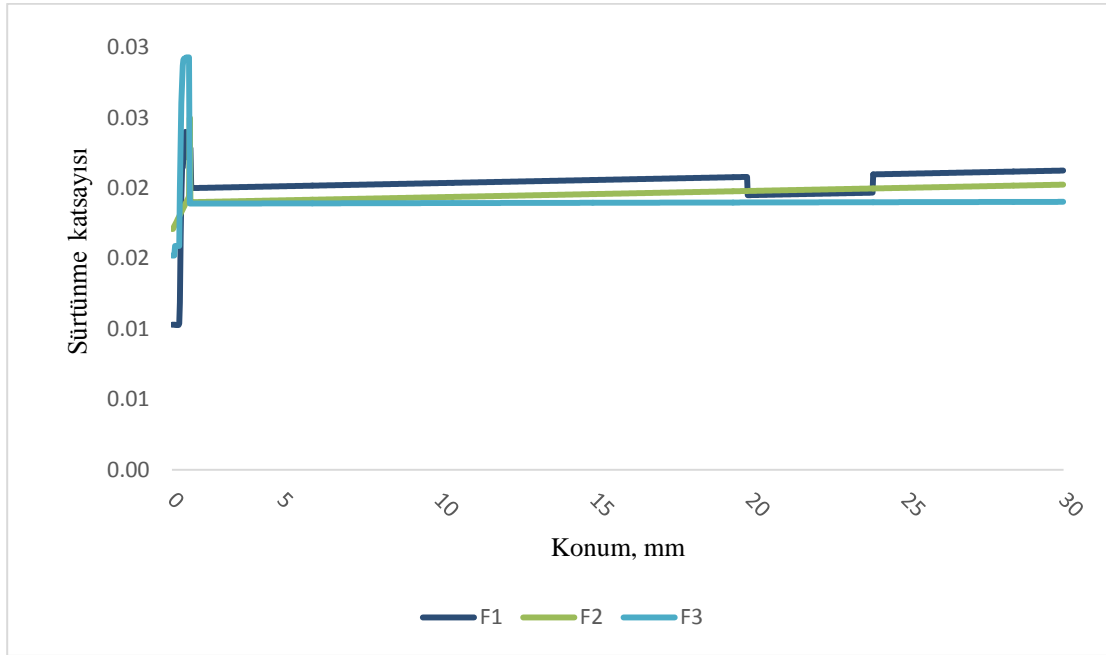


Şekil 4.3. Sac malzeme ve flanş bölgesindeki visura sıvı + 2PE sürtünme katsayısı eğrisi (Sac malzeme AISI 304 ile Kalıp malzeme AISI 4140)

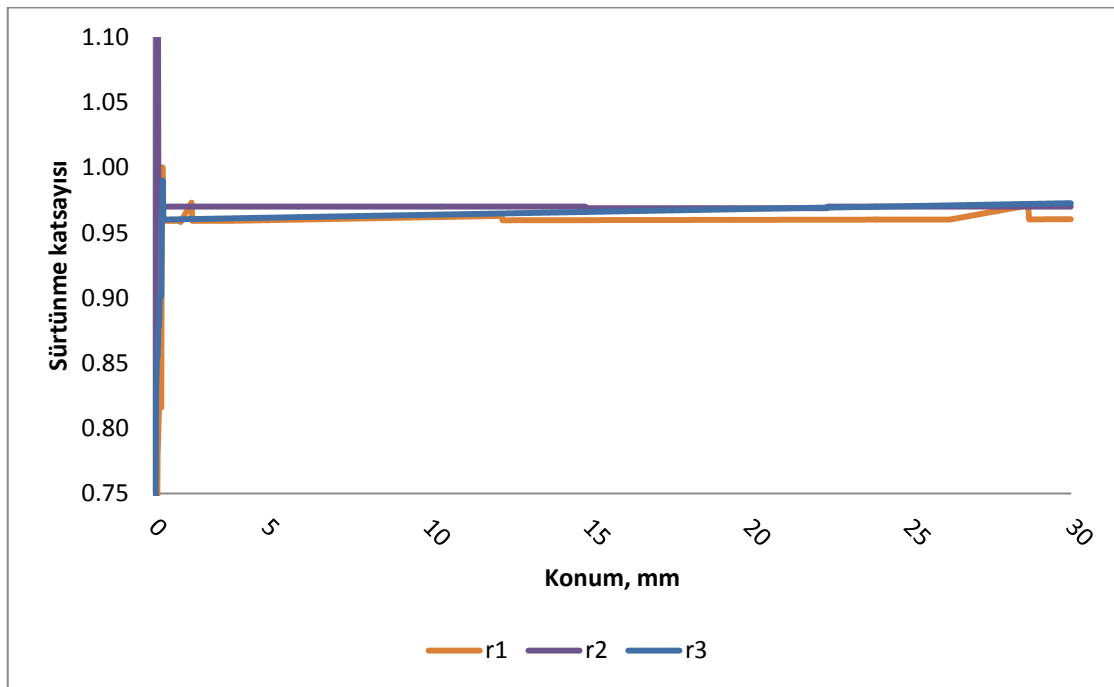


Şekil 4.4. Sac malzeme ve radyüs bölgesindeki visura sıvı + 2PE sürtünme katsayısı eğrisi (Sac malzeme AISI 304 ile Kalıp malzeme AISI 4140)

Ayrıca yapılan çalışmada flanş ve radyüs bölgeleri için parafin ile birlikte polietilen poşetli sac malzeme arasındaki durumlarına ait tipik eğriler Şekil 4.5 ve 4.6'da gösterildiği gibidir.



Şekil 4.5. Sac malzeme ve flanş bölgesindeki parafin + 2PE sürtünme katsayısı eğrisi (Sac malzeme AISI 304 ile Kalıp malzeme AISI 4140)



Şekil 4.6. Sac malzeme ve radyüs bölgesindeki parafin + 2PE sürtünme katsayısı eğrisi (Sac malzeme AISI 304 ile Kalıp malzeme AISI 4140)

Deneyler sonucunda elde edilen sürtünme katsayıları ile S/N oranı Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Flanş ve radyüs bölgesinde oluşan dinamik sürtünme katsayısı ortalaması ve Proses parametreleri için S/N karşılıkları

Test No	Sac malzeme ile flanş arasındaki sürtünme katsayısı	Sac malzeme ile radyüs arasındaki sürtünme katsayısı	Flanş bölgesi S/N (dB)	Radyüs bölgesi S/N (dB)
1	0,25	0,43	12,03	7,28
2	0,05	0,72	25,43	2,86
3	0,02	0,92	36,43	0,69
4	0,09	0,69	21,35	3,18
5	0,02	0,92	36,18	0,72
6	0,40	0,36	7,93	8,84
7	0,03	0,83	29,78	1,63
8	0,39	0,24	8,19	12,36
9	0,06	0,42	24,77	7,62
10	0,05	0,60	25,77	4,49
11	0,02	0,86	32,76	1,32
12	0,45	0,30	6,87	10,37
13	0,41	0,34	7,65	9,49
14	0,08	0,74	21,99	2,66
15	0,02	0,96	34,69	0,37
16	0,02	0,93	33,90	0,64
17	0,43	0,19	7,34	14,23
18	0,10	0,52	20,19	5,62

S/N oranlarına ek olarak, her bir parametre seviyesinin sürtünme katsayısı üzerindeki etkilerini araştırmak amacıyla ilgili parametre seviyelerinin S/N karşılıkları Çizelge 4.2 ve 4.3’de gösterilmiştir.

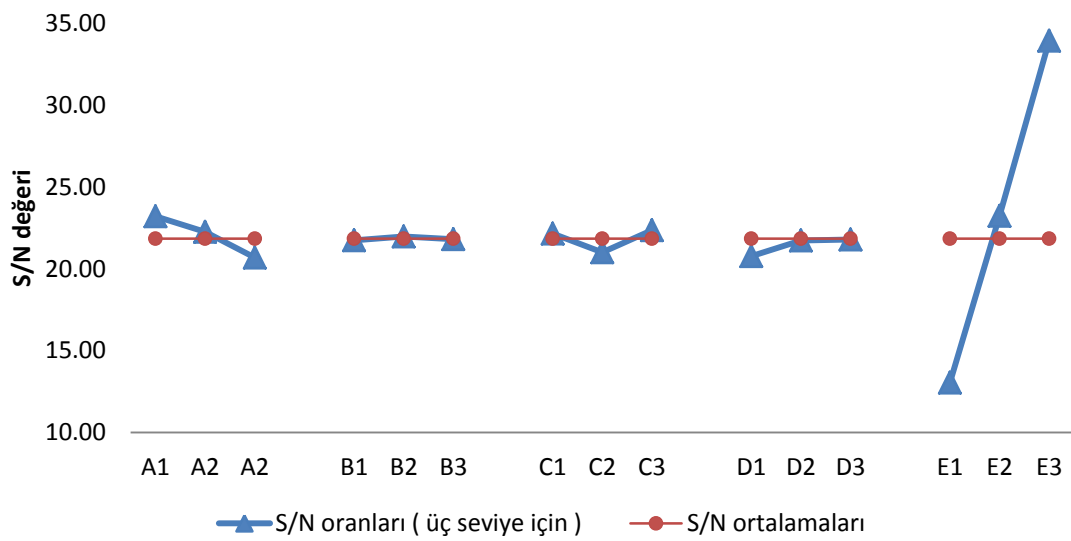
Çizelge 4.2. Flanş bölgesi için proses parametreleri S/N sonuçları

Kod	S/N oranı			Toplam Ortalama S/N	Maksimum-minimum
	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3		
1 A: Kalıp Radyüsü (mm)	23,22	21,64	20,69	21,85	2,52
2 B: Kalıp yüzey pürüzlülüğü (µm)	21,75	21,98	21,81		0,24
3 C: Hız (mm/dk)	22,16	21,02	22,37		1,35
4 D: Baskı plakası kuvveti (daN)	20,78	21,74	21,80		1,02
5 E: Yağlayıcı	13,04	23,25	33,96		20,91

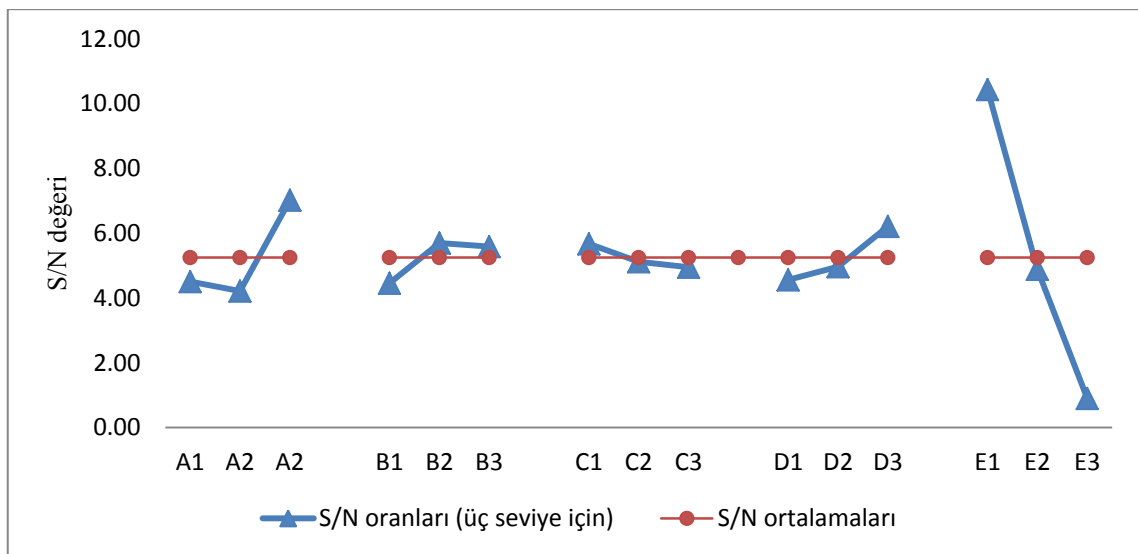
Çizelge 4.3. Radyüs bölgesi için proses parametreleri S/N sonuçları

Kod	S/N oranı			Toplam Ortalama S/N	Maksimum-minimum
	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3		
1 A: Kalıp radyüsü (mm)	4,50	4,21	7,02	5,24	2,81
2 B: Kalıp yüzey pürüzlülüğü (µm)	4,45	5,69	5,59		1,24
3 C: Hız (mm/dk)	5,67	5,12	4,95		0,72
4 D: Baskı plakası kuvveti (daN)	4,56	4,96	6,21		1,65
5 E: Yağlayıcı	10,43	4,88	0,89		9,54

Flanş ve radyüs bölgelerine ait S/N oranları grafiksel gösterim metoduna uygun olarak Şekil 4.7 ve Şekil 4.8’de grafiksel ve sayısal olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.7. Flanş bölgesi için S/N oranları grafiği



Şekil 4.8. Radyüs bölgesi için S/N oranları grafiği

Veri analizi özeti Çizelge 4.4’de gösterildiği gibidir.

Çizelge 4.4. Veri analiz özeti

Kod	S/N için Sonuç (En Büyük En iyi)	
	Flanş Etki derecesi	Radyüs Etki derecesi
1 A: Kalıp Radyüsü (mm)	2	2
2 B: Kalıp yüzey pürüzlülüğü (µm)	4	4
3 C:Hız (mm/dk)	3	5
4 D:Baskı plakası kuvveti (daN)	5	3
5 E: Yağlayıcı	1	1

Varyans analizi (ANOVA) ile hangi parametrelerin hangi oranda etkili olduğunu göstermek için Çizelge 4.5 ve Çizelge 4.6’da 1mm AISI 304 sac için varyans analiz özeti gösterilmiştir.

Çizelge 4.5. Flanş bölgesi için varyans analizi

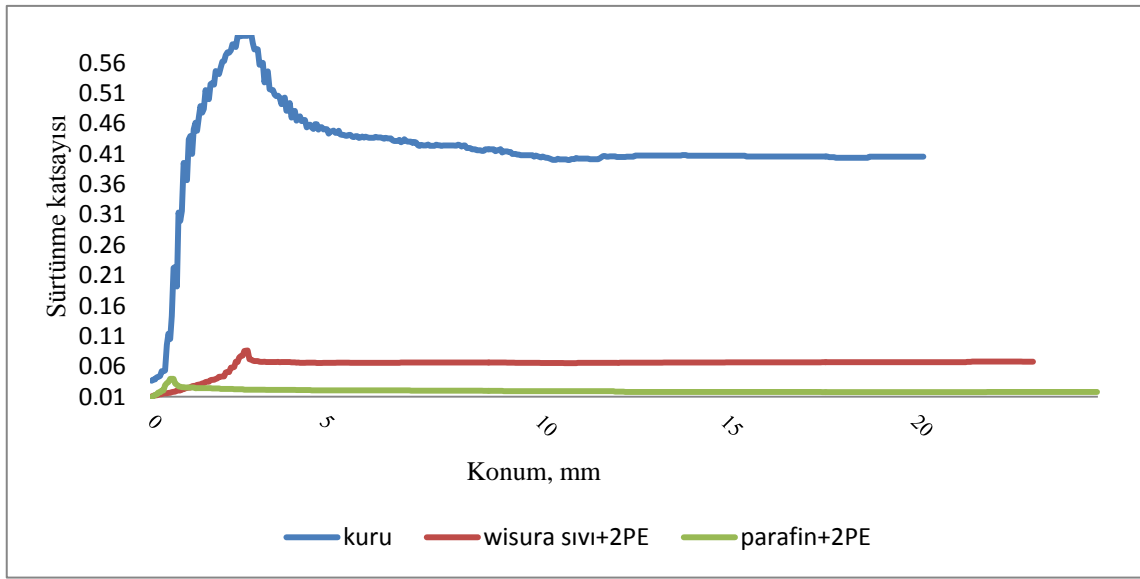
Kod	Serbestlik derecesi	Kareler toplamı (SS)	Ortalama kareler toplamı	Varyasyon oranı	Katkı oranı
1 A: Kalıp Radyüsü (mm)	2	9,74	4,87	0,30	1,40
2 B: Kalıp yüzey pürüzlülüğü (µm)	2	0,09	0,04	0,00	0,01
3 C: Hız (mm/dk)	2	3,17	1,58	0,10	0,46
4 D: Baskı plakası kuvveti (daN)	2	3,47	1,73	0,11	0,50
5 E: Yağlayıcı	2	678,42	339,21	20,60	97,63
Hata (e)	5	15,02	3,00		
Toplam	10	768,13	76,81		

Çizelge 4.6. Radyüs bölgesi için varyans analizi

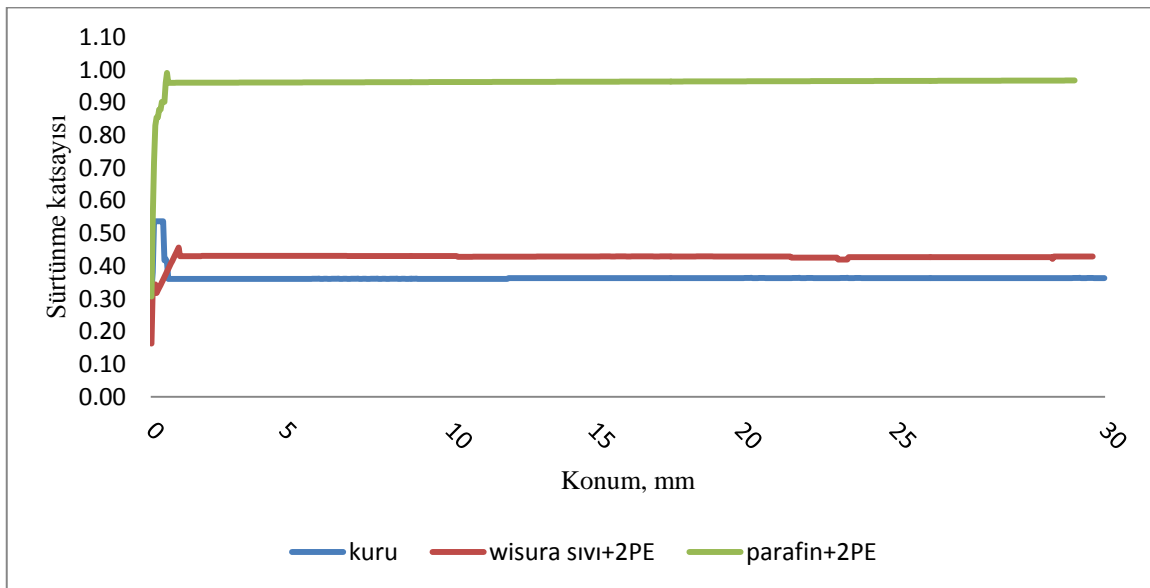
Kod	Serbestlik derecesi	Kareler toplamı (SS)	Ortalama kareler toplamı	Varyasyon oranı	Katkı oranı
1 A: Kalıp Radyüsü (mm)	2	14,31	7,16	0,32	8,93
2 B: Kalıp yüzey pürüzlülüğü (µm)	2	2,83	1,42	0,06	1,77
3 C: Hız (mm/dk)	2	0,85	0,42	0,02	0,53
4 D: Baskı plakası kuvveti (daN)	2	4,44	2,22	0,10	2,77
5 E: Yağlayıcı	2	137,82	68,91	3,07	86,00
Hata (e)	5	27,13	5,43		
Toplam	10	244,39	24,44		

Yapılan çalışmada flanş bölgesi için yağlayıcının oldukça etkili olduğu, radyüs bölgesi için yağlayıcı ile birlikte kalıp radyüsünün de etkili olduğu görülmektedir. Çalışmada yağlayıcı olarak kullanılan malzemeler incelendiğinde;

1. Kuru
 2. Sıvama yağı (WISURA marka) ile birlikte 0,04 mm kalınlığında 2PE malzeme
 3. Parafin ile birlikte 0,04 mm kalınlığında 2PE malzeme
- kullanılmıştır. Şekil 4.9 ve Şekil 4.10'da flanş ve radyüs bölgelerinde yüzey sürtünme katsayılarının etkisi eğrisel olarak gösterilmiştir.

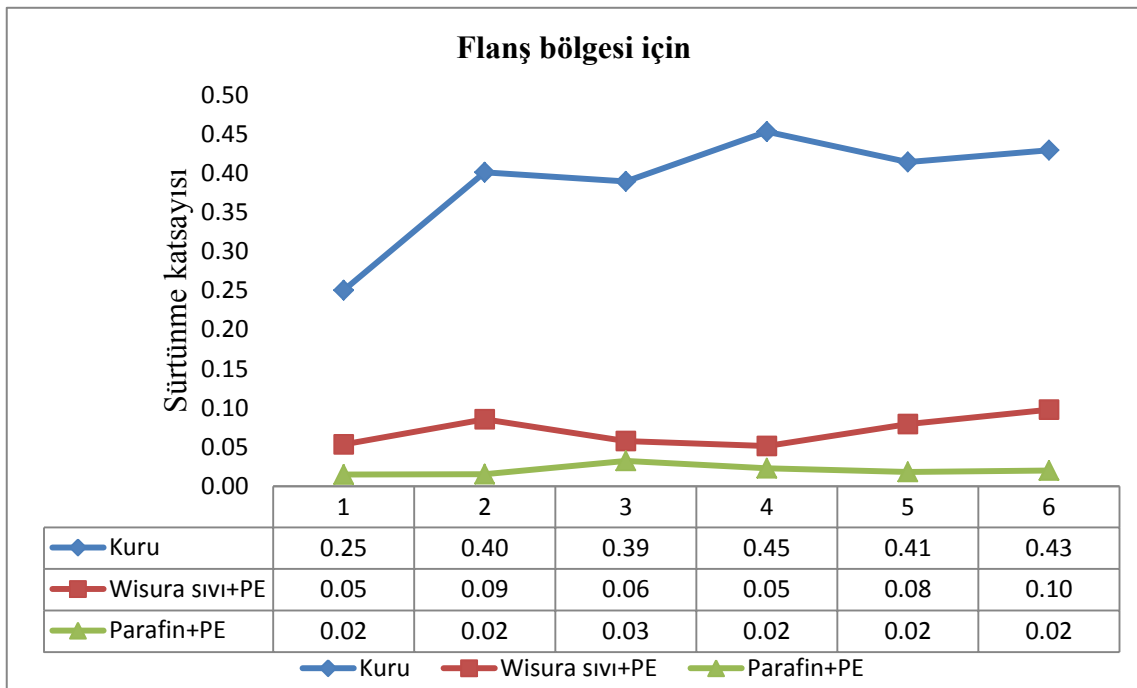


Şekil 4.9. Flanş bölgesinde kuru, sıvama sıvılı poşet ve parafinli poşet sürtünme katsayıları

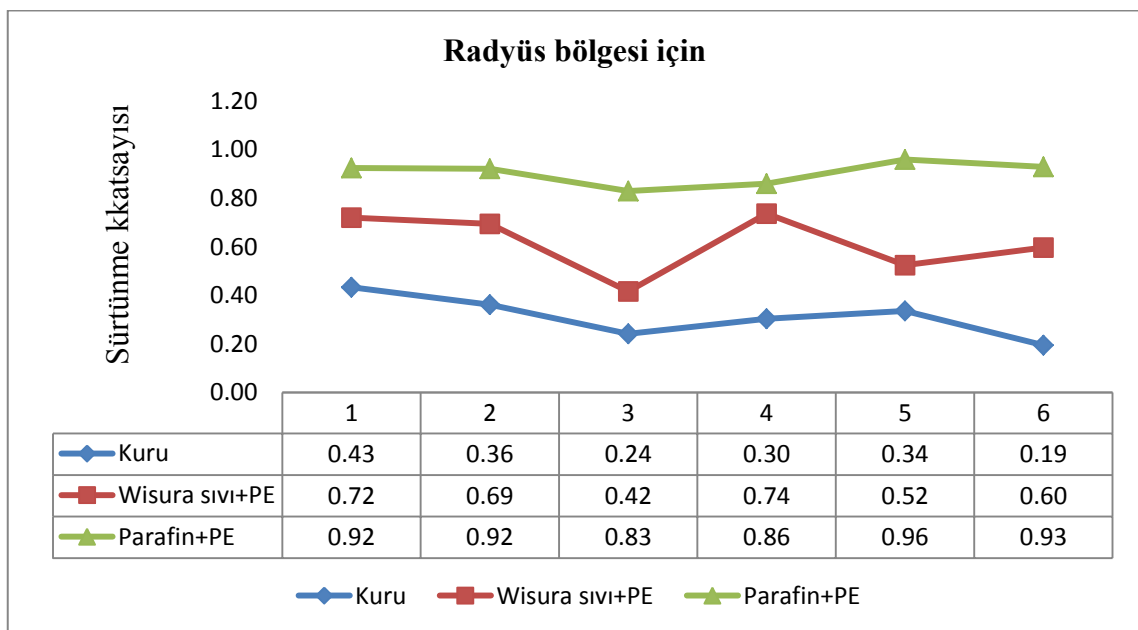


Şekil 4.10. Radyüs bölgesinde kuru, sıvama sıvılı poşet ve parafinli poşet sürtünme katsayıları

Ayrıca kuru, Wisura sıvama sıvı+2PE ve parafin+2PE durumlarını karşılaştırmak üzere çizilge 3.3 ve 4.1 kullanılarak 18 test içerisinde elde edilen sürtünme katsayılarının ortalamaları Şekil 4.11 ve 4.12’de gösterilmiştir.

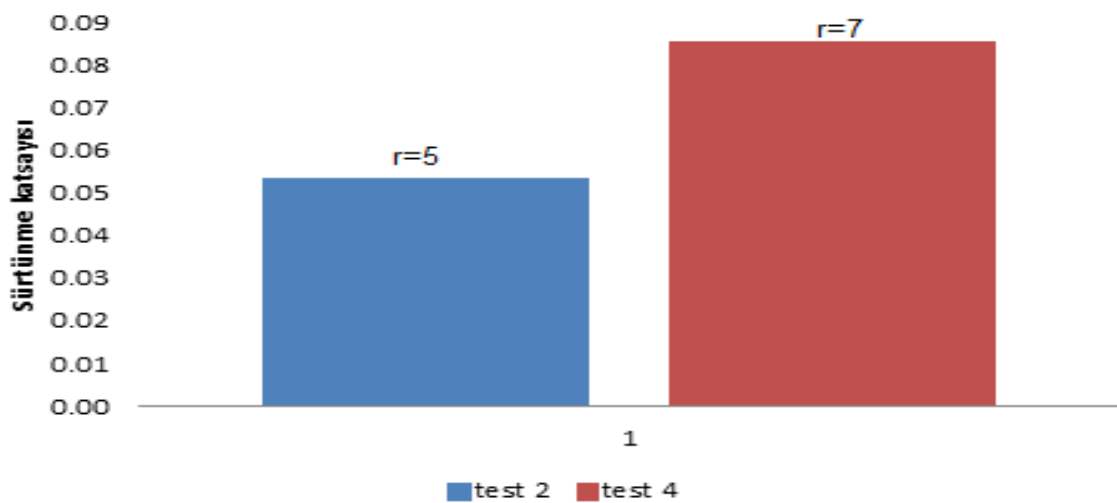


Şekil 4.11. Flaş bölgesinde kuru, wisura sıvama sıvılı poşet ve parafinli poşet durumunda ortalama sürtünme katsayıları

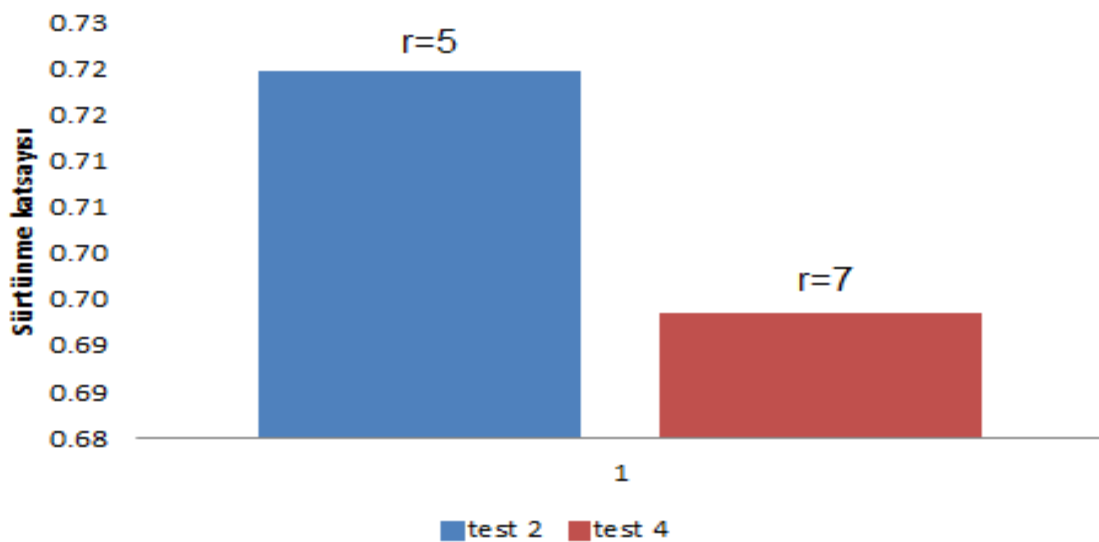


Şekil 4.12. Radyüs bölgesinde kuru, wisura sıvama sıvılı poşet ve parafinli poşet durumunda ortalama sürtünme katsayıları

Çalışmada, kalıp köşe radyüsleri $r=5$, $r=7$ ve $r=10$ mm olarak kademeli değiştirilmiştir. Yağlayıcının, sac malzeme ile kalıp arasındaki sürtünme katsayısına etkisinden sonra, kalıp köşe radyüsünün de azda olsa etkili olduğu görülmüştür. Radyüsün etkisini Wisura sıvı + 2PE'li durumda baskı plakası 100 daN olan Çizelge 4.1'deki sürtünme katsayı değerlerini kullanılarak oluşturulan grafikte test 2'de $r=5$ için ve test 4'de $r=7$ için radyüs etkisi Şekil 4.13 ve 4.14'de gösterilmiştir. (Hız ve yüzey pürüzlülüğü ihmal edilmiştir.)



Şekil 4.13. Flanş bölgesine ait $r=5$ ve $r=7$ için sürtünme katsayısı



Şekil 4.14. Radyüs bölgesine ait $r=5$ ve $r=7$ için sürtünme katsayısı

Çekme hızının etkisi incelendiğinde, çekme hızının hem flanş hem de radyüs bölgeleri için sac malzeme ile kalıp arasındaki sürtünme katsayısına etkisinin olmadığı görülmüştür.

Flanş bölgesi için baskı plakası kuvvetinin sürtünme katsayısına etkisi hemen hemen gözlenmezken, radyüs bölgesinde çok az etkili olduğu görülmüştür.

Kalıp yüzey pürüzlülüğü değerinin her iki bölge için de etkili bir parametre olmadığı tespit edilmiştir. Zaten yağlayıcı kullanılması durumunda kuru sürtünme durumu oluşmayacağı ve yağlayıcı bu etkiyi ortadan kaldıracığı için bu sonucun çıkması normaldir. Yüzey pürüzlülüğünün etkisi tam olarak tespit edilebilmesi için kuru koşullarda ancak diğer parametreler sabit tutularak testler gerçekleştirilmelidir.

Tartışılan konulara göre;

Radyüs bölgesi için sac malzeme ile kalıp arasındaki sürtünme katsayısı bazı testlerde 0,9 civarında elde edilmiştir. Bu değer yüksek bulunmuştur. Çizelge 3.3 ve Çizelge 4.1 incelendiğinde özellikle parafin + 2PE kullanılması koşulunda bu değer elde edildiği tespit edilmiştir. Elde edilen bu değer litaratürde elde edilenlerle uyumlu olduğu görülmüştür. Serway, Raymond A.; Beichner, Robert, Nisan 2007 yaptıkları çalışmalarda radyüs bölgesi için 1,7 civarında sürtünme katsayısı elde edilmiştir.

Sac malzeme olarak derin çekme proseslerinde bir çok ürünün üretiminde kullanılan AISI 304 çelik malzeme ile çelik malzeme arasındaki sürtünme katsayısını veren DIN 19704'e göre paralellik göstermektedir (EK-C). Sürtünme katsayısı, deneysel olarak, kalıp radyüsü, kalıp yüzey pürüzlülüğü, hız, baskı plakası kuvveti ve yağlayıcıların etkisi dikkate alınarak elde edilmiştir. Bulunan değerler malzeme tedarikçilerinin ve başka araştırmacıların verdikleri değerlerle karşılaştırılarak, deneylerin doğrulaması yapılmış ve farklı bulunan sonuçlar için de farklılığın oluşmasına neden olabilecek etkenler tartışılmıştır.

Bir diğer tartışılan konunun PE malzemenin çekme işlemi esnasında sac malzeme ile birlikte çekilip çekilmediği konusunda ise sac malzeme ile birlikte çekilmemesi neticesinde kalıp yüzey pürüzlülüğünün etkisiz hale getirilmiş olduğu vurgulanmıştır.

Ayrıca eğrilerde yaşanan sürtünme katsayısındaki artma eğilimi sac malzemeyi düzeltme için olduğu düşünülmüştür. Eğrilerin son kısımlarında ani düşüşlerin ani yük düşmelerine bağlı olduğundandır.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

5.1.Sonuç

Bu tez çalışmasında, derin çekme prosesini etkileyen önemli değişkenlerden olan sac malzeme ile kalıplar arasındaki sürtünme katsayıları, flanş ve radyüs bölgeleri için deneysel olarak belirlenmiştir. Ayrıca derin çekme prosesinde flanş ve radyüs bölgesi ile sac malzeme arasındaki sürtünme katsayılarına etki eden parametreler ANOVA analizi yöntemi ile incelenmiştir. Bu amaçla bu bölgelerdeki sürtünme katsayılarının her ikisini de belirleyebilecek bir aparat tasarlanıp imal edilmiştir. Geliştirilen sürtünme test aparatının en önemli özelliği, önceki test cihazlarından farklı olarak, iki test metodunu bir aparatta içermesidir. Bu özellik sayesinde, testlerin yapılması hem zaman açısından tasarruf sağlanmıştır.

Elde edilen sonuçlara göre;

- Derin çekme prosesinde flanş ve radyüs bölgesi için sac malzeme ile kalıp arasındaki sürtünme katsayıları aynı anda belirlenebilmiştir.
- Derin çekme prosesinde flanş ve radyüs bölgeleri ile sac malzeme arasındaki sürtünme katsayısına etki eden en önemli parametrenin yağlayıcı olduğu tespit edilmiştir.
- Flanş bölgesi için; kuru sürtünme durumunda sac malzeme ile kalıp arasındaki sürtünme katsayısı ortalama 0.38 gibi yüksek bir değerde iken, 2 adet PE + WISURA marka yağlayıcı kullanılması durumunda sürtünme katsayısı 0.07 ve PE + parafin kullanılması durumunda ise 0,02 değerlerine kadar düştüğü görülmüştür.
- Radyüs bölgesi için; kuru sürtünme durumunda sac malzeme ile kalıp arasındaki sürtünme katsayısı ortalama 0,31, 2 adet PE + WISURA marka yağlayıcı kullanılması durumunda sürtünme katsayısı 0.61 ve PE + parafin kullanılması durumunda ise 0,9 değerleri elde edilmiştir.
- Yağlayıcının sac malzeme ile kalıplar arasındaki etkisinden başka, flanş bölgesi ve radyüs bölgesi için yüzey pürüzlülüğü, baskı plakası kuvveti ve çekme hızının etkisinin olmadığı, ancak radyüs bölgesi için kalıp

radyüsünün sürtünme katsayısı üzerinde az da olsa etkisinin olduğu belirlenmiştir.

- Derin çekme prosesinde, flanş ve radyüs bölgesi için sac malzeme ile kalıp arasındaki sürtünme katsayılarının önemli ölçüde birbirlerinden farklı oldukları tespit edilmiştir.
- Flanş ve radyüs bölgesindeki sürtünme katsayılarının birbirlerinden önemli ölçüde farklı oldukları tespit edilmiştir.
- Farklı bölgeler için farklı sürtünme katsayılarının elde edilmesiyle sac şekillendirme prosesleri daha gerçekçi yapılabilecektir.

5.2 Öneriler

Bu konuda çalışacak araştırmacılara ışık tutması açısından aşağıdakiler hususların açıklanması uygun görülmüştür.

- Sac malzemelerinde özellikle kuru sürtünme testlerinde yaşanan sacın stampaya bağlanan kısımlarında kopmaların yaşanmaması için sac malzemenin daha geniş ve radyüslü yapılması faydalı olacaktır.
- Hadde doğrultusunun da dikkate alınabileceği, hadde doğrultusu yönünde, 45° ve 90° açıda olacak şekilde deneysel çalışmalar yapılarak sonuçlar incelenebilir.
- Sürtünme katsayısının paslanmaz çelikler üzerinde olan etkisini malzemeler için genelleştirilmesi amacıyla, birkaç farklı malzemeye daha uygulanması gerekir.
- Flanş bölgesi için yağlayıcı kullanılması ve radyüs bölgesi için yağlayıcı kullanılmaması neticesinde elde edilecek verilerin değerlendirilmesine gidilebilir.
- Tasarlanan deney düzeneği yaklaşık 35 mm'lik çekmeye kadar müsaade edebilmektedir. Şayet çekme işleminin daha fazla olması istendiği takdirde alt ve üst kalıbın boyunda uzatılmaya gidileceği gibi ara elemanın da boyunun artırılması gerekmektedir.

- PE poşet malzeme ile sac malzeme birlikte hareket etmesine olanak sağlayan tutucular ile kalıp pürüzlülüğü hakkında daha net sonuçlar alınmasına imkan sağlayacaktır.
- Sürtünme katsayısı eğrilerinde yaşanan artışların engellenmesine imkan sağlamak amacıyla hazırlanan numunelerin radyüs bölgelerine göre 90 derece olacak şekilde hazırlanması önemlidir. Özellikle test aparatı bağlanan tezgahın üst kalıbın hareketine müsaade eden preste yapılması, yaşanan sac malzemeleri düzeltme sorununu büyük ölçüde gidereceği düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- Andersson A. , 2004, Comparison of sheet-metal-forming simulation and try-out tools in the design of a forming tool, *J. Eng. Design*, vol. 15, no. 6, pp. 551–561.
- Blümel W, Stoewahse C., 1998, Geosynthetic interface friction testing in Germany - Effect of test set ups, *Sixth International Conference on Geosynthetics*, Vol 1 pp447-452.
- Colgan M., Monaghan J., 2003, Deepdrawing process: analysis and experiment, *Journal of Material Processing Technology*, 132; 35-41.
- Çetin H., 2005, Alüminyum alaşımı hafif metal levhaların prizmatik derin çekmede biçimlendirilebilirlik özelliklerinin araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta.
- Deryagin B.V., 1963, Shto takoye trienye. *Mashinostroyeniye*, p. 230.
- Dilmec M., Turkoz M., Halkaci H.S., 2007, Design of Stamping and Sheet Hydroforming Test Unit, *Archives of Materials Science*, vol. 28 (1-4): 25-29.
- Emmens WC ., 1988, The influence of surface roughness on friction. In: *proceedings of the 15th IDDRG congress*. Dearborn, MI, USA, pp 63–70.
- Haar ter Rudi, 1996, Friction in sheet metal forming, the influence of (local) contact conditions and deformation, *Doctora Thesis*, Universiteit Twente, Enschede, Netherlands.
- Halkaci H.S., Dilmeç M., Turkoz M., 2013, Design of an Apparatus to Determine Coefficients of Friction in Deep Drawing Process at the Flange and the Radius Regions, *MS&T 13*, Montreal, Kanada, 27-31
- Hao S., Klamecki B.E., Ramalingam S., 1999, Friction measurement apparatus for sheet metal forming, *Wear*, vol. 224, pp. 1-7.
- Hosford, W.F. and Caddell, R.M., 2007, *Metal Forming: Mechanics and Metallurgy*, Third Edition, Cambridge University Press, New York.
- Kragelski I.V., Shchedrov V.S., 1956, *Pasvitye nauki o trinii*. Isd. AN SSSR, p.235.
- Kong Y., Sun Y., Wang X., Wagoner R.H., 1996, Development of a new friction test device in sheet forming, *Advanced Technology of Plasticity 1996 - vol. II*, ed. T. Altan, The Ohio State University, pp. 835-838.
- Lin, J.F, L. Y. Wang and T.Huang, 1992, Friction in deep drawing of aluminium sheet, *Wear* 156,189-199.
- Marciniak, Z., Hu, S.J., Duncan, J.L., 2002, *Mechanics of Sheet Metal Forming*, *Butterworth-Heinemann*, London.

Metal Forming Handbook / Schuler (c) Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1998.

Serway, Raymond A.; Beichner, Robert, 2007, Çolakoğlu, Kemal. ed (Türkçe). Fen ve Mühendislik İçin Fizik (5. baskı bas.). Palme Yayınevi. ss. 133.sayfa. (online) http://tr.wikipedia.org/wiki/S%C3%BCrt%C3%BCnme_kuvveti, (Ziyaret Tarihi 01.09.2014)

Sniekers R.J.J.M, 1996, Friction in deep drawing, thesis Technischen Universiteit Eindhoven,37-43

Viorel P., Dumitru N., 2003, Simulation of friction phenomenon in deep drawing process, National Tribology Conference, The Annals of University, ISSN 1221-4590, 407-412

Wagoner R.H., Wang W. and Sriram S., 1994, Development of OSU formability test and OSU friction test, Journal of Material Processing Technology, Vol. 45, pp, 13-18.

Wang W., Wagoner R.H., 1993, A realistic friction test for sheet forming operations, SAE Technical Paper 930807.

Wang W., Wagoner R.H. and Wang X.J., 1996, ,Measurement of friction under sheet forming conditions, Metallurgical and Material Transactions A, vol. 27A, pp.3971-3981.

Wojtowicz W. J., Sliding friction test for metalworking lubricants. Lubrication Engineering, 11 (1955) 3, 174-177.

EKLER

EK-A) Sürtünme Olayları ve Sürtünmeye Etki Eden Parametreler

A. 1. Sürtünme kavramı

Sürtünme; katı yüzeylerinin, sıvı tabakalarının veya temas halindeki malzeme yüzeylerinin bağıl yanal hareketine karşı koyan, direnç gösteren kuvvettir.

Sürtünme temel bir kuvvet değildir. Elektronlar, protonlar ve moleküller dâhil yüklü parçacıklar arasındaki elektromanyetik kuvvetler sürtünme kuvvetini oluşturur. Bu nedenle sürtünme kuvveti Newton'un birinci kanunuyla hesaplanamaz ama deneysel yöntemlerle bulunabilir. Temas halindeki yüzeyler birbirine göre bağıla hareket ettiğinde iki yüzey arasındaki sürtünme, kinetik enerjiyi termal enerjiye veya ısı enerjisine dönüştürür. Kinetik sürtünmeyi yüzeyler arasındaki kimyasal yapıların yapısı teşkil etmektedir. Bununla birlikte yüzey pürüzlülüğü ve yüzeylerin temas alanı, mikro ve nano boyuttaki cisimler için kinetik sürtünmeyi etkilemektedir.

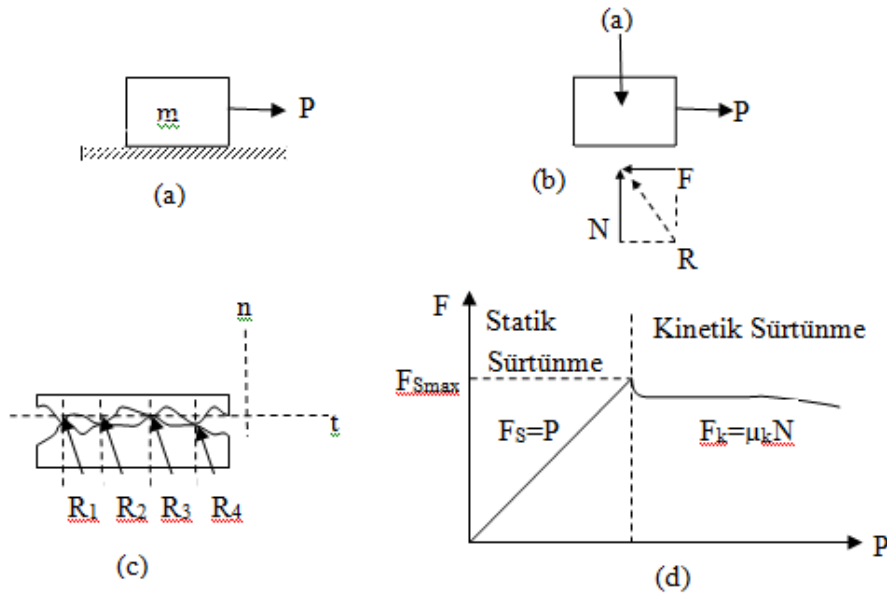
A. 2. Sürtünme olayları

Sürtünme çeşitleri kuru sürtünme, akışkan sürtünmesi, yuvarlanma sürtünmesi ve iç sürtünme olarak dört grupta incelenebilir.

A. 2. 1. Kuru sürtünme

Kuru sürtünme, temas halindeki iki katı yüzeyinin birbirine olan bağıla hareketine olan direnç kuvvetidir. Diğer bir ifadeyle iki katının yağlanmamış yüzeyi kayma halinde veya kaymaya hazır halde birbirlerine değiyorlarsa kuru sürtünme ile karşılaşılır. Değme yüzeylerine teğet bir sürtünme kuvveti, hem kaymaya başlayana kadar geçen süre içinde ve hem de kayma başladıktan sonra ortaya çıkar. Kuvvetin yönü daima harekete veya başlayacak olan hareket yönüne zıttır. Kuru sürtünme statik sürtünme ve kinetik sürtünme olmak üzere ikiye ayrılır. Statik sürtünme hareket etmeyen yüzeyler arasında olur. Kinetik sürtünme (kayma sürtünmesi veya dinamik sürtünme) hareketli yüzeyler arasında olur.

Şimdi kuru sürtünme mekanizması, Şekil A.1. a'da görüldüğü gibi, yatay bir düzlem üzerinde duran $W=mg$ ağırlığındaki bir katı cisim alalım. Değme yüzeylerinin belirli bir ölçüde pürüzlülüğü vardır. Deneyde, P yatay kuvveti sıfırdan itibaren sürekli olarak cisim hareket ettirmeye ve ona ölçülebilir hız vermeye yetecek kadar değiştirilecektir. P 'nin herhangi bir değeri için cismin serbest diyagramı Şekil A.1. b'de gösterilmiştir ve cisme, düzlemin uyguladığı teğetsel sürtünme kuvveti F ile gösterilecektir. Bu sürtünme kuvveti, daima, üzerine etkidiği cismin hareketine veya harekete koyulmasına zıt bir yönde olacaktır. Aynı zamanda normal bir N kuvveti vardır ve bu halde W 'ye eşittir; cisme dayanma yüzeyinin uyguladığı toplam R kuvveti N ile F kuvvetinin bileşkesidir. Temas yüzeylerinin düzgünsüzlüğünün büyütülmüş hali Şekil A.1. c'de verilmiş olup sürtünmenin mekanik etkisinin gösterilmesinde yardımcı olacaktır. Dayanma yüzeylerinin inişli çıkışlı olmalarından, temasta kesiklik vardır. R_1, R_2, R_3, \dots tepki kuvvetlerinin doğrultusu yüzey pürüzlülüğüne ve temas noktalarındaki deformasyona bağlıdır. Toplam normal kuvvet N , sadece, R 'nin n - bileşenlerinin toplamıdır. Yüzeyler bağlı harekette oldukları zaman, çıkıntıların tepelerinde temaslar olur ve R 'nin t - bileşenleri yüzeylerden biri diğerine göre durduğu zamankinden daha küçük olur. Bu şekilde inceleme, düzgünsüzlükler hemen hemen dişler halinde olduğu zaman, cismin hareketini devam ettirmek için gerekli P kuvvetinin, cisim hareket ettirmek için gerekli olandan daha az olduğu hususunu açıklamaya yarar.



Şekil A.1 Kuru sürtünme mekanizması

F sürtünme kuvvetinin P'nin bir fonksiyonu olarak ölçüldüğünü farz ediyoruz. Elde edilen bağıntı Şekil A.1. d'de gösterilmiştir. P sıfır olduğu zaman denge için sürtünme kuvvetinin olmaması gerekir. P artarken, sürtünme kuvveti, cisim kaymadıkça P'ye eşittir ve zıt yönde olur. Bu periyotta, cisim dengedendi ve cisme etkiyen bütün kuvvetlerin denge denklemlerini sağlamaları gerekir. Nihayet p, cismi kaydıracak ve uygulanan kuvvetin yönünde hareket ettirecek bir değere erişir. Aynı anda sürtünme kuvveti küçük ve dik olarak daha az bir değere iner. Burada, esas itibariyle sabit kalır, fakat sonra daha yüksek hızlarda daha da düşer.

Kayma veya harekete başlama noktasına kadar olan bölge, statik sürtünme aralığı adını alır ve sürtünme kuvvetinin değeri denge denklemleriyle belirlenmiştir. Bu kuvvet, sıfırdan, limitte, maksimum değer dâhil herhangi bir değerde olabilir. Verilen bir eş yüzey çifti için, statik sürtünmenin maksimum değeri $F_{s \max}$, N normal kuvvetiyle orantılı olarak bulunur. Böylece,

$$(F_s)_{\max} = \mu_s \cdot N \quad (A.1)$$

olur.

Burada f_s , orantı sabiti olup statik sürtünme katsayısı adını alır. Bu denklemin, sadece, statik sürtünme kuvvetinin limit veya maksimum değerini verdiği dikkat edilmelidir.

Kayma görüldükten sonra, kinetik sürtünme şartı göz önüne alınır. Kinetik sürtünme kuvveti, daima, maksimum sürtünme kuvvetinden biraz küçüktür. Kinetik sürtünme kuvveti F_k 'nin da normal kuvvet ile orantılı olduğu görülür. Böylece;

$$F_k = \mu_k \cdot N \quad (A.2)$$

yazılır; burada, μ_k , kinetik sürtünme katsayısıdır. Buradan μ_k 'nin μ_s 'den küçük olduğu çıkar.

İki sürtünme kuvveti denklemi genelde sadece;

$$F = \mu \cdot N \quad (A.3)$$

şeklinde yazılır.

Şekil A1. c'de görüldüğü gibi, pürüzlü yüzeyler için, tepkiler ile n- doğrultusu arasındaki açılar büyük olma ihtimali pürüzsüz yüzeylerinkinden fazladır. Şu halde, sürtünme katsayısını eşleştirilmiş bir yüzey çiftinin pürüzlülüğünü ölçer ve bu eş

eğrilerin geometrik özelliklerini birleştirir. Tek başına bir yüzey için sürtünme katsayısından bahsetmek anlamsızdır.

Şekil A.1. b'de görüldüğü gibi, N'inkinden itibaren ölçülmüş R'nin doğrultusu $\tan\alpha=F/N$ ile belirlenir. Sürtünme kuvveti limit statik değerine ulaştığı zaman, α açısı, maksimum θ_s değerine ulaşır. Böylece;

$$\tan \theta_s = \mu_s \quad (\text{A.4})$$

olur. Kayma görüldüğü zaman, α açısı, kinetik sürtünme kuvvetine karşı gelen θ_k değerini alır. Benzer tarzda;

$$\tan \theta_k = \mu_k \quad (\text{A.5})$$

yazılır. Sadece:

$$\tan \theta = \mu \quad (\text{A.6})$$

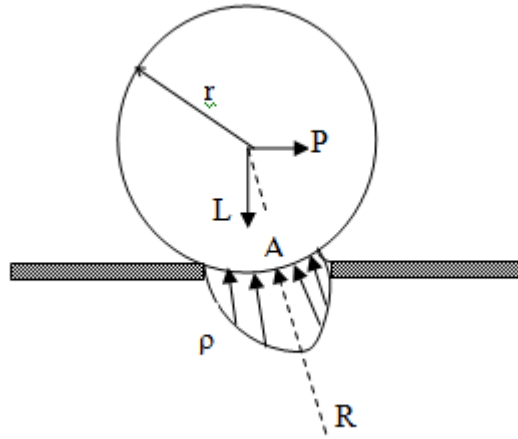
olarak genelde yazılır. θ_s açısı, statik sürtünme açısıdır ve θ_k açısı kinetik sürtünme açısıdır.

A. 2. 2. Akışkan sürtünmesi

Akışkanın (sıvı veya gazın) içinde bitişik tabakalar farklı hızlarda hareket ettiği zaman akışkan sürtünmesi doğar. Bu hareket, akışkan elemanları arasında sürtünme kuvvetlerine sebep olur ve bu kuvvetler tabakalar arasındaki bağıl hıza bağlıdır. Böyle bir bağıl hız yoksa akışkan sürtünmesi de yoktur. Akışkan sürtünmesi, sadece akışkan içindeki hız gradyanlarına değil, aynı zamanda akışkanın viskozitesine bağlıdır. Viskozite, akışkan tabakaları arasındaki kayma etkisine olan direncin bir ölçüsüdür.

A. 2. 3. Yuvarlanma sürtünmesi

Yuvarlanma sürtünmesi, silindir şeklindeki bir cismin yuvarlanmasına karşı bir dirençtir. Şekil A.2'de gösterilen silindir, ekseninde bir L yükü taşımaktadır ve P kuvveti yuvarlanma hasıl etmek için uygulanmıştır. Tekerleğin ve dayanma yüzeyinin deformasyonu görüldüğü gibi fazlaca abartılmıştır.



Şekil A.2. Yuvarlanma sürtünmesi

Değme alanı üzerindeki p basınç dağılımı gösterilene benzer ve bu dağılımın R bileşkesi bir A noktasına etkir ve denge için tekerleğin merkezinden geçecektir. Yuvarlanmayı başlatmak ve devam ettirmek için gerekli P kuvveti, bütün kuvvetlerin A 'ya göre momentlerini sıfıra eşitleyerek bulunabilir.

A. 2. 4. İç sürtünme

Periyodik yüklemeye maruz bütün katı maddelerde iç sürtünme vardır. Elastik malzemeler için deformasyondan geriye dönüşte, iç sürtünmeden dolayı çok az bir kayıp görünür. Elastikliği az olan ve yükleme süresince önemli derecede plastik deformasyon gösteren malzemeler için, bu deformasyon ile ilgili iç sürtünmenin etkisi önemli olabilir. Hem çekme ve hem de basma şeklindeki deformasyonların geriye dönüşündeki kayıp, histerezis çevrimi olarak bilinen eğriye sebep olur.

A.3. Sürtünme katsayısını etkileyen parametreler

Sac metal şekillendirme proseslerinde sürtünme karakteristikleri birçok parametre tarafından etkilenir. Sürtünme katsayısına etki eden parametreler aşağıda verilmiştir:

- Stribeck Eğrisiyle ilgili nicelikler;

Basınç,

Kayma hızı,

Viskozite,

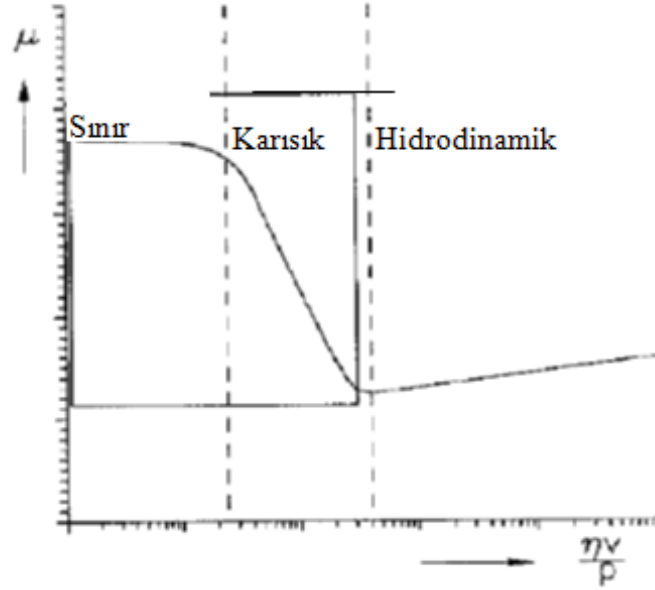
Sıcaklık.

- Karşılıklı Yüzeylerin Morfolojisi;
Fonksiyon,
Tanımlama,
Pürüzlülüğün gelişimi.
- Temas Bölgesinde Malzeme ve Yağlayıcı Etkileri;
Takım malzemesi,
İş parçası malzemesi,
Kaplamlar,
Yağlayıcı.
- Diğerleri;
Takım geometrisi,
Baskı plakası (Sniekers, 1996)

A.3.1. Stribeck eğrisiyle ilgili nicelikler

Stribeck eğrisi genel olarak karışık ve sınır yağlamalı rejimlerin uygulandığı çoğu derin çekme operasyonlarında tanımlanmaktadır. Şekil A.3'de derin çekme operasyonunda uygulanan aralığı göstermektedir. Görüldüğü gibi, sınır yağlama rejiminin olduğu bölgede sürtünme katsayısı Sommerfeld sayısından bağımsız olup, karışık yağlamalı rejimin olduğu bölgede Sommerfeld sayısına bağımlıdır.

Sommerfeld Sayısı: $\eta v / \rho$



Şekil A.3. Derin Çekme Prosesi İçin Stribeck Eğrisi (Sniekers, 1996)

Aşağıda Sommerfeld sayısına bağımlı olan parametreler açıklanmıştır:

A.3.1.1. Kayma hızı

Kayma hızı Sommerfeld sayısının bileşenlerinden biridir. Derin çekmede kayma hızı büyük ölçüde stampa hızını baz almaktadır. Bahsedilen hız, baskı plakası ile kalıp arasında ve kalıp baskı plakası üzerinden malzeme kayması için gerekli olan hızdır. Burada, kayma hızı yaklaşık olarak stampa hızına eşittir.

A.3.1.2. Basınç

Genelde proseslerde üç tane temas bölgesi tanımlanmaktadır. Bunlardan birincisi sac metalin baskı plakası ve kalıp arasına sıkıştırıldığı bölgedir. Rijit bir baskı plakası için, temas basıncı flanşın dış tarafıyla sınırlıdır. Esnek bir baskı plakası için, temas basıncı geniş bir bölgeye yayılır.

İkinci bölge ise kalıp omzunun civarındaki iş parçası ve takım arasındaki temas basıncının olduğu yerdir. Stampa kuvveti büyük ölçüde buraya karşılıklı etki etmektedir. İlave olarak, malzeme kalıp omzuna girerken veya terk ederken iş parçası eğilmekte veya şekil almaktadır. Bu temas basıncı yayılımında üst noktalara neden olur.

Üçüncü bölge stampa burnunda tanımlanır. Burada kalıp omzu bölgesindeki aynı durumlar söz konusudur.

Genelde, temas basıncına baskı plakasının kontrol edilmesiyle etki edilebilir. Ama tema basıncı dağılımındaki geniş paylaşım sac metalin malzeme davranışının ve prosesinin geometrisi tarafından belirlenebilir.

A.3.1.3. Viskozite

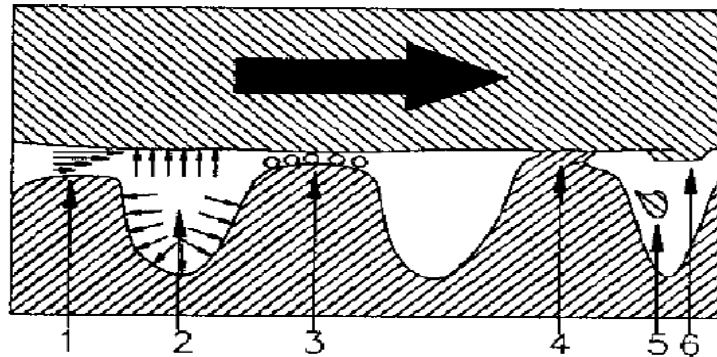
Sommerfeld sayısında, bir yağlayıcı, sürtünme şartlarında hidrodinamik yağlamaya başlıca etki eden özellik olan viskozite ile belirlenir. Sınır yağlama ise iş parçası ve takım malzemesi arasında fiziksel veya kimyasal bağ oluşturmak için yağlayıcı özelliğine bağlıdır. Bir yağlayıcı, hidrodinamik yağlama için gereklilikleri sağlayamayacak durumlarda olduğu zaman, bu durum, yağlayıcı filmiyle pürüz uçları arasındaki bağın kopmasına ve metalik temasa sebep olacaktır. Bu da sürtünme katsayısının artmasında, nihai ürün kalitesindeki düşüşe ve takım ömrünün azalmasına sebep olacaktır.

Viskoziteye sıcaklık ve basınç parametreleri etki etmektedir. Sıcaklıkla viskozite azalmakta ve artan basınçla viskozite artmaktadır.

A.3.2. Temas eden yüzeylerin morfolojisi

Önceden de ifade edildiği gibi derin çekme operasyonunda yağlama tipi karışık yağlamadır. Sınır ve hidrodinamik yağlama arasındaki denge büyük ölçüde karşılıklı yüzeylerin pürüzlülüğünü esas almaktadır.

Temasın olduğu yerlerde Şekil A.4'e benzer durum oluşur. Yukarıdaki düzgün parça takımı, aşağıdaki parça pürüzlü iş parçasını temsil etmektedir. Takım iş parçası malzemesinden pürüzsüz olacak şekilde dizayn edilir. Ama takımında meydana gelen aşınma ve yığılma durumları pürüzlülük oluşturur.



Şekil A.4. Mikro Geometrik Şartlar (Sniekers, 1996)

Yüksek uçlarda(1), hidrodinamik yağlama iki yüzeyi ayırır. Yüksek uçlar aşırı yüklenmeden zarar görürler ve sınır yağlama tabakası(3) aracılığıyla takımdan ayrılması gereklidir. Hidrostatik yağlama uçlar arasındaki çukur bölgesinde(2) oluşur. Yüksek uçlarda, sınır yağlama bile etkili olmayabilir ve metaller arası kontakta ve soğuk kaynağa neden olabilir. Devam eden bağıl hareket ile, bu kontakt deformasyona uğramalıdır. Partiküller yüzeylerin birinin üstünde kalabilir(6), veya pürüzlü bir boşluk(5) içinde hapsolmuş olabilir.

A.3.2.1. Tanımlama

Pürüzlülük genelde R_a değeriyle karakterize edilir, ama genellikle bunun yeterli olmadığı kabul edilir. Mesela, aynı R_a değerine sahip profiller farklı sürtünme davranışı gösterirler, çünkü profillerin şekli tamamen farklı olabilir. **Emmens** yüzeyler karşılaştırılabilir bir pürüzlülük tipine sahip olduğunda pürüzlülüğü tanımlamak ve yüzeyleri sürtünme davranışına göre sıralamak için bir parametrenin yeterli olacağını ifade etmiştir. **Bello** farklı yağlayıcıların büyük pürüzlülüklere farklı şekilde tepki gösterdiğini açıkça ispatlamıştır. Artan pürüzlülükle sürtünme katsayısının eğimi gayet açık olsa da büyük saçılma gözlenir. Bazı araştırmacılar pürüzlülüğü açıklamak için bazı parametreler öne sürmüşlerdir, ama hiç birine standart değer olarak ulaşılamamıştır.

A.3.2.2. Pürüzlendirme

Derin çekmede pürüzlendirme iş parçasının takım ile temas etmediği proses bölgelerinde oluşur. Bu bölgeler: flanşın (iç ve merkez) geniş parçası, stampanın düz parçası altındaki malzeme ve ürünün duvarlarındaki malzemededir.

Metal şekillendirmede, bir metal pürüzlendirilir ve yığılmış plastik deformasyon ile yeniden ortaya çıkarılır. Ayrıca pürüzlendirme küçük veya büyük derecede anizotropik olabilir. Üç farklı yüzey bozucu mekanizma vardır. Bunlar:

- Boşluk çekirdeklenmesi ve gelişimi.
- Kayma aşamaları,
- Yüzey taneleri rotasyonu.

A.3.3. Temas bölgesinde malzeme ve yağlayıcı etkileri

Sürtünme durumlarının geniş bir miktarı, kristal yapı gibi özgün malzeme özellikleri tarafından yapılan katkılar ile ilişkili olup gözlemlenmektedir. Malzeme

bileşimlerinin önemli özellikleri fiziksel ve kimyasal etkileşimler olup iş parçası & yağlayıcı, takım & yağlayıcı ve takım & iş parçası ara yüzlerinde meydana gelir.

A.3.3.1. Takım malzemesi

Kalıp prototipi, çoğu sac metal şekillendirme operasyonlarını gelişiminde kullanılır. Bu prototip, genelde yumuşak bir malzemeden yapılır. Çünkü farklı bir malzeme farklı sürtünme katsayısıyla sonuçlanacaktır, nihai ekipman hatalı olmasının bu prototipten ileri geleceği fark edilebilir. Brazier ve Thompson yaptığı araştırmalarda Çinko bazlı alaşımlardan oluşan yumuşak yakıma çelik gibi malzemeden oluşan takıma göre daha küçük sürtünme katsayısına sahip olduğu gözlemlenmiştir.

A.3.3.2. Takım kaplama ve yüzey işlemi

Kaplama ve yüzey muamelesinin başlıca amacı malzemeyi korumaktır. Metal şekillendirme takımları için, kaplamalar sürtünmeyi, aşınmayı veya tahribi azaltmak için kullanılır. Tabi ki, bir kaplama kendisinin yüzey malzemesinden bağımsız olarak özellikle yüksek basınçlarda görülemez. Yüzey malzemesi yeterli sertliğe sahip olmalıdır, çünkü kaplama yüzey malzemesi deformasyona uğradığında bozulacaktır.

Kaplamanın önemli özellikleri şunlardır:

- Adezyon kuvvet kabiliyeti
- Kayma performansı
- Elastik özelliği
- Sertlik
- Süneklik
- Kaplama takım malzemesi mukavemeti

A.3.3.3. Kaplama

Son yıllarda, birçok sac malzemeler yüzey kaplamasıyla sağlanır oldu, çünkü kaplama ürün prosten geçerken malzemenin korunmasına yardımcı olur. Kaplama bazen de imalat sürecini iyileştirmek için kullanılır.

A.3.3.4. İş parçası malzemesi

Wojtawicz, Davies ve birkaç bilimci daha yaptıkları çalışmalarda iş parçası malzemeleri aynı sınıftan olsa da sürtünme özelliklerinin aynı olmadığını gözlemlemişlerdir.

A.3.3.5. Yağlayıcı

Metal şekillendirme proseslerinde yağlamanın yapılmasındaki esas amaç metalik kontakta minimuma indirmektedir, çünkü metalik temas sonunda aşınma gibi malzeme transferine neden olacaktır. Yağlama yapılarak iş parçası ve takım arasındaki sürtünme kuvvetleri azaltılır.

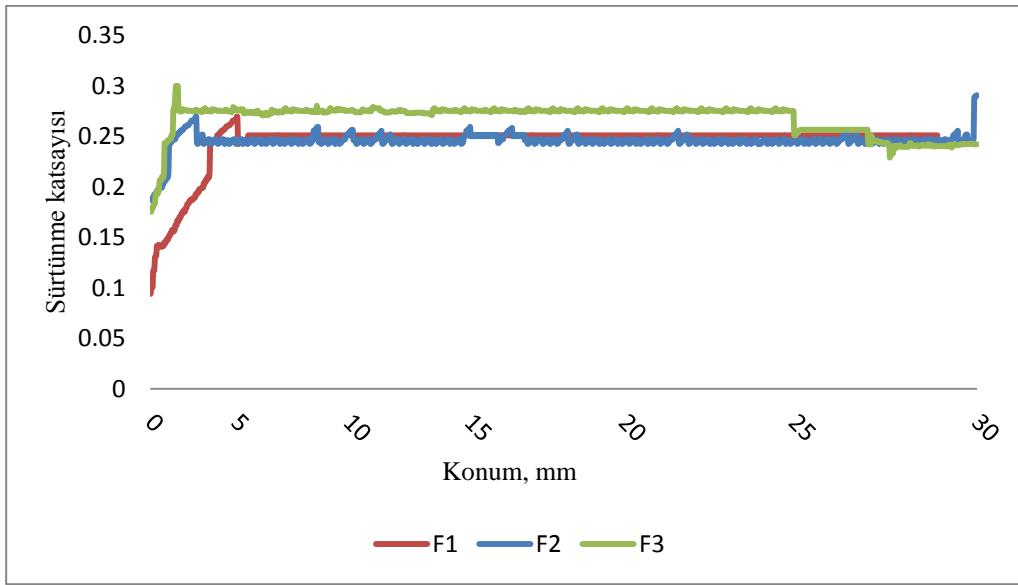
A.3.4. Diğer parametreler

Stampa radyusu, draw-bead, baskı plakası katılığı, baskı plakası kuvveti, stampa katılığı, takım aşınması, ürün boyutları ve çevre de sürtünme katsayısını etkileyen parametreler arasındadır.

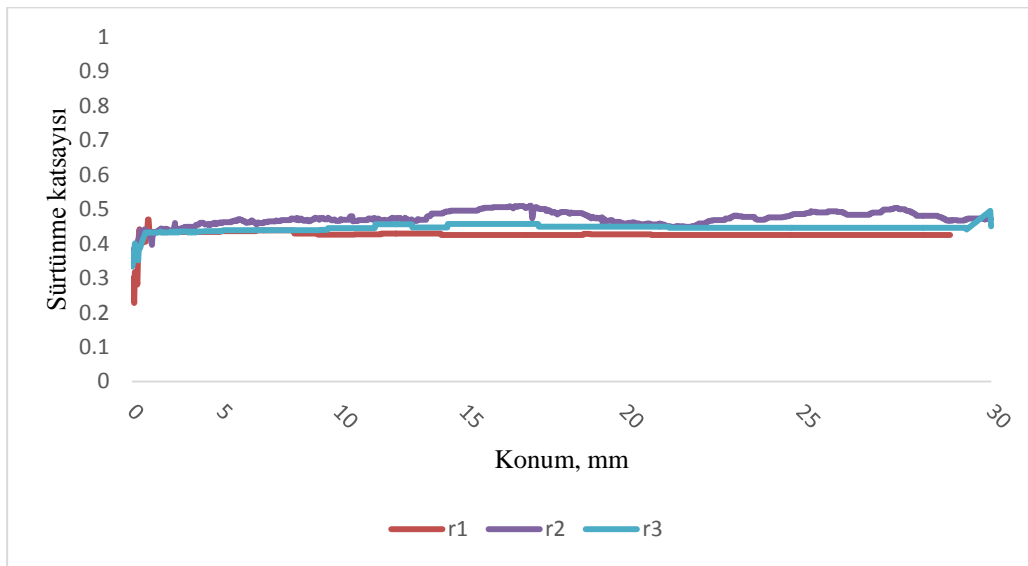
Ek-B) Flanş ve Radyüs Bölgelerinin Sac Malzeme ile Arasındaki Sürtünme Katsayılarına Ait Eğriler

B.1. Test 1

Test No	A mm	B (μm)	C (mm/dk)	D (daN)	E
1	5	0,211	0,5	100	kuru



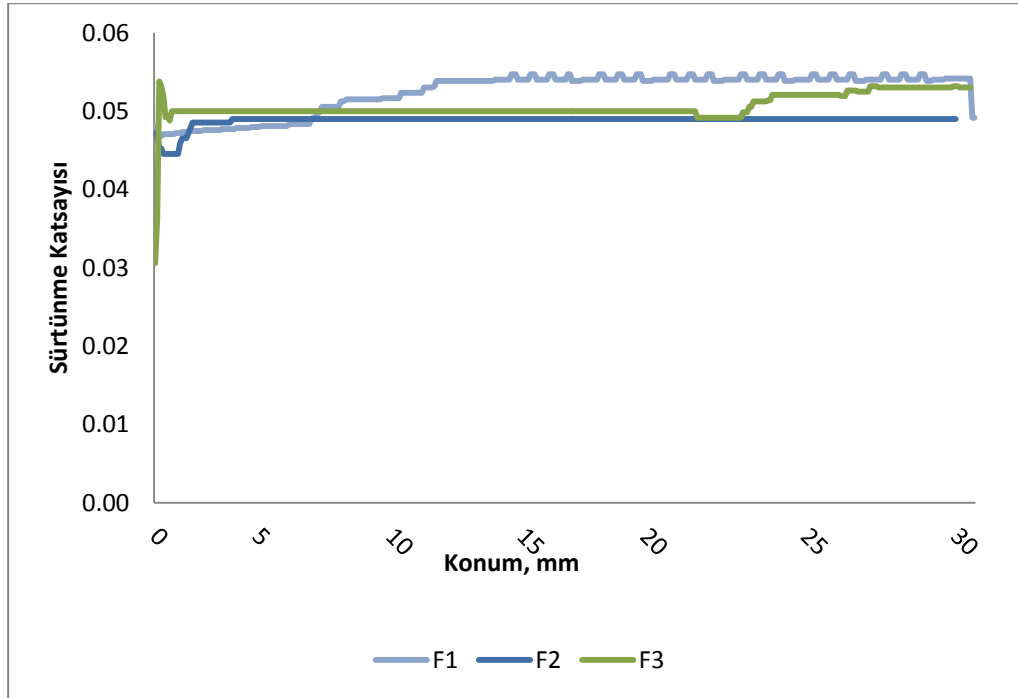
Şekil B.1. Sac malzeme ve flanş bölgesindeki sürtünme katsayısı eğrisi
(Sac malzeme AISI 304 ile Kalıp malzeme AISI 4140)



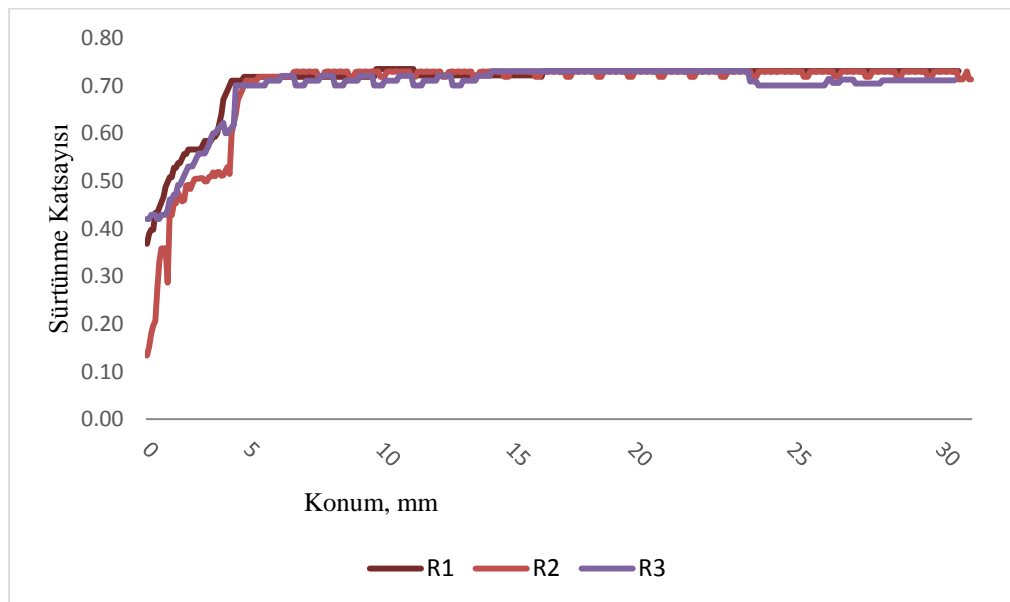
Şekil B.2. Sac malzeme ve radyüs bölgesindeki sürtünme katsayısı eğrisi
(Sac malzeme AISI 304 ile Kalıp malzeme AISI 4140)

B.2. Test 2

Test No	A mm	B (μm)	C (mm/dk)	D (daN)	E
2	5	0,484	1,5	180	sıvı+poşet



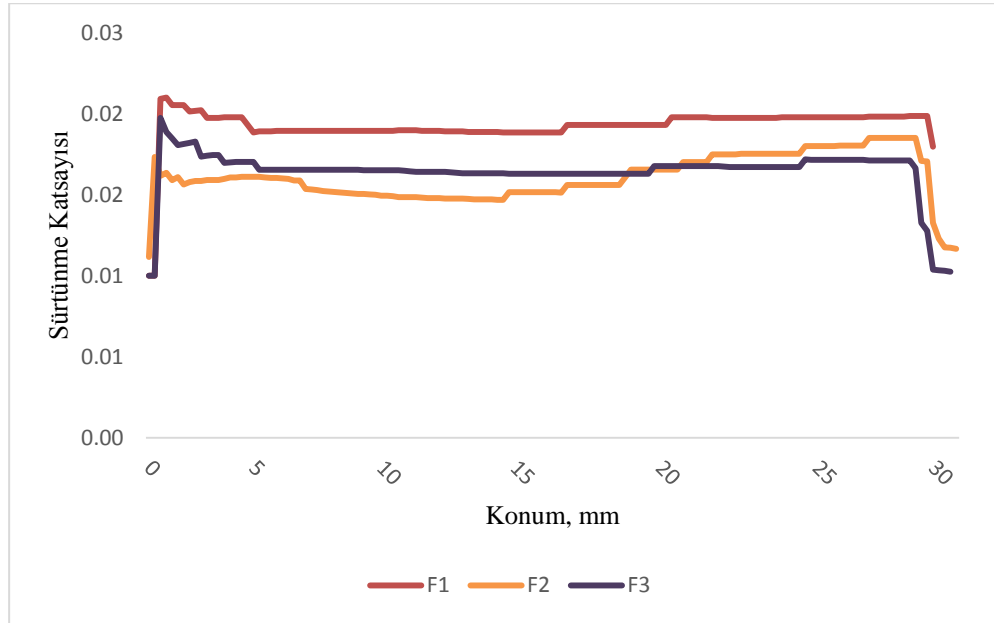
Şekil B.3. Sac malzeme ve flanş bölgesindeki sürtünme katsayısı eğrisi
(Sac malzeme AISI 304 ile Kalıp malzeme AISI 4140)



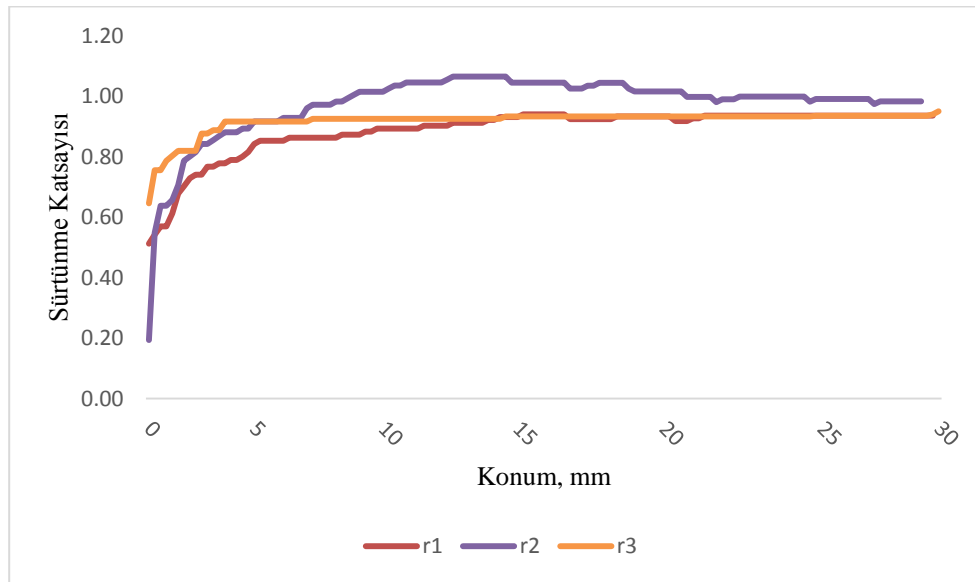
Şekil B.4. Sac malzeme ve radyüs bölgesindeki sürtünme katsayısı eğrisi
(Sac malzeme AISI 304 ile Kalıp malzeme AISI 4140)

B.3. Test 3

Test No	A mm	B (μm)	C (mm/dk)	D (daN)	E
3	5	2,33	4,5	260	parafin+poşet



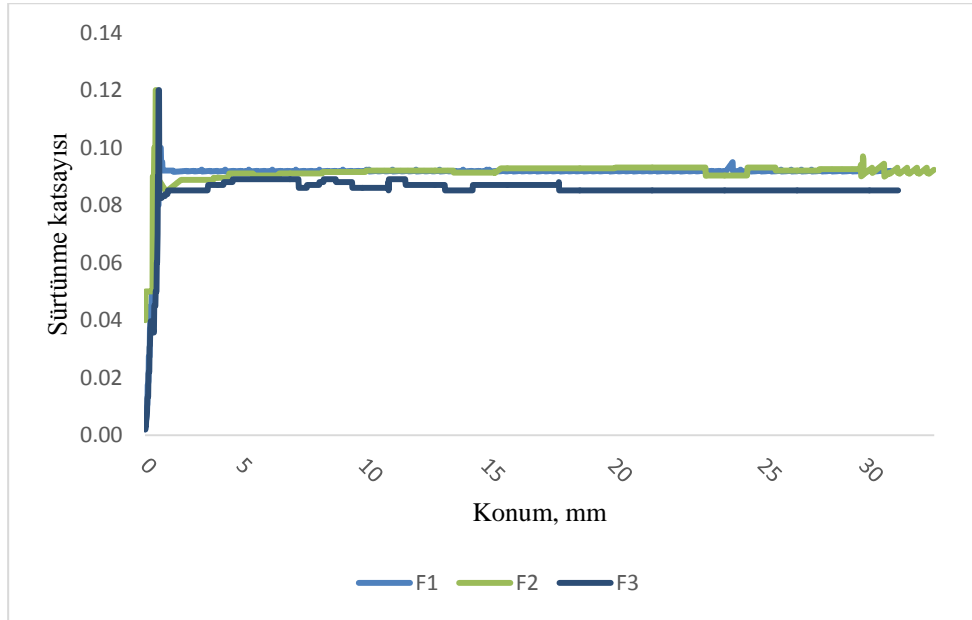
Şekil B.5. Sac malzeme ve flanş bölgesindeki sürtünme katsayısı eğrisi
(Sac malzeme AISI 304 ile Kalıp malzeme AISI 4140)



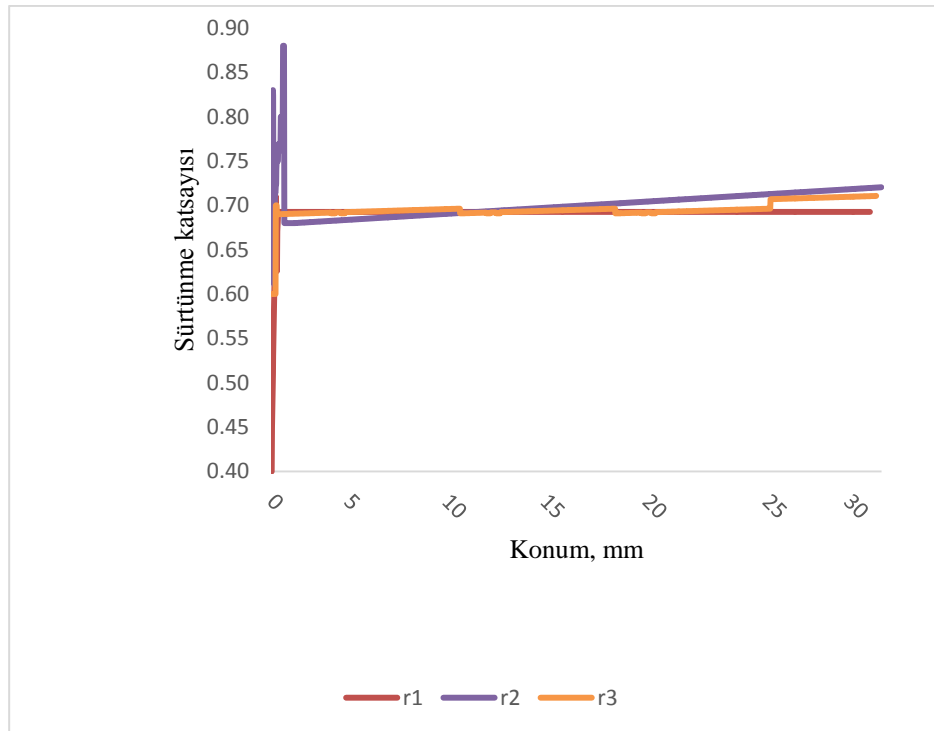
Şekil B.6. Sac malzeme ve radyüs bölgesindeki sürtünme katsayısı eğrisi
(Sac malzeme AISI 304 ile Kalıp malzeme AISI 4140)

B.4. Test 4

Test No	A mm	B (μm)	C (mm/dk)	D (daN)	E
4	7	0,211	0,5	180	sıvı+poşet



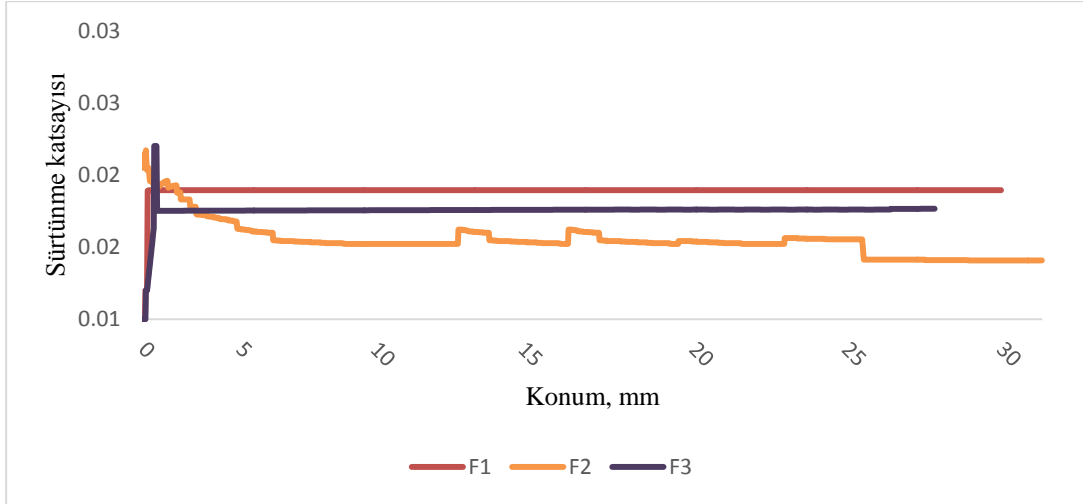
Şekil B.7. Sac malzeme ve flanş bölgesindeki sürtünme katsayısı eğrisi
(Sac malzeme AISI 304 ile Kalıp malzeme AISI 4140)



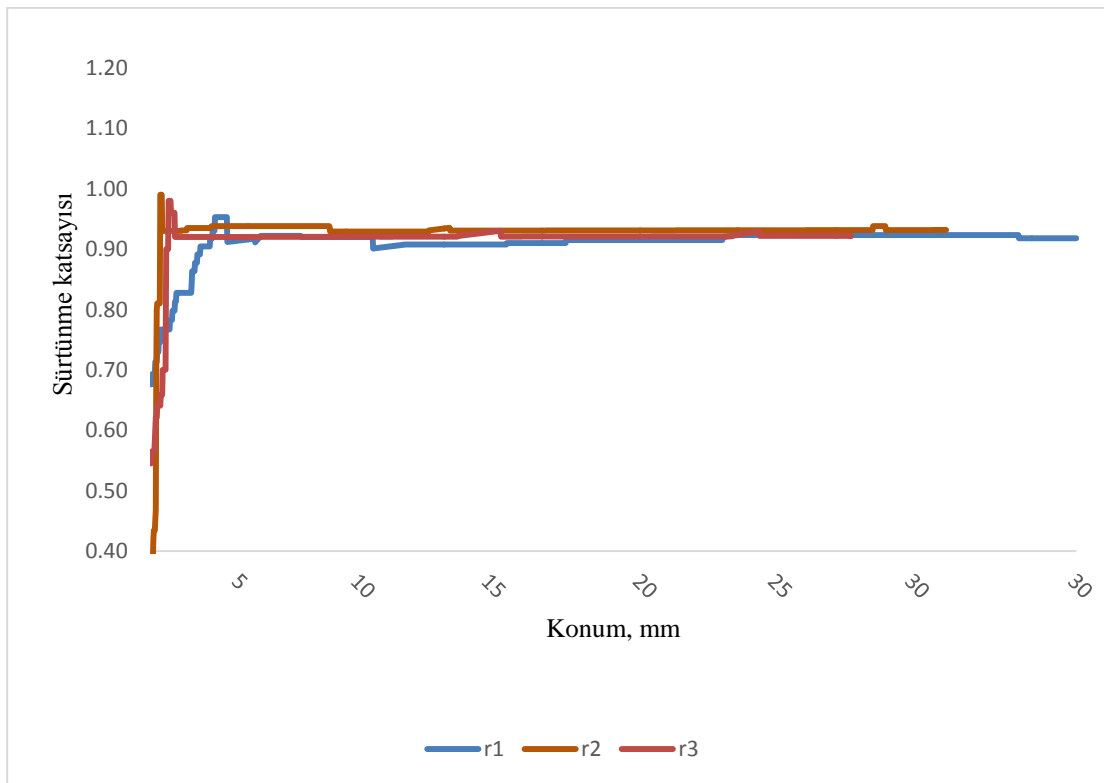
Şekil B.8. Sac malzeme ve radyüs bölgesindeki sürtünme katsayısı eğrisi
(Sac malzeme AISI 304 ile Kalıp malzeme AISI 4140)

B.5. Test 5

Test No	A mm	B (μm)	C (mm/dk)	D (daN)	E
5	7	0,484	1,5	260	parafin+poşet



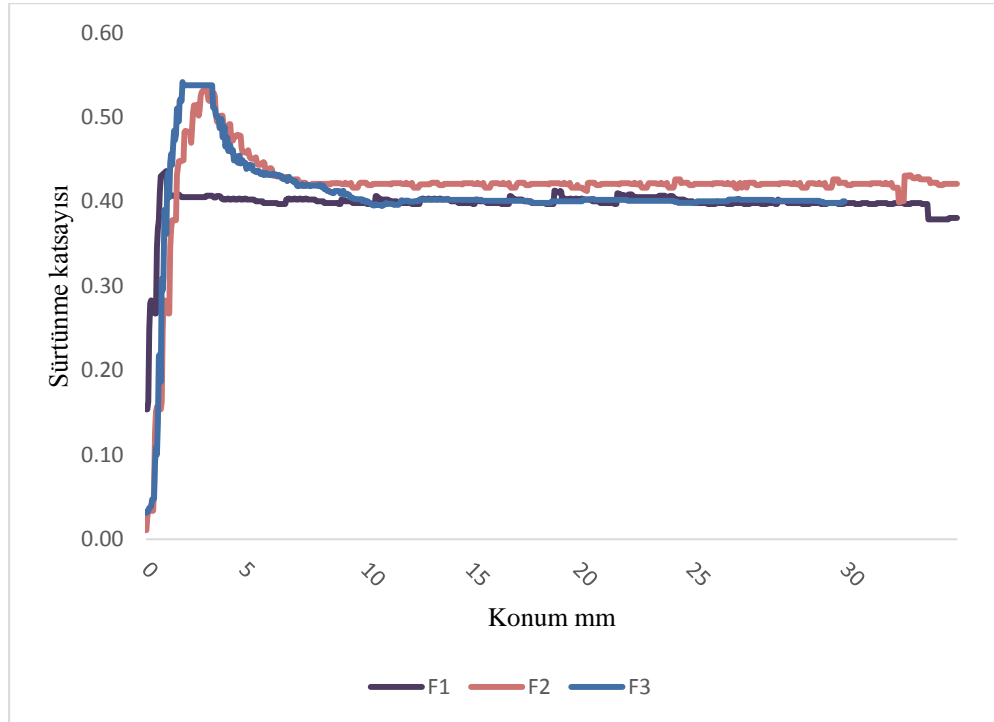
Şekil B.9. Sac malzeme ve flanş bölgesindeki sürtünme katsayısı eğrisi
(Sac malzeme AISI 304 ile Kalıp malzeme AISI 4140)



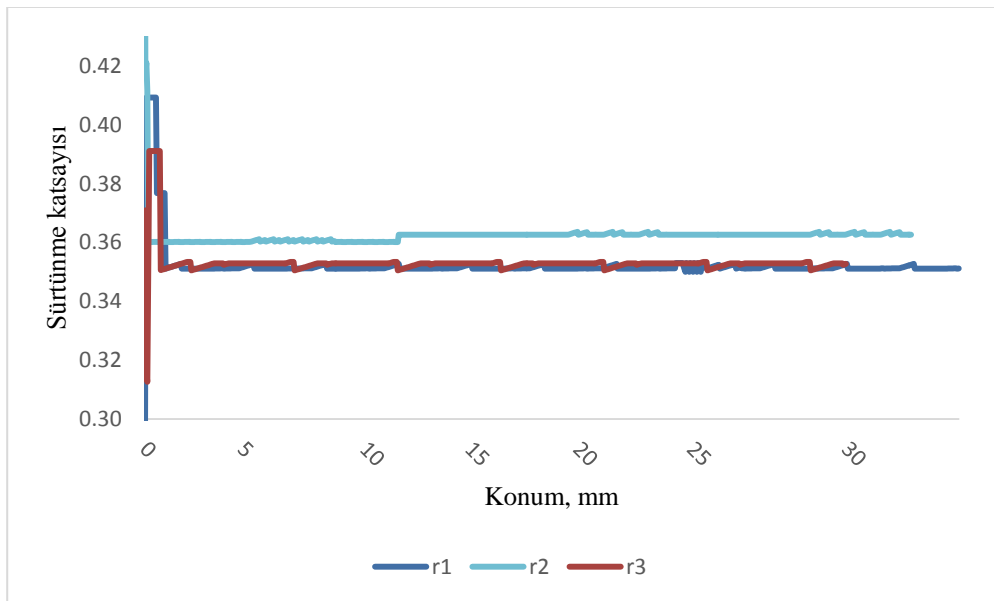
Şekil B.10. Sac malzeme ve radyüs bölgesindeki sürtünme katsayısı eğrisi
(Sac malzeme AISI 304 ile Kalıp malzeme AISI 4140)

B.6. Test 6

Test No	A mm	B (μm)	C (mm/dk)	D (daN)	E
6	7	2,33	4,5	100	kuru



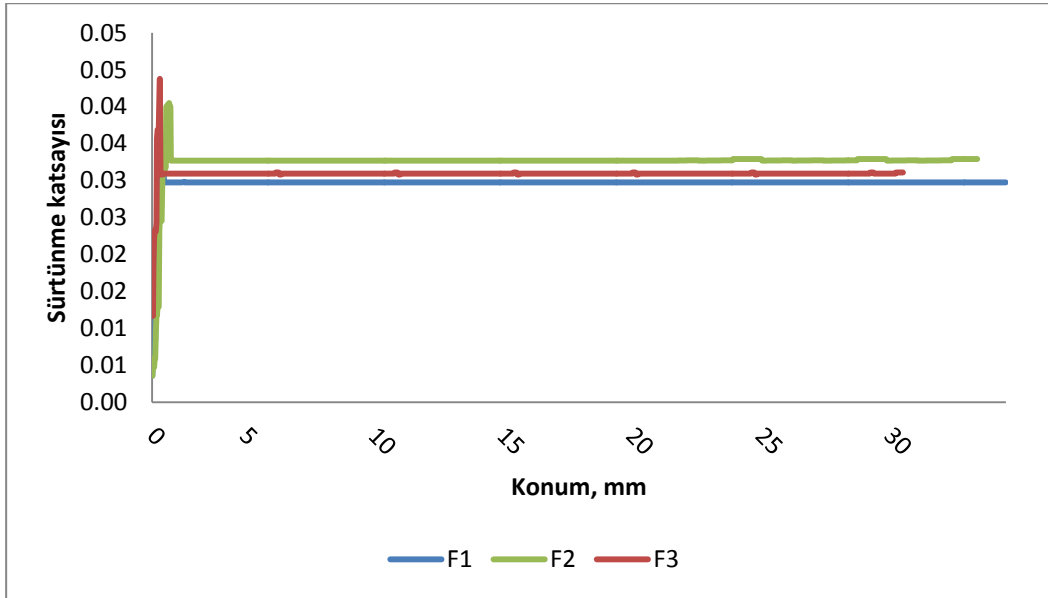
Şekil B.11. Sac malzeme ve flanş bölgesindeki sürtünme katsayısı eğrisi
(Sac malzeme AISI 304 ile Kalıp malzeme AISI 4140)



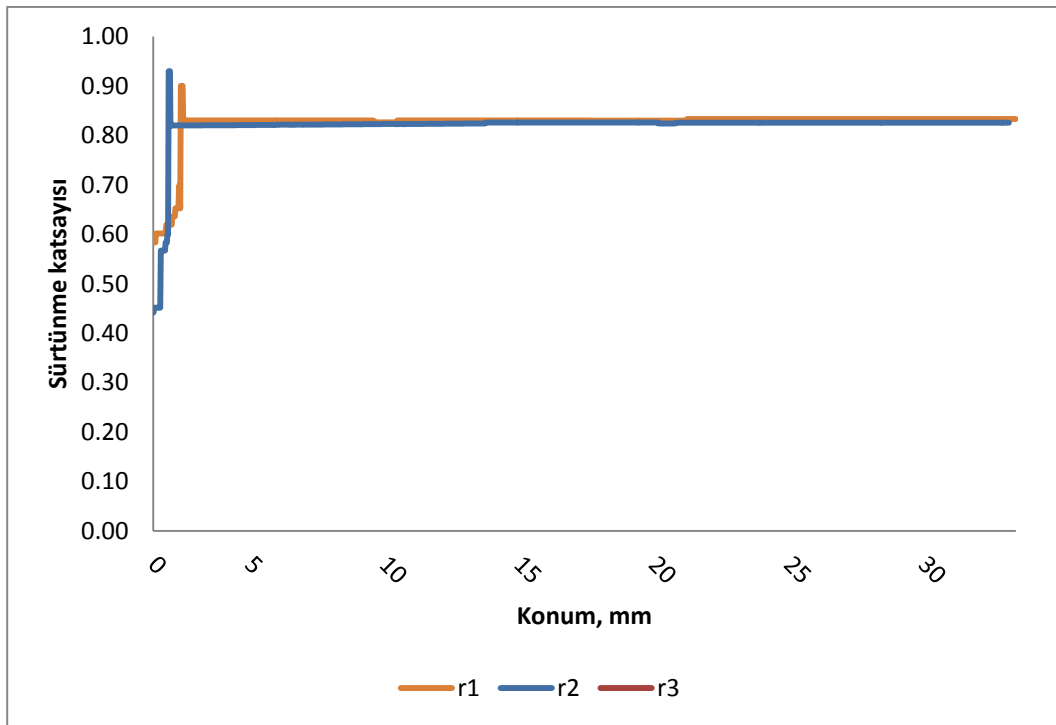
Şekil B.12. Sac malzeme ve radyüs bölgesindeki sürtünme katsayısı eğrisi
(Sac malzeme AISI 304 ile Kalıp malzeme AISI 4140)

B.7. Test 7

No	A mm	B (μm)	C (mm/dk)	D (daN)	E
7	10	0,211	1,5	100	parafin+poşet



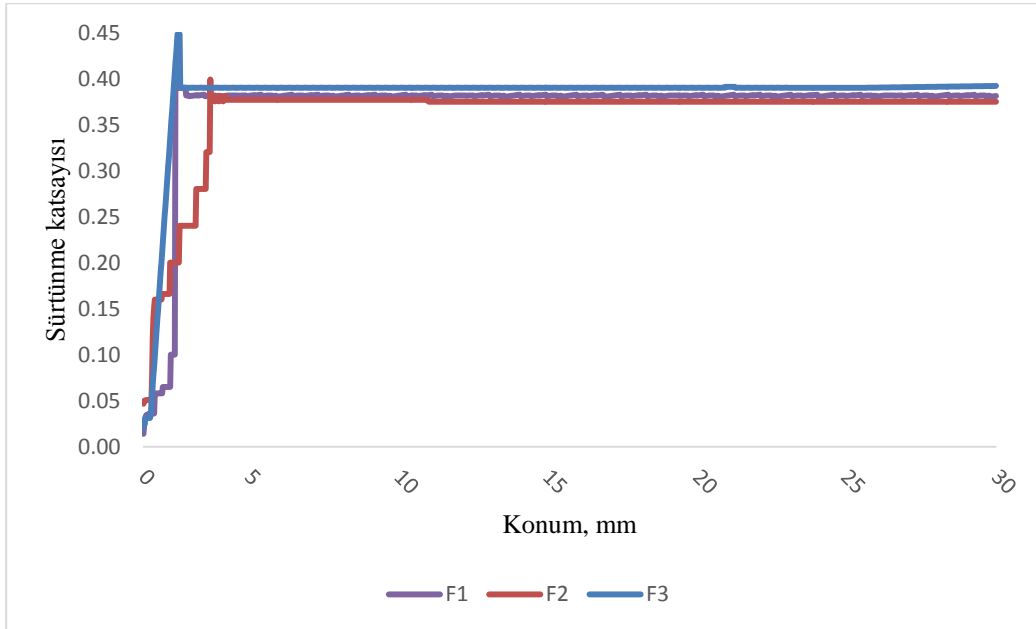
Şekil B.13. Sac malzeme ve flanş bölgesindeki sürtünme katsayısı eğrisi
(Sac malzeme AISI 304 ile Kalıp malzeme AISI 4140)



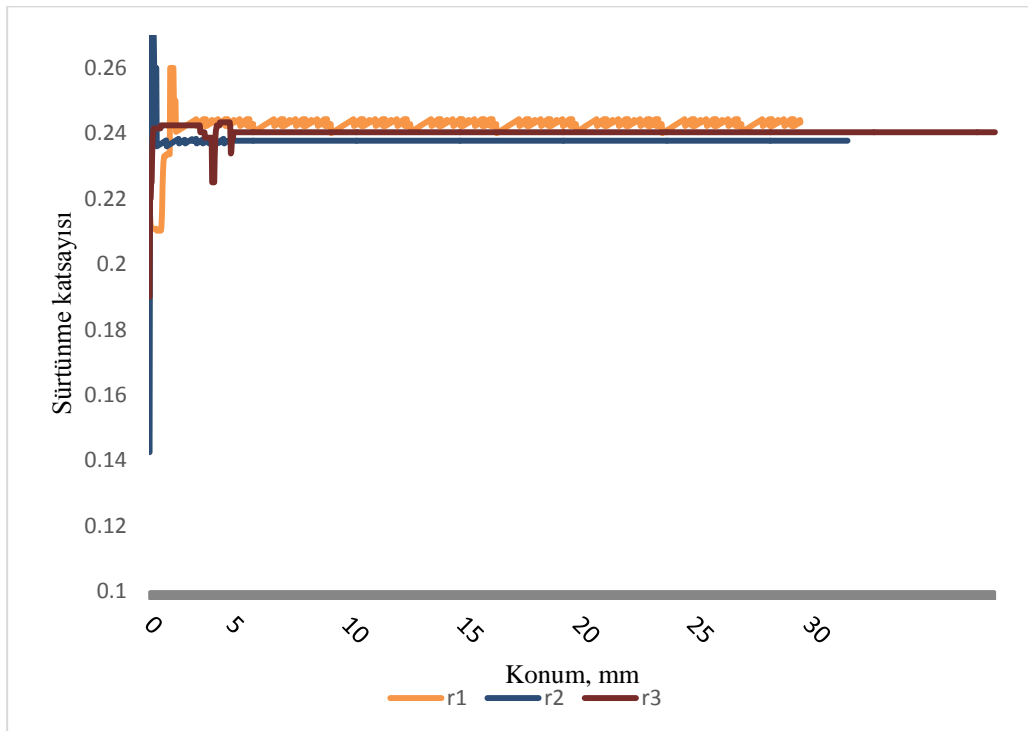
Şekil B.14. Sac malzeme ve radyüs bölgesindeki sürtünme katsayısı eğrisi
(Sac malzeme AISI 304 ile Kalıp malzeme AISI 4140)

B.8. Test 8

No	A mm	B (μ m)	C (mm/dk)	D (daN)	E
8	10	0,484	4,5	180	kuru



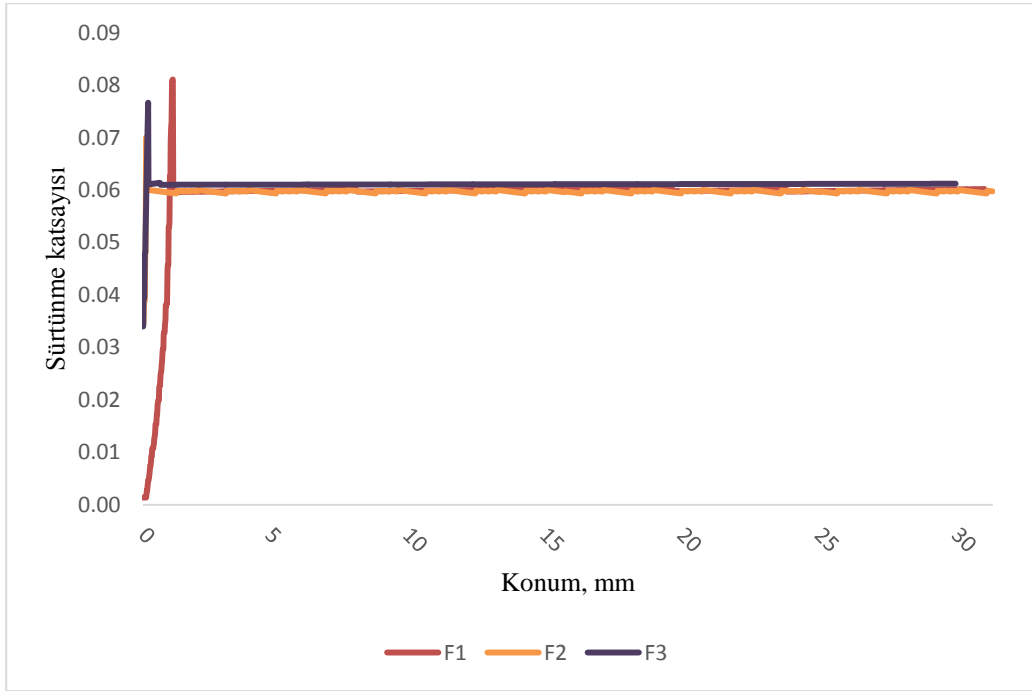
Şekil B.15. Sac malzeme ve flanş bölgesindeki sürtünme katsayısı eğrisi
(Sac malzeme AISI 304 ile Kalıp malzeme AISI 4140)



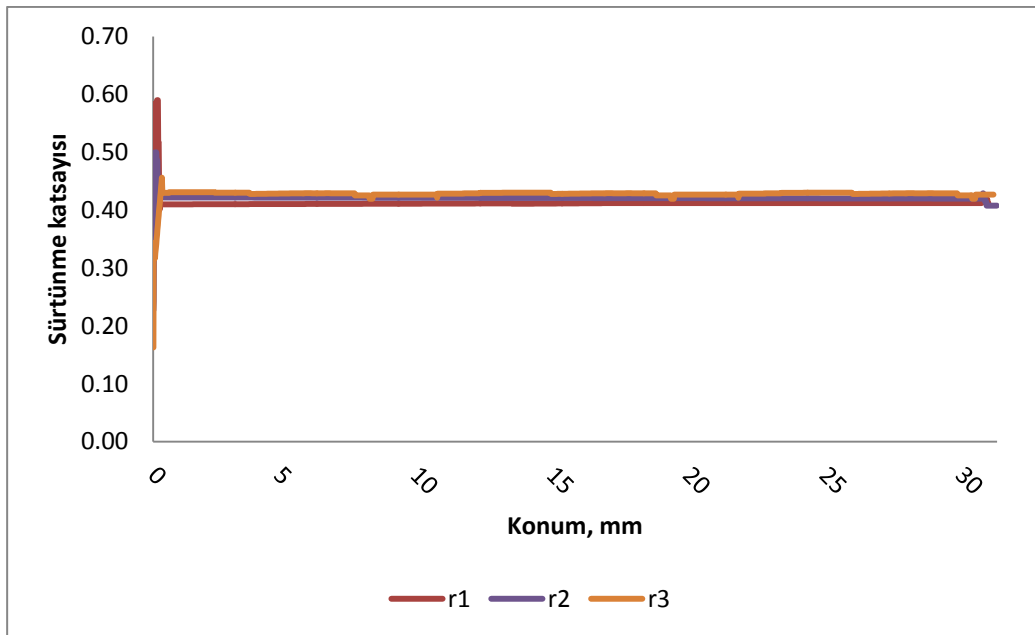
Şekil B.16. Sac malzeme ve radyüs bölgesindeki sürtünme katsayısı eğrisi
(Sac malzeme AISI 304 ile Kalıp malzeme AISI 4140)

B.9. Test 9

No	A mm	B (μm)	C (mm/dk)	D (daN)	E
9	10	2,33	0,5	260	sıvı+poşet



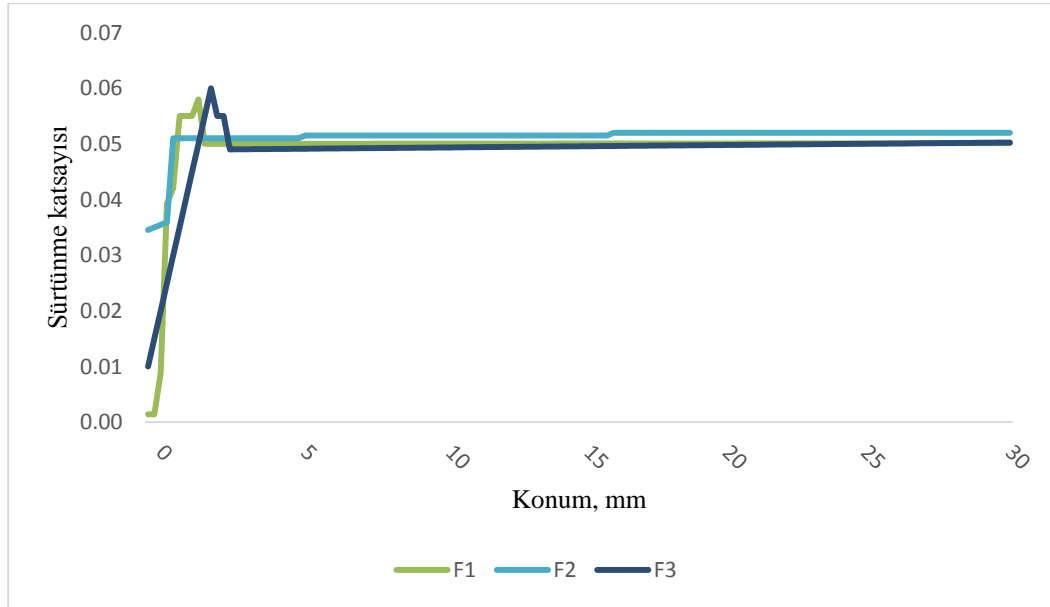
Şekil B.17. Sac malzeme ve flanş bölgesindeki sürtünme katsayısı eğrisi
(Sac malzeme AISI 304 ile Kalıp malzeme AISI 4140)



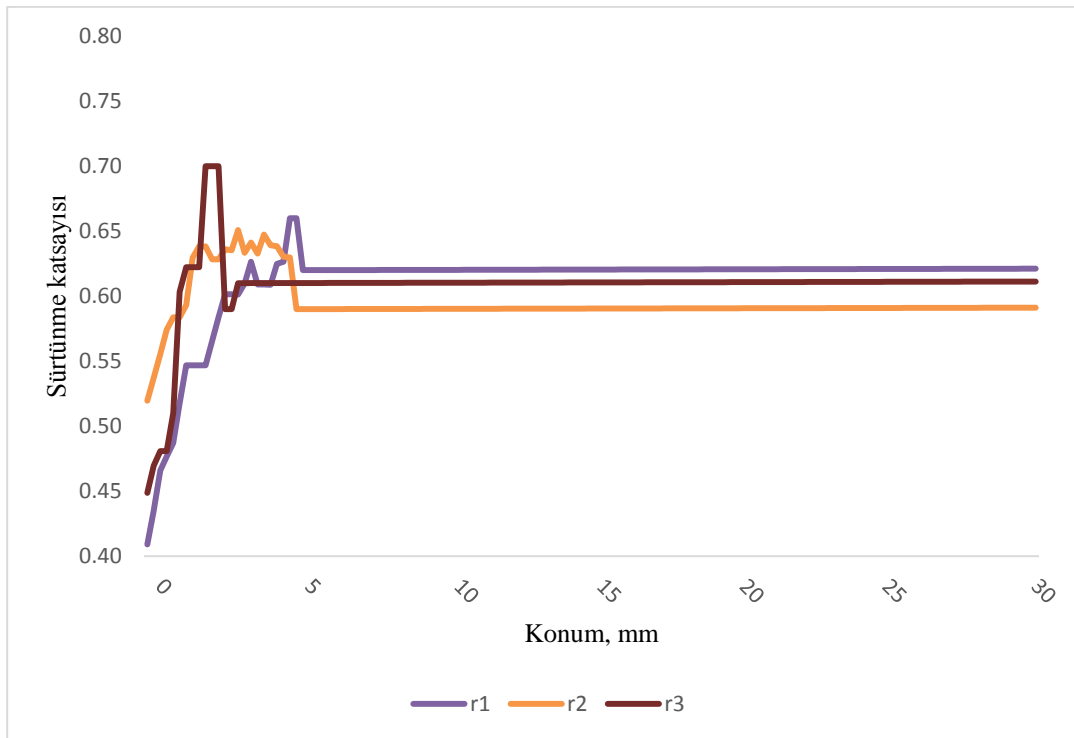
Şekil B.18. Sac malzeme ve radyüs bölgesindeki sürtünme katsayısı eğrisi
(Sac malzeme AISI 304 ile Kalıp malzeme AISI 4140)

B.10. Test 10

No	A mm	B (μ m)	C (mm/dk)	D (daN)	E
10	5	0,211	4,5	260	sıvı+poşet



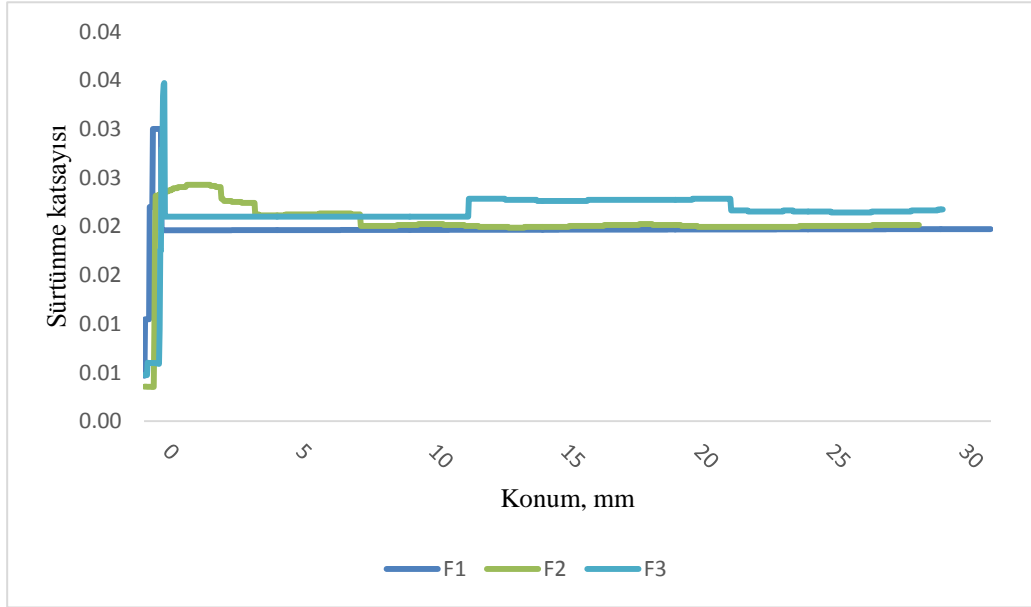
Şekil B.19. Sac malzeme ve flanş bölgesindeki sürtünme katsayısı eğrisi
(Sac malzeme AISI 304 ile Kalıp malzeme AISI 4140)



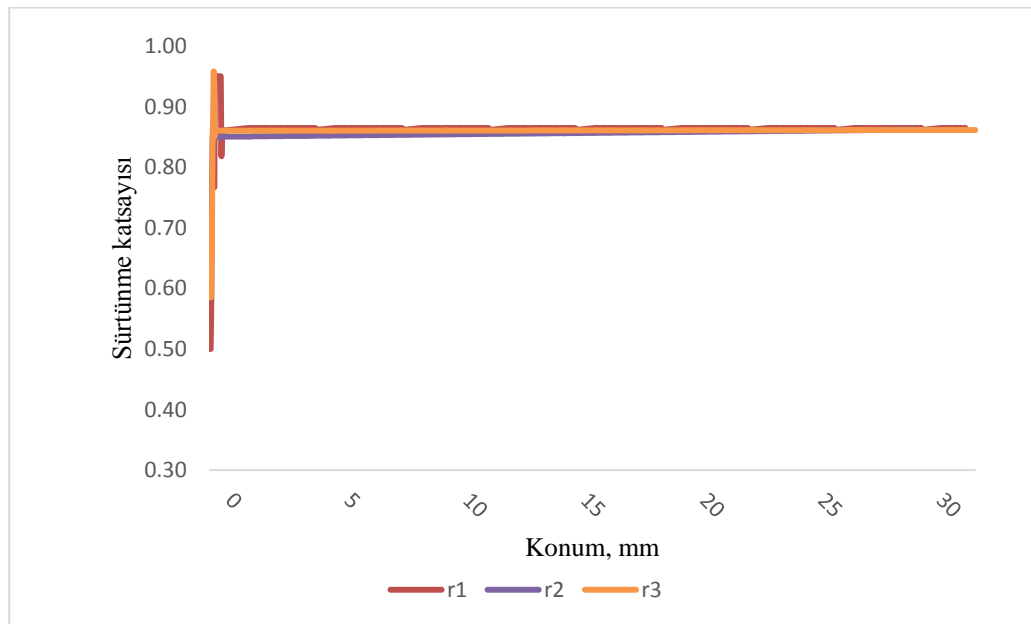
Şekil B.20. Sac malzeme ve radyüs bölgesindeki sürtünme katsayısı eğrisi
(Sac malzeme AISI 304 ile Kalıp malzeme AISI 4140)

B.11. Test 11

Test No	A mm	B (μm)	C (mm/dk)	D (daN)	E
11	5	0,484	0,5	100	parafin+poşet



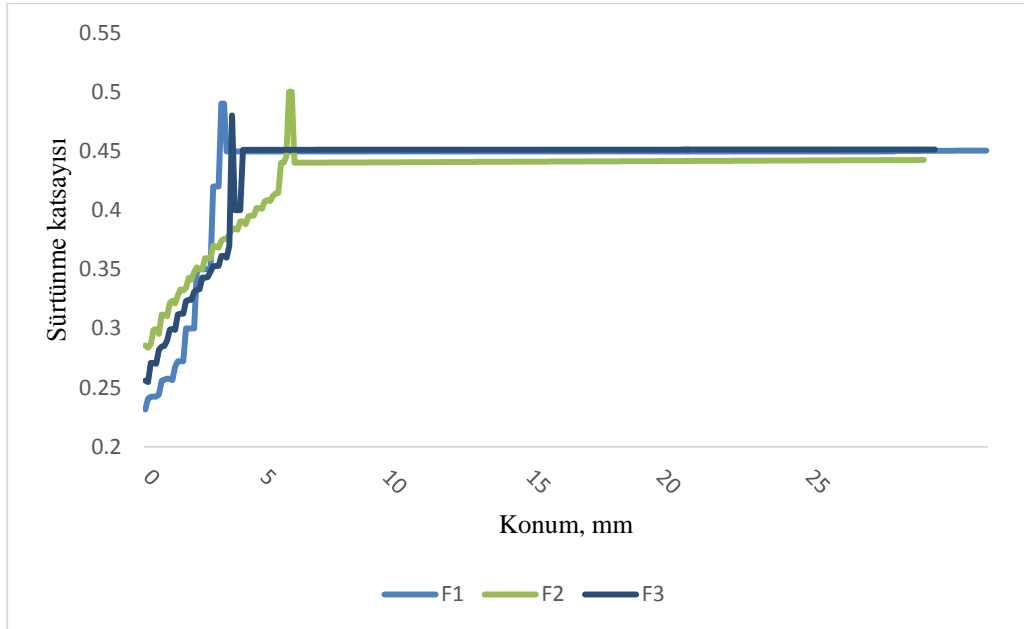
Şekil B.21. Sac malzeme ve flanş bölgesindeki sürtünme katsayısı eğrisi
(Sac malzeme AISI 304 ile Kalıp malzeme AISI 4140)



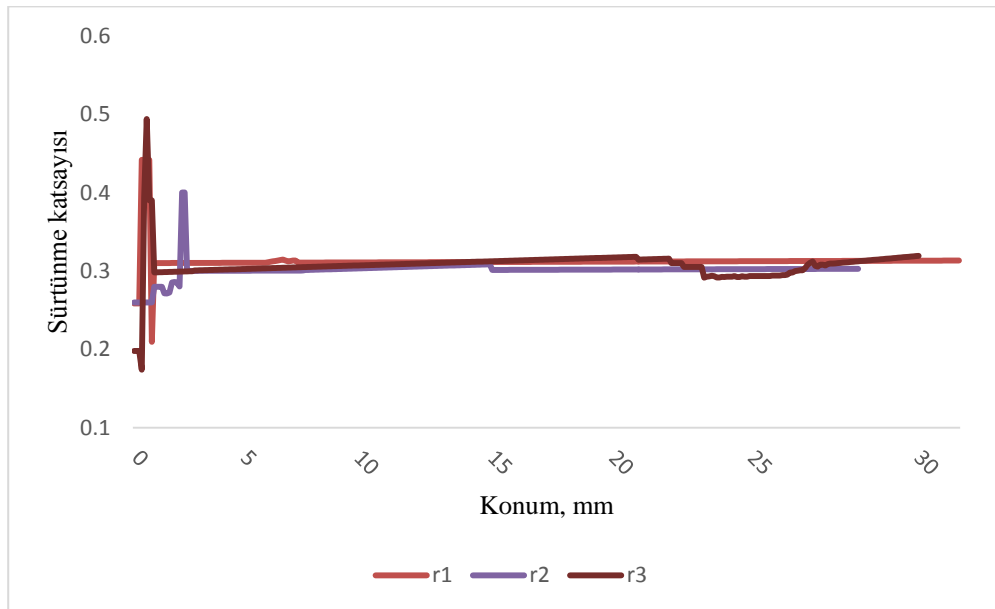
Şekil B.22. Sac malzeme ve radyüs bölgesindeki sürtünme katsayısı eğrisi
(Sac malzeme AISI 304 ile Kalıp malzeme AISI 4140)

B.12. Test 12

Test No	A mm	B (μm)	C (mm/dk)	D (daN)	E
12	5	2,33	1,5	180	kuru



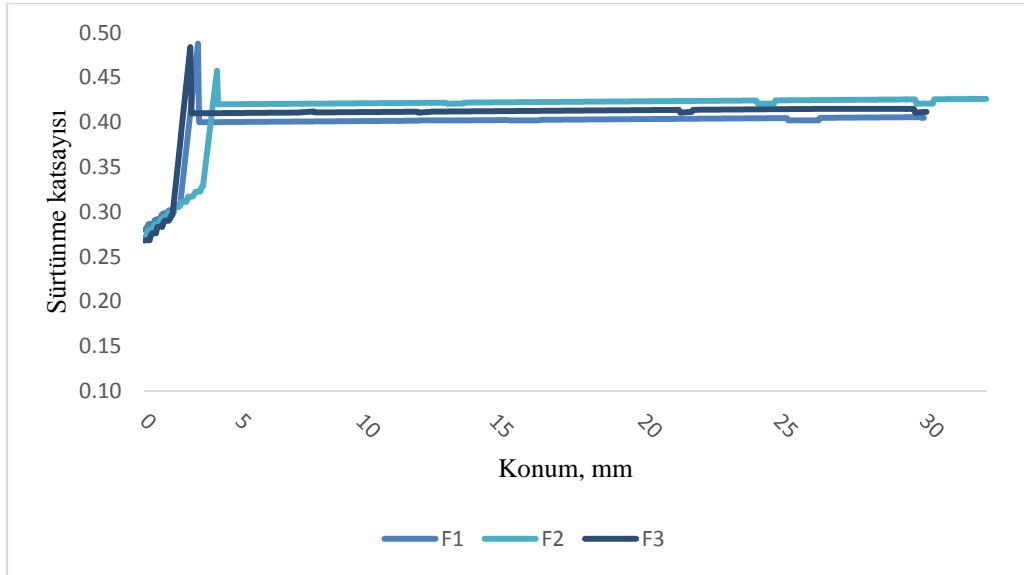
Şekil B.23. Sac malzeme ve flanş bölgesindeki sürtünme katsayısı eğrisi
(Sac malzeme AISI 304 ile Kalıp malzeme AISI 4140)



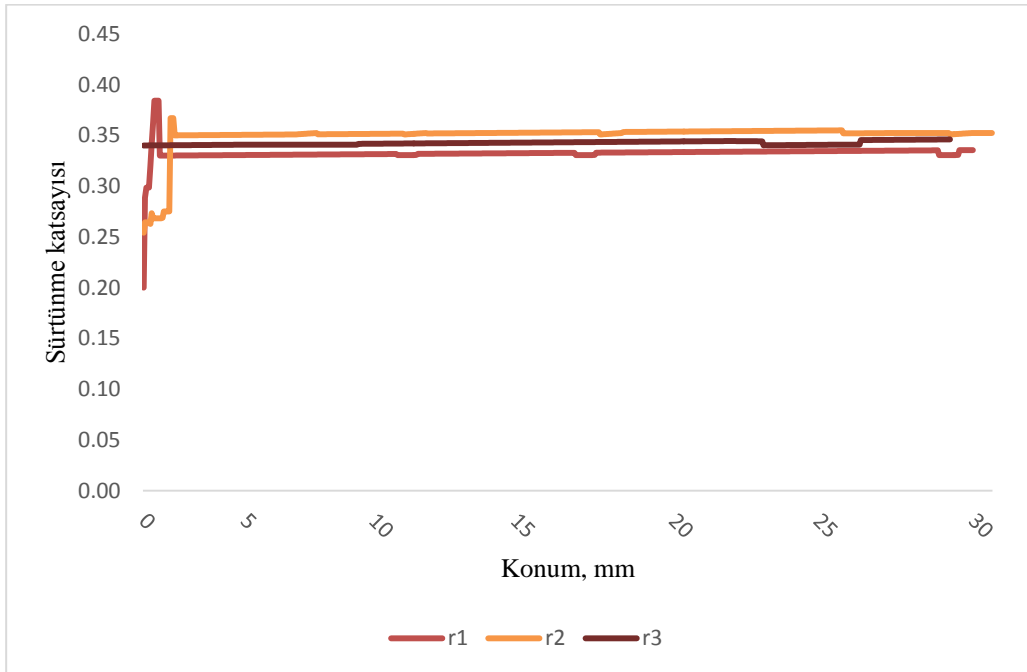
Şekil B.24. Sac malzeme ve radyüs bölgesindeki sürtünme katsayısı eğrisi
(Sac malzeme AISI 304 ile Kalıp malzeme AISI 4140)

B.13. Test 13

Test No	A mm	B (μm)	C (mm/dk)	D (daN)	E
13	7	0,211	1,5	260	kuru



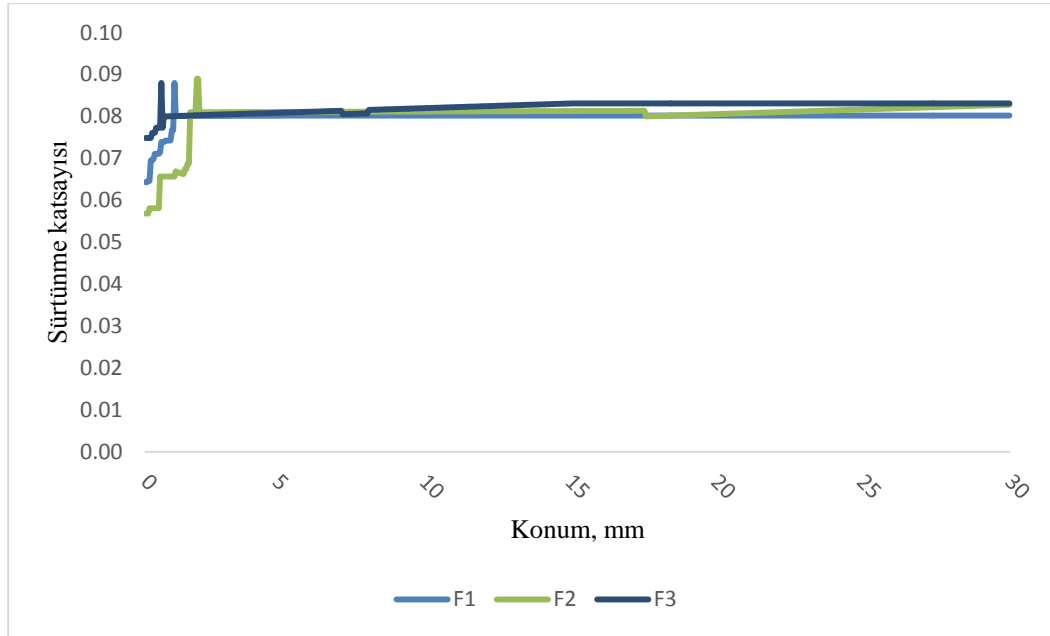
Şekil B.25. Sac malzeme ve flanş bölgesindeki sürtünme katsayısı eğrisi
(Sac malzeme AISI 304 ile Kalıp malzeme AISI 4140)



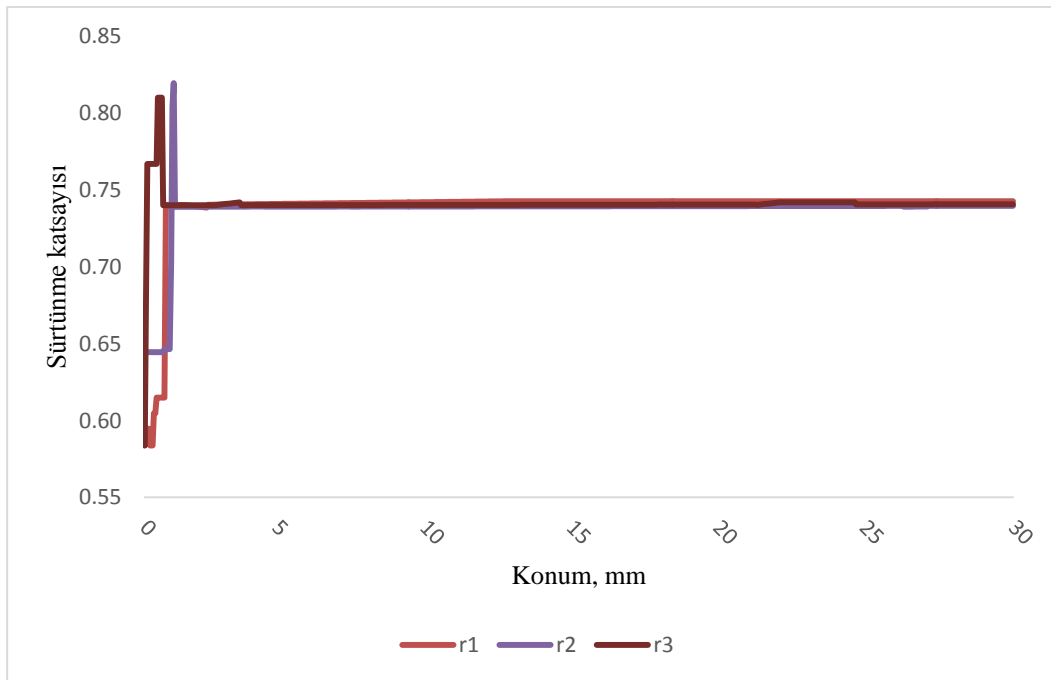
Şekil B.26. Sac malzeme ve radyüs bölgesindeki sürtünme katsayısı eğrisi
(Sac malzeme AISI 304 ile Kalıp malzeme AISI 4140)

B14. Test 14

Test No	A mm	B (μ m)	C (mm/dk)	D (daN)	E
14	7	0,484	4,5	100	sıvı+poşet



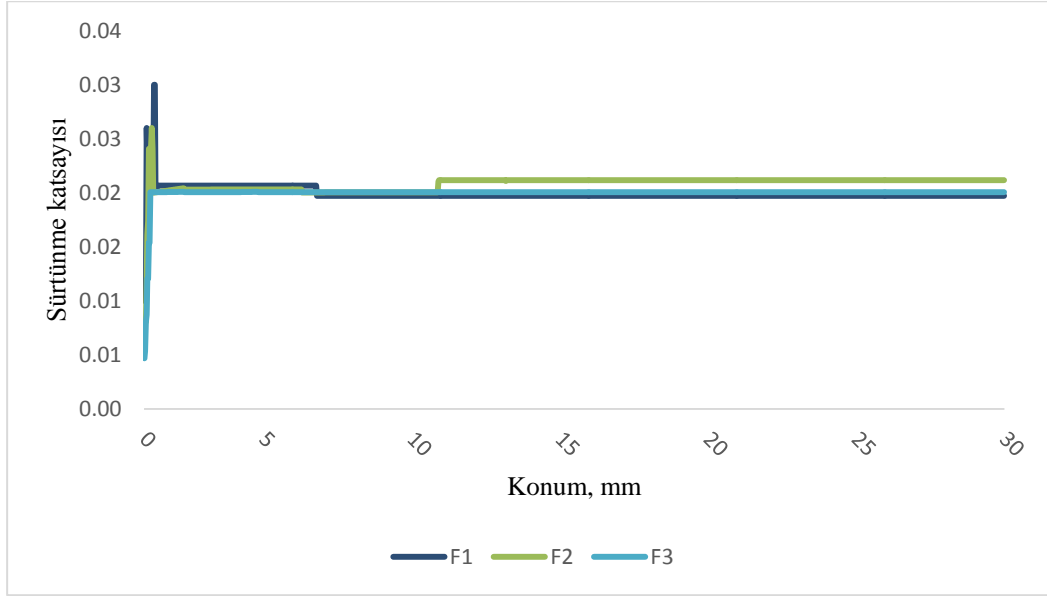
Şekil B.27. Sac malzeme ve flanş bölgesindeki sürtünme katsayısı eğrisi
(Sac malzeme AISI 304 ile Kalıp malzeme AISI 4140)



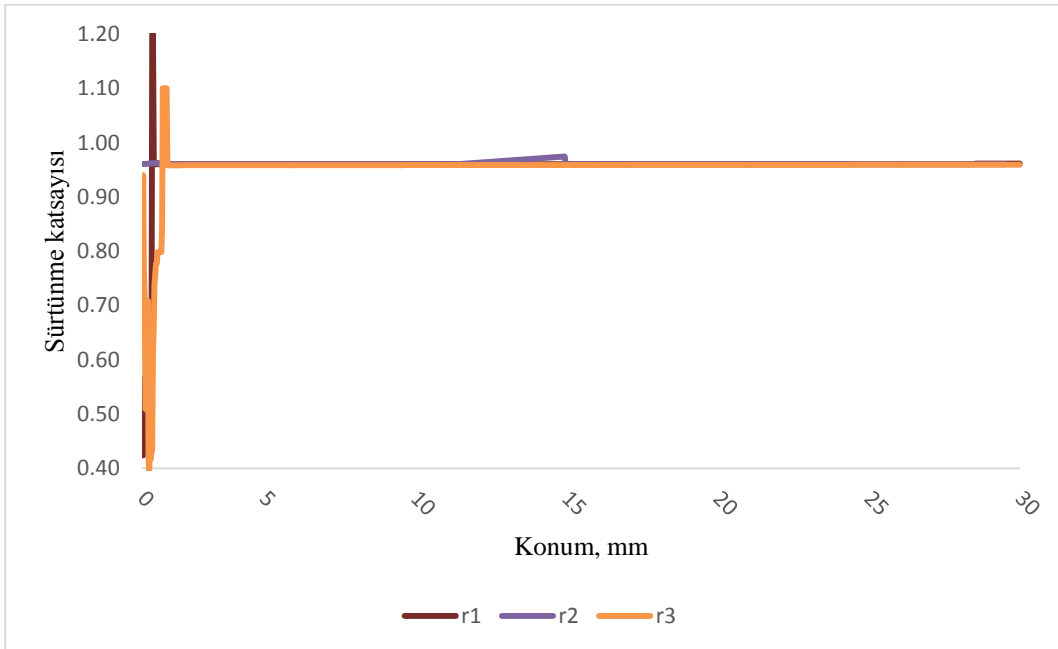
Şekil B.28. Sac malzeme ve radyüs bölgesindeki sürtünme katsayısı eğrisi
(Sac malzeme AISI 304 ile Kalıp malzeme AISI 4140)

B15. Test 15

Test No	A mm	B (μ m)	C (mm/dk)	D (daN)	E
15	7	2,33	0,5	180	parafin+poşet



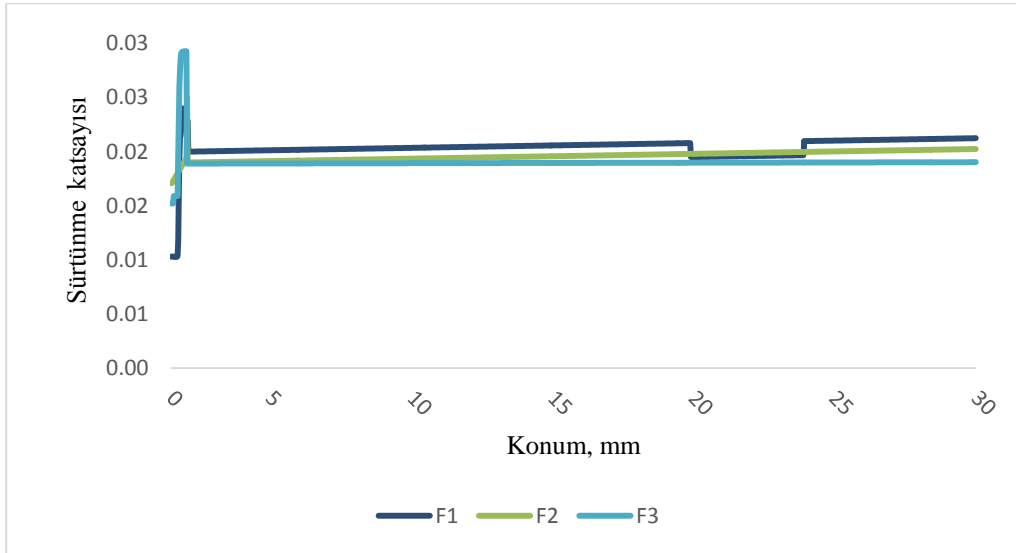
Şekil B.29. Sac malzeme ve flanş bölgesindeki sürtünme katsayısı eğrisi
(Sac malzeme AISI 304 ile Kalıp malzeme AISI 4140)



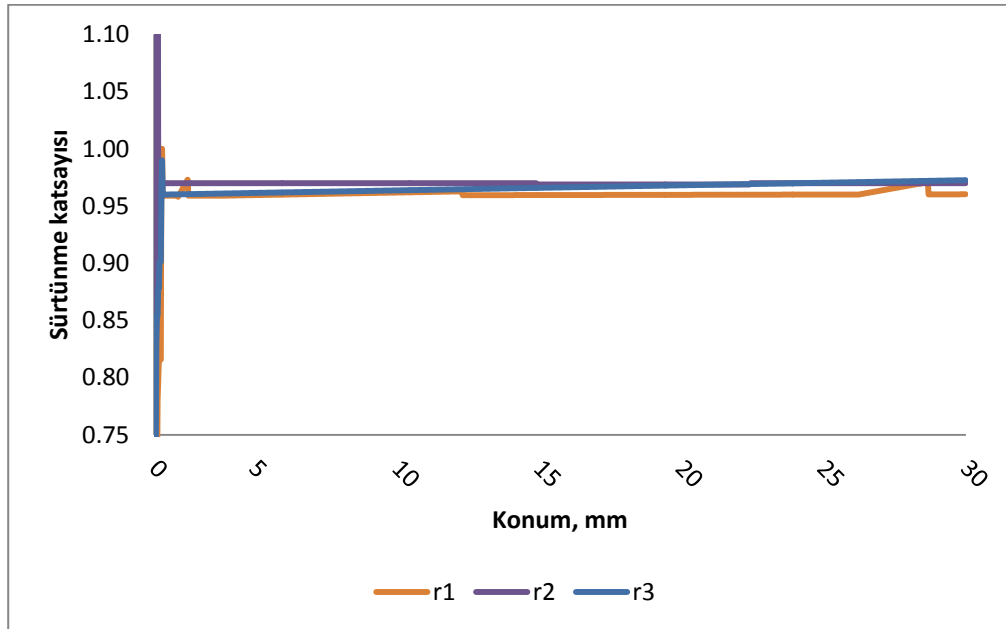
Şekil B.30. Sac malzeme ve radyüs bölgesindeki sürtünme katsayısı eğrisi
(Sac malzeme AISI 304 ile Kalıp malzeme AISI 4140)

B.16. Test 16

Test No	A mm	B (μm)	C (mm/dk)	D (daN)	E
16	10	0,211	4,5	180	parafin+poşet



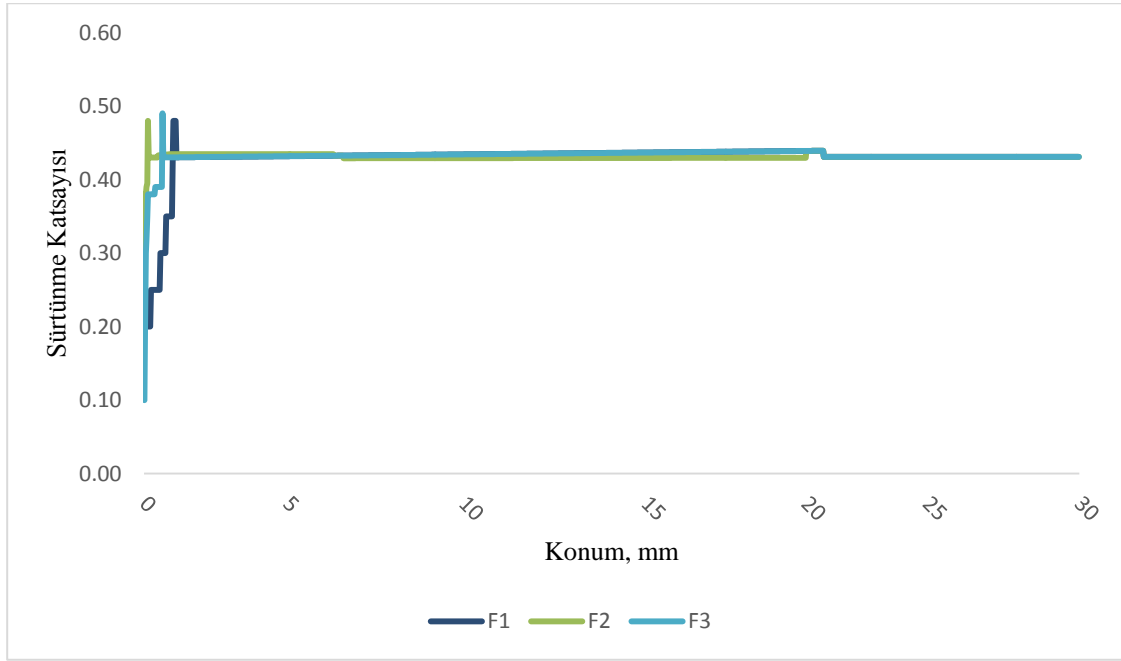
Şekil B.31. Sac malzeme ve flanş bölgesindeki sürtünme katsayısı eğrisi
(Sac malzeme AISI 304 ile Kalıp malzeme AISI 4140)



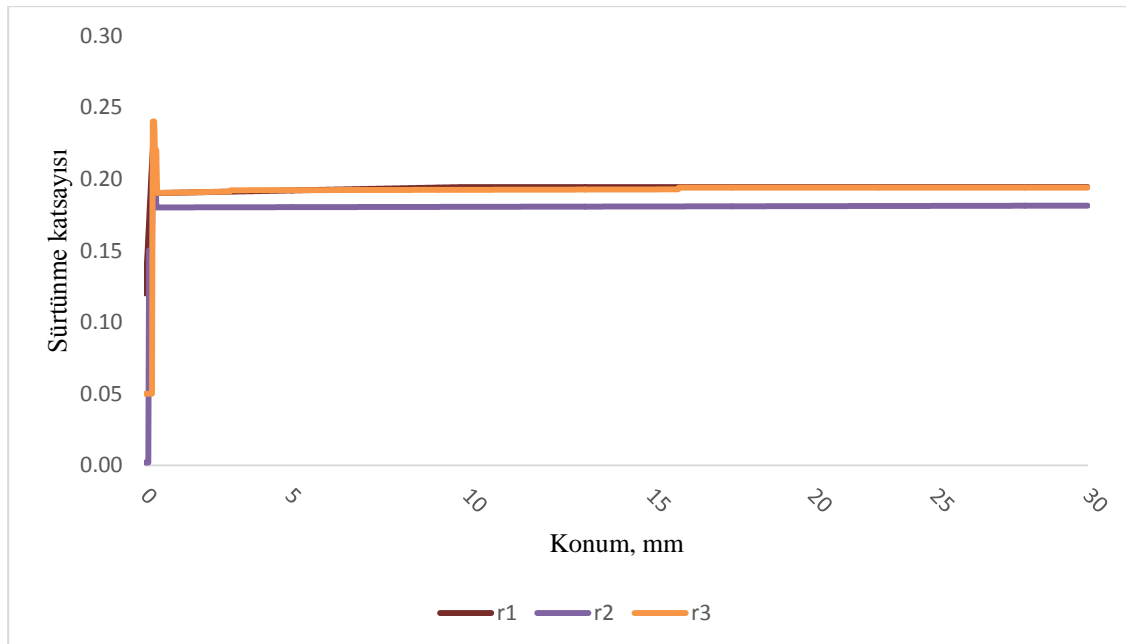
Şekil B.32. Sac malzeme ve radyüs bölgesindeki sürtünme katsayısı eğrisi
(Sac malzeme AISI 304 ile Kalıp malzeme AISI 4140)

B.17. Test 17

Test No	A mm	B (μm)	C (mm/dk)	D (daN)	E
17	10	0,484	0,5	260	kuru



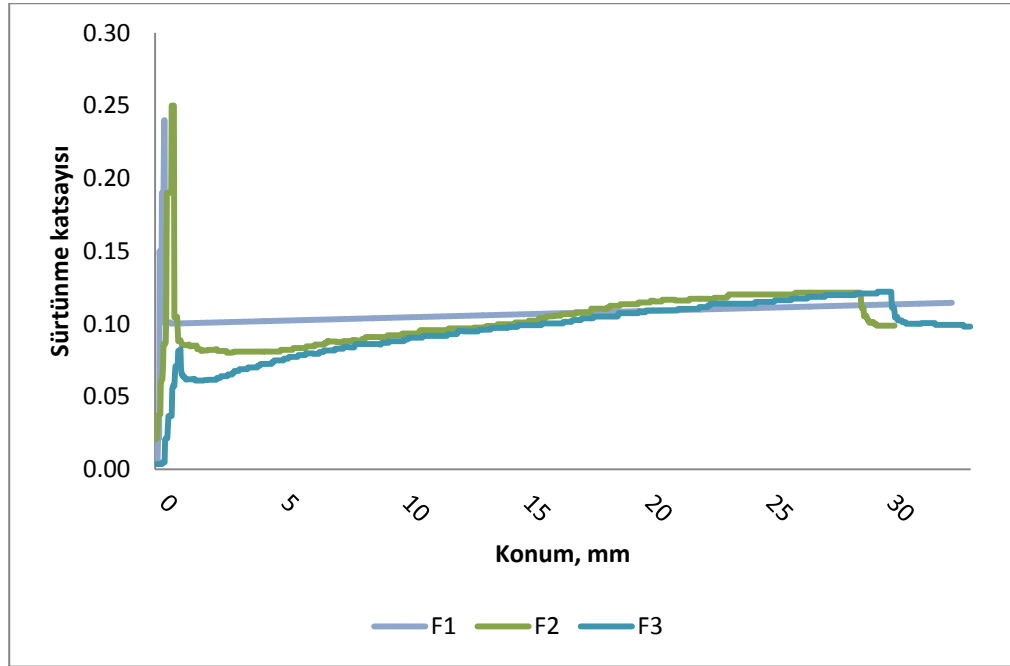
Şekil B.33. Sac malzeme ve flanş bölgesindeki sürtünme katsayısı eğrisi
(Sac malzeme AISI 304 ile Kalıp malzeme AISI 4140)



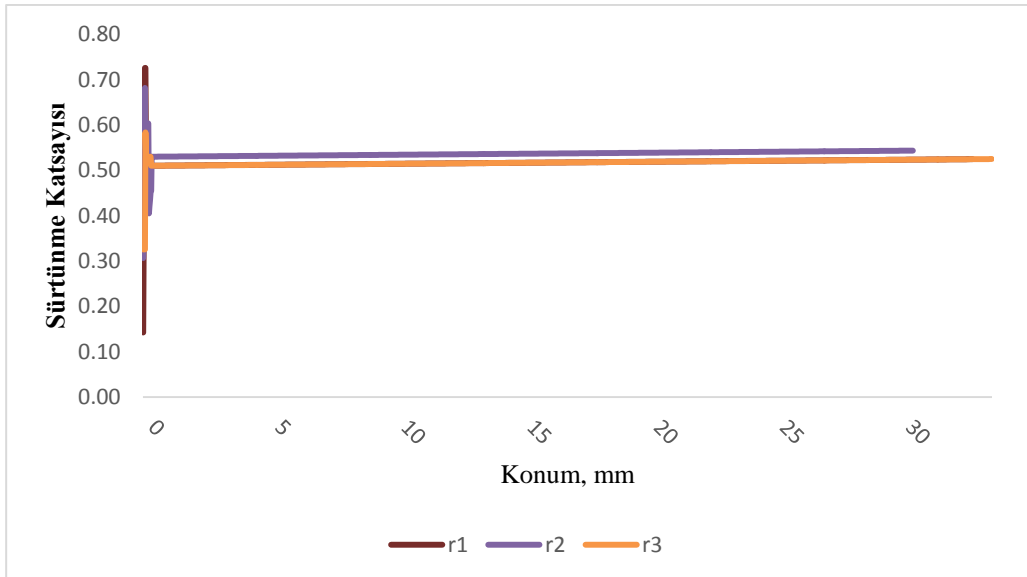
Şekil B.34. Sac malzeme ve radyüs bölgesindeki sürtünme katsayısı eğrisi
(Sac malzeme AISI 304 ile Kalıp malzeme AISI 4140)

B.18. Test 18

Test No	A mm	B (μm)	C (mm/dk)	D (daN)	E
18	10	2,33	1,5	100	sıvı+poşet



Şekil B.35. Sac malzeme ve flanş bölgesindeki sürtünme katsayısı eğrisi
(Sac malzeme AISI 304 ile Kalıp malzeme AISI 4140)



Şekil B.36. Sac malzeme ve radyüs bölgesindeki sürtünme katsayısı eğrisi
(Sac malzeme AISI 304 ile Kalıp malzeme AISI 4140)

EK-C) DIN 19704'e göre Çelik-Çelik Malzeme Arasındaki Sürtünme Katsayısı Değeri

Malzeme 1	Malzeme 2	Sürtünme Katsayısı			
		Kuru		Yağlı	
		Statik (Durgun)	Kayar	Statik (Durgun)	Kayar
Çelik(Yumuşak)	Dökme Demir		0,23	0,18	0,13
Çelik	Dökme Demir	0,40		0,21	
Çelik	Bakır Kurşun Alaşımı	0,22		0,16	0,15
Çelik (sert)	Grafit	0,21		0,09	
Çelik	Grafit	0,10		0,10	
Çelik(Yumuşak)	Kurşun	0,95	0,95	0,50	0,30
Çelik (sert)	Polietilen	0,20		0,20	
Çelik (sert)	Polisitren	0,3-0,35		0,3-0,35	
Çelik(Yumuşak)	Çelik (Yumuşak)	0,74	0,57		0,09-0,19
Çelik (sert)	Çelik (Sert)	0,78	0,42	0,05 -0,11	0,029-,12
Teflon	Çelik	0,04		0,04	0,04
Teflon	Teflon	0,04		0,04	0,04
Kalay	Dökme Demir		0,32		
Ti-6Al-4V(Derece	Bronz	0,36	0,27		
Tungsten Karbür	Tungsten Karbür	0,2-0,25		0,12	
Tungsten Karbür	Çelik	0,4 - 0,6		0,08 - 0,2	
Tungsten Karbür	Bakır	0,35			
Tungsten Karbür	Demir	0,80			
Ahşap	Ahşap(Temiz)	0,25 - 0,5			
Ahşap	Ahşap (Islak)	0,20			
Ahşap	Metaller(Temiz)	0,2-0,6			
Ahşap	Metaller(Islak)	0,20			
Ahşap	Tuğla	0,60			
Ahşap	Beton	0,62			
Çinko	Çinko	0,60		0,04	
Çinko	Dökme Demir	0,85	0,21		

Şekil C.1. Çelik-Çelik malzemenin sürtünme katsayısı

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Muhammet Mustafa ARAP

Uyruğu : TC

Doğum Yeri ve Tarihi : Hanay Almanya Fed. Cum.

Telefon : 0(555)622 85 22

e-mail :marap_42@hotmail.com

EĞİTİM

Lise : Özel Lale Lisesi, Meram, Konya, 2003

Üniversite : Selçuk Üniversitesi, Konya, 2009

Yüksek Lisans : Necmettin Erbakan Üniversitesi, Konya, ...

Doktora :

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl Kurum Görevi: 2009-2012 Tekelioğlu Cıvata San. Ltd. Şti, Ar-Ge & Proje

UZMANLIK ALANI: Metal Şekillendirme, Cad-Cam-Cae

YABANCI DİLLER: İngilizce, Almanca