



T.C.

BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ TEZLİ YÜKSEK LİSANS PROGRAMI

**METALİK MALZEMELERDE PROSES PARAMETRELERİNİN SÜRTÜNME
KATSAYISINA ETKİLERİNİN DENEYSEL VE NÜMERİK YÖNTEMLERLE
İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

YAHYA GÜNEŞ

TEZ DANIŞMANI

DOÇ. DR. EMRE ESENER

BİLECİK, 2026

10799531

T.C
BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ TEZLİ YÜKSEK LİSANS PROGRAMI

**METALİK MALZEMELERDE PROSES PARAMETRELERİNİN SÜRTÜNME
KATSAYISINA ETKİLERİNİN DENEYSEL VE NÜMERİK YÖNTEMLERLE
İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

YAHYA GÜNEŞ

TEZ DANIŞMANI
DOÇ. DR. EMRE ESENER

BİLECİK, 2026

10799531

BEYAN

“Metalik malzemelerde proses parametrelerinin sürtünme katsayısına etkilerinin deneysel ve nümerik yöntemlerle incelenmesi” başlıklı yüksek lisans tezinin hazırlık ve yazım aşamasında bilimsel araştırma ve etik kurallarına uyduğumu, [Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Faaliyetlerinde retken Yapay Zekâ Kullanımına Dair Etik Rehberine](#) uygun olarak tez/dönem projemi hazırladığımı, başkalarının eserlerinden yararlandığım bölümlerde bilimsel etik kurallarına uygun olarak atıfta bulunduğumu, kullandığım verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı, çalışmamın herhangi bir kısmının başka bir tez/dönem projesi olarak sunulmadığını, aksinin tespit edilmesi durumunda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Yahya GÜNEŞ

.../.../2026

mza:

ÖN SÖZ

Bu çalışma, metalik malzemelerin şekillendirme süreçlerinde kritik bir öneme sahip olan proses parametrelerinin, yüzey etkileşimleri ve sürtünme katsayısı üzerindeki etkilerini detaylı bir şekilde incelemek amacıyla gerçekleştirilmiştir. İmalat sektöründe verimliliği artırmak ve malzeme davranışlarını daha iyi analiz etmek hedefiyle yola çıkılan bu araştırmanın, literatüre ve sektörel uygulamalara katkı sağlaması hedeflenmektedir.

Tez çalışmamın başlangıcından sonuna kadar kıymetli bilgi ve tecrübeleriyle bana yol gösteren, akademik vizyonu ile ufku açan değerli danışmanım **Doç. Dr. Emre ESENER**'e en içten teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım süresince teknik imkanlarını ve verilerini benimle paylaşan, profesyonel gelişimime katkıda bulunan **Coşkunuz Holding Ar-Ge Birimi** yönetimine ve mesai arkadaşlarıma desteklerinden dolayı teşekkür ederim. Ayrıca deneyler ve veri analizi sürecinde tecrübeleriyle yardımlarını esirgemeyen **M. Mustafa YENİCE** ve **Önder KAYA**'ya şükran borçluyum.

Tüm akademik hayatım boyunca yanımda olan, sabır ve sevgiyle beni her daim destekleyen; hayatımın en büyük motivasyon kaynağı olan sevgili eşime ve çocuklarıma bu süreçteki fedakarlıkları için kalpten teşekkür ederim.

Yahya GÜNEŞ

2026

ÖZET

Sac metal şekillendirme simülasyonlarında analiz sonuçlarının gerçeğe yakınlığı, büyük ölçüde sınır şartlarının doğru tanımlanmasına bağlıdır. Bu parametrelerin en kritiği olan sürtünme katsayısı, endüstriyel uygulamalarda genellikle sabit bir değer (Coulomb sürtünme modeli) olarak kabul edilmektedir. Ancak karmaşık geometrilere ve değişken temas basınçlarına sahip parçalarda bu yaklaşım; geri esneme ve yırtılma tahminlerinde ciddi sapmalara neden olmaktadır.

Bu tez çalışmasında, 0,73 mm kalınlığındaki CR4 kalite sac malzeme kullanılarak; sürtünme katsayısının sabit bir değer olmadığı, aksine yüzey basıncı ve parça geometrisine bağlı olarak değişkenlik gösterdiği hipotezi test edilmiştir. Çalışmanın deneysel aşamasında, MTS test cihazına entegre edilen özel tasarım bir deney düzeneği vasıtasıyla numuneler; 3 MPa ve 5 MPa olmak üzere iki farklı yüzey basıncına maruz bırakılmıştır. Veri güvenilirliğini sağlamak amacıyla deneyler tekrarlanabilir setler halinde gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın nümerik aşamasında ise Autoform yazılımı kullanılarak deneysel koşullar sanal ortamda modellenmiş; basınç dağılımı ve sürtünme çıktıları karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir.

Elde edilen bulgular, formsuz (düz) numune durumunda simülasyon verileri ile deneysel sonuçların yüksek hassasiyetle örtüştüğünü ortaya koymuştur. Buna karşın, farklı formlu kesitlerde yapılan deneylerde simülasyon sonuçlarının deneysel verilerden önemli ölçüde saptığı gözlemlenmiştir. Bu çalışma; basınca ve geometriye bağlı sürtünme katsayısının, güncel Sonlu Elemanlar Analizi (SEA) yazılımları tarafından modellenen ideal durumlar ile gerçek fiziksel çıktılar arasında farklar yarattığını, dolayısıyla daha gelişmiş sürtünme modellerinin kullanımının bir zorunluluk olduğunu kanıtlamaktadır. Çalışmanın sonuçları, doğru sürtünme modellenmesinin analiz doğruluğunu artırırken, deneme-yanılma süreçlerini kısalttığını ve üretim maliyetlerini optimize ettiğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Sürtünme Katsayısı, Sac Metal, Temas Basıncı, Autoform, CR4 Çeliği

ABSTRACT

In sheet metal forming simulations, the accuracy of analysis results depends heavily on the correct definition of boundary conditions. The friction coefficient, the most critical of these parameters, is generally accepted as a constant value (Coulomb friction model) in industrial applications. However, in parts with complex geometries and variable contact pressures, this approach leads to significant deviations in springback and thinning (tearing) predictions.

In this thesis study, using CR4 grade sheet material with a thickness of 0.73 mm, the hypothesis that the friction coefficient is not a constant value but varies depending on surface pressure and part geometry was tested. In the experimental phase of the study, samples were subjected to two different surface pressures, 3 MPa and 5 MPa, via a specially designed experimental setup integrated into an MTS testing machine. Experiments were carried out in reproducible sets to ensure data reliability. In the numerical phase, the experimental conditions were modeled in a virtual environment using Autoform software; pressure distribution and friction outputs were analyzed comparatively.

The findings revealed that in the case of flat (unformed) samples, the simulation data and experimental results correlated with high precision. Conversely, in experiments conducted on cross-sections with different forms, simulation results were observed to deviate significantly from experimental data. This study proves that pressure- and geometry-dependent friction coefficients create discrepancies between the ideal conditions modeled by current Finite Element Analysis (FEA) software and actual physical outputs; therefore, the use of more advanced friction models is a necessity. The results of the study demonstrate that accurate friction modeling increases analysis accuracy while shortening trial-and-error processes and optimizing production costs.

Keywords: Friction Coefficient, Sheet Metal, Contact Pressure, Autoform, CR4 Steel

İÇİNDEKİLER

ÖN SÖZ.....	i
ÖZET	ii
ABSTRACT	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
TABLolar LİSTESİ.....	v
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	vi
KISALTMALAR VE SİMGELER LİSTESİ.....	xii
1.GİRİŞ.....	1
2.SÜRTÜNME KAVRAMI	9
3.SONLU ELEMANLAR ANALİZİ	17
4.UYGULAMA ÇALIŞMASI	24
4.1 Deneysel Çalışmalar	24
4.2 Sonlu Elemanlar Analizleri	36
4.3 Sonuçların Değerlendirilmesi	36
5.DEĞERLENDİRME.....	56
KAYNAKÇA	57

TABLULAR LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 2.1. Farklı Malzemeler Arası Sürtünme Katsayıları	7
Tablo 2.2. Sürtünme türleri	7
Tablo 4.1. Sonlu elemanlar yazılımında kullanılan eleman ve ağ yapısı parametreleri	30
Tablo 4.2. CR4 malzemesine ait mekanik özellikler.....	31
Tablo 4.3. SEA yazılımında kullanılan değişkenler.....	31

ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 1.1. Sac metal parça üretim süreci	1
Şekil 1.2. Proses tasarım görseli	2
Şekil 1.3. Döküm kalıp tasarımı.....	3
Şekil 1.4. Sonlu elemanlar analizi simülasyon görüntüsü	4
Şekil 1.5. Sac şekillendirmede deformasyon örnekleri.....	5
Şekil 2.1. İki yüzeyin temasında oluşan sürtünme kuvveti ve normal kuvvet	9
Şekil 2.2. Sac Metal Şekillendirme Sürecinde Kalıp-Sac Etkileşimi	9
Şekil 2.3. Coulomb yasasına göre normal kuvvet ile sürtünme kuvveti arasındaki ilişki	12
Şekil 3.1. Eleman ve düğüm noktaları	14
Şekil 3.2. Autoform'da Hill48 plastisite modeline sahip CR420LA malzemesi.....	16
Şekil 3.3. Örnek uzama-gerilme ve % uzama ve gerilme grafikleri	17
Şekil 3.4. Nakajima testi görseli	18
Şekil 3.5. Şekillendirme sınır eğrisi	19
Şekil 4.1. Hidrolik test cihazında deney düzeneği.....	20
Şekil 4.2. Deneyleerde kullanılan çeliklerin yüzey pürüzlülüğü	20
Şekil 4.3. Deneyleerde kullanılan sac numune yüzey pürüzlülüğü	21
Şekil 4.4. Deneyleerde kullanılan numune tipi ve ebatları	21
Şekil 4.5. Deney düzeneği ve değişkenleri	23
Şekil 4.6. MTS cihazı ile yapılan test numuneleri	23
Şekil 4.7. Farklı geometrilere hazırlanmış test elemanları	24
Şekil 4.8. Çeliklerin kesit görünümü	25
Şekil 4.9. Formsuz, farklı basınçlardaki sürtünme katsayısı ve kuvvet grafiği	25
Şekil 4.10. Basamak formulu farklı basınçlardaki karşılaştırma sürtünme katsayısı	26

Şekil 4.11. Dairesel formlu farklı basınçlardaki sürtünme katsayısı	27
Şekil 4.12. Dikdörtgen formlu farklı basınçlardaki sürtünme katsayısı	28
Şekil 4.13. Autoform’da kullanılan çeliklerin ağ yapıları	29
Şekil 4.14. Autoform’da CR4 malzemesine ait malzeme kartı görseli	30
Şekil 4.15. SEA yazılımında kullanılan açınım bilgileri	31
Şekil 4.16. SEA yazılımındaki kullanılmak üzere tasarlanan çelikler	32
Şekil 4.17. SEA Düz formsuz sürtüne katsayısı sonuçları	33
Şekil 4.18. SEA Basamak formlu basınca bağlı sürtünme katsayısı sonuçları	34
Şekil 4.19. SEA Dairesel formlu basınca bağlı sürtünme katsayısı sonuçları	35
Şekil 4.20. SEA Dikdörtgen formlu basınca bağlı sürtünme katsayısı sonuçları	36
Şekil 4.21. Formsuz düz olmak üzere farklı basınçlar uygulandığında oluşan sürtünme katsayısının deneysel ve numerik olarak karşılaştırılması	37
Şekil 4.22. Basamak formlu olmak üzere farklı basınçlar uygulandığında oluşan sürtünme katsayısının deneysel ve numerik olarak karşılaştırılması	38
Şekil 4.23. Dairesel formlu olmak üzere farklı basınçlar uygulandığında oluşan sürtünme katsayısının deneysel ve numerik olarak karşılaştırılması	39
Şekil 4.24. Dikdörtgen formlu olmak üzere farklı basınçlar uygulandığında oluşan sürtünme katsayısının deneysel ve numerik olarak karşılaştırılması	40
Şekil 4.25. 5MPa basınç altında yapılan deneysel çalışmamızın formsuz, basamak formlu, dairesele formlu ve dikdörtgen formlu geometrilere göre oluşan sürtünme katsayısının karşılaştırması.....	41
Şekil 4.26. 3MPa basınç altında yapılan deneysel çalışmamızın formsuz, basamak formlu, dairesele formlu ve dikdörtgen formlu geometrilere göre oluşan sürtünme katsayısının karşılaştırması.....	42

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

SEA: Sonlu Elemanlar Analizi

σ : Akma Gerilmesi Değeri

σ_0 : Hadde yönündeki akma gerilmesi değeri

σ_{45} : Hadde yönüne 45 derecedeki akma gerilmesi değeri

σ_{90} : Hadde yönüne 90 derecedeki akma gerilmesi değeri

σ_{12} : Çift Eksenli Akma Gerilmesi Değeri

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$: Asal Gerilmeler

$\sigma_{12}, \sigma_{23}, \sigma_{31}$: Kayma Akma Gerilmeleri

r : Anizotropi Katsayısı

r_0 : Hadde yönündeki anizotropi değeri

r_{45} : Hadde yönüne 45 derecedeki anizotropi değeri

r_{90} : Hadde yönüne 90 derecedeki anizotropi değeri

F, G, H, L, M ve N: Anizotropi katsayılarına ve akma gerilmelerine bağlı sabitler

M: Malzemenin kristal kafes yapısına bağlı üstel

a, c, h, k1, k2, p: Barlat-89 plastisite modeline bağlı katsayılar

SIGY, ϵ_{eff} , P, C, σ_y , s: Parça Boyunca Lineer Plastisite Sabitleri

R: Zımba Yarı Çapı

mm: Milimetre

S: Saniye

MPa: Megapaskal

kN: Kilo Newton

μ : Sürtünme Katsayısı

1. GİRİŞ

Endüstriyel imalatın temel yapı taşlarından biri olan sac metal şekillendirme; düz metal levhaların (sac), mühendislik gereksinimlerini karşılayacak işlevsel parçalara dönüştürüldüğü stratejik bir üretim sürecidir. Presler ve bu iş için özel olarak tasarlanmış kalıplar vasıtasıyla yürütülen bu süreç, metalin plastik deformasyon kabiliyetinden yararlanılarak, malzemenin kontrollü bir şekilde biçimlendirilmesi esasına dayanır. Sunduğu yüksek üretim hızı ve esneklik sayesinde bu yöntem, modern sanayinin birçok kolunda vazgeçilmez bir konuma sahiptir:

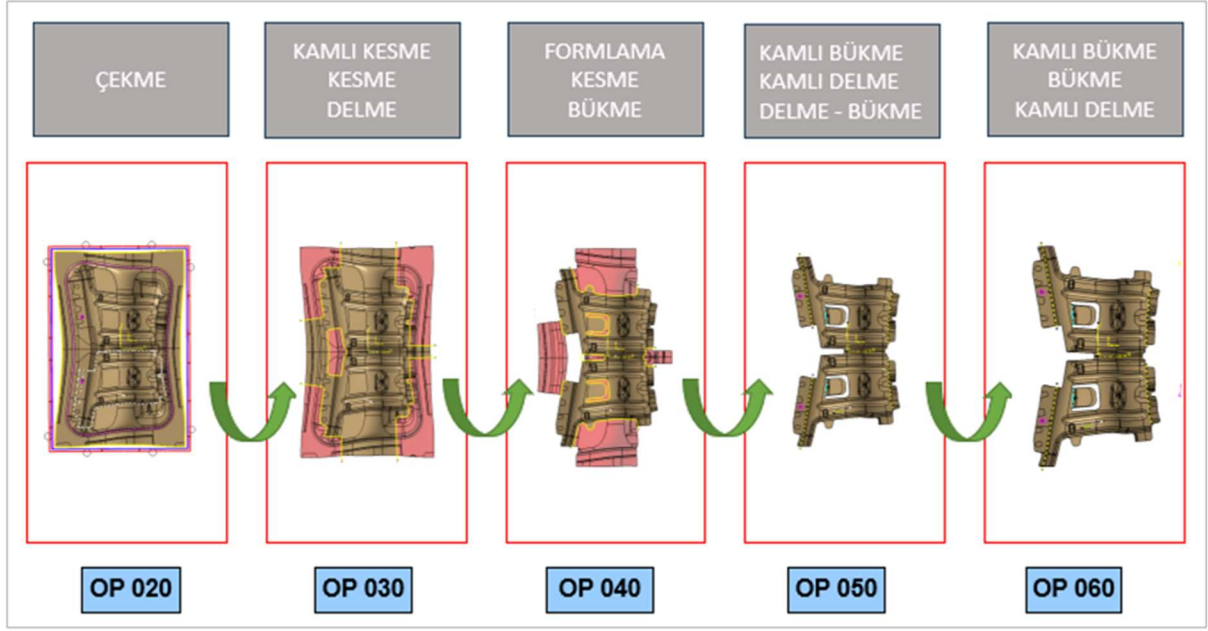
- **Otomotiv:** Şasi bileşenlerinden estetik gövde panellerine kadar geniş bir yelpaze.
- **Havacılık ve Uzay:** Aerodinamik yüzeyler ve yapısal gövde parçaları.
- **Beyaz Eşya:** Dayanıklı dış gövdeler ve karmaşık iç mekanizmalar.
- **İnşaat:** Cephe kaplamaları ve yapısal taşıyıcı elemanlar.

Şekil 1.1’de görüldüğü üzere, hammadde girişinden nihai ürüne uzanan bu kapsamlı imalat zincirinin bir parçası olan sac metal proses mühendisliği, yüksek hassasiyet ve mühendislik yetkinliği gerektirmektedir.



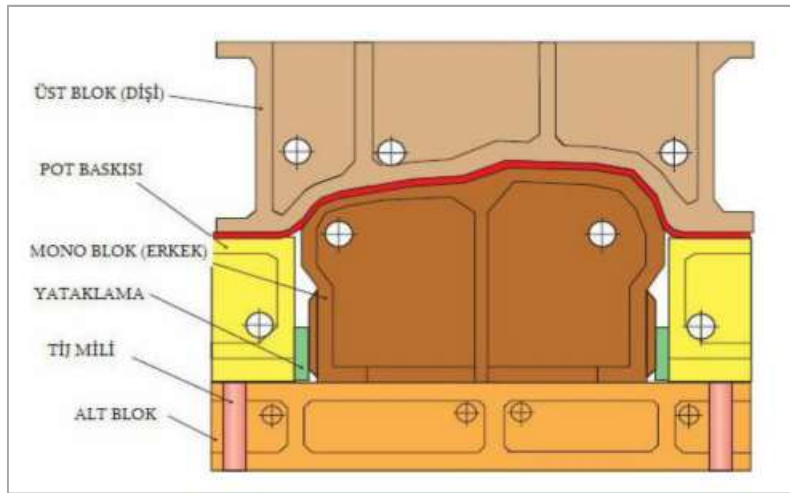
Şekil 1.1. Sac metal parça üretim süreci

Şekillendirme mekaniğinin temelinde, malzemenin elastik (geri yaylanma) ve plastik (kalıcı şekil değiştirme) davranışları arasındaki hassas denge yer alır. Oldukça karmaşık fiziksel fenomenleri barındıran bu yapı; malzeme bilimi, mekanik mühendisliği, proses tasarımı ve kalıp teknolojileri gibi farklı disiplinlerin entegrasyonunu zorunlu kılar. Üretim maliyetlerinin minimize edilmesi ve ürün kalitesinin maksimize edilmesi, ancak bu disiplinlerin uyumlu çalışmasıyla mümkündür. Şekil 1.2’de, bu parametrelerin dikkate alındığı örnek bir proses tasarımı sunulmuştur.



Şekil 1.2. Proses tasarım görseli

Sac metal şekillendirme süreçleri; malzeme özellikleri, makine parametreleri ve tribolojik koşulların (sürtünme, aşınma vb.) etkileşiminden doğan çok bilinmeyenli bir problemdir. Üretim esnasında oluşan aşırı gerilmeler, yorulma ve kontrolsüz plastik deformasyonlar hem kalıp ömrünü kısaltmakta hem de parça kalitesini tehdit etmektedir. Şekil 1.3'te, bu zorlukların yönetimini gerektiren karmaşık bir döküm kalıp tasarımı görülmektedir.

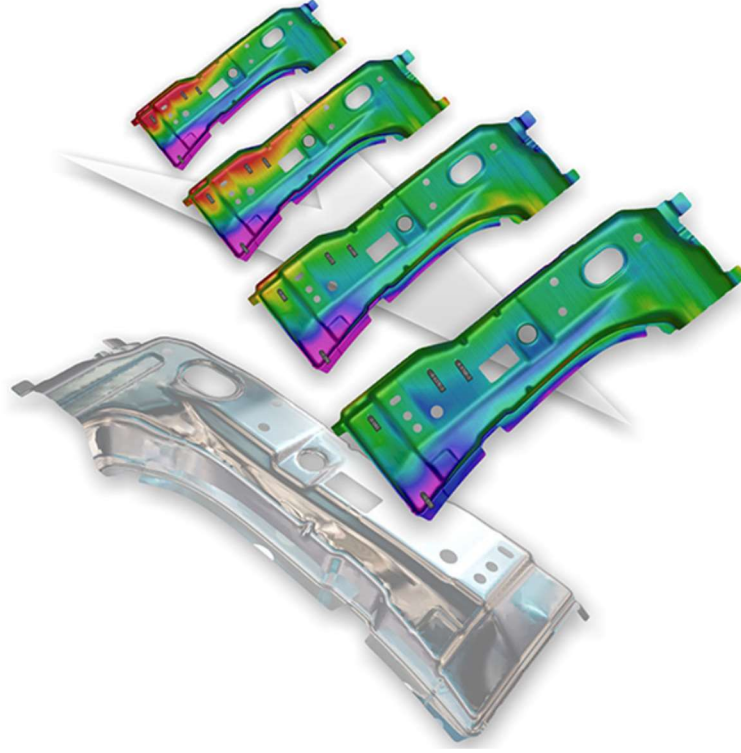


Şekil 1.3. Döküm kalıp tasarımı (Schuler, 1998)

Geleneksel "deneme-yanılma" yöntemleri, günümüzün rekabetçi piyasa koşullarında maliyet ve zaman açısından sürdürülebilirliğini yitirmiştir. Bu noktada, Bilgisayar Destekli Mühendislik (CAE) ve Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEA) devreye girmektedir. Sanal ortamda

gerçekleştirilen simülasyonlar (Şekil 1.4), kalıp henüz fiziksel olarak üretilmeden potansiyel hataların öngörülmesini sağlar. Bu analizler sayesinde:

1. Gerilim dağılımları ve malzeme akışı incelenir.
2. Yırtılma, kırışma, geri yaylanma gibi deformasyon kusurları tespit edilir.
3. Kalıp aşınması ve sıcaklık etkileri analiz edilir.



Şekil 1.4. Sonlu elemanlar analizi simülasyonu görüntüsü (Autoform, 2025)

Nümerik yöntemler ile yapılan incelemeler, sac metal şekillendirme sırasında oluşabilecek çeşitli problemlerin kalıp üretiminden önce anlaşılmasına, tespit edilmesine ve çözümlenmesine olanak tanımaktadır. Bu problemler arasında, örneğin; ürünün geometrik hataları, yırtılma, kırışma, geri yaylanma ve görsel hatalar gibi deformasyon türleri yer alır. Bunun yanı sıra, kalıp aşınması, sıcaklık dağılımlarının etkileri ve gerilim birikimi gibi faktörler de sac metal şekillendirme sürecinde karşılaşılan zorluklardandır. Nümerik simülasyonlar, bu tür problemleri daha ayrıntılı bir şekilde analiz etmeye imkân tanır ve tasarım sürecinde yapılacak iyileştirmeleri ortaya koyar. Şekil 1.5'te sac şekillendirme esnasında karşılaşılan deformasyon örnekleri verilmiştir.



Şekil 1.5. Sac şekillendirmede hata türleri (Lim, 2010)

Sac metal şekillendirme süreçlerinde karşılaşılan problemlerin anlaşılması ve çözülmesi adına yapılan araştırmaların önemli bir bölümü, özellikle otomotiv endüstrisinde büyük öneme sahiptir. Otomotiv sektörü, sac metal şekillendirme teknolojilerinin en yoğun kullanıldığı alanlardan biridir. Bu sektörde, araçların dış ve iç saclarının üretilmesi sırasında birçok farklı şekillendirme işlemi uygulanmaktadır. Bu süreçlerde, üretim sırasında meydana gelen gerilme, deformasyon, malzeme akışı ve yüzey hataları gibi faktörlerin dikkatli bir şekilde incelenmesi gerekmektedir. Bu bağlamda sac şekillendirme işlemleri sırasında, kullanılan metalin mekanik özellikleri, kalıp geometrisi ve uygulanan kuvvetler, üretilen parçanın nihai kalitesini doğrudan etkilemektedir. Bu süreçte en önemli parametrelerden biri ise sürtünme koşullarıdır.

Sürtünme, iki yüzeyin birbiriyle temas ettiği her durumda ortaya çıkan bir direnç kuvvetidir ve sac metal şekillendirme sürecinde büyük bir rol oynar. Özellikle yüksek tonajlı işlemler sırasında, sürtünme katsayısının değişimi, malzemenin akış davranışını, kalıp ömrünü ve yüzey kalitesini doğrudan etkilemektedir. Sürtünme katsayısının kontrol edilmesi, üretim süreçlerinde enerji verimliliğini artırırken aynı zamanda aşınma ve malzeme deformasyonunu minimize etmeye yardımcı olur. Bu nedenle, sac metal şekillendirme operasyonlarında sürtünme koşullarının doğru bir şekilde belirlenmesi ve modellenmesi büyük bir mühendislik problemi.

Bu tez çalışmasının temel amacı, sac metal şekillendirme süreçlerinde proses parametrelerinin sürtünme katsayısı üzerindeki etkilerini incelemek ve farklı koşullar altında sürtünme katsayısının nasıl değiştiğini ortaya koymaktır. Bu kapsamda, deneysel çalışmalar ve sonlu elemanlar analizleri gerçekleştirilerek sürtünme katsayısının hassas bir şekilde belirlenmesi hedeflenmiştir.

2. SÜRTÜNME KAVRAMI

2.1. Sürtünmenin Tanımı

Sürtünme, birbiriyle temas hâlinde olan iki yüzey arasında oluşan ve bir yüzeyin diğerine göre hareketine veya hareket etme eğilimine karşı koyan kuvvettir. Mekanik sistemlerde sürtünme, sistemin verimini düşürebilecek bir direnç olarak görülse de birçok uygulamada işlevsellik için zorunludur. Sürtünme kuvveti, genellikle yüzeyler arasındaki normal kuvvet ile yüzey özelliklerine bağlı olarak ortaya çıkan sürtünme katsayısının çarpımıyla ifade edilmektedir, bu ifade Denklem D.1’de verilmiştir. Burada F_s sürtünme kuvveti, (μ) sürtünme katsayısı ve N normal kuvvettir. Bu ifade, Coulomb sürtünme modeli olarak bilinir ve mühendislik hesaplamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. (Hibbeler, 2016; Meriam, 2012).

$$F_s = \mu \cdot N \quad (D.1)$$

Şekil 2.1’da iki yüzeyin temasında oluşan sürtünme kuvveti ve normal kuvvetin yönsel gösterimi verilmiştir. Burada, temas noktasında oluşan kuvvet bileşenleri vektörlerle temsil edilmiştir. Sürtünme kuvveti, yüzeye paralel olarak ve harekete zıt yönde; normal kuvvet ise yüzeye dik yönde gösterilmiştir.



Şekil 2.1. İki yüzeyin temasında oluşan sürtünme kuvveti ve normal kuvvet (Hibbeler, 2016; Meriam, 2012).

2.2. Sürtünmenin Tarihsel Gelişimi

Sürtünme olgusuna dair ilk sezgisel yaklaşımlar Antik Yunan filozoflarına kadar uzansa da bu fiziksel fenomenin sistematik bir mühendislik disiplini çerçevesinde ele alınması 15. yüzyılda Leonardo da Vinci'nin deneysel çalışmalarıyla başlamıştır. Da Vinci, döneminin ötesinde bir öngörüyle, sürtünme kuvvetinin temas eden yüzey alanından bağımsız olduğunu ve normal kuvvetle (yüzeye dik baskı) doğrudan orantılı bir ilişki içerisinde bulunduğunu öne sürmüştür. 17. yüzyıla gelindiğinde Guillaume Amontons, bu gözlemleri klasik sürtünme yasaları olarak matematiksel bir zemine oturtmuş; 18. yüzyılda ise Charles-Augustin de Coulomb, statik ve kinetik sürtünme arasındaki ayrımı netleştirerek kuramı derinleştirmiştir (Dowson, 1998; Hutchings, 2016).

20.yüzyıl, sürtünmenin sadece mekanik bir direnç değil; aşınma ve yağlama süreçleriyle iç içe geçmiş karmaşık bir sistem olduğunun anlaşıldığı "triboloji" biliminin doğuşuna tanıklık etmiştir. Günümüzde nanoteknoloji ve yüzey mühendisliği disiplinleri sayesinde, sürtünme artık sadece makro düzeyde bir katsayı değil, atomik ölçekteki pürüzlülük ve moleküler etkileşimler çerçevesinde analiz edilebilen bir uzmanlık alanıdır.

Bu tarihsel süreç ve kuramsal birikim, mühendislik tasarımlarında kritik öneme sahip olan malzeme etkileşimlerinin standartlaştırılmasını zorunlu kılmıştır. Sürtünme kuvvetinin temelini oluşturan ve yüzeylerin birbirine göre kayma direncini belirleyen katsayı, Denklem D.2'de temel bağıntı ile ifade edilmektedir:

$$F_s = \mu \cdot F_n \quad (D.2)$$

Burada F_s sürtünme kuvvetini, μ sürtünme katsayısını ve F_n ise yüzeye etki eden normal kuvveti temsil eder. Teorik gelişimden uygulama safhasına geçildiğinde, farklı endüstriyel malzemelerin sergilediği bu katsayılar, tasarım süreçlerinde temel referans noktasını oluşturmaktadır. Bu bağlamda, literatürde yaygın olarak kabul gören ve çeşitli çalışma koşullarında test edilmiş bazı malzeme çiftleri arasında oluşan sürtünme katsayısı tablosu Tablo 2.1'de verilmiştir (Dowson, 1998; Hutchings, 2016).

Tablo 2.1. Farklı Malzemeler Arası Sürtünme Katsayıları (Avallone, 2006; Bauwens, 2013).

Malzeme Çifti	Statik Sürtünme	Dinamik Sürtünme
Çelik- Çelik	0,11- 0,16	0,05- 0,15
Alüminyum- Çelik	0,61	0,47
Bakır- Çelik	0,53	0,36

2.3.Sürtünme Türleri

Sürtünme, hareket türüne ve ortam koşullarına bağlı olarak farklı şekillerde temel olarak statik, kinetik (dinamik), yuvarlanma ve akışkan (iç-viskoz) sürtünme olarak sınıflandırılmaktadır. Tablo 2.2’de sürtünme türlerine ait tanımlama ve örnek uygulamalar verilmiştir. Statik sürtünme, bir cismin harekete geçmeden önceki sürtünmesidir, genellikle en yüksek sürtünme kuvvetidir çünkü moleküller arası bağlar tam olarak kopmamıştır.

Kinetik (dinamik) sürtünme, cisim harekete geçtikten sonra gözlemlenen sürtünmedir ve statik sürtünmeye göre genellikle daha düşüktür. Yuvarlanma sürtünmesi, bir nesnenin diğerinin yüzeyi üzerinde yuvarlanırken karşılaştığı dirençtir ve genellikle çok düşüktür. Akışkan (Viskoz) sürtünme, bir cismin sıvı veya gaz ortamında hareketi sırasında karşılaştığı dirençtir (Blau,2008; Bhushan,2013).

Tablo 2.2. Sürtünme türleri (Walker, J. 2014; Serway, 2018).

Sürtünme Türü	Tanım	Örnek Uygulama
Statik Sürtünme	Hareket öncesi direnç	Cisim ilk harekete geçerken
Dinamik Sürtünme	Hareket halindeki direnç	Kayma yatakları
Yuvarlanma Sürtünmesi	Yuvarlanma sırasında oluşan direnç	Tekerlek- zemin
Akışkan Sürtünmesi	Sıvı/gaz ortamında direnç	Hava/su direnci

2.4.Sürtünmeyi Etkileyen Faktörler

Sürtünme kuvveti sabit değildir ve çeşitli faktörlere bağlı olarak değişmektedir. Sürtünme kuvvetini başlıca etkileyen unsurlar, yüzey pürüzlülüğü, malzeme cinsi, yağlama koşulları, normal kuvvet, hareket hızı ve sıcaklıktır (Persson, 2013; Bowden, 2003).

2.5. Sürtünmenin Mühendislikteki Önemi ve Sac Metal Şekillendirme Süreçlerinde Sürtünmenin Rolü

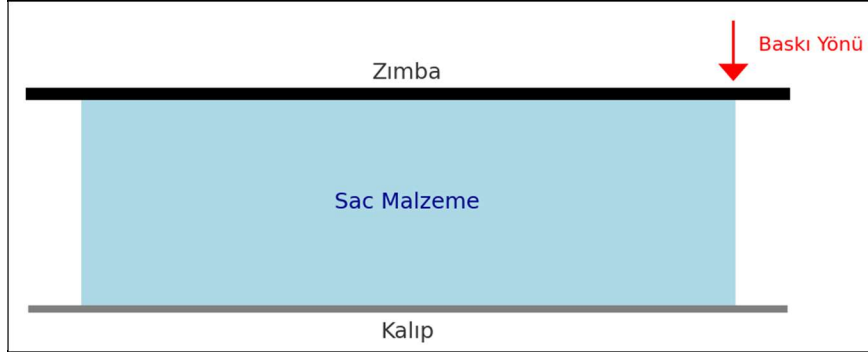
Mühendislik uygulamalarında sürtünme, birbirine temas eden iki yüzey arasındaki göreceli harekete karşı oluşan direnç olarak tanımlanmaktadır ve sac metal şekillendirme süreçlerinde sistemin başarısını belirleyen en temel parametrelerden biridir. Geleneksel mekanik sistemlerde sürtünme genellikle enerji kaybı ve aşınma gibi istenmeyen sonuçlarla ilişkilendirilse de kalıpcılık ve sac şekillendirme teknolojilerinde kontrol edilmesi ve optimize edilmesi gereken stratejik bir değişken niteliğindedir. Sac metal şekillendirme operasyonlarında sürtünme, malzemenin kalıp boşluğu içerisindeki akışını doğrudan kontrol eder. Şekil 2.2’de kalıp sac etkileşimi şematik olarak gösterilmiştir.

Özellikle derin çekme ve form verme işlemlerinde, sürtünme katsayısının (μ) seviyesi; parçadaki gerilme dağılımını, cidar kalınlığındaki değişimi ve nihai ürünün yapısal bütünlüğünü belirler. Sürtünmenin yetersiz olması durumunda malzeme kontrolsüzce kalıp içine akarak buruşma hatalarına yol açarken; aşırı sürtünme, malzemenin akışını engelleyerek yerel incelmelere ve nihayetinde yırtılma kusurlarına neden olmaktadır. Bu denge, mühendislik tasarımında "şekillendirme sınır diyagramları" üzerinden hassasiyetle takip edilmektedir.

Ek olarak, sürtünme olgusu tribolojik açıdan kalıp ömrü üzerinde belirleyici bir role sahiptir. Yüksek temas basınçları altında gerçekleşen kayma hareketleri, yüzeylerde mikroskobik aşınmalara ve ısıl yüklerin artmasına sebebiyet verir. Bu durum, kalıp yüzey kalitesinin bozulmasına ve üretim maliyetlerinin artmasına neden olan en önemli etkidir. Günümüzde bu etkileri minimize etmek amacıyla gelişmiş yağlama sistemleri, yüzey kaplama teknolojileri (TiN, DLC vb.) ve yüzey pürüzlülüğü optimizasyonları kullanılmaktadır.

Sonuç olarak, sürtünmenin sac metal şekillendirmedeki önemi sadece direnç kuvvetiyle sınırlı kalmayıp; geri esneme tahmini, boyutsal hassasiyet ve seri üretim sürdürülebilirliği gibi çok boyutlu mühendislik problemlerinin merkezinde yer almaktadır. Modern sonlu elemanlar analizi (FEA) yazılımlarında doğru sürtünme modellerinin kullanılması, sanal ortamdaki

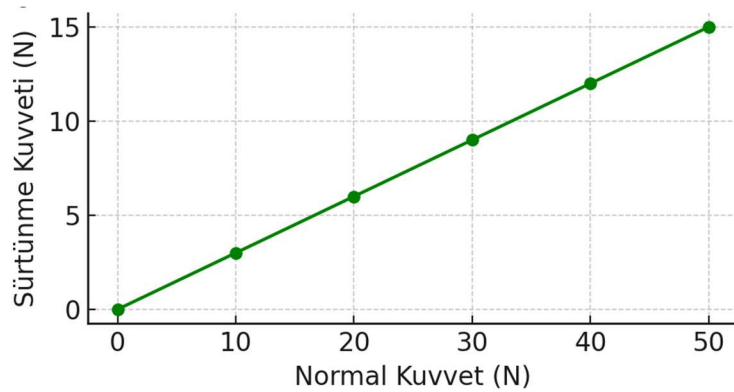
simülasyonların gerçek üretim sonuçlarıyla örtüşmesi adına kritik bir öneme sahiptir (Williams, 2005; Stolarski,2000).



Şekil 2.2. Sac metal şekillendirme sürecinde kalıp-sac etkileşimi (Hosford, 2011; Stolarski, 2000).

2.6. Sürtünmenin Modellenmesi

Mühendislikte sürtünme genellikle Coulomb modeliyle temsil edilmektedir. Bu modele göre normal kuvvet ile sürtünme kuvveti arasındaki ilişki Şekil 2.3'te gösterilmiştir.



Şekil 2.3. Coulomb yasasına göre normal kuvvet ile sürtünme kuvveti arasındaki ilişki (Hibbeler, 2016; Meriam, 2012).

Ancak bu model sabit bir katsayı içerdiği için karmaşık prosesleri açıklamakta yetersiz kalabilir. Bu nedenle, Sac metal şekillendirme süreçlerinde sürtünme, yalnızca sabit bir katsayı (μ) değil; temas basıncı, kayma hızı, yüzey pürüzlülüğü ve sıcaklık gibi değişkenlerin bir fonksiyonudur. Mühendislik analizlerinde ve sonlu elemanlar yöntemi (FEM) simülasyonlarında bu karmaşık yapıyı ifade edebilmek için farklı matematiksel modeller kullanılmaktadır. Literatürde en yaygın kabul gören Coulomb sürtünme modeli, teğetsel sürtünme kuvvetinin normal kuvvete oranının sabit olduğunu varsaysa da sac şekillendirme gibi yüksek basınçlı plastik deformasyon süreçlerinde bu modelin doğruluğu sınırlı kalmaktadır. Özellikle kalıp ve sac arasındaki temas basıncının malzemenin akma gerilmesine yaklaştığı

durumlarda, sürtünme davranışı Tresca sürtünme modeli ile daha tutarlı açıklanmaktadır. Bu modelde sürtünme direnci, malzemenin kayma akma gerilmesiyle ilişkilendirilir.

Modern tribolojik yaklaşımlar ise, yağlama rejimlerinin sürtünme üzerindeki etkisini Stribeck Eğrisi üzerinden analiz eder. Sac metal şekillendirme operasyonlarında genellikle "sınır yağlama" (boundary lubrication) ve "karma yağlama" (mixed lubrication) rejimleri hakimdir.

Bu rejimlerde, yağlayıcı film tabakasının kalınlığı ile yüzey pürüzlülüğü arasındaki oran, metalin metale temas miktarını ve dolayısıyla aşınma hızını doğrudan belirler. Sürtünmenin bir diğer boyutu olan yüzey topografyası, sacın kalıp üzerindeki mikro-mekanik kilitleme davranışını etkiler. Sac yüzeyindeki "mikro-cepler", yağlayıcıyı hapsederek yüksek basınç altında bile yüzeyler arasında bir hidrostabilite sağlar. Bu durum, özellikle otomotiv sektöründe kullanılan yüksek mukavemetli eliklerin (AHSS) şekillendirilmesinde ısıl kararlılığı artırarak kalıp ömrünü uzatır.

Sonuç olarak, sürtünme katsayısının hassas bir şekilde modellenmesi, sadece parça formunun doğruluğunu değil, aynı zamanda üretim hattındaki fire oranlarının minimize edilmesini ve takım maliyetlerinin optimize edilmesini sağlayan en kritik mühendislik müdahalelerinden birisidir (Wriggers, 2006; Gelin, 2002).

3. SONLU ELEMANLAR ANALİZİ

Üretim süreçlerinin başarısı, tasarım ve imalat aşamalarındaki hassasiyet ile doğrudan ilişkilidir. Günümüz modern mühendisliğinde bu hassasiyet, süreçlerin simüle edilmesini ve optimize edilmesini sağlayan Bilgisayar Destekli Mühendislik (CAE) yazılımları sayesinde sağlanmaktadır. Teknolojinin ilerlemesiyle paralel bir gelişim gösteren sac metal analiz programları, endüstriyel üretimi daha süratli, hatasız ve maliyet etkin bir yapıya kavuşturmuştur. Bu bölümde, söz konusu yazılımların tarihsel evrimi, endüstriyel katkıları ve çalışma prensipleri detaylandırılacaktır.

Sac metal şekillendirme teknolojisinin kökleri 20. yüzyılın başlarına dayanmakla birlikte, o dönemde süreçler büyük oranda zanaatkarlığa, fiziksel denemelere ve manuel hesaplamalara bağlıydı. Mühendisler, istenen formu elde etmek için maliyetli ve uzun zaman alan deneme-yanılma yöntemlerini kullanmak zorundaydı. Ancak havacılık ve otomotiv gibi seri üretim yapan sektörlerde, bu geleneksel yöntemlerin yarattığı verimsizlik ve maliyet yükü, yeni arayışları beraberinde getirmiştir.

Dijitalleşme devrimiyle birlikte, özellikle 1960'ların sonlarında mühendislik dünyasında köklü değişimler yaşanmaya başlamıştır. 1970'lerin ortalarına gelindiğinde ise bilgisayar destekli tasarım ve analiz araçları endüstriyel süreçlere entegre olmaya başlamış, sac metal sektörü de bu dönüşümden payını almıştır. Bu dönemde geliştirilen sayısal analiz teknikleri, mühendislerin karmaşık problemleri daha hızlı çözmelerine ve daha tutarlı sonuçlar elde etmelerine olanak tanımıştır (Sürmen, 2019).

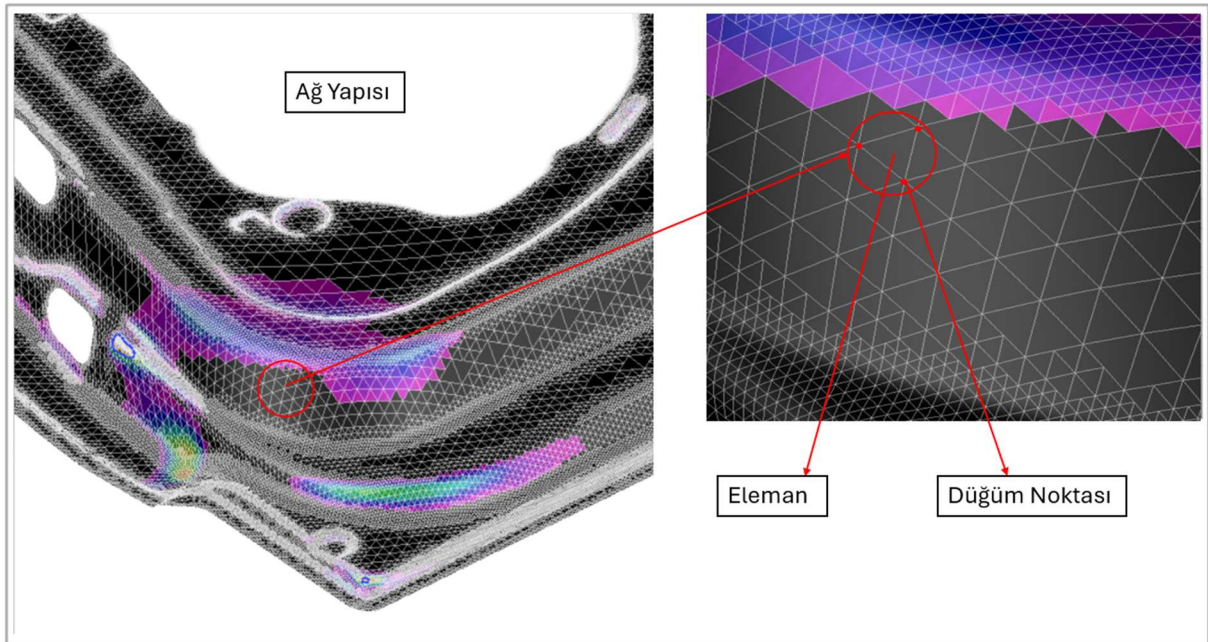
Günümüzde AutoForm, Ls-Dyna ve Pam-Stamp gibi gelişmiş yazılımlar, sac metal şekillendirme süreçlerinin vazgeçilmez bir parçası haline gelmiştir. Bu platformlar sadece basit şekil değişimlerini değil; gerilme birikimlerini, plastik deformasyonları, malzeme akışını ve kalıp-parça etkileşimlerini de detaylı bir şekilde analiz edebilmektedir. Tasarım aşamasında potansiyel hataların (yırılma, potluk, geri yaylanma vb.) tespit edilmesi, fiziksel prototip ihtiyacını minimuma indirmekte ve kalıp devreye alma sürelerini ciddi oranda kısaltmaktadır.

Sanal doğrulama süreçleri, geleneksel yöntemlere kıyasla çok yönlü avantajlar sunar. Hataların henüz tasarım masasında çözülmesi, gereksiz malzeme israfını önleyerek "yalın üretim" hedeflerine katkı sağlar. Ayrıca, farklı malzeme kaliteleri ve kalınlıkları sanal ortamda test edilerek en optimum hammadde kullanımı belirlenebilir. Bu durum hem maliyetleri düşürür hem de atık oranlarını azaltarak çevresel sürdürülebilirliğe hizmet eder. Kalıp aşınmalarının

önceden öngörülmesi ise kalıp ömrünü uzatan ve bakım maliyetlerini düşüren bir diğer kritik faktördür. Şekil 3.1. Sonlu elemanlar yazılımındaki eleman ve düğüm yapısı gösterilmiştir.

Bu yazılımların çalışma prensibi incelendiğinde, temelinde ağ yapısı (mesh) ve sonlu elemanlar yönteminin yattığı görülmektedir. Tüm analiz programları, hesaplama yapabilmek için sürekli bir fiziksel ortamı, sonlu sayıda küçük parçaya bölmek zorundadır. Ayrıklaştırma (discretization) olarak adlandırılan bu işlemde, karmaşık geometriler sayısal olarak çözülebilir hale getirilir.

Ağ yapısı, incelenen parçayı geometrik olarak daha basit alt birimlere (elemanlara) ayırır. Bu elemanlar; analiz türüne ve parça geometrisine göre üçgen (triangle), dörtgen (quadrilateral), dörtyüzlü (tetrahedron) veya altı yüzlü (hexahedron) formunda olabilir. Her bir eleman, matematiksel modelin uygulandığı en küçük yapı taşıdır. Elemanların köşe noktaları ise "düğüm noktası (node)" olarak adlandırılır. Düğümler, elemanları birbirine bağlayan ve yer değiştirme, sıcaklık gibi bilinmeyen değişkenlerin hesaplandığı kilit noktalarıdır. Dolayısıyla, ağ yapısının kalitesi ve sıklığı, analizin doğruluğunu doğrudan belirleyen en önemli parametredir.



Şekil 3.1. Eleman ve düğüm noktaları

Mühendislik simülasyonlarının güvenilirliği, geometrik modellemenin temeli olan ağ yapısının kalitesiyle doğrudan ilişkilidir. Yapısal analizlerden akışkanlar dinamiğine (CFD), ısı transferinden elektromanyetik alan hesaplamalarına kadar geniş bir yelpazede kullanılan otomatik mesh algoritmaları, analizin başarısını belirleyen kritik faktördür. Eleman sayısı ve ağ

yapısı kalitesi hem çözüm süresini hem de elde edilen sonuçların hassasiyetini tayin eder. Özellikle karmaşık geometrilere, sonuçların gerçeğe yakınsaması için ağ yapısının optimize edilmesi zorunludur. Bu bağlamda gelişmiş otomatik ağ yapısı oluşturma yazılımları, tasarım ve analiz süreçlerinde verimliliği artırarak mühendislik hatalarını minimize eder.

Geometrik modellemenin ardından, bir sonlu elemanlar analizi (SEA) projesinin başlatılabilmesi için ikinci ve en hayati adım, doğru bir malzeme dosyasının (malzeme kartının) oluşturulmasıdır. Simülasyonu yapılacak parçanın "dijital ikizi" olarak nitelendirilebilecek bu dosyalar, malzemenin fiziksel ve mekanik davranışlarını tanımlayan parametreleri barındırır. Analizin doğruluğu, sisteme girilen bu verilerin kalitesine sıkı sıkıya bağlıdır.

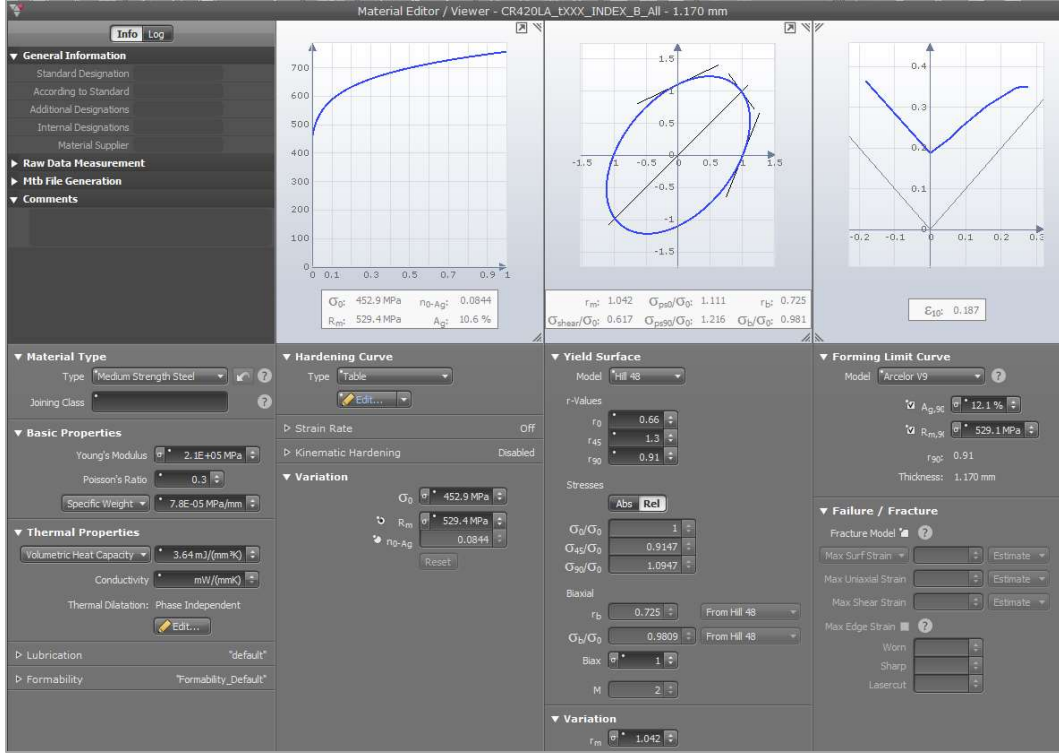
Farklı SEA yazılımları, malzeme tanımlamaları için kendilerine özgü kart formatları kullansa da temel parametreler evrenseldir. Malzeme kartları seçilen plastisite modeline göre kullanıcıdan girdi olarak ilgili malzemeye ait mekanik özellikleri istemektedir. Anizotropik malzeme ve izotropik pekleşme kabulü yapan standart bir malzeme kartı kullanıcıdan şu mekanik özellikleri istemektedir:

- Elastik Modül (Young Modülü)
- Poisson Oranı
- Akma ve Çekme Dayanımları
- Akma Eğrileri (Flow Curves)
- Anizotropi Katsayıları (r-değerleri)

Bu kartlar, esasen arka planda çalışan karmaşık matematiksel plastisite modellerinin kullanıcı arayüzüne yansımış halidir. Kartın içeriği, seçilen plastisite modelinin (örneğin; izotropik veya kinematik pekleşme) gereksinimlerine göre şekillenir. Kullanıcıdan beklenen bu mekanik özellikler, genellikle tek eksenli çekme testlerinden elde edilen deneysel verilerle beslenir.

Sac metal şekillendirme simülasyonlarında malzemenin plastik deformasyon davranışını modellemek için en sık başvurulan yöntemlerden biri Hill48 kriteridir. Rodney Hill tarafından 1948 yılında geliştirilen bu teori, malzemelerin anizotropik (yöne bağlı değişen) özelliklerini hesaba katarak, gerilme altındaki akma başlangıcını tahmin etmede oldukça başarılıdır (Hill, 1948; Benjamin, 2017).

Özellikle hadde yönüne göre farklı mukavemet özellikleri gösteren sac metaller için Hill48 kriteri endüstri standardı haline gelmiştir. Örnek olarak, CR420LA kalite bir sac malzeme için AutoForm ticari yazılımında oluşturulmuş ve Hill48 plastisite modelini temel alan malzeme kartı görseli Şekil 3.2’de sunulmuştur.



Şekil 3.2. Autoform’da Hill48 plastisite modeline sahip örnek malzeme kartı

Hill48 modelini geleneksel yaklaşımlardan ayıran en belirgin nitelik, plastik deformasyon mekanizmasını yalnızca gerilme şiddetine değil, aynı zamanda gerilmenin etki ettiği doğrultuya (yönelime) da dayandırmasıdır. Bu modelin geliştirilmesindeki temel motivasyon, metalik malzemelerin yöne bağlı değişen (anizotropik) akma davranışlarını gerçeğe en yakın şekilde simüle edebilmektir.

Modelin odak noktası, malzemenin elastik sınırdan çıkıp kalıcı şekil değiştirmeye (plastik deformasyona) başladığı kritik eşiği, yani akma yüzeyini (yield locus) tayin etmektir. Özellikle derin çekme gibi yüksek deformasyon oranlarına sahip işlemlerde, malzeme davranışının ve inceme oranlarının doğru öngörülmesi hayati önem taşır.

R. Hill' in karesel (quadratic) normal anizotropi kriteri temel alınarak, düzlemsel gerilme koşulları altında eşdeğer gerilme ($\sigma_{eq}=0$) bağıntısı matematiksel olarak şu şekilde formüle edilmiştir:

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \frac{2r}{1+r}\sigma_1\sigma_2} \quad (D.3)$$

Benzer şekilde eşdeğer gerinim oranı (σ_{eq}), D.3 denkleminde hesaplanabilir.

$$d\varepsilon_{eq} = \frac{1+r}{\sqrt{1+2r}} \sqrt{d\varepsilon_1^2 + d\varepsilon_2^2 + \frac{2r}{1+r}d\varepsilon_1d\varepsilon_2} \quad (D.4)$$

(σ_1), D.3 denkleminde hesaplanabilir.

$$\sigma_{eq} = \sigma_1 \sqrt{1 + \alpha^2 - \frac{2r}{1+r}\alpha} \quad (D.5)$$

Buna uygun olarak, ($d\varepsilon_1$), D.4 denkleminde hesaplanabilir.

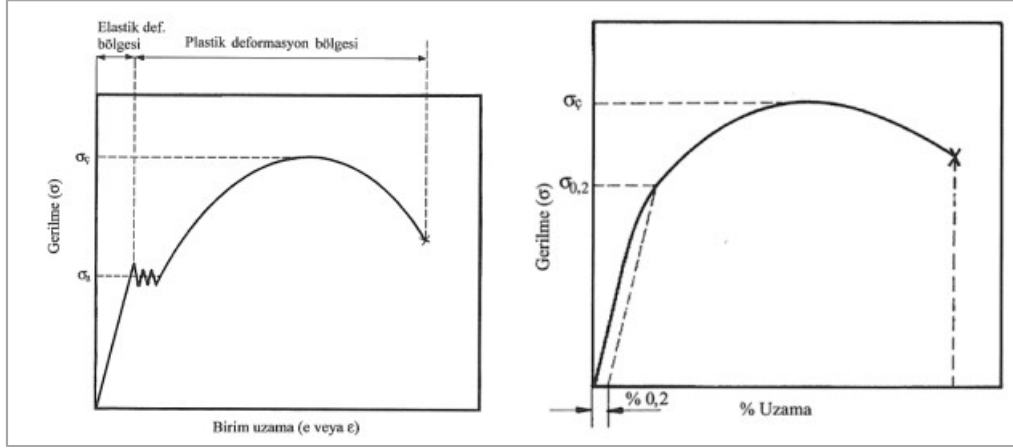
$$d\varepsilon_{eq} = d\varepsilon_1 \frac{1+r}{\sqrt{1+2r}} \sqrt{1 + \beta^2 + \frac{2r}{1+r}\beta} \quad (D.6)$$

Sonlu elemanlar analizlerinin (SEA) güvenilirliği, sisteme tanımlanan malzeme verilerinin doğruluğu ile doğrudan ilişkilidir. Bu kapsamda, simülasyon yazılımlarında kullanılan malzeme kartlarının temelini oluşturan mekanik parametreler, büyük oranda standartlaştırılmış tek eksenli çekme testleri (uniaxial tensile tests) ile elde edilir.

Bu test yöntemi, adından da anlaşılacağı üzere malzemenin tek bir doğrultudaki deformasyon davranışını inceler. Test süresince cihazdan alınan ham veriler, numuneye uygulanan Kuvvet (F) ve bu kuvvet altında numunede meydana gelen boyca Uzama (Δl) miktarıdır. Ancak mühendislik uygulamalarında, numune geometrisinden bağımsız evrensel bir malzeme davranışı tanımlayabilmek adına, bu "Kuvvet-Uzama" verileri yerine "Gerilme-Birim Şekil Değiştirme (Stress-Strain)" eğrileri tercih edilir.

Mühendislik gerilmesi (σ_{eq}) numuneye etki eden anlık kuvvetin, numunenin test öncesindeki başlangıç kesit alanına ($\sigma=F/A_0$) bölünmesiyle hesaplanır:

Bu dönüşüm işlemi sonucunda, malzemenin elastik sınırdan kopma noktasına kadar gösterdiği direnci ifade eden Gerilme-Gerinim diyagramı elde edilir. Şekil 3.3'te, karakteristik bir metal malzemeye ait gerilme ve yüzde uzama ilişkilerini gösteren grafikler sunulmuştur.

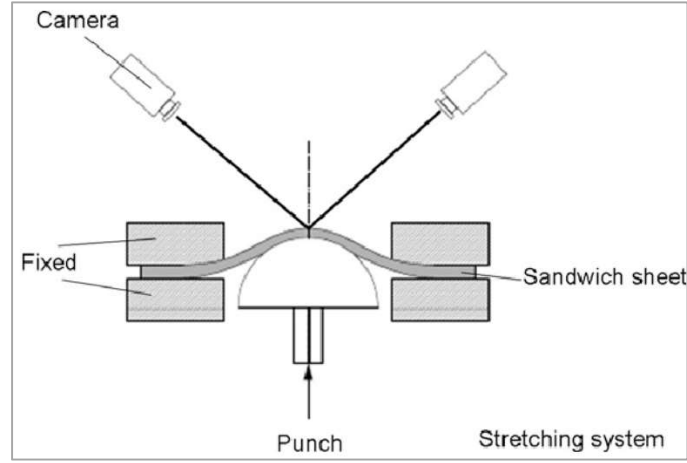


Şekil 3.3. Örnek gerilme birim uzama ve % uzama grafikleri (Callister ve Rethwisch, 2020).

Tek eksenli çekme testleri, bir malzemenin mekanik kimliğini oluşturan temel parametrelerin (Elastisite modülü, akma sınırı, maksimum çekme dayanımı, % uzama, kesit daralması ve tokluk) belirlenmesinde standart referans noktasıdır. Bu mekanik değerler, malzemenin kimyasal kompozisyonu, ısıl işlem geçmişi ve metalografik iç yapısı ile doğrudan ilişkilidir Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2020).

Ancak endüstriyel sac metal şekillendirme operasyonları, doğası gereği karmaşık ve çok eksenli gerilme durumlarını (multi-axial stress states) içerir. Malzeme, kalıp içerisinde aynı anda farklı yönlerden gelen kuvvetlere maruz kalır. Bu nedenle, sadece tek eksenli yükleme koşullarına dayanan standart çekme testi verileri, malzemenin gerçek şekillendirme kabiliyetini (formability) ve sınırlarını tam olarak temsil etmekte yetersiz kalır.

Bu boşluğu doldurmak ve malzemenin güvenli şekillendirme sınırlarını belirleyebilmek için Nakajima Testi en yaygın kullanılan yöntemdir. Bu testin temel prensibi; farklı genişliklerdeki sac numunelerin, yarı küresel (hemispherical) bir zımba vasıtasıyla yırtılma (failure) gerçekleşene kadar deforme edilmesine dayanır. Elde edilen verilerle Şekillendirme Sınır Diyagramları (FLD) oluşturulur. Şekil 3.4'te, Nakajima test düzeneğinin şematik yapısı gösterilmiştir.



Şekil 3.4. Nakajima test düzeneği görseli (Sokolova, 2011)

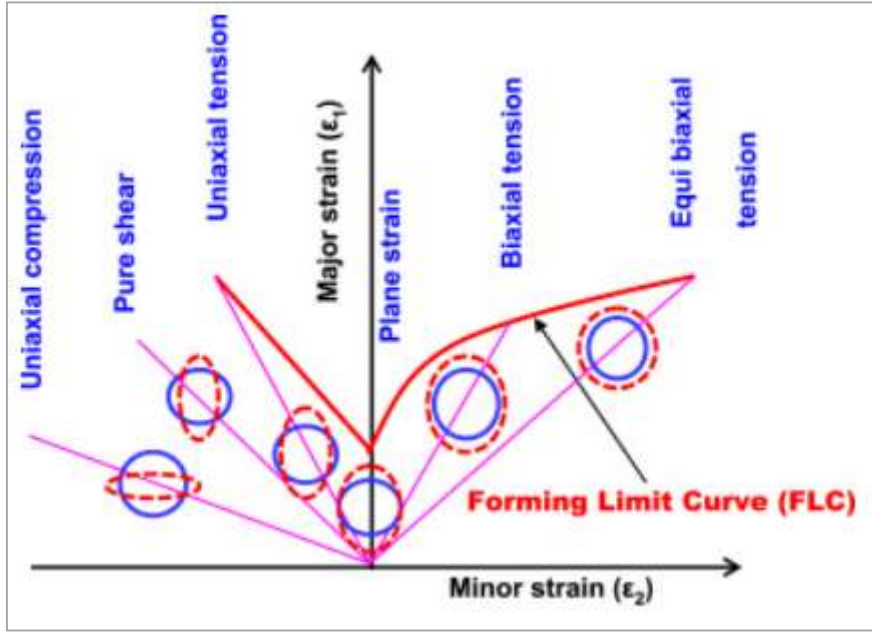
Nakajima testi boyunca, malzeme yüzeyinde meydana gelen plastik akış ve deformasyon davranışları hassas bir şekilde incelenir. Bu test serisinin nihai amacı, malzemenin "boyun verme" (necking) veya "yırılma" öncesinde ulaşabileceği maksimum şekil değiştirme kapasitesini sayısal olarak ortaya koymaktır.

Elde edilen deneysel veriler, literatürde Şekillendirme Sınır Eğrisi (FLC- Forming Limit Curve) olarak adlandırılan kritik diyagramın oluşturulmasını sağlar. FLC, bir sac malzemenin güvenli şekillendirme bölgesini, hasar (yırılma) bölgesinden ayıran sınır hattıdır.

Bu eğriyi oluşturmak için, farklı geometrilere sahip numuneler test edilerek tek eksenli çekmeden, düzlem şekil değiştirmeye (plane strain) ve çift eksenli germeye (biaxial stretch) kadar uzanan farklı deformasyon yolları taranır. Grafikselleştirilmiştir;

- **Dikey Eksen:** Büyük gerinim (Major Strain),
- **Yatay Eksen:** Küçük gerinim (Minor Strain) temsil eder.

FLC grafiği, üretim mühendisleri için hayati bir referans noktasıdır. Tasarım aşamasında simülasyon sonuçları bu eğri ile karşılaştırılır; eğrinin altında kalan noktalar "güvenli", eğrinin üzerine çıkan noktalar ise "yırılma riski" taşıyan bölgeler olarak değerlendirilir. Şekil 3.5'te tipik bir Şekillendirme Sınır Diyagramı (FLD) ve FLC eğrisi görülmektedir.



Şekil 3.5. Şekillendirme sınır eğrisi (Surajit, 2021)

Şekillendirme sınır eğrilerinin (FLC) teorik olarak doğru kabul edilebilmesi için, test süresince numunenin maruz kaldığı deformasyon yolunun (strain path) doğrusallığını koruması kritik bir ön koşuldur. Bu durum, büyük (ϵ_1) ve küçük (ϵ_2) asal şekil değiştirmeler arasındaki oranın işlem boyunca sabit kalması ilkesine dayanır ve matematiksel olarak şu şekilde ifade edilir:

$$\epsilon_1 = \text{const.} \cdot \epsilon_2 \quad (\text{D.7})$$

Şekillendirme sınır diyagramının (FLD) oluşturulmasında temel kabul; büyük asal şekil değiştirmenin (ϵ_1) her zaman pozitif olması ($\epsilon_1 > 0$) ve mutlak değerce küçük asal şekil değiştirmeden (ϵ_2) daha büyük olmasıdır ($\epsilon_1 > \epsilon_2$) bu matematiksel kısıtlar, diyagramın geometrik sınırlarını belirler.

Ancak pratik uygulamalarda, "mükemmel" bir sınır eğrisi elde etmek neredeyse imkansızdır. Özellikle Nakajima testlerinde, zımba ile sac numune arasındaki sürtünme faktörü, deformasyon yolunda sapmalara neden olarak ideal koşullardan uzaklaşılmasına yol açar. Bu testlerde kritik ölçümler, numunenin en fazla deforme olduğu, kıvrılan ve boyun vermenin başladığı tepe noktalarından alınarak analiz edilir (Gökçalp, 2006; Fatih, 2024).

4. UYGULAMA ÇALIŞMASI

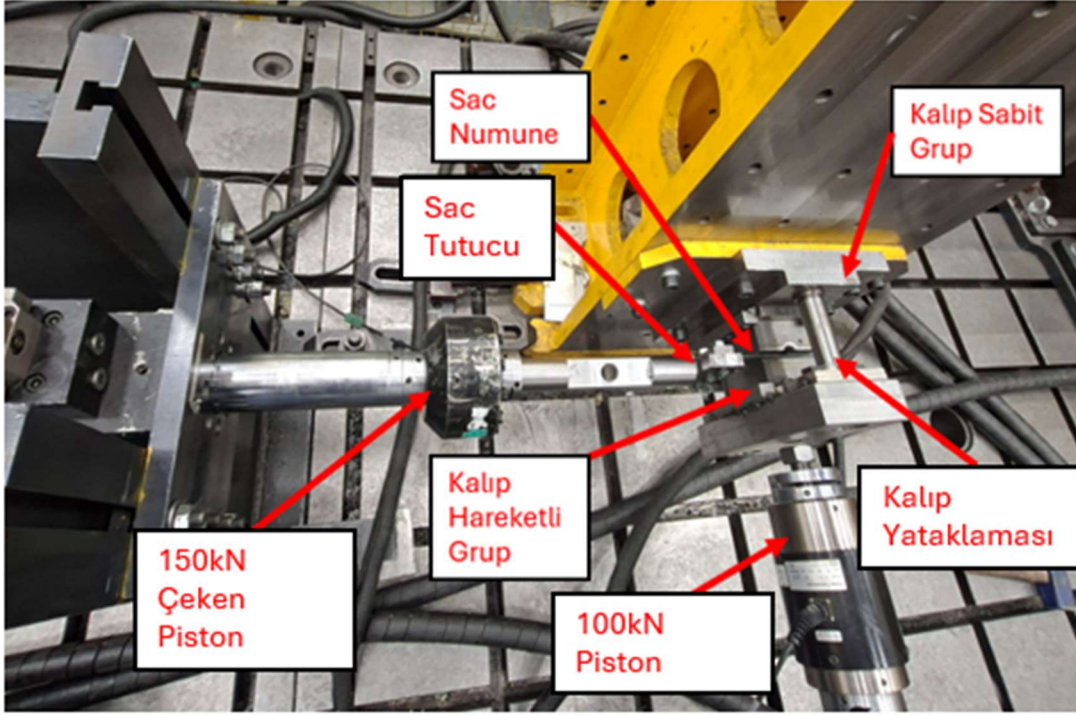
Bu tez çalışmasında, sac şekillendirme süreçlerindeki sürtünme etkisinin, farklı basınçlarda ve farklı geometriler ile olan ilişkisini daha iyi anlamayı amaçlamaktadır. Bu sayede, üretim süreçlerinde karşılaşılan olası deformasyon ve kalite sorunlarına karşı çözüm önerileri geliştirilmesi beklenmektedir.

Bu amaçlar doğrultusunda sac kalıpcılığı prosesinde sürtünme parametresini inceleyerek, sac şekillendirme işlemlerinin verimliliğini artırmaya yönelik SEA programında ve deneysel çalışmalar yapılmıştır. Çalışma, sac kalınlığı 0.73 mm olan CR4 kalitesine sahip düşük karbonlu bir çelik malzemenin, Hill48 malzeme modeli ile modellenerek Autoform yazılımı ile 3 ve 5 MPa basınçlar altında farklı geometrilere sahip plakalar arasında sürtünme davranışının incelenmesinin sonlu elemanlar analizleri ile gerçekleştirilmesi üzerine odaklanmaktadır. Ayrıca, deneysel çalışmalar için sürtünme test düzeneği kullanılarak sürtünme etkilerinin ölçülmesi, simülasyon sonuçlarıyla karşılaştırılması hedeflenmiştir.

4.1 Deneysel Çalışmalar

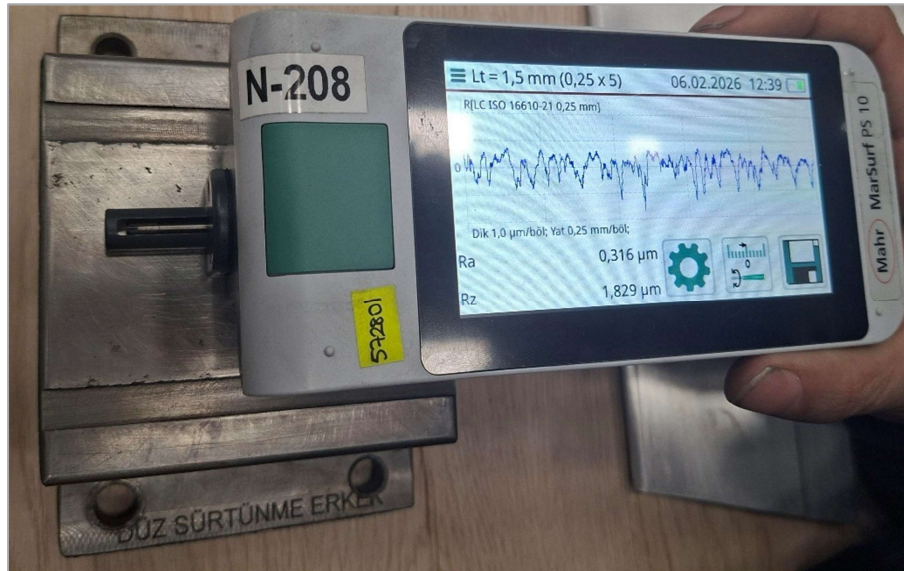
Tezin bu bölümünde, sac şekillendirme süreçlerinde sürtünme katsayısını incelemek amacıyla yapılan deneysel çalışmaların yöntemleri ve sonuçları sunulmaktadır. Deneysel çalışmalar, sac malzemenin şekillendirilmesi sırasında sürtünme katsayısının nasıl değiştiğini ve bu değişimin farklı basınç ve geometrilerde sürtünme katsayısının nasıl etkilendiğini belirlemek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Tüm deneyler, bir hidrolik test cihazı olan MTS marka cihaz ile iki adet piston kullanılarak yapılmıştır. Şekil 4.1’de hidrolik test cihazında kurulan test düzeneği gösterilmektedir.

Test düzeneğinde sürtünme deneylerinin yapılabilmesi için bir tarafı sabit bir tarafı hareketli olmak üzere iki gruptan oluşan aparat tasarlanarak imal edilmiştir. Sabit olan grup MTS cihazının sabit bloklarını bağlanmıştır. Baskı oluşturması istenilen diğer hareketli grup ise pistonla bağlanmıştır. İkisi arasındaki ve boşlukların önemli olduğu bu çalışmada hassasiyeti artırmak için özel kolon burç kılavuz takımlar kullanılmıştır.



Şekil 4.1. Sürtünme test düzeneği

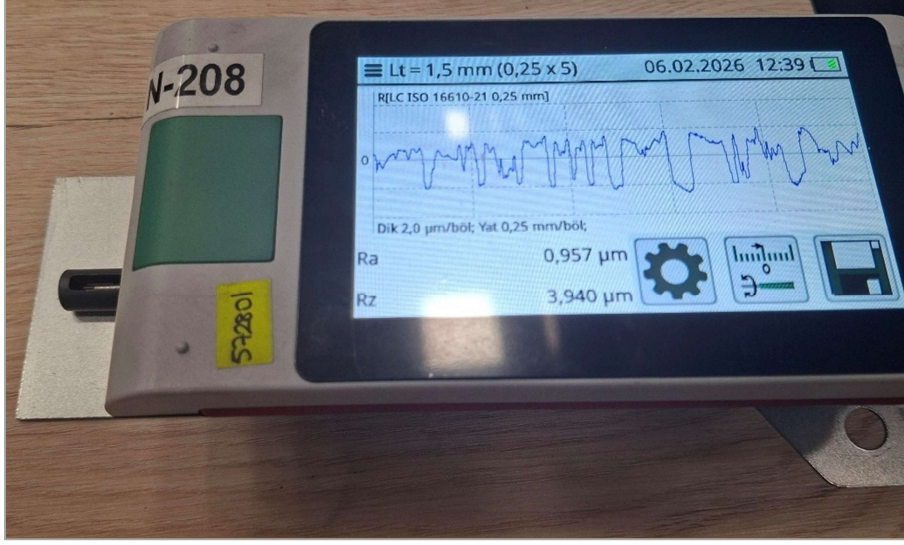
Ayrıca diğer önemli bir husus olan malzeme kalitesi genelde kalıplarda kullanılan ve standart olan GGG70L döküm malzemeden üretilmiş çeliklerimizdir. Bu çeliklerinde üretimi sonrasında takım izleri alınarak elde edilen yüzey kalitesi Şekil 4.2’de gösterildiği gibi 0.316 Ra olarak ölçülmüştür.



Şekil 4.2. Deneplerde kullanılan kalıp elemanlarının yüzey pürüzlülüğü

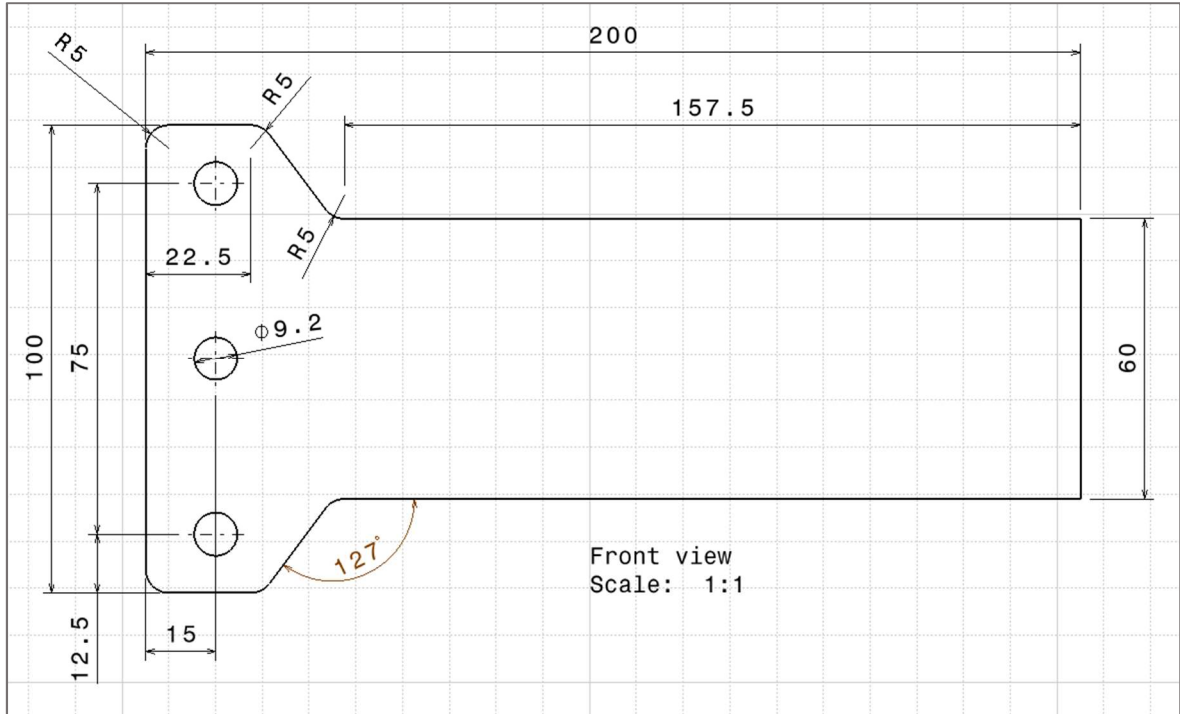
Deneplerde kullanılan ve sürtünme katsayısına etkisi olduğu düşünülen CR4 standartlarında malzeme olan sacın yüzey pürüzlülüğü Şekil 4.3’te gösterildiği 0.95Ra olarak

ölçülmüştür. Aslında tüm çalışma aynı lot malzemeden kesilen numuneler ile yapılmıştır. Fakat yüzey pürüzlülüğünü belirlemek adına ölçüm yapılmıştır.



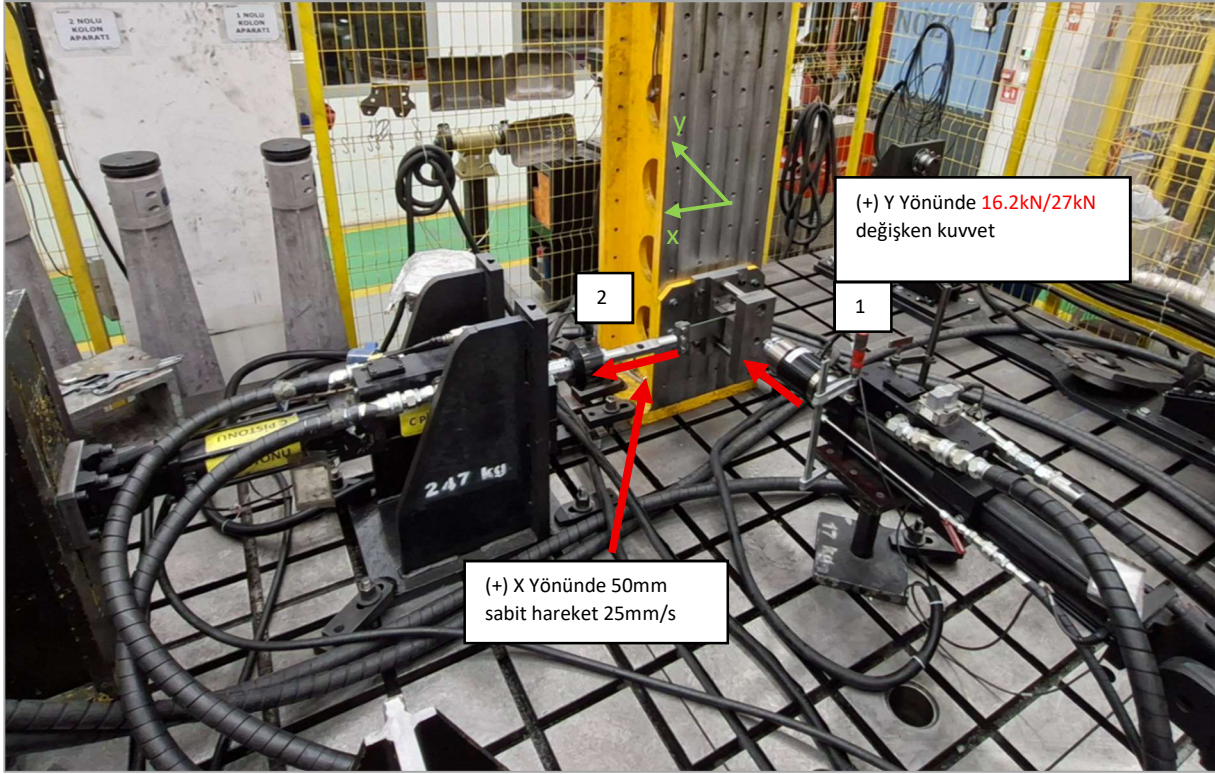
Şekil 4.3. Sac numune yüzey pürüzlülüğü

Deneylerde kullanılan CR4 malzeme Şekil 4.4'te gösterildiği gibi 0.73 mm x 60 mm x 200 mm olarak kullanılmıştır. Çektirme çeliklerinin sacı kaçırma riskinden kaynaklı Ø10 mm 3 adet delik delinmiştir.



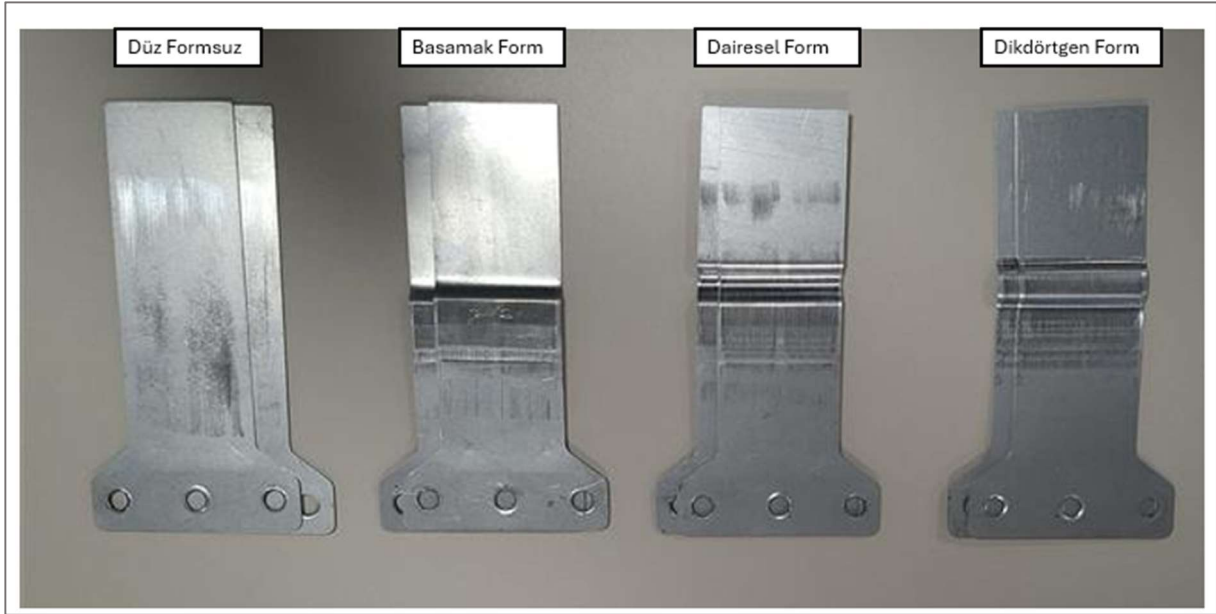
Şekil 4.4. Deneylerde kullanılan numune ebatları

Deneyler sabit sac ebatları (0.73 mm x 60 mm x 200 mm), sabit blok (100x100), sabit hareketli baskı (100x100 mm), sabit çekirme hızı (25 mm/s), hareketli çekme kursu (10 mm), ve değişken üst tampon kuvvetiyle (16.2 kN / 27 kN) gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.5'te deney düzeneği, değişkenleri ve deneyle ilgili bilgiler yer almaktadır.



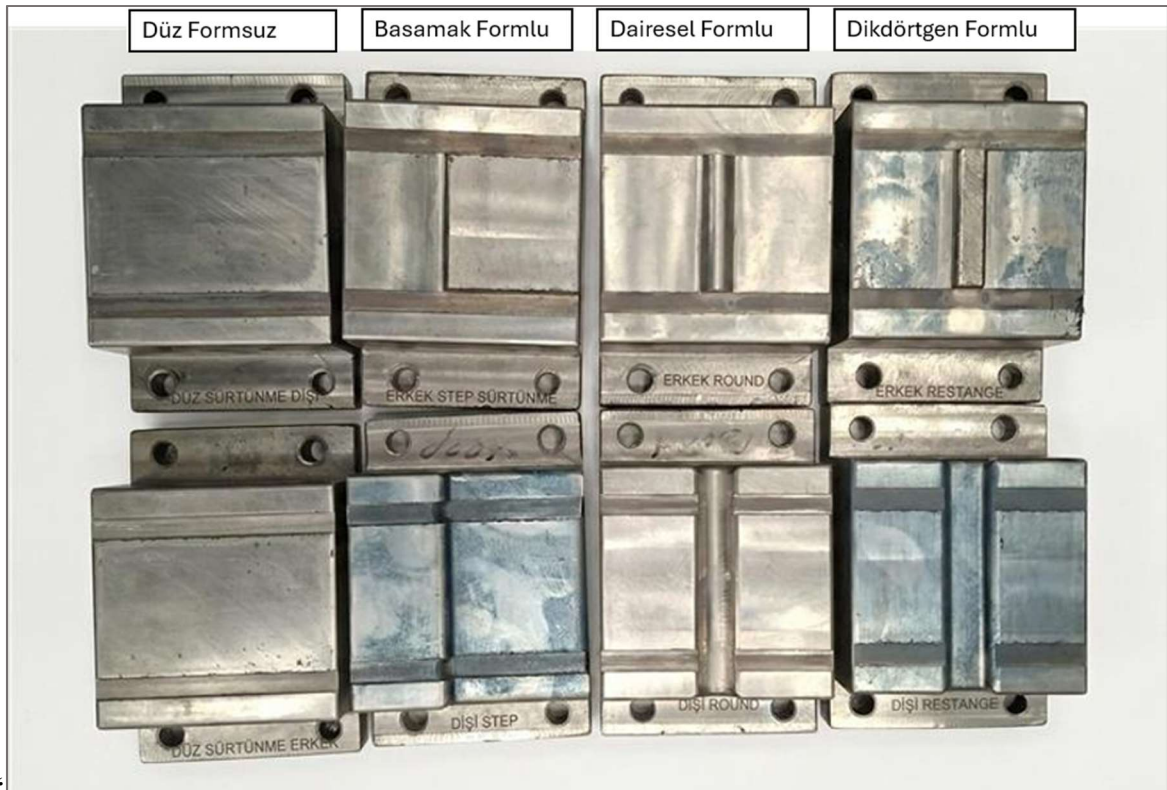
Şekil 4.5. Deney düzeneği ve değişkenleri

Deneyin çalışma prensibi; ilk olarak 1 no'lu piston sac parçaya değişken kuvvetler uyguluyor. Sonrasında 2 no'lu piston 25 mm/s hızla hareket etmeye başlıyor. Şekil 4.5'ten de görüleceği üzere 1 no'lu piston sabit kuvveti uyguluyor sonra kuvvet uygulanırken 2 no'lu piston ise 10 mm hareket ederek deney gerçekleşiyor. Her bir üst tampon kuvveti (16.2 kN / 27 kN) için testler 3 tekrarlı olarak gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen testler sonucunda elde edilmiş numuneler Şekil 4.6'da gösterilmiştir. 3 tekrar olarak yapılan deneylerin sonuçları birbirine yakın olduğu için 1 denemeyle devam edilmiştir.

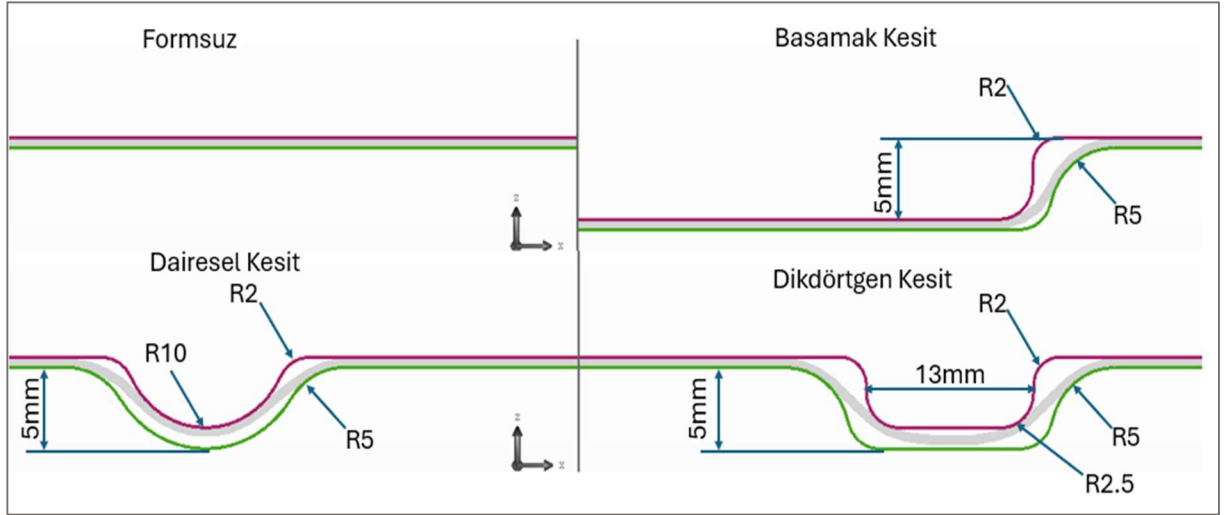


Şekil 4.6. Test sonrasında çıkan numuneler

Çıkan sonuçlar üç tekrarlı testin sonuçları ile tutarlı olduğu için sonraki denemelerde geometriye bağlı olan sürtünme katsayısının incelenebilmesi için Şekil 4.7’de gösterildiği gibi farklı geometrilerde test elemanları hazırlanmıştır, bu elemanlara ait kesit geometrisi ise Şekil 4.8.’de gösterilmiştir.

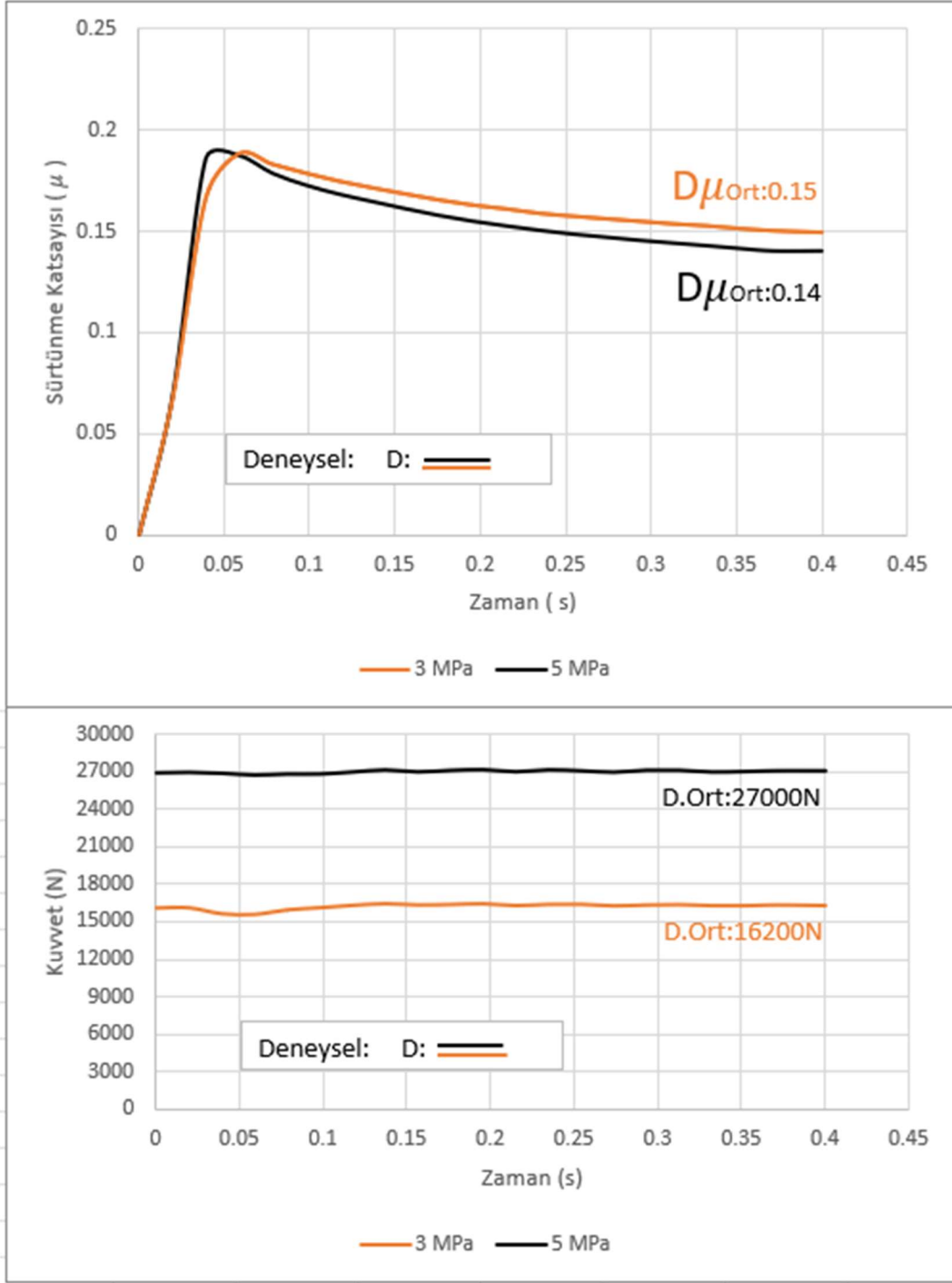


Şekil 4.7. Farklı geometrilerde hazırlanmış test elemanları



Şekil 4.8. Test elemanlarının kesit görünümü

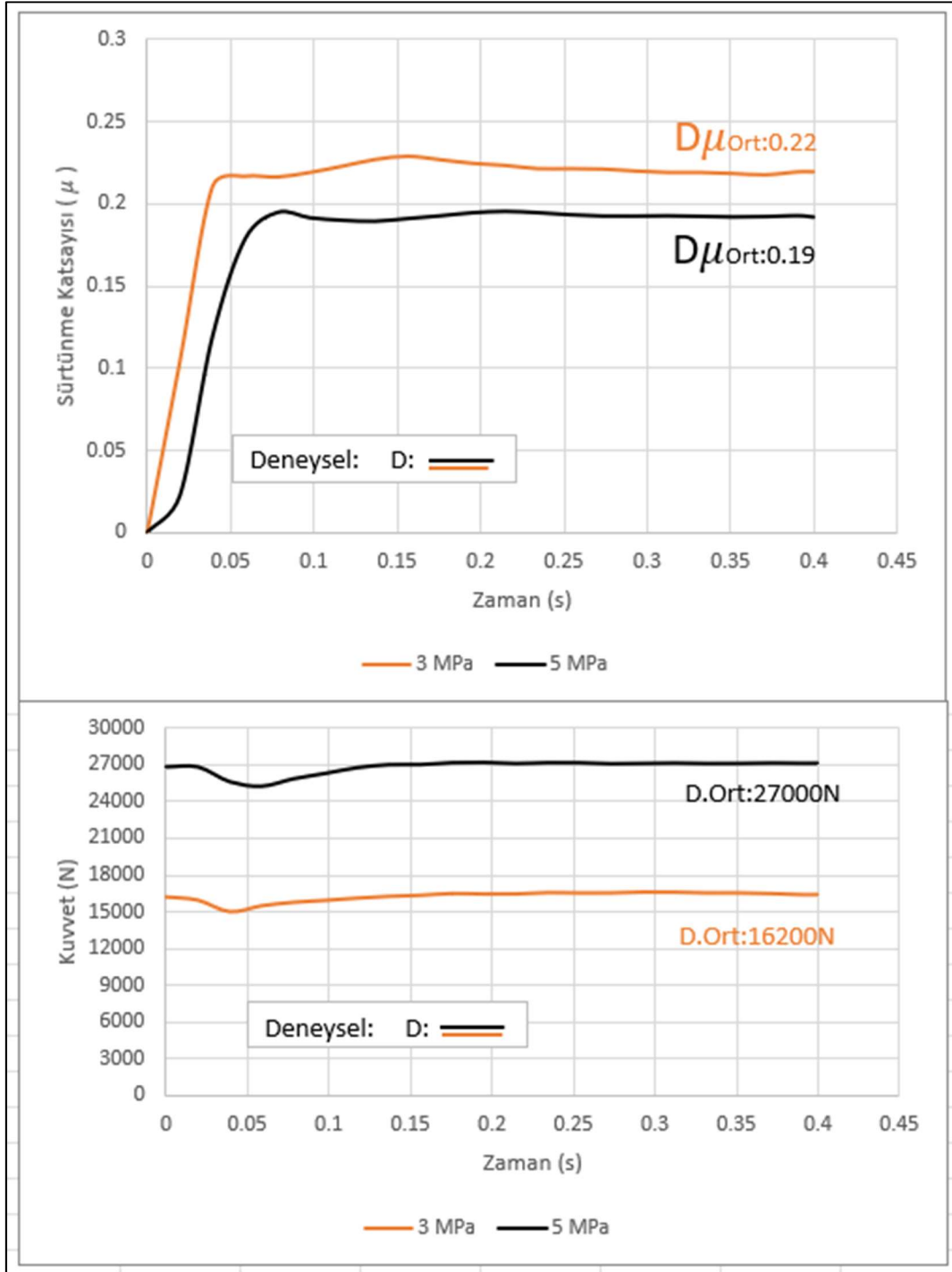
İlk yapılan deneme olan formsuz düz çelik arasından çekilen sacın sürtünme katsayısı değerleri elde edilmiştir. Şekil 4.9'daki gibi oluşan sürtünme katsayısı değerleri grafik ile gösterilmiştir. Aynı grafiğin altında uygulanan kuvvetin değişkenliğini de görmek adına ayrıca kuvvet zaman grafiği ile gösterilmiştir. Sonraki hem deneysel hem numerik çalışmalarda aynı mantık ile gösterim sağlanmıştır.



Şekil 4.9. Formsuz, farklı basınçlardaki sürtünme katsayısı ve kuvvet grafiği

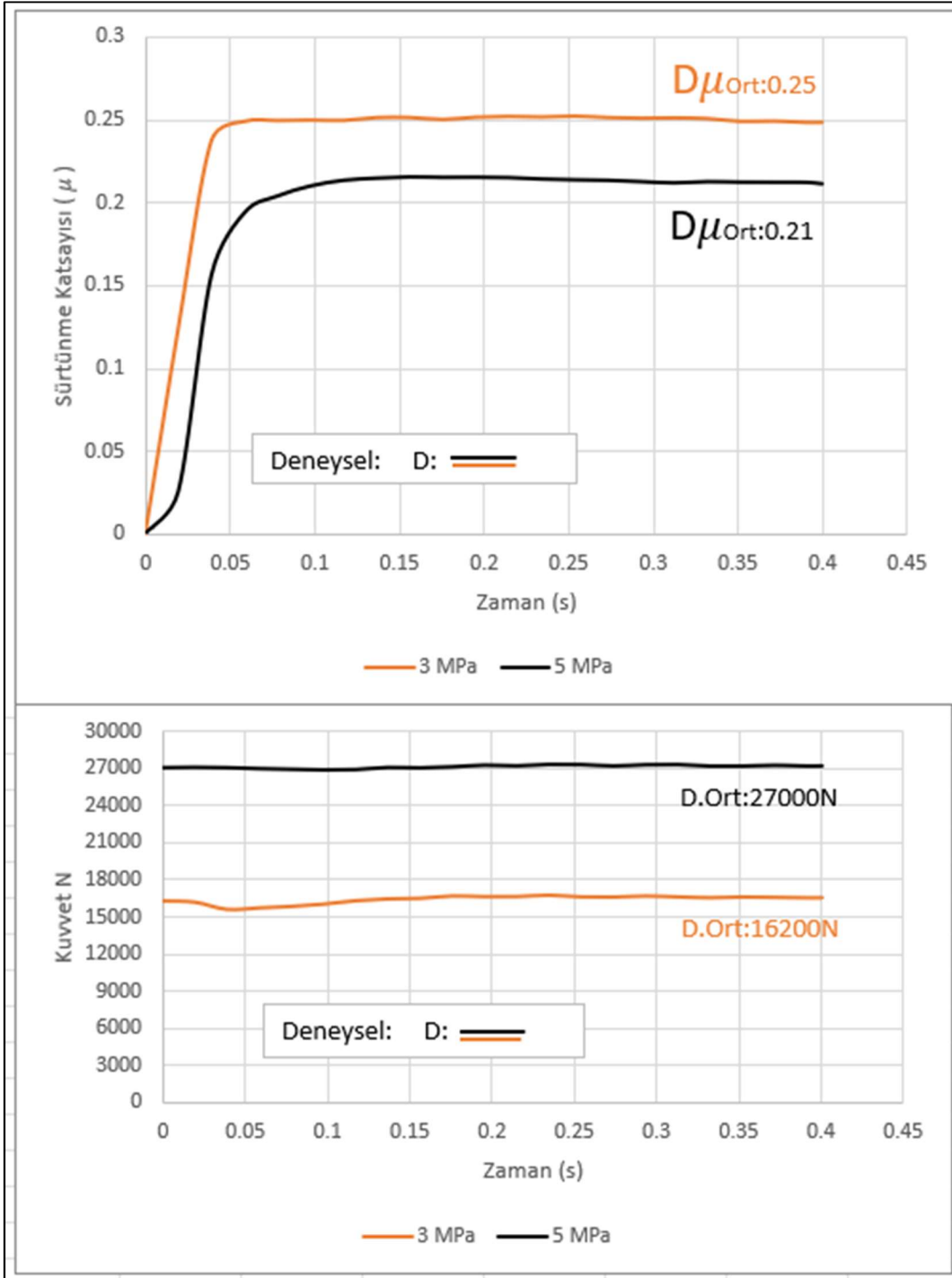
Çıkan sonuçlar iki tekrarlı testin sonuçları ile tutarlı olduğu için sonraki geometriye bağlı olan sürtünme katsayısının incelenebilmesi için düz formsuz olan kalıp elemanları sökülerek Şekil 4.7’de gösterilen kalıp elemanları sırasıyla bağlanmıştır.

Formlu olarak yapılan deneylerin ilki basamak formlu olarak tanımlanan çelikler ile yapılmıştır. Basamak geometri ile yine değişken basınçlardaki sürtünme katsayısını testleri gerçekleştirilmiş olup elde edilen sonuçlar Şekil 4.10’da grafik olarak gösterilmiştir.



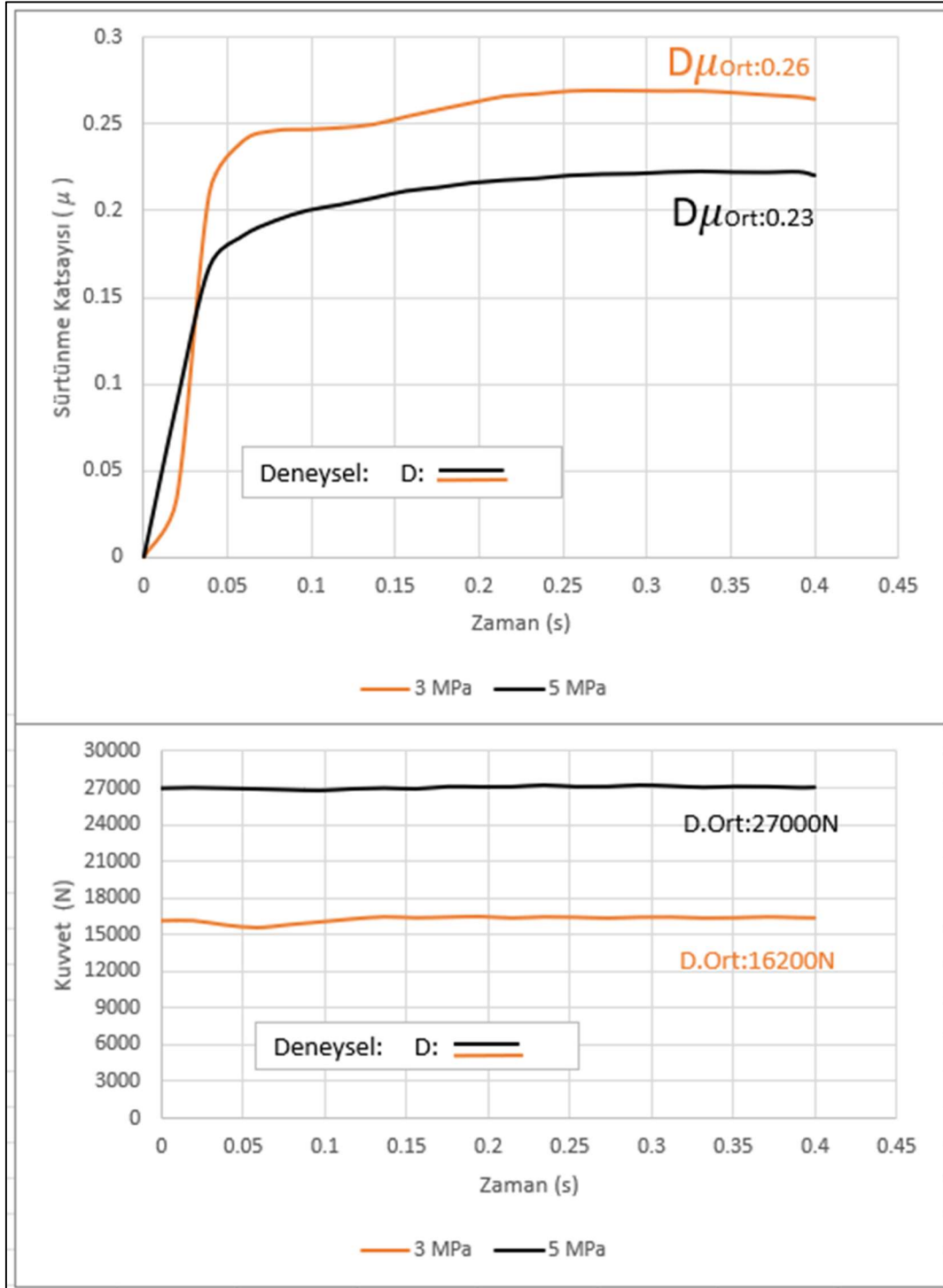
Şekil 4.10. Basamak formulu farklı basınçlardaki sürtünme katsayısı ve kuvvet grafiği

Bir sonraki aşamada dairesel geometri kullanılarak değişken basınçlardaki testleri gerçekleştirilmiş olup elde edilen sonuçlar Şekil 4.11’de karşılaştırılmıştır.



Şekil 4.11. Dairesel formlu farklı basınçlardaki sürtünme katsayısı ve kuvvet grafiği

Sonraki deneme olan dikdörtgen geometri ile değişken basınçlardaki testleri gerçekleştirilmiş olup elde edilen sonuçlar Şekil 4.12’de karşılaştırılmıştır.

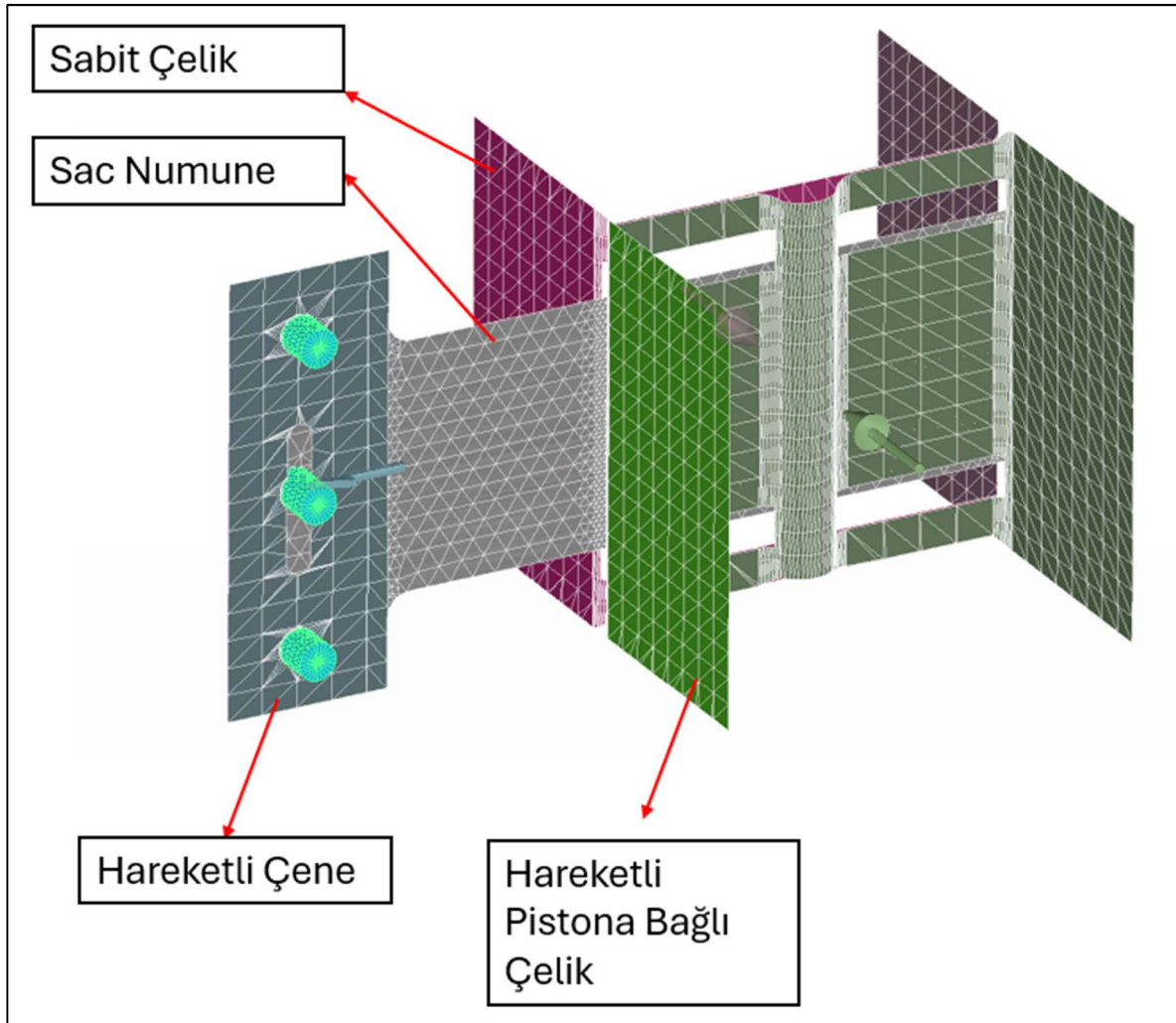


Şekil 4.12. Dikdörtgen formlu farklı basınçlardaki sürtünme katsayısı ve kuvvet grafiği

Bu deneysel çalışmada hidrolik test düzeneğiyle değişken basınç altında saca sabit bir kuvvet verilerek bir yönde çekme işi gerçekleştirilmiştir. Bu işlemin neticesinde sacın altında ve üstünde oluşan sürtünme katsayısı incelenmiş, sürtünme-zaman, kuvvet zaman grafikleri elde edilmiştir.

4.2 Sonlu Elemanlar Analizleri

Tez çalışmasının bu aşamasında, Bölüm 4.1’de anlatılan deneyler numerik olarak modellenmiştir. Bu kapsamda sonlu elemanlar yöntemi Autoform ticari yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sistem geometrisi Catia CAD yazılımı ile sac malzeme hariç kalıp geometrisinin rijit cisim olarak kabul edilmesinden dolayı yüzey olarak modellenmiştir. Elde edilen yüzeyler Autoform yazılımına aktarılarak ilk olarak ağ yapısı elde edilmiştir. Elde edilen ağ yapısı Şekil 4.13’te ve sonlu elemanlar analizlerine ait hesaplama parametreleri Tablo 4.1’de verilmiştir.

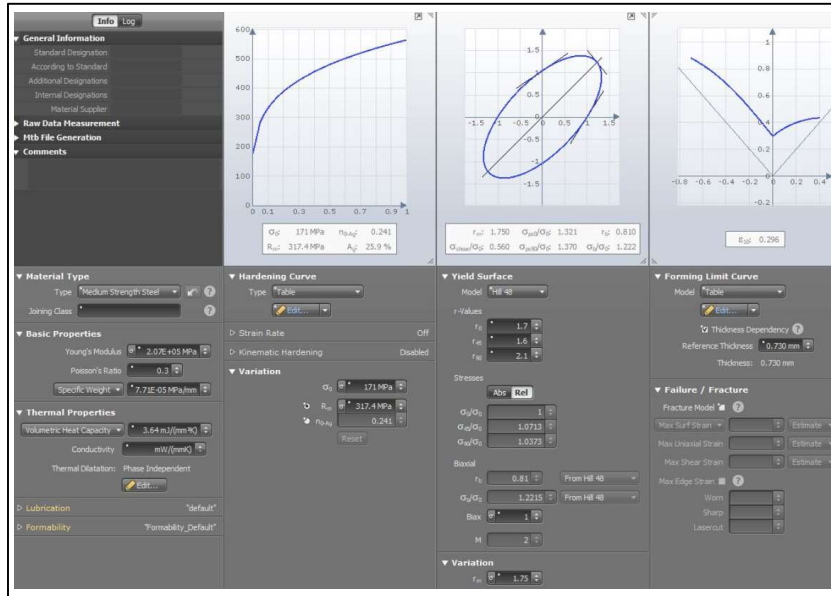


Şekil 4.13. Autoform’da kullanılan çeliklerin ağ yapıları

Tablo 4.1. Sonlu elemanlar yazılımında kullanılan eleman ve ağ yapısı parametreleri

	Parametre	Değer
Kalıp	Eleman Toleransı	0.04
	Eleman Maksimum Yan Uzunluk	10 mm
Sac	Sac Maksimum Eleman Açısı	22,5°
	Minimum Eleman Boyutu	0.31
	Ana Eleman Boyutu	40 mm
	Başlangıç Maksimum Eleman Boyutu	20 mm

Sonraki adım olarak CR4 malzemesinin tanımlaması gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda Hill48 plastisite modeli kullanılmıştır. Malzemeye ait Autoform ticari yazılımı kütüphanesinden alınan malzeme kartı Şekil 4.14'te verilmiştir.



Şekil 4.14. Autoform'da CR4 malzemesine ait malzeme kartı görseli

SEA yazılımında Autoform malzeme kartına ait mekanik özellikler, sac kalınlığı ve plastite modeli Tablo 4.2'de gösterilmiştir.

Tablo 4.2. CR4 malzemesine ait mekanik özellikler

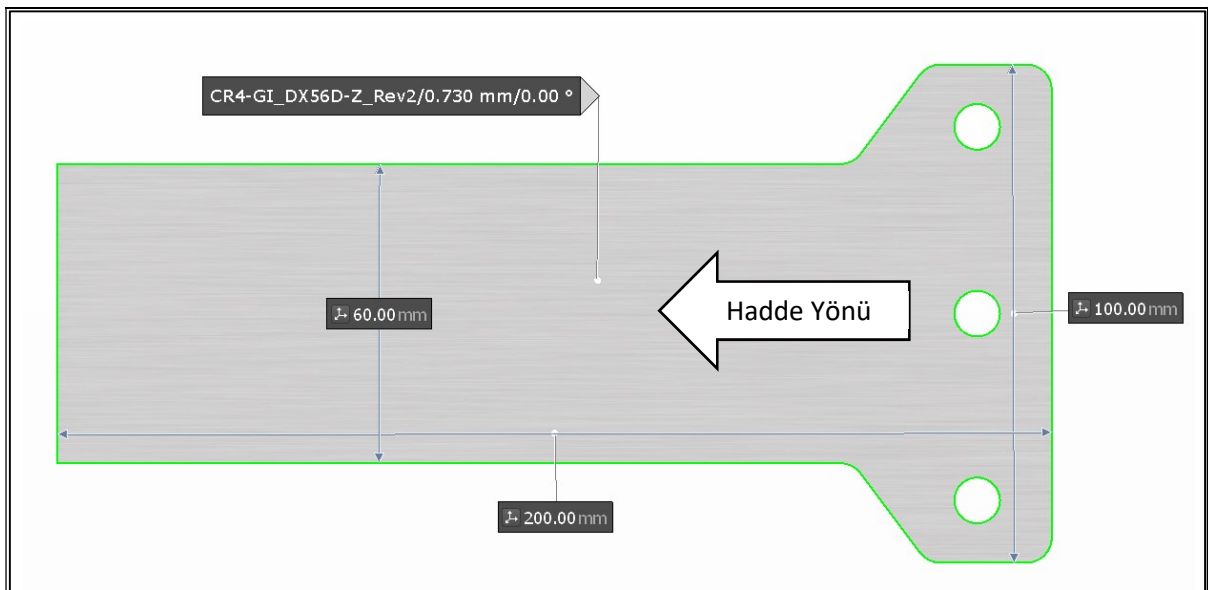
Akma Gerilmesi (MPa)	Çekme Gerilmesi (MPa)	Poisson Oranı	Plastisite Modeli	r ₀ /r ₄₅ /r ₉₀	Çekme Uzaması (%)	Sac Kalınlığı(mm)
171	317	0.3	Hill48	1.7 / 1.6 / 2.1	25.9	0.73

Bir sonraki adımda, SEA yazılımında çeliklere ait kullanılan değişkenler ve parametreler tablo 4.3'te verilmiştir.

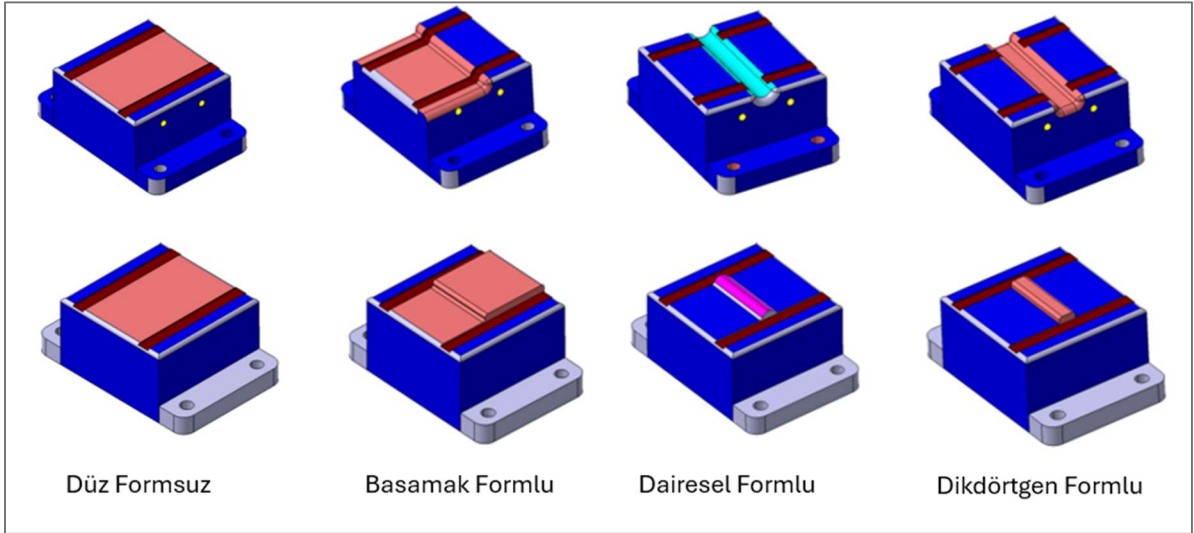
Tablo 4.3. SEA yazılımında kullanılan değişkenler

Tampon Kuvveti(N)	Çekme Hızı(mm /s)	Erkek Çelik Vuruş Hızı(mm/s)	Çekme mesafesi(m)	Hesaplama Hassasiyeti
16200/27000	25	100	10	Son doğrulama hassasiyeti

SEA yazılımında kullanılan açınım ölçülerine ve hadde yönüne ait bilgiler Şekil 4.15'te ve SEA yazılımında kullanılan çeliklerin 3 boyutlu tasarımları Şekil 4.16'da gösterilmiştir.



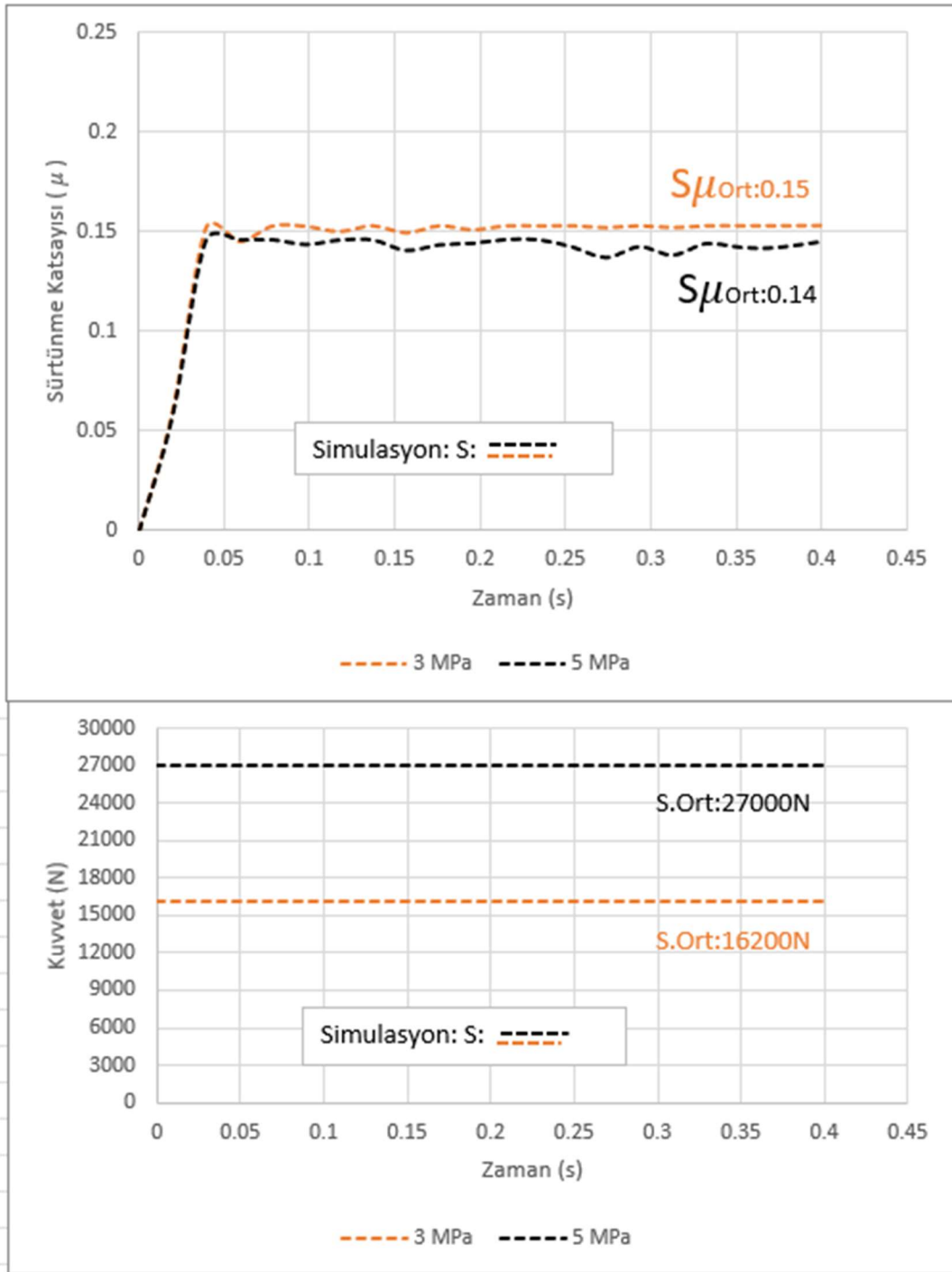
Şekil 4.15. SEA yazılımında kullanılan açınım bilgileri



Şekil 4.16. SEA yazılımındaki kullanılmak üzere tasarlanan kalıp elemanları

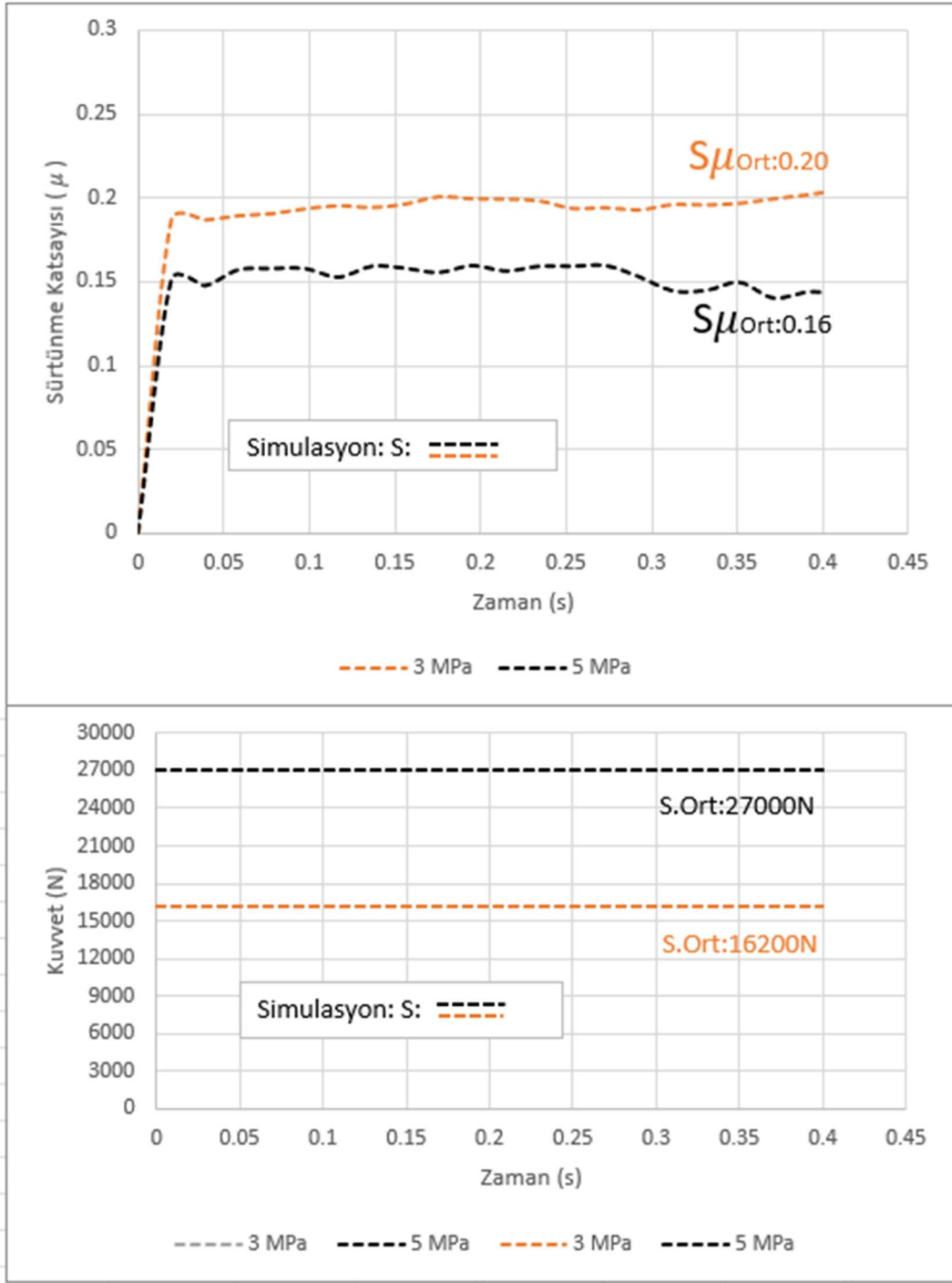
Son adım olarak da sonlu elemanlar modeli çözülmüştür. Sonuçlar sürtünme katsayısı, geometriye ve temas basıncı açısından değerlendirilmiştir. Sonuçlar değerlendirilirken deneysel yöntemde olduğu gibi grafikler ile gösterilmiştir.

İlk olarak düz formsuz kalıp elemanları ile yapılan çalışmamızda proses boyunca sürtünme davranışı grafik çıktısı ile incelenmiştir ve basınca bağlı olarak sürtünme katsayısının literatüre uygun bir şekilde azaldığı görülmüştür. Bu durum Şekil 4.17’de verilmiştir.



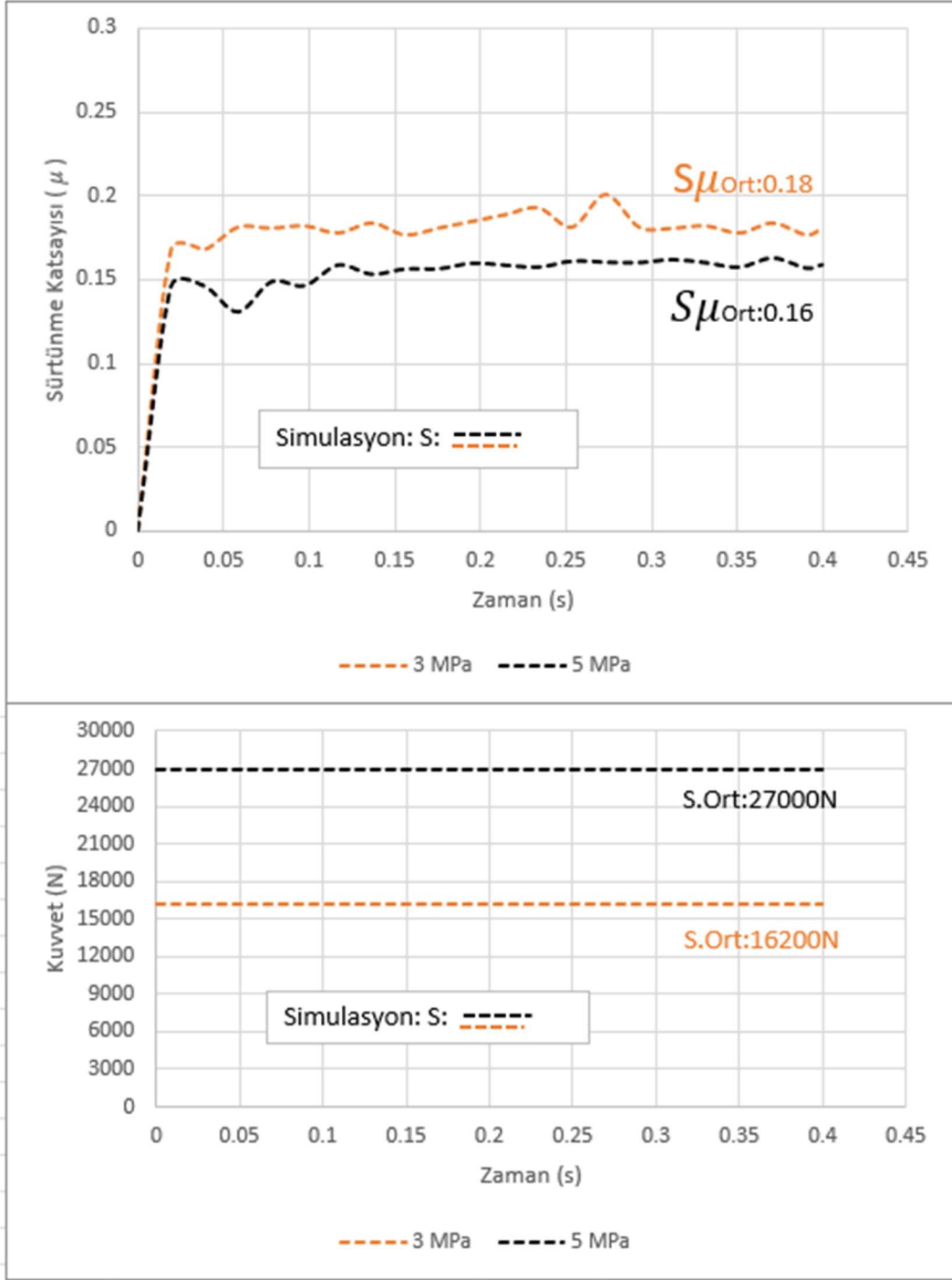
Şekil 4.17. SEA Düz formsuz sürtünme katsayısı sonuçları

Daha sonra gerçek durumda test edilen geometriye bağlı sürtünme katsayısının nasıl etkilendiğini görmek adına SEA yazılımı ile analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlar Şekil 4.18'de belirtilmiştir.



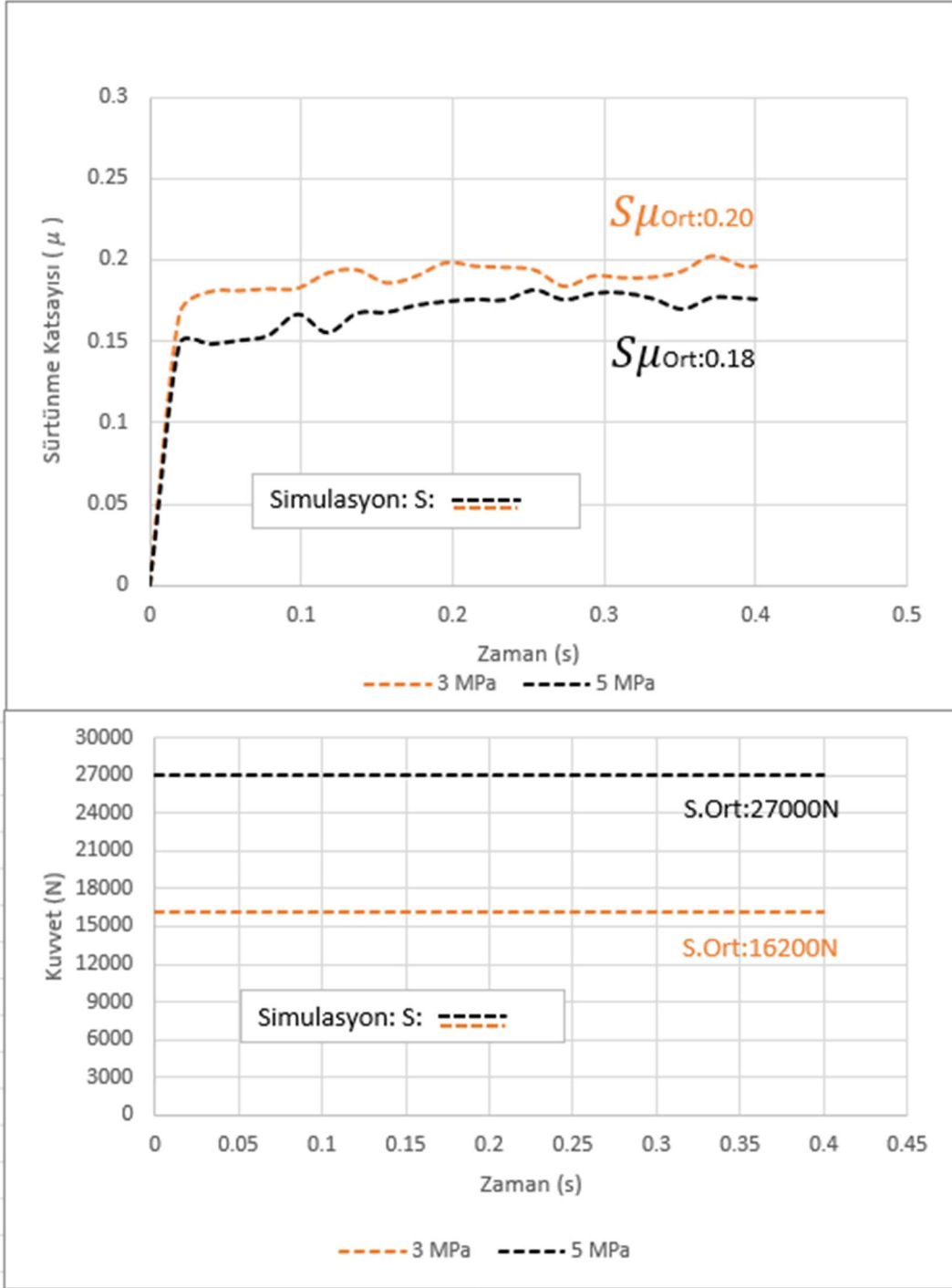
Şekil 4.18. SEA Basamak formu basınca bağlı sürtünme katsayısı sonuçları

Diğer bir geometri olan Round geometriye bağlı sürtünme katsayısının nasıl etkilendiğini görmek adına SEA yazılımı ile analiz edilmiştir. Şekil 4.19'de belirtilmiştir.



Şekil 4.19. SEA Dairesel formlu basınca bağlı sürtünme katsayısı sonuçları

Diğer bir geometri olan dairesel geometriye bağlı sürtünme katsayısının nasıl etkilendiğini görmek adına SEA yazılımı ile analiz edilmiştir. Şekil 4.20’de belirtilmiştir.

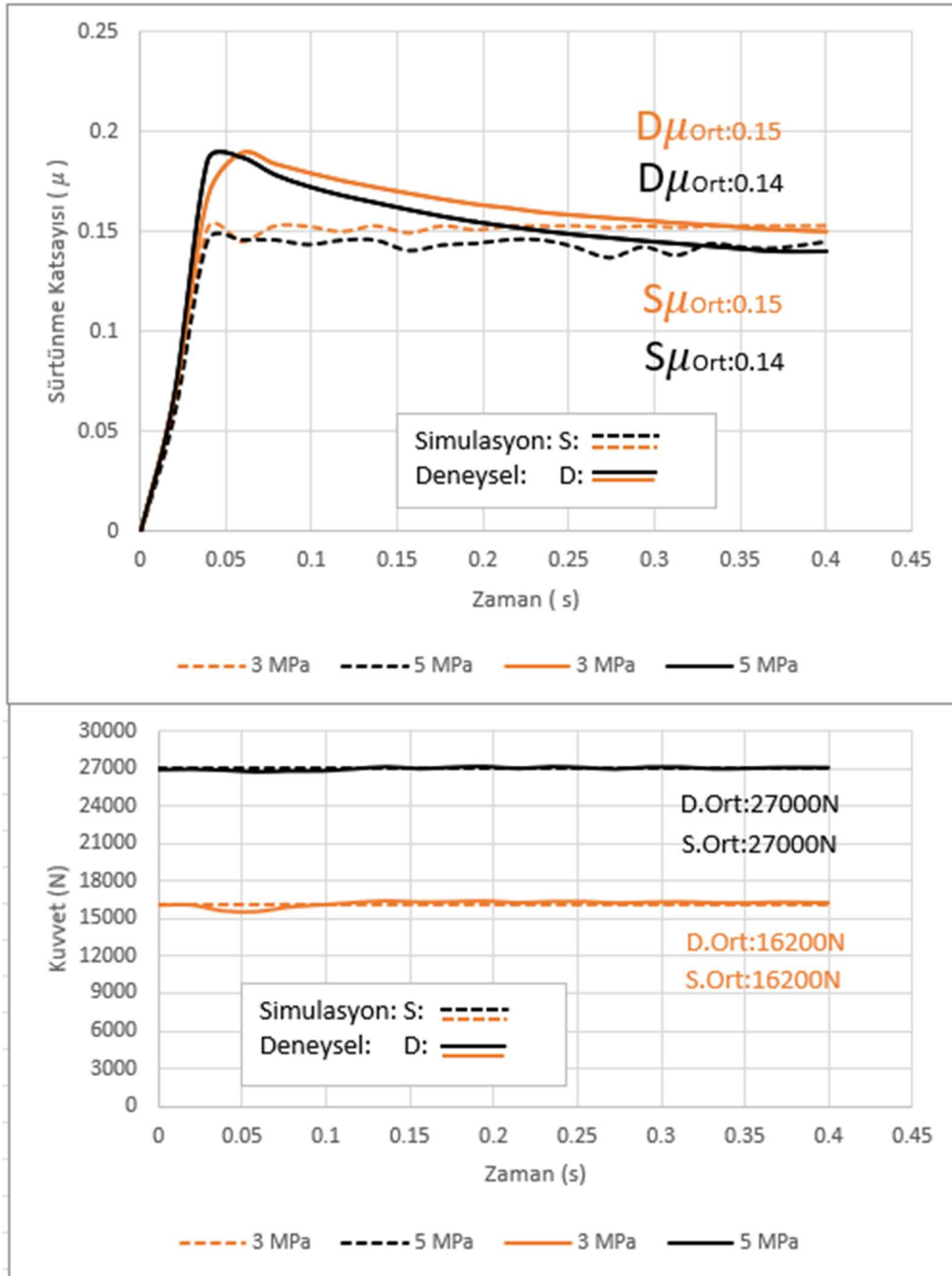


Şekil 4.20. SEA Dikdörtgen formulu basınca bağlı sürtünme katsayısı sonuçları

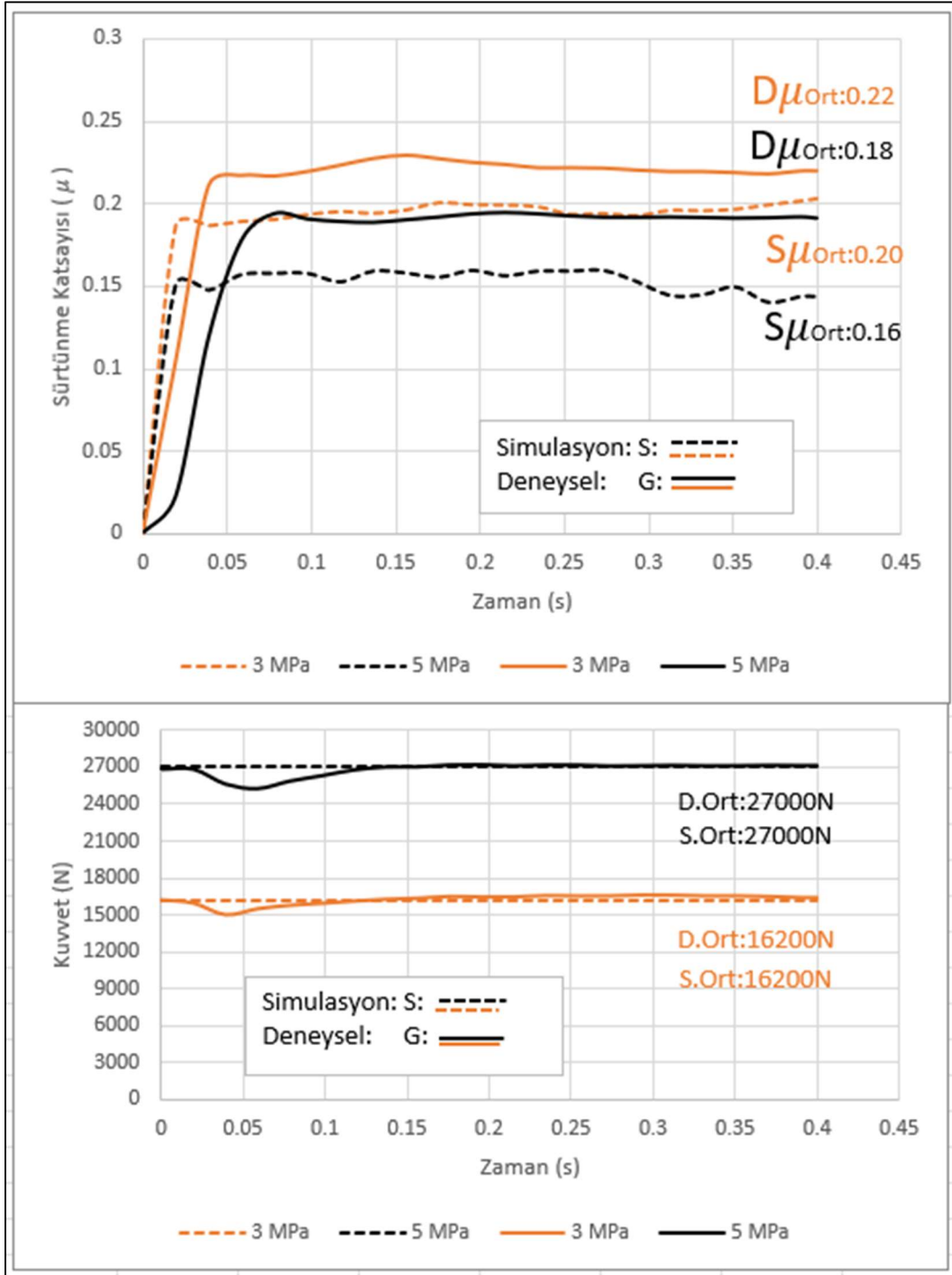
Böylece SEA yazılımına tanımlanan CR4 malzemeyle tüm simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Sürtünme katsayısı, temas basıncı ve geometriye bağlı olan etkisini çıktılarının üst tampon kuvveti değişkeniyle gerçekleşen sürtünme katsayısı sonuçları incelenmiştir. Bu kuvvetlere ait karşılaştırma grafikleri tanımlanmıştır.

4.2 Sonuçların Değerlendirilmesi

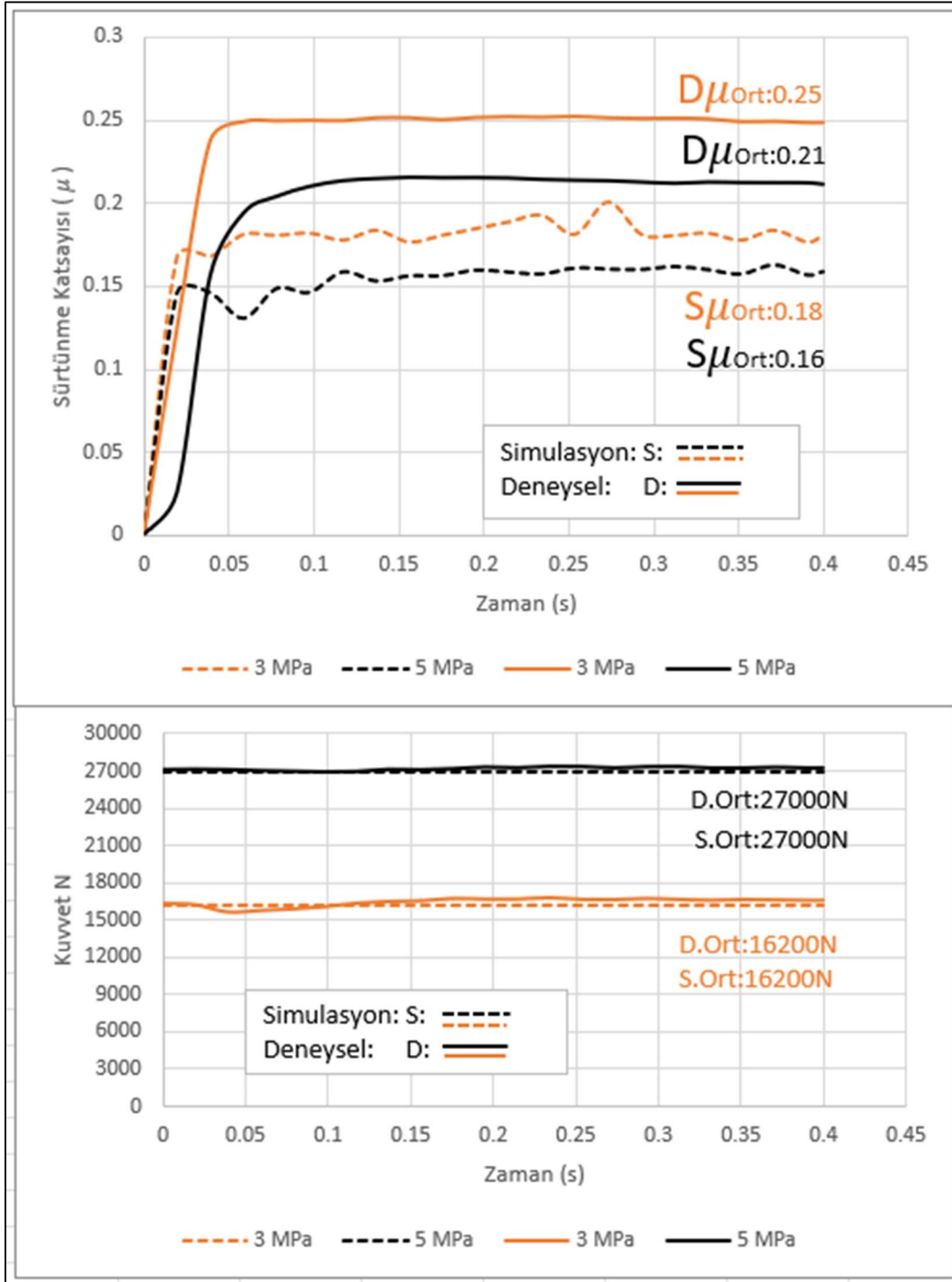
Deneyel olarak hidrolik test cihazında gerçekleştirilen testlerin numerik olarak aynı parametrelerle sonlu elemanlar analizi programında uygulaması yapılmıştır. Bu çalışma neticesinde Sürtünme katsayısı üst tampon kuvveti değişkenleri (16000N / 27000N) ile geometriye bağlı değişkenlerinin etkisi deneysel ve numerik olarak karşılaştırılması birlikte yapılmıştır.



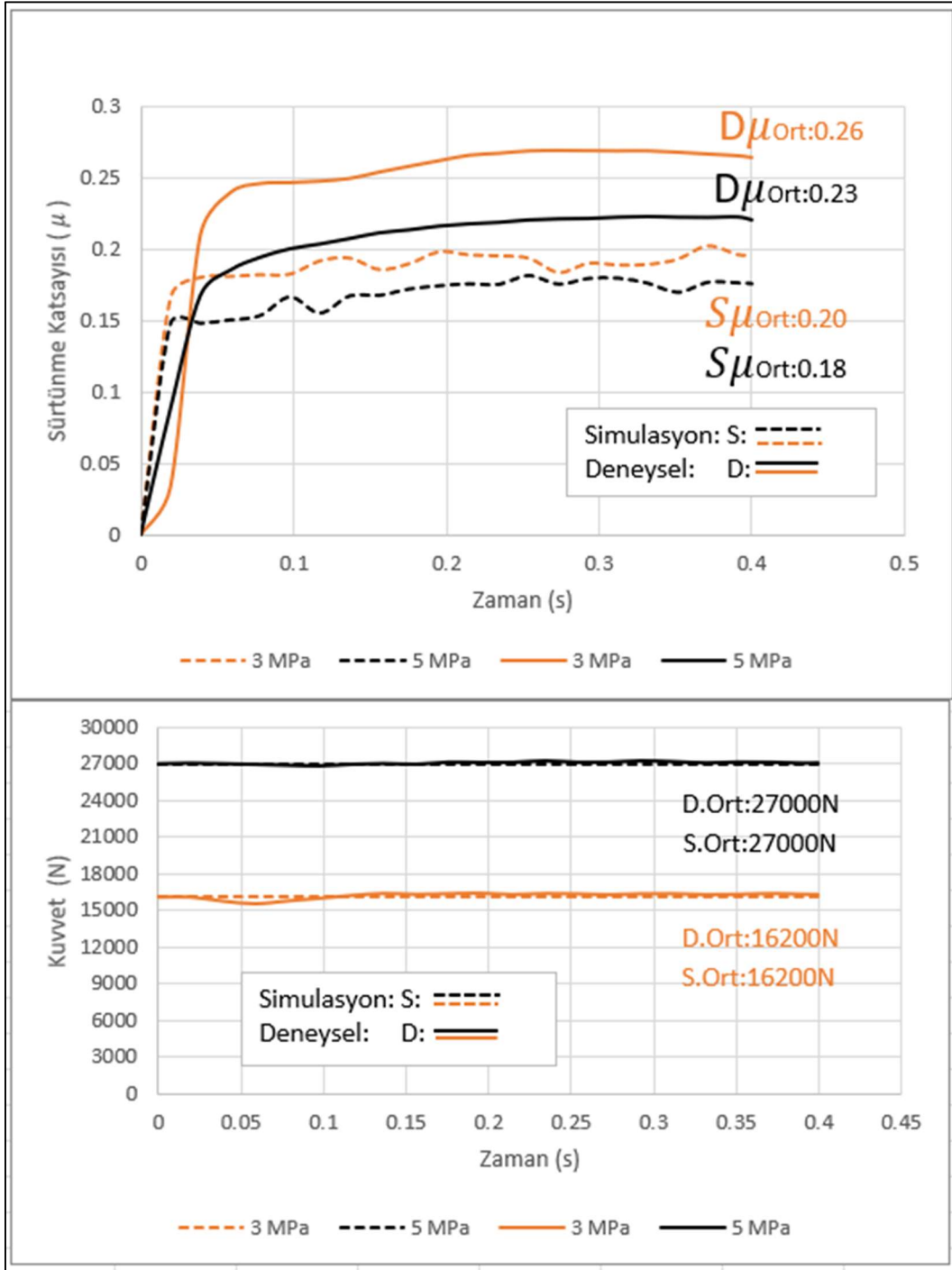
Şekil 4.21. Formsuz düz olmak üzere farklı basınçlar uygulandığında oluşan sürtünme katsayısının deneysel ve numerik olarak karşılaştırılması



Şekil 4.22. Basamak formu olmak üzere farklı basınçlar uygulandığında oluşan sürtünme katsayısını ve kuvvet grafiğini deneysel ve numerik olarak karşılaştırılması

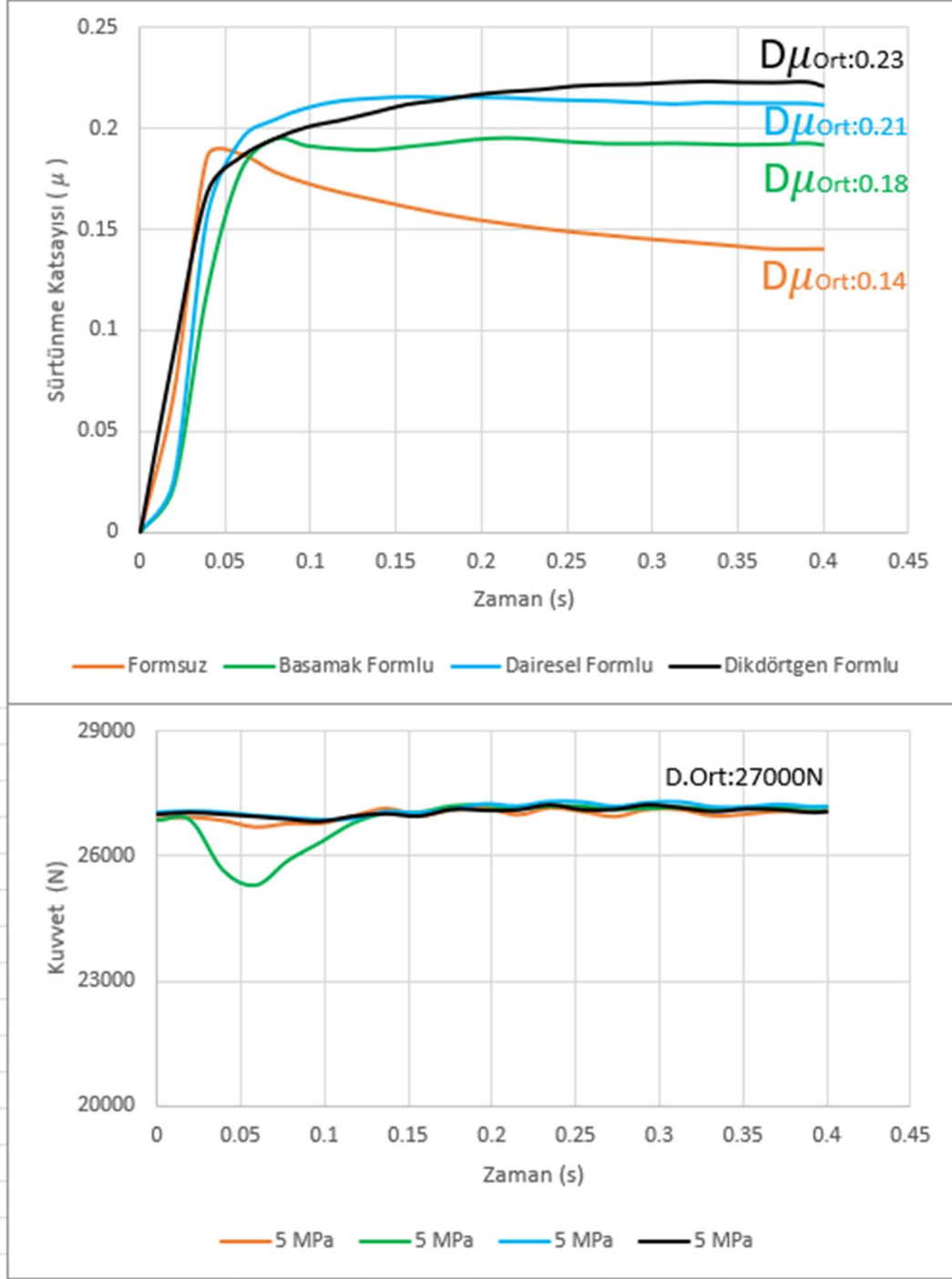


Şekil 4.23. Dairesel formlu olmak üzere farklı basınçlar uygulandığında oluşan sürtünme katsayısını ve kuvvet grafiğini deneysel ve numerik olarak karşılaştırılması

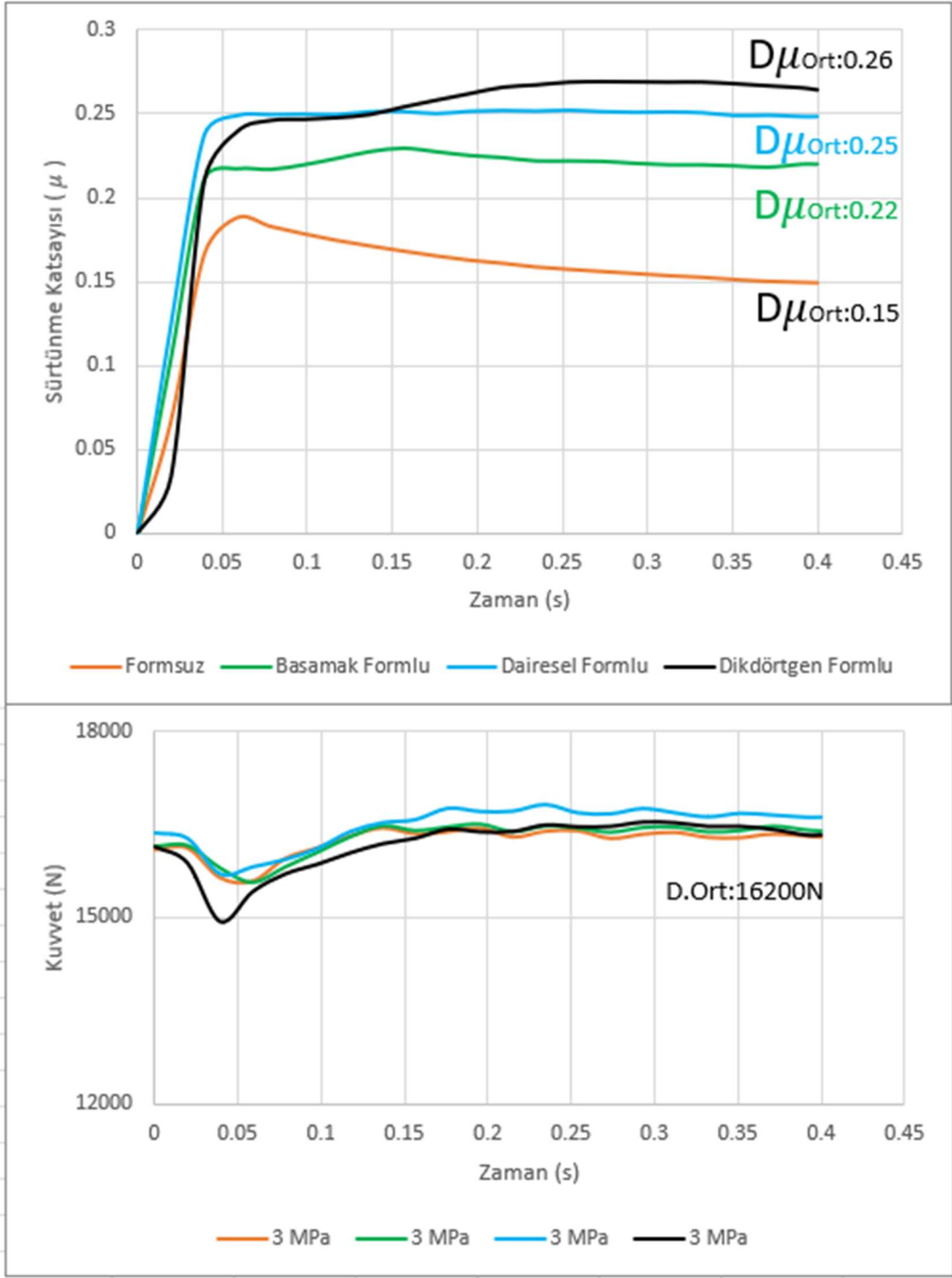


Şekil 4.24. Dikdörtgen formlu olmak üzere farklı basınçlar uygulandığında oluşan sürtünme katsayısını ve kuvvet grafiğini deneysel ve numerik olarak karşılaştırılması

DeneySEL ve numerik deneylerin karşılaştırılması tamamlanmıştır. Fakat deneySEL olarak yapılan çalışmanın hem 3MPa'da hem 5MPa'da basınca ve geometriye bağılı kendi içinde de karşılaştırılması yapılmıştır.



Şekil 4.25. 5MPa basınç altında yapılan deneySEL çalışmamızın formsuz, basamak formlu, dairesel formlu ve dikdörtgen formlu geometrilere göre oluşan sürtünme katsayısının karşılaştırılması



Şekil 4.26. 3MPa basınç altında yapılan deneysel çalışmamızın formsuz, basamak formlu, dairesel formlu ve dikdörtgen formlu geometrilere göre oluşan sürtünme katsayısının karşılaştırması

5. DEĞERLENDİRME

Bu tez çalışmasında, sac metal şekillendirme simülasyonlarında kritik bir parametre olan sürtünme katsayısının, yalnızca yüzey basıncına değil, parça geometrisine bağlı olarak değişimi incelenmiştir. Endüstriyel uygulamalarda sürtünme katsayısı genellikle sabit kabul edilse de özellikle formlu yüzeylerde gerçekleşen malzeme akışı ve yüzey etkileşimleri, analiz doğruluğunu önemli ölçüde etkilemektedir.

Çalışma kapsamında 0.73 mm kalınlığındaki CR4 malzeme kullanılarak hem deneysel hem de nümerik analizler gerçekleştirilmiştir. Deneyler iki ana kategoride ele alınmıştır: Formsuz (düz) yüzey testleri ve geometrik formlu (basamak, dairesel ve dikdörtgen) yüzey testleri yapılmıştır. Her iki durumda da numuneler 3 MPa ve 5 MPa basınç değerlerine maruz bırakılmıştır.

Elde edilen sonuçlar incelendiğinde; düz ve formsuz yüzeylerde gerçekleştirilen testlerde, 3 ve 5 MPa basınç değerlerinin tamamında, nümerik analiz sonuçları ile deneysel verilerin birebir örtüştüğü gözlemlenmiştir. Bu durum, basit temas koşullarında mevcut sürtünme modellerinin yeterli doğrulukta çalıştığını ve basınç değişimini doğru simüle edebildiğini kanıtlamaktadır.

Ancak, sacın basamak, dairesel ve dikdörtgen formlu çelikler üzerinden akmaya zorlandığı geometrik testlerde durum farklılaşmaktadır. Geometrinin devreye girdiği bu testlerde, simülasyon programı sabit veya basınca bağlı modeller kullansa dahi, deneysel sonuçlarla nümerik çıktılar arasında belirgin sapmalar tespit edilmiştir. Deneysel verilerde, geometrik engellerin (köşeler, radyuslar) malzeme üzerinde yarattığı ekstra deformasyon ve yüzey pürüzlülük değişimi sürtünme direncini artırırken, simülasyon ortamının bu geometrik etkileşimi tam olarak yansıtamadığı görülmüştür.

Sonuç olarak; sac metal simülasyonlarında hata payını minimize etmek için sadece basınca duyarlı modellerin yeterli olmadığı anlaşılmıştır. Analiz doğruluğunun artırılması ve özellikle karmaşık kalıplarda deneme sürelerinin kısaltılması için, geometriye ve deformasyon moduna bağlı değişen, geliştirilmiş sürtünme modellerinin kullanılması gerektiği ortaya konmuştur.

KAYNAKÇA

- Avallone, E. A., Baumeister, T., & Sadegh, A. (2006). *Marks' standard handbook for mechanical engineers*. McGraw-Hill, USA.
- Bauwens, J. P. (2013). *Introduction to tribology*. John Wiley & Sons, USA.
- Bhushan, B. (2013). *Introduction to tribology*. John Wiley & Sons, USA.
- Blau, P. J. (2008). *Friction science and technology: From concepts to applications*. CRC Press, USA.
- Bowden, F. P., & Tabor, D. (2001). *The friction and lubrication of solids*. Oxford University Press, UK.
- Callister, W. D., & Sethwisch, D. G. (2020). *Materials science and engineering: An introduction*. John Wiley & Sons, USA.
- Civelek, F., & Özdemir, A. (2024). Sac metal malzemelerin şekillendirilebilirlik kriterlerinin değerlendirilmesi. *Politeknik Dergisi*, 27(1), 1-1.
- Eckert, A. (2012). *Prognose der maßhaltigkeit punktförmig mechanisch gefügter karosseriebau-teile*. (Yüksek Lisans Tezi). Technische Universität Dresden, Mühendislik Fakültesi, Dresden.
- Feng-Xian, L. (2020). *China shock line stamping*. [Erişim: 26.02.2020, <https://formingworld.com/china-shock-line-stamping/>]
- Gelin, J. C. (2002). Modelling and simulation of friction in metal forming processes. *Journal of Materials Processing Technology*, 125, 7-14.
- Halliday, D., Resnick, R., & Walker, J. (2014). *Fundamentals of physics*. John Wiley & Sons, USA.
- Hibbeler, R. C. (2016). *Engineering mechanics: Statics*. Pearson, USA.
- Hill, R. (1948). A theory of the yielding and plastic flow of anisotropic metals. *Proceedings of the Royal Society of London Series A Mathematical and Physical Sciences*, 193, 281-297.
- Hosford, W. F., & Caddell, R. M. (2011). *Metal forming: Mechanics and metallurgy*. Cambridge University Press, UK.
- Kishami, Y., vd. (2023). Measurement of skid line formation and formation mechanism of automotive outer panel. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1284(1), 012064.
- Lim, Y. (2010). *Mimo adaptive process control in stamping using punch force*. (Doktora Tezi). University of Michigan, Mechanical Engineering, Michigan.
- Meriam, J. L., & Kraige, L. G. (2012). *Engineering mechanics: Statics*. Wiley, USA.
- Paul, S. (2021). Controlling factors of forming limit curve: A review. *Advances in Industrial and Manufacturing Engineering*, 2, 100033.
- Persson, B. N. (2013). *Sliding friction: Physical principles and applications*. Springer Science & Business Media, Germany.
- Ren, X., Zhang, Z., & Li, G. (2011). Prediction of slip line on automobile panel based on finite element simulation. *Journal of Plasticity Engineering*, 18(5), 11-15.
- Schuler. (1998). *Schuler metal forming hand book*. Springer-Verlag, Heidelberg.
- Serway, R. A., & Jewett, J. W. (2018). *Physics for scientists and engineers*. Cengage Learning, USA.
- Smith, L., Zhou, D., Geng, L., & Wanintradul, C. (2017). An experimental analysis device for obtaining skid line limit diagrams. *AIP Conference Proceedings*, 1383(1), 557-564.
- Sokolova, O., Carrado, A., & Palkowski, H. (2011). Metal-polymer-metal sandwiches with local metal reinforcements: A study on formability by deep drawing and bending. *Composite Structures*, 94(1), 1-7.
- Stolarski, T. A. (2000). *Tribology in machine design*. Butterworth-Heinemann, UK.

- Sürmen, Y. (2019). *Endüstri 4.0 ve otomotiv endüstrisi: Bursa ili swot analizi ile değerlendirilmesi*. (Yüksek Lisans Tezi). Uludağ Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Bursa.
- Uysal, G. (2006). *Otomotiv endüstrisinde yüksek mukavemetli sacların şekillendirilebilme özelliklerinin incelenmesi*. (Yüksek Lisans Tezi). Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.
- Williams, J. A. (2005). *Engineering tribology*. Cambridge University Press, UK.
- Wriggers, P. (2006). *Computational contact mechanics*. Springer, Germany.
- Zhao, D., Zhang, C., Zhao, K., & Xie, Y. (2022). *Experimental study and simulation-based criterion for stamping skid line*. (Yüksek Lisans Tezi). Anhui University of Science and Technology, China.