

BURSA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ❖ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ÜÇÜNCÜ NESİL FORTIFORM 1050 ÇELİĞİNİN BASINCA BAĞLI
SÜRTÜNME KATSAYISININ DENEYSEL
VE SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİYLE ARAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Yasin ÇİNİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

MAYIS 2019

BURSA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ❖ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ÜÇÜNCÜ NESİL FORTIFORM 1050 ÇELİĞİNİN BASINCA BAĞLI
SÜRTÜNME KATSAYISININ DENEYSEL
VE SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİYLE ARAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Yasin ÇİNİ
(162080104)**

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Dr. Selçuk KARAGÖZ

MAYIS 2019

BTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 162080104 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Yasin ÇİNİ, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "ÜÇÜNCÜ NESİL FORTIFORM 1050 ÇELİĞİNİN BASINCA BAĞLI SÜRTÜNME KATSAYISININ DENEYSEL VE SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİYLE ARAŞTIRILMASI" başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Dr. Selçuk KARAGÖZ**
Bursa Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Dr. Erdem UZUNSOY**
Bursa Teknik Üniversitesi

Dr. Ahmet YILDIZ
Uludağ Üniversitesi

Savunma Tarihi : 10 Mayıs 2019

FBE Müdürü : **Doç. Dr. Murat ERTAŞ**
Bursa Teknik Üniversitesi/...../.....

İNTİHAL BEYANI

Bu tezde görsel, işitsel ve yazılı biçimde sunulan tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uyularak tarafımdan elde edildiğini, tez içinde yer alan ancak bu çalışmaya özgü olmayan tüm sonuç ve bilgileri tezde kaynak göstererek belgelediğimi, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim.

Öğrencinin Adı Soyadı: Yasin ÇİNİ

İmzası :

YASIN ÇİNİ



Eşime ve aileme,

ÖNSÖZ

Lisans eğitimim boyunca almış olduğum derslerin takibinde yanımda olan ve tez çalışmam kapsamında her türlü sorumu özveriyle cevaplayan, ihtiyacım olan her konuda destek sağlayan ve bilimsel/sosyal yönden sohbetini benden esirgemeyen saygıdeğer danışmanım Dr. Selçuk KARAGÖZ' e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmamın çeşitli noktalarında yardımlarını ve tecrübelerini sunan Mücahit Mustafa YENİCE'ye ve COŞKUNÖZ Ailesine teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmamı gerçekleştirirken bilgilerini ve desteklerini benden esirgemeyen başta eşim Ece TURAN ÇİNİ'ye ve değerli arkadaşlarım Zeynep Begüm KURT, Hüseyin BEYTUT, Emre Esvet MÜFTÜOĞLU, Mehmet Kıvanç TURAN, Muhammet ARSLAN, Erkut SİRDAŞ ve Yahya GÜNEŞ'e teşekkür ederim.

Tüm hayatım boyunca attığım her adımda yanımda olan ve bu tez çalışmasını gerçekleştirecek gücü bana veren, çok sevdiğim, kıymetli aileme sonsuz teşekkür ederim.

Mayıs 2019

Yasin Çini

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	v
İÇİNDEKİLER	vi
KISALTMALAR	vii
SEMBOLLER	viii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	ix
ŞEKİL LİSTESİ.....	x
ÖZET.....	xi
SUMMARY	xiii
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Tezin Amacı	4
1.2 Literatür Araştırması	5
1.3 İleri Yüksek Mukavemetli Çelikler (AHSS).....	9
1.3.1 Birinci nesil ileri yüksek mukavemetli çelikler	10
1.3.2 İkinci nesil ileri yüksek mukavemetli çelikler	11
1.3.3 Üçüncü nesil ileri yüksek mukavemetli çelikler	11
1.4 Bilgisayar Destekli Tasarım	11
1.5 Sac Metal Şekillendirmesi (SMF)	13
1.5.1 Sac metal şekillendirme parametreleri	14
1.5.2 Sac metal şekillendirme analizi.....	16
2. MATERYAL VE METOT	18
2.1 Malzeme Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi	18
2.2 Sürtünme Katsayısının Belirlenmesi	18
2.3 Parçanın ve Kalıbın Tasarımı	20
2.4 Autoform Sac Şekillendirme Analizi	21
2.5 Geri Esneme Analizi	23
3. BULGULAR VE TARTIŞMA	25
3.1 Malzeme Mekanik Özellikleri.....	25
3.2 Basınca Bağlı Sürtünme Katsayısı	27
3.3 Sac Şekillendirme Analizi	31
3.4 Prototip Parça Üretimi.....	34
3.5 Geri Esneme Kıyaslaması	34
4. SONUÇLAR VE ÖNERİ.....	37
KAYNAKLAR	39
ÖZGEÇMİŞ.....	45

KISALTMALAR

AHSS	: İleri Yüksek Mukavemetli Çelik
BHF	: Pot Çemberi Kuvveti
Btu	: İngiliz Sıcaklık Birimi
CAD	: Bilgisayar Destekli Tasarım
CO₂	: Karbondioksit
CP	: Kompleks Fazlı Çelik
DP	: Çift Fazlı Çelik
FE	: Sonlu Elemanlar
FEM	: Sonlu Elemanlar Modeli
L-IP	: Uyarılmış Plastisite ile Hafif Çelikler
MART	: Martenzitik Çelik
MPa	: MegaPascal
N	: Newton
SMF	: Sac Metal Şekillendirme
TRIP	: Dönüşüm Etkili Yoğruklu Çelikler
TWIP	: İkizlenmeyle Plastığı Artırılmış Çelikler

SEMBOLLER

α	: Hız Faktörü
F_s	: Sürtünme Kuvveti
F_n	: Normal Kuvvet
n	: Basınç Çarpanı
P	: Basınç
P_o	: Referans Basınç
\bar{r}	: Anizotropi Katsayısı
V_{ref}	: Referans Şekillendirme Hızı
V_{rel}	: Kalıp Yüzey Sürtünmesine Bağlı Hız
μ	: Sürtünme Katsayısı
μ_o	: Referans Sürtünme Katsayısı
μ_{ef}	: Efektif Sürtünme Katsayısı

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Fortiform 1050 malzemesinin kimyasal bileşenleri ve mekanik özellikleri.	18
Çizelge 3.1 : Fortiform 1050 çelik malzemesinin mekanik özellikleri	26



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Otomobillerde kullanılan malzemelerin dağılım yüzdeleri.....	1
Şekil 1.2 : Sac metal malzemeden üretilen parçalar: a) motor kaputu b) kapı.....	2
Şekil 1.3 : Parçanın 3-D modellemesi	4
Şekil 1.4 : Çekme dayanımına karşı uzama grafiğinde 3. nesil AHSS'nin dağılım grafiği.....	10
Şekil 1.5 : Otomotiv sanayilerinde kullanılan CAD programları.....	12
Şekil 1.6 : Derin çekme proses prensibi.....	13
Şekil 1.7 : Gerdirme prosesi şematik gösterimi.....	13
Şekil 2.1 : Kuvvet-Sürtünme eğrisinde statik ve kinetik sürtünme bölgeleri.....	18
Şekil 2.2 : Sürtünme aparatı tasarımı.....	20
Şekil 2.3 : Parçanın 3-D modellemesi.....	20
Şekil 2.4 : Parçanın kalıp tasarımı.....	21
Şekil 2.5 : Sac metal parça üretim aşamaları.....	22
Şekil 2.6 : Autoform kullanıcı arayüzü.....	22
Şekil 2.7 : Autoform'da mesh işlemi gerçekleştirilmiş destek parçası.....	23
Şekil 3.1 : Mekanik testler (a) çekme testi, (b) sertlik testi.....	25
Şekil 3.2 : Çekme testi için hazırlanan Fortiform 1050 çelik malzeme numunesi....	26
Şekil 3.3 : Fortiform 1050 çelik malzemesinin gerilme-gerinme diyagramı.....	26
Şekil 3.4 : Sürtünme test numunesi teknik resmi.....	27
Şekil 3.5 : Sürtünme test aparatı.....	27
Şekil 3.6 : 1440 N ile gerçekleştirilen test sonucunda elde edilen yerdeğiştirmeye karşı sürtünme katsayısı eğrileri.....	28
Şekil 3.7 : 1920 N ile gerçekleştirilen test sonucunda elde edilen yerdeğiştirmeye karşı sürtünme katsayısı eğrileri.....	28
Şekil 3.8 : 2400 N ile gerçekleştirilen test sonucunda elde edilen yer değiştirmeye karşı sürtünme katsayısı eğrileri.....	29
Şekil 3.9 : Basınca bağlı sürtünme katsayıları grafiği.....	30
Şekil 3.10 : Basınca bağlı sürtünme katsayıları yakınlaştırılmış grafiği.....	30
Şekil 3.11 : Autoform analiz programı Fortiform 1050 malzeme kartı.....	31
Şekil 3.12 : Çekme prosesi sonrası ölçülen çekme payları (Coulomb yasası).....	32
Şekil 3.13 : Çekme prosesi sonrası ölçülen çekme payları (basınca bağlı).....	32
Şekil 3.14 : Sürtünme teoremlerine göre şekillendirme analizi.....	33
Şekil 3.15 : Sürtünme teoremlerine göre geri esneme analiz değerleri.....	33
Şekil 3.16 : Şekillendirme işlemi gerçekleşen destek parçasının çekme payları.....	34
Şekil 3.17 : Tarama işlemi gerçekleştirilen destek parçası.....	35
Şekil 3.18 : Coulomb sürtünme katsayılı simülasyon sonucu ile prototip parça kıyasalama sonucu.....	36
Şekil 3.19 : Basınca bağlı sürtünme katsayılı simülasyon sonucu ile prototip parça kıyaslama sonucu.....	36

ÜÇÜNCÜ NESİL FORTIFORM 1050 ÇELİĞİNİN BASINCA BAĞLI SÜRTÜNME KATSAYISININ DENEYSEL VE SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİYLE ARAŞTIRILMASI

ÖZET

Sac metaller başta otomotiv sektörü olmak üzere birçok farklı sektörde kullanılmakta ve uygulama alanları sürekli artmaktadır. Kullanım alanları ve geometrilerine bağlı olarak malzemelerden beklenen özellikler değişmektedir. Günümüz otomotiv endüstrisinde ağırlıktan kazanç sağlayarak emisyon oranını azaltma trendi göz önünde bulundurulduğunda, geleneksel malzemelere oranla nispeten hafif malzemeler dikkat çekmektedir. Bu bağlamda hafif malzemeler olarak adlandırılan alüminyum, magnezyum, kompozit ve ileri yüksek mukavemetli çelik malzemeler ön plana çıkmaktadır. İleri yüksek mukavemetli çelikler geleneksel çeliklerle kıyaslandığında aynı özgül ağırlık değerine sahipken daha yüksek dayanım sunabilmektedirler. Geleneksel malzemeler yerine yüksek dayanımlı malzemenin kullanımı ile aracın çeşitli parçalarında sac kalınlığını düşürerek eş dayanım değerine sahip daha hafif parçaların ve dolayısıyla daha hafif araçların üretilmesi mümkün kılınmaktadır.

Bu çalışmada, üçüncü nesil ileri yüksek mukavemetli çelikler ailesinin bir üyesi olan Fortiform 1050 malzemesinin preste şekillendirilme davranışı incelenmiştir.

Sac parçaların soğuk şekillendirme prosesinde form vermeyi etkileyen pek çok farklı parametre bulunmaktadır. Bu parametrelerden biri olan sürtünme katsayısı, iki farklı sanal simülasyon yöntemi ile incelenmiş ve bu iki yöntemin kıyaslaması yapılmıştır.

Bahsi geçen bu iki yöntemde Coulomb sürtünme katsayısı ile basınca bağlı sürtünme katsayısının sac şekillendirme üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Basınca bağlı sürtünme katsayısının bulunabilmesi adına değişik kuvvet değerleri altında bir takım testler gerçekleştirilmiştir. Bu testler sonucunda sürtünme katsayısının farklı kuvvetler altındaki değerleri elde edilmiştir.

Basınca bağlı sürtünme katsayısı formülasyonuna uygun Matlab kodu yazılarak elde edilen sürtünme katsayıları ve bunlara karşılık gelen kuvvetler girilerek simülasyonu gerçekleştirebilmek için gerekli olan n ve P_0 değerleri bulunmuştur. Sürtünme katsayısının şekillendirme üzerindeki etkisini araştırabilmek adına destek parça tasarımı gerçekleştirilmiş ve bu parçayı preste üretebilmek için gerekli olan kalıp, firma bünyesinde bulunan prototip kalıbın revize edilesiyle elde edilmiştir. Bu kalıp yüzeylerine ve iki farklı sürtünme katsayısı teoremine göre şekillendirme analizleri gerçekleştirilmiştir. Simülasyon sonuçlarının doğruluğunu anlamak adına prototip parçaların üretimi yapılmış ve prototip parçalar ile simülasyon sonuçları kıyaslanmıştır. Bu kıyaslamayı gerçekleştirebilmek için ilk olarak parçaların şekillendirilme sonrasındaki çekme paylarına bakılmıştır.

Prototip parçalardaki çekme paylarını ölçebilmek adına pot üzerine belirli bölgelerde işaretlemeler yapılmış, bu işaretler ile final parça arasındaki mesafeler ölçülmüştür ve simülasyon sonuçlarındaki çekme payları arasındaki fark incelenmiştir. Daha sonra

Üretilen prototip parçalar taranıp, tarama datası simülasyon sonuçları ile çakıştırılarak şekillendirme sonrası sac parçaların geri esneme doğruluğu kıyaslanmıştır. Elde edilen veriler doğrultusunda, basınca bağlı sürtünme katsayısının daha doğru sonuçlar verdiği grlmştr.

Anahtar kelimeler: İleri yüksek mukavemetli elik malzemeler, basınca bağlı sürtünme katsayısı, sac metal şekillendirme, Fortiform 1050 eliđi, sonlu elemanlar yöntemi, Autoform.



INVESTIGATION OF PRESSURE DEPENDENT FRICTION COEFFICIENT OF THIRD GENERATION FORTIFORM 1050 STEEL WITH EXPERIMENTAL AND FINITE ELEMENT ANALYSIS

SUMMARY

Sheet metals are being used in many industries, particularly in the automotive industry, and they have increasing use cases. Depending on the geometry and the area of use, the expected properties of the materials vary. Considering the trend of reducing emission rate by the reduction in weight, compared to traditional materials, relatively light materials stand out. In this regard, aluminium, magnesium, composite and advanced high strength steel materials, which are called light materials, come into prominence. In comparison to traditional steel, advanced high strength steels provide higher strength while having the same specific gravity. By using high strength materials in place of traditional materials, the sheet thickness of the parts of the automobile can be reduced without a loss on their strength. Thus, the automobile becomes lighter corresponding to the weight loss of its parts.

In this study, the behaviour of Fortiform 1050, a member of the third-generation high strength steel family, in press forming is examined.

There are many parameters in cold press forming of sheet metals that affect forming. Friction coefficient, which is one of those parameters, is examined by two different virtual simulation methods, and a comparison of two is made.

With these two methods, the effects of Coulomb friction coefficient and pressure dependent friction coefficient on sheet metal forming is investigated. A number of tests under varying force values are conducted in order to calculate the pressure dependent friction coefficient. In consequence of these tests, different values of friction coefficient under different forces are obtained.

By entering the friction coefficient values and the corresponding forces on the coding in MATLAB, that is coded in regard to pressure dependent friction coefficient, n and P_0 values, which are required in order to run the simulations, are calculated.

To be able to examine the effects of the friction coefficient on forming, a support part is designed and the die design that is required to produce this part is updated to revise the die of the prototype found at the company site. Forming analyses are made according to these die surfaces and two different friction coefficient theorems.

In order to understand the accuracy of the simulation results, prototype parts are produced, and the results are compared with the prototype parts. To carry out this comparison, firstly shrinkage allowance of the parts after forming is examined.

In order to measure the shrinkage allowance in the prototype parts, markings are made on specific parts of the pot, the distances between these marks and the final part were measured and the difference between the shrinkage allowances in the simulation results is examined. Then, produced prototype parts are scanned, and shrinkage

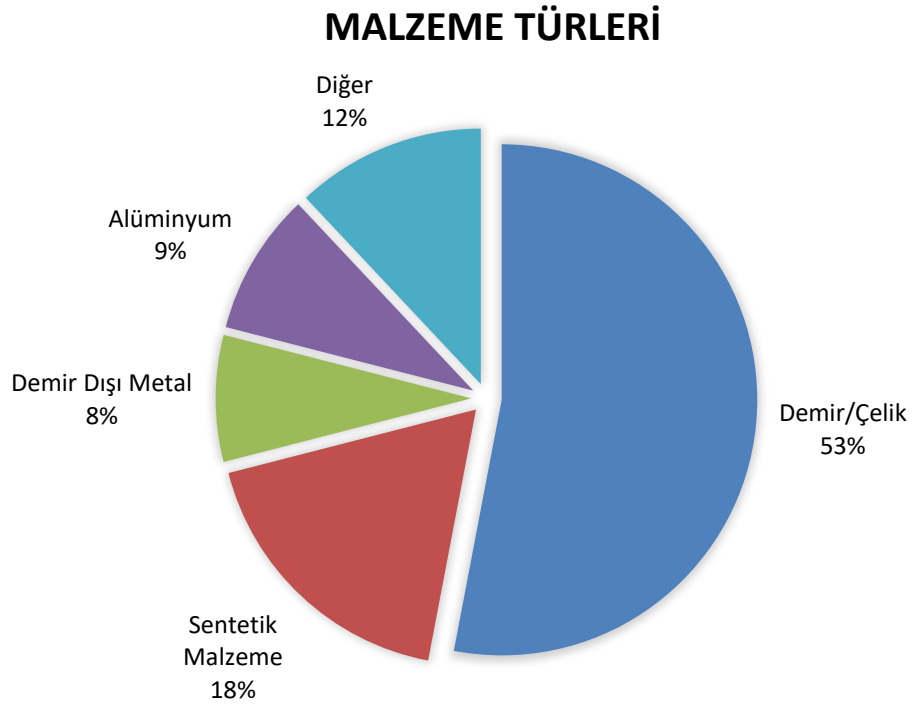
allowance accuracy of sheet metal parts is compared with the results of the simulation data. According to the data obtained, the pressure dependent friction coefficient is found to be more accurate.

Keywords: Advanced high strength steel materials, pressure dependent friction coefficient, sheet metal forming, Fortiform 1050 steel, finite element analysis, Autoform.



1. GİRİŞ

Otomobiller günlük yaşantımızın önemli unsurlarından biri olarak karşımıza çıkmaktadır. Günümüzde birçok farklı kasa türünde, farklı büyüklükte ve modelde otomobiller kullanılmakta ve her bir otomobil irili ufaklı binlerce parçadan oluşmaktadır. Bu parçalar genellikle metal malzemelerden yapılmakla birlikte diğer malzeme türlerinden (örneğin: plastik, kompozit, ahşap, kauçuk, iplik, kumaş, sünger ve benzeri) yapılan parçalar da bulunmaktadır. Şekil 1.1’de gösterildiği üzere metal malzemeler, otomobillerde kullanılan malzeme çeşitleri göz önünde bulundurulduğunda en büyük kullanım oranına sahip olan malzeme türleridir. [1].



Şekil 1.1 : Otomobillerde kullanılan malzemelerin dağılım yüzdeleri [1].

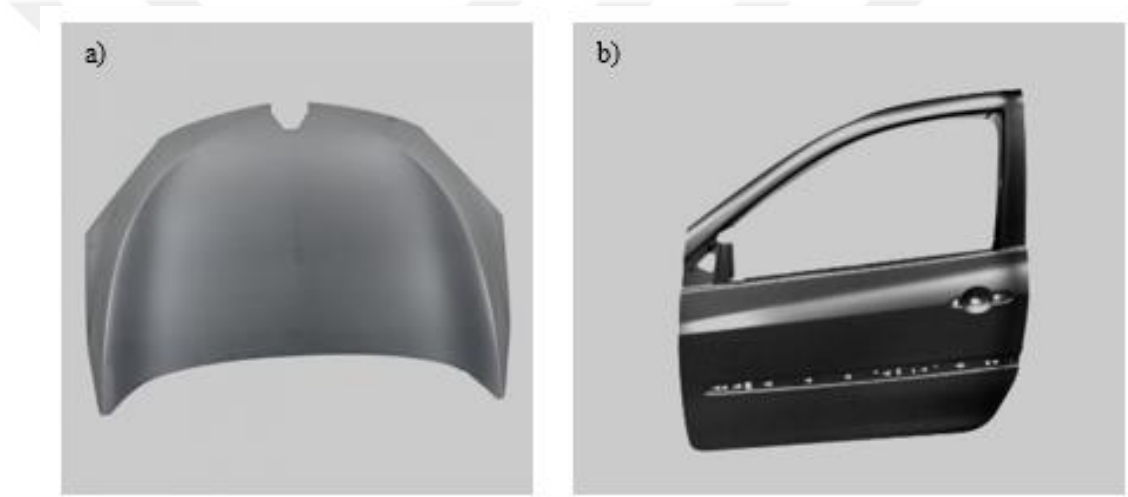
Otomobili oluşturan metal parçaların çoğu, sacların pres altında soğuk şekillendirilmesiyle oluşturulur. Sac parçaların şekillendirilmesinde pek çok farklı yöntem kullanılmaktadır.

Bunların başlıcaları şunlardır:

- Delme
- Kesme
- Derin çekme
- Bükme

Bu metotlar kendi içlerinde alt başlıklara ayrılmaktadır.

Saclar, başta gövde olmak üzere birçok otomobil parçasının yapımında kullanılmaktadır. Koltuk rayı, motor kaputu, sütunlar, çamurluk, ön ve arka kapı, tampon kirişi, çarpışma kutusu vb. sac malzemedен üretimi gerçekleştirilen motor kaputu ve araç kapısı Şekil 1.2'de gösterilmektedir.



Şekil 1.2 : Sac metal malzemedен üretilen parçalar: a) motor kaputu b) kapı [2].

Günümüzde artarak devam eden ekolojik kaygılar, araç-yolcu güvenliği ve yakıt ekonomisine yapılan vurgu, araç üreticilerini önemli bir değişken olan malzeme seçiminde değişiklikler yapmaya zorlamaktadır. Bu amaçla çelik endüstrisi, çelik malzemelerin değişen gereksinimlere uyum sağlayabilmesi adına otomotiv endüstrisi için çeşitli çözümler sunmaktadır. Bu açıdan değerlendirildiğinde, İleri Yüksek Mukavemetli Çelikler, otomotiv uygulamaları için iyileştirilmiş güvenlik ve optimize edilmiş çevresel performansa sahip düşük maliyetli ve hafif parçaların geliştirilmesi için bir fırsat sunmaktadır.

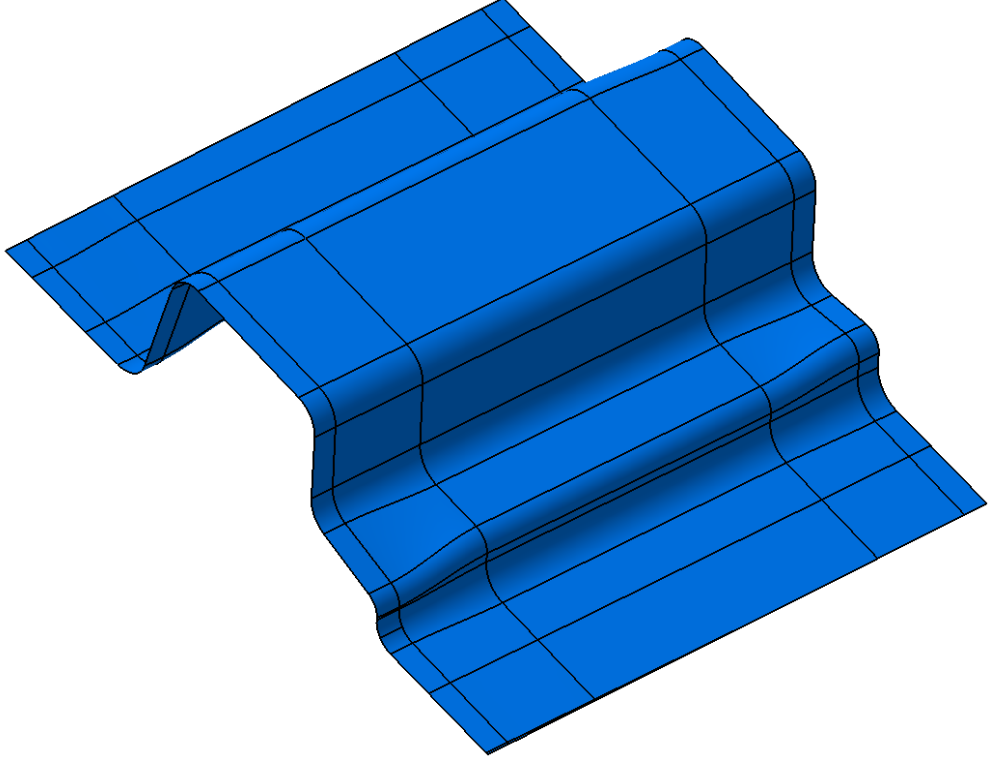
İleri yüksek mukavemetli çelik sınıfında yer alan 3. nesil çelikler, önceki nesille ilişkili yüksek maliyet sorunlarını ortadan kaldırarak otomotiv araç tasarımcılarının ve preste şekillendirme yapan üreticilerin karşısına çıkmaktadır. Bununla birlikte, çeliklerin şekillendirilebilirliğinin, mukavemet arttıkça azaldığı iyi bilinmekte ve bu durum yeni

geliştirilen üçüncü nesil yüksek mukavemetli çelikler için de geçerli olmaktadır. Şekillendirilebilirlikteki önemli düşüşün yanı sıra, yüksek dayanımlı sac metal bileşenlerin tanımlanması ve geliştirilmesinde şekillendirme sonrası artan geri yaylanma en büyük teknolojik problemlerden biridir. Bu malzemeleri kullanırken, geri yaylanma dengelemesi için gerekli olan telafi çalışmalarında harcanan aşırı hazırlık zamanı ve telafi çalışmaları sonrasında meydana gelen fizibilite problemleri endüstriyel üretim açısından sorun oluşturmaktadır.

Bileşenlerin son geometrisini sayısal olarak tahmin ederken mümkün olduğunca yüksek doğrulukta sonuçlara ulaşabilmek adına iki ana husus dikkate alınmalıdır. Bu hususlar; sac parçanın malzeme modeli ve kalıp ile malzeme arasındaki sürtünmeye bağlı kısıtlayıcı kuvvetlerdir. Bu iki ana husus ne kadar doğru girilirse sonlu elemanlar çıktısı da gerçeğe bir o kadar yakın olmaktadır.

Sürtünme katsayısı, sayısal simülasyonlarda dikkate alınması gereken önemli bir parametredir. Sürtünme katsayısı, kalıp elemanları arasındaki malzeme akışının kısıtlayıcı seviyesini etkiler ve bu parametrenin yanlış bir tanımı, istenmeyen kopmalara, yetersiz deformasyonlara ve dahası beklenmedik geri yaylanma fenomenleri oluşturabilir. Daha düşük bir sürtünme katsayısı, düşük stres durumlarını indükler ve bunun sonucu olarak daha yüksek elastik iyileşme sağlar. Bu nedenle, sayısal simülasyon yoluyla bileşenin son geometrisini yüksek doğrulukta tahmin etmek için sürtünme katsayısının doğru bir şekilde tanımlanması gereklidir.

Bu çalışmada 3. Nesil İleri Yüksek mukavemetli çelik sınıfında yer alan ve ticari olarak yeni duyurulan Fortiform 1050 malzemesinin preste şekillendirme koşulları altındaki davranışı incelenmiştir. Sac malzemenin şekillendirilmesine etki eden önemli faktörlerden biri olan sürtünme katsayısı deneysel yöntemler ile elde edilmiştir. Çalışmaya konu olan destek parçasının tasarımı CATIA V5 isimli tasarım yazılımında gerçekleştirilmiştir. Aynı şekilde, çalışmada kullanılan destek parçasının üretimi için gerekli olan kalıpların tasarımı da CATIA V5 tasarım yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Destek parçasının 3 boyutlu modeli Şekil 1.3'de verilmiştir. Parçanın tasarımı gerçekleştirilirken otomobillerde dayanımın ön planda tutulduğu yapısal parçalardan esinlenilmiştir.



Şekil 1.3 : Parçanın 3-D modellemesi

Parçanın üretimi için kullanılacak olan kalıp elemanları Autoform analiz programına aktarılarak deneysel olarak elde edilen sürtünme katsayısı, bu kalıp elemanları ile sac parçanın üzerine tanımlanmıştır. Ayrıca tasarımı yapılan parçanın prototip üretimi gerçekleştirilerek Autoform analizi ile elde edilen sonuçlar ile kıyaslaması ve değerlendirilmesi yapılmış böylelikle hem sanal hem de gerçek ortamda doğrulaması sağlanmıştır.

1.1 Tezin Amacı

Bu çalışmanın amacı 3. Nesil İleri Yüksek mukavemetli çelik sınıfında yer alan ve ticari olarak adını ArcelorMittal firması tarafından yeni duyuran Fortiform 1050 çelik malzemesinin preste şekillendirme koşulları altındaki davranışını tespit etmek ve iki farklı sürtünme teorimi kullanarak sürtünme katsayısının şekillendirmeye ve geri esnemeye olan etkisini incelemektir. Ayrıca bu çalışma, ileride yapılacak bilimsel çalışmalar ve Fortiform 1050 çelik malzemenin kendine yer bulduğu çeşitli endüstriyel uygulamalara ışık tutması amacıyla gerçekleştirilmiştir.

1.2 Literatür Araştırması

Tez çalışma konusuyla ilişkili olan ve referans oluşturabilecek literatürde yer alan çalışmalar incelenerek bazıları aşağıda ifade edilmiştir:

Ramezani ve Ripin yaptıkları çalışmada AA 6061-T4 sac metalinin V bükme prosesindeki geri esneme davranışını anlamak için Stribeck sürtünme modelini incelemiş ve Coulomb sürtünme modeli ile kıyaslamıştır. Çalışma deneysel ve numerik olarak yapılmış olup numerik analiz için ABAQUS/Standard sonlu eleman yazılımı kullanılmıştır. Çalışma sonunda Stribeck sürtünme modelinde Coulomb modelinden farklı olarak normal yükleme ve artan kayma hızı ile kinetik sürtünme katsayısı azaldığı görülmüştür. Bunun yanı sıra simülasyon verileri üzerinden yapılan doğrulamaya göre Stribeck sürtünme modelinin Coulomb sürtünme modeline göre zımba yükleme-yol eğrisi ile geri yaylanmayı daha iyi belirlediği görülmüştür. Coulomb sürtünme modelinde hata %14 iken Stribeck modelinde yalnızca %9 olarak gerçekleşmiştir [3].

Hol ve arkadaşları, yaptıkları çalışmada büyük ölçekli şekillendirmeleri simüle edebilmek için mikro ölçekte yüzey değişimini baz alan bir sürtünme modeli geliştirmiştir [4].

Tisza, yaptığı çalışmada özellikle otomotiv sektörü için büyük önem arz eden sac metal şekillendirme alanındaki güncel çalışmaları incelemiştir. Çalışma sonucunda günümüze kadar otomotiv sektörü için en önemli malzemenin çelik olduğu görülmüştür. Fakat çağın değişen koşulları hafif alaşımların kullanımını önemli kılmıştır. Bu sebeple alüminyum ve magnezyum alaşımlarının kullanımı artmaya başlamıştır [5].

Zöller ve arkadaşları, gerçekleştirdikleri çalışmada FE-simülasyon programı Autoform' da sayısal ve deneysel testlerle basınca bağlı sürtünme modelini kalibre etmişler ve doğrulamışlardır. Bu basınca bağlı yaklaşımın, sac metal şekillendirme işlemlerinin simülasyonunda evrensel bir kullanılabilirlik için iyi bir potansiyel olduğunu ortaya koyduğu belirtilmiştir. Yapılan araştırmalar, modelin kalıpta şekillendirme kuvveti eğrileri tarafından kalibre edilmesinin mümkün olduğunu ve değişen boşluk tutucu baskılara sahip simülasyonlardaki maksimum kalıpta şekillendirme kuvvetlerinin daha iyi bir tahmin doğruluğunun elde edilebileceği gösterilmiştir [6].

Steinmetz ve Felder, yaptıkları çalışmada yeni bir düz sac kalıbının test sürtünme sonucunu kontrol eden bir araç geliştirmiştir. Çalışma hem numerik hem de deneysel olarak gerçekleştirilmiştir. Sürtünme ile zımbalama prosesi arasındaki ilişki gözlenmiştir. Sıcak daldırma galvanizli çelik için deneysel olarak statik Coulomb sürtünme katsayısı elde edilmiştir. Daha sonra numerik simülasyonda kullanmak amacıyla deneysel verileri baz alan bir bölgesel sürtünme kanunu oluşturulmuştur. Burada elde edilen veriler sürekli Coulomb sürtünme katsayısı verileri ile mukayese edilmiştir [7].

Kudo ve Azushima, sürtünme katsayısının temas basıncına bağlı olduğunu [8], Dohda ve Wang bağıl kayma hızının etkilerini [9], Emmens ise kalıplar ve sac plakalar arasındaki kayma uzunluğunun etkilerini araştırmıştır [10].

Stebut, derin çekme işleminde uygulanan yük tarafından çelik sacların yüzey profilinin zarar gördüğünü ve bu hasarın sac plaka yüzey pürüzlülüklerinin kesilmesine karşılık geldiğini belirtmiştir [11].

Wang ve arkadaşları, FEM simülasyonu ile sac şekillendirmede kalıplar ve yağlanmış çelik plakalar arasındaki temasın durumunu araştırmışlardır [12].

Ma ve arkadaşları, metal şekillendirmede pürüzlü yüzeylerin düzleşmesini hesaplamış ve nominal basıncın bir fonksiyonu olarak temas alanı oranının arttığını gözlemlemişlerdir. Takım elemanları ve sac plaka arasındaki bağıl kaymanın hem temas alanı oranının hem de nominal basıncı arttırabildiğini ortaya koymuşlardır. Bu çalışmalar; sürtünme katsayısının, sac plakanın ve kalıp elemanlarının yüzey pürüzlülüğüne bağlı olduğu gerçeğini açıklamıştır [13].

Metal şekillendirmenin FE analizi için sürtünme katsayısı modelleri de önerilmiştir. Örneğin, Wilson ve arkadaşları, temas basıncına ve kayma hızına ek olarak ortalama kayganlaştırıcı film kalınlığı, tabaka pürüzlülüğü ve takım pürüzlülüğü gibi iç ara birimsel değişkenler cinsinden ifade edilen bir sürtünme modeli önermiştir [14].

Nakamura ve arkadaşları, 270 MPa gerilme mukavemetli kaplanmış çelik levhaların sürtünme testlerini gerçekleştirmiş, gerilme ve kayma uzunluğu değişkenlerini içeren bir polinom denklem ile tarif edilen bir sürtünme katsayısı modeli önermiştir [15].

Hildenbrand ve arkadaşları, temas basıncı ve sürtünme değişkenlerini içeren doğrusal olmayan sürtünme katsayısı modelini önermiş [16], Hashimoto ve arkadaşları, yapmış oldukları çalışmada sürtünme katsayısını Coulomb'un sürtünme kuramına dayalı FE

analizinden daha yüksek doğrulukla tahmin etmek için temas basıncının ve kayma uzunluğunun dikkate alınmasının önemli olduğunu göstermiştir [17].

Ma ve Sugitomo, temas basıncı, hız, kayma uzunluğu ve sürtünmenin etkilerini dikkate alan doğrusal olmayan sürtünme katsayısı modelini geliştirmişlerdir. Yapılan çalışmalar sonucunda kayma uzunluğu arttıkça sürtünme katsayısında arttığı gözlemlenmiştir [18].

Sürtünme katsayısının plastik deformasyonun bir fonksiyonu olarak değiştiğini ortaya koyan Kaftanoğlu, oda sıcaklığında doğrusal olmayan ekstrapolasyon ve manuel genleme ölçümleri ile sürtünme katsayısı hesaplamaları gerçekleştirmiştir. Gerdirme şekillendirmesindeki sürtünme katsayılarının, radyal çekmeden çok daha yüksek olduğu belirtilmiştir [19].

3D sonlu eleman modellerini kullanarak sac metal şekillendirme işlemi sırasında topografyada meydana gelen malzeme deformasyonunun simülasyonunu gerçekleştiren Schmoeckel ve arkadaşları, ayrıca değişimin sürtünme üzerindeki etkisini araştırmıştır [20].

Kalkan ve arkadaşları, derin çekme prosesinde yer alan zımba/sac metal ve dişi/açınım sacı arasındaki iki bölge için sürtünme katsayısını incelemişlerdir. Her iki bölge içinde sürtünme katsayı değerleri benzer aralıkta elde edilmiştir [21].

Çavuşoğlu, yaptığı çalışmada deformasyon hızının ve malzemenin şekillendirme işlemi üzerine etkisini incelemiştir. Çalışma kapsamında DP600 ve DP780 sac parçalar kullanılmıştır. Sac parçalara malzeme özelliklerini belirlemek amacıyla 0, 45, 90 derecelik hadde yönlerinde ve farklı deformasyon hızlarında çekme testleri tatbik etmiştir. Elde edilen bu veriler ışığında Autoform programı aracılığıyla parçaların şekillendirilebilirlik analizleri yapılmıştır. Yapılan analizler sonucunda deformasyon hızı arttıkça sacın etek bölgesinde kalınlaşma görülürken, üst bölgelerde incelme gözlenmiştir. DP780 çeliğinde DP600 çeliğine göre daha az kalınlaşma olduğu gözlenmiştir. Deformasyon hızındaki artışın şekillendirme kuvvetini ve geri esneme miktarını arttırdığı tespit edilmiştir. Fakat silindirik çekme işleminde deformasyonun en yoğun olduğu büküm noktalarında esnemenin çok az olduğu ortaya çıkmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda deformasyon hızındaki artışın sacın deformasyona uğrayan bölgelerinde pekleşme gerilmesine çok fazla etki etmediği ortaya çıkmıştır [22].

Giuliano, yaptığı çalışmada sac metal şekillendirme için Coulomb sürtünme katsayısının tespitinde nümerik ve deneysel yöntemlerin sonuçlarını mukayese etmiştir. Çalışma kapsamında Cassino Üniversitesinde geliştirilmiş test araçları kullanılmıştır. Çalışmada deney numunesi olarak DC 05 çelik sac kullanılmıştır. Numuneler önce yağlanmamış, sonra LB4 cinsi yağı kullanılarak test edilmiştir. Test sonucunda yağsız durum için Coulomb sürtünme katsayısı 0.29 iken LB4 yağının kullanılması durumunda 0.17 olarak gözlenmiştir. Erichsen testinin iki simülasyonu da bu değerler üzerinden gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonucunda özellikle LB4 yağının kullanılması durumunda deneysel ve nümerik kıyaslamaların iyi sonuç verdiği söylenebilir [23].

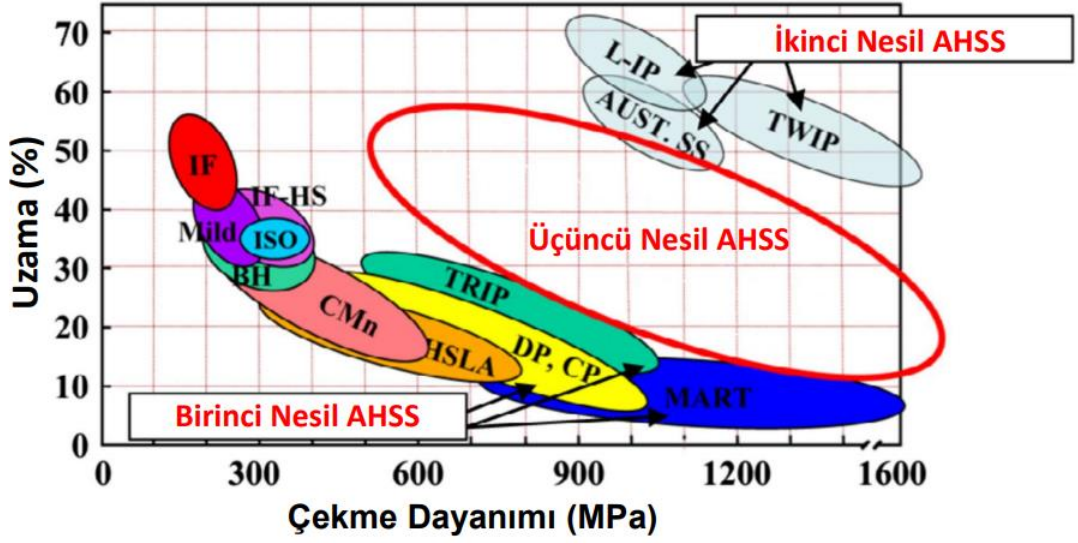
Çalışma kapsamında kullanılan 3. nesil ileri yüksek mukavemetli çelik malzeme ile ilgili olarak literatürde yalnızca iki adet çalışmaya rastlanmıştır. Bahsi geçen çalışmada Galdos ve arkadaşları, üçüncü nesil Fortiform 1050 çeliğinin hadde düzleme prosesini sayısal olarak analiz etmişlerdir. Proses, MSC MARC yazılımı ve iki farklı malzeme kanunu kullanılarak incelenmiştir. Saf izotropik sertleştirme kanunu kullanılmış ve temel çalışma olarak belirlenmiştir. Fortiform 1050 çeliğin döngüsel davranışını analiz etmek için çekme-basma testleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen verilerle, birleşik izotropik kinematik sertleştirme formülasyonu kullanılarak yeni bir malzeme modeli oluşturulmuştur. Son olarak, malzeme modelinin sayısal sonuçlardaki etkisi, saf izotropik model ve daha sonra birleştirilmiş karma sertleştirme modeli karşılaştırılarak analiz edilmiştir [24].

Argandona ve arkadaşları, yaptıkları çalışmada 3. Nesil 1050 çeliğinin elasto-plastik davranışını döngüsel çekme-basma testleriyle incelemiştir. Aynı zamanda plastik genişleme ile pseudo elastik modülünün değişimini incelemiştir. U-çekme prosesinin analiz edilmesi için farklı kontak basınç değerlerinde çekme testleri yapılmış, deneysel verilere Filzek modeli uygulanmış ve Autoform yazılımında çeşitli analizler yapılmıştır. Çalışma sonucunda parçanın son geometrisini en iyi belirleyen modelin yalnızca pseudo elastik modülün değişimini baz alan young malzeme modeli olduğu görülmüştür. Ayrıca basınca bağlı sürtünme katsayısının kullanımının analiz edilen tüm malzeme modelleri için geri yaylanmayı arttırdığı görülmüştür [25].

1.3 İleri Yüksek Mukavemetli Çelikler (AHSS)

Bir aracın ağırlığını azaltmak, yakıt verimliliğini iyileştirmek ve sera gazı emisyonlarını azaltmak için etkili bir yoldur. Bununla birlikte, dikkate alınması gereken potansiyel güvenlik sorunları vardır. Örneğin, toplam araç ağırlığındaki her %10'luk bir azalma için ortalama %4.9 oranında yakıt tasarrufu sağlanabilir [26], ancak bir taşıtın ağırlığında 100 kg'lık bir düşüşle güvenlik riskinde %3–4,5'lük bir artışa neden olabilir [27,28]. Otomotiv üreticileri, hem gelişmiş yakıt ekonomisi hem de çarpışma güvenliği hedeflerini dengelemelidir. Çelik endüstrisi, bu gibi amaçlara cevap verebilmek için, otomotiv endüstrisinin güvenlik, verimlilik, emisyonlar, üretilebilirlik, dayanıklılık ve kalite gereksinimlerini karşılamasını sağlayan benzersiz metalürjik özelliklere ve işleme yöntemlerine sahip nispeten düşük maliyetle yeni ileri yüksek mukavemetli çelikler (AHSS) geliştirmektedir [29,30]. Bu yeni çelik sınıfları üzerinde dünyanın dört bir yanındaki pek çok grup, uygulamalarını daha iyi anlamak ve benzersiz karakteristiklerini daha uygun hale getirmeye devam etmek için araştırmalar yapmaktadır. Dört kapılı bir araç gövdesindeki geleneksel çeliklerin yerini ileri yüksek mukavemetli çelikler aldığı zaman, ağırlığın %25'inde ve maliyetin %14'ünde tasarruf etmek mümkündür [31]. Taşımacılık sektöründeki enerji tüketiminin, 2012 yılında 267 katrilyon İngiliz sıcaklık birimi (Btu) seviyesinden 2040 yılında 2540 katrilyon Btu seviyesine gerilemesi, hafif ticari araçların enerji tüketiminde önemli bir düşüş yaşanması nedeniyle sera gazı emisyonunu azaltacağı ve fayda sağlayacağı bildirilmiştir [32]. Dünya Çelik Birliği tarafından bildirilen [33] bir çevresel vaka çalışmasına dayanarak, beş kişilik bir aile arabasında her 1 kg'lık AHSS'nin kullanılması, toplamda 8 kg'lık sera gazı (CO₂ eşdeğerleri olarak rapor edilmiştir) tasarrufu sağlayabilir. AHSS'lerin toplam otomotiv çeliklerine oranının 2009 yılında %7'den 2020 yılında %28-36'ya çıkarılacağı tahmin edilmektedir [34]. AHSS'ler parlak bir geleceğe sahiptir ve mükemmel performansın ve rekabetçi maliyetin eşsiz birleşimi nedeniyle 21. yüzyıldaki araçlar için en çok umut verici materyaller olarak görülmüştür.

Farklı gelişim aşamalarına dayanan AHSS'ler genellikle üç jenerasyona ayrılırlar [35]. Şekil 1.4'deki çekme dayanımına karşı uzama grafiğinde 3. nesil AHSS'nin dağılımlarını göstermektedir [36].



Şekil 1.4 : Çekme dayanımına karşı uzama grafiğinde 3. nesil AHSS'nin dağılım grafiği [36].

1.3.1 Birinci nesil ileri yüksek mukavemetli çelikler

Birinci nesil AHSS'ler, çift fazlı (DP) çelik, dönüşüm etkili yoğrıklı çelikler (TRIP) çeliği, karmaşık faz (CP) çelik ve martenzitik (MART) çeliği içerir. Bu çelik kaliteleri, geleneksel yüksek mukavemetli çeliklere kıyasla maliyette önemli bir artış olmadan daha yüksek mukavemete ve daha iyi süneklığe sahip parçalar üretilmesine olanak sağlamaktadır ve otomotiv endüstrisinde birçok uygulamada kullanılmaktadır. Günümüzde DP çeliklerinin çekme dayanımı 590 MPa ile 1400 MPa arasında değişmektedir. Bu çelikler otomobillerin çarpışma kutularında, A sütunu, B sütunu ve tavan destek saclarında kullanılmaktadır [37]. TRIP çeliklerinin çekme dayanımı 590 ile 1180 MPa arasında değişmektedir. Otomobillerde travers ve ön ve arka raylarda kullanılmaktadır [37]. CP çeliklerin çekme dayanımı 800 ile 1180 MPa arasında değişmektedir [37]. CP çelikleri genel olarak Avrupa'da otomobillerde çarpışmaya karşı A sütunu, B sütunu ve marşpiyel sacı olarak tercih edilmektedir [37,38]. MART çelikleri en yüksek dayanıma sahip AHSS çelikleri olup çekme dayanımı 1900 MPa'a kadar ulaşabilir [36,37]. MART çeliklerine süneklilik artırımı için menevişleme işlemi uygulanıp, şekillendirilebilme yeteneği yüksek sertlikte olmasına rağmen artırılabilir [36]. Martenzitik çelikler otomobillerde oto-sürgü taban takviyeleri, kapı barlarında ve tampon takviye kirişlerinde kullanılmaktadır [38].

1.3.2 İkinci nesil ileri yüksek mukavemetli çelikler

İkizlenme - uyarılmış plastisite (TWIP) çeliği, östenitik paslanmaz çelik ve uyarılmış plastisite ile hafif çelikler (L-IP) ikinci nesil ileri yüksek mukavemetli çelik sınıfında yer almaktadır. Bu çelikler mükemmel şekillendirilebilirlik ve yüksek dayanımları sayesinde zor tasarıma sahip parçalarda ağırlık azaltımı için kullanılmaktadırlar. Ancak bu AHSS sınıfları, krom ve nikel gibi yüksek maliyetli alaşım elementleri ile yüksek oranda birleştirilmiştir. Bu da önemli oranda üretim maliyeti artışına neden olur ve bunların yaygın şekilde benimsenmesini engellemektedir [39].

1.3.3 Üçüncü nesil ileri yüksek mukavemetli çelikler

Otomotiv endüstrisi için üçüncü nesil ileri yüksek mukavemetli çelikler (AHSSs), yüksek mukavemet ile süneklik dengesini optimum seviyede tutacak çelik plakaların geliştirilmesinde daha ileri bir adımdır. Katı çözümlü sertleşmesi, çökme sertleşmesi, mikro alaşımlama, tane inceltme, gerinim yaşlanması ve transformasyon kaynaklı plastisite (TRIP) veya İkizlenme-Uyarılmış Plastisite (TWIP) çeliği etkilerinin karmaşık etkileşimini kullanırlar. Üçüncü nesil AHSS, çok fazlı yapıların (1. nesil AHSS için karakteristik) [40-45] ve östenitik fazın avantajlarını birleştirir, özellikle farklı sertleştirme mekanizmalarını, gerilme kaynaklı martenzitik dönüşümü ve mekanik ikizlenmeyi (2. nesil AHSS için karakteristik) geliştirmek için uygundur. [46-50]. İkinci nesil AHSS'ye ait olan östenitik çeliklerin uygulamaları mükemmel mekanik özelliklerine rağmen, muhtemelen çarpışma olayları sırasında enerjiyi emen özel olarak tasarlanmış geometriler için sınırlı olacaktır [51]. Bunun nedenleri arasında, zayıf döküm, 1150'nin üzerinde sıcak çalışma, korozyon direnci, Mn segregasyonu ve özellikle Mn'den kaynaklanan yüksek maliyet (% 20-30 arası), Al ve Si alaşımlama konsepti gibi çeşitli teknolojik problemler bulunmaktadır [46-50]. 3. nesil AHSS'in ana fikri, 1. nesil çelikler (DP, TRIP, CP) ile karşılaştırıldığında maliyeti biraz daha yüksekte 1. nesil ve 2. nesil AHSS arasında mekanik özellikleri elde etmektir [52-54].

1.4 Bilgisayar Destekli Tasarım

Bir parça ya da konstrüksiyon imalatı öncesinde üç boyutlu olarak modellenmesini sağlamak amacıyla bilgisayar destekli programlar (CAD) kullanılmaktadır. Sac metal, kalıp, makine imalatı, inşaat vb sektörlerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Otomotiv

sektöründe yaygın olarak CATIA, SolidWorks, AutoCAD, NX Siemens vb. CAD programları tercih edilmektedir (Şekil 1.5). Bu çalışmaya konu olan tasarımın oluşturulmasında CATIA programı tercih edilmiştir.

FİRMA	PROGRAM
TOYOTA 	 
GM 	
VOLKSWAGEN 	 
FORD 	
HYUNDAI 	 
PSA 	
HONDA 	
NISSAN 	
FIAT 	
SUZUKI 	
RENAULT 	
DAIMLER 	 
BMW 	 
MAZDA 	
CHRYSLER 	

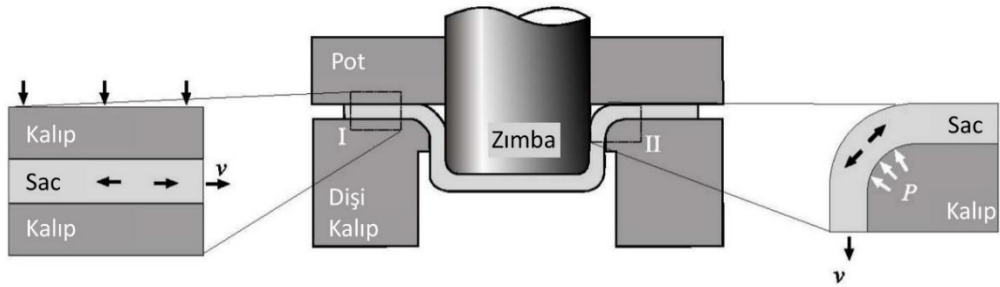
Şekil 1.5 : Otomotiv sanayilerinde kullanılan CAD programları [55].

CATIA programı hem bilgisayar destekli tasarımda hem de bilgisayar destekli imalatta kolay çizim komutları sağlaması ve etkileşimli analiz yapma imkanı sağlamasından dolayı en çok tercih edilen programlar arasında yer almaktadır. Türkiye’de yaygın olarak kullanılmakta olan SolidWorks ve AutoCAD programlarından farklı olarak CATIA, akışkanların da tasarımının yapılmasına olanak vermektedir. Köken olarak Fransızca’dan gelen CATIA “Conception Assistée Tridimensionnelle Interactive Appliquée” kelimelerinin baş harflerinin bir araya getirilmesiyle oluşturulmuştur. Fransız Dassault Systèmes firması tarafından 40 yılı aşkın süredir geliştirilmeye devam edilmektedir [56].

1.5 Sac Metal Şekillendirmesi (SMF)

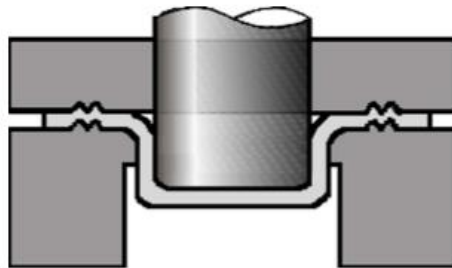
Sac şekillendirme işleminde, başlangıçta düz bir levha mekanik olarak deforme edilerek istenen şekil elde edilir. Birkaç farklı SMF süreci vardır, ancak en çok kullanılanlar bükme, gerdirme ve derin çekme işlemidir. Bükme, esnekliği nedeniyle çoğu montaj endüstrisinde bulunur ve ikincisi genellikle otomobil gövde panelleri ve gıda endüstrisi için teneke ve gövdelerin şekillendirilmesinde kullanılır. SMF sürecini optimize etmek ve başarılı bir şekillendirme operasyonu sağlamak için tribolojik ve mekanik koşullar çok önemlidir.

Hem gerdirme hem de derin çekme işlemlerinde, sac parçaları pot çemberi ile kalıp arasında sıkıştırılır. Derin çekme işleminde Şekil 1.6'da sunulduğu üzere levhaların pot çember alanından kalıp boşluğuna daha çok kaymasına izin verilir. Şekil 1.7'de gösterildiği üzere ise pot çember alanında daha az bir malzeme akışı bulunmaktadır [57].



Şekil 1.6 : Derin çekme proses prensibi [57].

Şekillendirme işlemi sırasında malzeme akışı, şekillendirilen parçanın geometrik sapmalarını azaltmak ve parçasının kırışmasını önlemek için kontrol edilmelidir. Kompleks kalıp elemanlarında veya yüksek kısıtlayıcı kuvvetlerin gerekli olduğu yerlerde, kalıp üzerinde bulunan yarı silindirik çıkıntılar olan süzdürme çubukları kullanılır. Açınım sacı süzdürme çubuğundan geçerken, ek bir kısıtlama kuvvetine yol açan bir bükülme, bükülmeme ve ters bükme işlemine tabi tutulur [58-64].



Şekil 1.7 : Gerdirme prosesi şematik gösterimi [57].

Şekillendirme işlemi sırasında, pot çemberi/kalıp ve sac parça arasındaki sürtünme ile elde edilen malzeme akışı, geometrik sapsmaları ve iş parçasının buruşmasını önlemek için kontrol edilmeli ve uygun malzeme akışı kısıtlayıcı kuvvet tarafından sağlanmalıdır.

1.5.1 Sac metal şekillendirme parametreleri

Sac metal şekillendirme prosesi, açınım sac boyutları, zımha şekli ve boyutu, açınım sac malzemesinin mekanik özellikleri ve kalıp yarıçapı gibi birçok parametreden etkilenmektedir.

a) Zımha (erkek) yarıçapı

Sac metal şekillendirmede, zımha açınım sacı üzerinde basınç uygular ve deformasyona neden olur. Zımha yarıçapı malzeme davranışı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir, fazla büyük yarıçap, sac parçanın sadece yarıçap etrafında gerilmesiyle sonuçlanırken, çok küçük zımha yarıçapı, kalıp ile zımha arasında plakanın yırtılmasına neden olur. Zımha yarıçapının uygun seçimi, malzeme özelliklerine ve açınım sacının malzeme çeşidine ve kalınlığına bağlıdır [65-67].

b) Kalıp (Dişi) yarıçapı

Pot çemberinin kullanıldığı yerdeki dişi kalıp profil yarıçapı, çekme işlemine tesir eden bir parametredir. Dişi kalıp yarıçapı çok küçük tutulduysa, bu yarıçap üzerinde sac parçanın daha zor bir şekilde bükülerek şekillendirilmesine neden olan yüksek kısıtlayıcı kuvvetlerin sonucunda malzeme yırtılması gerçekleşebilir. Ayrıca, bu zorlayıcı şekillendirme işlemi süresince büyük miktarda ısı oluşur. Bununla birlikte, açınım sacının buruşması, büyük bir dişi kalıp yarıçapının bir sonucu olarak ortaya çıkar [68].

c) Pot çemberi kuvveti (BHF):

Kalıpta malzeme akışına izin verilmemesi, aşırı gerilmeye ve nihayetinde açınım sacının yırtılmasına neden olur. Buna karşılık, yeteri kadar basınç uygulanmadan gerçekleştirilen şekillendirme prosesinde ise, açınım sacının buruşmasına neden olur. Bu yüzden, pot çember tutucu kuvvetinin optimum şekilde ayarlanması, şekillendirilen parçada yırtılmayı ve buruşmayı önleyebilir. BHF genel olarak pres taban sistemi tarafından veya gazlı yay ekipmanları kullanılarak uygulanır. BHF, kalıptaki malzeme akışını kontrol eder ve ürün kalitesini önemli ölçüde etkiler [69-75].

d) Çekme (şekillendirme) tonajı

Çekme tonajı, sac parçanın istenen şekle deforme edilmesi için gereken gücü sağlar. Önceden ayarlanmış çekme tonajındaki fazla varyasyon, bası gerilmelerindeki ilerleme ve açınım sacının tamamlanmayan deformasyonu gibi hatalarla sonuçlanabilir.

e) Pot / Tampon hareketi

Metal şekillendirmede, bir zımba tarafından uygulanan çevresel şekillendirme kuvveti, açınım sacını kalıp boşluğuna akmaya zorlar, oysa açınım sacı, akmaya karşı direnç gösterir. Açınım sacının akmaya karşı olan çok yüksek direnci, kalıbın kırılmasına neden olabilir. Pot ile zımba arasındaki mesafe, açınım sacının gerilmesini ve incelmesini etkiler. Açınım sacı pot üzerine uygun bir şekilde yerleştirildiğinde ve kalıp giriş yarıçapı doğru bir şekilde ayarlandığında, metal kalıba homojen şekilde girer ve boşluğa serbestçe akar. Pot / tampon hareketi gazlı yaylar veya presin tabanına bağlı tij milleri kullanılarak uygun şekilde ayarlanır.

f) Süzdürme çubuğu şekli ve yüksekliği

Süzdürme çubuğu malzeme akışını kontrol eden gerekli kısıtlama kuvvetini düzenler. Süzdürme çubuğu, pot kalıp yüzeyi üzerindeki bir çıkıntı ile eşleşen, dişi kalıp yüzeyinde de oyuk olarak bulunan bir formdur. Süzdürme çubuğunun şekli, yüksekliği ve yönü parça geometrisine göre değişiklik gösterebilir. Pot ve dişi kalıp yüzeyleri kapatıldıktan sonra, sac parça süzdürme çubuğu üzerinden çekilir [65,72].

g) Malzeme özellikleri

Doğada bulunan her malzemenin kendine özgü fiziksel, kimyasal ve mekanik olarak farklı özellikleri bulunmaktadır. Malzemenin çekme, akma dayanımı, pekleşme üsteli, anizotropi katsayısı gibi parametler sacın şekillendirilmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Örneğin, sac metal malzeme şekillendirme esnasında etki eden gerilmedeki artış ile plastik şekil değişimi ve sertleşme meydana gelmektedir. Sac malzeme bölgesel olarak şekil değişimine uğradığı alanda meydana gelen pekleşmeden dolayı dayanım artar, bu bölgedeki şekil değişimi durur ve parçanın diğer bölgelerdeki plastik şekil değişimi başlar. Malzemelerin akma dayanımı genellikle artan deformasyon hızları ile artmakta ve plastik deformasyon oluşumunu zorlaştırmaktadır. Yüksek mukavemetli çeliklerin hadde yönünde göstermiş oldukları

duyarlılık yani anizotropi farklılaşmaları da sac metal malzemelerin şekillendirilebilirliğini etkilemektedir.

h) Sürtünme katsayısı

Sürtünme, kalıp elemanlarının ve sacın yüzey kalitesi ile bağıntılı olarak oluşan ve parça fizibilitesine önemli ölçüde etki eden şekillendirme faktörlerinden biridir. Kalıp ve açınım sacı arasındaki sürtünme, sac malzemenin şekil verme kabiliyetini etkiler. Kalıbın yüzeyleri ve açınım sacı temasa girdiğinde en yüksek temas alan oranı oluşur ve daha büyük sürtünme gerilmeleri ile sonuçlanır. Sürtünme ayrıca kalıp yüzeylerinin zamanla aşınmasına katkıda bulunur.[65,68,73].

Sac şekillendirme işlemleri sırasında, kalıp elemanları ve iş parçası temas halindeyken, malzemeler arasında teğetsel sürtünme kuvvetleri oluşur. Sac malzemenin şekillendirme başlangıcından itibaren, ürünün maliyeti/kalitesi ve kalıp çizilmesi sürtünmeden etkilendiğinden, yağlayıcılar aracılığıyla etkileri azaltılmalıdır [74]. Sac metal şekillendirme işlemlerini doğru bir şekilde analiz etmek için sonlu elemanlar metodu analizi (FEM) çoğunlukla kullanılır. FEM analizi, bu sac plakanın mekanik özelliklerini ve şekillendirme işlemi için kullanılan kalıp elemanları arasındaki sürtünmeyi içerir. Literatürde [75] açıklanan çeşitli sürtünme modelleri arasında Coulomb'un sürtünme modeli, sac plaka ve kalıp elemanları önemli ölçüde etkileşimde olduğunda soğuk şekillendirme işlemi için en uygun olanıdır.

Amontons tarafından belirlenen Coulomb sürtünme katsayısı modeli, Denklem 1.2 e göre, sürtünme kuvveti ve normal yük arasındaki doğrusal orantı denkleminde karşılık gelir [76]. Bu nedenle, bu çift kuvvete bakılarak (sürtünme kuvveti; normal kuvvet) sürtünme katsayısı değerinin tahminine izin verir.

$$F_s = \mu F_n \quad (1.2)$$

Denklem 1.2'de görüleceği üzere F_n normal kuvveti, μ sürtünme katsayısını ve F_s sürtünme kuvvetini ifade eder.

1.5.2 Sac metal şekillendirme analizi

Parçaların şekillendirme davranışının tespiti amacıyla çeşitli simülasyon programları kullanılarak sanal verilere göre doğrulama ve öngörü yapılmaktadır. Bu çalışmada otomotiv sektöründe ve sac metal şekillendirmenin önemli olduğu diğer sektörlerde de yaygın olarak kullanılmakta olan Autoform programı tercih edilmiştir. Yüksek

doğruluk elde etmek, hızlı çözüm yapabilmek ve kullanım kolaylığı sunabilme amacıyla kullanılan Autoform yazılım programı, sac metal şekillendirme ve kalıp endüstrisinde çoğunlukla belirtilen özellikleri nedeniyle tercih edilmektedir. AutoForm'da tüm yazılım modüllerinin entegre çalışması sayesinde sac parça için fizibilite ve maliyet amaçlı yapılan ilk çalışmalar için başlangıç oluşturur ve daha sonraki proses optimizasyonlarında kullanılmaya devam eder. CAD yazılımları ile entegre olarak çalışabilmektedir. Şekillendirme analiz programının kullanılması ile sac parça kalitesi yükseltilebilir, daha düşük maliyetli parça üretimi gerçekleştirilebilir, sac parça imalat prosesini analiz ederek imalat prosesi oluşturulabilir, daha kısa zamanda tasarım ve deneme çalışmaları gerçekleştirilebilir. Otomobil üreticilerinin en büyük 20 sinin %100 ü, 50 sinin %80 i Autoform şekillendirme analiz programını tercih etmektedir [77].

2. MATERYAL VE METOT

2.1 Malzeme Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi

Malzeme mekanik özelliklerin tespiti özellikle Autoform üzerinden yapılacak analizler için büyük önem arz etmektedir. Bu özelliklerin tam ve doğru şekilde elde edilip sac şekillendirme analize tanıtılması sonlu elemanlar çıktısını gerçek değerlere yakınsatacaktır. Bu sayede işin önemli bir kısmı bilgisayarlar üzerinden gerçekleştirilebilecektir.

Malzeme mekanik özellikleri; malzeme bileşenleri, akma dayanımı, çekme dayanımı, anisotropi katsayısı, pekleşme üsteli, elastisite modeli vb. birçok bileşenden oluşmaktadır. Çizelge 2.1’de Fortiform 1050 çeliğinin kimyasal bileşenleri ve mekanik özellikleri gösterilmektedir [25].

Çizelge 2.1 : Fortiform 1050 malzemesinin kimyasal bileşenleri ve mekanik özellikleri.

C	Mn	P	S	Si	Al	N	YS (MPa)	UTS (MPa)	A%
%0.2069	%2.1755	%0.0107	%0.0005	%1.4521	%0.0366	%0.0051	775	1235	10

2.2 Sürtünme Katsayısının Belirlenmesi

Sürtünme kuvveti, statik sürtünme kuvveti ve kinetik sürtünme kuvveti olmak üzere ikiye ayrılmaktadır (Şekil 2.1).



Şekil 2.1 : Kuvvet-Sürtünme eğrisinde statik ve kinetik sürtünme bölgeleri [78].

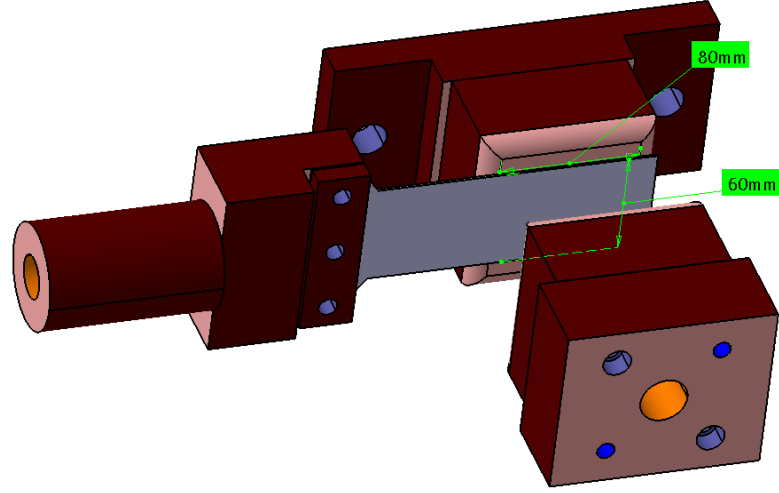
Sürtünme katsayısının tespit edilmesinde farklı teorik formüller kullanılmaktadır. Autoform, sac şekillendirme simülasyonlarında 3 farklı sürtünme formülasyonu seçeneği sunmaktadır. Bu 3 formülasyonun temelini Coulomb Sürtünme Teoremi oluşturmaktadır. Coulomb Sürtünme Teoremi parçanın statik sürtünme bölgesindeki değerini sürtünme katsayısı kabul ederek buna göre hesaplama yapmakta ve basıncın her yerde eşit olduğunu kabul eder, uygulanan normal kuvvete bağlı olarak sürtünme katsayısının hesaplanmasına olanak vermektedir. Ancak bir parçanın şekillendirme sırasında parça üzerine etkiyen tüm kuvvetler eşit olarak dağılmamasından ötürü daha doğru bir yakınsama yapabilmek adına Autoform’ da iki adet ek sürtünme modeli seçeneği bulunmaktadır. Bu modeller hıza bağlı ve basınca bağlı verilmekte ve Coulomb sürtünme katsayısını belli bileşenler ile çarpmakta ve buna göre sürtünme katsayısını yeniden hesaplamaktadır. Autoform’un 3 sürtünme modelini içeren formülasyonu Denklem 2.1 de verilmektedir.

$$\mu_{ef}(p) = \mu_0 \cdot \left(\frac{p}{p_0}\right)^{n-1} - \left(\alpha \ln \frac{\max(v_{rel}, v_{ref})}{v_{ref}}\right) \quad (2.1)$$

Belirtilen denklemde μ_0 referans sürtünme katsayısı, P basınç, P_0 referans basınç, n basınç çarpanı, μ_{ef} efektif sürtünme katsayısını, α hız faktörünü, v_{ref} referans hızı ve v_{rel} sac malzemenin kalıp elemanları ile temasındaki hızı ifade etmektedir. Bu çalışmada sac şekillendirmede prosesinde hız faktörünü göz ardı edildiğinden formülasyon Denklem 2.2 ye indirgenmektedir.

$$\mu_{ef}(p) = \mu_0 \cdot \left(\frac{p}{p_0}\right)^{n-1} \quad (2.2)$$

Basınca bağlı sürtünme katsayısının bulunabilmesi için farklı basınç değerlerinde sac sürtünme testi yapılması ve bu üç basınç değeri için uygun n ve P_0 değerleri bulunmalıdır. Bu değerleri bulabilmek ve sürtünme testlerini gerçekleştirebilmek adına Şekil 2.2’de gösterilen sürtünme test aparatından yararlanılmıştır. Sürtünme aparatı modellenirken Coulomb sürtünme teoremini göz önünde bulundurulmuştur. Bu test aparatında sürtünme numunesi, biri sabit diğeri hareketli olan iki adet çene arasına belirli bir kuvvet altında sıkıştırılmakta ve test numunesi tutan piston aracılığı ile belli bir hızda çekilmektedir.



Şekil 2.2 : Sürtünme aparatı tasarımı.

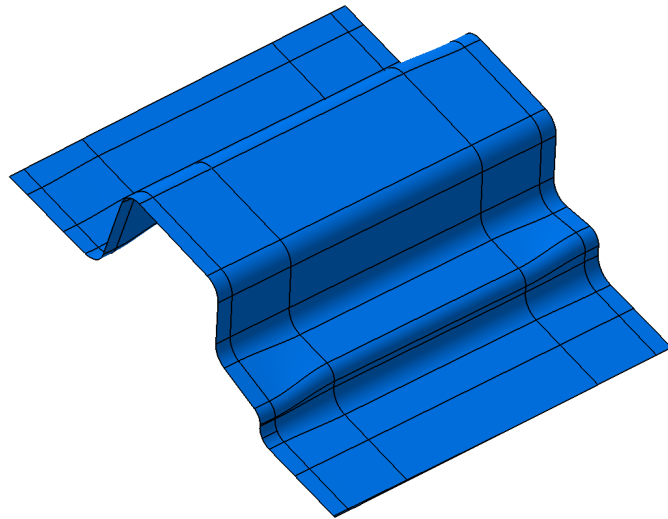
F_s , sürtünme kuvvetini ve F_n , normal kuvvet olmak üzere Denklem 2.3'e göre sürtünme kuvveti hesaplanmıştır. Denklemde F_s , sürtünme kuvvetinin ikiye bölünmesinin nedeni sac parçanın iki yüzey arasında sürtünmeye maruz bırakılmasından dolayıdır.

$$F_n = \left(\frac{F_s}{2\mu} \right) \quad (2.3)$$

Yapılan literatür araştırmasında Fortiform 1050 malzemesi için referans sürtünme katsayısı (μ_0) 0.15 olarak kabul edilmektedir [24].

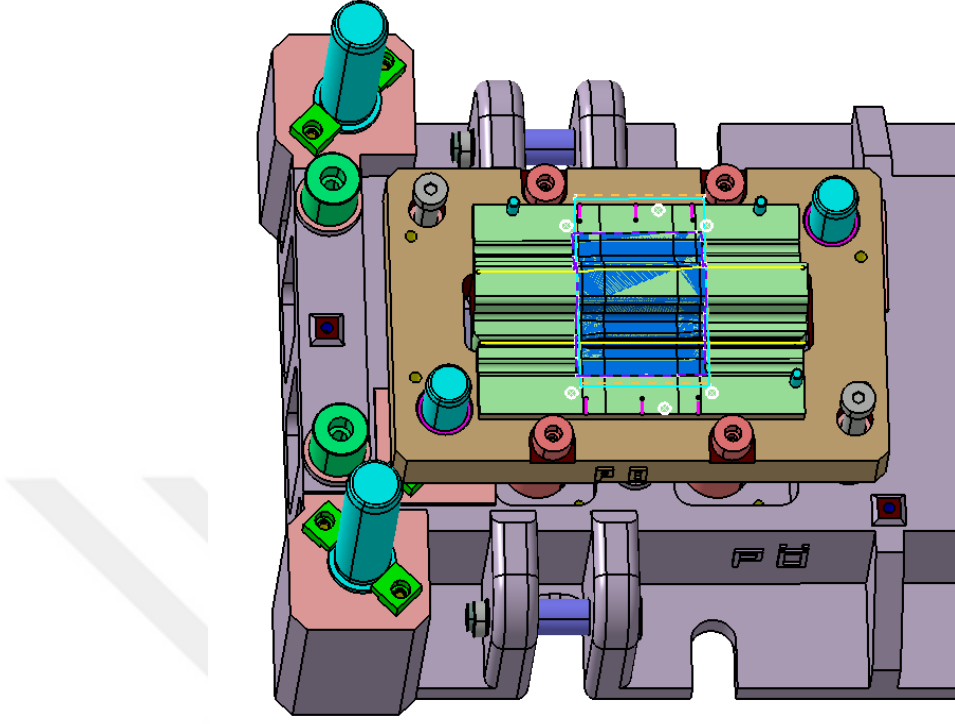
2.3 Parçanın ve Kalıbın Tasarımı

Fortiform 1050 malzemesinin preste şekillendirme koşulları altındaki davranışı incelenmek amacıyla referans olarak alınan destek parçanın tasarımı CATIA V5 programı kullanılarak tasarlanmıştır (Şekil 2.3).



Şekil 2.3 : Parçanın 3-D modellemesi.

Bu destek parçasının soğuk şekillendirme üretimi için gerekli olan kalıp tasarımı CATIA V5 programı kullanılarak modellenmiştir (Şekil 2.4).



Şekil 2.4 : Parçanın kalıp tasarımı.

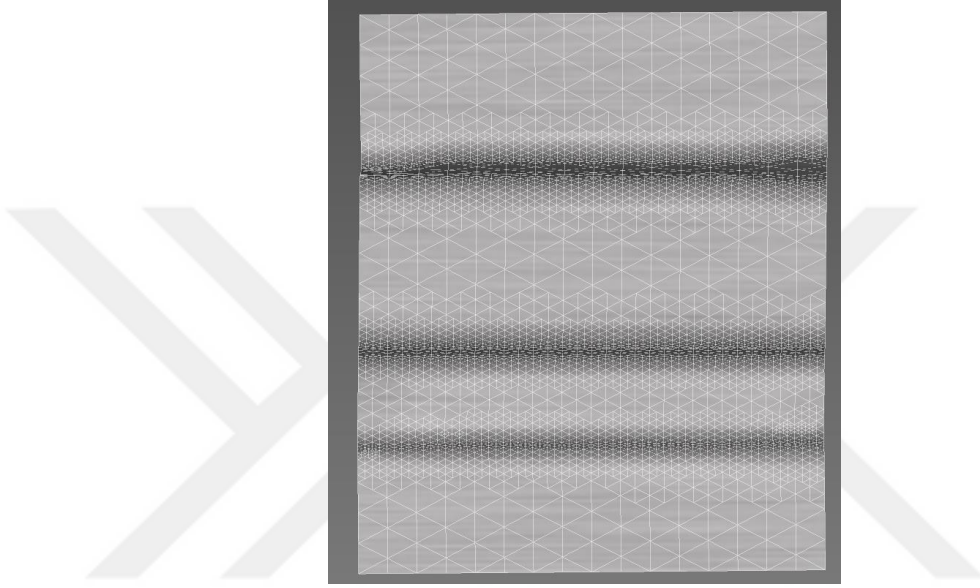
Sac kalıp tasarımı yapılırken simülasyon değerlerine uygun olarak hazırlanmasına dikkat edilmiştir. Özellikle yüksek mukavemetli çelik şekillendirildiğinden dolayı kalıp tasarımındaki pot tonajı ve pres kuvveti önem arz etmektedir.

2.4 Autoform Sac Şekillendirme Analizi

Parça şekillendirme analizini yapabilmek için Autoform programından yararlanılmıştır. Autoform sac metal ve kalıp sanayisi için geliştirilmiş yüksek doğruluğa ve güvenilirliğe sahip analiz programıdır. Autoform yazılımının kullanıcıya sağladığı başlıca faydalar şunlardır:

- Maliyetler azalır.
- Proses güvenilirliği artar.
- Deneme ve devreye alma süresini kısar.
- Üretilen parçanın red olma olasılığı azalır.
- Üretim hatlarının boşa bekleme süresi azalır.

Sonlu elemanlar analizlerinde en önemli adımlardan biri mesh işlemidir. Mesh'ler geometriyi oluşturan küçük hücrelerin her birine verilen addır. Mesh işleminin uygunluğu ve ana parçaya benzerliği analizin doğruluğunu ve sonuçların keskinliğini doğrudan etkilemektedir. Autoform programı pek çok farklı mesh cinsinden biri olan tetragonal cinsi mesh kullanmaktadır. Bunun nedeni keskin hatlı geometrilerde quad cinsi meshlerin yapımına uygun olmamasıdır. Şekil 2.7'de Autoform'da mesh işlemi gerçekleştirilmiş destek parçası gösterilmektedir.



Şekil 2.7 : Autoform'da mesh işlemi gerçekleştirilmiş destek parçası.

Sac parça hakkındaki girdi tanımlamaları yapıldıktan sonra uygun üretim yöntemi simülasyon programında seçilmelidir. Uygun üretim yöntemi seçildikten sonra kalıp elemanları ve sınır şartlarının üretim alanında gerçekleşecek olan koşullar ile aynı şekilde girilmesi gerekmektedir. Bu koşullar; kalıp elemanlarında ki boşaltılar, tampon kuvveti, tampon yüksekliği, açınının konumu, hadde yönü vb. sınır şartları olarak tanımlanabilir.

Autoform programında üretim koşullarında tanımlandıktan sonra simülasyon koşturularak sonuçlar elde edilir. Parça fizibilitesi incelenerek kalıp elemanları üzerinde revizyonlar yapılır. Bu revizyon işlemleri uygun parça üretimi gerçekleşene kadar tekrarlanır.

2.5 Geri Esneme Analizi

Çekme operasyonundan sonra şekillendirmenin geri esneme üzerindeki etkisinin tespit edilmesi amacıyla şekillendirilen parça ATOS programı ile taranacaktır. Tarama

işleminin gerçekleştirilebilmesi için normalde çatlak kontrolünde kullanılan Beta BT70 sprej boyası ile yüzeyler boyanacak ve etrafına markör adı verilen işaret parçaları konumlandırılacaktır. Bu sprej boyasının seçilme amacı parlak yüzeyleri matlaştırarak tarama yapılmasına daha uygun hale getirmesidir. Markörlerin konumlandırılmasının amacı ise; tek seferde 360° taranamayan parça için çeşitli bölgelerden referanslar oluşturularak bu referanslar sayesinde bölgesel taramaların bir bütün haline getirilmesidir.



3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1 Malzeme Mekanik Özellikleri

Malzemenin genel mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla Fortiform 1050 çelik malzemesine Şekil 3.1 (a)'da gösterildiği üzere çekme testi ve Şekil 3.1 (b)'de gösterildiği üzere sertlik testi uygulanmıştır. Çekme testi ile malzemenin elastisite modülü, akma mukavemeti, çekme mukavemeti, uzama gibi birçok kritik değer elde edilirken sertlik testi ile malzemenin Rockwell cinsinden sertliği elde edilmiştir.

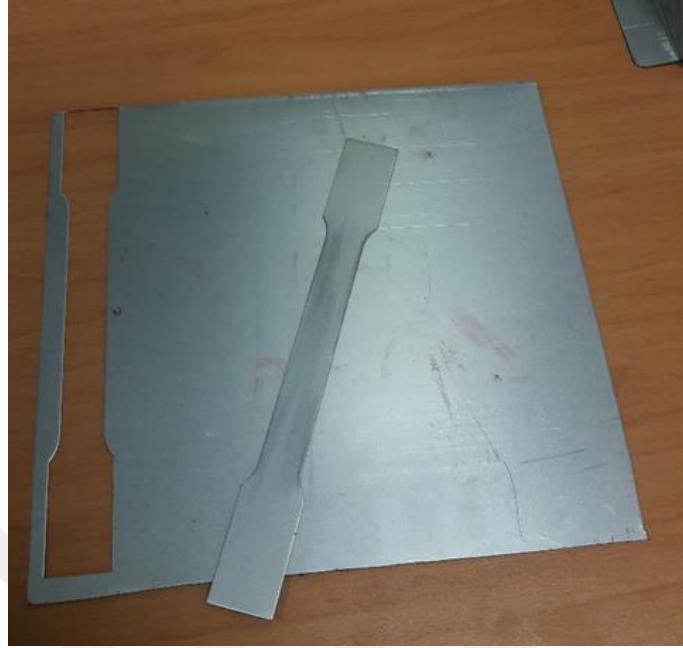


Şekil 3.1 : Mekanik testler (a) çekme testi, (b) sertlik testi.

Rockwell sertlik ölçme yöntemi, belirli bir yük altında, koni ya da küre biçimindeki delici bir cismin, sertliği ölçülecek malzemeye batma miktarının, malzemenin sertliği hakkında bilgi vermesi esasına dayanan bir sertlik ölçme yöntemidir. Brinell ve Vickers yöntemlerinden farklı olarak, rockwell sertlik ölçme yönteminde sertlik, yükün iz yüzeyine oranına göre hesaplanmaz, iz derinliği dikkate alınır. İz derinliği ve sertlik değeri bir derinlik ölçme aletinden (derinlik saati) okunabilir. Bu yönüyle kısa sürede sertlik ölçümü değerlerine ulaşmak mümkün olup, istendiğinde işlem otomatikleştirilebilir [79].

Çekme testi için hazırlanan numune resmi Şekil 3.2'de gösterilmektedir. Gerçekleştirilen çekme testleri 0° , 45° ve 90° hadde yönlerinde olacak şekilde

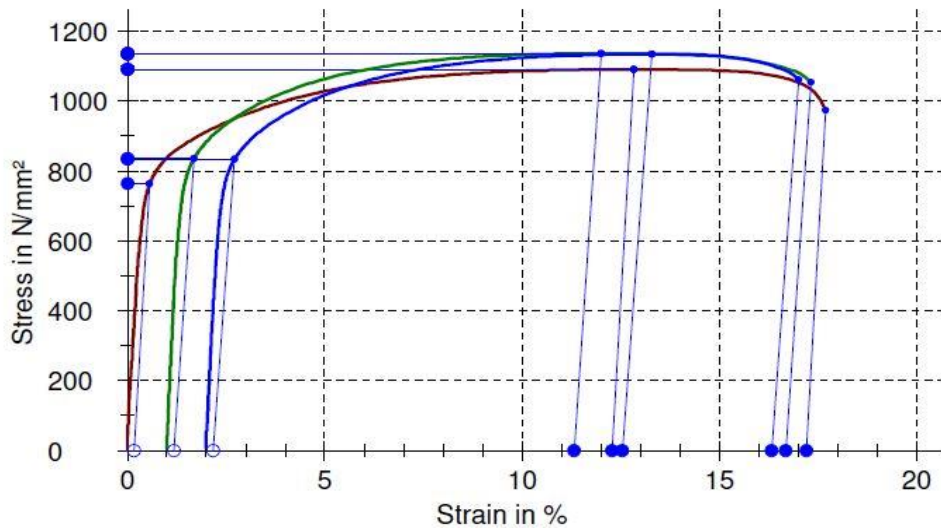
gerçekleştirilerek elde edilen mekanik sonuçlar Çizelge 3.1’de aktarılmıştır. Farklı yönlenimlerdeki gerilme-gerinme diyagramları Şekil 3.3’de gösterilmektedir.



Şekil 3.2 : Çekme testi için hazırlanan Fortiform 1050 çelik malzeme numunesi.

Çizelge 3.1 : Fortiform 1050 çelik malzemesinin mekanik özellikleri.

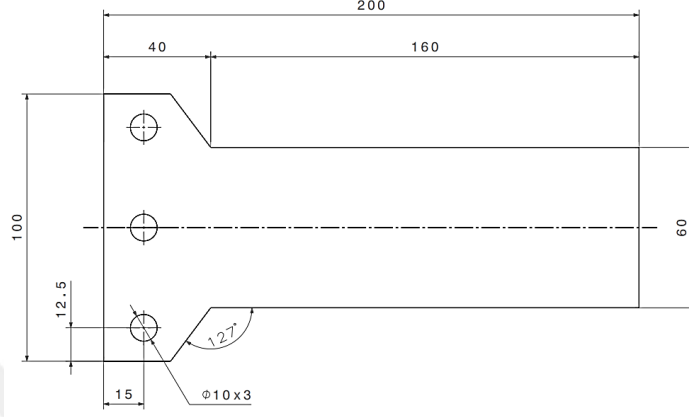
Numune	Yön	Akma mukavemeti N/mm ²	Çekme mukavemeti N/mm ²	Uzama %	Elastisite Modülü GPa	r	Sertlik HRC
1	0	763.98	1091.82	17.23	205	0.87	33.9
2	45	835.75	1136.65	15.71	205	1.01	33.9
3	90	832.79	1133.72	14.35	205	1.14	33.9



Şekil 3.3 : Fortiform 1050 çelik malzemesinin gerilme-gerinme diyagramı.

3.2 Basınca Bağlı Sürtünme Katsayısı

Fortiform 1050 çelik sac malzemesi sürtünme testini gerçekleştirebilmek için lazer kesme yöntemiyle Şekil 3.4'te verilen teknik resime uygun şekilde test numuneleri kesilmiştir ve sürtünme aparatına 3 adet cıvata ile bağlanmıştır.



Şekil 3.4 : Sürtünme test numunesi teknik resmi.

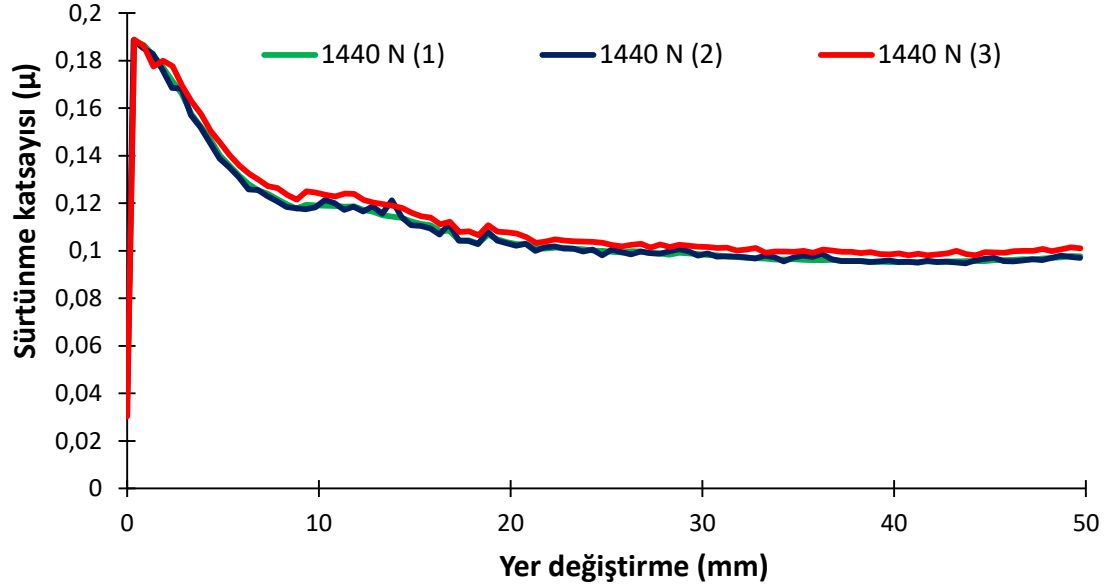
Aparat malzemesi olarak kalıplarda sıkça kullanılan GGG70 döküm çeliği malzeme seçilerek sürtünme testi için biri sabit, diğeri loadcell bağlantılı iki adet çene kullanılmıştır. Çelik malzemeler ile sac parça arasındaki temas alanı 80 mm x 60 mm olarak ayarlanmıştır. Sürtünme testleri sırasında parça 50 mm hareket ettirilerek 5 mm/sn. sabit hız ile çektilmiştir.

Normal kuvvet (F_n) olarak seçilen 1440 N, 1920 N ve 2400 N kuvvetlerin her biri için üç adet test gerçekleştirilerek ortalama sürtünme kuvvetleri hesaplanmıştır. Bu testler için kullanılan test aparatı Şekil 3.5'te gösterilmektedir.

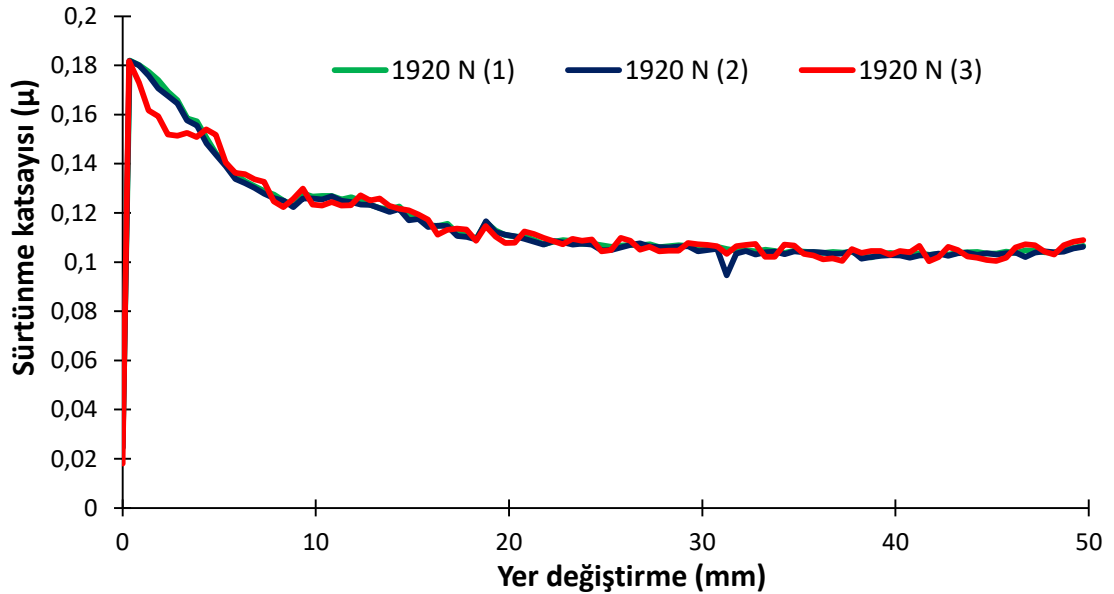


Şekil 3.5 : Sürtünme test aparatı.

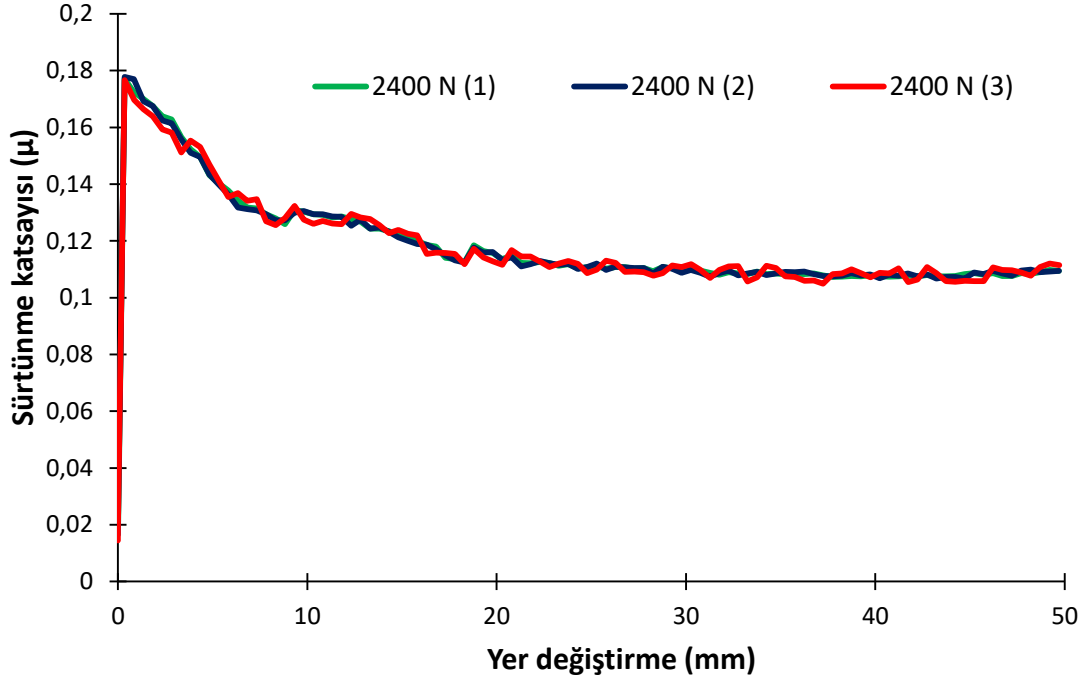
Farklı normal kuvvetler altında yapılan testlere ilişkin grafikler sırasıyla 1440 N, 1920 N ve 2400 N için Şekil 3.6, Şekil 3.7 ve Şekil 3.8’de gösterilmektedir. Bu kuvvet değerleri 4800 mm²’lik yüzey alanına uygulandığından; 1440 N 0.3 MPa, 1920 N 0.4 MPa ve 2400 N 0.5 MPa basınç değerlerine denk gelmektedir.



Şekil 3.6 : 1440 N ile gerçekleştirilen test sonucunda elde edilen yerdeğiştirmeye karşı sürtünme katsayısı eğrileri.



Şekil 3.7 : 1920 N ile gerçekleştirilen test sonucunda elde edilen yerdeğiştirmeye karşı sürtünme katsayısı eğrileri.



Şekil 3.8 : 2400 N ile gerçekleştirilen test sonucunda elde edilen yer değiştirmeye karşı sürtünme katsayısı eğrileri.

Yukarıdaki testler sonucunda sürtünme katsayıları 0.3 MPa basınç altında 0.18861, 0.4 MPa basınç altında 0.18159 ve 0.5 MPa basınç altında 0.17911 olarak bulunmuştur.

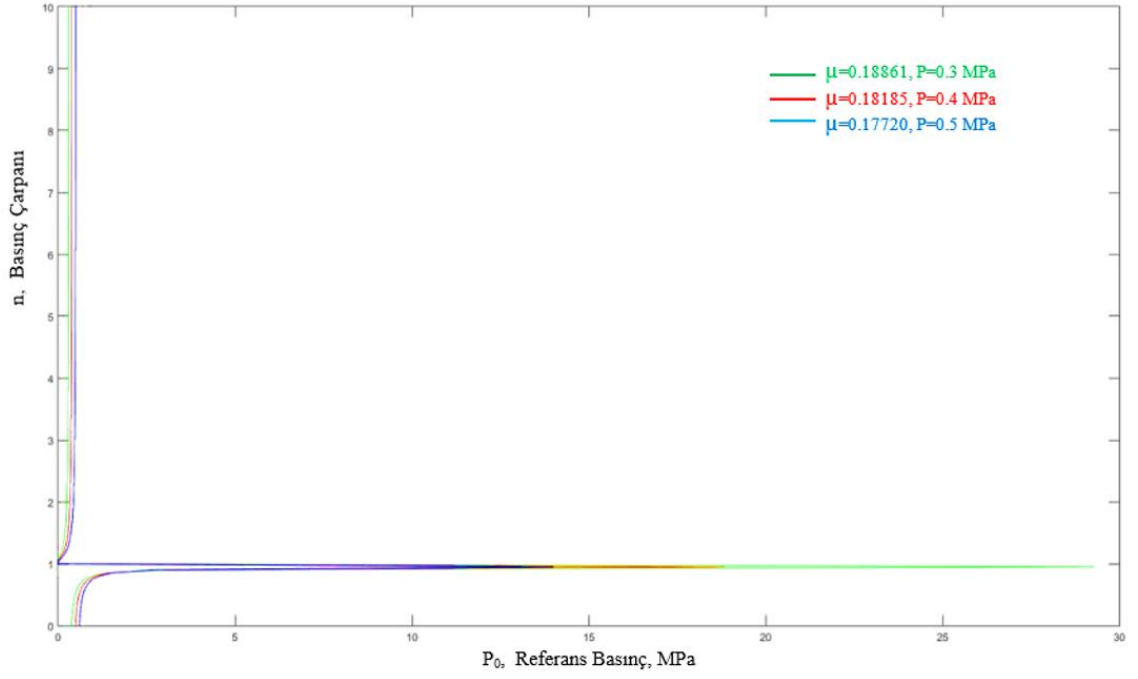
Basınca bağlı sürtünme katsayısı denkleminde P_0 ve n değerlerini tespit etmek amacıyla Matlab programında aşağıda belirtilen kodlamaya göre,

% P_0 ve n değerlerinin bulunması için yazılan Matlab kodu

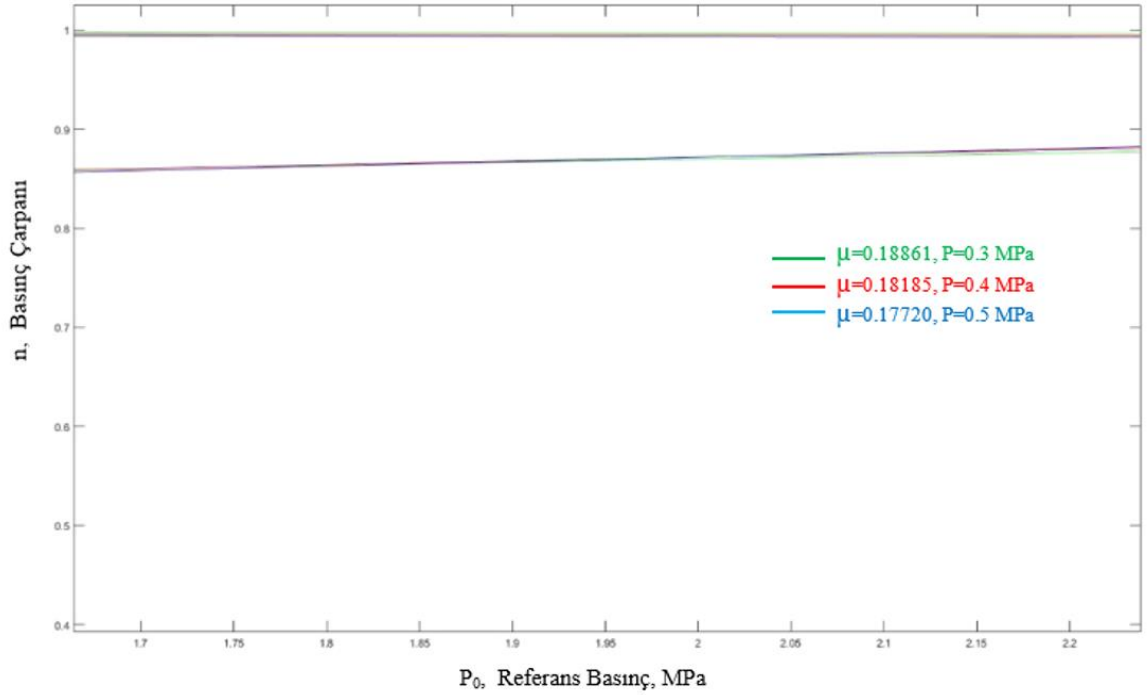
```
n1=0:0.05:10;
n2=0:0.05:10;
n3=0:0.05:10;
m0=0.15
m1=0.18861
p1=0.3
m2=0.18159
p2=0.4
m3=0.17911
p3=0.5
p01=p1./((m1/m0).^(1./(n1-1)))
p02=p2./((m2/m0).^(1./(n2-1)))
p03=p3./((m3/m0).^(1./(n3-1)))

plot(p01,n1,'g',p02,n2,'r',p03,n3,'b')
```

μ_0 için 0.15 değeri sabit kabul edilerek 0.3 MPa, 0.4 MPa ve 0.5 MPa'lık P değerlerine bağlı olarak sürtünme katsayıları bulunmuştur. Elde edilen basınca bağlı sürtünme katsayıları Şekil 3.9'da ve yakınlaştırılmış hali Şekil 3.10'da gösterilmektedir.



Şekil 3.9 : Basınca bağlı sürtünme katsayıları grafiği.

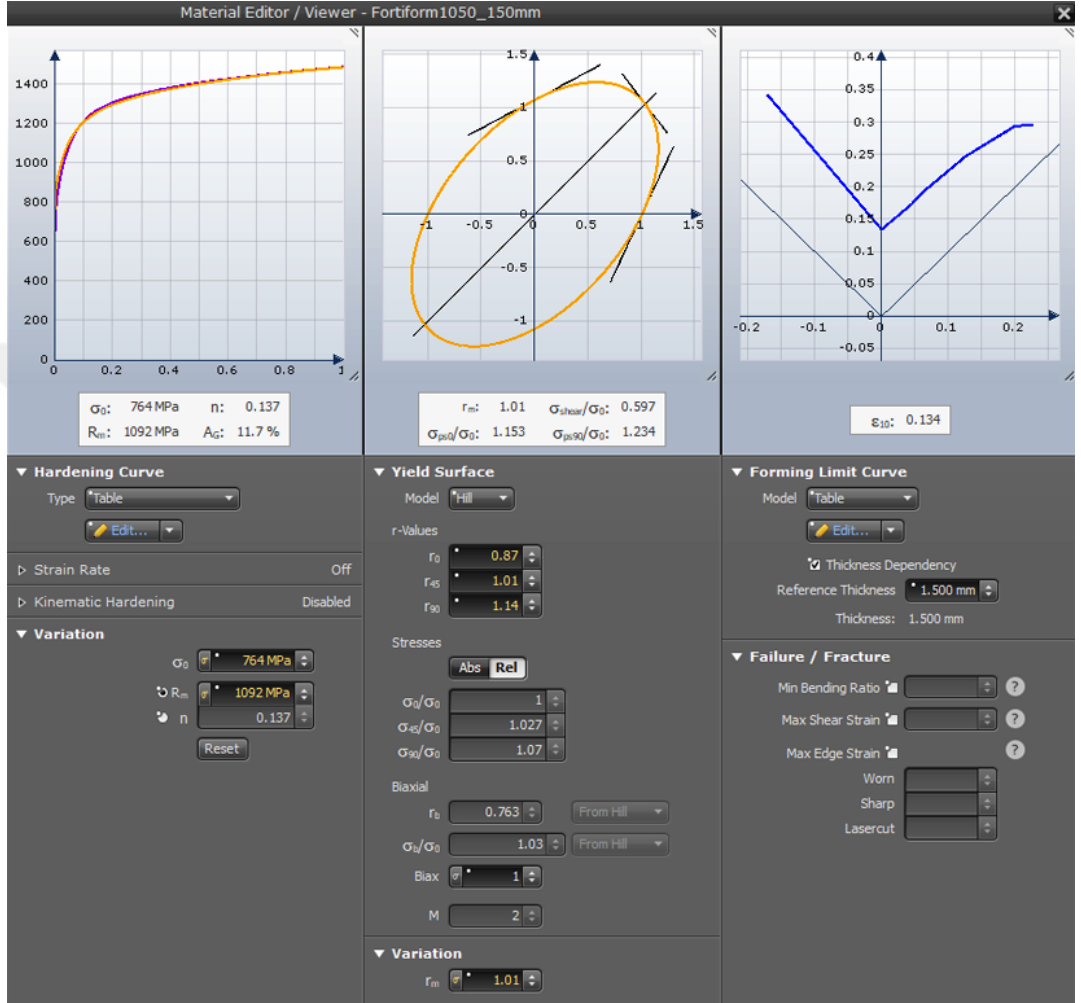


Şekil 3.10 : Basınca bağlı sürtünme katsayıları yakınlaştırılmış grafiği.

P_0 ve n değerleri üç çözüm sonucunun kesiştiği noktadan alınmıştır ve basınca bağlı sürtünme katsayısı grafiklerden elde edilen sonuçlara göre $n=0.88$ ve $P_0=2$ MPa olmak üzere optimum değerler saptanmıştır.

3.3 Sac Şekillendirme Analizi

Parça şekillendirme analizini yapabilmek için Autoform programından yararlanılmıştır. İlk olarak deneysel yöntemlerle elde edilen malzeme özelliklerine göre Şekil 3.11’de gösterilen malzeme kartı oluşturulmuştur.



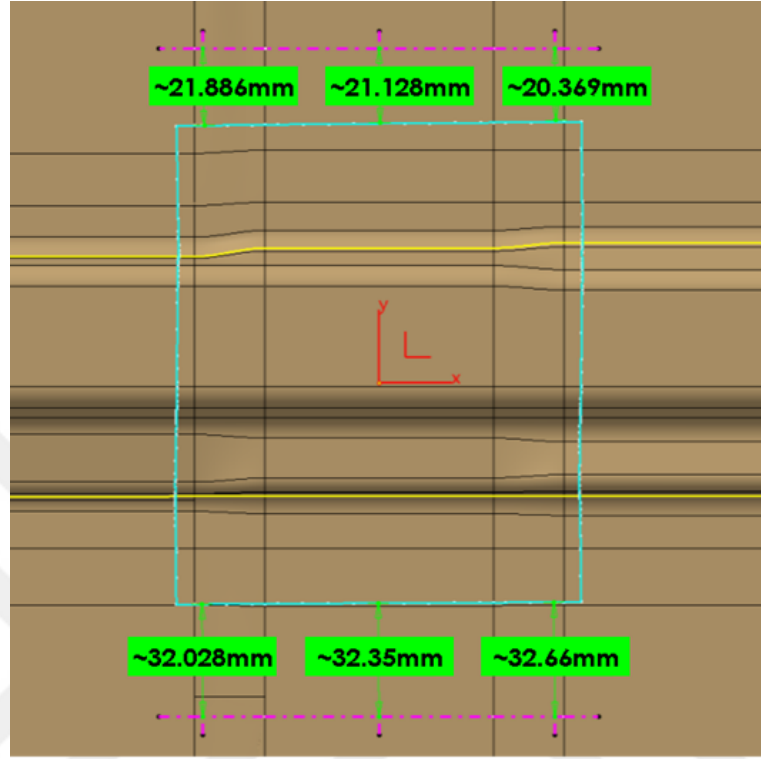
Şekil 3.11 : Autoform analiz programı Fortiform 1050 malzeme kartı.

CATIA tasarım programı ile oluşturulan matematik model ve geliştirilen kalıp yüzeyleri analiz programının içine dahil edilmiştir. Bu işlem yapılırken maksimum eleman uzunluğu 10 mm. , dikiş toleransı 0.2 mm. ve mesh toleransı 0.05 mm. olacak şekilde ayarlanmıştır.

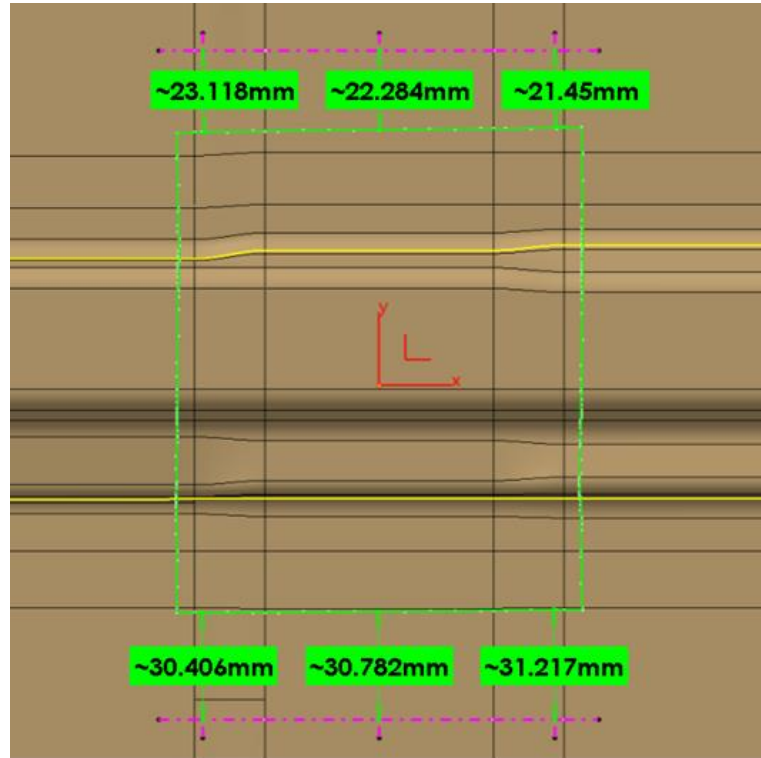
Parça şekillendirme analizi, Coulomb teoremi ve basınca bağlı sürtünme katsayısı teoremleri için kıyaslamalı olarak gerçekleştirilmiştir.

Simülasyonlarda pot hareketi 40 mm. ve pot kuvvetinin başlangıçta 4.6 ton, hareket sonunda ise 5.8 ton olacak şekilde uygulanacağı öngörülmüştür. Aradaki farkın tespit

edilebilmesi amacıyla çekme prosesi sonrasında çekme payları tespit edilmiş olup Coulomb yasasına bağlı olan sonuçlar Şekil 3.12’de ve basınca bağlı olan sonuçlar Şekil 3.13’de gösterilmektedir.

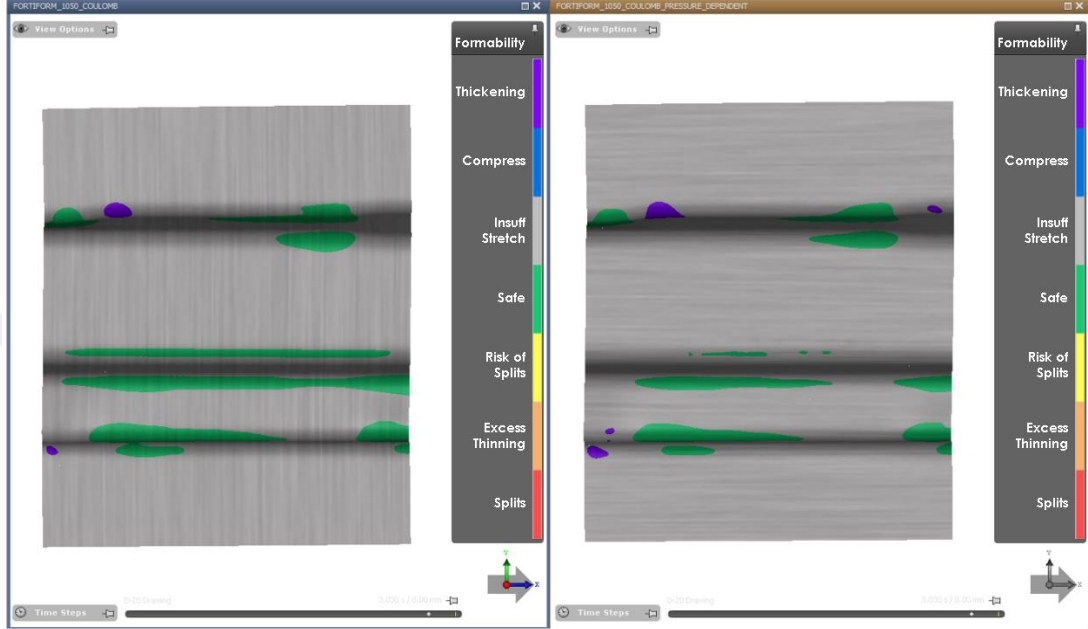


Şekil 3.12 : Çekme prosesi sonrası ölçülen çekme payları (Coulomb yasası).

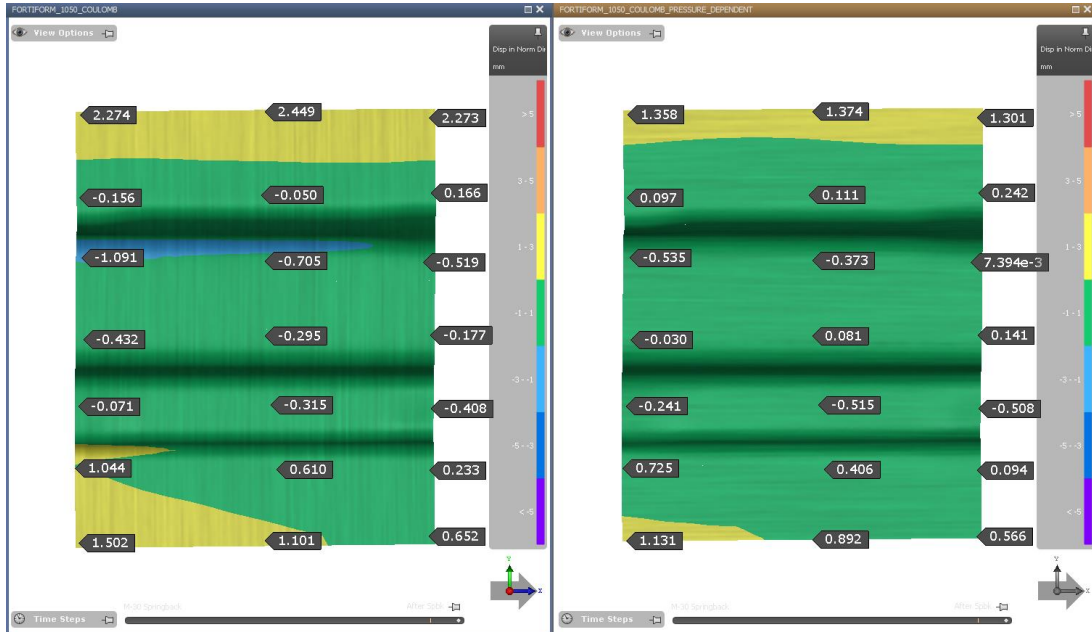


Şekil 3.13 : Çekme prosesi sonrası ölçülen çekme payları (basınca bağlı).

Sürtünme katsayısının geri esnemeye olan etkisinin tespit edilmesi amacıyla parça kesilerek eteklerdeki geri yaylanma değerleri Autoform analiz programında yer alan “Springback” özelliğinden yararlanılarak tespit edilmiştir. İki farklı sürtünme teoremine göre elde edilen şekillendirme sonuçları Şekil 3.14’te, geri esneme değerleri Şekil 3.15’te gösterilmektedir.



Şekil 3.14 : Sürtünme teoremlerine göre şekillendirme analizi.



Şekil 3.15 : Sürtünme teoremlerine göre geri esneme analiz değerleri.

3.4 Prototip Parça Üretimi

Protip kalıp üretimi için GGG70 malzemesi seçilmiştir. Bu malzeme sürtünme testinde kullanılan çeneler ile aynı olup sac şekillendirme kalıplarında da sıkça kullanılmaktadır. Tasarım revizyonları tamamlanan kalıp ile destek parçasının şekillendirme operasyonu gerçekleştirilmiştir. Prototip parça üretimini gerçekleştirebilmek için mevcut kalıpta; kalıp elemanları arası boşluk revize edilmiş, kalıp formları güncellenmiş ve sac dayamaları revize edilmiştir.

Simülasyon sonuçlarını doğrulamak amacıyla şekillendirilen parçanın çekme paylarına bakılmaktadır. Bu çekme paylarının kontrolü için pot üzerinde sacın yerçekimindeki durumunun 5 mm offseti alınmış ve 6 noktadan çizgi çizilmiştir. Çekilen saca göre 6 noktanın çelik cetvel ile mesafe ölçümü gerçekleştirilmiştir. Elde edilen 6 noktanın değerleri Şekil 3.16' da gösterilmektedir.

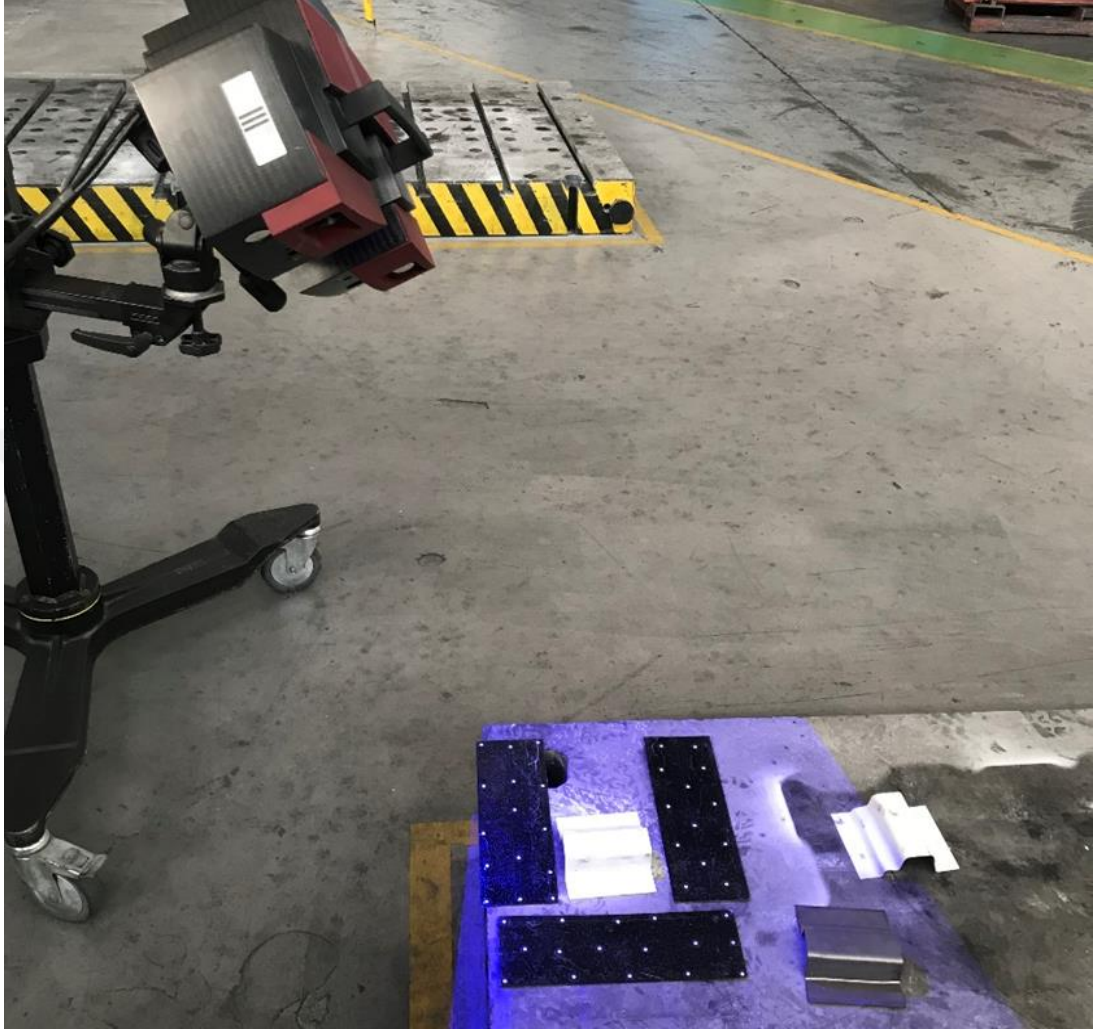


Şekil 3.16 : Şekillendirme işlemi gerçekleşen destek parçasının çekme payları.

3.5 Geri Esneme Kıyaslaması

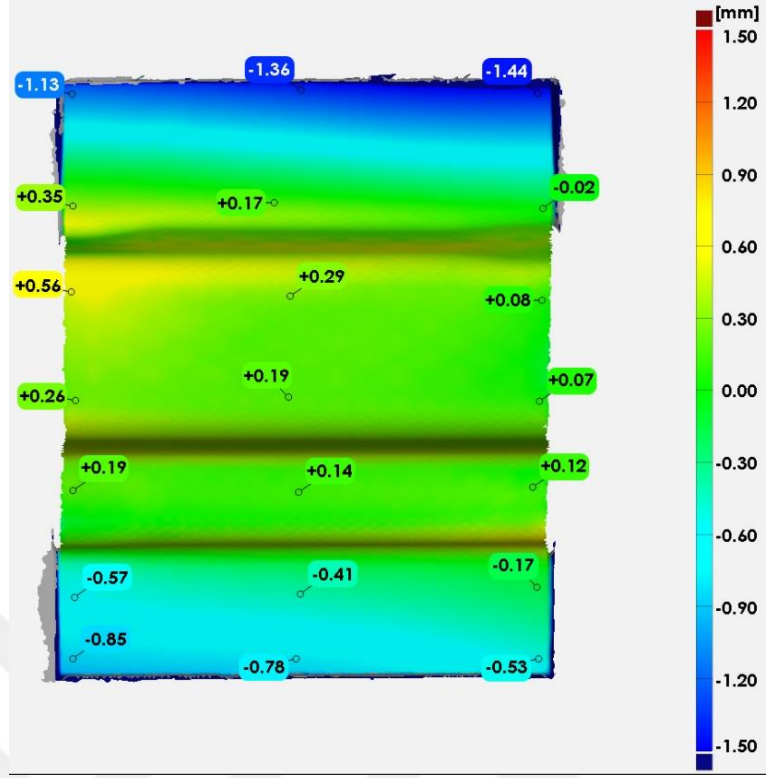
Şekillendirilen parçaların geri esneme sonuçlarının incelenmesi adına, parçaların tarama işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu tarama işlemi parçalar sert sac olduklarından

dolayı serbest konumda eteklerden zemine referanslanarak yapılmıştır. Tarama işlemi sonrasında çıkan sonuçlar nokta bulutu şeklinde dataya dönüştürülmüştür. Şekil 3.17’de tarama işlemi gerçekleştirilen parça gösterilmektedir.

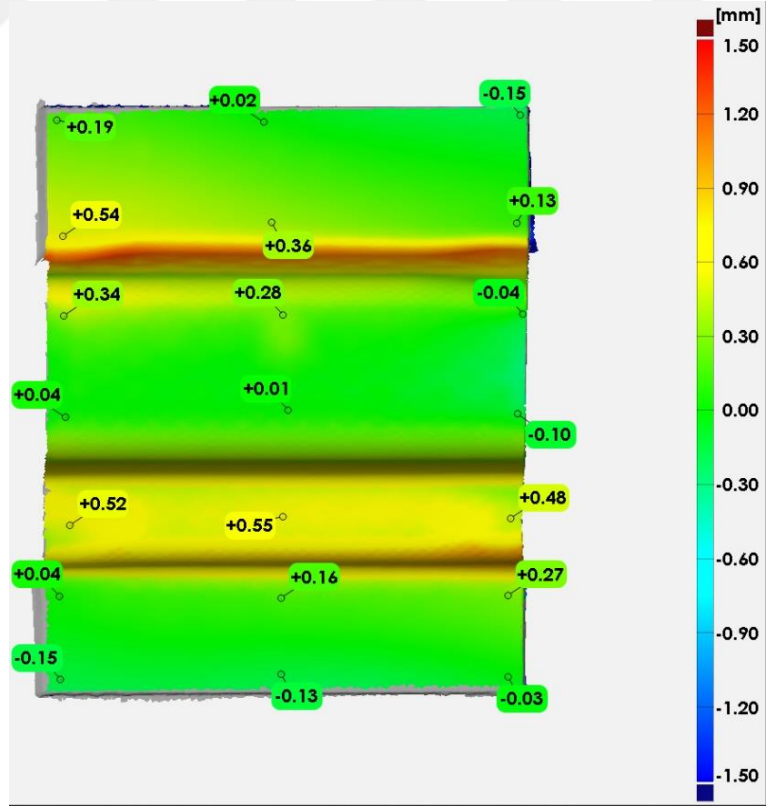


Şekil 3.17 : Tarama işlemi gerçekleştirilen destek parçası.

Tarama datalarındaki geri esneme değerlerinin Autoform simülasyon sonuçlarındaki geri esneme değerleri ile kıyaslanabilmesi için, Autoform’da gerçekleştirilen simülasyon geri esneme sonuçları stl formatında dışarı alınmıştır. Daha sonra GOM programının da dışarı alınan bu datalar sac kalınlığının yarısı kadar tarama yapılan yüzeye uygun olacak şekilde ofset edilmiştir. Bunun nedeni Autoform programında analiz yapılırken sac kalınlığının orta katmanı referans kabul edilerek çözüm yapılmasıdır. Daha sonra tarama dataları ile Autoform Coulomb sürtünme katsayılı ve basınca bağlı sürtünme katsayılı simülasyon sonuçları referanslanmıştır. Çıkan sonuçlar Şekil 3.18 ve 3.19’da verilmektedir.



Şekil 3.18 : Coulomb sürtünme katsayılı simülasyon sonucu ile prototip parça kıyasalama sonucu.



Şekil 3.19 : Basınca bağlı sürtünme katsayılı simülasyon sonucu ile prototip parça kıyaslama sonucu.

4. SONUÇLAR VE ÖNERİ

Bu tez çalışmasında ilk olarak ASTM E8 standardına göre çekme numunesi Fortiform 1050 malzemeden hazırlanarak çekme testi gerçekleştirilmiş ve malzemenin mekanik özellikleri belirlenmiştir. Fortiform 1050 malzemesine sürtünme test aparatında farklı kuvvetler uygulanarak sürtünme testleri gerçekleştirilmiştir. Yüzey alanı 4800 mm² olan test parçalarına uygulanan kuvvetler 1440 N, 1940 N ve 2400N olarak seçilmiştir. Bu değerler 0.3 MPa, 0.4 MPa, 0.5 MPa değerlerine denk gelmektedir. Destek parça geometrisine bağlı olarak konumlandırma ve kalınlık fonksiyonları göz önünde bulundurularak firmada mevcut bulunan prototip kalıbı revize edilmiştir. Destek parçasının pres altında şekillendirme üretimi yapılmış ve sonrasında simülasyon sonuçları ile doğruluğunun karşılaştırılabilmesi için numuneler ATOS tarama cihazı ile taranmıştır.

Fortiform 1050 malzemesi için farklı sürtünme teoremleri ile yapılan simülasyonlar ve prototip parçanın kıyaslanması sonuçlarına göre;

- Yapılan sürtünme testleri sonucunda, 0.3 MPa basınç altında $\mu=0.18861$, 0.4 MPa basınç altında $\mu=0.18159$ ve 0.5 MPa basınç altında $\mu=0.17911$ olarak bulunmuştur. Çıkan sonuçlar ışığında kuvvet arttıkça sürtünme katsayısının azaldığı görülmüştür.
- Parçanın şekillendirme sonrasındaki çekme paylar incelendiğinde basınca bağlı sürtünme katsayısının daha doğru sonuç verdiği gözlemlenmiştir.
- İki sürtünme teoremindeki parçanın şekillendirilebilirlik analiz sonuçları yaklaşık olarak aynı çıkmıştır.
- Coulomb sürtünme katsayılı simülasyon sonucundaki geri esneme miktarının, basınca bağlı sürtünme katsayılı simülasyon sonucundaki geri esneme miktarından daha fazla olduğu görülmüştür.
- Destek parçasının geri esneme davranışını incelemek adına parçalara tarama işlemi yapılmış ve simülasyon çıktıları ile kıyaslanmıştır. Geri esneme davranışları kıyaslandığında basınca bağlı sürtünme katsayılı analiz daha

gerçekçi sonuçlar sergilemiştir. Coulomb sürtünme katsayılı şekillendirme sonucundaki kıyaslama değerlerinin negatif çıkmasının nedeni analiz sonucundaki parçanın referans geometri olarak tanıtılması ve bundan dolayı prototip parçanın bu değerlere göre negatif konumda kalmasıdır.

Gelecekte benzer konularda yapılacak çalışmalar için öneriler ise şu şekildedir:

- Bu çalışmada şekillendirme hızı ihmal edilerek analizler gerçekleştirilmiştir. Gelecek çalışmalarda bu girdi de hesaba katılarak sürtünme katsayısının sac şekillendirme üzerindeki etkilerinin analiz sonuçları üzerindeki etkisi incelenebilir.



KAYNAKLAR

- [1] **Otomotiv Sektöründe Kullanılan Malzemeler.** (t.y.). Erişim tarihi 20 Kasım 2018, <https://malzemebilimi.net/otomotiv-sektorunde-kullanilan-malzemeler.html>.
- [2] **Dış Yüzey ve Hareketli Parçalar.** (t.y.). Erişim tarihi 20 Kasım 2018, <http://www.coskunuz.com.tr/urunler/binek-araclar/dis-yuzey-ve-hareketli-parcalar.html>.
- [3] **Ramezani, M., & Ripin, Z. M.** (2009). Effect of friction models on stress distribution of sheet materials during V-bending process. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 32, 654-659.
- [4] **Hol, J., Alfaro, M. C., de Rooij, M. B., & Meinders, T.** (2012). Advanced friction modeling for sheet metal forming. *Wear*, 286, 66-78. doi:10.1016/j.wear.2011.04.004.
- [5] **Tisza, M.** (2014). Advanced materials in sheet metal forming. In *Key Engineering Materials* (Vol. 581, pp. 137-142). Trans Tech Publications. doi:10.4028/www.scientific.net/KEM.581.137.
- [6] **Zöllner, F., Sturm, V., & Merklein, M.** (2015). Experimental and Numerical Investigation on a Pressure Dependent Friction Model. In *Key Engineering Materials* (Vol. 639, pp. 403-410). Trans Tech Publications. doi:10.4028/www.scientific.net/KEM.639.403.
- [7] **Steinmetz, G., Felder, E.** (t.y.). About the Static Coefficient of Friction under Sheet Metal Forming Contact Conditions, Erişim tarihi 13 Mart 2019, <https://www.oetg.at>
- [8] **Kudo, H., & Azushima, A.** (1987). Interaction of Surface Microstructure and Lubricant in Metal Forming Tribology. in: *Proceedings of the Second ICTP*, (p.373–384). Stuttgart, Germany.
- [9] **Dohda, K., & Wang, Z.** (1998). Effects of average lubricant velocity and sliding velocity on friction behavior in mild steel sheet forming. *Journal of tribology*, 120 (4), 724-728. doi:10.1115/1.2833771.
- [10] **Emmens, W. C.** (1988). The influence of surface roughness on friction. In *International Conference on Controlling Sheet Metal Forming Processes*, (p.63-70). Michigan.
- [11] **von Stebut, J.** (1986). Modification of a surface profile's height parameters during strip drawing. *Wear*, 109 (1-4), 145-155. doi:10.1016/0043-1648(86)90260-7.
- [12] **Wang, Z., Nakamura, T., Dohda, K., & Obika, T.** (2003). FEM analysis of contact mechanism in press-forming of lubricant pre-coated steel sheet. *Journal of Materials Processing Technology*, 140 (1-3), 514-519. doi:10.1016/S0924-0136(03)00790-8.
- [13] **Ma, B., Tieu, A. K., Lu, C., & Jiang, Z.** (2002). A finite-element simulation of asperity flattening in metal forming. *Journal of materials processing technology*, 130, 450-455. doi:10.1016/S0924-0136(02)00752-5.

- [14] Wilson, W. R. D., Hsu, T. C., & Huang, X. B. (1995). A realistic friction model for computer simulation of sheet metal forming processes. *Journal of engineering for industry*, 117 (2), 202-209. doi:10.1115/1.2803295.
- [15] Nakamura, Y., Nakamachi, E., & Wagoner, R. H. (1992). Deep drawing analysis of square cups with coated, rate-sensitive steel sheets. *Computational Plasticity: Fundamentals and Applications. II*, 1301-1310.
- [16] Hildenbrand, A., Bretault, N., & Hashimoto, K. (2006). *Non-Linear Friction Laws Friction Coefficient as a Function of Contact Parameters* (No. 2006-01-1655). SAE Technical Paper. doi:10.4271/2006-01-1655.
- [17] Hashimoto, K., Isogai, E., Yoshida, T., Kuriyama, Y., & Ito, K. (2008). Finite Element Analysis of Sheet Metal Forming Taking Account of Nonlinear Friction Model- Assessment of Sheet Formability by Nonlinear Friction Model III. *Journal of the Japan Society for Technology of Plasticity*, 49 (573), 0995-0999.
- [18] Ma, N., Sugitomo, N. (2009). Nonlinear Friction Model Considering Contact Pressure, Sliding Velocity, Sliding Distance and Frictional Work. *The Proceedings of the 2009 Japanese Spring Conference for the Technology of Plasticity*, (p.35–36). Kyoto.
- [19] Kaftanoğlu, B. (1973). Determination of coefficient of friction under conditions of deep-drawing and stretch forming. *Wear*, 25 (2), 177-188. doi:10.1016/0043-1648(73)90070-7.
- [20] Schmoeckel, D., Prier, M., & Staeves, J. (1997). Topography deformation of sheet metal during the forming process and its influence on friction. *CIRP Annals*, 46 (1), 175-178. doi:10.1016/S0007-8506(07)60802-6.
- [21] Kalkan, H., Hacaloğlu, T., & Kaftanoğlu, B. (2016). B. Sac Şekillendirme İşleminde Sürtünmenin İncelenmesi. *Makina Tasarım ve İmalat Dergisi*, 14(2), 88-94.
- [22] Çavuşoğlu, O. (2013). *Sac Metal Şekillendirme İşlemlerinde Pres Hızı ve Malzemenin Şekillendirmeye Etkilerinin Deneysel ve Teorik Olarak İncelenmesi* (Yüksek Lisans Tezi), Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [23] Giuliano, G. (2015). Evaluation of the coulomb friction coefficient in DC05 sheet metal forming/Analiza koeficienta Coulombovega trenja pri preoblikovanju plocevine DC05. *Strojnicki Vestnik-Journal of Mechanical Engineering*, 61(12), 709-715.
- [24] Galdos, L., De Argandoña, E. S., Mendiguren, J., & Silvestre, E. (2017, September). Numerical simulation of the roll levelling of third generation fortiform 1050 steel using a nonlinear combined hardening material model. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 896, No. 1, p. 012122). IOP Publishing. doi:10.1088/1742-6596/896/1/012122.
- [25] de Argandoña, E. S., Galdos, L., Mendiguren, J., Otero, I., & Mugarra, E. (2017, September). U-drawing of Fortiform 1050 third generation steels. Numerical and experimental results. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 896, No. 1, p. 012118). IOP Publishing. doi :10.1088/1742-6596/896/1/012118.
- [26] Cheah, L. W. (2010). *Cars on a diet: the material and energy impacts of passenger vehicle weight reduction in the US*, (Doktora Tezi). Massachusetts Teknoloji Enstitüsü, Amerika Birleşik Devletleri.

- [27] Tolouei, R., & Titheridge, H. (2009). Vehicle mass as a determinant of fuel consumption and secondary safety performance. *Transportation research part D: transport and environment*, 14 (6), 385-399. doi:10.1016/j.trd.2009.01.005.
- [28] Broughton, J. (1996). The British index for comparing the accident record of car models. *Accident Analysis & Prevention*, 28 (1), 101-109. doi:10.1016/0001-4575(95)00049-6.
- [29] Demeri, M. Y. (2013). *Advanced high-strength steels: science, technology, and applications*. ASM international.
- [30] Rowe, J. (Ed.). (2012). *Advanced materials in automotive engineering*. Elsevier.
- [31] Galan Lopez, J., Samek, L., Verleysen, P., Verbeken, K., & Houbaert, Y. (2012). Advanced high strength steels for automotive industry. *Revista de metalurgia*, 48(2), 118-131.
- [32] **Annual Energy Outlook 2014**. (2014). Erişim tarihi 17 Mart 2019, [https://www.eia.gov/outlooks/aeo/pdf/0383\(2014\).pdf](https://www.eia.gov/outlooks/aeo/pdf/0383(2014).pdf).
- [33] **An Advanced High-Strength Steel Family Car**. (2008). Erişim tarihi 26 Şubat 2019, <https://www.smdisteel.org>.
- [34] Jin, Y. S. (2011). Development of advanced high strength steels for automotive applications. *La Metallurgia Italiana*, (6).
- [35] Matlock, D. K., & Speer, J. G. (2006, August). Design considerations for the next generation of advanced high strength sheet steels. In *Proc. of the 3rd International Conference on Structural Steels*, ed. by HC Lee, the Korean Institute of Metals and Materials, Seoul/Korea (pp. 774-781).
- [36] **Advanced High Strength Steels Applications Guidelines Version 4.1**. (2009). Erişim tarihi 22 Ocak 2019, <https://www.worldautosteel.org>.
- [37] Billur, E., & Altan, T. (2013). Three generations of advanced high-strength steels for automotive applications, Part I. *Stamp. J*, 16-17.
- [38] Riebeck, J. (2011). The Riddle of Steel: A-UHSS, Erişim tarihi 25 Mayıs 2018, <http://www.stle.org>.
- [39] Zhao, J., & Jiang, Z. (2018). Thermomechanical processing of advanced high strength steels. *Progress in Materials Science*, 94, 174-242. doi:10.1016/j.pmatsci.2018.01.006.
- [40] Adamczyk, J., & Grajcar, A. (2007). Heat treatment and mechanical properties of low-carbon steel with dual-phase microstructure. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 22 (1), 13-20.
- [41] Kuziak, R., Kawalla, R., & Waengler, S. (2008). Advanced high strength steels for automotive industry. *Archives of civil and mechanical engineering*, 8(2), 103-117. doi:10.1016/S1644-9665(12)60197-6.
- [42] Krizan, D., & De Cooman, B. C. (2008). Analysis of the Strain-Induced Martensitic Transformation of Retained Austenite in Cold Rolled Micro-Alloyed TRIP Steel. *steel research international*, 79 (7), 513-522. doi:10.1002/srin.200806160.
- [43] Suliga, M., & Muskalski, Z. (2009). The influence of single draft on TRIP effect and mechanical properties of 0.09 C-1.57 Mn-0.9 Si steel wires. *Archives of Metallurgy and Materials*, 54 (3), 677-684.

- [44] Hadasik, E., Kuziak, R., Kawalla, R., Adamczyk, M., & Pietrzyk, M. (2006). Rheological model for simulation of hot rolling of new generation steel strips for automotive applications. *Steel research international*, 77 (12), 927-933. doi:10.1002/srin.200606483.
- [45] Siodlak, D., Lotter, U., Kawalla, R., & Schwich, V. (2008). Modelling of the Mechanical Properties of Low Alloyed Multiphase Steels with Retained Austenite Taking into Account Strain-Induced Transformation. *steel research international*, 79 (10), 776-783. doi:10.1002/srin.200806198.
- [46] Grajcar, A., & Borek, W. (2008). Thermo-mechanical processing of high-manganese austenitic TWIP-type steels. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 8 (4), 29-38. doi:10.1016/S1644-9665(12)60119-8.
- [47] Dobrzanski, L. A., Grajcar, A., & Borek, W. (2009). Microstructure evolution of high-manganese steel during the thermomechanical processing. *Archives of Materials Science*, 70, 70.
- [48] Dobrzański, L. A., & Borek, W. (2011). Hot deformation and recrystallization of advanced high-manganese austenitic TWIP steels. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 46 (1), 71-78.
- [49] Opiela, M., Grajcar, A., & Krukiewicz, W. (2009). Corrosion behaviour of Fe-Mn-Si-Al austenitic steel in chloride solution. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 33 (2), 159-165.
- [50] Grajcar, A., Galisz, U., & Bulkowski, L. (2011). Non-metallic inclusions in high manganese austenitic alloys. *Archives of Materials Science and Engineering*, 50 (1), 21-30.
- [51] Gronostajski, Z., Niechajowicz, A., & Polak, S. (2010). Prospects for the use of new-generation steels of the AHSS type for collision energy absorbing components. *Archives of metallurgy and materials*, 55 (1), 221-230.
- [52] De Moor, E., Gibbs, P. J., Speer, J. G., Matlock, D. K., & Schroth, J. G. (2010). AIST transactions strategies for third-generation advanced high-strength steel development. *Iron & steel technology*, 7 (11), 132.
- [53] Kim, S. J. (2010). Effects of manganese content and heat treatment condition on mechanical properties and microstructures of fine-grained low carbon TRIP-aided steels. In *Materials Science Forum* (Vol. 638, pp. 3313-3318). Trans Tech Publications. doi:10.4028/www.scientific.net/MSF.638-642.3313.
- [54] Merwin, M. J. (2008). Microstructure and properties of cold rolled and annealed low-carbon manganese TRIP steels. *Iron & steel technology*, 5(10), 66-84.
- [55] Which Automotive Companies Use NX (Seimens) as Their CAD Software. (t.y). Erişim tarihi 13 Mart 2019, <https://www.quora.com>.
- [56] CATIA Nedir? (t.y). Erişim tarihi 13 Mart 2019, <https://cadsay.com>.
- [57] Carlsson, P. (2005). *Surface Engineering in Sheet Metal Forming* (Doktora Tezi). Uppsala Üniversitesi, İsveç.
- [58].Schedin, E. (1994). Galling mechanisms in sheet forming operations. *Wear*, 179 (1-2), 123-128. doi:10.1016/0043-1648(94)90229-1.

- [59] Courvoisier, L., Martiny, M., & Ferron, G. (2003). Analytical modelling of drawbeads in sheet metal forming. *Journal of Materials Processing Technology*, 133 (3), 359-370. doi:10.1016/S0924-0136(02)01124-X.
- [60] Emmens, W. (1997). *Tribology of Flat Contacts and Its Applications in Deep Drawing* (Doktora Tezi). Twente Üniversitesi, Hollanda.
- [61] Hosford, W., Caddell R. (1993). *Metal Forming; Mechanics and Metallurgy*, PTR Prentice Hall.
- [62] Rooij M. (1998). *Tribological Aspects of Unlubricated Deep Drawing Processes* (Doktora Tezi). Twente Üniversitesi, Hollanda.
- [63] Westeng, A. (2001). *Modelling of Contact and Friction in Deep Drawing Processes* (Doktora Tezi). Twente Üniversitesi, Hollanda.
- [64] Haar, R. (1996). *Friction in Sheet Metal Forming*, (Doktora Tezi), Twente Üniversitesi, Hollanda.
- [65] Colgan, M., & Monaghan, J. (2003). Deep drawing process: analysis and experiment. *Journal of materials processing technology*, 132 (1-3), 35-41. doi:10.1016/S0924-0136(02)00253-4.
- [66] Gunnarsson, L., & Schedin, E. (2001). Improving the properties of exterior body panels in automobiles using variable blank holder force. *Journal of Materials Processing Technology*, 114 (2), 168-173. doi:10.1016/S0924-0136(01)00727-0.
- [67] Jawad, W. K., & Mohamed, J. H. (2008). Studying the effect of punch nose radius on deep drawing operation. *Engineering and Technology Journal*, 26 (1), 55-73.
- [68] Kakandikar, G. M., & Nandedkar, V. M. (2016). Prediction and optimization of thinning in automotive sealing cover using Genetic Algorithm. *Journal of Computational Design and Engineering*, 3 (1), 63-70. doi: 10.1016/j.jcde.2015.08.001.
- [69] Thiruvarduchelvan, S., & Lewis, W. G. (1990). Deep drawing with blank holder force approximately proportional to the punch force. *Journal of engineering for industry*, 112 (3), 278-285. doi:10.1115/1.2899587.
- [70] Wang, Y. G., Huang, G. S., Liu, D. K., Lin, C. H. E. N., Han, T. Z., Jian, P. E. N. G., & Pan, F. S. (2016). Influence of blank holder type on drawability of 5182-O aluminum sheet at room temperature. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 26 (5), 1251-1258. doi: 10.1016/S1003-6326(16)64225-5.
- [71] Candra, S., Batan, I. M. L., Berata, W., & Pramono, A. S. (2015). Analytical study and FEM simulation of the maximum varying blank holder force to prevent cracking on cylindrical cup deep drawing. *Procedia Cirp*, 26, 548-553. doi:10.1016/j.procir.2014.08.018.
- [72] Sun, G., Li, G., Gong, Z., He, G., & Li, Q. (2011). Radial basis functional model for multi-objective sheet metal forming optimization. *Engineering Optimization*, 43 (12), 1351-1366. doi: 10.1080/0305215X.2011.557072.
- [73] Zein, H., El-Sherbiny, M., Abd-Rabou, M., & El Shazly, M. (2013). Effect of die design parameters on thinning of sheet metal in the deep drawing process. *American Journal of Mechanical Engineering*, 1 (2), 20-29. doi:10.12691/ajme-1-2-1.

[74] **Kalpakistan, S.** (2009). Manufacturing Engineering and Technology, *Prentice Hall*, Amerika Birleşik Devletleri.

[75] **Joun, M. S., Moon, H. G., Choi, I. S., Lee, M. C., & Jun, D. B.** (2009). Effects of friction laws on metal forming processes. *Tribology International*, 42 (2), 311-319. doi:10.1016/j.triboint.2008.06.012.

[76] **Ramalho, A.** (2010). A reliability model for friction and wear experimental data. *Wear*, 269 (3-4), 213-223. doi:10.1016/j.wear.2010.03.023.

[77] **AutoForm.** (t.y.). Erişim tarihi 13 Mart 2019, <http://www.grupotomasyon.com.tr>.

[78] **Static and Kinetic Friction.** (t.y.). Erişim tarihi 15 Ocak 2019, http://fden-2.phys.uaf.edu/211_fall2002.web.dir/ben_townsend/staticandkineticfriction.htm.

[79] **Rockwell Sertlik Ölçme Yöntemi Nedir?** (t.y.). Erişim tarihi 15 Ocak 2019, <https://www.makinaegitimi.com/rockwell-sertlik-olcme-yontemi/>.



ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Yasin ÇİNİ
Doğum Tarihi ve Yeri : 10.08.1987 / BURSA
E-posta : yasincini@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2010, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü
- **Yüksek Lisans** : Bursa Teknik Üniversitesi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2018- , Coşkunöz Holding A.Ş.- Proses Tasarım Mühendisi
- 2015-2017, Ermetal/Erkalıp- Süreç/Proses Sorumlusu
- 2014-2015, Ermetal/Erkalıp- Teklif Hazırlama Mühendisi
- 2013-2014, Piston Gaz Springs- Ar-Ge Mühendisi
- 2012, Aysanmak- Üretim Mühendisi