

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**DERİN ÇEKMEDE İŞ MALZEMESİ VE PROSES
PARAMETRELERİNİN DENEYSEL VE NÜMERİK OLARAK
İNCELENMESİ**

CANER YALÇIN

KOCAELİ 2021

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

DERİN ÇEKMEDE İŞ MALZEMESİ VE PROSES
PARAMETRELERİNİN DENEYSEL VE NÜMERİK OLARAK
İNCELENMESİ

CANER YALÇIN

Prof.Dr. Tamer SINMAZÇELİK
Danışman, Kocaeli Üniversitesi

Prof.Dr. Aziz Armağan ARICI
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniversitesi

Dr.Öğr.Üyesi Cihan KABOĞLU
Jüri Üyesi, Bursa Teknik Üniversitesi

Tezin Savunulduğu Tarih: 14.06.2021

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜRLER

Dünyada otomotiv sektörü önemli bir yere sahiptir. Bir otomobil üretimi için çok sayıda parça üretilmeli ve montaj edilmelidir. Bu çalışmada incelenen sac metal şekillendirme işlemleri ise otomotiv sektöründe vazgeçilemeyecek üretim yöntemlerinden biridir. Çalışmada sürtünme, aşınma ve yağlayıcı etkisi sac metal şekillendirme tribolojisi kapsamında değerlendirilmiştir. Zorlu bir sac şekillendirme prosesi olan derin çekme işlemi için parametre değişikliklerinin etkileri üzerine çalışmalar yapılmıştır.

Çalışmam süresince katkıları ve bana olan desteğinden dolayı danışman hocam Prof. Dr. Tamer SINMAZÇELİK Bey'e, deney çalışmalarına destek olan Doç. Dr. Alpay Tamer ERTÜRK Bey'e, Dr. Öğretim Üyesi Ersin Asım GÜVEN Bey'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Deney numunelerinin temin edilmesi ve deneylerin gerçekleştirilmesi imkanını sağlayan Ulus Metal Sanayi ve Ticaret A.Ş. Genel Müdürü Ragıp TUNALILAR Bey'e, Genel Müdür Yardımcısı Ahmet Turan GÜVEN Bey'e, Ar-Ge Müdürümüz Makine Mühendisi Yiğit YURDAKUL Bey'e, çalışmamın her aşamasında destek olan Ar-Ge Şefimiz Makine Yüksek Mühendisi Ömer Emre UÇAKKUŞ Bey'e, Makine Mühendisi Rabia EDİS Hanım'a, kalıp tasarım aşamasında desteklerinden dolayı Makine Mühendisi Yasin DOĞAN Bey nezlinde tüm kalıphane bölümü çalışanlarına, simülasyon çalışmaları için destek olan Yavuz GÖKKUŞ Bey'e teşekkür ederim.

Hayatım boyunca desteklerini eksik etmeyen, her zaman yanımda olan babam Hüseyin YALÇIN, annem Binnaz YALÇIN ve geleceğin mimarı kardeşim Ceren YALÇIN nezlinde tüm aileme, çalışmama dolaylı dolaysız katkıları olan herkese sonsuz saygılarımı sunar ve teşekkürü borç bilirim.

Haziran – 2021

Caner YALÇIN

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜRLER.....	i
İÇİNDEKİLER	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	iii
TABLolar DİZİNİ	v
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	vi
ÖZET.....	vii
ABSTRACT	viii
GİRİŞ	1
1. SAC METAL ŞEKİLLENDİRME	3
1.1. Kesme	4
1.2. Bükme	5
1.3. Gererek Şekillendirme.....	5
1.4. Derin Çekme.....	6
2. TRIBOLOJİ	8
2.1. Sac Metal Şekillendirmede Triboloji	9
2.1.1. Derin çekme tribolojisi	11
2.2. Sürtünme	16
2.3. Aşınma.....	18
2.3.1. Adhezif aşınma.....	18
2.3.2. Abratif aşınma	18
2.3.3. Tribo kimyasal aşınma	19
2.3.4. Yüzey yorgunluğu	19
2.4. Yağlayıcı	19
3. TASARIM, MALZEME VE YÖNTEM	22
3.1. Tasarım.....	22
3.2. Kullanılan Malzeme ve Yöntem Özellikleri	25
4. NÜMERİK VE DENEYSEL İRDELEME.....	31
4.1. DD13 Sac Malzemesi Simülasyon ve Deney Çıktıları	31
4.2. 1.4301 Sac Malzemesi Simülasyon ve Deney Çıktıları	39
4.3. DD13 ve 1.4301 Malzemelerinin Deney Çıktılarının Karşılaştırması	48
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	53
KAYNAKLAR	55
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER	60
ÖZGEÇMİŞ	61

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1.	Sac metal kalıbı.....	4
Şekil 1.2.	Kesme işlemi.....	4
Şekil 1.3.	Bükme işlemi	5
Şekil 1.4.	Gererek şekillendirme işlemi	5
Şekil 1.5.	Derin çekme işlemi	7
Şekil 2.1.	Tribolojik sistem	9
Şekil 2.2.	Sac metal şekillendirme özelliklerine etki eden faktörler.....	10
Şekil 2.3.	Derin çekme kusurları.....	12
Şekil 2.4.	Derin çekme prosesini etkileyen parametreler.....	12
Şekil 2.5.	Derin çekme bölgeleri.....	13
Şekil 3.1.	Deney düzeneği kesiti	22
Şekil 3.2.	Deney düzeneği CAD modeli	23
Şekil 3.3.	İmalatı gerçekleştirilmiş deney düzeneği (açık)	23
Şekil 3.4.	İmalatı gerçekleştirilmiş deney düzeneği (kapalı)	24
Şekil 3.5.	İmalatı gerçekleştirilmiş zımba ve dişi kalıp	25
Şekil 3.6.	AUTOFORM DD13 simülasyon parametreleri.....	27
Şekil 3.7.	AUTOFORM 1.4301 simülasyon parametreleri.....	27
Şekil 3.8.	AUTOFORM şekillendirme öncesi kalınlık dağılımı	28
Şekil 3.9.	AUTOFORM şekillendirme sonrası kalınlık dağılımı	28
Şekil 3.10.	AUTOFORM örnek FLD sonuçları.....	29
Şekil 3.11.	Deneyisel çalışma görselleri	30
Şekil 4.1.	DD13 0,25 mm/sn “Prelube” şekillendirilebilirlik sonuçları.....	31
Şekil 4.2.	DD13 0,25 mm/sn “B.Wash” şekillendirilebilirlik sonuçları	32
Şekil 4.3.	DD13 1 mm/sn “Prelube” şekillendirilebilirlik sonuçları.....	32
Şekil 4.4.	DD13 1 mm/sn “B.Wash” şekillendirilebilirlik sonuçları	33
Şekil 4.5.	Deney sonucu elde edilen DD13 ürün görselleri	34
Şekil 4.6.	DD13 0,25 mm/sn yağlı ve yağsız kuvvet-strok grafikleri.....	35
Şekil 4.7.	DD13 1 mm/sn yağlı ve yağsız kuvvet-strok grafikleri.....	35
Şekil 4.8.	DD13 yağlı koşullar kuvvet-strok grafikleri.....	36
Şekil 4.9.	DD13 yağsız koşullar kuvvet-strok grafikleri	36
Şekil 4.10.	DD13 gerçekleşen maksimum kuvvet değerleri	37
Şekil 4.11.	Kesilmiş DD13 ürün görselleri	37
Şekil 4.12.	DD13 stereo mikroskop görselleri	38
Şekil 4.13.	DD13 minimum kalınlık değerleri.....	38
Şekil 4.14.	DD13 maksimum kalınlık değerleri.....	39
Şekil 4.15.	1.4301 0,25 mm/sn “Prelube” şekillendirilebilirlik sonuçları	40
Şekil 4.16.	1.4301 0,25 mm/sn “B.Wash” şekillendirilebilirlik sonuçları.....	40
Şekil 4.17.	1.4301 1 mm/sn “Prelube” şekillendirilebilirlik sonuçları	41
Şekil 4.18.	1.4301 1 mm/sn “B.Wash” şekillendirilebilirlik sonuçları.....	41
Şekil 4.19.	Deney sonucu elde edilen 1.4301 ürün görselleri.....	43
Şekil 4.20.	1.4301 0,25 mm/sn yağlı ve yağsız kuvvet-strok grafikleri	43
Şekil 4.21.	1.4301 1 mm/sn yağlı ve yağsız kuvvet-strok grafikleri.....	44
Şekil 4.22.	1.4301 yağlı koşullar kuvvet-strok grafikleri.....	44

Şekil 4.23. 1.4301 yağsız koşullar kuvvet-strok grafikleri	45
Şekil 4.24. 1.4301 gerçekleşen maksimum kuvvet değerleri.....	45
Şekil 4.25. Kesilmiş 1.4301 ürün görselleri.....	46
Şekil 4.26. 1.4301 stereo mikroskop görselleri.....	46
Şekil 4.27. 1.4301 minimum kalınlık değerleri.....	47
Şekil 4.28. 1.4301 maksimum kalınlık değerleri	47
Şekil 4.29. 0,25 mm/sn yağlı DD13 ve 1.4301 kuvvet-strok grafikleri.....	48
Şekil 4.30. 0,25 mm/sn yağsız DD13 ve 1.4301 kuvvet-strok grafikleri.....	48
Şekil 4.31. 1 mm/sn yağlı DD13 ve 1.4301 kuvvet-strok grafikleri.....	49
Şekil 4.32. 1 mm/sn yağsız DD13 ve 1.4301 kuvvet-strok grafikleri.....	49
Şekil 4.33. Gerçekleşen şekillendirme enerjisi sonuçları	50
Şekil 4.34. Gerçekleşen maksimum kuvvet sonuçları	50
Şekil 4.35. Gerçekleşen minimum kalınlık sonuçları	51
Şekil 4.36. Gerçekleşen maksimum kalınlık sonuçları	51



TABLULAR DİZİNİ

Tablo 1.1. Silindirik parça için gereken çekme sayısı	7
Tablo 3.1. 1.2379 kalıp çeliğinin kimyasal bileşimi (%)	25
Tablo 3.2. DD13 ve 1.4301 malzemelerinin kimyasal bileşimi (%).....	26
Tablo 4.1. AUTOFORM DD13 simülasyon sonuçları	33
Tablo 4.2. AUTOFORM 1.4301 simülasyon sonuçları	42



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

As	: Arsenik
C	: Karbon
c	: Kalıp zımba arası boşluk
Cr	: Krom
d	: Parça çapı
D _b	: Sac metal çapı (Açınım çapı)
D _p	: Zımba çapı
DR	: Derin çekme oranı
F _N	: Normal yük
F _T	: Sürtünme kuvveti
h	: Parça yüksekliği
J	: Joule
kN	: Kilonewton
mm	: Milimetre
Mn	: Mangan
Mo	: Molibden
N	: Azot
n	: Gereken çekme sayısı
Ni	: Nikel
r	: Azaltma oranı
R _k	: Kalıp eğrilik yarıçapı
R _z	: Zımba eğrilik yarıçapı
P	: Fosfor
S	: Kükürt
Sb	: Antimon
Si	: Silisyum
t	: Sac kalınlığı
V	: Vanadyum
μ	: Sürtünme katsayısı
μ _A	: Adhezyon kuvveti
μ _P	: Deformasyon kuvveti

Kısaltmalar

B.Wash	: Blank Wash (Yağsız)
CAD	: Computer Aided Design (Bilgisayar Destekli Tasarım)
FLD	: Forming Limit Diagram (Şekillendirme Sınır Diyagramı)
P.Lube	: PreLube (Yağlı)

DERİN ÇEKMEDE İŞ MALZEMESİ VE PROSES PARAMETRELERİNİN DENEYSEL VE NÜMERİK OLARAK İNCELENMESİ

ÖZET

Sac şekillendirme prosesi günümüzde çok geniş alanlarda uygulanan önemli yöntemlerden birisidir. Bu prosesin doğası gereği şekillendirme birbirine temas eden metalik yüzeyler ile oluşur. Bu temas sonucu sürtünen yüzeyler arasında oluşan kusurlar üretim performansını, ürün kalitesini ciddi anlamda etkileyerek üretimin verimini etkilemektedir. Bu yüzden aşınma, sürtünme ve yağlayıcının temasta olan yüzeyler arasında etkisinin incelenip optimize edilmesi gerekmektedir. Prosesin doğası gereği temas eden yüzeylerden kaçınmak mümkün olmayacağından amaç sürtünmenin ve sonrasında oluşacak etkilerin mümkün olduğunca kontrol edilebilir olmasıdır.

Sac metal şekillendirme işlemleri kesme, bükme, gererek şekillendirme ve derin çekme olarak temelde dörde ayrılabilir. En karışık ve zorlu işlem derin çekme işlemidir. Otomotiv sektöründe kompresör, havalı fren sistemi parçaları üretiminde ve daha birçok alanda derin çekme işlemi ile şekillendirilmiş parçalar kullanılır. Zımba geometrisi, zımba hızı, kalıp geometrisi, sac malzeme, pot baskısı ve prosesin gerçekleştiği ortam şartları gibi birçok parametre etkisi altında sac metal şekillendirilir. Tüm parametrelerin incelenerek etkilerinin belirlenmesi oldukça zordur. Mümkün oldukça seri üretim koşulları altında optimum şartlar sağlanarak işlemler gerçekleştirilmelidir. Optimum şartlar ise simülasyon programlarıyla analiz edilerek elde edilmektedir. Böylece üretimdeki deneme sayısı azaltılarak verimlilik artırılmış olur.

Sac metal şekillendirme işlemlerinde derin çekme kalıpları genellikle benzer geometri ile üretilmekte ve en hızlı yıpranan kalıplardan biridir, çalışmada sac metal şekillendirme işlemlerinde; sac malzeme, yağlayıcı ve şekillendirme parametreleri değişikliklerinin prosese etkileri araştırılmış, derin çekme operasyonu nümerik olarak değerlendirilmiş ve deneysel çalışma ile incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Derin Çekme, Sac Malzemesi, Sac Metal Şekillendirme, Triboloji, Yağlayıcı.

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL INVESTIGATION OF SHEET MATERIAL AND PROCESS PARAMETERS IN DEEP DRAWING

ABSTRACT

The sheet metal forming process is one of the most important methods applied in a wide range of areas. Due to the nature of this process, shaping occurs with metallic surfaces in contact with each other. The defects that occur between the friction surfaces as a result of this contact seriously affect the production performance, efficiency and product quality. Therefore, it is necessary to examine and optimize the effect of wear, friction and lubricant between the surfaces in contact. Due to the nature of the process, it will not be possible to avoid contacting surfaces, so the aim is to control friction and effects as much as possible.

Sheet metal forming basically can be divided into four steps as cutting, bending, stretch forming and deep drawing. The most complex and hard step is deep drawing. In the automotive sector, parts shaped by deep drawing process are used in the production of compressors, air brake system parts and in many other systems. Sheet metal is formed under the influence of many parameters that punch geometry, punch speed, die geometry, sheet material, pot pressure and environmental conditions of the process. It is very difficult to examine all parameters and determine their effects. As much as possible, operations should be carried out under optimum conditions respect of mass production conditions. Optimum conditions are obtained by simulation programs. Thus, productivity is increased by reducing the number of trials in production.

Deep drawing molds in sheet metal forming processes are generally produced with similar geometries and are one of the fastest wearing molds. In sheet metal forming processes; The effects of changes in sheet material, lubricant and shaping parameters on the process were investigated, the deep drawing operation was evaluated numerically and investigated with an experimental study.

Keywords: Deep Drawing, Sheet Material, Sheet Metal Forming, Tribology, Lubricant.

GİRİŞ

Tez çalışmasında sac metal şekillendirme proseslerinde zorlu bir işlem olan derin çekme prosesinin simülasyon ve deneysel çalışmaları yapılmıştır. Öncelikle sac metal şekillendirme imalatı, triboloji ve sac metal şekillendirme prosesi tribolojisi ile ilgili yapılan literatür taramaları sonucu bir ön fikir oluşturulmuştur. Sac metal şekillendirme işlemlerine bakıldığında hızlı deformasyona uğrayarak üretim verimliliğini ciddi derecede etkileyen derin çekme operasyonları, sıvama işlemleri ön plana çıkmaktadır. Bu kapsamda derin çekme işlemi için nümerik ve laboratuvar çalışmaları yapılmış ve elde edilen sonuçlar literatür taraması sonucu kazanılmış bilgiler doğrultusunda değerlendirilerek ilgili parametrelerin proses üzerine etkisi detaylandırılmıştır.

Ürünün (deney örneklerinin) CAD tasarımı yapılarak imal edilebilirliği değerlendirilmiştir. Derin çekme operasyonu için gerekli şartlar göz önüne alınmış, ölçülendirme ve toleranslandırma işlemleri, üretim şartlarında kullanılan derin çekme kalıplarının tasarım aşamaları ve kullanılacak simülasyon programı sonucu elde edilmiş sonuçlar dikkate alınarak imalat gerçekleştirilmiştir. İmal edilecek aparat öncesi proses kurgusu AUTOFORM programı kullanılarak oluşturulmuş ve ortaya çıkan sonuçlar değerlendirilerek proses kurgusu tasarlanmıştır. Derin çekme prosesi laboratuvar ölçekli imal edilmiş, Kocaeli Ünivertisi'nde basma cihazında kuvvet deplasman eğrileri çıkarılmış ve AUTOFORM simülasyon sonuçları ile başarı oranları karşılaştırılmıştır. Farklı sac malzemeleri, farklı yağlama koşulları ve farklı zımba hızları denenerek elde edilen sonuçlar incelenmiştir. Simülasyon sonucu elde edilen et kalınlıkları ile mamul et kalınlıkları karşılaştırılmıştır. AUTOFORM yazılımı, CAD programı ve kalıp aparatı tasarımı için gerekli kalıp çeliği alımı ve imalatı Ulus Metal San. ve Tic. A.Ş. Ar-Ge departmanı tarafından sağlanmıştır. Zımba, pot çemberi, kalıp, kalıp tutucu ve sac merkezleyici kısımlarından oluşan derin çekme aparatı yapılarak sac şekillendirme işlemlerinde hızlı deforme olması sonucu üretim hızını, kaliteyi ve maliyeti önemli derecede etkileyen derin çekme operasyonu simüle edilmiştir. Ulus Metal San. ve Tic. A.Ş. tarafından sağlanmış olan farklı sac

malzemeler proses gerekliliği kapsamında boyutlandırılmış ve yapılacak olan deneysel çalışma için hazır hale getirilmiştir. Yapılan deneysel çalışma için Kocaeli niversitesi laboratuvarında çekme test cihazında bası modunda farklı parametreler; sac malzeme değişikliği, yağlama koşulu değişikliği, zimba hızı değişikliği ortaya çıkan sonuçlar AUTOFORM simülasyon programı ile elde edilmiş olan nümerik sonuçlar ile karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Birçok parametrenin etkilediği proses kurgusu mümkün olduğunca farklı parametreler değerlendirilerek gerekli optimum şartların sağlanmasına yönelik sonuçların eldesi ile tamamlanmıştır. Deneysel alışmalar sonrası sac malzemelerin et kalınlıkları incelenmiştir. Bunu sağlamak üzere Kocaeli Üniversitesi Malzeme Laboratuvarı'ndaki stereo mikroskop kullanılmıştır.



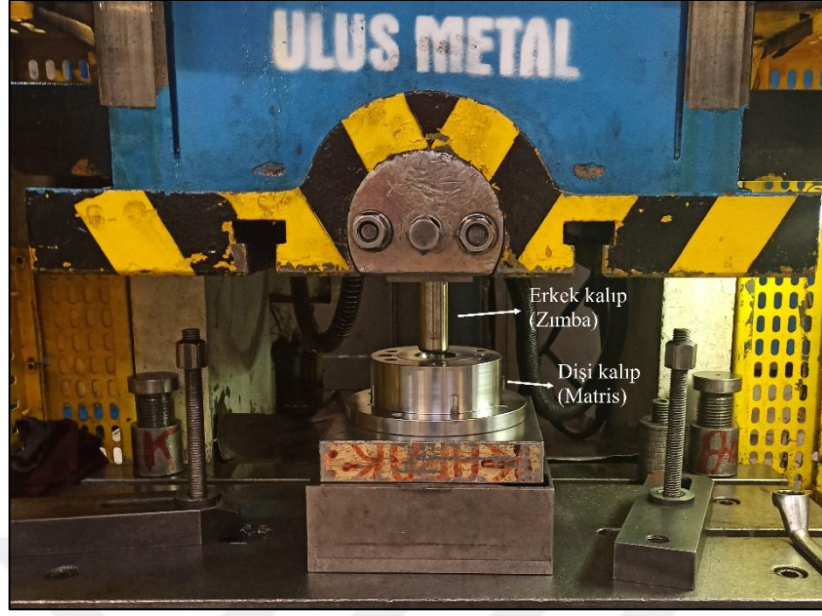
1. SAC METAL ŞEKİLLENDİRME

Günümüz üretiminde her ne kadar plastik, kompozit, metalik köpük vb. ürünler kullanılarak üretilen parça sayısı artsa da kritik noktalarda gerekli mukavemet, ömür vb. birçok özellik gerektiren ürünler hala çeliğin kullanılmasını gerektirmektedir. Bu sebeple metal şekillendirme işlemleri çok kullanılan önemli üretim yöntemlerindedir.

Bilindiği gibi dış kuvvetlerin etkisi sonucu akma sınırının üstünde bir kuvvete maruz kalan metal plastik deformasyona yani kalıcı şekil değişimine uğramaktadır. Sac metal şekillendirme işlemi bu teoriye dayanmaktadır.

Sac metal şekillendirme işlemleri günümüzde genellikle mekanik veya hidrolik preslerle yapılan işlemlerdir. Farklı kalınlıklarda sac metal istenilen parçaya yönelik farklı operasyonlar sonucu şekillendirilerek birbirinden farklı ürün elde edilmesi amaçlanmaktadır. Sac metaller genelde 6 mm ve altında kalınlığa sahiptirler, kalınlıkları genişlik ve uzunluğuna göre daha incedir. Daha fazla kalınlığa sahip ise bu parçalar plaka olarak adlandırılmaktadır. Sac metal şekillendirme işlemleri çok geniş ve farklı alanlarda kullanılmakta olan parçaların üretimi için kullanılan önemli bir yöntemdir. Kullanılan saclar kalın ve gevrek olmadığı sürece soğuk şartlarda şekillendirilebilmektedir.

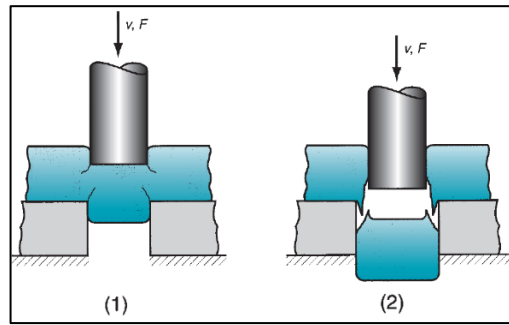
Sac metal şekillendirmede haddelenmiş ve belirli bir kalınlığa sahip sac metal, dişi ve erkek kalıp olmak üzere iki kalıp arasında işlem görerek nihai ürün olarak ortaya çıkmaktadır. Zimba (punch) olarak adlandırılan erkek kalıp genellikle hareketli olan ve preste üst tablaya bağlanan kısma verilen isimdir. Aynı zamanda bu parça istampa olarak da adlandırılmaktadır. Dişi kalıp (die) olarak adlandırılan kısım genellikle preste hareketsiz olarak alt tablada kalan kısımdadır. Aynı zamanda matris olarak da adlandırılmaktadır (Şekil 1.1). Sac metal, zimba ile dişi kalıp arasında kalarak şekillenmektedir. Bu işlemler sırasında basma ve çekme kuvveti uygulanması sac metal şekillendirmenin temelini oluşturmaktadır. Sac metal şekillendirme işlemleri temelde kesme, bükme, gererek şekillendirme ve derin çekme olmak üzere dört başlık altında incelenmektedir.



Şekil 1.1. Sac metal kalıbı

1.1. Kesme

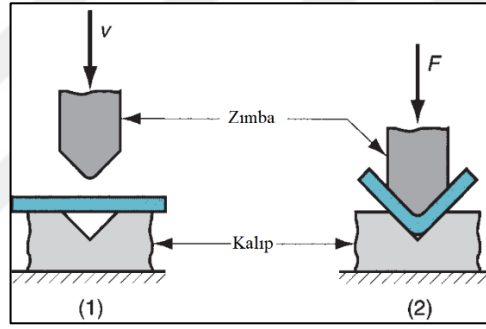
Sac metallerde kesme işlemi düz malzeme formlarının kesilmesi işlemidir. Şekil 1.2'de görüldüğü gibi işlemde sabit ve hareketli iki keskin kenar kullanılarak kesme işlemi gerçekleştirilmektedir. Kesme işleminde zımba kesilecek sac yüzeyinde plastik deformasyon meydana getirmektedir. Farklı tip bıçak ve kesiciler kullanılarak mekanik, hidrolik ve pnömatik güç kullanan makinelerle kesme işlemi gerçekleştirilmektedir [1]. Kesme işleminde zımba ve kalıp arasındaki boşluk, kullanılan sacın kalınlığı, malzeme cinsi, mukavemeti ve kesme uzunluğu gibi dikkat edilmesi gereken parametreler vardır [2]. Uygun kalıp zımba aralığı bırakılmadığında kesme kalitesi düşerek kesme yüzeyinde girinti ve çıkıntılara neden olabilmektedir.



Şekil 1.2. Kesme işlemi [3]

1.2. Bükme

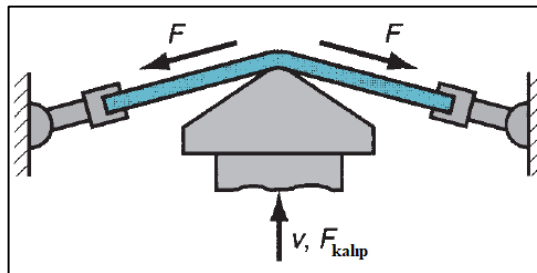
Bükme işlemi sadece belirli profillerde parçalar oluşturmak için değil aynı zamanda atalet momentini arttırmak suretiyle parçanın sertliğini arttırmak için de kullanılmaktadır [1]. Bükme işleminde sac metal tarafsız eksen etrafında eğilmektedir. Tarafsız eksen altında basma, üstünde çekme kuvvetleri ile bükülen sac metal kalıcı deformasyona uğrayarak şekillenmektedir. Şekillendirme sonrası bir miktar elastik deformasyon sebebiyle geri yaylanma gözlemlenmektedir. Bükme işlemlerinde gerilen düz levha veya metal şeritlerin yanı sıra boru, çubuk, tel gibi malzemeler şekillendirilmektedir. Bükme işleminde metalin yumuşaklığı, kalınlığı ve kırmadan verilebilecek en küçük bükme çapı önemli parametrelerdendir [2]. Şekil 1.3'te bükme işlemi görülmektedir.



Şekil 1.3. Bükme işlemi [3]

1.3. Gererek Şekillendirme

Gererek şekillendirme işlemi sac malzemenin iki tarafından sabitlenerek istenilen formlarda eğildiği işlemlerdir. Şekil 1.4'te görüldüğü gibi gerilen saca farklı bir kalıpla baskı uygulanarak istenen şekil elde edilmektedir. Bu işlemde gerdirme ve eğme sonucu geri yaylanma azalmaktadır. Karmaşık şekillendirme işlemleri için uygun ve ekonomik bir yöntemdir [3].



Şekil 1.4. Gererek şekillendirme işlemi [3]

1.4. Derin Çekme

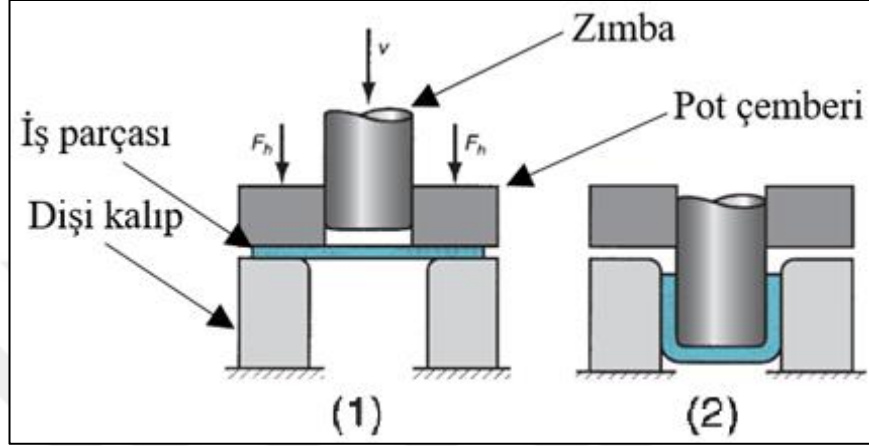
Sac metal şekillendirme işlemlerine bakıldığında hızlı deformasyona uğrayarak üretim verimliliğini ciddi derecede etkileyen, zorlu ve birçok parametrenin (pres, kalıp, tasarım, kullanılan malzemeler, yağlayıcılar) etki ettiği karmaşık yapıya sahiptir. Derin çekme işlemleri tüm parametrelerin etkileşimlerinin değerlendirilmesinin zor olduğu bir uygulamadır [4]. Otomotiv ve havacılık endüstrisi gibi farklı alanlarda çok kullanılan şekillendirme yöntemlerinden biridir [5].

Derin çekme işleminin temeline baktığımızda amaç düzlemsel sac metali zımba vasıtasıyla kalıp boşluğuna iterek plastik deformasyon ile istenilen derinlik ve boyutlara sahip üç boyutu mühendislik parçalarının elde edilmesidir. Bu proses sonucu ortaya çıkan ürün derinlikleri çapına göre daha büyüktür. Üretilecek olan ürünlerin kalitesi, nihai duvar kalınlığına, kırışiksız ve yırtılmamış olmasına göre belirlenir. Şekillendirme için gereken kuvvet; malzemenin plastik bölgeye geçebileceği kadar büyük, kuvvet ortadan kalktığında ürünün geri yaylanmamasını ve elastik olarak deforme olmamasını sağlayacak kadar yeterli olmalıdır. Derin çekme birden çok aşamadan oluşabilen işlemler sonrası sıkıştırma-germe sonucunda parça üzerinde çekme ve basma gerilmelerini aynı anda meydana getiren ve sac metalin kalıp şeklini alarak ürün haline gelmesini sağlayan karmaşık bir işlemdir [5-7].

Derin çekme işlemi ile montaja gerek duymadan minimum hammadde kullanımı ve minimum fire oranı ile ürün eldesi söz konusu olabilmektedir. Derin çekme işlemi iki farklı şekilde gerçekleştirilebilmektedir. İlki saf çekme denilen sac malzemenin kalınlığında bir değişim olmadan yapılan işlemdir. Diğeri ise ütüleme denilen, sac malzemenin kalınlığında azalma ile gerçekleştirilen işlemdir [1].

Derin çekme işlemi pot çemberi diğeri adıyla baskı plakası kullanılarak veya kullanılmadan yapılabilmektedir. Pot çemberi baskısı sacın istenilen şekillendirme koşulları çerçevesinde kalıba akmasına izin verecek ancak kırışmaya müsaade etmeyecek miktarda olmalıdır. Pot çemberi kullanılmadan yapılan derin çekme işlemleri sacın buruşma ve kırışıklığa uğrama olasılığını arttırmaktadır. Bu sebeple özellikle küçük çaplı saclar için uygun bir proses olmamaktadır.

Şekil 1.5'te görüldüğü gibi sac malzeme pot çemberi ve dişi kalıp arasında belirli bir basınç altında sıkıştırıldıktan sonra zımba hareketi ile sac malzeme kalıp boşluğuna itilmektedir. Sacın konkav hale gelmesiyle derin çekme işlemi gerçekleştirilmektedir. Zımba ve dişi kalıbın köşelerinin eğrilik yarıçapları işlemin sağlıklı gerçekleşmesi için önemlidir.



Şekil 1.5. Derin çekme işlemi [3]

Derin çekme işleminde genellikle şekil değişikliği miktarı şiddetlidir. İşlem tek aşamada gerçekleşemeyecek kadar ardışık çekim gerektirmektedir. İstenilen şekil eldesi için yeniden derin çekme, ters derin çekme, ütüleme gibi işlemler uygulanmaktadır. Yeniden derin çekme ve ters derin çekme işlemleri çekilen parça çapını küçültecek işlemlerdir. Ütüleme işlemi çap değişimi olmadan parça kalınlığını azaltarak yapılmaktadır. Gereken çekme sayısı (n) Denklem (1.1)'de görüldüğü gibi parça yüksekliğinin (h) parça çapına (d) oranlanması sonucu;

$$n = \frac{h}{d} \quad (1.1)$$

elde edilmektedir [2].

Denklem sonucu elde edilen değerler Tablo 1.1'de gösterilen aralıklar dikkate alınarak parça için gerekli çekme sayısı elde edilmektedir.

Tablo 1.1. Silindirik parça için gereken çekme sayısı [2]

h/d	<0.6	0.6-1.4	1.4-2.5	2.5-4.0	4.0-7.0	7.0-12.0
n	1	2	3	4	5	6

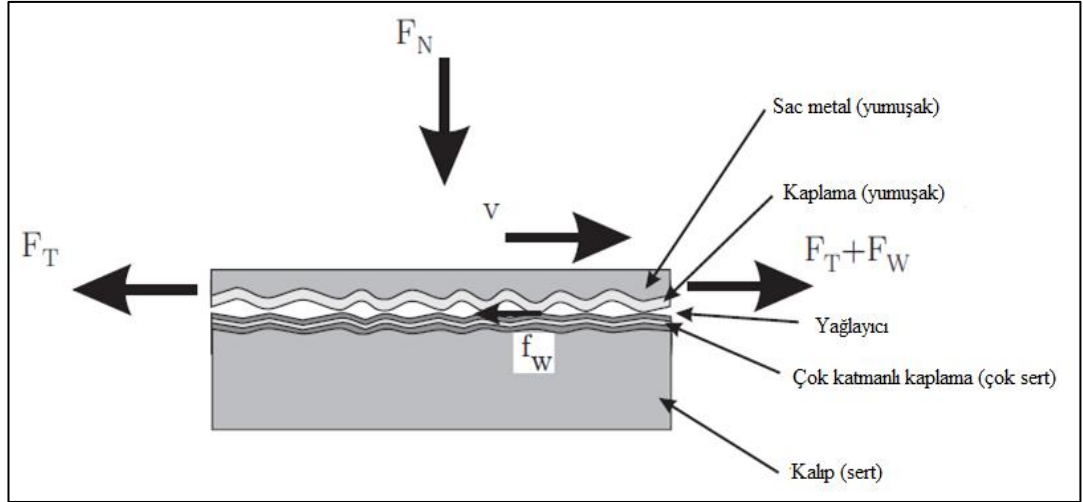
2. TRIBOLOJİ

Triboloji sözcüğü Yunanca ‘tribos’ yani kayma anlamına gelen kelimedenden türetilmiştir. Günümüzde sürtünme, aşınma ve yağlama başlıklarını kapsayan çalışmaların genel adıdır. Triboloji kelimesinin kullanımı yeni olsa bile içeriği açısından çok daha uzun yıllardan beridir kullanılmaktadır.

Triboloji birbirine belirli bir basınç altında temas eden ve hareket halindeki yüzeyler arasında geçerlidir. Temas halinde olan yüzeylerin kimyasal ve fiziksel yapıları zamanla değişmektedir. Üretim göz önüne alındığında birbiri üzerinde temas eden yüzeylerden ve temas sonucu oluşan hata ve kusurlardan kaçmak mümkün olmamaktadır. Amaç mümkün oldukça az temas ile istenmeyen hata ve kusurların önüne geçmek, olabildiğince minimum baskı kuvveti ve enerji ile üretim verimliliğini arttırmaktır. Sürtünme her zaman istenmeyen bir durum değildir. Derin çekme uygulamaları dahil pek çok uygulamada var olmaları gereklidir. Gereken sürtünme değerlerinin elde edilmesi, aşınma sorununun ise minimum değerlerde tutulması yağlayıcı kullanımı ile sağlanmaktadır.

Günümüzde üretimin önem kazandığı bu ortamda artık sadece üretmek yetmemektedir. Yapılan çalışmalar üretim esnasında enerjinin üçte birinin sürtünme sonucu kaybedildiğini ve aşınma sonucu ciddi ekonomik kayıpların yaşandığını ortaya koymaktadır. Oluşan bu rekabet ortamı elde edilecek ürünün olabildiğince kısa sürede daha kaliteli ve daha az malzeme kullanımı ile üretilmesinin önemini arttırmaktadır. Bu noktada üretim esnasında enerjiyi ve malzemeyi verimli kullanmak için tribolojiyi incelemek büyük önem arz etmektedir.

Aşınma ve sürtünme olaylarının görüldüğü tüm teknik sistemler tribolojik sistem olarak adlandırılmaktadır [8]. Şekil 2.1’de bir tribolojik sistem görülmektedir. Bir tribolojik sistemdeki bileşenler; temas halindeki yüzeyler, yağlayıcı ve çalışma ortamı olarak tanımlanmaktadır.



Şekil 2.1. Tribolojik sistem [9]

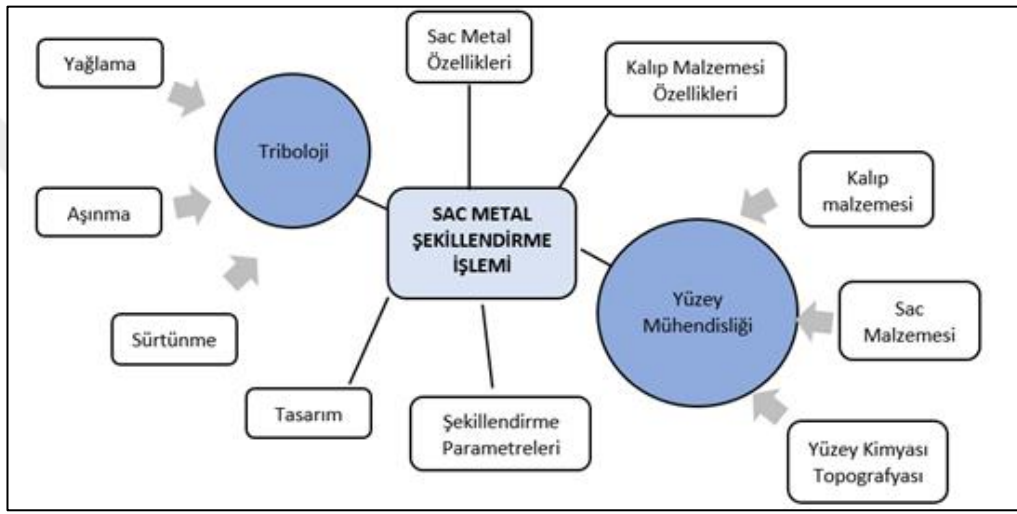
Tribolojik sistemler açık ve kapalı olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Kapalı tribosistemlerde zamanla aynı yüzeylerin sürece dahil olması sonucu yüzey topoğrafyası düzleşmektedir. Bu düzleşme sonucu aşınma azalır ve yağlama kolaylaşır. Kapalı tribosistemlerde koşulların makul doğrulukta tahmini mümkün olabilmektedir. Diğer bir sistem olan açık sistemler, kapalı sistemlerden farklı olarak yüzeylerden birinin sürekli yenilenmesini içermektedir. Bu sebeple daha şiddetli tribolojik koşullar altında aşınma tahminleri karmaşık hale gelmektedir. Sac metal şekillendirme işlemleri açık tribosistemin başlıca uygulamalarından bir tanesidir [10].

2.1. Sac Metal Şekillendirmede Triboloji

Sac metal şekillendirme işlemlerine baktığımız zaman önemli olayın sac metal ile kalıp yüzeyleri arasındaki temasta gerçekleştiği görülmektedir [11]. Temasın olduğu yerde sürtünme, aşınma ve yağlayıcı parametreleri akla gelmeli ve işlem triboloji kapsamında incelenmelidir. Amacımız triboloji başlığı altında inceleyeceğimiz parametreleri en aza indirmek değil kontrol altına almak olmalıdır.

Çoğu bileşen arızası yüzeyden başlamaktadır. Bu nedenle malzemelerin tribolojik performansının, kaplamaların ve yağlayıcıların, sistem bileşenlerinin tasarımı için önemli bir faktör olduğu unutulmamalıdır [11]. Yapılan çalışmalar uygun kalıp malzemeleri ve uygun yağlayıcılarla amaca yönelik uygulama sonucu şekillendirme ve kesme kalıplarının aşınmasının önemli ölçüde azaltılacağını ortaya koymuştur [12].

Tribolojik özellikler, temas halindeki malzemeler için çok önemlidir ve sac metal şekillendirme gibi hareketli bir sistemin parametrelerin bir ayağını oluşturan önemli etkenlerden biridir [13]. Tribolojinin kontrol altına alınması ile ciddi enerji tasarrufu, çevre zararı önlenmesi ve maddi kazanç eldesi mümkün olmaktadır. Sac metal şekillendirme tribolojisi; ürün kalitesi, ekipman kapasitesi, kalıp ömrü, çevre sağlığı ve işçi sağlığı gibi parametrelerin üzerindeki etkisi ile sac metal şekillendirmede önemli bir rol oynamaktadır [14]. Şekil 2.2’de sac metal şekillendirme işlemine etki eden parametreler görülmektedir.



Şekil 2.2. Sac metal şekillendirme özelliklerine etki eden faktörler [11]

Miklós Tisza ve Tibor Fülöp yapmış oldukları çalışmada birçok otomobil üreticisi ile görüşerek sac metal şekillendirme işlemlerinde tribolojinin ana etmenlerden biri olduğunu ortaya koymuşlardır [4]. Sac metal şekillendirme işlemlerinin başarıya ulaşması için; şekillendirme işleminin türü, kullanılan sac malzeme özellikleri, kalıp malzemesi, kalıp/sac arayüzündeki tribolojik koşullar, sıcaklık, yüzey kalitesi, temas basıncı, kayma hızı, kullanılacak olan yağlayıcı özellikleri, plastik deformasyon miktarı ve istenilen ürün gereksinimleri dikkat edilmesi gereken parametrelerdendir [8, 15]. Bu sebeple işlem sırasında tribolojik koşullar kontrol altına alınarak ortaya çıkabilecek kusurlar azaltılmalıdır.

Maliyet açısından bakıldığı zaman seri üretim şartlarında prosesin tribolojik şartlarının bire bir test edilmesi uygun değildir. Bu nedenle proses şartlarını simüle eden farklı deneysel test metodları ve sayısal çözümleme programları ile değerlendirmeler yapılarak tribolojik şartlar iyileştirilmeye çalışılmaktadır. Ancak her ne kadar tüm

parametreler dikkate alınarak simüle edilmeye çalışılsa bile bazı şartların tam olarak sağlanamaması çalışmaların doğruluk payını azaltabilmektedir. Deneysel ortamda farklı denemeler arasındaki bekleme süreleri göz önüne alındığında, seri üretim şartlarında proses devamlılığı sebebiyle oluşacak sıcaklık değerine ulaşamayacak olması doğruluk payını azaltan örneklerden bir tanesidir. Triboloji çalışmalarında sıcaklığın sürtünme, aşınma ve yağlayıcı üzerindeki etkisi göz ardı edilemeyecek kadar önemlidir.

M. Bamjac ve arkadaşları yapmış oldukları çalışmada tribolojiye termodinamik açıdan yaklaşmışlardır. Pratik kullanım için henüz uygun olmasa bile termodinamik yaklaşım, tribolojik sistemlerin davranışının analizi imkanını sunmaktadır [16]. Tribolojinin üretim esnasında kontrolü oldukça zor olduğundan sac metal ile kalıp arasındaki davranışını simüle eden birkaç farklı tribolojik test yöntemi geliştirilmiştir [11]. Böylece sürtünme şartları, sürtünme katsayısı, kullanılacak olan yağlayıcı parametreleri değerlendirilebilmektedir. Ermanno Ceron ve Niels Bay yeni tribo sistemleri test etmek için üretim şartlarının sağlanmasına yönelik çalışma yapmışlardır. Üretimde sürekli halde çalışma sonucu ortaya çıkan sıcaklık etkisini laboratuvar ortamında test etmek zordur. Bu kapsamda sac malzemeyi tanımlamak üzere spesifik ekipmanlar geliştirmişlerdir [17].

Tehlikeli yağlayıcı kullanımının azaltılmasına yönelik mevzuat nedeniyle yeni tribo sistemler önemli hale gelmiştir ve bu konuda birçok çalışmanın başlamasına neden olmuştur [18]. Bu amaca yönelik E. Ceron ve N. Bay yaptıkları çalışmada gerilim altında bükme testlerini çalıştırabilen evrensel bir cihaz geliştirilmişlerdir [19].

2.1.1. Derin çekme tribolojisi

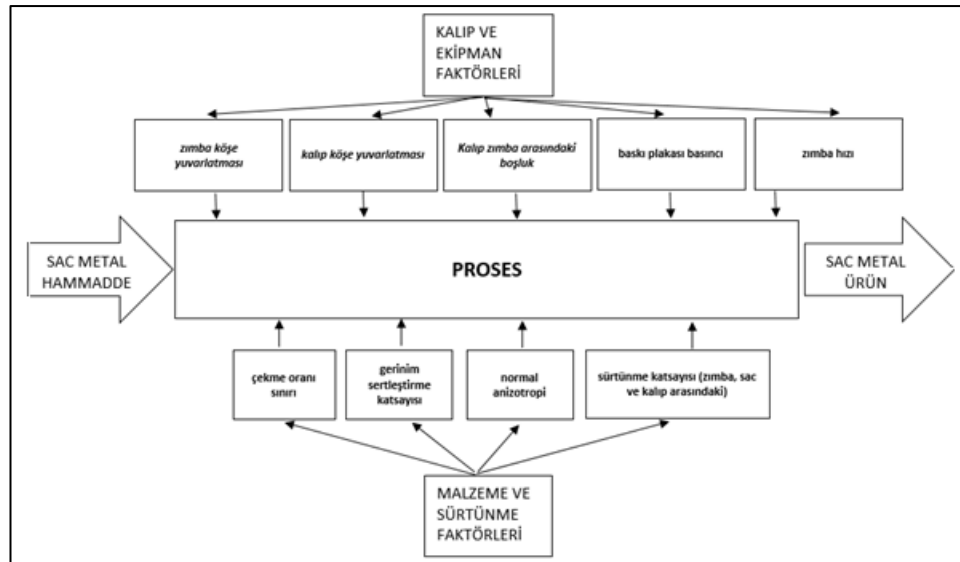
Derin çekme işlemi tribolojik açıdan dikkat edilmesi gereken sac şekillendirme prosesidir. Tribolojik etmenler derin çekme kusurlarının temelini oluşturmaktadır. Derin çekme işlemlerinde en çok buruşma ve yırtılma kusurları meydana gelmektedir [20]. Tribolojik incelemelerle parametreleri kontrol altında tutmak suretiyle derin çekme kusurlarının oluşmadan önüne geçmek gerekmektedir. Böylece üretim duruşları minimize edilerek ekonomik kayıplar azaltılabilir. Mümkün olduğu kadar sürtünme, aşınma kontrol altına alınabilirse şekillendirme işlemi verimli hale gelecektir. Şekil 2.3'te kırışıklık, yırtılma gibi derin çekme kusurları görülmektedir.



Şekil 2.3. Derin çekme kusurları

A. R. Joshi ve arkadaşları derin çekme işleminde oluşan kusurlardan kırışıklıkların özellikle duvar kırışıklıklarının giderilmesi için yaptıkları çalışmada analize dayalı olarak kırışıklık oluşumunun ana nedenini ani kesitsel değişikliklere bağlamışlardır [21]. Derin çekme prosesi üzerinde etmenler malzeme, sürtünme faktörleri ve alet, ekipman faktörleri (kalıp geometrisi ve işlem koşulları) olmak üzere iki ana başlık altında incelenmektedir. Bu etmenler birbirleri ile ilişkilidir. Birinin iyi olması diğerinin kötü olmasını tolere edebilir. Örneğin malzeme kolay biçimlendirilebiliyorsa iyi olmayan kalıp geometrisi ve işlem koşulları altında istenilen ürün eldesi sağlanabilir [1].

Şekil 2.4'te derin çekme prosesini etkileyen bu iki etmen daha detaylı görülmektedir.



Şekil 2.4. Derin çekme prosesini etkileyen parametreler [1]

Derin çekme prosesi diğer sac şekillendirme proseslerine nazaran işlem hızından daha fazla etkilenmektedir. Zımbanın hızı, sac malzemenin kalıp içerisine akma süresini ve

sacın fiziksel ve mekanik özelliklerini etkilemektedir. Uygun seçilmeyen zımba hızı sonucu malzeme şekil değişimi için yeterli/gerekli zamanı bulamayacağından incelme, yırtılma gibi şekillendirme kusurları ortaya çıkabilmektedir [22, 23].

Derin çekme prosesinde pot çemberi ile sac metalin temasta olduğu yüzey ve dişi kalıp eğrilik yarıçapı ile sac metalin temasta olduğu yüzeyler malzeme hareketliliğinin olduğu bölgelerdir. Ayrıca dişi kalıp eğrilik yarıçapı yüksek basınçlar sonucu aşınmanın sıklıkla gözlemlendiği bölgedir. Sac kalınlığı, pot çemberi kuvveti, sürtünme katsayısı ve kalıp eğrilik yarıçap değeri gibi değişkenler maksimum gerilimin konumu ve büyüklüğünü etkileyen parametrelerdir [10].

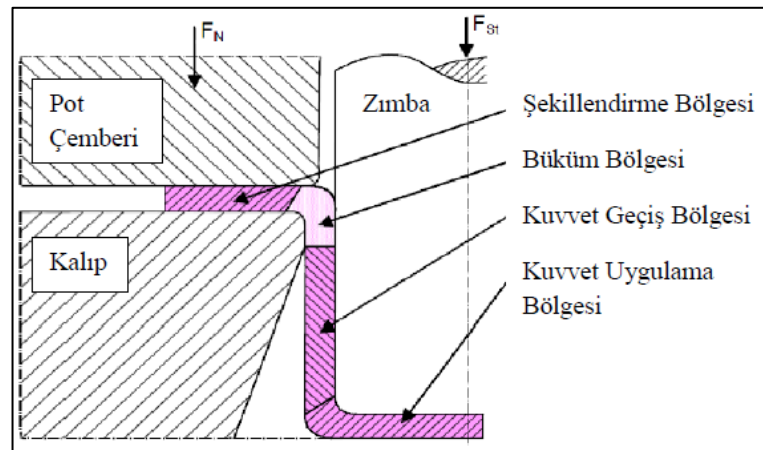
Proses esnasında oluşan temaslar üçe ayrılmaktadır:

- Zımba ve sac metal arasındaki temas
- Kalıp ve sac metal arasındaki temas
- Pot çemberi (baskı plakası) ve sac metal arasındaki temas [24]

Yukarıda görülen temaslar sonucu gerçekleşen plastik deformasyon proses esnasında geniş alanlarda görülmektedir. Bu alanlara baktığımızda:

- İş parçasının henüz kalıp boşluğuna girmemiş olan düz kısmı (flaş) - (Şekillendirme Bölgesi),
- Büküm Bölgesi,
- İş parçasının kalıp boşluğuna (duvar) çekilen kısmı – (Kuvvet Geçiş Bölgesi),
- Zımba ve iş parçası arasındaki temas bölgesi – (Kuvvet Uygulama Bölgesi) olmak üzere dörde ayrılabilir [1, 25, 22].

Şekil 2.5'te bu bölgeler görülmektedir.



Şekil 2.5. Derin çekme bölgeleri [22]

Şekillendirme bölgesi olarak adlandırılan flanş kısmında, iş parçanın kalıp boşluğuna çekilmesinden kaynaklı radyal çekme gerilimi görülmektedir. Pot çemberi kullanılması ile çevresel basma kuvvetleri oluşmaktadır. Bu kuvvetin çok yüksek değerlerde olması malzemenin kalıp boşluğu içerisine akışını engelleyerek flanş bölgesinde kalınlığın artmasına neden olmaktadır. Flanş bölgesinde oluşacak burulmalar ile parça üzerinde kırışıklık oluşmaktadır. Bu nedenle uygun pot çemberi kuvveti seçilmelidir. Büküm bölgesinde, radyal çekim kuvvetleri ve çevresel basma kuvvetleri görünmektedir. Kalıp ve zımba eğrilik yarıçapının bölge üzerinde büyük etkisi vardır. Uygun değerler belirlenmezse yırtılma oluşabilir. Ayrıca çekme kuvveti yüksek ise yırtılma gözlenebilir. İş parçasının kalıp boşluğuna (duvar) çekilen kısmı olan kuvvet geçiş bölgesinde, radyal çekim kuvvetlerinin etkisi vardır. Parça kalınlığı azalarak uzama gerçekleşir. Tribolojik etkilerin önemli olduğu bir bölgedir. Zımba ve kalıp ile sac metalin temas halinde olduğu ve sürtünme kontrolünün önem kazandığı bir bölgedir. Zımba ve iş parçası arasındaki temas bölgesi olan kuvvet uygulama bölgesinde, zımba ucu parça üzerine temas halindedir. Çekme kuvveti etkisi altında çeper kalınlığı azalmaktadır [1, 23, 26].

Derin çekme yönteminin çok kullanılması ve diğer proseslerden farklı olarak sac metalin zımbaya sarması proses özelinde kalıp malzeme seçimi, sac malzeme özellikleri; sac malzemenin cinsi, alaşım elementleri, üretim yöntemi, ısıl işlem, anizotropi, hadde yönü, kimyasal bileşimi, mekanik özellikleri, deformasyon hızı, üretim şartları ve temas durumlarının irdelenmesi gerekliliğini ortaya çıkarmaktadır [23, 27-29].

Özgür Özduş ve M. Emin Erdin yaptıkları çalışma ile derin çekme uygulamalarında yaygın olarak kullanılan DC01, DC04, DD13, DD14 sac malzemelerinin şekillendirme sonuçlarını; pot çemberi kuvveti ve sürtünme koşulları şartlarını dikkate alarak karşılaştırmışlardır [30].

Sorunsuz bir proses için kalıp geometrisinin uygun olarak tasarlanması önem arz etmektedir. Derin çekme işleminde zımba ve kalıp köşeleri sac metalin sorunsuz şekillendirilebilmesi için prosesin özelliklerine bağlı olarak belirlenen eğrilik yarıçapları (R_z ve R_k) dikkate alınarak imal edilmelidirler [7]. Aksi halde oluşacak ürün üzerinde yırtılma, kırışıklık gibi istenmeyen kusurlar meydana gelmektedir.

Vedat Taşdemir kalıp üzerinde farklı eğrilik yarıçaplarının ürün üzerine etkilerine dair çalışmasında dört farklı kalıp eğrilik yarıçapı incelemiştir [6].

Adnan I. O. Zaid yaptığı çalışmada maksimum çekme kuvvetinin, kalıp profili yarıçapının artmasıyla azaldığı ve zımba profil yarıçapının artmasıyla arttığını ve hem zımba hem de kalıp profili yarıçaplarının artması, kalıp profili yarıçapından daha fazla etkilenecek üretilen kapların buruşma riskini arttırdığını gözlemiştir [31]. Krupal T. Shah ve arkadaşları derin çekme prosesinde kusurlara sebebiyet veren parametreleri belirlemeye yönelik çalışmalar yapmışlardır [32]. Kopanathı Gowtham ve arkadaşları alüminyum malzeme kullanarak Deform-3D uygulaması ile derin çekme prosesinde kalıp yarıçapının etkileri özelinde incelemeler yapmışlardır [33].

Eğrilik yarıçapı dışında kalıp ve zımba arası boşluk ve sacı tutmak için oluşturulan pot çemberi baskısı, zımba hızı, çekme derinliği, ürün geometrisi, kullanılan yağlayıcı gibi parametreler dikkat edilmesi gereken diğer etmenlerdendir. Doğru derin çekme prosesi tasarımının oluşturulması ürün kalitesi ve proses sağlığı açısından önemlidir. Tasarım için daha önce gerçekleştirilen çalışmalar sonucu elde edilen formüllere dikkat edilmelidir. Bakıldığı zaman kalıp ile zımba arası boşluğun (c), sac kalınlığından (t) en az %10 fazla olması gerekmektedir. Diğer bir önemli parametre DR derin çekme oranıdır. Bu oran Denklem (2.1)'de görüldüğü gibi D_b sac metal çapının (açınım çapının), D_p zımba çapına oranlanması ile hesaplanmaktadır ve maksimum değeri 2 civarındadır [3].

$$DR = \frac{D_b}{D_p} \quad (2.1)$$

Derin çekme prosesini karakterize eden diğer bir ifade azaltma oranı Denklem (2.2)'de verilmiştir.

$$r = \frac{D_b - D_p}{D_b} \quad (2.2)$$

Bunun dışında sac kalınlığının sac metal çapına oranının ise %1'den büyük olması istenmektedir. Oranın küçülmesi parça üzerinde kırışıklığa neden olmaktadır [3].

Derin çekme işlemi birçok etmenin rol aldığı ve oluşabilecek kusurların fazla miktarda olduğu karmaşık bir yapıya sahiptir. İstenilen kalitede ürün eldesi için parça

şekillendirilirken istenmeyecek derecede malzeme akışı gibi parametrelerin önüne geçilmelidir. Bunun için kalıbın ilk bağlandığında preste üst ve alt tablaya bağlanan kısımlarının doğru merkezlenmesi ve sonrasında sac metal şekillendirmede aşınma, sürtünme ve yağlayıcı özelliklerinin mümkün olduğunca tahmin edilebilir ve doğru uygulanabilir olması gerekmektedir.

Tribolojik koşullar farklı deneysel sistem tasarımları ile incelenmektedir. Daha önce bahsedildiği gibi deneysel çalışmalar sırasında üretim şartlarının tam anlamıyla sağlanamayacak olması prosesin seri üretim esnasında farklı şartlardan etkileniyor olması doğruluk payını azaltmaktadır. Günümüzde sonlu elemanlar analizi ile parametreler değerlendirilerek gerçeğe yakın sonuç eldesinde önemli bir artış sağlanabilmektedir [34].

Sonlu elemanlar analizi tahmin hassasiyeti ve sorunun çözüm süresi dengesinin kurularak iyi seçilerek gerçeğe mümkün olduğunca yakın tahminler elde edilebilmektedir [35]. Hüseyin Vatansever ve Emre Esenler, Kévin A. Mouta ve arkadaşları hesaplama parametrelerinin simülasyon süre ve hassasiyetine etkilerini incelemiştir [35, 36]. M. El-Sherbiny ve arkadaşları üretim maliyetlerini azaltarak kalite artışı sağlanacağını ortaya koyan çalışmalarında sonlu elemanlar analizi ve istatistiksel yöntemleri kullanmışlardır [37].

2.2. Sürtünme

Sürtünme temasta bulunan yüzeylerin hareketlerine karşı oluşan direnç olarak tanımlanabilir. Sürtünme genellikle en aza indirilmek istenir. Sürtünme bazı istenmeyecek durumlara sebebiyet vermesine rağmen gereklidir. Farklı uygulamalarda sürtünme ihtiyacı farklılık gösterebilmektedir. Örneğin sac metal şekillendirme işlemlerinden derin çekme için sürtünmenin en aza indirilmesi istenmemektedir. Prosesin amacına bakıldığında sürtünme ihtiyacı ortaya çıkmaktadır. Zimba sac metali kalıp boşluğuna iterken pot çemberi ile dişi kalıp arasında belirli bir baskı altında bulunan sac metal akışı sürtünme ile kontrol altında alınmalıdır. Ancak makul değerlerde olmalıdır yoksa kalıp ve ürün üzerinde istenmeyecek kusurlara sebebiyet verebilmektedir.

Amontos-Coulomb yasasına göre sürtünme katsayısı sürtünme kuvveti ile normal yük arasındaki orandır ve Denklem (2.3)'teki gibi ifade edilmektedir.

$$\mu = \frac{F_T}{F_N} \quad (2.3)$$

Sac metal şekillendirme işlemlerinde sürtünmeye [38] baktığımız zaman iki farklı sürtünme bileşeni görülmektedir.

- Temas halindeki yüzeyler arasında adhezif bağ oluşumu sonucu gerçek temas alanlarına etki eden kimyasal etkileşim kaynaklı adhezyon kuvveti (μ_A)
- Daha sert olan zımba-kalıp yüzey pürüzlerinin daha yumuşak olan sac metal yüzeyinde işlem sırasında oluşturduğu deformasyon kuvveti (μ_P)

$$\mu = \mu_A + \mu_P \quad (2.4)$$

Denklem (2.4)'ten anlaşılacağı üzere sac metal şekillendirmede bu iki kuvvetin toplamı ile sürtünme kuvveti elde edilmektedir [10, 15].

Sürtünme hareket ile meydana gelmektedir ki sac metal şekillendirme işlemlerinde hareketsiz iş parçası ile üretim mümkün değildir ve dolayısıyla sürtünme önlenemez bir olgudur.

Sürtünmeyi etkileyen en önemli parametreler sıcaklık ve yağlayıcı olmaktadır. Sıcaklık artışı kararsız bir durum yaratacağından sürtünme için kullanılan formüller yetersiz kalmaktadır. Laboratuvar deneyleri yapılmalıdır. Tabii üretim şartlarının sağlanması tam olarak gerçekleştirilemeyeceğinden yine sürtünme katsayısının bir tahmini olarak sonuç ortaya çıkmaktadır. Sürtünme kuvveti tahmini için yaygın olarak pin-on disk ve çekme-bükme sürtünme testleri kullanılmaktadır [14].

Derin çekme gibi karmaşık bir proseste sürtünme birçok değişkene bağlıdır. Sürtünme katsayısı; yağlama koşulundan, sac malzemesi ve kaplamasından, takım malzemesi ve kaplamasından, takım-sac malzeme ikilisinden, normal basma ve derin çekme hızından etkilenmektedir. Kullanılacak olan test yöntemlerinin seri üretim şartlarına mümkün olduğunca uygun olması istenilen en önemli özelliktir. Bu istek derin çekme işlemi için iyi test yöntemlerinin arayışının başlamasına neden olmuştur [39].

Tomasz Trzepiecinski ve Hirpa G. Lemu kalıbın ve zımbanın yuvarlatılmış kenarlarında sürtünme olayını farklı proses parametrelerindeki değişimleri dikkate

olarak incelemişlerdir [40]. Bir diğer çalışmalarında ise sürtünme koşullarının mümkün olduğunca üretim şartları ile test edilmesine yönelik çalışmışlardır [41]. Rui Ma ve arkadaşları yaptıkları çalışma ile sürtünme katsayısını ölçme aparatı geliştirmişlerdir [42].

Tüm metal şekillendirme süreçlerinde sürtünmenin doğrudan analizi neredeyse imkansızdır. Genellikle yükler ölçülerek analitik ve ampirik yöntemler kullanılmaktadır. Ancak şiddetli koşullarda bu değerlendirmeler yapılamayacağından laboratuvar çalışmaları yapılmaktadır [43].

2.3. Aşınma

Aşınma, iki katı yüzeyin hareketli teması sonucu yüzeylerde malzeme kaybı olma durumudur. Üretim şartlarında performans kaybına neden olabileceğinden istenmeyen bir durumdur. Aşınma mekanizmasının başlaması ve ilerlemesinde yüzey kusurları hızlandırıcı rol oynar. Hem adhezif hem de abrasif mekanizmalar nedeniyle aşınma meydana gelebilir [10]. Genellikle aşınmaya eş zamanlı çalışan mekanizmalar sebep olmaktadır [14]. Aşınmayı sınıflandıracak olursak adhezif aşınma, abrasif aşınma, tribo kimyasal aşınma ve yüzey yorgunluğu olmak üzere dört temel aşınma mekanizması ortaya çıkmaktadır [15, 24].

2.3.1. Adhezif aşınma

Sac metal şekillendirmede en kritik olan aşınma mekanizması adhezif aşınmadır. Katı yüzeylerin tam anlamıyla pürüzsüz olmaması nedeniyle gerçek temas alanı her zaman görüldüğünden daha azdır. Bu iki yüzeyin teması, gerçek temas alanının yükü taşımak için yeterli olana kadar elastik veya plastik deforme olmasına sebep olmaktadır. Zayıf olan malzeme bozularak yüzeyinden kopan parçacıklar diğer yüzeye kalıcı veya geçici olarak yapışır. Böylece adhezif aşınma gerçekleşir. Bu aşınma mekanizması yüzeyler arasına yağ filmi eklenmesi ve farklı malzeme seçimleri ile önlenabilmektedir [15].

2.3.2. Abrasif aşınma

Abrasif aşınma sac metal şekillendirmede yaygın görülen bir mekanizma değildir [15]. Bu mekanizma sert bir yüzey veya parçacık, yumuşak malzemeyi karşı yüzeyden

ayırıldığında ortaya çıkmaktadır. Genellikle adhezif aşınma mekanizmasının bir sonucu olarak ortaya çıkmaktadır [10].

2.3.3. Tribo kimyasal aşınma

Tribo kimyasal aşınma proseste veya proses çevresinde meydana gelen mekanik ve termal işlemlerin kombinasyonu sonucu ortaya çıkmaktadır. Genellikle, proses sırasında oluşan sürtünme ile açığa çıkan ısı sonucu taze metal yüzeylerin ve aşınma parçacıklarının oluşumu ile tribofilm oluşumu desteklenir. İşlem sırasında sürtünme ısısının artması sürtünme katsayısını artırarak oksit esaslı tribo filmlerin oluşumuna zemin hazırlamaktadır [10].

2.3.4. Yüzey yorgunluğu

Yüzey yorgunluğu aşınması döngüsel gerilme değişimleri sonucu çatlak oluşumu ve çatlak ilerlemesi sonucu parça kopması ile meydana gelen aşınma türüdür [24].

2.4. Yağlayıcı

Yağlayıcı kullanımı temelde sürtünme kayıplarını azaltmak ve daha uzun süre hizmet sağlamak gibi iki amacı yerine getirmektedir [44]. Şekillendirme işlemi sırasında yağlayıcı kullanılmadığı durumlarda sürtünme katsayısının genellikle 0,5'ten yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Nadiren yağlayıcı kullanılmadan 0,5 altında sürtünme katsayısı elde edilir. Bu derece yüksek değerler kusurlara ve enerji kayıplarına sebebiyet vermektedir. Bu nedenle sac metal şekillendirmede yüzeler arasında sürtünme kuvvetini ve dolayısıyla ısı oluşumunu istenilen düzeyde tutabilmek ve temas halinde bulunan yüzeylerin aşınmasını azaltmak için çeşitli yağlayıcılar kullanılmaktadır [14, 15].

Kullanılan yağlayıcı temas halinde bulunan iki yüzeyi ayırarak adhezif aşınma olasılığının en aza indirilmesini sağlamaktadır. Ancak fazla yağ kullanımı çeşitli kalite sorunlarına sebebiyet vermektedir. Yağlayıcı uygun özelliklerde ve miktarda kullanılmalıdır. Doğru yağlayıcı için işlem sıcaklığı, işlem hızı, proses ekipmanlarının ve yağlayıcının fiziksel ve kimyasal uyumluluğu dikkate alınarak seçim yapılmalıdır.

Metal şekillendirme işlemlerinde dört grup yağlayıcı kullanılır:

- Sürekli bir film oluşturan ve hidrodinamik bir yağlamayı destekleyen hafif mineral yağlardan sentetik greslere kadar geniş bir viskozite aralığına sahip sıvılar,
- Aletler ve iş parçası ile kimyasal olarak reaksiyona giren, çok ince filmler oluşturan ve sınır yağlaması oluşturan uygun bileşimlere sahip emülsiyonlar,
- Temas arayüzünde bileşik katmanlar oluşturmak için aletler ve iş parçasıyla reaksiyona giren aşırı basınçlar için katkı maddeleri içeren organik malzemeler,
- Aletleri ve iş parçası yüzeylerini ayırmak için kullanılan grafit, cam, bor nitrür ve molibden disülfür gibi katılar [14].

Derin çekme işlemlerinde kullanılan başlıca yağ çeşitleri; gresler, madeni yağlar, molikotlu yağlar, mumlu yağlar, sabunlu kuru yağlama, teflon ve P.T.F.E. filmeri ve yağlama, grafitli yağlar, bitkisel yağlar, hayvansal yağlardır. Derin çekme işlemi sırasında sadece dişi kalıp ile sacın temas yüzeyi yağlanmalıdır [7, 11]. Zira zımba ile sacın temasta olduğu yüzeyde sürtünme kuvveti derin çekme işlemi için gereklidir.

Lucian Lăzărescu ve Dorel Banabic derin çekme prosesinde farklı sürtünme koşulları altında gerekli zımba yükü ile ilgili yapmış oldukları çalışmada kalıp ile pot çemberi arasında dört sürtünme koşulu altında (kuru, hidrolik yağ, lityum bazlı yağ ve hayvansal yağ kullanarak) derin çekme işlemini her bir sürtünme koşulu için üç farklı pot çemberi kuvveti ile gerçekleştirmişlerdir ve simülasyon sonuçları ile karşılaştırarak değerlendirmişlerdir [5].

Jan Filzek ve Peter Groche şekillendirme işlemi sırasında yağlayıcı davranışını ve tribolojik koşullar üzerindeki etkisini değerlendirmeye yönelik yaptıkları çalışmada otomotivde kullanılan farklı viskozitelere sahip beş yağlayıcı ile çalışmalarını gerçekleştirmişlerdir [45].

Son zamanlarda triboloji çalışmaları yeni bir boyut kazanmış ve yeşil triboloji kavramının ortaya çıkarak triboloji kontrolünün çevreye ve insana faydalarına yönelik araştırmaların ortaya çıkmasına neden olmuştur. Yapılan araştırmalar sac metal şekillendirme sırasında kullanılan yağlayıcıların çevreye olan zararlı etkilerinin ortaya çıkmasını ve yeşil triboloji anlayışının önem kazanmasını sağlamıştır. Bu nedenle yağlayıcı yerine kullanılacak alternatif yöntemlerin ilerleyen zamanlarda daha çok araştırma konusu olacağından hiç şüphe yoktur. İşlem sırasında kullanılan

yağlayıcıların atılması veya geri dönüştürülmesi ile ilgili ciddi sorunlar ortaya çıktığından bakteri ve mantarlar tarafından kullanım sonrası çevreye zarar vermeden ayrıştırılabilen yağlayıcılar geliştirilmeye çalışılmaktadır [46]. Ayrıca yağlayıcı kullanmadan önce adhezif aşınmanın önlenebileceği bir diğer yöntem olan kalıp ve sac kimyasının değiştirilmesi göz önüne alınmalıdır [15].

Soumya Subramonian galvaniz tavlı çelik sacların şekillendirilmesi için şerit çekme testi ve derin çekme testi kullanılarak farklı tipte yağlayıcıları değerlendirmiştir. Genel olarak, sentetik yağlayıcıların petrol bazlı yağlayıcılardan daha iyi performans gösterdiğini ortaya koymuştur [47]. N. Bay ve arkadaşları gerçek koşulların simülasyonlarına odaklanarak sürtünme ve yağlamanın laboratuvar testleri için geliştirdikleri sistem ile üretim şartlarında yağlayıcı seçimi hakkında temel oluşturmuşlardır [48]. Hector Torres ve arkadaşları yağlayıcı kullanılmadan kendi kendini yağlayan malzemeler üzerine geniş bir araştırma yapmışlardır [49]. Lanny Kirkhorn ve arkadaşları sac metal şekillendirme işlemlerinde minimum miktarda yağlayıcı kullanımı üzerine iki farklı yağlayıcı üzerine çalışma gerçekleştirmişlerdir [50]. A. Brosius ve A. Mousavi derin çekme prosesinde yağlayıcıdan kaçınmak amacıyla makro yapılı bir tasarım geliştirerek sürtünme kuvvetlerinin azaltılması ve yağlama gereksiniminin ortadan kaldırılmasına yönelik çalışma gerçekleştirmişlerdir [51].

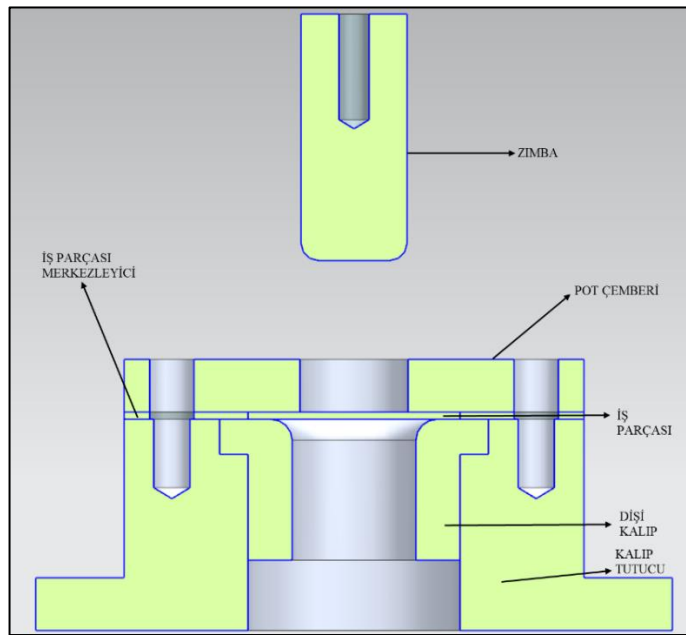
3. TASARIM, MALZEME VE YÖNTEM

Zorlu ve karmaşık bir sac metal şekillendirme prosesi olan derin çekme işlemi esnasında, şekil vermeye etki eden parametrelerin etki düzeylerinin belirlenmesi amacıyla bir dizi deneysel çalışma yapılmıştır.

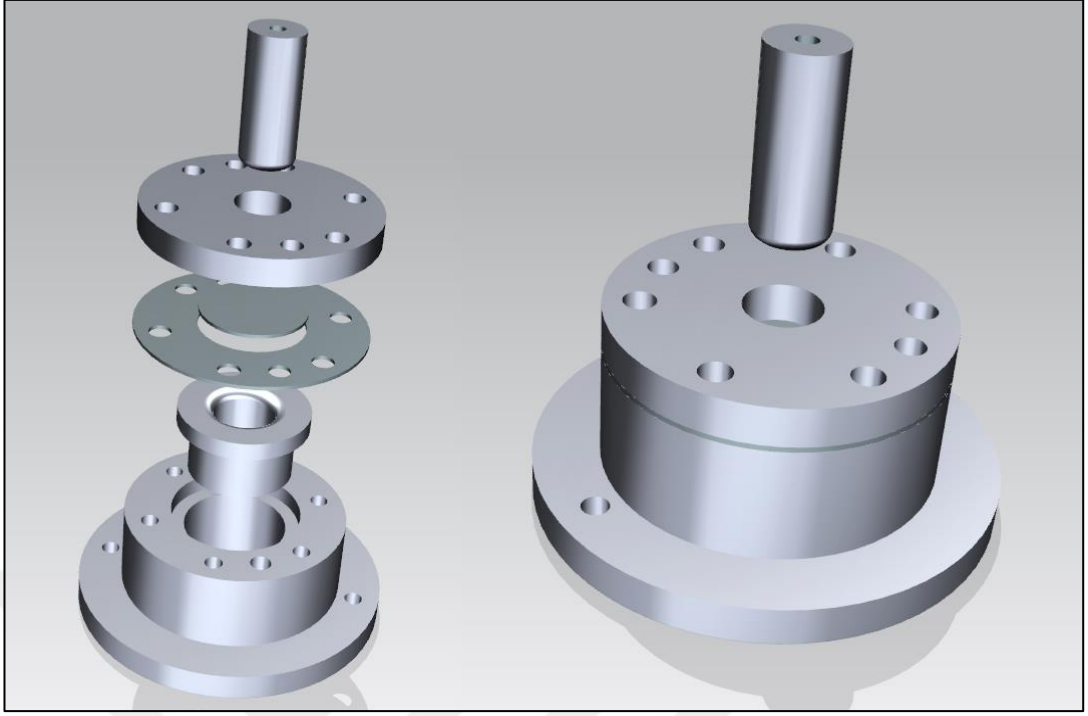
Yapılan deneysel çalışmalarda, farklı parametre değerleri ile derin çekme deneyleri gerçekleştirilmiştir. İki farklı sac malzeme kullanılarak iki farklı yağlama koşulu ve iki farklı zımba hızının şekillendirme özelliklerine etkileri incelenmiştir. Deneylerden elde edilen veriler, AUTOFORM simülasyon programından elde edilen veriler ile karşılaştırılarak değerlendirilmiştir.

3.1. Tasarım

Kocaeli Üniversitesi Laboratuvarı'nda universal çekme test cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiş olan deney için Siemens NX programı kullanılarak derin çekme işlemini simüle edecek Şekil 3.1 ve Şekil 3.2'de görülen tasarım yapılmıştır. Tasarım zımba, pot çemberi, sac merkezleyici, kalıp ve kalıp tutucu bölümlerinden oluşmaktadır.

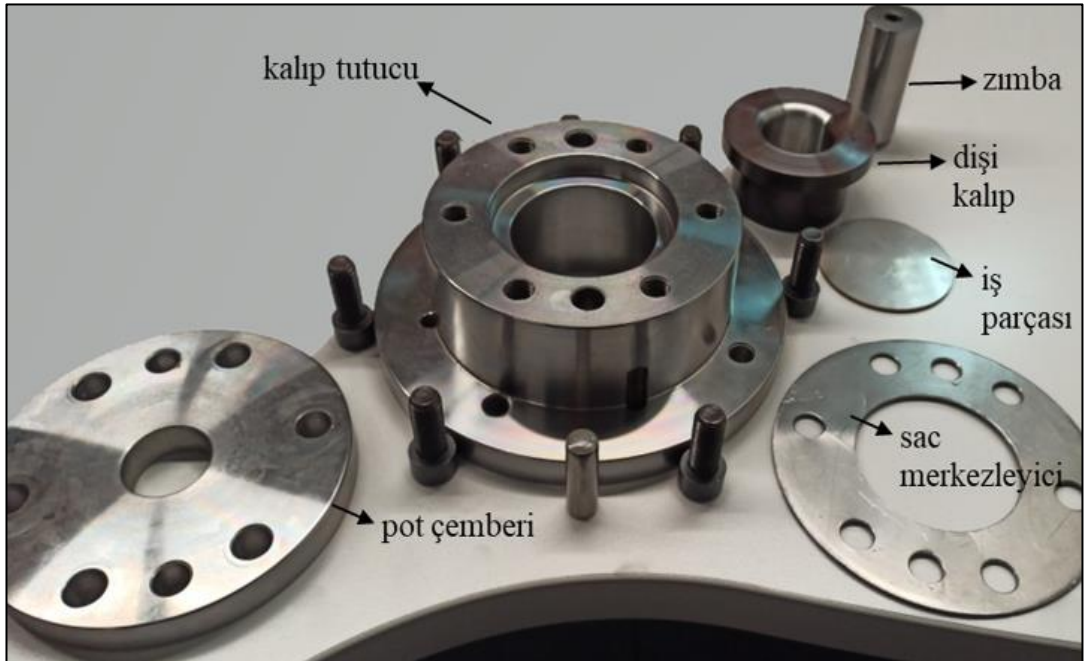


Şekil 3.1. Deney düzeneği kesiti

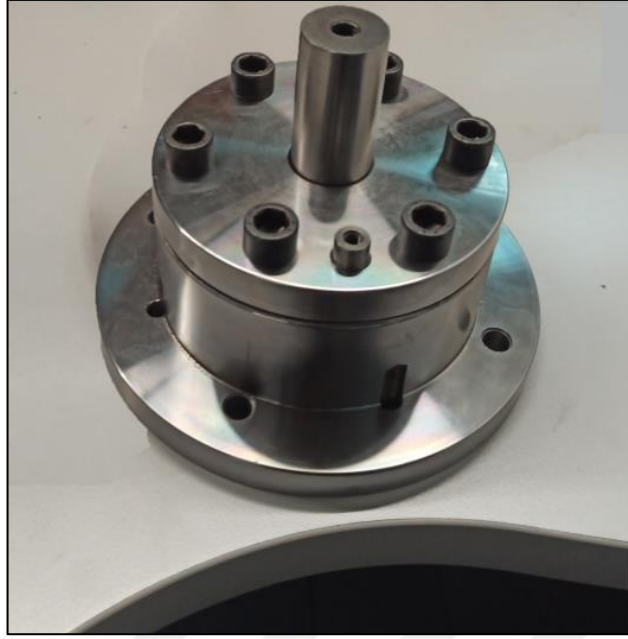


Şekil 3.2. Deney düzeneği CAD modeli

Tasarımı gerçekleştirilen düzenek Şekil 3.3 ve Şekil 3.4'te görülüşü gibi imal edilmiştir.



Şekil 3.3. İmalatı gerçekleştirilmiş deney düzeneği (açık)



Şekil 3.4. İmalatı gerçekleştirilmiş deney düzeneği (kapalı)

Düzenek 6 adet M12 civata kullanılarak pot baskısı yapılabilecek şekilde tasarlanmıştır. Pot çemberi kalınlığı 15 mm ve çapı 130 mm'dir. Pot çemberi merkezinde zımbanın geçmesi için 34 mm çapında delik vardır. Pot çemberi ve kalıp tutucunun merkezlenmesi için iki adet 12 mm çapında pim kullanılmıştır. İş parçasının merkezlemesini sağlamak için sac malzemedan 2 mm kalınlığında merkezleyici imal edilmiştir. Merkezleyici 130 mm çapında imal edilmiş ve iş parçasının yerleştirilmesi için 60 mm çapında deliğe sahiptir. Şekillendirilecek iş parçası DD13 ve 1.4301 malzemelerinden lazer kesim sonucu elde edilen 60 mm çapa sahiptir ve et kalınlığı 2 mm'dir. Kalıp tutucu ve pot çemberi arasına yerleştirilmektedir. Kalıp tutucu dişi kalıbın rahat geçeceği şekilde tasarlanmıştır. Aparatın universal çekme cihazı tablasına bağlantısı için kalıp tutucuya eksenleri arası 150 mm olacak şekilde iki adet M10 civataya uygun delik delinmiştir.

Zımba çapı 30 mm, uzunluğu 70 mm olarak ve zımba eğrilik yarıçapı 5 mm olarak imal edilmiştir. Kalıp ile zımba arası boşluk literatüre göre minimum iş parçası kalınlığının 1,1 katı olacak şekilde her iki yandan 2,2 mm olması gerekmektedir. Kalıp boşluğu bu değer dikkate alınarak her iki yandan 2,5 mm boşluk ile 35 mm çapında ve kalıp eğrilik yarıçapı 6 mm olarak imal edilmiştir (Şekil 3.5).



Şekil 3.5. İmalatı gerçekleştirilmiş zımba ve dişi kalıp

Denklem (2.1)'e göre hesaplama yapıldığında sac malzeme çapı 60 mm ve zımba çapı 30 mm olduğundan sonuç $DR=2$ çıkmakta ve işlem tek adımda gerçekleşmektedir.

3.2. Kullanılan Malzeme ve Yöntem Özellikleri

Dişi kalıp ve zımba 1.2379 (X153CrMoV12) kalıp çeliğinden imal edilerek 58-60 HRC yüksek sıcaklık menevişi ısıl işlemi ardından hassas taşlama sonrası deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

1.2379 çeliği soğuk iş takım çeliğidir. Aşınma direnci yüksek, basınca dayanıklı ve kolay sertleştirilebilen bir çeliktir. Çok düşük tokluk / süneklik değerine sahip olması ve kötü işlenebilme özellikleri dezavantajlarındandır. Derin çekme kalıplarında sıklıkla kullanılmaktadır. Tablo 3.1'de 1.2379 çeliğinin kimyasal yapısı görülmektedir.

Tablo 3.1. 1.2379 kalıp çeliğinin kimyasal bileşimi (%) [52]

C	Si	Mn	Cr	Mo	V
1,55	0,5	0,4	11,5	0,8	0,8

İş parçası olarak derin çekme işlemlerinde sıklıkla kullanılan DD13 (Erdemir 6224) sac malzemesi ve 1.4301 (304 paslanmaz) malzemesi kullanılmıştır.

Literatüre göre derin çekme işlemlerinde kullanılan sac malzemelerin kimyasal bileşiminde karbonun %0,8'den manganezin ise %0,35'ten az olması istenir. Ayrıca

P, S, N, Sb, As, Cr, Si gibi elementlerin işleme olumsuz etkilediği bilinmektedir [7]. Tablo 3.2’de kullanılan sac malzemelerin kimyasal bileşimi gösterilmektedir.

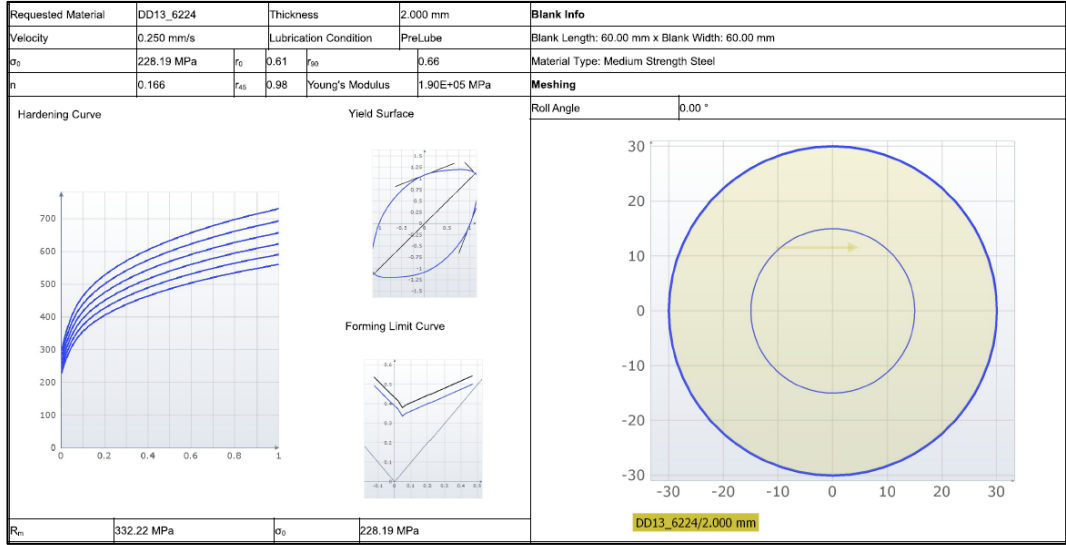
Tablo 3.2. DD13 ve 1.4301 malzemelerinin kimyasal bileşimi (%) [53, 54]

Sac Malzeme	C max.	Mn max.	P max.	S max.	Si max.	Cr	Ni
DD13	0,07	0,35	0,025	0,025	-	-	-
304 (1.4301)	0,08	2	0,045	0,03	0,75	18-20	8-10

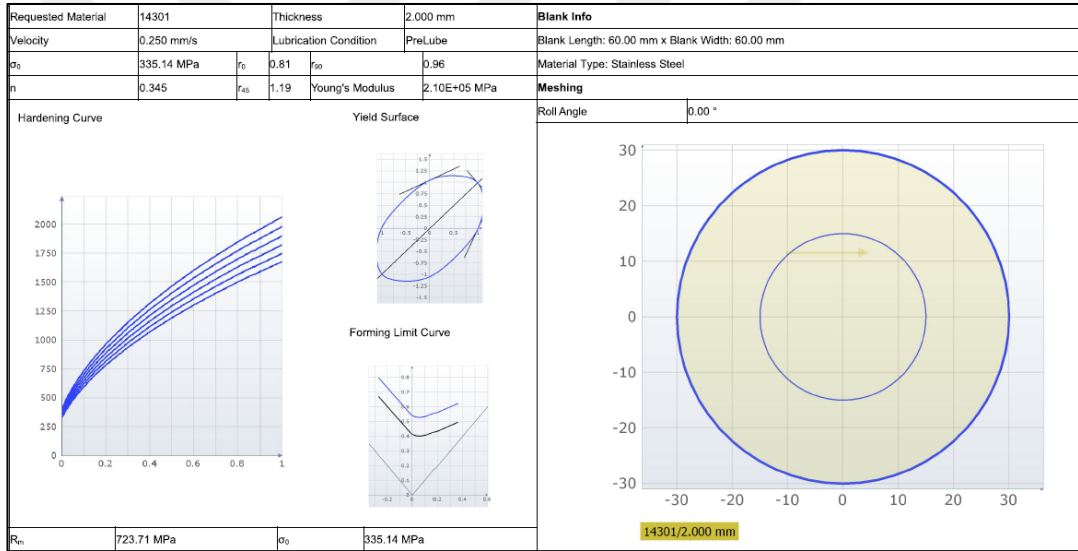
Tablo 3.2’ye göre DD13 sac malzemesi derin çekme işlemine daha uygun bir kimyasal bileşime sahiptir.

İstenilen kalitede ürün elde edebilmek için kalıp tasarım aşamasında parametrelerin mümkün olduğunca tahmin edilebilir olması gerekmektedir. Yapılacak ufak hatalar doğru ürün eldesi için uzun süren zaman kayıplarına veya yeniden kalıp tasarımına kadar ciddi sorunlara neden olabilmektedir. Maliyeti oldukça yüksek olan bu sorunları minimize etmek için simülasyon programları kullanılmaktadır. Sac şekillendirme için en başarılı çözümlene yöntemi şekillendirme sırasında sacın durumunu belirleyen denklemlerin zamanda integrasyonudur. Bu çözüm yöntemi implicit ve explicit olmak üzere iki farklı metotla yapılmaktadır. AUTOFORM implicit yöntemle çözüm yapan bir sac şekillendirme simülasyon yazılımıdır.

AUTOFORM simülasyon programında “PreLube-Yağlı” ve “Blank Wash-Yağsız” olmak üzere iki farklı yağlama koşulu altında ve 0,25 mm/sn ve 1 mm/sn zımba hızlarında simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.6 ve 3.7’de simülasyon programında DD13 ve 1.4301 çeliğe ait simülasyon ve malzeme parametreleri gösterilmiştir. Görseller 0,25 mm/sn zımba hızı ve “PreLube” yağlama koşuluna aittir. DD13 ve 1.4301 malzemeleri için iki farklı hız (0,25 mm/sn ve 1 mm/sn) ve iki farklı yağlama koşulu (PreLube-Yağlı ve Blank Wash-Yağsız) kullanılarak toplam sekiz adet simülasyon gerçekleştirilmiştir.



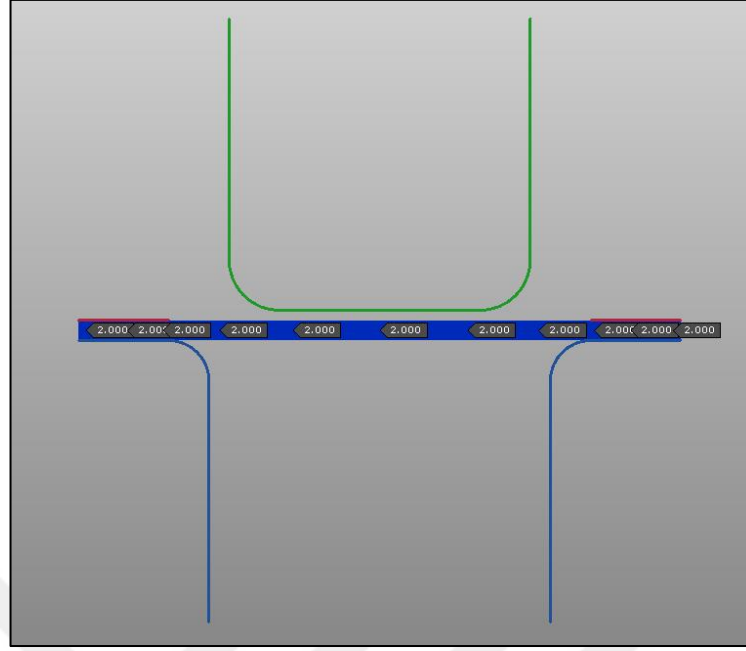
Şekil 3.6. AUTOFORM DD13 simülasyon parametreleri



Şekil 3.7. AUTOFORM 1.4301 simülasyon parametreleri

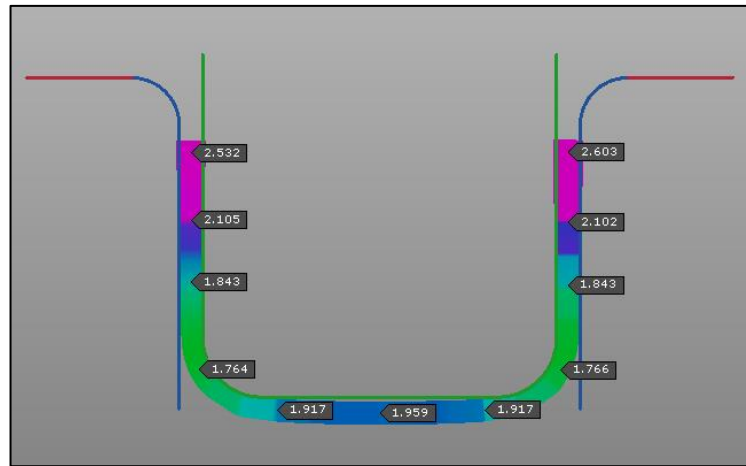
Bilindiği gibi şekillendirme hızı arttıkça şekillendirmeye karşı malzeme direnci artar. Simülasyonlarda hızın etkisini gözlemlemek için AUTOFORM programında “strain rates” değerlendirme kriteri aktifleştirilerek malzemenin deformasyon hızına duyarlı olması sağlanmıştır.

Gerçekleştirilen tüm simülasyonlarda Şekil 3.8’de görüldüğü gibi şekillendirme öncesi sac kalınlığı tüm noktalarda 2 mm kabul edilmiştir.



Şekil 3.8. AUTOFORM şekillendirme öncesi kalınlık dağılımı

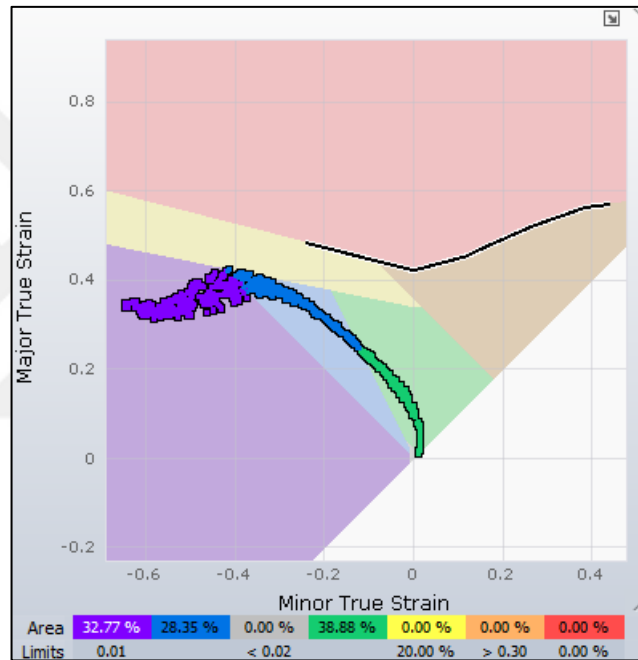
Şekillendirme sonrası Şekil 3.9’da görüldüğü gibi parçanın üst bölgelerinde kalınlaşma gerçekleşmekte ve parça tabanına doğru kalınlık giderek azalmaktadır. Minimum kalınlık değeri radyus bölgelerinde elde edilmektedir. Parça tabanında ise sadece çekme etkisi altında kalan iş parçasının ilk et kalınlığına göre fazla bir değişim yaşanmamıştır.



Şekil 3.9. AUTOFORM şekillendirme sonrası kalınlık dağılımı

Sac metalin yırtılma olmadan uzayabileceği limitler sabit değildir ve farklı doğrultulardaki uzama durumuna bağlıdır. Bunun sonucu olarak çizilen minimum ve

maksimum strain diyagramı FLD (Forming Limit Diagram) (Şekil 3.10) olarak adlandırılmaktadır. Böylece şekillendirilebilirlik açısından değerlendirme yapılabilmektedir. Şekil 3.10'da görülen siyah çizgi minör uzamalara göre malzemenin yırtılma gerçekleşmeden maksimum uzama değişimini göstermektedir. Eğer malzeme bu değer üstüne çıkarsa kırmızı bölge yani yırtılma gerçekleşecektir. Siyah çizginin hemen altında görülen sarı renk yırtılma ihtimali olan bölgeleri, turuncu renk ise aşırı incelleme bölgelerini göstermektedir. Yeşil renk sorunsuz gerçekleşen çekme bölgesini, gri renk yetersiz şekillendirme bölgesini, mavi renk ezilme gerçekleşen bölgeyi ve mor renk ise kalınlaşma bölgelerini göstermektedir.



Şekil 3.10. AUTOFORM örnek FLD sonuçları

İmal edilen deney düzeneği DARTEC marka, 60 ton kapasiteli universal çekme cihazı bası modu kullanılarak simülasyon çalışmalarına karşılık deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.11).

Gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda yağlı koşul için yüksek performanslı korozyon önleyici katıklar ihtiva eden bir derin çekme yağı olan KC70 sıvama yağı kullanılmıştır [55]. Yağlama işlemi sac malzemenin dışı kalıp ile temasta olan yüzeyine yapılmıştır.



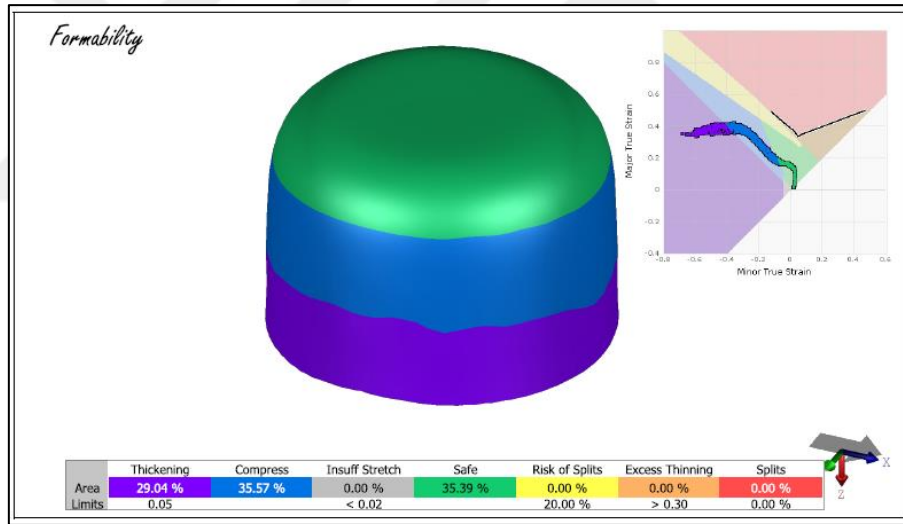
Şekil 3.11. Deneysel çalışma görselleri

Tüm simülasyonlara karşılık gerçekleştirilen deneysel çalışmalar sonrası oranları belirlenmiştir.

4. NÜMERİK VE DENEYSEL İRDELEME

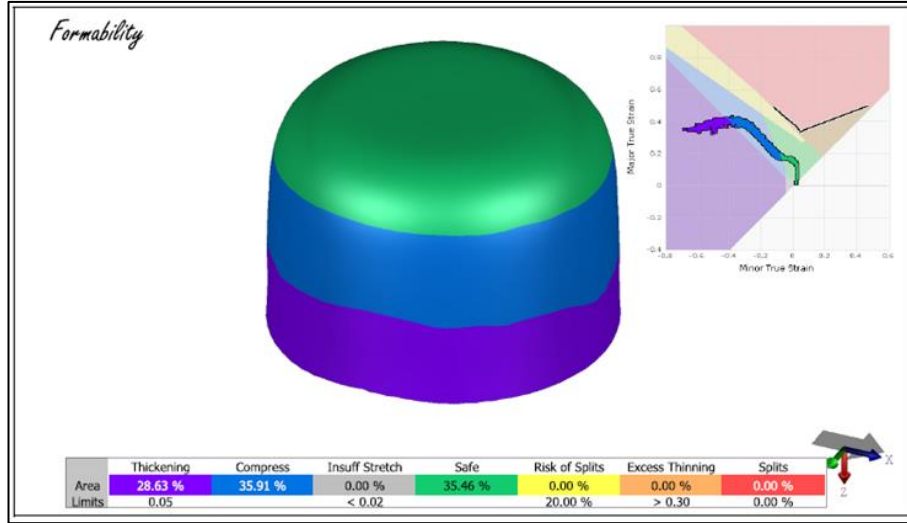
4.1. DD13 Sac Malzemesi Simülasyon ve Deney Çıktıları

DD13 malzeme için iki farklı hız (0,25 mm/sn ve 1 mm/sn) ve iki farklı yağlayıcı koşulu (PreLube – Blank Wash) kullanılarak gerçekleştirilen simülasyonların şekillendirilebilirlik, maksimum kuvvet, maksimum kalınlık ve minimum kalınlık açısından değerlendirilmesi yapılmıştır. Beklendiği gibi tüm sonuçlarda parçanın tabanında sağlıklı bir şekil değişimi gözlemlenmiştir. Parçanın üst kısımlarına doğru kalınlık değerleri artmış, iş parçasının şekillendirme öncesi et kalınlığından daha fazla kalınlık değerleri elde edilmiştir.



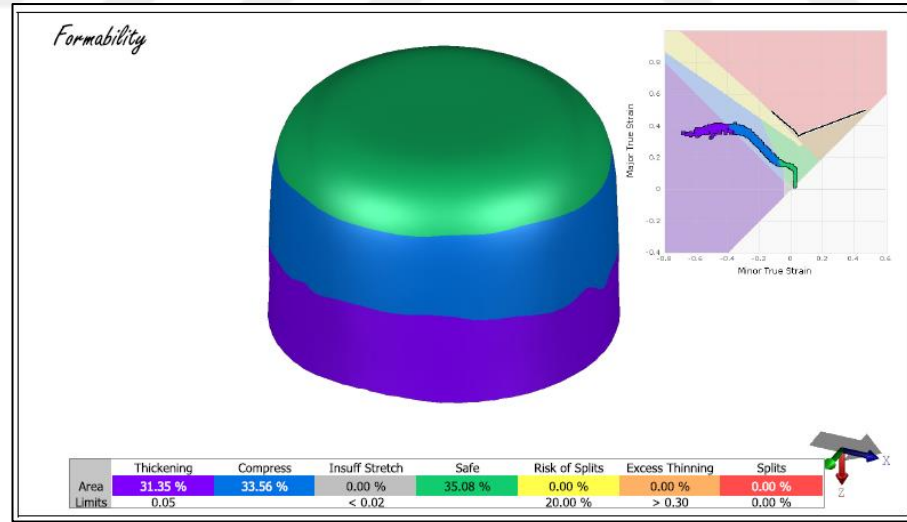
Şekil 4.1. DD13 0,25 mm/sn “PreLube” şekillendirilebilirlik sonuçları

Şekil 4.1’de görüldüğü gibi yapılan simülasyon sonunda 0,25 mm/sn hızla gerçekleştirilen “PreLube” yağlayıcı koşulu altında, parça üzerinde %29,04’lük bir alanda kalınlaşma meydana gelmiştir. %35,57’lik bir alanda ezilme yaşanmıştır. %35,39’luk alan istenilen formda şekillenmiştir. Maksimum et kalınlığı 2,72 mm olmuştur. Minimum et kalınlığı ise 1,72 mm olmuştur. Bu koşullar altında şekillendirme sırasında oluşan maksimum kuvvet 65,70 kN olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.2. DD13 0,25 mm/sn “B. Wash” şekillendirilebilirlik sonuçları

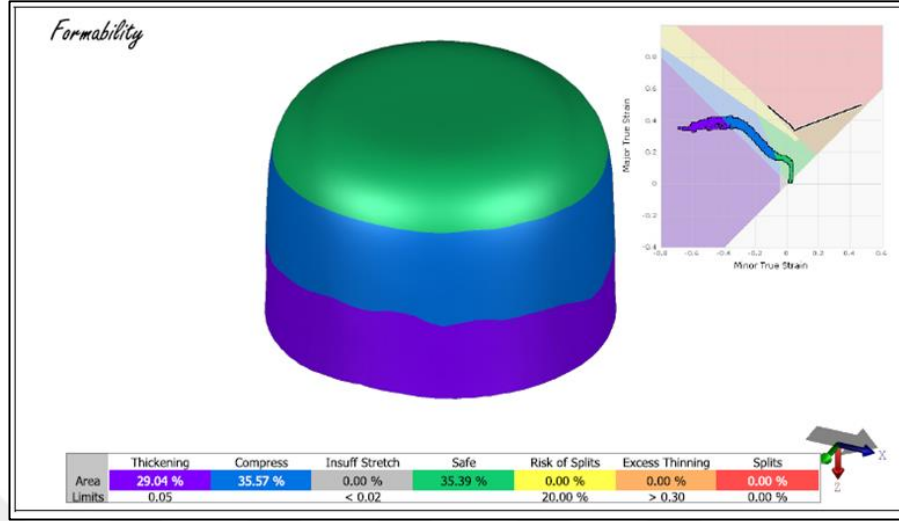
0,25 mm/sn hızla gerçekleştirilen “Blank Wash” yağlayıcı koşulu altında, parça üzerinde %28,63'lük alanda kalınlaşma meydana gelmiştir. %35,91'lik alanda ezilme meydana gelmiştir. %35,46'luk alan ise istenilen formda şekillenmiştir (Şekil 4.2). Maksimum et kalınlığı 2,69 mm'dir. Minimum et kalınlığı 1,72 mm'dir. Bu koşullar altında oluşan maksimum kuvvet artarak 70,61 kN olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.3. DD13 1 mm/sn “PreLube” şekillendirilebilirlik sonuçları

1 mm/sn hızla gerçekleştirilen simülasyonda “PreLube” yağlayıcı koşulu altında parça üzerinde %31,35'lik alanda kalınlaşma olmuştur. Hız artışı kalınlaşma alanının artmasına sebep olmuştur. %33,56'luk alanda ezilme meydana gelmiştir. %35,08'lik alan ise güvenli bir şekilde şekillendirilmiştir (Şekil 4.3). Maksimum kalınlık değeri

2,71 mm minimum kalınlık değeri 1,70 mm olmuştur. Maksimum kuvvet 67,67 kN olarak hesaplanmıştır.



şekil 4.4. DD13 1 mm/sn “B.Wash” şekillendirilebilirlik sonuçları

1 mm/sn hızla ve “Blank Wash” yağlayıcı koşulu altında geręekleřtirilen simülasyonda %29,04’lük alanda kalınlaşma olmuştur. %35,57’lik alanda ezilme meydana gelmiştir. %35,39’luk alan ise sorunsuz şekillendirilmiştir (şekil 4.4). Maksimum kalınlık değeri 2,72 mm olmuştur. Minimum kalınlık ise 1,71 mm olmuştur. Maksimum kuvvet 72,57 kN olarak hesaplanmıştır.

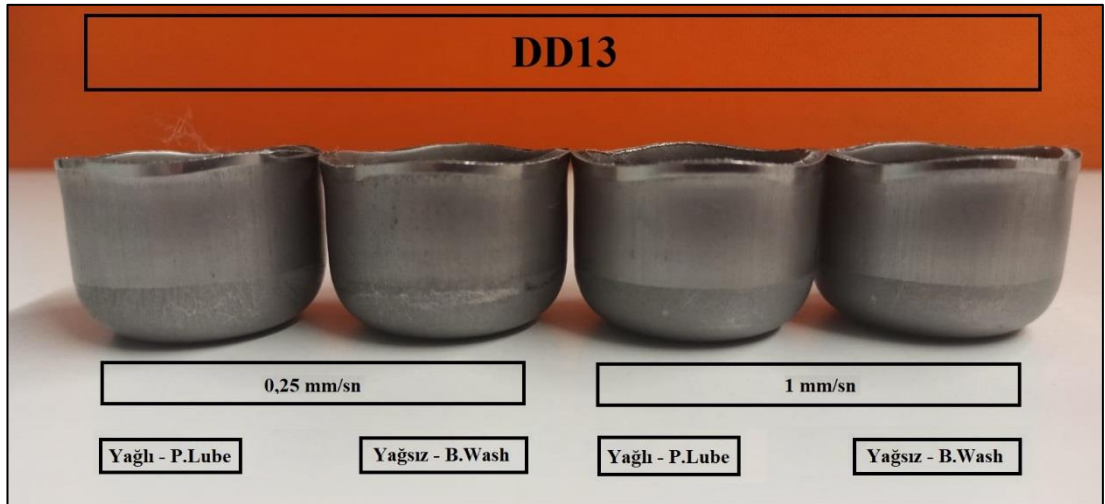
Tablo 4.1. AUTOFORM DD13 simülasyon sonuçları

Koşullar	Kalınlaşma (% Alan)	Ezilme (% Alan)	Güvenli (% Alan)	Max. Kalınlık (mm)	Min. Kalınlık (mm)	Max. Kuvvet (kN)
DD13- 0,25 mm/sn - PreLube	29,04	35,57	35,39	2,72	1,72	65,70
DD13 - 0,25 mm/sn - Blank Wash	28,63	35,91	35,46	2,69	1,70	70,61
DD13 - 1 mm/sn - PreLube	31,35	33,56	35,08	2,71	1,72	67,67
DD13 - 1 mm/sn - Blank Wash	29,04	35,57	35,39	2,72	1,71	72,57

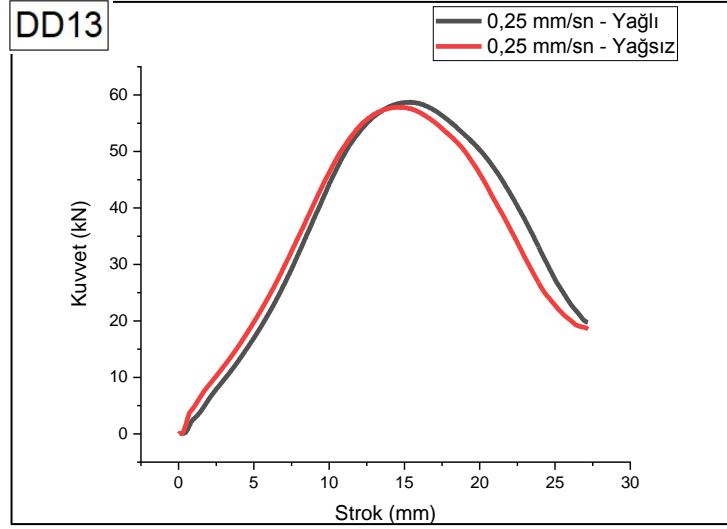
Tablo 4.1'deki sonuçlara bakıldığında 1 mm/sn hız ile gerçekleştirilen simülasyonda "PreLube" yağlama koşulu altında kalınlaşma gerçekleşen bölge en yüksek değere ulaşmaktadır. Her iki hızda "PreLube" koşulu altında sürtünme katsayısının "Blank Wash" durumuna göre azalması sonucu daha homojen bir kalınlık dağılımı gözlenmiştir. Kalınlaşma değerinin artması parçanın yırtılma beklenen bölgeleri için iyidir. Ancak sac çekildikçe derin çekme parçasının üst kısmında çevresel basma ve radyal çekme kuvvetlerinin etkisiyle kalınlaşma meydana gelmektedir. Kalınlaşma sonucu et kalınlığı sac malzemenin ilk et kalınlığı değerinden fazla olmakta ve bu değer artması parçanın kalıp içerisine sıkışma olasılığını arttırmaktadır. Bu nedenle tasarımda kalıp boşluğuna dikkat edilmelidir.

Elde edilen sonuçların yakınlığı parça boyutunun ve hız değerlerinin düşük olması sebebiyledir. Daha yüksek hız, daha farklı sürtünme değerleri ve büyük parça boyutu için fark artacaktır. Nihai ürün kalitesi için seri üretim şartlarında birden çok derin çekme işlemi gerçekleştirilerek homojen bir kalınlık dağılımı elde edilmektedir.

Simülasyonu gerçekleştirilen durumun universal çekme test cihazında 0,25 ve 1 mm/sn ile yağlı (PreLube) ve yağsız (Blank Wash) olarak deneyleri gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen deneyler sonucu elde edilen ürün görselleri Şekil 4.5'te görülmektedir.

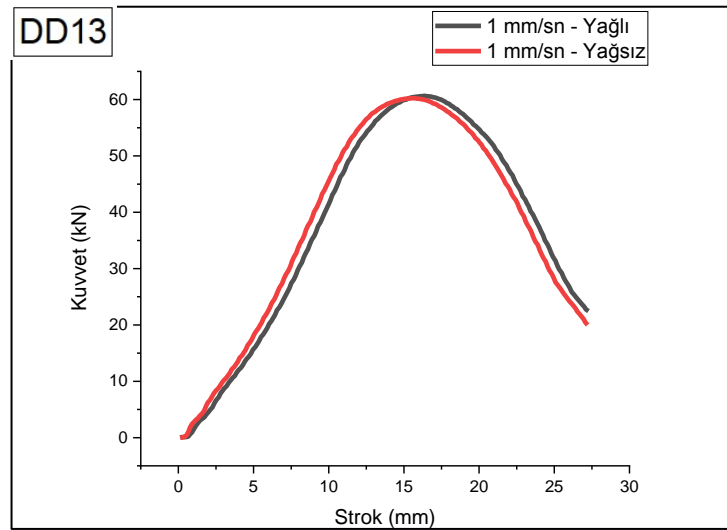


Şekil 4.5. Deney sonucu elde edilen DD13 ürün görselleri



Şekil 4.6. DD13 0,25 mm/sn yağlı ve yağsız kuvvet-strok grafikleri

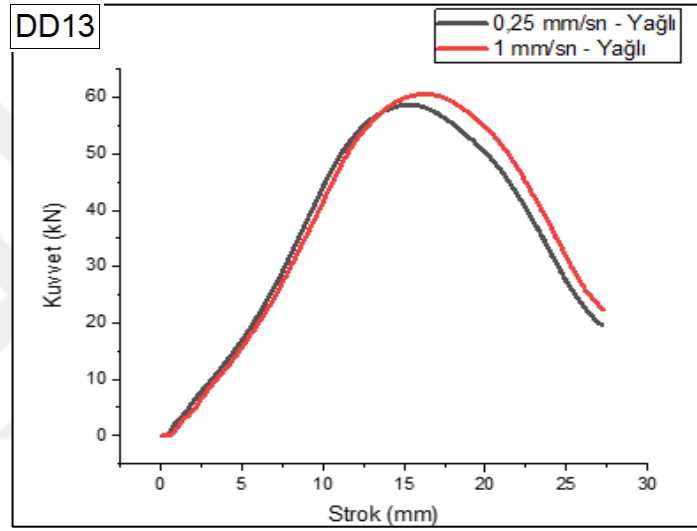
0,25 mm/sn hızda yağlı durumda derin çekme işlemi esnasında 984,89 J enerji harcanmıştır. Maksimum kuvvet 58,75 kN olarak ölçülmüştür. Yağsız durumda 966,39 J enerji harcanmış ve maksimum kuvvet 57,88 kN olmuştur (Şekil 4.6). Yağlama işlemi sacın dişi kalıp ile temasta olduğu yüzeye yapılmıştır. Grafikte görüldüğü üzere yağlama sonrası sac daha kolay hareket etmiştir. Yağlayıcı kullanımı parça üzerinde bazı bölgelerin et kalınlığı değerinin artmasına sebep olmuştur. Yaşanan kalınlık artışı parçanın kalıp içerisine sıkışmasına neden olmuştur. Grafiğin sağ tarafında yağlı şartlar altında gerçekleşen işlemin kuvvet değerleri daha yüksek çıkmıştır. Böylece toplamda şekillendirme işlemi için daha yüksek enerji harcanmıştır.



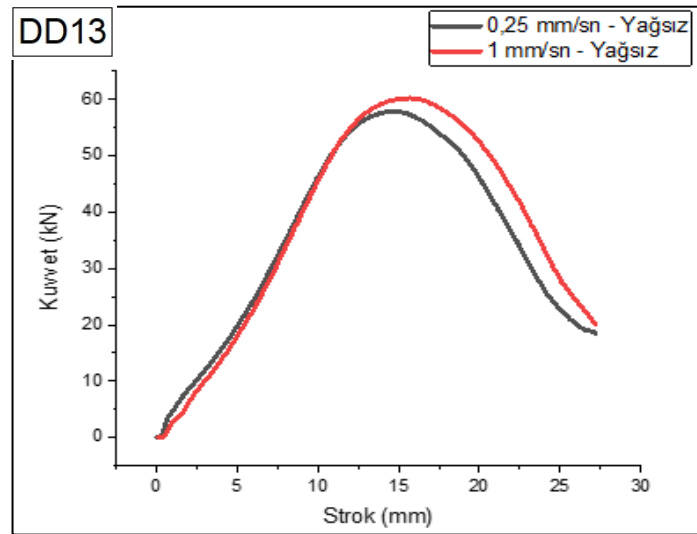
Şekil 4.7. DD13 1 mm/sn yağlı ve yağsız kuvvet-strok grafikleri

1 mm/sn hızda yağlı durumda derin çekme işlemi esnasında 1014,77 J enerji harcanmıştır. Maksimum kuvvet 60,65 kN olarak ölçülmüştür. Yağsız durumda 1021,02 J enerji harcanmış ve maksimum kuvvet 60,24 kN olarak ölçülmüştür (Şekil 4.7). Hızın artması yağlı/yağsız koşullar arasındaki farkın daha az belirgin olmasını sağlamıştır.

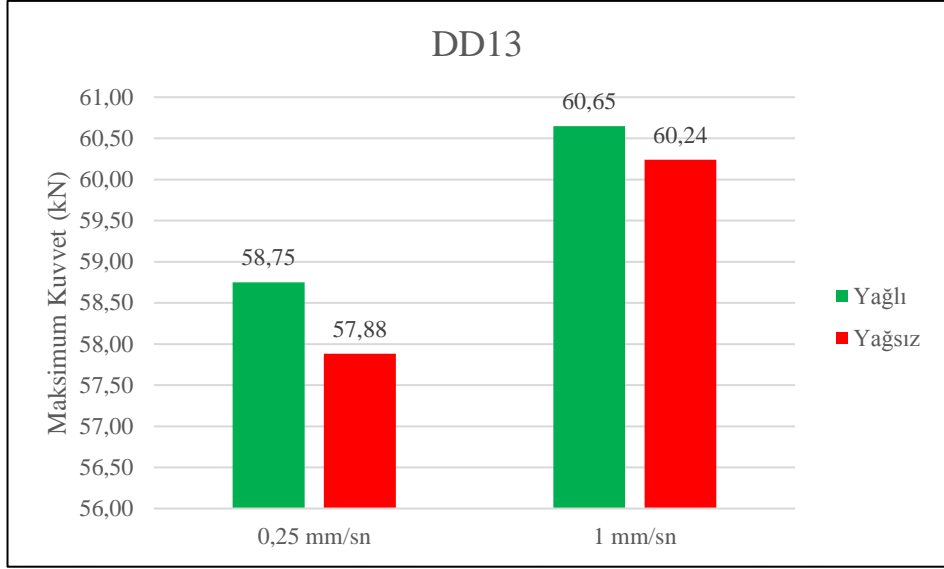
0,25 mm/sn ve 1 mm/sn hızlar karşılaştırıldığında yağlı ve yağsız her iki durumda hız artışı harcanan enerjinin artmasına sebep olmuştur. Yağsız durumda hız artışı daha belirgin bir etkiye sebep olmuştur (Şekil 4.8 - Şekil 4.9)



Şekil 4.8. DD13 yağlı koşullar kuvvet-strok grafikleri



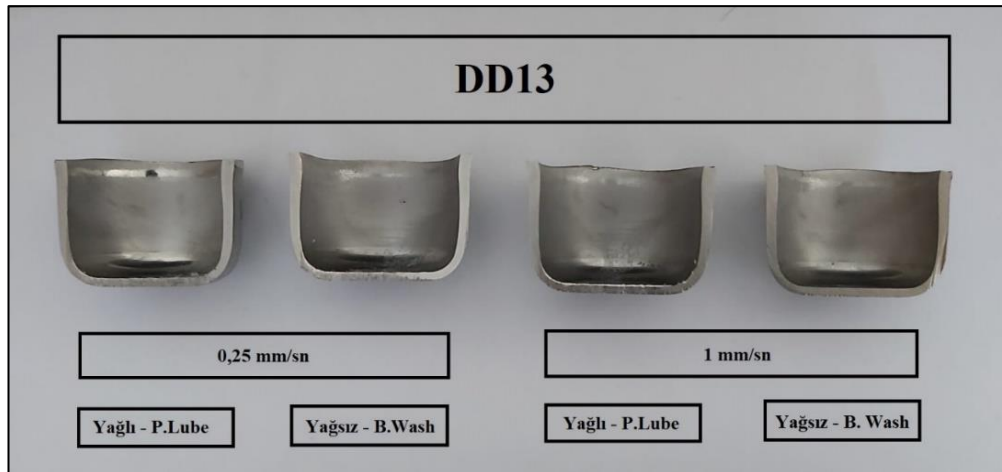
Şekil 4.9. DD13 yağsız koşullar kuvvet-strok grafikleri



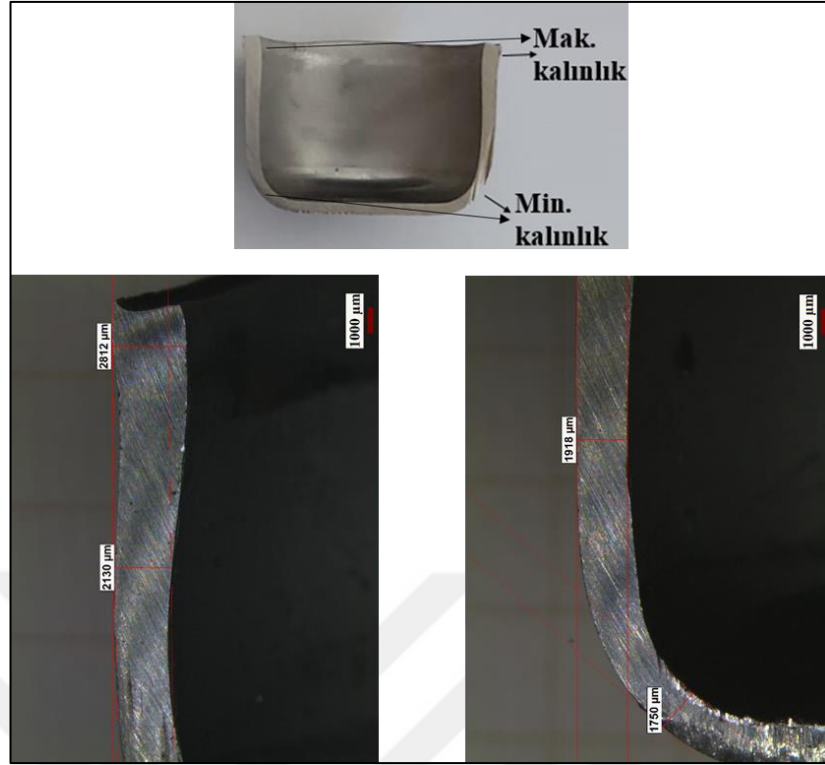
Şekil 4.10. DD13 gerçekleşen maksimum kuvvet değerleri

Maksimum kuvvet 60,65 kN ile 1 mm/sn hızda yağlı durumda elde edilmiştir (Şekil 4.10). Harcanan enerji ise 1021,02 J ile 1 mm/sn yağsız durumda gerçekleştirilen işlem sonucu elde edilmiştir. Hızın artması kuvvet ve harcanan enerjinin artmasına sebep olmuştur. Deney sonucu ulaşılan maksimum kuvvetler simülasyon sonucu ile karşılaştırıldığında 0,25 mm/sn – P.Lube (Yağlı) koşullarında yaklaşık %89,42 iken bu değer aynı hızda B.Wash (Yağsız) şartlar altında %81,97 olarak gerçekleşmiştir. 1 mm/sn hız altında P.Lube (Yağlı) koşullarda yaklaşık %89,63 iken bu değer aynı hızda B.Wash (Yağsız) şartlar altında %83,05 olarak gerçekleşmiştir.

Deney sonrasında parçalar kesilerek stereo mikroskop ile kalınlık değişimi incelenmiştir (Şekil 4.11).

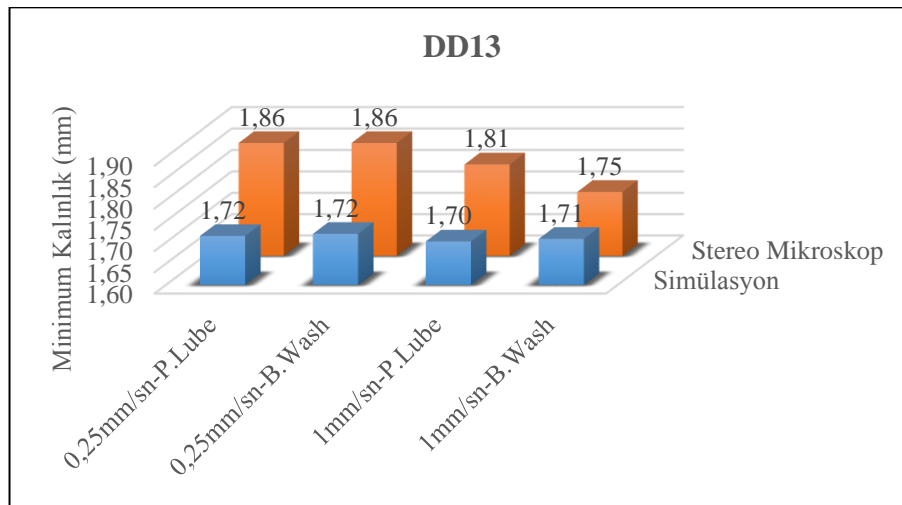


Şekil 4.11. Kesilmiş DD13 ürün görselleri



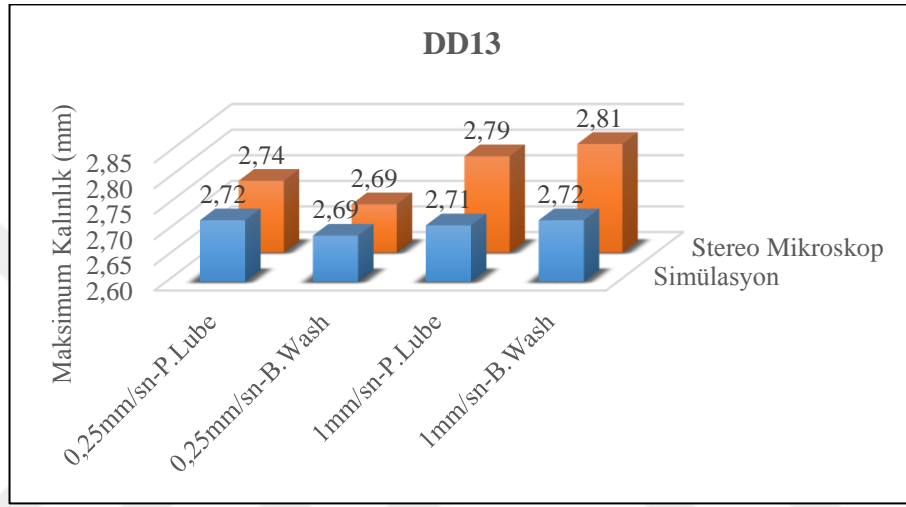
Şekil 4.12. DD13 stereo mikroskop görselleri

Ölçüm sonucu Şekil 4.12’de görüldüğü ve simülasyon sonuçlarından beklendiği gibi parçanın üst kısımlarında kalınlaşma meydana gelmiştir. Bu durum parçanın dişi kalıp içerisine akarken maruz kaldığı radyal çekme ve çevresel basma kuvvetleri ile açıklanmaktadır. Parça üzerinde aşağıya doğru inildikçe kalınlık azalmaktadır. Minimum kalınlık değeri çekme kuvvetinin etkisi sonucu radyus bölgelerinde ölçülmüştür.



Şekil 4.13. DD13 minimum kalınlık değerleri

Gerçekleştirilen tüm deneylerde minimum kalınlık değerleri simülasyon sonuçlarına göre daha yüksektir (Şekil 4.13). Sonuçlara göre hız artışı incelmeyi arttırmıştır. Düşük hızda yağlayıcı kullanımı minimum kalınlık değerinde bir değişime sebep olmamıştır. Stereo mikroskop ölçümleri ile simülasyon sonuçları arasında 0,25 mm/sn - P.Lube (Yağlı) ve B.Wash (Yağsız) koşullarında yaklaşık %92,47 olmuştur. 1 mm/sn hız altında P.Lube (Yağlı) koşullarında yaklaşık %93,92 iken bu değer aynı hızda B.Wash (Yağsız) şartları altında %97,71 olarak gerçekleşmiştir.



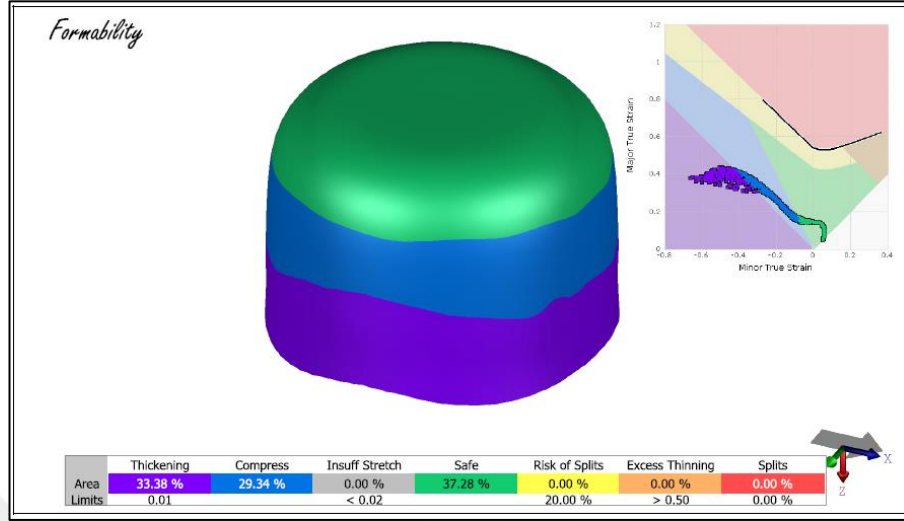
Şekil 4.14. DD13 maksimum kalınlık değerleri

Şekil 4.14'de görüldüğü gibi genellikle gerçekleşen maksimum kalınlık değerleri simülasyon sonuçlarına göre daha yüksektir. Hız artışı maksimum kalınlık değerinin artmasına sebep olmuştur. Stereo mikroskop ölçümleri ile simülasyon sonuçları arasında 0,25 mm/sn - P.Lube (Yağlı) koşullarında yaklaşık %99,27 iken bu değer aynı hızda B.Wash (Yağsız) şartları altında %100 olarak gerçekleşmiştir. 1 mm/sn hız altında P.Lube (Yağlı) koşullarında yaklaşık %97,48 iken bu değer aynı hızda B.Wash (Yağsız) şartları altında %96,79 olarak gerçekleşmiştir. 0,25 mm/sn hızla yapılan çalışmalarda simülasyon sonuçlarının deneysel sonuçlara daha yakın olduğu belirlenmiştir.

4.2. 1.4301 Sac Malzemesi Simülasyon ve Deney Çıktıları

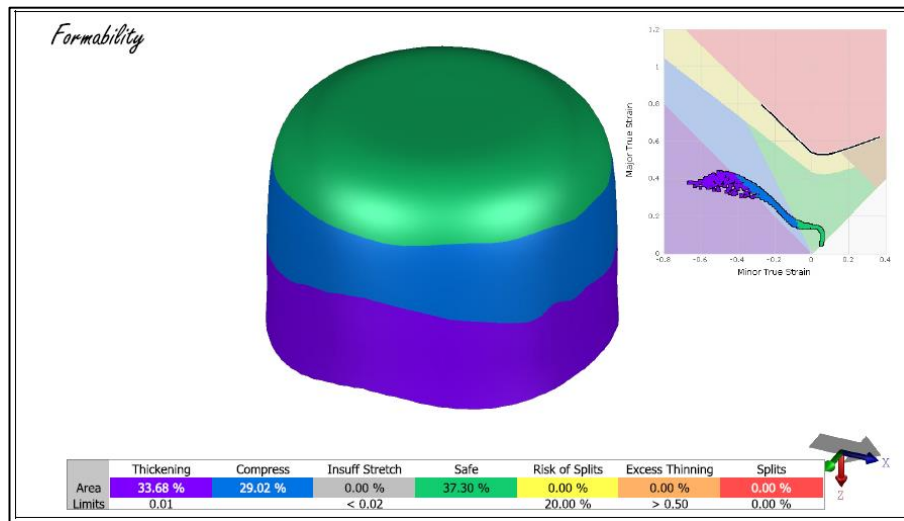
Diğer iş parçası 1.4301 malzeme için iki farklı hız (0,25 mm/sn ve 1 mm/sn) ve iki farklı yağlayıcı koşulu (PreLube – Blank Wash) kullanılarak gerçekleştirilen

simülasyonların şekillendirilebilirlik, maksimum kuvvet, maksimum kalınlık ve minimum kalınlık açısından değerlendirmesi yapılmıştır.



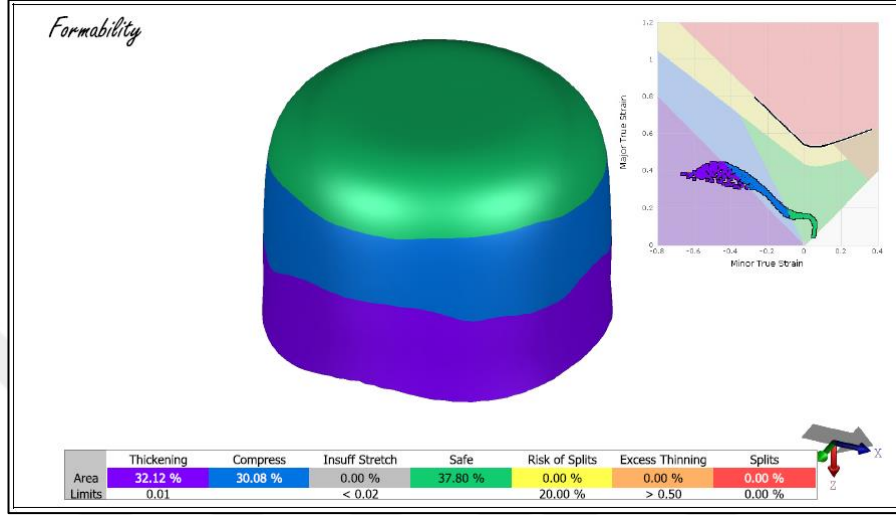
Şekil 4.15. 1.4301 0,25 mm/sn “PreLube” şekillendirilebilirlik sonuçları

0,25 mm/sn hızla gerçekleştirilen simülasyonda “PreLube” yağlayıcı koşulu altında parça üzerinde %33,38’lik alanda kalınlaşma gözlenmiştir. %29,34’lük alanda ezilme meydana gelmiştir. %37,28’lik alan ise güvenli bir şekilde şekillendirilmiştir (Şekil 4.15). Maksimum kalınlık değeri 2,67 mm olarak karşımıza çıkmıştır. Minimum kalınlık değeri ise 1,67 mm olmuştur. Bu koşullar altında oluşan maksimum kuvvet 127,49 kN olarak hesaplanmıştır.



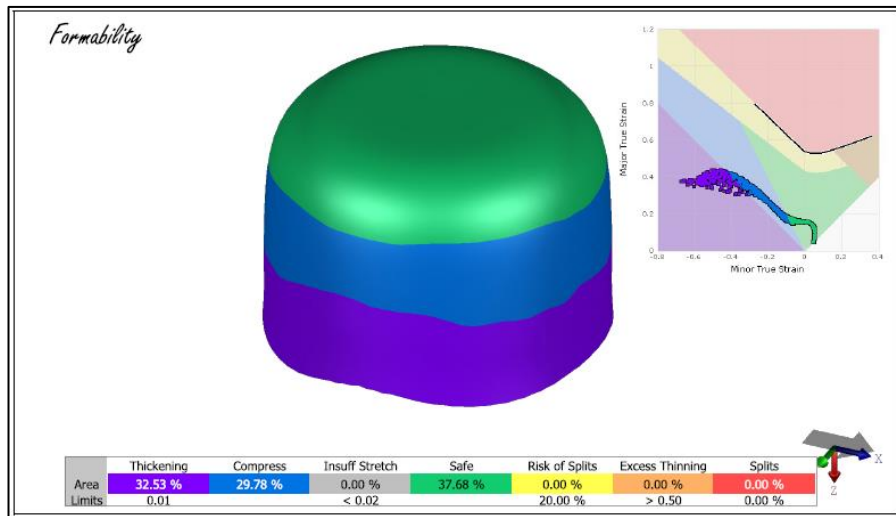
Şekil 4.16. 1.4301 0,25 mm/sn “B.Wash” şekillendirilebilirlik sonuçları

0,25 mm/sn hızla gerçekleştirilen simülasyonda “Blank Wash” yağlayıcı koşulu altında %33,68’lik alanda kalınlaşma meydana gelmiştir. %29,02’lik alanda ezilme meydana gelmiştir. %37,30’luk alan ise güvenli bir şekilde şekillendirilmiştir (Şekil 4.16). Maksimum kalınlık değeri 2,67 mm minimum kalınlık değeri ise 1,66 mm olmuştur. Maksimum kuvvet 135,33 kN olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.17. 1.4301 1 mm/sn “Prelube” şekillendirilebilirlik sonuçları

1 mm/sn hızla “PreLube” koşulu altında %32,12’lik alanda kalınlaşma, %30,82’lik alanda ezilme meydana gelmiştir. %37,80’lik alan güvenli şekilde şekillendirilmiştir (Şekil 4.17). Maksimum kalınlık değeri 2,68 mm minimum kalınlık değeri ise 1,67 mm olmuştur. Maksimum kuvvet 127,49 kN olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.18. 1.4301 1 mm/sn “B.Wash” şekillendirilebilirlik sonuçları

1 mm/sn hızla gerçekleştirilen simülasyonda “Blank Wash” yağlayıcı koşulu altında parça üzerindeki bölgelerin %32,53’lük kısmında kalınlaşma, %29,78’lik kısmında ezilme meydana gelmiştir. %37,68’lik alan ise güvenli bir şekilde şekillendirilmiştir (Şekil 4.18). Maksimum kalınlık değeri 2,69 mm minimum kalınlık değeri ise 1,66 mm olmuştur. Bu koşullar altında oluşan maksimum kuvvet 135,33 kN olarak hesaplanmıştır.

Tablo 4.2. AUTOFORM 1.4301 simülasyon sonuçları

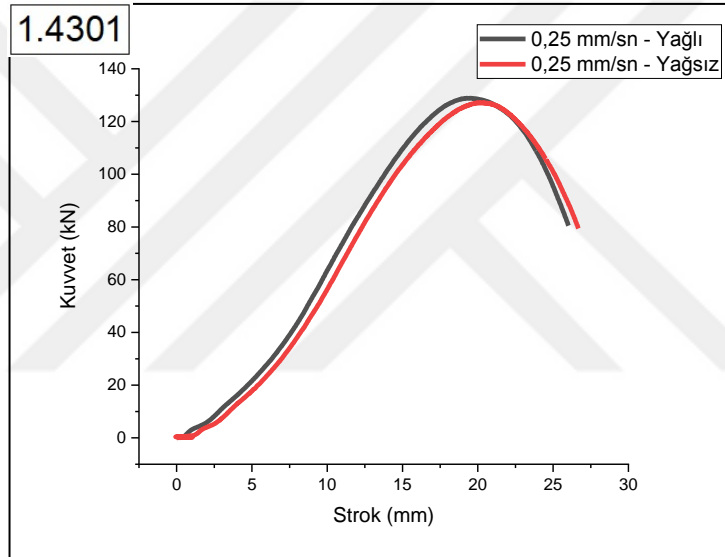
Koşullar	Kalınlaşma (%Alan)	Ezilme (%Alan)	Güvenli (%Alan)	Max. Kalınlık (mm)	Min. Kalınlık (mm)	Max. Kuvvet (kN)
1.4301 - 0,25 mm/sn - PreLube	33,38	29,34	37,28	2,67	1,67	127,49
1.4301 - 0,25 mm/sn - Blank Wash	32,12	30,08	37,80	2,67	1,66	135,33
1.4301 - 1 mm/sn – PreLube	33,68	29,02	37,30	2,68	1,67	127,49
1.4301 - 1 mm/sn - Blank Wash	32,53	29,78	37,68	2,69	1,66	135,33

Tablo 4.2’deki sonuçlara bakıldığında 1 mm/sn hız ile gerçekleştirilen simülasyonda “PreLube” yağlama koşulu altında kalınlaşma gerçekleşen bölge en yüksek değere ulaşmaktadır. Ezilme gerçekleşen alan 0,25 mm/sn hız ile “Blank Wash” yağlayıcı koşulu altında en yüksek değere ulaşmaktadır. Yine aynı koşul altında güvenli şekillendirilen alan en yüksek değere ulaşmaktadır. Elde edilen sonuçların yakınlığı parça boyutunun ve hız değerlerinin düşük olması sebebiyledir. Daha yüksek hız, daha farklı yağlama koşulları sonucu elde edilecek sürtünme değerleri ve daha büyük, farklı formlu parçalar için fark artacaktır.

Simülasyonu gerçekleştirilen durumların universal çekme test cihazında 0,25 ve 1 mm/sn ile yağlı (PreLube) ve yağsız (Blank Wash) olarak deneyleri gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen deneyler sonucu elde edilen 1.4301 malzemesine ait ürün görselleri Şekil 4.19’da görülmektedir.



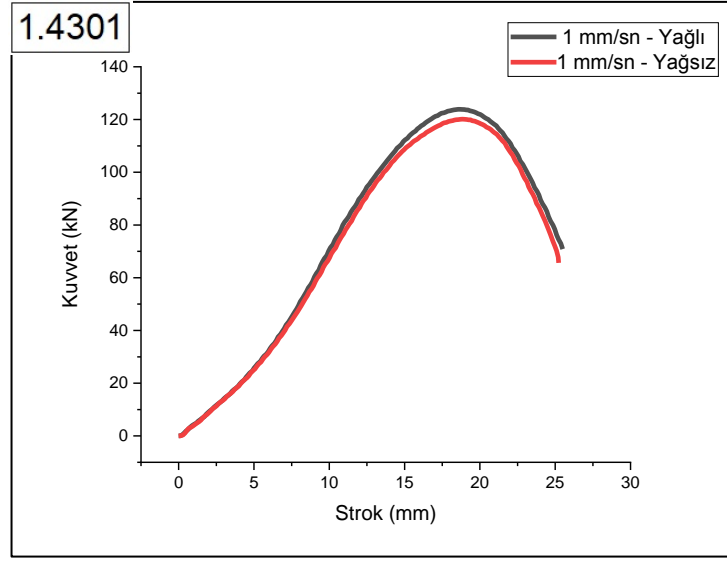
Şekil 4.19. Deney sonucu elde edilen 1.4301 ürün görselleri



Şekil 4.20. 1.4301 0,25 mm/sn yağlı ve yağsız kuvvet-strok grafikleri

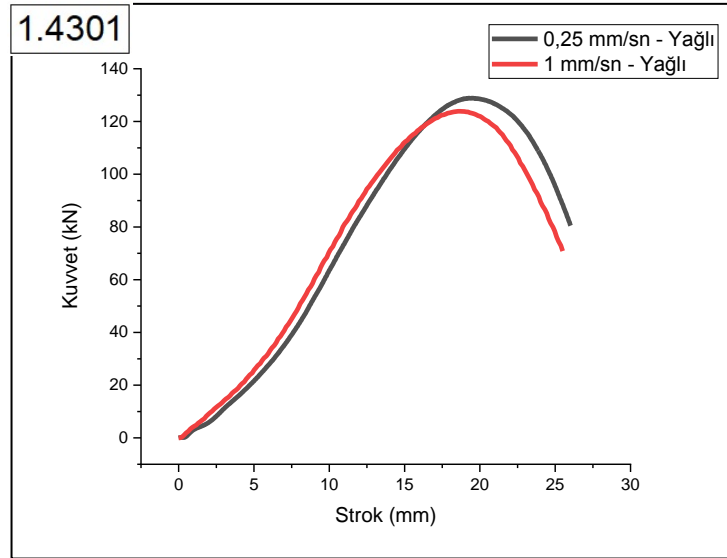
0,25 mm/sn hızda yağlı durumda 1976,72 J enerji harcanmıştır. Maksimum kuvvet 128,89 kN olarak ölçülmüştür. Yağsız durumda 1950,47 J enerji harcanmış ve maksimum kuvvet 127,17 kN olmuştur (Şekil 4.20). Yağlama işlemi sacın dişi kalıp ile temasta olduğu yüzeye yapılmıştır.

1 mm/sn hızda yağlı durumda derin çekme işlemi esnasında 1916,51 J enerji harcanmıştır. Maksimum kuvvet 123,85 kN olarak ölçülmüştür. Yağsız durumda 1833,55 J enerji harcanmış ve maksimum kuvvet 120,12 kN olmuştur (Şekil 4.21). Hızın artması yağlı/yağsız koşullar arasındaki farkın daha belirgin olmasını sağlamıştır.

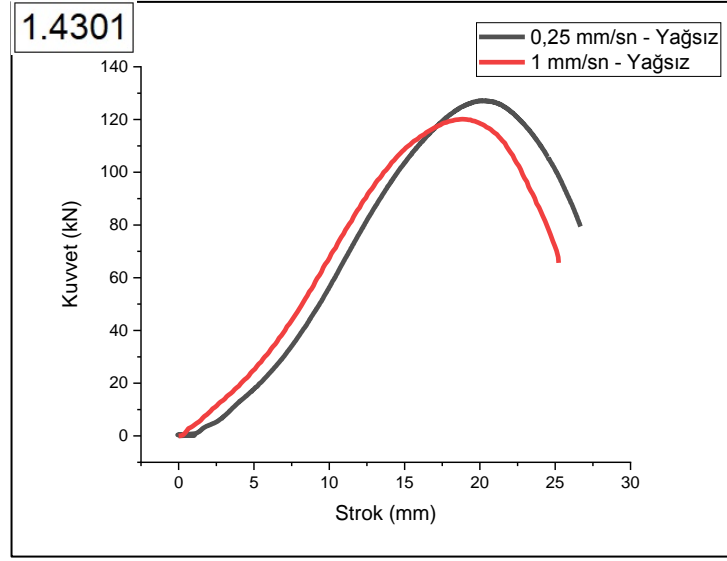


Şekil 4.21. 1.4301 1 mm/sn yağlı ve yağsız kuvvet-strok grafikleri

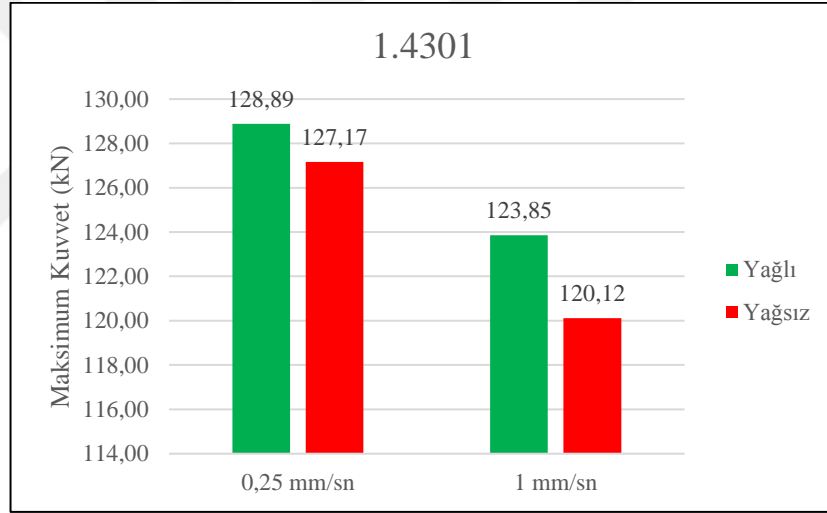
0,25 mm/sn ve 1 mm/sn hızlar karşılaştırıldığında 1.4301 malzemesi için yağlı ve yağsız her iki durumda hız artışı harcanan enerjinin azalmasına sebep olmuştur. Yağlı durumda hız artışı ile 60,21 J, yağsız durumda hız artışı ile 116,92 J enerji düşüşü ile şekillendirme işlemi gerçekleşmiştir. Yağsız durumda hızın değişmesi daha belirgin bir enerji düşüşüne sebep olmuştur (Şekil 4.22 - Şekil 4.23)



Şekil 4.22. 1.4301 yağlı koşullar kuvvet-strok grafikleri



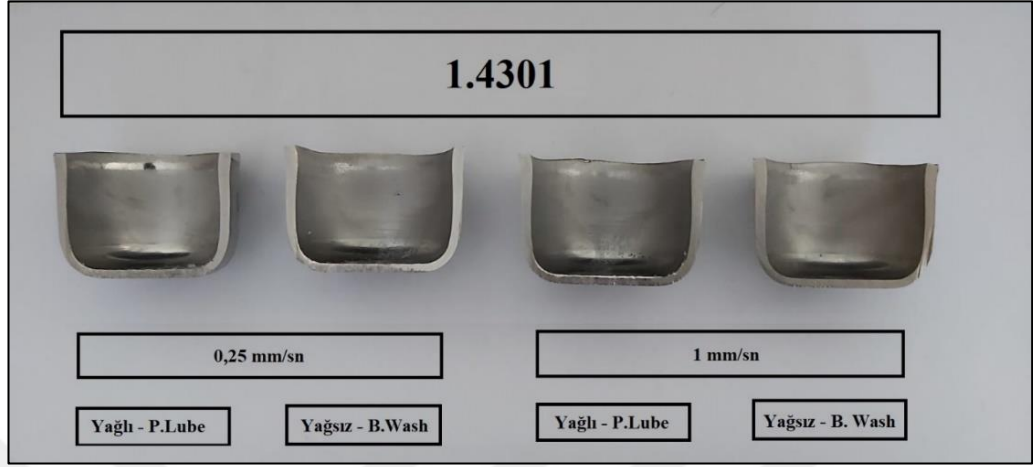
Şekil 4.23. 1.4301 yağsız koşullar kuvvet-strok grafikleri



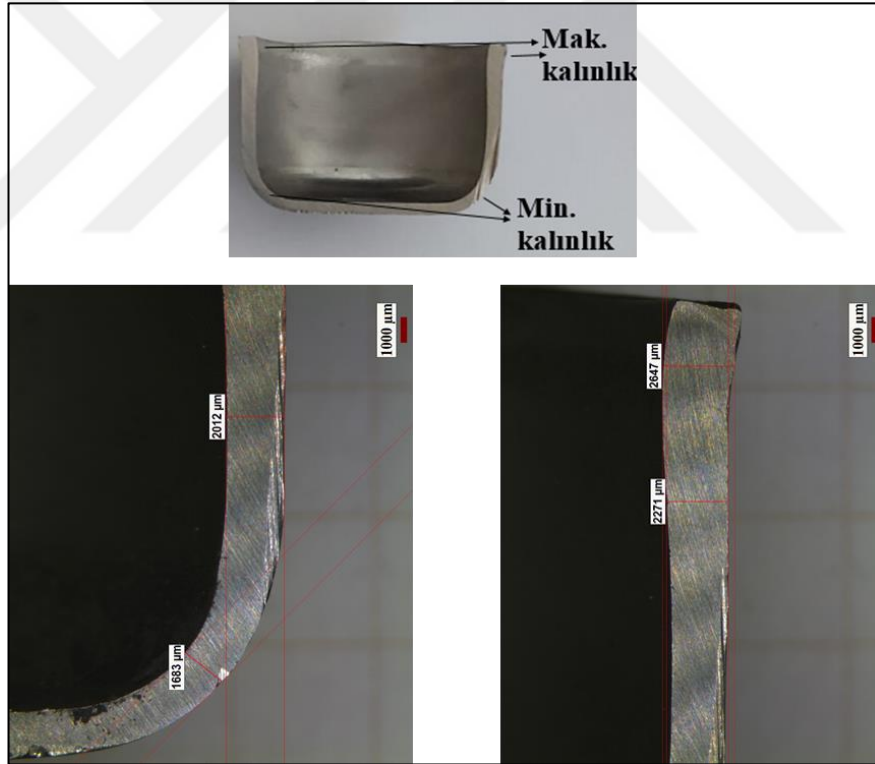
Şekil 4.24. 1.4301 gerçekleşen maksimum kuvvet değerleri

Maksimum kuvvet 128,89 kN ile 0,25 mm/sn hızda yağlı durumda elde edilmiştir (Şekil 4.24). Harcanan enerji ise 1976,72 J ile yine 1 mm/sn yağlı durumda gerçekleştirilen deney sonucu elde edilmiştir. Hızın artması kuvvet ve harcanan enerjinin azalmasına sebep olmuştur. Deney sonucu ulaşılan maksimum kuvvetler simülasyon sonucu ile karşılaştırıldığında 0,25 mm/sn – P.Lube (Yağlı) koşul altında yaklaşık %98,92 iken bu değer aynı hızda B.Wash (Yağsız) şartlar altında %93,97 olarak gerçekleşmiştir. 1 mm/sn hız altında P.Lube (Yağlı) koşulda yaklaşık %97,14 iken bu değer aynı hızda B.Wash (Yağsız) şartlar altında %88,76 olarak gerçekleşmiştir.

Deney sonrasında parçalar kesilerek stereo mikroskop ile kalınlık değişimi incelenmiştir (şekil 4.25).

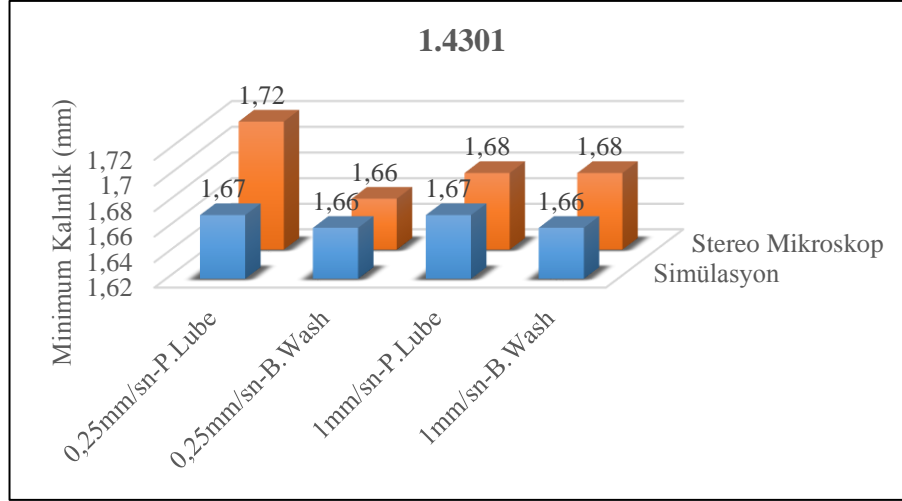


şekil 4.25. Kesilmiş 1.4301 rn görselleri



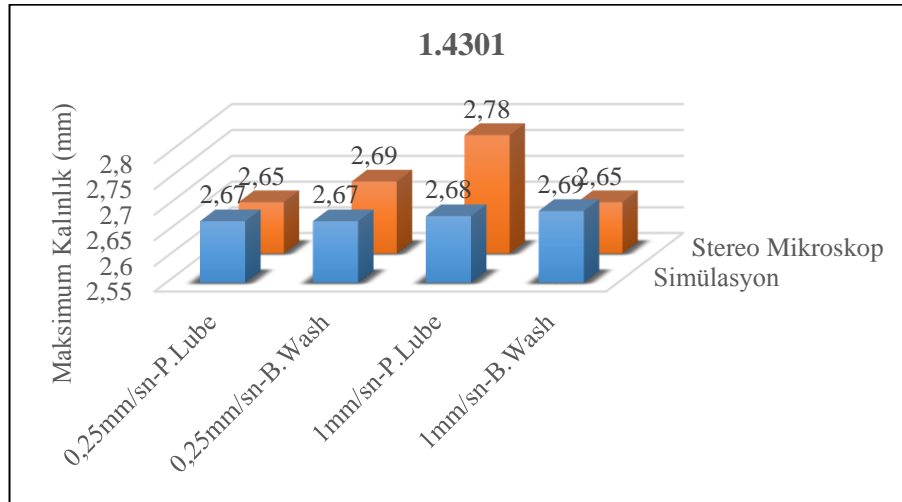
şekil 4.26. 1.4301 stereo mikroskop görselleri

Ölüm sonucu şekil 4.26'da görüldüğü ve simülasyon sonuçlarından beklendiği gibi parçanın st kısımlarında kalınlaşma meydana gelmiştir. Parçanın tabanına doğru gidildikçe kalınlık azalmaktadır. Minimum kalınlık değeri radyus bölgelerinde llmştr.



Şekil 4.27. 1.4301 minimum kalınlık değerleri

Şekil 4.27’de görüldüğü gibi gerçekleşen minimum kalınlık değerleri genellikle simülasyon sonuçlarına göre daha yüksektir. 0,25 mm/sn hızda yağlayıcı etkisi ile minimum et kalınlığı artarken, 1 mm/sn hızda bir değişim gözlenememiştir. Stereo mikroskop ölçümleri ile simülasyon sonuçları arasında 0,25 mm/sn - P.Lube (Yağlı) koşul altında yaklaşık %97,09 olarak gerçekleşmiştir. Aynı hız değerinde B.Wash (Yağsız) koşul altında yaklaşık %100 olmuştur. 1 mm/sn hız altında P.Lube (Yağlı) koşulda yaklaşık %99,40 iken bu değer aynı hızda B.Wash (Yağsız) şartları altında %98,81 olarak gerçekleşmiştir.

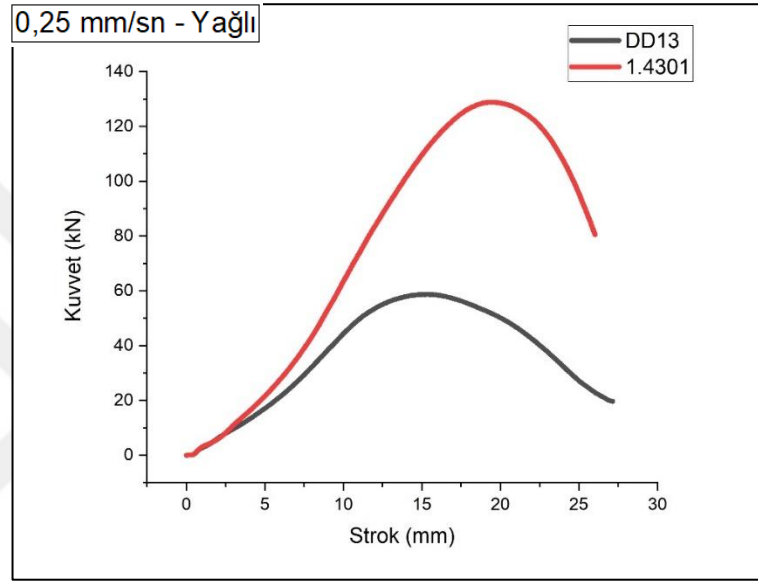


Şekil 4.28. 1.4301 maksimum kalınlık değerleri

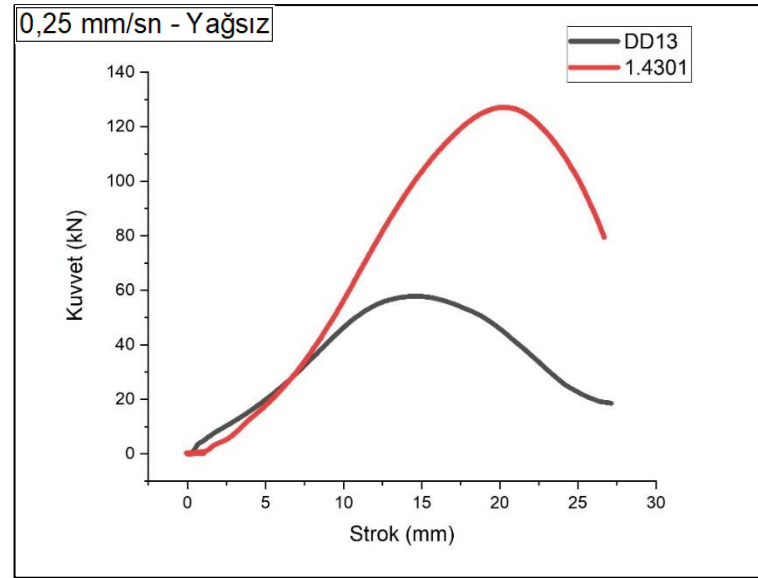
Maksimum kalınlık sonuçlarına göre 1 mm/sn yağlı durumda gerçekleştirilen deneyde en yüksek kalınlık değeri elde edilmiştir (Şekil 4.28). Stereo mikroskop ölçümleri ile simülasyon sonuçları arasında 0,25 mm/sn - P.Lube (Yağlı) koşullarında

yaklaşım %99,25 iken bu değer aynı hızda B.Wash (Yağsız) şartları altında %99,26 olarak gerçekleşmiştir. 1 mm/sn hız altında P.Lube (Yağlı) koşullarda yaklaşım %96,40 iken bu değer aynı hızda B.Wash (Yağsız) şartlar altında % 98,51 olarak gerçekleşmiştir. 0,25 mm/sn hızla yapılan çalışmalarda simülasyon sonuçlarının deneysel sonuçlara daha yakın olduğu belirlenmiştir.

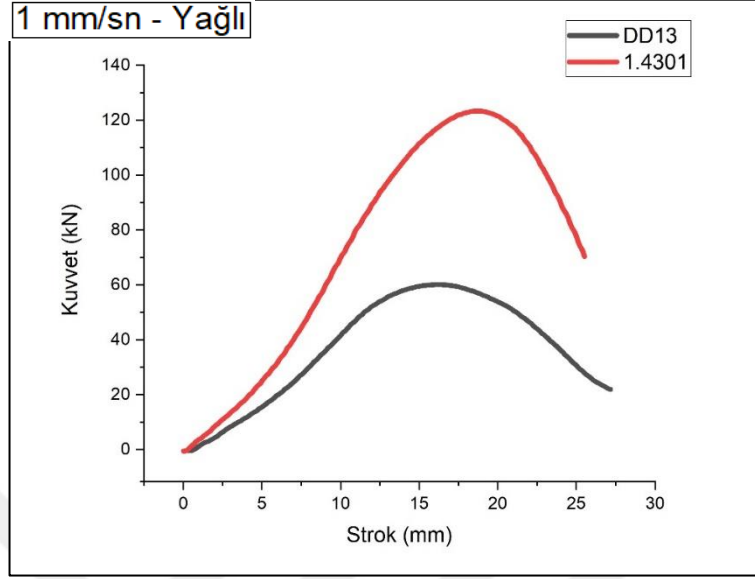
4.3. DD13 ve 1.4301 Malzemelerinin Deney Çıktılarının Karşılaştırması



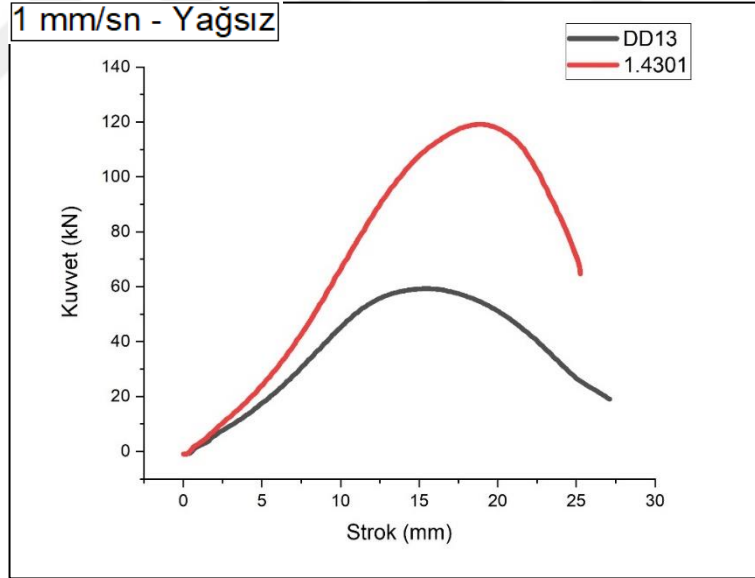
Şekil 4.29. 0,25 mm/sn yağlı DD13 ve 1.4301 kuvvet-strok grafikleri



Şekil 4.30. 0,25 mm/sn yağsız DD13 ve 1.4301 kuvvet-strok grafikleri

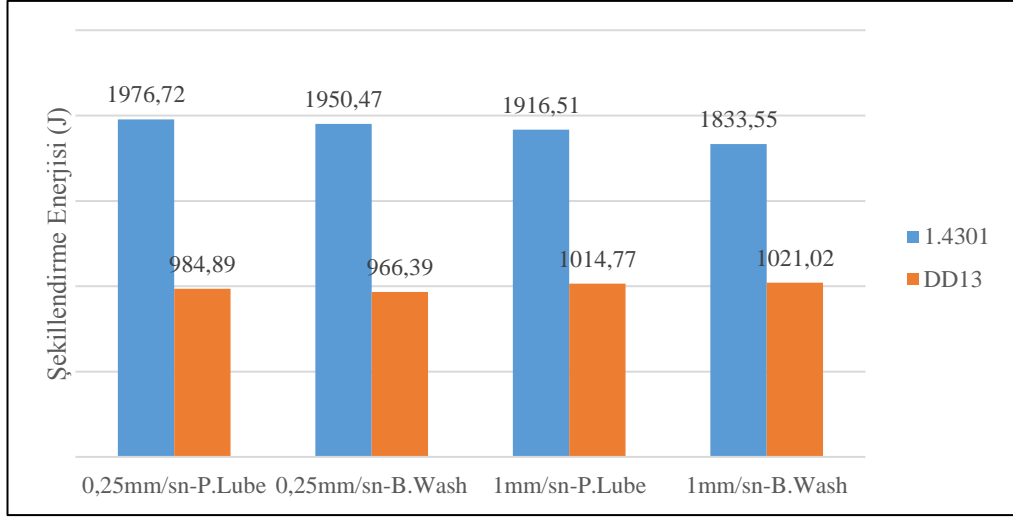


Şekil 4.31. 1 mm/sn yağlı DD13 ve 1.4301 kuvvet-strok grafikleri

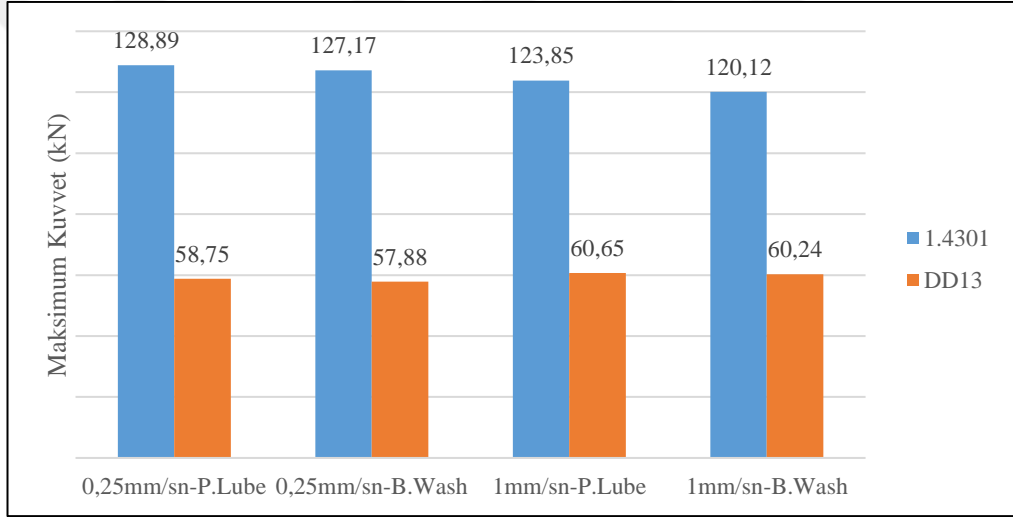


Şekil 4.32. 1 mm/sn yağsız DD13 ve 1.4301 kuvvet-strok grafikleri

Şekil 4.29, Şekil 4.30, Şekil 4.31 ve Şekil 4.32’de sırasıyla 0,25 mm/sn yağlı, 0,25 mm/sn yağsız, 1 mm/sn yağlı ve 1 mm/sn yağsız koşullar altına DD13 ve 1.4301 sac metal malzemelerin kuvvet-strok grafik karşılaştırmaları görülmektedir. Malzemelerin mukavemetsel özellikleri arttıkça şekil değişimi zorlaşmaktadır. 1.4301 paslanmaz çeliğin akma ve çekme mukavemet değerleri DD13 sac malzemeye göre yüksektir.



Şekil 4.33. Gerçekleşen şekillendirme enerjisi sonuçları

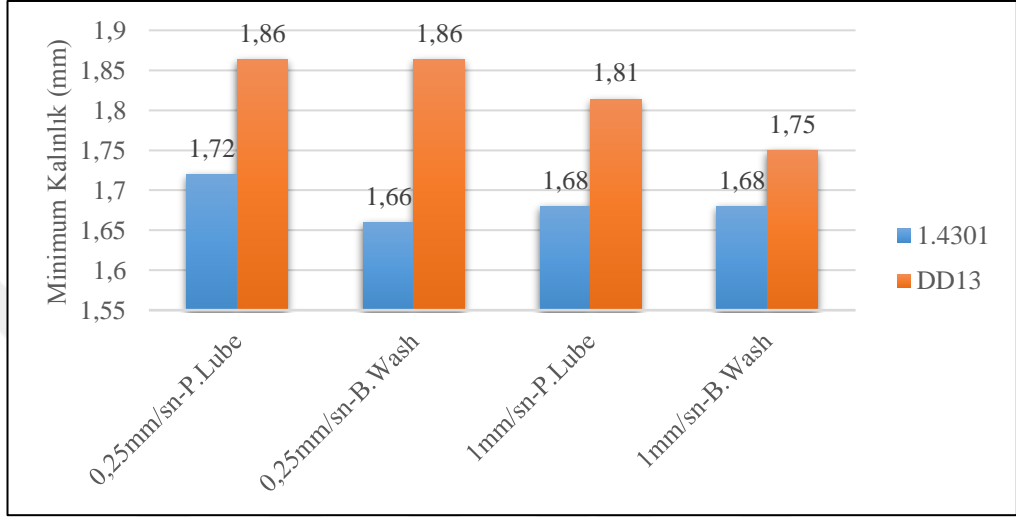


Şekil 4.34. Gerçekleşen maksimum kuvvet sonuçları

1.4301 malzemesi östenitik paslanmaz çeliktir. Akma ve çekme dayanımı arasındaki yüksek farktan dolayı şekil verme ve soğuk çekme olarak iyi özellik göstermektedir. 1.4301 çeliklerinin uzaması yüksektir. Mükemmel soğuk çekme, yüksek süneklik, sıvama özelliğine sahiptirler. Akma dayanımının soğuk işleme hemen yükselmesi şekil vermek için daha fazla enerji gerektirmektedir [56].

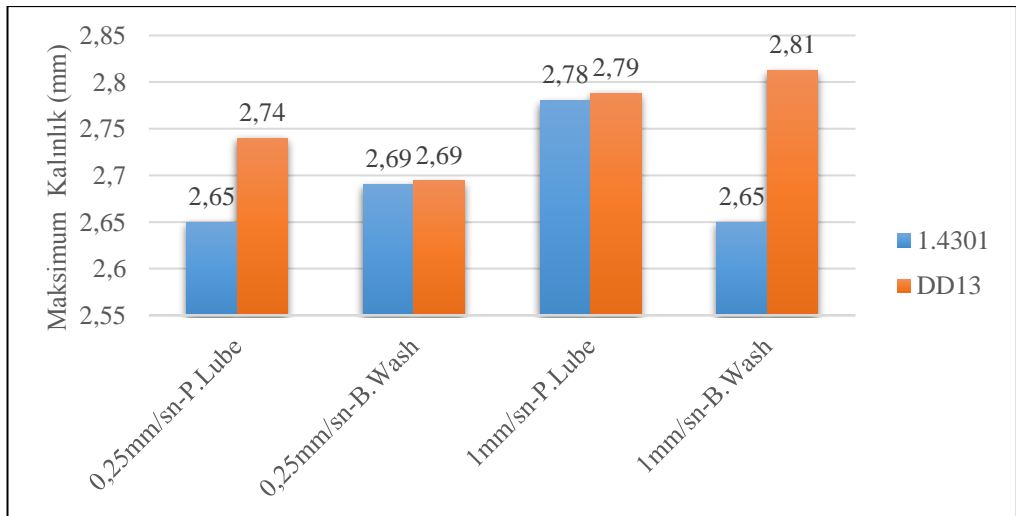
Bu özelliklere bakıldığında DD13 sac malzemesine göre 1.4301 malzemesinin beklendiği gibi yüksek kuvvetler ve enerji ile şekillendirilebildiği görülmüştür (Şekil 4.33 – Şekil 4.34). Paslanmaz çelikte hız artışı maksimum kuvvet ve enerji değerlerinde azalmaya sebep olurken DD13 için tam tersi durum söz konusu olmuştur.

Yağlayıcı kullanımı genel olarak enerji ve maksimum kuvvetlerde artışa sebep olmuştur. Bu durum parçada yaşanan maksimum kalınlık değerlerinin artması, merkezlemede yaşanabilecek sorunlar ve proses parametrelerinin değişkenliği sonucu parçanın kalıba sıkışması ile açıklanmaktadır. Bu nedenle kalıp boşluğu ve merkezlemesi tasarım aşamasında dikkat edilmesi gereken parametrelerdendir.



Şekil 4.35. Gerçekleşen minimum kalınlık sonuçları

Radyus bölgelerinde elde edilen minimum kalınlık değerleri 1.4301 malzemesinde DD13 sac malzemesine göre daha düşüktür. DD13 malzemesi için hız artışı minimum kalınlığın azalmasına neden olmuştur. 1.4301 için fazla bir değişim gözlemlenememiştir. Yağ kullanımının DD13 malzemesi için yüksek, 1.4301 malzemesi için düşük hızda daha etkin olduğu görülmüştür (Şekil 4.35).



Şekil 4.36. Gerçekleşen maksimum kalınlık sonuçları

Maksimum kalınlık değerlerinde ise yağlı durumlar için hız artışı her iki malzemenin maksimum kalınlık değerlerinde artışa sebep olmuştur. Yağısız durumlarda DD13 malzemesi için hız artışıyla kalınlık değeri artarken 1.4301 için azalmıştır (Şekil 4.36).



5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Gerek derin çekme kalıplarından elde edilen veriler gerek yapılan literatür taramaları sonucunda radyus bölgelerinin derin çekme işlemi sırasında temas alanının azalması sonucu oluşan yüksek basınçlar altında daha çok sürtünmeye ve ısınmaya maruz kalarak aşındığı anlaşılmıştır. Dişi kalıp eğrilik yarıçapı ve pot çemberi ile iş parçasının temasta olduğu yüzeyler akış işleminin gerçekleştirildiği bölgeler olması nedeniyle tribolojik açıdan dikkat edilmesi gereken noktalar. Bu nedenle yüksek miktarda sürtünme, aşınmanın beklendiği ve parça üzerinde yırtılma, kopma gibi hasarların beklendiği bölgeler radyus bölgeleri olmaktadır.

Diğer bir önemli parametre olan kalıp boşluğu parçanın kalıp içerisine sıkışmasını önlemek için tasarım aşamasında dikkat edilmesi gereken konulardandır. Kalıp boşluğunun yanı sıra parçanın merkezlemesi kalıp boşluğu yeterli olsa dahi kusurlara sebebiyet vereceğinden önemli bir diğer parametredir.

Gerçekleştirilen simülasyonlar ve deneysel çalışmalar karşılaştırıldığında kuvvet değerlerinde yaklaşım oranı için en iyi 1.4301 malzemesi için elde edilmiştir. 1.4301 malzemesi için 0,25 mm/sn – P.Lube (Yağlı) koşulda %98,92 ile en iyi yaklaşım değeri elde edilmiştir. DD13 malzemesi için en iyi yaklaşım değeri %89,63 ile 1 mm/sn – P.Lube (Yağlı) koşulda gerçekleşmiştir.

Deney sonucu elde edilen maksimum kalınlık değerleri simülasyon ile karşılaştırıldığında her iki malzeme için tüm şartlar altında gerçekleştirilen çalışmalar sonucu elde edilen yaklaşım değerleri %96,79 değerinin üzerindedir. 0,25 mm/sn – B.Wash (Yağsız) koşul altında her iki malzeme için yaklaşım oranı %100 olarak elde edilmiştir.

Minimum kalınlık değerleri karşılaştırıldığında ise 1.4301 paslanmaz çelik malzemesinin simülasyon değerleri gerçekleşen değerlere daha yakın olmuştur. 0,25 mm/sn hız – B.Wash (Yağsız) koşul altında %99,26 ile en iyi yaklaşım oranı elde edilmiştir.

Tüm sonuçlar değerlendirildiğinde 1.4301 paslanmaz çelik simülasyon sonuçlarının DD13 malzemesine göre deneysel veriler ile daha fazla örtüştüğü görülmüştür. 1.4301 paslanmaz çelik için düşük hızlarda daha yakın sonuçlar elde edildiği ancak DD13 malzemesi için bu sonucun değişkenlik gösterdiği görülmüştür.

Simülasyon sonuçlarının seri üretim şartlarına etki ederek verimliliği artırması için doğru malzeme kart değerlerinin kullanılması ve gerçek üretim şartlarının olabildiğince simülasyon programına aktarılması gerekmektedir.

Bu çalışmada simülasyon ve deneysel çalışma arasındaki ilişki sayısal olarak ortaya konulmuştur. Özellikle kuvvet-strok eğrisi olarak derin çekme esnasındaki değişimler gözlemlenmiştir. Harcanan enerjinin ve oluşan kuvvetlerin tepe değerleri belirlenmiştir. Öncelikle deneysel ve simülasyon arasındaki ilişkinin testler sonrası valide edilmesi ile bundan sonraki çalışmalarda deneysel olarak çok farklı sac malzeme, kalıp malzemesi ve yağlama koşulları altında çalışmalar yapmak, alışılmamış sac malzemeler ve kalıp malzemeleri, yüzey işlemleri, toleranslar, kalıp geometrileri vb. dışında derin çekme ile ilgili her türlü çalışmayı gerçekleştirebilecek bir deneysel alt yapı ortaya konulmuştur.

KAYNAKLAR

- [1] Boljanovic V., *Sheet Metal Forming Processes And Die Design*, 1st ed., Industrial Press, New York, 2004.
- [2] Şekerci E. M., Meşeci E. Y., Düz kaya E., Örs D., Sac Metal Şekillendirme ve Uygulamaları, Bitirme Çalışması, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Trabzon, 2018.
- [3] Groover M. P., *Fundamentals of Modern Manufacturing*, 4th ed., John Wiley & Sons, Inc., United States of America, 2010.
- [4] Tisza M., Fülöp T., A General Overview of Tribology of Sheet Metal Forming, *Journal for Technology of Plasticity*, 2001, **6**(2), 11-25.
- [5] Lăzărescu L., Banabic D., Evaluation of Deep Drawing Force Under Different Friction Conditions, *MATEC Web of Conferences*, DOI: 10.1051/mateconf/201713705003.
- [6] Taşdemir V., Derin Çekme İşlemi Üzerine Kalıp Geometrisinin Etkisinin Sonlu Elemanlar Analizi, *KSU Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 2013, **16**(1), 43-47.
- [7] <https://argevetasarim.com/derin-cekme-yontemi/>, (Ziyaret tarihi: 11 Kasım 2020).
- [8] Yılmaz İ. Ö., Otomotiv Sac Şekillendirme Kalıplarında Kullanılan Malzemelerin Tribolojik Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir, 2012, 312980.
- [9] Rooij M. B., Tribological Aspects of Unlubricated Deep Drawing Processes, Ph.D. Thesis, University of Twente, Faculty of Engineering Technology, Twente, 1998.
- [10] Gåård A., Wear in Sheet Metal Forming, Licentiate Thesis, Karlstad University Studies, Faculty of Technology and Science, Karlstad, 2008.
- [11] Makhkamov A., Tribology in Sheet Metal Forming, Ph.D. Thesis, Universidade do Porto, Faculdade de Engenharia, Porto, 2017.
- [12] GmbH S., *Metal Forming Handbok*, 1st ed., Springer, Berlin, 1998.
- [13] Nilsson, M., Tribology in Metal Working, Licentiate Thesis, Uppsala University, Department of Engineering Sciences, Uppsala, 2012.

- [14] Button S. T., Tribology in Metal Forming Processes, Editor: Davim J. P., *Tribology in Manufacturing Technology*, 1st ed., Springer, London, 103-120, 2012.
- [15] Carlsson P., Surface Engineering in Sheet Metal Forming, Ph.D Thesis, Uppsala University, Department of Engineering Sciences, Uppsala, 2005.
- [16] Banjac M., Vencel A., Otović S., Friction and Wear Processes – Thermodynamic Approach, *Tribology in Industry*, 2014, **36**(4), 341-347.
- [17] Ceron E., Bay N., Testing and Prediction of Limits of Lubrication in Sheet Metal Forming, *Proceedings of International Deep Drawing Research Group Conference*, 2012, **41**(1), 251-257.
- [18] Ceron E., New tribo-systems for Sheet Metal Forming of Advanced High Strength Steels and Stainless Steels, Ph.D. Thesis, Technical University of Denmark, Department of Mechanical Engineering, Kopenhagen, 2013.
- [19] Ceron E., Bay N., Testing New Tribo-Systems for Sheet Metal Forming of Advances High Strength Steels and Stainless Steels, *Tribologia – Finnish Journal of Tribology*, 2014, **32**(1), 25-32.
- [20] Koçar O., Derin Çekme İşleminde Ürün Kalitesinin Tahmini ve Kontrolü, Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 2014, 379559.
- [21] Joshi A. R., Kothari K. D., Jhala Dr. R. L., Effects of Different Parameters on Deep Drawing Process: Review, *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, 2013, **2**(3), 1-5.
- [22] Yıldız B., Derin Çekme İşleminde Kalıp Tasarımının Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Optimizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Dicle Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Diyarbakır, 2017, 477595.
- [23] Gürün H., Derin Çekme Kalıplarındaki Parametrelerin Deneysel Olarak İncelenmesi ve Bulanık Mantık ile Tahmini, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2008, 234059.
- [24] Masen M. A., Abrasive Tool Wear in Metal Forming Processes, Ph.D Thesis, University of Twente, Faculty of Engineering Technology, Twente, 2004.
- [25] Altan T., Tekkaya E., *Sheet Metal Forming Fundamentals*, 1st ed., ASM International, Ohio, 2012.
- [26] Westeneng A., Modelling of Contact and Friction in Deep Drawing Processes, Ph.D Thesis, University of Twente, Faculty of Engineering Technology, Twente, 2001.
- [27] Ünal E., Kare Kesitli Kapların Derin Çekilmesinde Kalıp Geometrisi ve Radyüsünün Çekme Oranına Etkisinin Araştırılması, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 2011, 287057.

- [28] Göl S., Derin Çekme İşlemine Etki Eden Parametrelerin Analizi ve Optimizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa, 2005, 168202.
- [29] Dwivedi R., Agnihotri G., Study of Deep Drawing Process Parameters, *Materialstoday: Proceedings*, 2017, **4**(5), 820-826.
- [30] Özdiilli Ö., Erdin M. E., Comparison of Common Deep Drawing Steel Sheets in terms of Blank Holder Force and Friction Conditions, *International Journal of Automotive Science and Technology*, 2018, **2**(3), 36-41.
- [31] Zaid A. I. O., Deep Draawing Mechanism, Parameters, Defects and Recent Results: State of the Art, *Materials Science and Engineering*, DOI: 10.1088/1757-899X/146/1/012009.
- [32] Shah K. T., Chaudhary S., Bhatt D. K., Analysis of the Effect of Process Parameters in Deep Drawing, *International Journal of Advance Engineer ing and Research Development (IJAERD)*, 2014, **1**(5), 2348-4470.
- [33] Gowtham K., Srikanth K. V. N. S., Murty K. L. N., Simulation of the Effect of Die Radius on Deep Drawing Process, *International Journal of Applied Research in Mechanical Engineering (IJARME)*, 2012, **2**(1), 12-17.
- [34] Ceron E., Bay N., Determination of Friction in Sheet Metal Forming by Means of Simulative Tribo-Tests, *Key Engineering Materials*, DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.549.415.
- [35] Vatansever H., Esener E., Sonlu Elemanlar Hesaplama Parametrelerinin Sac Metal Şekillendirme Simülasyon Süresi ve Hassasiyetine Etkisinin Tespiti, *European Journal of Science and Technology EJOSAT*, DOI: 10.31590/ejosat.555491.
- [36] Mouta K. A., Azevado L. D., Fernandes M. G., Fonseca E. M. M., Sheet Metal Forming by Numerical Simulations: 2D and 3D Axisymmetric Deformation of A Cylindrical Piece, *Proceedings of the 7th International Conference on Mechanics and Materials in Design*, Albuferia, Portugal, 11-15 Haziran 2017.
- [37] Zein H., El-Sherbiny M., Abd-Rabon M., Shazly M. E., Effect of Die Design Parameters on Thinning of Sheet Metal in the Deep Draeing Process, *American Journal of Mechanical Engineering*, DOI: 1 0.12691/ajme-1-2-1.
- [38] Kalkan H., Hacaloğlu T., Kaftanoğlu B., Sac Şekillendirme İşleminde Sürtünmenin İncelenmesi, *Makine Tasarım ve İmalat Dergisi*, 2016, **14**(2), 88-94.
- [39] Sniekers R. J. J. M., Friction in Deep Drawing, Ph.D Thesis, Eindhoven University of Technology, Department Of Manufacturing Technology, Eindhoven, 1996.

- [40] Trzepiecinski T., Lemu H. G., Effect of Lubrication on Friction in Bending Under Tension Test-Experimental and Numerical Approach, *Metals*, DOI: 10.3390/met10040544.
- [41] Trzepiecinski T., Lemu H. G., Recent Developments and Trends in the Friction Testing for Conventional Sheet Metal Forming and Incremental Sheet Forming, *Metals*, DOI: 10.3390/met10010047.
- [42] Wang C., Ma R., Zhao J., Zhao J., Calculation Method and Experimental Study of Coulomb Friction Coefficient in Sheet Metal Forming, *Journal of Manufacturing Processes*, DOI: 10.1016/j.jmapro.2017.02.016.
- [43] Seshacharyulu K., Bandhavi C., Naik B. B., Rao S. S., Singh S. K., Understanding Friction in Sheet Metal Forming-A Review, *Materialstoday: Proceedings*, 2018, 5(1), 18238-18244.
- [44] Davim J. P., *Tribology for Engineers*, 1st ed., Woodhead Publishing Limited, UK, 2011.
- [45] Filzek J., Groche P., Assessment of the Tribological Function of Lubricants for Sheet Metal Forming, *Bench Testing of Industrial Fluid Lubrication and Wear Properties Used in Machinery Applications*, DOI: 10.1520/STP10502S.
- [46] Stachowiak G. W., Batchelor A. W., *Engineering Tribology*, 4th ed., Butterworth Heineman, USA, 2014.
- [47] Subramonian S., Evaluation of Lubricants for Stamping Deep Draw Quality Sheet Metal in Industrial Environment, Master's Thesis, The Ohio State University, Department of Mechanical Engineering, Columbus, 2009.
- [48] Bay N., Olsson D. D., Andreasen J. L., Lubricant Test Methods for Sheet Metal Forming, *Tribology International*, DOI: 10.1016/j.triboint.2007.11.017.
- [49] Torres H., Ripoll M. R., Prakash B., Tribological Behaviour of Self-Lubricating Materials at High Temperatures, *International Materials Reviews*, DOI: 10.1080/09506608.2017.1410944.
- [50] Kirkhorn L., Gutnichenko O., Bihagen S., Stahl J., Minimum Quantity Lubrication (MQL) with Carbon Nanostructured Additives in Sheet Metal Forming, *Procedia Manufacturing*, DOI: 10.1016/j.promfg.2018.06.106.
- [51] Brosius A., Mousavi A., Lubricant Free Deep Drawing Process by Macro Structured Tools, *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, DOI: 10.1016/j.cirp.2016.04.060.
- [52] <http://arascelik.com.tr/urunler/soguk-is-takim-celikleri/12379/11>, (Ziyaret tarihi: 25 Ocak 2021).
- [53] https://www.erdemir.com.tr/Sites/1/upload/files/Yassi_Urun_Katalogu_2020_TR-4649.pdf, (Ziyaret tarihi: 25 Ocak 2021).

- [54] <https://bircelik.com/tr/kategori/304-1-4301->, (Ziyaret tarihi: 25 Ocak 2021).
- [55] <https://www.belginoil.com/tr/Urunler/Metal-Isleme-Yaglari/Pur-Sivama-cekme-Yaglari/1/8/5/Drawtex-KC-70>, (Ziyaret tarihi: 25 Ocak 2021).
- [56] Töre C., *Mekanik Tasarımda Çelik ve Özellikleri*, 1st ed., Özkan Matbaacılık, Ankara, 2007.



KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

- [1] **Yalçın C.**, Edis R., Uçakkuş Ö.E., Sınmazçelik T., Derin Çekme İşleminde Zımba Hızı Değişiminin ve Yağlayıcı Kullanımının Etkilerinin Nümerik ve Deneysel Olarak İncelenmesi, *Ankara IV. Uluslararası Bilimsel Araştırmalar Kongresi*, Ankara, Türkiye, 10-11 Nisan 2021.
- [2] **Yalçın C.**, Edis R., Özzaim P., Durali H., Yurdakul Y., Sınmazçelik T., Sac Şekillendirme İşletmesinde SMED Çalışmasına Bir Örnek, *Icontech Uluslararası Pozitif Bilimlerde Yenilikçi Araştırmalar Sempozyumu*, Bursa, Türkiye, 1 Mayıs 2020.
- [3] Edis R., **Yalçın C.**, Özzaim P., Yılmaz Y., Yurdakul Y., Sınmazçelik T., Sac Şekillendirme İşletmesinde Fire Yönetimi Çalışmasına Bir Örnek, *Icontech Uluslararası Pozitif Bilimlerde Yenilikçi Araştırmalar Sempozyumu*, Bursa, Türkiye, 1 Mayıs 2020.

ÖZGEÇMİŞ

İlk, orta öğrenimini Darıca Mehmet Akif İlköğretim Okulu'nda tamamladıktan sonra lise öğrenimini Gebze Anadolu Lisesi'nde tamamladı. 2014 yılında Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği bölümünü kazandı. 1 sene Kocaeli Üniversitesi Yabancı Diller Yüksekokulu'nda İngilizce hazırlık okudu. 4 senelik Makine Mühendisliği Lisans eğitiminin ardından 2019 yılında 3,25 ortalama ile bölüm 3.sü olarak mezun oldu. 2019 yılında Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans öğrenimine başladı. 01.10.2019 tarihinden itibaren Ulus Metal San. Ve Tic. A.Ş.'de Ar-Ge Mühendisi olarak çalışmaktadır.

