

**T.C.
HİTİT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**POLİMER KAPLI METAL SACLARIN DERİN ÇEKME
DAVRANIŞININ İNCELENMESİ**

Özgür ÖZDİLLİ

**DOKTORA TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**DANIŞMAN
Dr. Öğr. Üyesi M. Emin ERDİN**

**EYLÜL 2018
ÇORUM**

Özgür ÖZDİLLİ tarafından hazırlanan “ Polimer Kaplı Metal Sacların Derin Çekme Davranışının İncelenmesi” adlı tez çalışması 18/09/2018 tarihinde aşağıdaki jüri üyeleri tarafından oy birliği ile Hitit Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Mehmet Burak BİLGİN

Doç. Dr. Arif GÖK

Dr. Öğr. Üyesi M. Emin ERDİN (Danışman)

Dr. Öğr. Üyesi Mert Şafak TUNALIOĞLU

Dr. Öğr. Üyesi İbrahim BİLİCİ



Hitit Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun 18/09/2018 tarih ve 2018/252... sayılı kararı ile Özgür ÖZDİLLİ Anabilim Dalı’nda Doktora derecesi alması onanmıştır.



Doç. Dr. Cengiz BAYKASOĞLU
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

TEZ BEYANI

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını beyan ederim.



Özgür ÖZDİLLİ

POLİMER KAPLI METAL SAÇLARIN DERİN ÇEKME DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

Özgür ÖZDİLLİ

HİTİT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Eylül 2018

ÖZET

İmalatta derin çekme işlemi sac metallere üç boyutlu şekil vermek için otomobil ve makinaların gövde saçları, beyaz eşyalar, jantlar, mutfak evyeleri, mutfak eşyaları, medikal kaplar ve içecek kutuları başta olmak üzere pek çok üründe yaygın kullanılan bir yöntemdir. Derin çekme işlemi büyük miktarda plastik deformasyonun gerçekleştiği; malzeme anizotropisi, parça geometrisi, malzemenin kimyasal bileşimi, ortam koşulları, zımba hızı ve etkin basınç başta olmak üzere pek çok parametrenin etkin olduğu ve matematiksel analizin son derece zor olduğu bir imalat yöntemidir. Yırtılma, kırılma, çizilme ve kulaklanma gibi hasarlar oluşmadan en yüksek derin çekme oranını yakalayabilmek için, baskı plakası basıncı ve sürtünme değerlerinin belirlenmesi çok önemlidir. Bu çalışmada sürtünmeyi azaltmak ve imalat verimliliğini arttırmak için polimer kaplamalı çelik saçların derin çekme işlemi deneysel olarak incelenmiştir. Deneyleerde çekme oranı, baskı plakası basıncı ve çekme hızı parametreleri çeşitli aralıklarda değiştirilmiş ve elde edilen değerler grafikler yardımıyla değerlendirilmiştir.

Derin çekme sırasında yukarıda belirtilen kusurları azaltmak ve ürün kalitesini yükseltmek amacıyla çeşitli yağlayıcılar kullanılmaktadır. Buna rağmen yüzeylerde plastik şekillendirme sonucunda yanma ve çizilmeler oluşmaktadır. Ayrıca derin çekilmiş bir ürüne imalat sonrası, her türlü kaplama ya da boyanın uygulanması mümkün olmamaktadır. Derin çekme işlemi öncesinde metal saçların polimer esaslı

bir malzeme ile kaplanması; uzun ömür, dekoratif görünüm, korozyon direnci, aşırı aşınmanın engellenmesi, derin çekme esnasında sürtünmenin ve yağlama ihtiyacının azalması, bazı imalat yöntemlerinde şekillendirme sonrası boyama hattı gereksinimini ortadan kaldırması gibi avantajlar sağlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Sac şekillendirme, derin çekme, DC01, çekme oranı sınırı (LDR), polimer kaplama



INVESTIGATION OF DEEP DRAWING BEHAVIOR OF POLYMER COATED METAL SHEETS

Özgür ÖZDİLLİ

HİTİT UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

September 2018

ABSTRACT

Deep drawing process in manufacturing is a widely used method for giving three dimensional shapes to sheet metals, such as automobile and machine body sheets, white goods, wheel rims, kitchen sinks, kitchenware, medical containers and beverage cans, etc. Deep drawing process is a manufacturing method in which large amount of plastic deformation occurs. Thus, mathematical analysis of deep drawing is extremely difficult due to lots of parameters effective during the process, such as material anisotropy, part geometry, chemical composition of material, environmental conditions, punch speed and effective pressure, etc. It is very important to determine the appropriate blank holder pressure and friction values in order to obtain the highest deep draw ratio without occurrence of damages such as tearing, wrinkling, scratching and earing. In this study, deep drawing process of polymer coated steel sheets was experimentally investigated to reduce friction and increase manufacturing productivity. In the experiments, drawing ratio, blank holder pressure and drawing speed parameters were varied at various intervals and the obtained values were evaluated via graphs.

A variety of lubricants are used during deep drawing to reduce the mentioned problems above and to increase product quality. Nevertheless, burning and scratches occur as a result of plastic deformation on the surfaces. Furthermore, it is not always possible to apply some kinds of coatings or paint after manufacturing to a deep drawn product. Coating metal sheets with a polymer based material before the deep drawing process

provides a number of advantages such as longevity, decorative appearance, corrosion resistance, prevention of excessive wear, reduction of friction and lubrication need during deep drawing, and removing painting line requirement after forming in some manufacturing methods.

Keywords: Sheet forming, deep drawing, DC01, limiting drawing ratio (LDR), polymer coating



TEŞEKKÜR

Çalıőmalarım boyunca bilgi ve deneyimlerini benden esirgemeyen, teővik ve destekleri ile her türlü problemin üstesinden gelmemde bana yardımcı olan danışmanım Dr. Öğr. Üyesi M. Emin ERDİN'e teőekkürlerimi sunarım.

Tez savunma sınavı jürimde bulunan değerli öğretim üyelerine teőekkürlerimi sunarım.

Hayatım boyunca desteklerini her zaman hissettiğim aileme sonsuz teőekkürler ederim.

Bu tez çalışmasına, MUH19004.17.002 numaralı proje kapsamında vermiş oldukları destekten dolayı, Hitit Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatrlği'ne teşekkür ederiz.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT	vi
TEŞEKKÜR	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xii
ŞEKİLLER DİZİNİ	xii
RESİMLER DİZİNİ.....	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR	xiii
1. GİRİŞ	1
2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI	2
2.1. Derin Çekme İşlemi.....	2
2.2. Derin Çekme Mekanığı.....	3
2.3. Derin Çekme Mühendislik Hesaplamaları.....	7
2.3.1. Başlangıç Sac Çapının Hesaplanması	7
2.3.2. Derin Çekme Oranı	9
2.3.3. Baskı Plakası Kuvveti	9
2.3.4. Kalınlık ve çap oranı	11
2.4. Derin Çekme Kabiliyetini Etkileyen Faktörler	11
2.4.1. Derin Çekme Değişkenleri	12
2.4.2. Malzeme Özellikleri ve Kalıp Geometrisinin Etkisi.....	15
2.5. Polimer Kaplama	19
2.5.1. Elektrostatik Toz Polimer Kaplama	20
2.5.2. Polimer Kaplama Malzemeleri.....	24
2.5.3. Polimer Kaplamanın Amacı	25
2.5.4. Polimerlerin Sürtünme Mekanizmaları.....	25
2.6. Literatür Özeti	27
3. MATERYAL VE METOT.....	33
3.1. Deney Düzeneginin Kurulması	33
3.1.1. Presin teknik özellikler.....	34
3.1.2. Kalıp tasarımı	34
3.1.3. Sac Malzemesi ve Kaplama Özellikleri	39

Sayfa

3.1.4. Pürüzlülük Değerleri ve Sürtünme	43
3.2. Derin Çekme Deneyleri	44
3.2.1. Deneyin Yapılışı	45
3.2.2. Kaplamasız Sacların Çekilmesi	46
3.2.3. Kaplamalı Sacların Çekilmesi	49
3.3. Sonuçlar	49
3.3.1. Farklı Baskı Plakası Basınçlarının Derin Çekme Kuvvetine Etkileri ...	51
3.3.2. Farklı Çekme Hızlarının Derin Çekme Kuvvetine Etkileri.....	54
3.3.3. Aynı Şartlarda Kaplama Durumunun Değiştirilmesi.....	57
3.3.4. Polimer Kaplamalı ve Kaplamasız Deneylerinin Karşılaştırılması	59
3.3.5. Kaplamalı Derin Çekme İşleminde Karşılaşılan Hatalar	71
3.3.6. Derin Çekme Sonrasında Kalınlık Değişiminin İncelenmesi	72
3.3.7. Poliüretan ile Kaplanmış Parçaların Derin Çekilmesi	76
3.3.8. Epoksi ile Kaplanmış Parçaların Derin Çekilmesi	77
3.3.9. Kaplamalı ve Yağlı Numunelerin Karşılaştırılması.....	79
3.3.10. Çalışmanın Kıyaslanması.....	80
4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	81
4.1. Sonuçlar	81
4.2. Öneriler	82
KAYNAKLAR.....	84
EKLER.....	89
EK-1. Polimer malzeme analiz sonuçları.....	90
EK-2. Metal sac malzeme pürüzlülük değerleri	91
EK-3. Deney numunelerinin kalınlık ölçüm noktalarının görüntüleri.....	93
ÖZGEÇMİŞ.....	94

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Çekme hızları	13
Çizelge 2.2. Elektrostatik toz kaplamanın fayda ve zararları.....	23
Çizelge 2.2. Derin Çekme İşleminde Oluşabilecek Hatalar, Muhtemel Nedenleri.....	26
Çizelge 3.2. DC01 malzemesinin farklı ülkelerde kullanılan isimleri.....	39
Çizelge 3.3. DC01 EN 10130:2006 Kimyasal Bileşimi ve Mekanik Özellikleri.....	39
Çizelge 3.4. Deneyde kullanılan polimer kaplamanın test sonuçları.....	41
Çizelge 3.5. Deney parametreleri	46
Çizelge 3.6. Kaplamasız DC01 çelik sac deney numuneleri.....	48
Çizelge 3.8. Deney sonuçlarının karşılaştırmalı tablosu.....	59
Çizelge 3.9. Literatürdeki çalışmalarla kıyas tablosu.....	80

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Derin çekme	2
Şekil 2.2. Derin çekmede işlem adımları	3
Şekil 2.3. Silindirik çekme işleminin oluşumu.....	4
Şekil 2.4. Çekme başlangıcında iş parçasının durumu	5
Şekil 2.5. Derin çekme esnasında meydana gelen gerilmeler	6
Şekil 2.6. Temsili derin çekme işleminde parçaya etki eden kuvvetler	7
Şekil 2.7. Farklı parça şekilleri için çap değerlerinin hesaplanması.....	8
Şekil 2.8. Balık kılçığı yöntemiyle derin çekmeyi etkileyen işlem parametreleri.....	12
Şekil 2.9. Derin çekme işlemi ve temas yüzeyleri.....	14
Şekil 2.10. Zimba ve matris yuvarlatma yarıçapı.....	19
Şekil 2.11. Kaplama tozlarının film haline gelme aşamaları	21
Şekil 2.12. Tabanca ile tozun parça üzerine püskürtülmesi	22
Şekil 2.13. Elektrostatik toz boyama işlem aşamaları	23
Şekil 3.1. Polimer kaplamalı metal sacların derin çekme süreci	33
Şekil 3.2. Kalıp, zimba ve baskı plakası görünümü	35
Şekil 3.3. Kaplamasız ve kaplamalı elde edilecek ürünler.....	35
Şekil 3.4. Derin çekme kalıp tasarımı	36
Şekil 3.5. Çalışmada kullanılan derin çekme modeli	38
Şekil 3.6. DC01 deney numunesinin ölçülen pürüzlülük değeri	43
Şekil 3.7. Kaplamalı deney numunesinin ölçülen pürüzlülük değeri	44
Şekil 3.8. Polimer kaplamalı deney numunelerinin grafik örnekleri.....	52
Şekil 3.9. Kaplamasız deney numunelerinin grafik örnekleri	53
Şekil 3.10. Farklı baskı plakası basınçlarında kaplamalı ve kaplamasız numunelerin grafiklerinin karşılaştırılması	54
Şekil 3.11. Farklı derin çekme hızlarında polimer kaplamalı deney numunelerinin grafik örnekleri	55
Şekil 3.12. Farklı derin çekme hızlarında kaplamasız deney numunelerinin grafik örnekleri	56
Şekil 3.13. Farklı çekme hızlarında numunelerin grafiklerinin karşılaştırılması	57
Şekil 3.14. 150 mm ilkel çap, 130 bar basınç ve 3 mm/s hızda farklı kaplama durumlarının kuvvet-strok eğrileri.....	58
Şekil 3.15. Polimer kaplamalı çelik sacların 3 mm/s hızla derin çekilmesinde elde edilen değerler.....	61

Şekil	Sayfa
Şekil 3.16. Kaplamasız çelik sacların 3 mm/s hızla derin çekilmesinde elde edilen değerler	62
Şekil 3.17. Polimer kaplamalı çelik sacların 12 mm/s hızla derin çekilmesinde elde edilen değerler.....	63
Şekil 3.18. Kaplamasız çelik sacların 12 mm/s hızla derin çekilmesinde elde edilen değerler	64
Şekil 3.19. Polimer kaplamalı çelik sacların değişken hızla derin çekilmesinde elde edilen değerler.....	65
Şekil 3.20. Kaplamasız çelik sacların değişken hızla derin çekilmesinde elde edilen değerler	66
Şekil 3.21. Polimer kaplamalı ve kaplamasız hasarsız deney sonuçlarına göre derin çekme sınırları	67
Şekil 3.22. 3 mm/s hızla hasarsız derin çekme işlemine tabi tutulmuş kaplamasız ve polimer kaplamalı çelik sac numunelerin çekme sınırları.....	68
Şekil 3.23. 12 mm/s hızla hasarsız derin çekme işlemine tabi tutulmuş kaplamasız ve polimer kaplamalı çelik sac numunelerin çekme sınırları.....	69
Şekil 3.24. Değişken hızla hasarsız derin çekme işlemine tabi tutulmuş kaplamasız ve polimer kaplamalı çelik sac numunelerin çekme sınırları.....	70
Şekil 3.24. Polimer kaplama ile metal sac arasında oluşabilecek birim şekil değişimleri	71
Şekil 3.26. Polimer kaplamalı metal saclarda ayrılma.....	71
Şekil 3.27. Polimer kaplamalı ve kaplamasız çelik sacların derin çekme sonrası kalınlık dağılımları	74
Şekil 3.28. Üzerinde çekme öncesi işaretleme yapılmış deney numunesi.....	75
Şekil 3.29. 1,86 çekme oranı ve 30 bar baskı plakası basıncında kuvvet-strok eğrilerinin karşılaştırması.....	77
Şekil 3.30. 2 çekme oranı ve 130 bar baskı plakası basıncında kuvvet-strok eğrilerinin karşılaştırması.....	78
Şekil 3.31. 2 çekme oranı ve 40 bar baskı plakası basıncında kuvvet-strok eğrilerinin karşılaştırması.....	79
Şekil E1.1. Deneylerde kullanılan polimer kaplama malzemesinin analiz sonuçları.....	90
Şekil E2.1. Deneylerde kullanılan kaplamasız metal sac pürüzlülük profili	91
Şekil E2.2. Deneylerde kullanılan polimer kaplama malzemesinin pürüzlülük profili	92
Şekil E3.1. Polimer kaplamalı deney numunelerinin mikroskop ile çekilen görüntüleri.....	93
Şekil E3.2. Kaplamasız deney numunelerinin mikroskop ile çekilen görüntüleri.	93

RESİMLER DİZİNİ

Resim	Sayfa
Resim 3.1. Derin çekme deney düzeneği	34
Resim 3.2. Pres kontrol ekranı	37
Resim 3.3. Daldırma yöntemi için kullanılacak polimer karışım seçenekleri	40
Resim 3.4. Başarısız olunan farklı yöntemler ve polimer kaplama örnekleri	40
Resim 3.5. Deneyde kullanılan elektrostatik toz kaplama makinası	42
Resim 3.6. Polimer kaplanmış numune örnekleri.....	42
Resim 3.7. Pürüzlülük ölçümü	43
Resim 3.8. Deney numunelerinden örnekler	45
Resim 3.9. Derin çekme aşamaları	45
Resim 3.10. Kaplamasız derin çekilmiş deney numuneleri	47
Resim 3.11. Farklı ilkel çap ve baskı plaka basıncı uygulanmış numuneler	47
Resim 3.12. Polimer kaplamalı derin çekilmiş deney numuneleri	49
Resim 3.13. Aynı parametrelerde (150 mm, 130 bar ve 3 mm/s) çekilmiş polimer kaplamalı (a) ve kaplamasız (b) numunelerin derin çekilmiş görüntüleri	58
Resim 3.14. Polimer kaplamalı çelik sacların derin çekilmesinde karşılaşılan hatalar.....	72
Resim 3.15. Kalınlık ölçümleri için kesit alınmış numuneler	72
Resim 3.16. Derin çekilmiş ürünlerin farklı ölçüm yöntemleri ile kalınlık ölçümleri	73
Resim 3.17. Kalınlık ölçümü yapılan deney parçalarında ölçüm noktaları	73
Resim 3.18. Derin çekme öncesi numunelerin kaplama kalınlıklarının ölçümü	75
Resim 3.19. Poliüretan kaplamalı derin çekme numunelerin görünümü	76
Resim 3.20. Aynı şartlarda derin çekilmiş kaplamasız, epoksi kaplamalı ve polyester kaplamalı numunelerin görünümü	78

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

c	Zımba ve matris arasındaki boşluk
d	Zımba çapı
D	Sac daire çapı
F_D	Derin çekme kuvveti
F_Z	Zımba kuvveti
F_T	Yırtma kuvveti
F_{BP}	Baskı Plakası kuvveti
P_{BP}	Baskı plakası basıncı
l	Deneyden sonra son boy
l_0	Deney parçasının ilk boyu
r	Redüksiyon oranı
r_m	Matris kenar yarıçapı
r_{st}	Zımba kenar yarıçapı
t	Sac parçası kalınlığı
w	Deneyden sonra son en
w_0	Deney parçasının ilk eni
σ_{ak}	Akma dayanımı
$\sigma_{\check{c}}$	Çekme dayanımı

Kısaltmalar

PET	Polietilen tereftalat
PVC	Polivinil klorür
PVDF	Polivinil florür
PP	Polipropilen
LDR	Derin çekme sınırı

1.GİRİŞ

Günlük yaşantımızda kullandığımız ürünler değişik imalat yöntemleri ile üretilmektedir. Bazı ürünler birden çok imalat yönteminden geçerek son şeklini almaktadır. Kalıpcılık teknolojisi de, sanayide kullanılan plastik şekil verme yöntemlerinden biridir. Sac malzemeler kesme, bükme ve çekme yoluyla kalıplar kullanılarak şekillendirilmektedir. Bunlardan derin çekme kalıpcılığı başta beyaz eşya ve otomotiv olmak üzere birçok endüstride yoğun olarak kullanılmaktadır. Bu yöntemde sac malzemeyi alttan destekleyen bir kalıp, sacı kalıp içerisine doğru akmaya zorlayan ve bu esnada ona şeklini veren bir zımba ve bu akışı kontrol eden bir baskı plakası kullanılmaktadır. Derin çekme kalıpcılığı sayesinde özdeş ve dikişsiz, farklı geometrilere kaplar imal etmek mümkündür. Otomotiv parçaları, yapı malzemeleri, sağlık ekipmanları, paketleme ürünleri, parfüm kutuları ve birçok mutfak eşyası bu imalat yöntemi ile üretilmektedir.

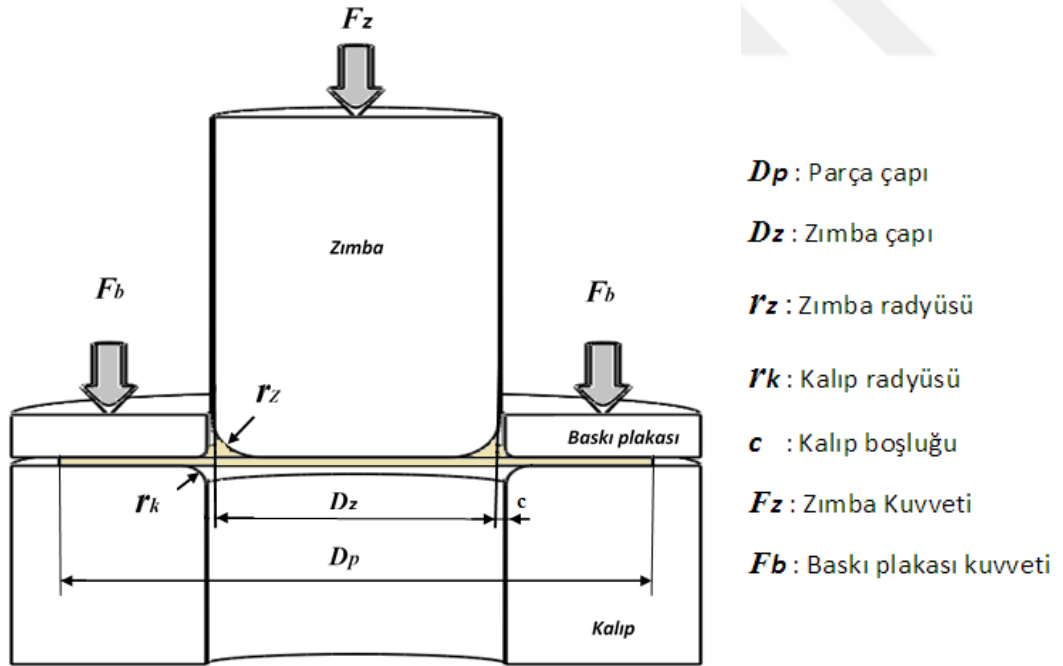
Hızlı ve ekonomik yaklaşım tarzının hemen her alanda egemen olduğu günümüzde, seri üretimde kullanılmakta olan yöntemlere genel olarak bakıldığında malzeme kaybını minimize etmesinden ve hızlı bir imalat yöntemi olmasından dolayı derin çekmenin, talaşlı imalata nazaran oldukça avantajlı olduğu söylenebilir. Derin çekme işlemi büyük miktarda plastik deformasyonun gerçekleştiği; malzeme anizotropisi, parça geometrisi, malzemenin kimyasal bileşimi, ortam koşulları, zımba hızı ve etkin basınç başta olmak üzere pek çok parametrenin etkin olduğu ve buna bağlı olarak matematiksel analizin son derece zor olduğu bir imalat yöntemidir. Bu parametrelerin yanlış seçilmesine bağlı olarak üründe kulaklanma, yırtılma, kırılma ve çizilme gibi kusurlar ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle, işlem sonucunda elde edilecek ürünün istenilen kalitede olması için analiz süreci iyi planlanmalı ve söz konusu hataların önlenmesi amacıyla derin çekme işlemini etkileyen malzeme, ortam ve işlem parametreleri uygun seçilmelidir. Bu çalışmada polimer kaplamalı çelik sacların derin çekme işleminde derin çekme oranı, baskı plakası basıncı, çekme hızı ve sürtünme şartlarının şekillendirilebilirlik üzerindeki etkileri incelenerek şekillendirilebilirliğin ve ürün kalitesinin en yüksek olduğu şartların belirlenmesi hedeflenmiştir.

2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Derin Çekme İşlemi

Madeni düz pulların veya plakaların çekme kalıbı denilen düzeneklerle zımba kuvveti ile çökertilerek istenilen derinlik ve profillerde kap şekline getirilmesi işlemine çekme adı verilmektedir (Güneş, 2002).

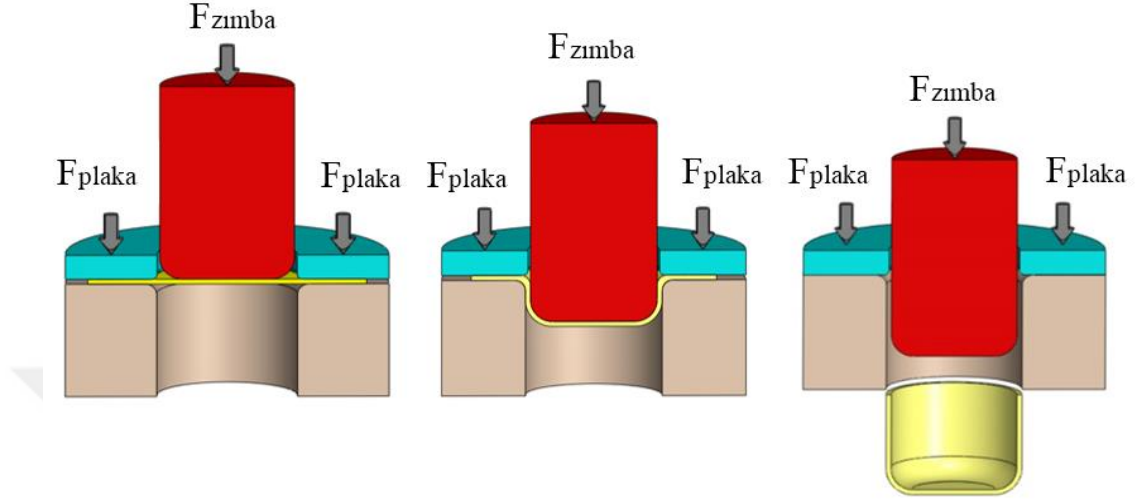
Derin çekme bir sac metal şekillendirme işlemi olup genellikle silindirik, kare prizma veya dikdörtgen prizma kap şekillerin veya daha konkav parçaların imalatında kullanılan bir yöntemdir. Derin çekme, Şekil 2.1'de görüldüğü üzere zımba ile sacın matris boşluğuna doğru itilerek akmasının sağlanması işlemidir. Sac genellikle aşağıya doğru baskı plakası (pot çemberi veya sac tutucu) tarafından basılarak sıkıştırılır. Bu işlemle yaygın üretilen parçalar içecek kutuları, mermilikler, lavabolar, yemek tencereleri ve otomobil kaporta panelleridir (Groover, 2016).



Şekil 2.1. Derin çekme

Derin çekme işlemi, ilkel sacın matris üzerine yerleştirilmesi, sonrasında baskı plakasının belirli bir basınçta sacı gerdirmesi ve zımbanın ise gerekli zımba kuvveti

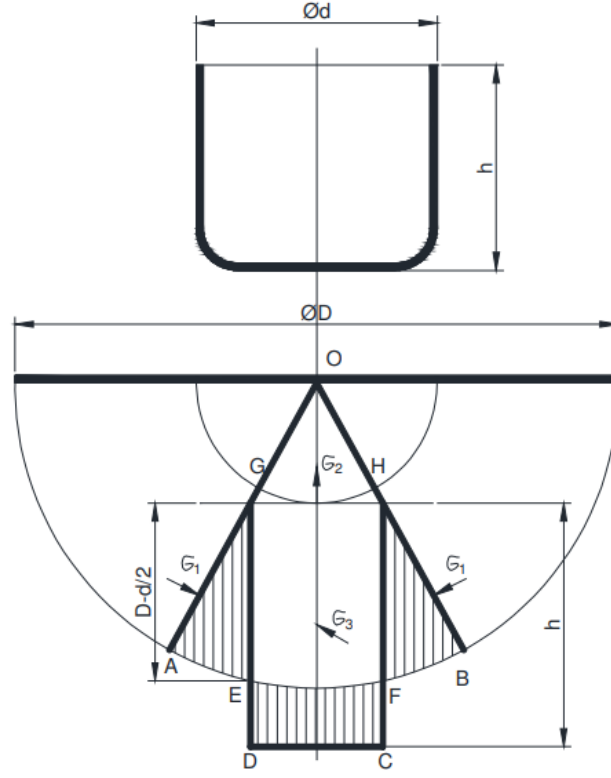
ile ilerleyerek, saca matris ve zımba arasında istenen şekli verene kadar devam etmesinden oluşur. Bu işlem sırası Şekil 2.2’de görülmektedir.



Şekil 2.2. Derin çekmede işlem adımları

2.2. Derin Çekme Mekanîği

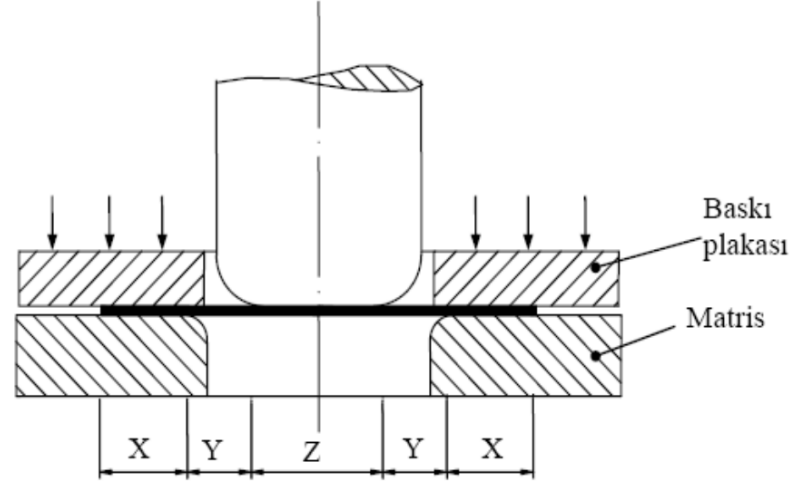
Metal sacların, içi boş, dikişsiz kap veya değişik parçaların elde edilmesi işleminde kullanılan derin çekmede çekilecek parçanın ölçülerine göre ilkel sac çapı belirlendikten sonra bu başlangıç sacının hangi kademelerden geçerek istenilen ölçülerde parçaya dönüştürüleceği kararlaştırılır. Şekil 2.3’te D çaplı ilkel pulun d çapında ve h yüksekliğinde bir kap şekline dönüştürülmesi görülmektedir.



Şekil 2.1. Silindirik çekme işleminin oluşumu (Koçar, 2014)

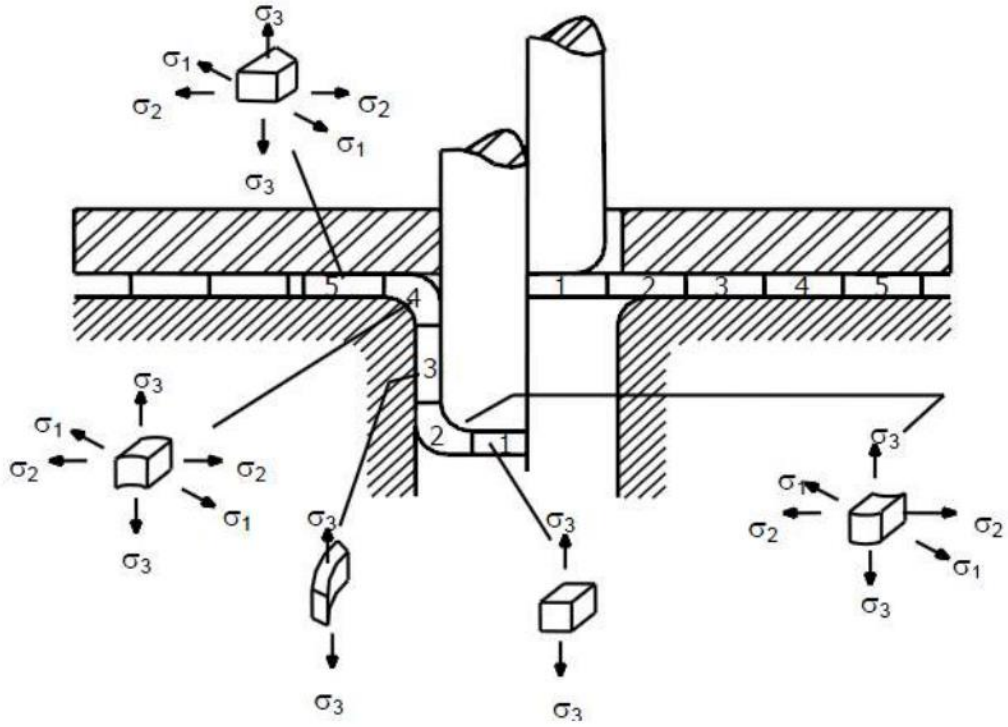
İlkel sacın OAB dilimi çekme sonrası OCD şekline dönüşmektedir. Silindirik parça tabanını oluşturan OGH bölgesi değişmediğinden ilkel sacın GHBA kısmı yanlara doğru sıkışmış ve boyu da uzayarak GHCD bölgesini oluşturmuştur. Kısaca GAE ve HBF dilimleri çekme sonunda EFCD kısmına dönüşmüştür. Bu şekil değişikliği malzemenin çeşitli bölgelerinde farklı gerilmeler ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Bu gerilmelerin belirlenmesi karmaşık bir plastisite problemidir (Koçar, 2014).

Derin çekme işlemine tabi tutulan dairesel bir metal sac levha, işlemde kullanılan kalıplarla temas halinde olduğu bölgelerine göre, üç ana kısımda incelenebilir. Bu bölgeler X, Y ve Z olarak gösterilebilir.



Şekil 2.4. Çekme başlangıcında iş parçasının durumu, baskı plakası, zımba ve matris (Alparslan, 2008, Demiray, 2006)

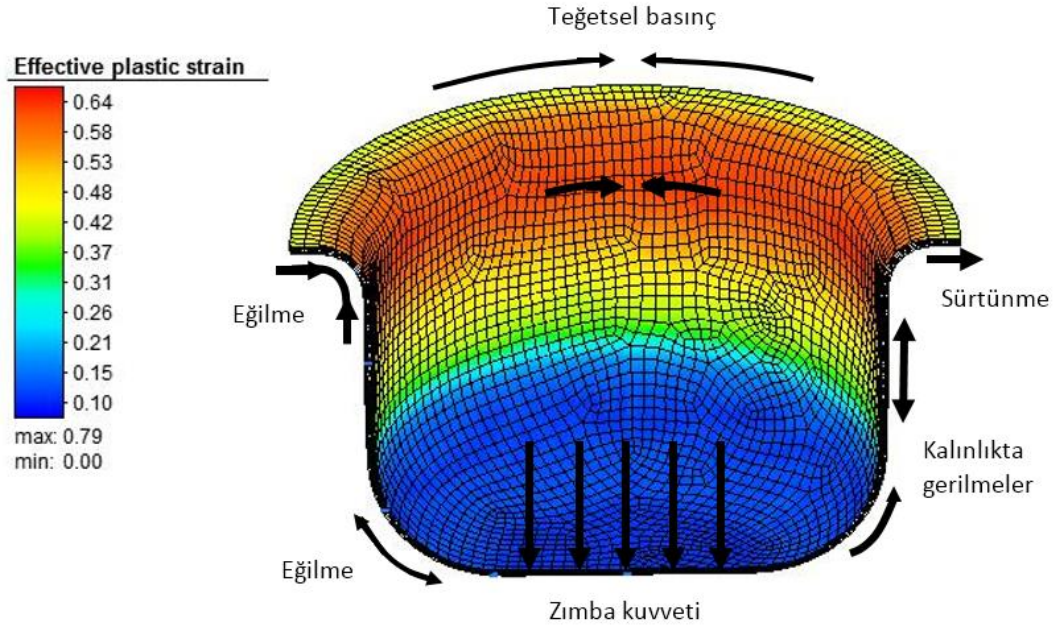
Yukarıda, Şekil 2.4'te, X olarak belirtilen halka biçimli bölge matrisle, Z bölgesi zımba alt yüzeyi ile temas halindedir. Y bölgesi işlem başlangıcında zımbaya da, kalıba da temas etmemektedir. Çekme esnasında X bölgesi, zımba kuvveti etkisi ile radyal çekme gerilmesi sonucunda matris boşluğuna doğru itilir. Derin çekme işleminde malzemenin baskı plakası ile temas halinde olduğu yüzeyde basma gerilmesi oluşur ve matrisin yuvarlatma yarıçapı kısmında malzeme şekillenirken Y bölgesinde incelme yani metal akışı meydana gelir. Malzemenin, içinden geçmeye zorlandığı matris boşluğu çapı, halkanın başlangıç çapından küçük olduğu için bu bölgede basma gerilmeleri ve buna bağlı malzeme yığılmaları oluşur. Radyal çekme sonucunda sac levha ilerledikçe levhanın dış kısmına doğru kalınlaşma gerçekleşir. Böylece X bölgesinin bitiminde iş parçasında boyun oluşumu meydana gelmektedir. Z bölgesinde ise şekil değişimi olmamaktadır (Alparslan, 2008).



Şekil 2.5. Derin çekme sırasında oluşan gerilmeler (Güneş, 2002).

Sacın ilk çapı ile zımba çapı arasındaki oranı ifade eden çekme oranı büyüdükçe sacı plastik deformasyona uğratmak için gerekli zımba kuvveti büyümektedir. Zımba kuvvetinin artması derin çekme esnasında oluşan gerilmelerin büyümesine yol açmaktadır. Bu nedenle derin çekme esnasında oluşan bu büyük gerilmelere mukavemet gösteremeyen iş parçasında yırtılmalar meydana gelmekte ve işlem sonunda kalınlık değişim oranındaki artış nedeniyle yırtılmanın yanında çizilme de meydana gelebilmektedir. Bu sorunları engelleyebilmek için çekme oranı (β), malzeme özellikleri ve geometri göz önünde bulundurularak doğru belirlenmelidir (Güneş, 2002).

Derin çekme işlemi sırasında çekme sacına farklı kuvvetler etki etmektedir. Bu etkiler Şekil 2.6'da görülmektedir.



Şekil 2.6. Temsili derin çekme işleminde parçaya etki eden kuvvetler

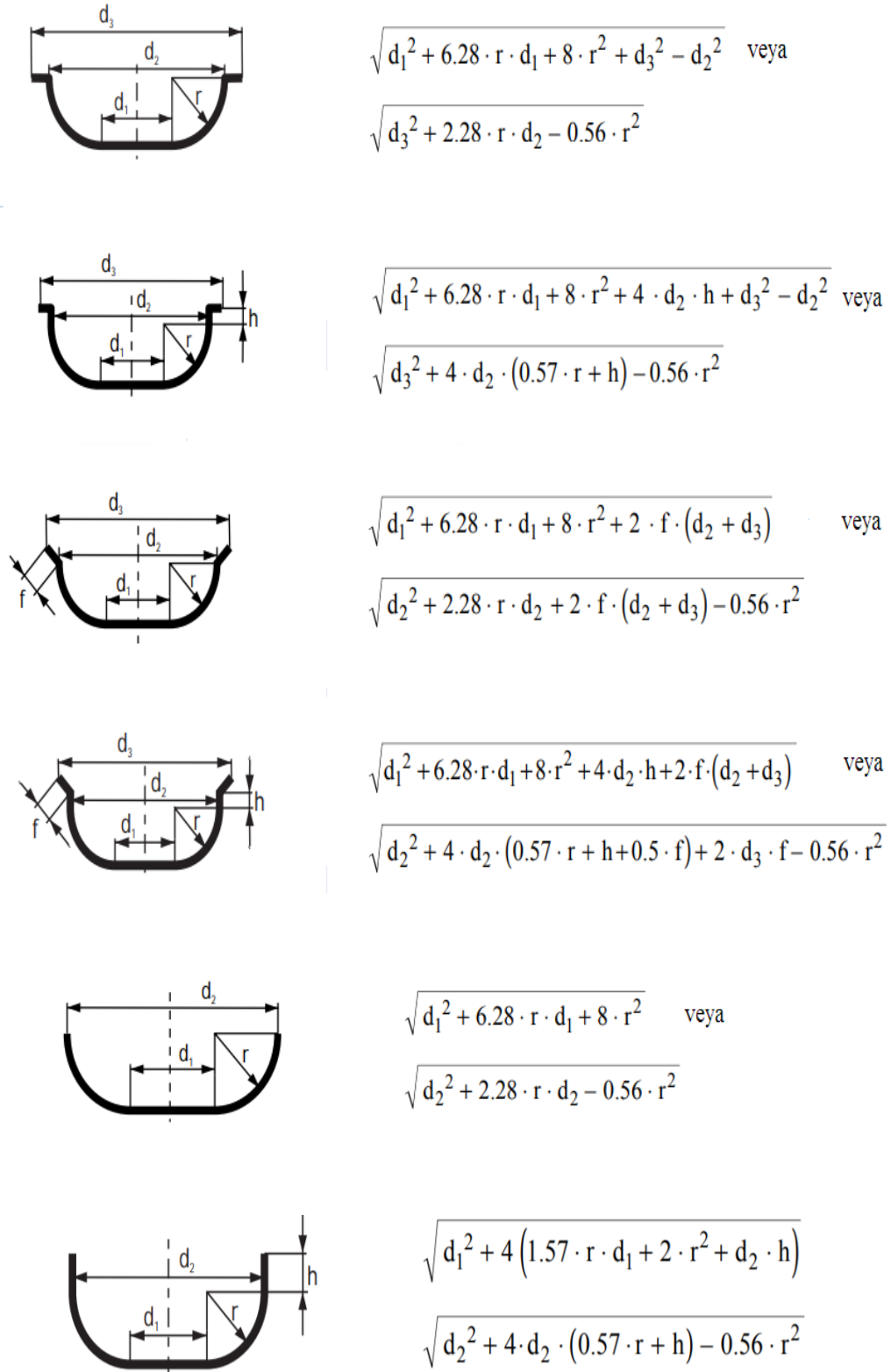
2.3. Derin Çekme Mühendislik Hesaplamaları

2.3.1. Başlangıç Sac Çapının Hesaplanması

Derin çekme işlemlerinde ilk olarak çekilecek malzemenin çapı hesaplanır. Genel kural olarak ilkel sacın hacmi (S) ile derin çekme işlemi sonunda elde edilen parçanın hacmi (S_1) ve alanları birbirine eşittir. Ayrıca işlem öncesi ve sonrası malzeme yoğunluklarında da bir değişiklik olmamaktadır.

Alan eşitlik ilkesinden yararlanarak çekme başlangıç çapı (D);

$$S_1 = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 = S \quad \text{bağıntısından} \quad D = \sqrt{\frac{4S}{\pi}} \quad \text{elde edilir.} \quad (2.1)$$



Şekil 2.7. Farklı parça şekilleri için çap değerlerinin hesaplanması (Schuler, 1998)

2.3.2. Derin Çekme Oranı

Derin çekme oranı, başlangıç çapının (D), zımba çapına (d) oranıdır;

$$DR = D / d \quad (2.3)$$

Limit derin çekme oranı (LDR) ise, çekme kusurları olmadan ideal şekilde çekilebilen en büyük ilkel iş parçası çapının, tasarlanan kalıptaki zımba çapına oranıdır. Bu değer malzemelerin derin çekme ile şekillendirilebilirliğin bir ifadesidir. Malzemede oluşabilecek yırtılma öncesinde, en fazla hangi çekme oranına kadar çekilebileceğini gösterir (Groover, 2016).

$$LDR = D_{\max} / d \quad (2.4)$$

2.3.3. Baskı Plakası Kuvveti

Derin çekme işlemi sırasında başlangıç çapının (D) küçülmesinde etkili olan teğetsel gerilmeler Şekil 2.6'da görülmektedir. Bu kuvvetler parçanın matris boşluğu dışında kalan kısımlarını buruşmaya zorlar. Özellikle çekilen malzemenin kalınlığı çapına göre ince ise bu gerilmeler etkisiyle hızla buruşma meydana gelir ve çekme işlemi başarısız olur. Malzemenin çekme esnasında buruşmaması için baskı plakası denilen ek bir düzener ile kalıp yüzeyine bastırılması gerekir. Fakat bu baskı plakası kuvveti malzemeyi ilave bir basınç ile kalıba bastırılarak zorladığından zımba kuvvetini arttırır. Kalıbın çekme kesitinde gerilmelerin artması ise yırtılmaya neden olur. Bu bakımdan baskı plakası kuvvetinin buruşmayı önleyecek en az değer ile uygulanması gerekir. Baskı plakası kuvveti, baskı yüzey alanı ile bu yüzeye uygulanan basıncın çarpılması ile belirlenir. Malzemenin gerilmeler etkisiyle buruşma ya da yırtılma olmadan çekilebilmesini sağlayan yüzey basıncının teorik hesabı uzun ve karmaşık bir plastisite problemidir.

Baskı plakası basıncı (P_{BP}) için aşağıdaki formül önerilmektedir.

$$P_{BP} = c[(\beta - 1)^2 + 0,5 \frac{d}{100t}] \sigma_c \quad (\text{Koçar, 2014}) \quad (2.5)$$

Bu bağıntıda; c , genellikle 0,2 ile 0,3 arasında değerler alan bir işlem parametresi [-]; β , derin çekme oranı [-]; d , zımba çapı [mm]; t , sac kalınlığı [mm] ve σ_c , sac malzemenin çekme dayanımıdır [MPa].

Baskı plakası kuvvetinin hesaplanmasında kullanılan yüzey basınçları çekmenin başladığı ana aittir. Sabit baskı plakası kuvveti uygulayabilmek için, çekme işlemi ilerledikçe parçanın flanş çapı devamlı küçüldüğünden başlangıçtaki yüzey basıncı flanş çapının küçülmesiyle orantılı olarak artmaktadır, bu da aşağıdaki formüle göre hesaplanabilir.

$$P_{BP} = \frac{D^2 - (d + 2r_m)^2}{D_f^2 - (d + 2r_m)^2} \quad (\text{Koçar, 2014}) \quad (2.6)$$

Burada; D , ilkel çap [mm]; D_f , flanş çapı [mm]; d , zımba çapı [mm]; r_m , matris yuvarlatma yarıçapıdır [mm]. Uygun baskı plakası basıncının belirlenmesi, parçanın istenilen yüksekliğe kadar sorunsuz derin çekilmesini sağlar. Baskı plakası basıncı iş parçası malzemesinin akma dayanımına ve sac/ürün geometrisine bağlı olarak farklı analitik ve deneysel formüllerle yaklaşık olarak hesaplanabilmekle birlikte malzemenin pekleşme davranışı, birim şekil değişim hızına duyarlılığı gibi özelliklerinden önemli ölçüde etkilendiğinden önerilen bağıntılar arasında bariz farklar ortaya çıkmaktadır (Volk ve ark, 2011). Derin çekme işleminde kırışıklıkları önlemek için sac malzeme üzerine uygulanması gereken basıncı sağlayan baskı plakası kuvvetinin (F_{bh}) uygun değerini belirlemek için literatürde çeşitli analitik ve deneysel bağıntılar önerilmiştir.

$$F_{BP} = 0.015 \sigma_{ak} \cdot \pi [D^2 - (d + 2.2t + 2r_m)^2] / 4 \quad (\text{Groover, 2016}) \quad (2.7)$$

Bu bağıntıda; F_{BP} , baskı plakası kuvveti [kN]; σ_{ak} , sac malzemenin çekme dayanımı [MPa]; d , zımba çapı [mm]; t , sac kalınlığı [mm] ve r_m ise matris yuvarlatma yarıçapıdır [mm].

$$F_{BP} = \frac{F_D}{3} \quad (\text{Groover, 2016}) \quad (2.8)$$

Bu bağıntıda; F_D , derin çekme kuvvetidir [kN].

$$F_{BP} = \left[(\beta - 1)^2 + \frac{D}{200t} \right] \frac{\sigma_{\xi}}{400} A \quad (\text{Tschaetsch, 2006}) \quad (2.9)$$

Bu bağıntıda; A , baskı plakasının sac ile temas eden yüzeyinin alanıdır [mm²].

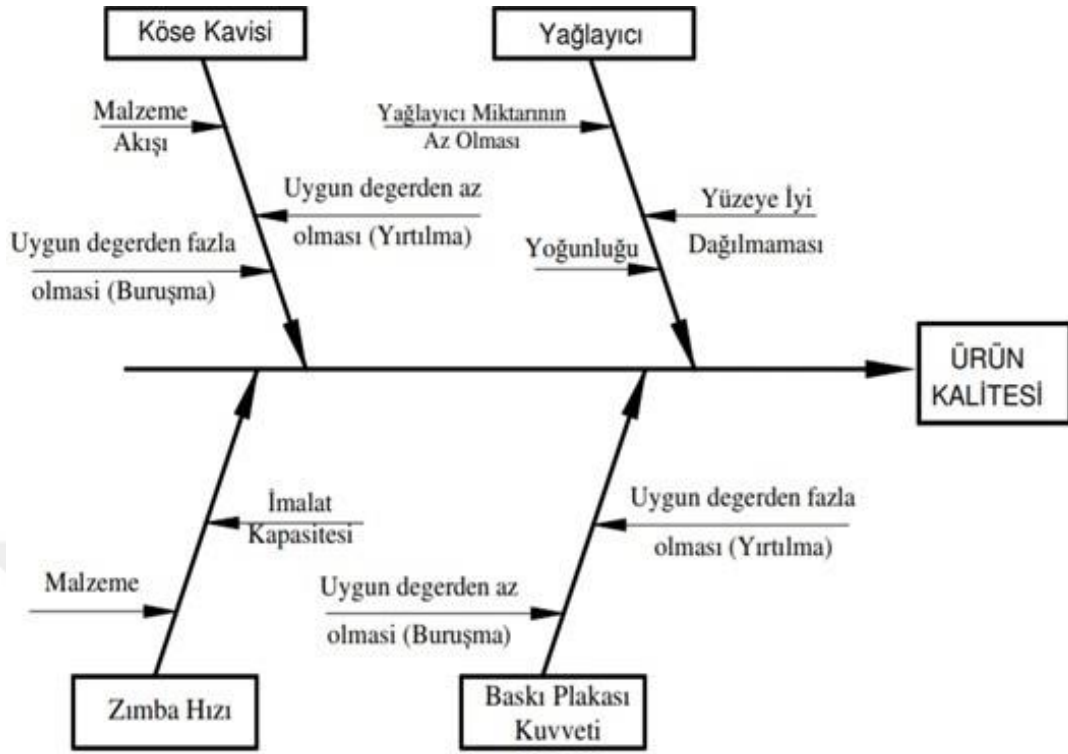
$$F_{BP} = \left[(\beta - 1)^2 + \frac{D}{200t} \right] \frac{\sigma_{\xi}}{500} A \quad (\text{Volk ve ark, 2011}) \quad (2.10)$$

2.3.4. Kalınlık ve çap oranı

Derin çekme işlemi öncesi, sac kalınlığının ilkel çapa oranının (t/D) %1'den fazla olması tavsiye edilir. t/D oranı azaldıkça derin çekme ürünüde kırışma eğilimi artmaktadır (Groover, 2016).

2.4. Derin Çekme Kabiliyetini Etkileyen Faktörler

Derin çekme işlemini ürün kalitesini etkileyen birçok parametre olmakla beraber zımba hızı, matris yuvarlatma yarıçapı, baskı plakası kuvveti ve yağlama durumu parametrelerinin doğrudan etkili olduğu bilinmektedir. Bu parametreler uygun seçilmediğinde derin çekme işleminde en çok karşılaşılan kusurlar olan buruşma ve yırtılma meydana gelmektedir. Şekil 2.8'deki balık kılıçığı diyagramında ürün kalitesini etkileyen bu dört ana parametrenin ürünü nasıl etkilediği görülmektedir.



Şekil 2.8. Balık kılıçığı yöntemiyle derin çekmeyi etkileyen işlem parametreleri (Koçar, 2014)

2.4.1. Derin Çekme Değişkenleri

2.4.1.1. Kalıp Tasarımı

Derin çekme işlemi için en fazla çekme yüksekliği elde edilebilen, yırtılma ve kırışma gibi kusurlar oluşmadan ve ürünün taban yuvarlatma yarıçapında aşırı incelme olmadan, düşük kuvvetle derin çekmeyi sağlayabilecek net bir matris yuvarlatma yarıçapı hesabı bulunmamaktadır.

Derin çekmede büyük önemi olan zımba yuvarlatma yarıçapı için de kesin bir kural yoktur. Küçük zımba yuvarlatma yarıçaplarında cidar zayıflama etkisi görülmekte ve parça çevresinde çizgi şeklinde izler meydana gelir. Genel olarak zımba yuvarlatma yarıçapının matris yuvarlatma yarıçapından daha küçük olması gerektiği bilinmektedir. Zımba yuvarlatma çapları için genel kural (3~8)t'dir. Kalıp ve zımba yuvarlatma yarıçapları arasında aşağıda görülen bağıntılar kurulabilir (Ulu, 2008).

$100(t/D) > 0,6$ durumunda	$r_z = r_m$
$100(t/D) = 0,6 \sim 0,3$ durumunda	$r_z = 1,5r_m$
$100(t/D) < 0,3$ durumunda	$r_z = 2r_m$

2.4.1.2. Baskı Plakası Basıncı

Baskı plakası için gerekli basınç, derin çekmede meydana gelebilecek kırılma ve dalgalanmaları önlemek için önemlidir. Bu basınç çeşitli formüllerle hesaplanabilse de, gerçek durum için en uygun değer kalıp denemeleri ile belirlenmesi önerilir. Bunun için baskı plakası basıncı ayarlanabilen bir düzenek kurulmalıdır. Silindirik parçalarda baskı plakası basıncı düzenlidir. Çünkü malzemenin akışı her noktada aynıdır. Fakat karmaşık parça geometrileri için farklı düzenlemeler gerekmektedir (Cerit, 2000).

2.4.1.3. Çekme Hızı

Çekme hızı, genellikle deneysel çalışmalar ile belirlenmektedir. Çekme işleminde, malzemeye şekil değiştirmesi için yeterli zaman verilmelidir. Aksi halde sac malzeme üzerinde yırtılmalar oluşabilmektedir (Koçar, 2014). Genelde çekme hızı çekilecek sacın malzemesine, kalınlığına, sürtünmeye ve işlem parametrelerine bağlı olarak seçilir.

Çizelge 2.1. Çekme hızları [mm/dak]

Malzeme	Tek Etkili	Çift Etkili
Alüminyum	175	100
Pirinç	200	100
Bakır	150	85
Çelik	55	35~55
Çinko	150	40

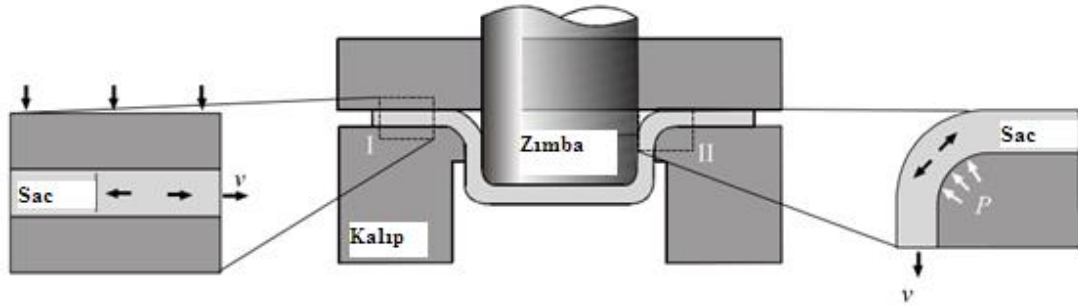
Çekme hızı değerinin tespiti, aşağıdaki formül yardımıyla hesaplanabilmektedir.

$$v = 33,3 \left(1 + \frac{d}{D} \sqrt{D-d} \right) [mm / dak] \quad (2.11)$$

Mekanik preslere göre hidrolik preslerde, piston hızı kurs boyunca sabit tutulabildiği için, kurs boyunca sabit kuvvet uygulamak da mümkün olmaktadır (Koçar, 2014).

2.4.1.4. Sürtünme ve Yağlama Etkisi

Plastik deformasyonu gerçekleştirecek cihazda, kalıplar ile iş parçası arasındaki sürtünme, aşınma ve güç kaybına sebep olur. Ayrıca malzemenin deformasyon kabiliyeti, sürtünmeden olumsuz yönde etkilenir. Sürtünmeyi en aza indirmek için yağlama yapmak gerekir. Yağlayıcı maddeler fiziksel durumlarına göre katı, yarı katı, sıvı ve gaz yağlayıcılar olarak dört sınıfta gruplandırılabilir. Yağlayıcıların seçiminde çalışma şartları ve yağ kalitesi önemlidir (Gürün, 2008).



Şekil 2.9. Derin çekme işlemi ve temas yüzeyleri (Carlsson, 2005)

Şekil 2.9’da parça, matris, zimba ve baskı plakası ile aralarındaki sürtünme yüzeyleri görülmektedir. Bu temas yüzeylerindeki sürtünmeler çekme işleminin verimliliğini önemli ölçüde etkilemektedir.

2.4.2. Malzeme Özellikleri ve Kalıp Geometrisinin Etkisi

Derin çekmeyi etkileyen faktörler birkaç yönden ele alınabilir. Bunlar; çekme işleminde kullanılan malzemenin özellikleri, kalıp geometrisi ve işlem koşullarıdır. Bu faktörler aslında birebir ilişkilidir (Demirci, 2002).

2.4.2.1. Sac Kalınlığı

Malzemenin kalın olması derin çekme oranını artırır. Çünkü daha fazla çekme derinliği ve daha fazla kalınlık incelmeye imkân verir. Malzemenin tane yapısının ince olması, tek fazlı olması ve metalik olmayan kalıntılardan arındırılmış olması derin çekmeye olumlu etki yapar (Demirci, 2002).

2.4.2.2. Deformasyon Hızı Duyarlılık Faktörü

Sac malzemelerin davranışları deformasyon hızı değişiminden etkilenmektedir. Artan deformasyon hızı ile malzemenin akma ve çekme dayanımı artırmaktadır. Deformasyon hızı arttıkça sacın etek kısımlarında kalınlaşma meydana gelmekte, deformasyonun olduğu üst bölgelerde incelmeye meydana gelmektedir. (Çavuşoğlu, 2014).

Sıcak işlem koşullarında, malzemedeki deformasyon sertleşmesi olmadığından, deformasyon sabit gerilme altında gerçekleşir. Yüksek sıcaklıklarda deformasyon hızının etkisi çok fazladır. Deformasyon hızının dayanım üzerindeki etkisi;

$$\sigma = C\varepsilon^m \quad (2.12)$$

bağıntısı ile ifade edilmektedir (Gürün, 2008).

Bu bağıntıda; σ gerilmeyi [N/mm^2]; C, deformasyon hızına bağlı bir malzeme dayanım katsayısını [N/mm^2]; ε , gerçek birim şekil değişimini [-] ve m ise deformasyon hızı duyarlılık faktörünü ifade eder.

Deformasyon hızı duyarlılığı, şekil değiştirmenin hızı ile oluşan akma gerilmesindeki artış olarak belirtilir. Deformasyon hızı duyarlılık üstelinin (m) büyük değerleri malzemenin boyun verme olarak da bilinen kararlı olmayan şekil değişme olayının gecikmesini sağlamaktadır. Bu değer büyük olması malzemenin iyi şekillendirilebilir olduğunun önemli bir göstergesidir (Çetin, 2007).

2.4.2.3. Akma ve Çekme Gerilmesi

Bir malzemenin bütün bölgelerinde, her yerde aynı ve sabit şekil değişimine ulaşabilmek için üst akma sınırı aşılmalıdır. Bu nedenle, metal sac şekillendirme uygulamalarında malzemenin belirgin olarak akması istenmez.

Bir malzemenin, çatlama ya da aşırı incelmeden dayanabileceği deformasyon miktarı o malzemenin şekillendirilebilirlik özelliğini gösterir. Şekillendirilebilirlik ve ürün kalitesi üzerinde doğrudan ya da dolaylı olarak etkisi olan malzeme özelliklerinin belirlenebilmesi için en çok kullanılan yöntem, tek eksenli çekme testidir. Tek eksenli çekme testiyle kopma ve akma mukavemeti, elastiklik modülü, yüzde uzama ve alan daralması, pekleşme (deformasyon sertleşmesi) üsteli, deformasyon hızı duyarlılık üsteli gibi malzeme özellikleri elde edilebilir (Koçar, 2014).

Çekme gerilmesi ya da maksimum gerilme malzemenin boyun vermeden önce ulaşabileceği gerilme değerini gösterir. Bu noktada ($dF=0$) plastik kararsızlık başlar ve incelme belli bir bölgede toplanarak kopma gerçekleşir. Akma gerilmesi ve çekme gerilmesi şekillendirilebilirlikle doğrudan ilgili değildir. Ancak bu ikisinin arası ne kadar yakınsa malzeme o kadar serttir. Şekillendirilebilirlikte diğer bir kıstas, toplam uzama ve kesit daralmasıdır. Toplam uzama kırılma anındaki tek eksenli şekil değişiminin miktarıdır. Kopma uzaması hem elastik hem de plastik deformasyonu içine alır ve genellikle kopmadaki yüzde olarak ifade edilir.

2.4.2.4. Pekleşme Üsteli

Metal sacın etki eden gerilmenin artışı ile elastik olmayan şekil değişimi esnasındaki sertleşme, soğuk şekillendirilebilirliğini etkileyen bir malzeme özelliğidir. Bölgesel plastik şekil değişimine maruz kalan bir malzemede, pekleşme ile dayanım artacağından, burada şekil değişimi duraklar ve komşu diğer bölgelerde plastik şekil değişimi oluşmaya başlar. Pekleşmeden dolayı daha düzgün şekil değişimi oluşarak, malzeme daha uzun sürede hasara uğramaktadır. Pekleşme, deformasyon esnasında dislokasyon fazlalığı ve artış gösteren çizgisel kusurların birbirleri ya da başka engeller ile etkileşmesi ile belirtilmektedir. Çekme deneylerinde malzeme en büyük kuvvete kadar düzgün bir şekilde şekil değiştirir. Bu şekil değişimi, sacın pekleşmesinin bir ölçüsüdür. Başka bir ölçü ise pekleşme üstelidir. Çekme deneyi ile elde edilen akma eğrisinde oluşan plastik şekil değişimi ile gerilme arasındaki ilişki, Holloman bağıntısı olarak belirtilen;

$$\sigma = K \varepsilon^n \quad (2.13)$$

denklemleri ile gösterilmektedir. Bu bağıntıda; K, deformasyon miktarına bağlı bir malzeme dayanım katsayısını $[N/mm^2]$ ifade eder. Bu eğriye göre logaritmik $\sigma - \varepsilon$ diyagramında doğrudaki eğim pekleşme üsteli olarak belirlenmektedir. Pekleşme üsteli değerini fazlaştıran mikroyapısal özellikler, metalin şekil değiştirmesinin homojen dağılmasıyla daha yüksek sınır şekil değişimleri sağlar, bu da sacın şekillendirilebilirliğini iyileştirmiş olur. Yeniden kristalleşen yapılar malzemenin dayanımını düşürür ve pekleşme kapasitesini ifade ederler (Koçar, 2014, Safaeirad ve ark, 2008).

2.4.2.5. Plastik Anizotropi

Metallerin çekme özelliklerinin çoğunlukla bütün yönlerde aynı olmadığını bilinmektedir. Bu şekilde malzeme özelliklerinin yöne bağlı olarak değişmesine anizotropi denilir (Şener, 2012). Sac düzlemi içerisinde özelliklerin değişimi düzlemsel anizotropi, normal yönde özelliklerin değişimi ise normal anizotropi

(plastik veya dikey anizotropi) olarak adlandırılır. Plastik anizotropi (r), bir sacın düzlemi üzerinde çekme veya basma kuvvetlerine maruz kaldığı zaman incelmeye karşı koyma yeteneğini gösteren bir parametredir. İncelmeye karşı olan bu direnç derin çekmede düzgün şekil alabilmeye katkı sağlamaktadır. Bu nedenle ' r ' değeri sac metalin derin çekilebilirliğinin bir ölçüsü olarak göz önüne alınır (Çetin, 2015).

2.4.2.6. Elastiklik Modülü

Elastiklik modülü malzemenin elastik özelliğini gösteren en etkili faktördür. Elastiklik modülü, akma dayanımı ile beraber geri yaylanma probleminin olduğu bükme işlemlerinde önemli bir etkidir. Geri yaylanmayı kontrol eden mekanizma elastik şekil değişimidir. Bundan dolayı artan elastik şekil değişimi miktarı ile geri yaylanma da artacaktır (Erdoğan, 2017).

2.4.2.7. Matris Boşluğu

Derin çekme işleminde zımba ile kalıp arasında kalan boşluk matris boşluğu ile ifade edilmektedir. Bu boşluk verilirken sac kalınlığı ve parça üst kısmındaki kalınlaşma dikkate alınmalıdır. Boşluk az verildiğinde malzeme cidarında incelmeler oluşmakta ve zımba kuvveti artarak yırtılmalara sebep olmaktadır. Gereğinden fazla matris boşluğu verilmesi ise kırışıklıklar oluşturmaktadır. Bu durumda ise istenen parça çapı elde edilemeyecektir. Çeşitli malzemeler için uygulanacak çekme boşlukları aşağıda görülmektedir (Gürün, 2008, Güneş, 2002).

$$\text{Çelik saclar için} \quad c = t + 0,07\sqrt{10t} \text{ [mm]} \quad (2.14)$$

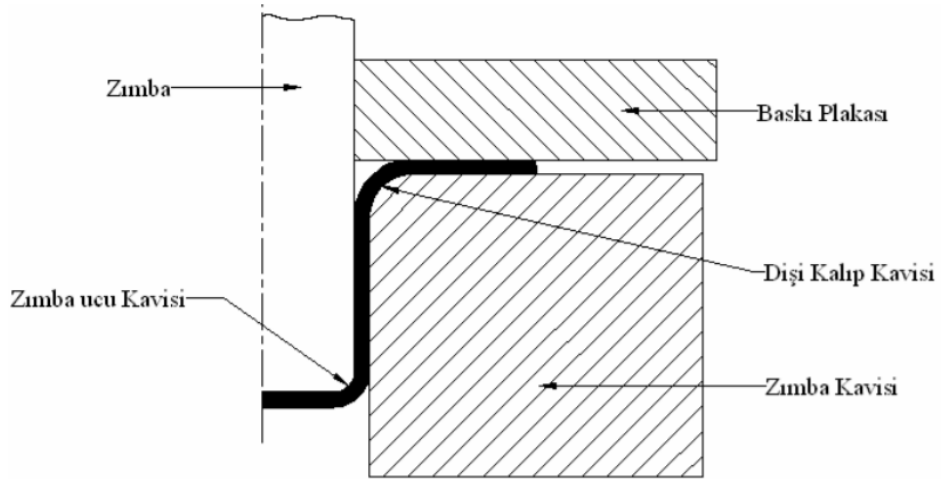
$$\text{Alüminyum için} \quad c = t + 0,02\sqrt{10t} \text{ [mm]} \quad (2.15)$$

$$\text{Demir olmayan metaller için} \quad c = t + 0,04\sqrt{10t} \text{ [mm]} \quad (2.16)$$

2.4.2.8. Zimba ve Matris Yuvarlatma Yarıçapı

Çekilen sacın işlem sırasında kalıp içerisinde akışını kolaylaştırmak amacıyla zimba ve matris yuvarlatma yarıçaplarının mümkün olduğu kadar büyük tutulması gerekmektedir. Ancak, gereğinden büyük tutulmuş zimba ve matris yuvarlatma yarıçaplarının, baskı plakası etki yüzeyi küçüleceğinden, sac malzemenin takım ile temas etmeyen yüzeyi büyümekte ve parça üzerinde istenmeyen kırışıklıklar oluşmaktadır.

Çekme yuvarlatma yarıçaplarının çok düşük olması durumunda ise, sac malzemenin kalıp içerisinde akışı için gerekli olan temas alanı küçüleceğinden dolayı, takım kesme kalıbı gibi çalışmakta ve malzemenin yırtılması kolaylaşmaktadır (Gürün, 2008).



Şekil 2.10. Zimba ve matris yuvarlatma yarıçapı (Güneş, 2002)

2.5. Polimer Kaplama

Polimerler günümüzde toprak, metal, cam, ağaç vb. organik ya da inorganik maddelerden imal edilen malzemelerin yerini alan veya bu malzemeler ile beraber kullanılan alternatif malzemeler durumuna gelmiştir. Üretimlerinin kolaylığı, kullanımlarının basitliği ve düşük maliyetli olmaları sayesinde polimerlerden üretilen malzemelerin tüketimi sürekli artmaktadır. Bu artışı karşılayabilmek için ve gelişen teknolojiyi yakalamak için polimerler önem kazanmakta ve sürekli

geliştirilmektedirler. Zincir yapıdaki aynı türden veya farklı türden monomerlerin birbirlerine tekrar eklenerek bir araya gelip oluşturmuş oldukları çoklu yapıya polimer denilmektedir. Genellikle H₂, O₂, N₂ ve C gibi kimyasal elementlerden oluşmaktadır. Bu polimerler; termoplastikler, duroplastikler (termosetler) ve elastomerler olmak üzere üç farklı yapıda bulunurlar.

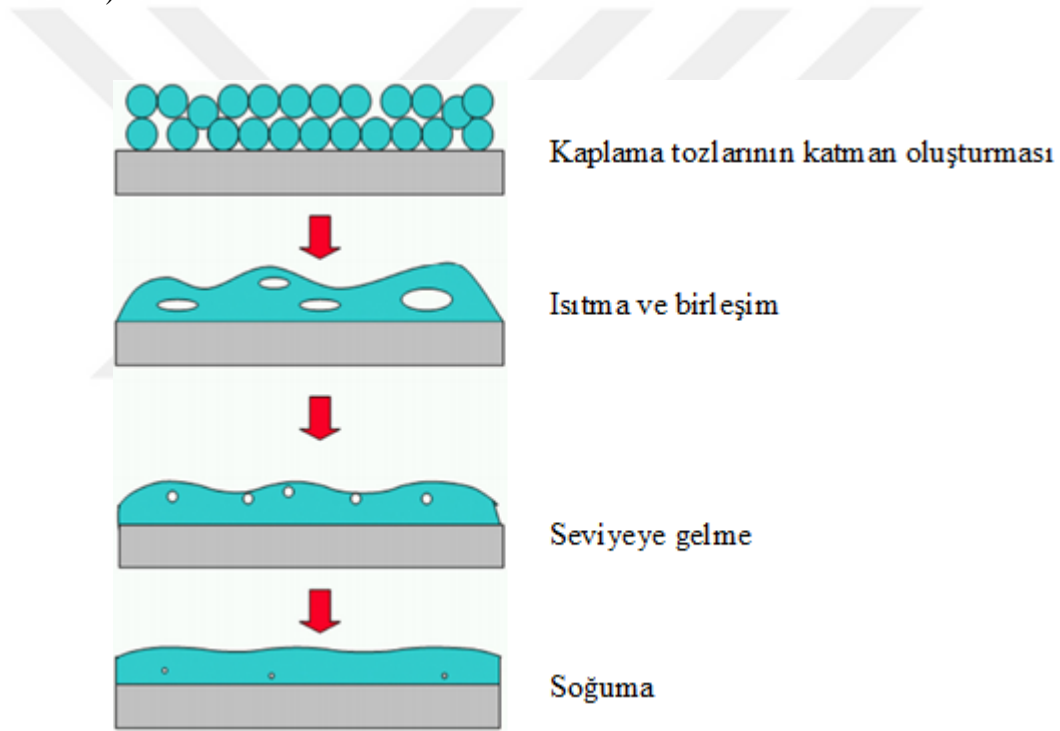
Elektrostatik toz boya kaplama malzemeleri ise genellikle termoset malzemeler olmakla beraber metal ve metal olmayan yüzeylerin kaplamasında sıklıkla kullanılmaktadırlar. Bu toz boya kaplama malzemeleri, bünyelerinde çözücü kimyasal içermedikleri için ıslak-sıvı kaplama malzemelerine oranla daha çok kullanılır hale gelmiştir. Çözücü içermemeleri sayesinde çevreci olmalarının yanında, kaplanacak malzeme yüzeyinde istenilen kaplama kalınlığı elde edilebilmektedir. Toz boya kaplama malzemeleri; farklı reçineler, sertleştiriciler, pigmentler, dolgu malzemeleri ve içlerindeki reçine ve sertleştiricilerin çeşidine göre gruplandırılmıştır. Günümüzde en yaygın kullanılanları, polyester, epoksi ve polyester-epoksi karışımlarıdır. Elektrostatik yöntem ile toz boya kaplama malzemesi kaplanacak olan yüzeylere püskürtme tabancası ile püskürtülmektedir. Tabanca içerisinde yüklenen toz boya tanecikleri, püskürtme tabancasını terk ettikten sonra topraklanmış malzeme ile bu parçacıklar arasında oluşan elektrostatik çekim kuvveti ile malzeme yüzeyine tutunur. Böylece karmaşık geometrik yüzeyler bile istenilen kalınlıkta kaplanabilmektedir. Bu yöntemle karmaşık parçaların kaplanması esnasında polimer toz malzemenin yaklaşık olarak %35'i parça yüzeyine tutunamadan dökülmektedir. Bu kayıp seri üretimin yapıldığı sistemlerde toplanarak düşük verimle tekrar kullanılabilir (Kismet, 2015).

2.5.1. Elektrostatik Toz Polimer Kaplama

Elektrostatik toz polimer kaplama sistemi bir püskürtme tabancası ve bir sprej kabininden oluşur. Sistem, polimer tozlarına elektrostatik yük vermek için bir korona şarj sistemini kullanır. Bir gerilim kaynağı ile akım üretilir, bunun bir püskürtme tabancasının ucunda bulunan bir elektroda taşınmasıyla manyetik alan oluşturulur. Hava akışı, polimer tozunun, püskürtme tabancasının içinden, tabanca ucuna ve sprej

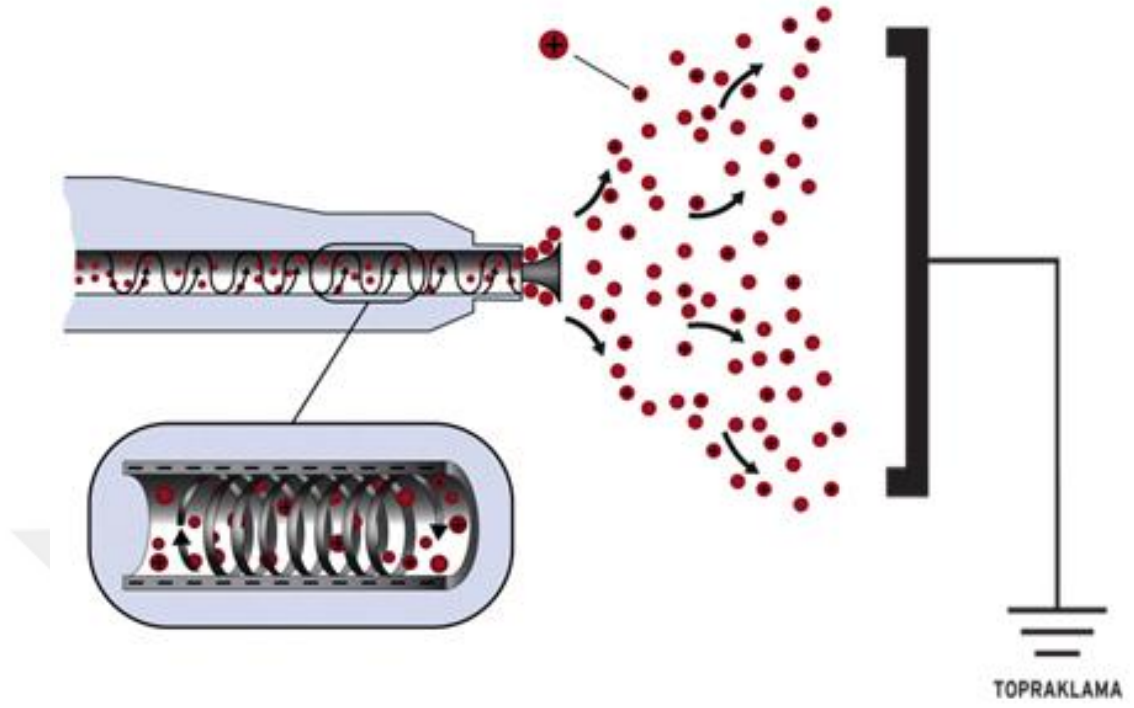
kabininin içine topraklanan metal alt tabakaya doğru beslenmesini sağlar. Hava akımı ve toz boyalarının karışımı, tabanca ucundaki elektrostatik alandan geçtiğinde, hava akımı iyonize edilir ve sonuç olarak, yalıtıcı toz boyalar hızla elektriksel olarak yüklenir ve bu nedenle topraklanmış metal alt tabakaya çekilir.

Elektrostatik kaplama düzeneği, parçacıkların yüklenmesini, yüklü parçacıkların püskürtülmesini veya atomize edilmesini ve yüklü parçacıkların topraklanmış bir altlık üzerine çökertilmesini sağlar. Tortulanan parçacıklar daha sonra bir film üretmek için genellikle ısıyla sertleştirilir ve kaplama işlemi gerçekleştirilmiş olur (Prasad ve ark, 2016).



Şekil 2.11. Kaplama tozlarının film haline gelme aşamaları (Prasad ve ark, 2016)

Elektrostatik ve aerodinamik kuvvetlerin bir sonucu olarak metal yüzey üzerine ince bir toz boya tabakası geçici olarak yapıştırılır. Elektrostatik püskürtme işleminden sonra, toz boyalar metal yüzey üzerinde, yaklaşık 180 °C sıcaklıkta 20 dakika boyunca bekletilir. Pişirme denilen bu işlem sırasında geçici olarak yapışan toz boyalar erimiş, düzleştirilmiş olarak, alt metal üzerinde sürekli bir film oluşturur (Barletta, 2011).



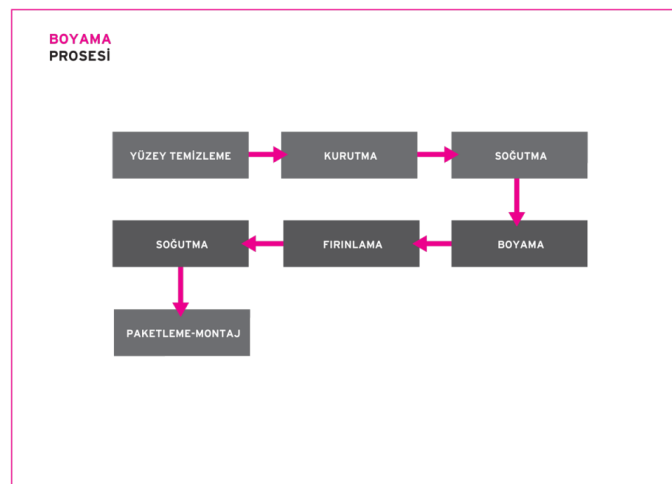
Şekil 2.12. Tabanca ile tozun parça üzerine püskürtülme
(<http://www.pulver.com.tr/toz-boya-uygulamaları>)

Toz boyanın yüzeye tam yapışabilmesi için malzemenin de çok iyi bir şekilde elektrostatik yüklenmesi gerekir. Fazla boya, kabinde bulunan boya geri kazanım sistemi sayesinde toplanarak tekrar kullanıma sokulur. Boya geri kazanım sistemi toz boyama teknolojisinin en büyük avantajlarından biridir.

Çizelge 2.2. Elektrostatik toz kaplamanın fayda ve zararları (Aras, 2016)

	Avantajlar	Dezavantajlar
Ekonomi	Enerji tasarrufu sebebiyle düşük işletme maliyeti, işgücü maliyet tasarrufu, yüksek çalışma verimliliği, azaltılmış çevresel maliyetler ve artan tesis güvenliği	Sermaye gereksinim ve maliyetlerinin yaş boyalara göre fazla olması, renk değişikli sebebiyle sık sık kesinti yapılması, temiz ve kuru parçalar gerektiren çalışma ortamı
Çevre	VOC salınımı olmaması, enerji kullanımının az olması, fazla sprey geri dönüşümü, atıkların kolay bertarafı	Ön hazırlık için kullanılan fosfat ve kromatlar, kanserojen katkı maddeleri, UV/IR kurutmada yüksek kürleşme sıcaklığı
Görünüm ve Performans	Tekstüründe yüksek dayanıklılık ve varyasyon, değiştirilebilir renk ve boya kalınlıkları	Genellikle keskin iç köşelerin ve ısıya duyarlı parçaların kaplanmasındaki zorluklar, Çok ince boya kaplama uygulamaları
Güvenlik	Düşük yanma ve kıvılcım oluşma riski, personelin solvent gaz solunumuna maruz kalmaması	Toz boyaların saklanması için özel depolama ve iklimlendirme kontrol gerekliliği

Solvent içermemesi, yüksek yüzey kalitesi, dayanıklılığı, boya geri kazanım sistemi, ekonomikliği ve çevre duyarlılığı elektrostatik toz boyamayı geleneksel boyama işlemlerine göre daha çekici bir alternatif yapmaktadır. Toz boyaların yaş boyaya göre en önemli avantajları çevre için zararlı hiçbir uçucu sıvı ve çözücü içermemeleridir. Diğer yandan kalite özellikleri ve ekonomiklik bakımından da toz boyalar önemli avantajlara sahiptirler (Aras, 2016). Şekil 2.13'te elektrostatik toz boyama işleminin aşamaları şematik olarak görülmektedir.



Şekil 2.13. Elektrostatik toz boyama işlem aşamaları

2.5.2. Polimer Kaplama Malzemeleri

Polimerler, çok fazla aynı ya da farklı atomik grupların kimyasal bağlarla oluşturduğu uzun zincirli, başka bir ifadeyle yüksek molekül ağırlıklı bileşiklerdir. Sentetik polimerler çoğunlukla, fazla sayıda oluşan “monomer” denilen basit birimlerden oluşur. En basit sentetik polimer bilinen polietilen üzerinde polimerizasyon denilen bu işlem aşağıdaki gibi ifade edilebilir.



İşlemin sol tarafında görülen etilen monomerinin polimerizasyonu ile bu monomeri çok sayıda içeren polietilen elde edilmektedir. Burada “n” polimerizasyon derecesi olup, bir polimer zincirindeki monomer sayısını gösterir. Polimerin gerekli fiziksel özelliklere sahip olması için, molekül ağırlığının 10⁴'ün üzerinde olması gerekir. Molekül ağırlığı arttıkça polimerin elastiklik modülü ve kopma dayanımı yükselir (Pişkin, 1987).

Polietilen tereftalat (PET), termoplastik bir polyesterdir. Bu polimer kristalin, yüksek molekül ağırlıklı olup mekanik özellikleri ile işlenme kabiliyeti arasında çok iyi denge bulunan bir malzemedir. Çok çabuk kristalleşebildiği ve akabildiği için kalıplama zamanı çok kısadır. PET'in iyi çekme, sürünme ve kimyasal dayanımı; düşük su emme kabiliyeti ve buna bağlı olarak iyi boyut kararlılığı vardır. Kuvvetli asit ve bazların dışındaki kimyasal maddelere karşı çok dayanıklıdır. PET, cam elyafı ile kuvvetlendirilerek rijitliği ve sürünme dayanımı iyileştirilebilir. Saf halde tokluğu çok iyi olan bir malzeme olmakla birlikte çentik hassasiyeti yüksektir. PET genellikle dayanımının ve özellikle darbe dayanımının yüksek olması istenen parçaların imalatında kullanılır (Aksulu, 2007).

2.5.3. Polimer Kaplamanın Amacı

Derin çekme öncesinde 1 mm kalınlığındaki DC01 metal sac malzemesi polimer malzeme ile elektrostatik toz kaplama yöntemi ile kaplanarak;

- Dekoratif görünüm sağlama,
- Korozyondan koruma,
- Aşırı aşınmayı engelleme,
- Derin çekme esnasında yağlayıcı kullanımını azaltma ya da ortadan kaldırma,
- İmalat sürecinin sonunda firma içerisinde boyama ünitesini devreden çıkarma,
- Özellikle karmaşık geometrik şekillere sahip parçalarda şekillendirme sonrası parçanın kaplama işleminin zaman alıcı ve maliyetli olması gibi sorunları ortadan kaldırılması gibi faydalar amaçlanmaktadır.

2.5.4. Polimerlerin Sürtünme Mekanizmaları

Polimerlerin sürtünme özellikleri elastik temas bölgesinden dolayı metal malzemelerden farklıdır. Bir polimerin plastiklik indeksi;

$$\psi = \frac{E}{H} \sqrt{\sigma_h / R_{av}} \quad (2.17)$$

bağıntısıyla ifade edilir. Bu bağıntıda; E, elastiklik modülü; H, sertlik ; σ_h , pürüz yükseklikleri dağılımının standart sapması; R_{av} , pürüz tepeciklerinin eşdeğer eğrilik yarıçapı ve $\sqrt{\sigma_h / R_{av}}$ yaklaşık olarak pürüzlerin ortalama eğimidir.

Polimer malzemelerde E/H oranı 10 civarında iken metaller için genellikle 100 ve daha büyüktür. Plastiklik indeksi polimerlerde metallerin yaklaşık onda biri kadardır, temas çok pürüzlü yüzeyler hariç hemen hemen bütünüyle elastiktir. Polimerlerin sürtünme katsayıları polimer veya metal temas durumunda kayma hareketi sırasında genellikle

0,1 ile 0,5 arasında değişir. Sürtünme katsayısı normal yük, kayma hızı ve sıcaklıkla belirli bir miktar değişir.

2.6. Derin Çekme İşleminde Karşılaşılan Hatalar

Derin çekme işleminde sıkça rastlanan kırışma, yırtılma, kulaklanma gibi hataların Çizelge 2.2’de belirtildiği gibi çok farklı nedenleri bulunmaktadır. Bu sac şekillendirme işlemine, kalıp geometrisi, malzemenin içyapısı, yağlama koşulları, sıcaklık, malzemenin yüzey kalitesi, şekillendirme hızı, baskı plakası kuvveti gibi birçok değişkenden etkilenmektedir (Çetin, 2015).

Çizelge 2.2. Derin Çekme İşleminde Oluşabilecek Hatalar ve Muhtemel Nedenleri

Hata	Muhtemel Nedenleri
Buruşma	Uygunsuz baskı plakası kuvveti
	Baskı plakası kuvvetinin tüm yüzeylerde eşit olmaması
	Sac malzeme kalitesinin düşük olması
	Matris yuvarlatma yarıçapının çok büyük olması
	Çekme boşluğunun çok büyük olması
	Malzeme yüzeyinin kirlili veya çapaklı olması
Parçada yırtılma ve kırılma	Aşırı baskı plakası kuvveti
	Matris yuvarlatma yarıçapının çok küçük olması
	Çekme boşluğunun çok küçük olması
	Presin veya kalıbın eksenden kaçık olması
	Uygunsuz veya eksik yağlama
	Sac malzeme kalitesinin düşük olması
	Pres hızının çok yüksek olması
	Çekme oranının çok yüksek olması
	Kalıp veya baskı plakası üzerinde oluşan çizik veya çentikler
	Malzeme akışını önleyen keskin köşeler
Düzensiz çekme veya kulaklanma	Çekme boşluğunun uygun olmaması
	Presin veya kalıbın eksenden kaçık olması
	Sac malzemenin kalıp içerisine uygun yerleştirilmemesi
	Uygunsuz yağlama
Parça kenarlarında yırtılma veya dalgalanma	Çekme boşluğunun uygun olmaması
	Fazla yağlama
	Matris yuvarlatma yarıçapının çok büyük olması
	Eşit olmayan baskı plakası kuvveti
	Kalıp kenarlarının dışa esnemesi
Parçanın dip kısımlarında pürüzleşme	Sac malzeme kalitesi
	Baskı plakasının yetersiz olması
	Baskı plakası üzerinde yağ birikmesi
	Hava çıkışının olmaması
	Parçadaki uygunsuz esneme

2.7. Literatür Özeti

Metal sacların derin çekme işlemi oldukça yaygın kullanılan bir plastik şekillendirme yöntemi olduğu için konu ile ilgili çok fazla araştırma yapılmaktadır. Fakat bunlar genelde sac malzemeleri, kalıp elemanlarının geometrisi ve uygulanan şekillendirme kuvvetlerinin değişimini içermektedir. Polimer kaplamalı metal sacların derin çekilmesi ile ilgili sınırlı sayıda çalışma bulunmakta ve bunların büyük bir kısmı kimya ağırlıklıdır.

Literatürde metal saclar üzerine derin çekme işlemlerinde parametreler değiştirilerek yapılan çok sayıda çalışma mevcuttur. Browne ve Hillery, derin çekme parametrelerinin son derece önemli olduğunu belirttikleri araştırmalarında, işlemi etkileyen baskı plakası ve zimba kuvveti, derin çekme hızı, zimba ve matris kenar yuvarlatma yarıçapı değerlerini değiştirerek etkilerini deneysel olarak incelemişler ve parça kalınlık dağılımını homojen hale getiren şartları belirlemişlerdir (Browne and Hillery, 2003).

Candra ve arkadaşları, sabit baskı plakası kuvveti uygulandığında derin çekme ürünüde ortaya çıkan çatlakları önlemek için analitik bir bağıntı ile değişken baskı plakası kuvvetini belirlemeye çalışmışlar ve sonlu eleman analizleri sonucunda değişken baskı plakası kuvveti uygulamasıyla şekillendirilebilirliğin %8'e ve derin çekme yüksekliğinin %17'ye kadar arttırabildiğini gözlemlemişlerdir (Candra ve ark, 2015).

Chengzhi ve arkadaşları, dikdörtgen kutu şeklindeki bir parça üzerinde değişken baskı plakası kuvvetinin şekillendirilebilirlik üzerindeki etkilerini deneysel olarak ve sonlu eleman yöntemi ile inceledikleri çalışmalarında baskı plakası kuvvetini bölgesel olarak değiştirerek malzeme akışını kontrol etmiş ve şekillendirilebilirliğin arttırılabildiğini göstermişlerdir (Chengzhi ve ark, 2005).

Zheng ve arkadaşları, AA6082 alüminyum alaşımının makro dokulu baskı plakası ile derin çekilmesinde etek kırışması için bir model oluşturdukları çalışmalarında sıcaklık artışı ve şekillendirme hızı düşüşü ile kırışıklık direncinin arttığını belirtmişlerdir (Zheng ve ark, 2017).

Yoshihara ve arkadaşları, çalışmalarında hafif bir malzeme olan magnezyum alaşımı bir sacı silindirik kap şeklinde derin çekme işlemine tabi tutarak, sabit ve değişken baskı plakası kuvvetlerinin etkilerini incelemişler ve değişken baskı plakası kuvveti uygulaması ile derin çekme oranının 300 °C sıcaklıkta önemli ölçüde arttırılabildiğini göstermişlerdir (Yoshihara ve ark, 2005).

Kitayama ve arkadaşları, derin çekilmesi zor olan malzemelerde değişken ve titreşimli baskı plakası kuvvetinin etkilerini araştırmışlardır. Sayısal benzetimin kullanıldığı çalışma ile sac malzemenin güvenli şekillendirilebilirlik bölgesi sabit baskı plakası kuvveti kullanılarak belirlenmiş ve bu bölgede değişken ve titreşimli baskı plakası kuvvet değerleri optimize edilmiştir (Kitayama ve ark, 2016).

Gürün ve Karaağaç, otomotiv sektöründe geniş kullanım alanına sahip olan DC01 malzemesi için maksimum 2,165 olan derin çekme oranını hidromekanik bir sistem kullanarak 2,33'e yükseltmişlerdir. Ayrıca bu yöntem ile derin çekme sonrasında kalınlık değişiminde %12 azalma görülmüştür (Gurun and Karaagac, 2015).

Colgan ve Monaghan, derin çekme işleminde zımba kuvveti ve ürün kalınlık değişimini, deneysel ve sonlu eleman analizi ile araştırmışlardır (Colgan and Monaghan, 2003).

Duchene ve Habreken, derin çekmede zımba kuvveti, yuvarlatma yarıçapı ve derin çekme yüksekliğini deneysel ve sonlu eleman analizi kullanarak incelemişler ve karşılaştırmışlardır (Duchene and Habraken, 2005).

Gavas ve İzciler, derin çekme işleminde baskı plakasının etkisini farklı bir şekilde araştırmış ve Anti-Lock Braking Sistemi (ABS) kullanarak malzemenin kalıp içinde akışını kontrol etmiştir (Gavas and Izciler, 2006).

Çavuşoğlu ve Gürün, otomotiv sektöründe yaygın olarak kullanılan DP600 ve DP780 metal sac malzemelerin derin çekme sürecinde deformasyon hızının etkilerini araştırmışlardır. Bunun için farklı deformasyon hızlarında çekme testleri yapılarak

malzemenin mekanik özellikleri belirlenmiştir. Çalışma sonlu eleman analizleri ile desteklenmiş olup deformasyon hızındaki artışın, ürünün üst kısımlarında et kalınlığında incelmeleri arttırdığı, etek kısımlarında ise kalınlığın arttığı, geri yaylanma değerini ve çekme kuvvetini arttırdığı görülmüştür (Çavuşoğlu, 2014).

Polimer kaplama, metal sacların plastik şekillendirme öncesi gerçekleştirilebilen sürekli ve otomatik bir işlemdir. Polimer kaplamalı metal sacların sürtünmeyi düşürme, korozyonu önleme ve mükemmel parlak görünüm sağlama gibi avantajları vardır. Kaplamanın korozyona karşı direnci, paslanmaz çelik sacların kullanımı yerine soğuk haddelenmiş çeliğin kullanılmasına imkân verir ve bu da malzeme maliyetini azaltır (Son ve ark, 2015).

Lim ve arkadaşları, derin çekme işleminde şekillendirilebilirliği arttırmak için polietilen tereftalat (PET) ve polivinil klorür (PVC) kaplamalı metal saclar için şekillendirilebilirliği tahmin etmek amacıyla Gurson-Tvergaard-Needleman (GTN) hasar modeline dayanan sayısal bir formülasyon geliştirmişlerdir (Lim ve ark, 2016).

Purohit ve arkadaşları, polimer kaplamalı metal sacların şekillendirilmesi sırasında oluşabilecek yüzey hatalarını araştırmışlardır. Polivinil florür (PVDF) ve polipropilen (PP) kaplamalı sacları şerit çekme deneyi ile eğmeye tabi tutarak yüzeyindeki hataları inceledikleri çalışmalarının sonucunda, kaplama yüzey hatalarında yüksek temas gücü, düşük kaplama gücü ve düşük yağlamanın etkili olduğunu belirtmişlerdir.

Ueda ve arkadaşları, ön boyalı çelik sacların derin çekme ile şekillendirilebilirliğini ve boya filminin viskoelastik özelliklerini araştırmışlardır. Boya filmlerinin hasarını, boyanın mekanik özelliklerinin etkilediği belirlemişlerdir. Bu çalışmada, polyester/melamin boya kaplama malzemesi kullanılmıştır. Bu kaplamanın viskoelastik özellikleri incelenmiş ve düşük elastiklik modülüne ve düşük uzama özelliğine sahip olduğunu saptamışlardır. Derin çekme testleri sonucunda kaplama malzemesinin yüksek plastik özelliklere sahip olduğu belirlenmiştir (Ueda ve ark., 2002).

Bosch ve arkadaşları, polimer kaplamalı metal sacların ayrılma özelliklerini araştırmışlar. Karma sayısal-deneysel yaklaşım kullanılan çalışmada, soyma testi kullanılarak ara yüzey incelenmiş ve ara yüzey özellikleri bir ters parametre tanımlama prosedürü yoluyla belirlenmiş (Bosch ve ark., 2008).

Son ve arkadaşları, vinil kaplamalı metal şekillendirmede delaminasyon olarak da bilinen kaplama ayrılmasını deneysel olarak incelemişlerdir. PET kaplamanın ayrılması çapraz kesme kubbe ve dikdörtgensel derin çekme testleri ile incelenmiş olup, şekillendirme sınır diyagramı (ŞSD) oluşturulmuştur. Vinil kaplamalı metalden imal edilmiş olan ve koruyucu film, PET ve PVC'den oluşan üç tabaka kullanılan çalışmada şekillendirme sınır diyagramları elde edilerek, delaminasyon alanı belirlendikten sonra tabakaların ayrılmasını gösteren majör ve minör gerilme değerleri belirlenmiştir (Son ve ark., 2012).

Elnagmi ve arkadaşları, polimer kaplamalı sac metallerin derin çekme davranışlarını aksenal simetrik derin çekme testi uygulayarak inceledikleri çalışmalarında optik gerilme ölçme sistemi kullanarak gerilme analizlerini yapmış ve zımba yükü, kırışma, gerilme dağılımı, yırtılma gibi derin çekme özelliklerini incelemişlerdir. Ayrıca dekoratif amaçla kaplanmış paslanmaz çelik sac için basıncın ayrılma ve kırışma üzerindeki etkisini araştırmışlardır (Elnagmi ve ark., 2011).

Moon ve arkadaşları, otomotiv endüstrisinde kullanılan ön kaplamalı metal saclar için polyster reçineli polikarbonat ile sentezlenerek polimer kaplamaya esneklik kazandırmış, çizilme direncini ve şekillendirme kabiliyetini arttırmayı hedeflemişlerdir (Moon ve ark., 2012).

Zumelzu ve arkadaşları, çalışmalarında derin çekme sırasında polimer kaplamalı metal saclarda oluşabilecek hataları araştırmışlardır. Çeşitli yöntemlerle PET kaplamadaki ayrılmaları ve yapısal bozulmaları incelemişlerdir (Zumelzu ve ark., 2006).

Boelen ve arkadaşları, polimer kaplamalı gıda kutularındaki kusurların başlangıcını ve yayılmasını etkileyen faktörleri incelemek için, çok sayıda deney yaparak derin çekme sürecini incelemiştir (Boelen ve ark., 2004).

Lee ve arkadaşları, kaplanmış sacların kaplama katmanlarının elastoplastik $\sigma - \varepsilon$ davranışlarını incelemek için, sonlu eleman (SE) simülasyonu ve yapay sinir ağı (YSA) tekniğini kullanmışlardır (Lee ve ark., 2007).

Colgan ve Monaghan, sonlu eleman analizi ve deneysel yöntemler ile derin çekme işleminde zımba kuvveti ve kalınlık değişimi arasındaki ilişkiyi araştırmışlardır (Colgan, 2003).

Vayeda ve Wang, iki tür PVDF kaplamalı sac malzemesi üzerinde, kaplamaların plastik deformasyon altında saclara yapışmasını değerlendiren bir teknik sunmuşlardır. ŞSD kullanarak kaplama yapışma testi, çapraz bant testi (ASTM D3359), hızlandırılmış şartlandırma ve tek eksenli çekme testleri ile kaplamaların uygunluğunu değerlendirmişlerdir (Vayeda and Wang, 2007).

Lee ve arkadaşları, araç parçalarında şekillendirilebilirliği değerlendirmek için karma kompozit malzemeler üzerinde derin çekme testleri yapmışlardır. Çeşitli baskı plakası kuvvetleri uygulayarak incelleme oranlarını ve karşılaşılan sorunları incelemiştir (Lee ve ark., 2016).

Lee ve arkadaşları, silikon modifiyeli özel polyester bir reçine ile derin çekme çalışmaları yaparak, bu işlemin yüzeyin esnekliğini ve sertliğini nasıl iyileştirdiğini değerlendirmişler (Lee ve ark., 2014).

Van der ve arkadaşları, metal gıda ve içecek kaplarına üretim esnasında cila şeklinde madde püskürtme sürecinin zararlı ve zaman alıcı olduğu fikrinden yola çıkarak, polimer kaplamalı metal sac kullanımını deneysel ve sayısal olarak incelemiştir (Van der ve ark., 2000).

Sokolova ve arkadaşları, farklı boyut ve şekillerde iki zımba kullanarak elde ettikleri farklı kalınlıklara sahip üç katmanlı sandviç kompozitleri (316L/PP-PE/316L) derin çekme işlemine tabi tutmuş ve şekillendirilebilirliklerini incelemişlerdir. Elde ettikleri sonuçları fotogrametrik ve metalografik olarak analiz etmişlerdir (Sokolova ve ark., 2012).

Cheng ve arkadaşları, otomotiv uygulamalarında hafiflik ve titreşim sönümlenme performansını arttırmak için kullanılan malzemelerde derin çekme sonrasında ortaya çıkan kırışıklıkları gidermek amacıyla araştırmalar yapmışlardır (Cheng ve ark, 2004).



3. MATERYAL VE METOT

3.1. Deney Düzeneginin Kurulması

Deneyleerde 50 ton kapasiteye sahip bir hidrolik pres kullanılmıştır. Bu prese, deney yapılırken parametre değerlerini girebilmek ve sonuçlarda çekme yksekligi, çekme kuvveti, hız değerlerini anlık izlemek ve kayıt altına alabilmek için elektronik bir sistem ilave edilmiştir. Bu sayede her numune için alınan sonuçlardan grafik elde ederek farklı parametrelerde yapılan deneyler arasında kıyaslamalar yapılabilmıştir. İşlem süreci Şekil 3.1’de gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Polimer kaplamalı metal sacların derin çekme süreci

Pres ve kontrol sistemi Resim 3.1’de gösterilmiştir.



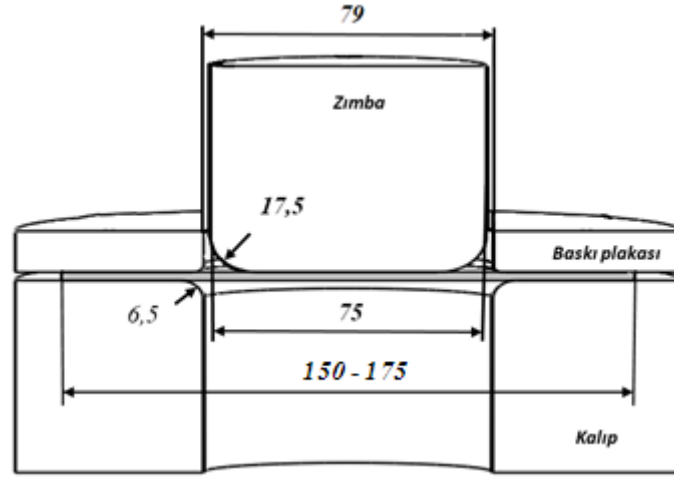
Resim 3.1. Derin çekme deney düzeneği

3.1.1. Presin teknik özellikler

3.1.2. Kalıp tasarımı

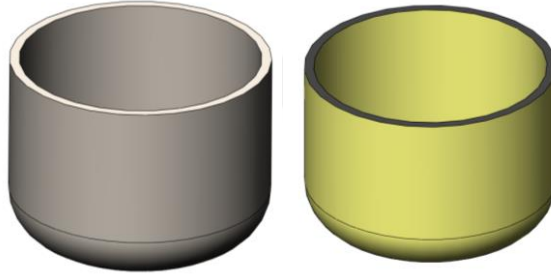
Kalıp elemanları (zımba, matris ve baskı plakası) teorik olarak verilen bağıntılara göre hesaplanmış ve imalatı yapılmıştır. Kalıp resimleri ve önemli ölçü değerleri Şekil 3.22’de ifade edilmiştir.

Deneyleerde 50 ton kapasiteli 2,5 mm/s ile 14 mm/s arasında çekme hızlarına sahip elektronik bir devre (PLC) ile desteklenmiş hidrolik bir pres düzeneği kullanılmıştır.



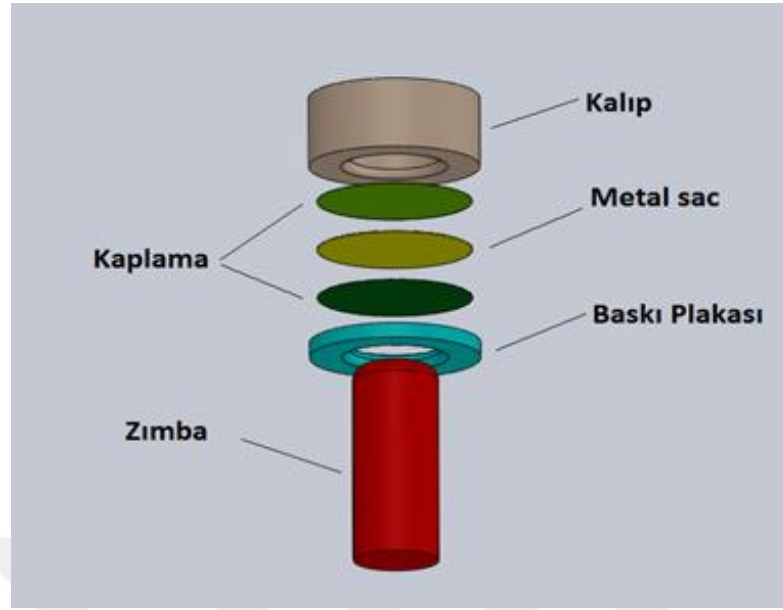
Şekil 3.2. Kalıp, zimba ve baskı plakası görünümü

Çekme işlemi sonrasında elde edilecek parça Şekil 3.3'te gösterilmiştir.



Şekil 3.3. Kaplamasız ve kaplamalı elde edilecek ürünler

Şekil 3.4'te deney kalıpları ve numunesi ayrılmış olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.4. Derin çekme kalıp tasarımı

3.1.2.1. Baskı Plakası Basıncı

Baskı plakası basıncı belirli bir değerin altında olduğunda zımba ile matris arasındaki matris boşluğuna gereğinden fazla malzeme girdiğinden sacda kırışma, belirli bir değerin üzerinde ise uygulanan basınç sacın etek kısımlarının kaymasını engellediğinden aşırı malzeme akışı nedeniyle sacda incelme ve yırtılma meydana gelmektedir (Groover, 2016). Yırtılma ve kırışma kusurları oluşmadan ideal baskı plakası basıncını belirlemek için öncelikle Eş. 2.6~2.10 denklemlerine göre farklı çekme oranları için gerekli hesaplamalar yapılmıştır. Fakat daha önce de belirtildiği üzere teorik hesaplamalar sonucu bulunan değerler oldukça geniş bir aralıktadır. Bunun için farklı çekme oranlarına sahip kaplamalı ve kaplamasız parçalar için 10, 40, 80 ve 120 bar sabit baskı plakası basınçları uygulanmıştır.

3.1.2.2. Zimba ve Matris Yuvarlatma Yarıçapı

Çekme işleminde sac malzemenin kalıp içerisinde akışını kolaylaştırmak için zımba ve matris yuvarlatma yarıçapının mümkün olduğu kadar büyük tutulması gerektiği düşünülmektedir. Ancak, gereğinden büyük tutulmuş zımba ve matris yuvarlatma yarıçaplarında, baskı plakası etki yüzeyi küçüleceğinden, sac malzemenin takımla

temas etmeyen yüzeyi büyümekte ve parça üzerinde istenmeyen kırışıklıklar oluşmaktadır. Çekme yuvarlatma yarıçaplarının çok düşük tutulması durumunda ise, sac malzemenin kalıp içerisinde akışı için gerekli olan temas alanı küçüleceğinden dolayı, takım kesme kalıbı gibi çalışmakta ve malzemenin yırtılması kolaylaşmaktadır (Hasçalık ve ark, 2007).

3.1.2.3. Çekme Hızı

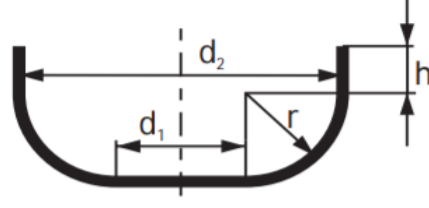
Teorik olarak çekme hızı, çalışmada kullanılan malzeme, ilkel çap ve zimba çapı değerlerine göre 0,92 mm/s, Eş. 2.11'e göre 2,96 mm/s olarak hesaplanmıştır. Deneyle daha önce bahsedildiği üzere prese ilave edilen hız ayar ünitesi sayesinde çekme numunelerine farklı çekme oranı ve baskı plakası kuvveti parametre için 3 ve 12 mm/s sabit hızların yanı sıra, 12~3 mm/s aralığında azalan değişken bir çekme hızı da uygulanmıştır. Resim 3.2'de pres düzeneğinin çekme hızı ayar kontrol ekranı görülmektedir.



Resim 3.2. Pres kontrol ekranı

3.1.2.4. İlkel Çap Hesabı

1 mm kalınlığındaki metal sac numunelerin ilk çapları, deney listesinde belirtilen çekme oranlarını elde etmek için ayrı ayrı hesaplanmıştır.



Şekil 3.5. Çalışmada kullanılan derin çekme modeli (Schuler, 1998)

$$D = \sqrt{d_1^2 + 4 \cdot (1,57 \cdot r \cdot d_1 + 2 \cdot r^2 + d^2 \cdot h)} \quad (3.1)$$

$$D = \sqrt{d_2^2 + 4 \cdot d_2 \cdot (0,57 \cdot r + h) - 0,56 \cdot r^2} \quad (3.2)$$

Deney numunelerinde Şekil 3.5'te görülen ürün geometrisine uygun olarak Eş. 3.1 ve Eş. 3.2 denklemleri, sabit zımba çapı ve matris yuvarlatma yarıçapı dikkate alınarak kullanılmıştır.

3.1.2.5. Çekme Boşluğu

Matris boşluk değeri, çelik için aşağıdaki Eş. 3.3'ten faydalanılarak, 1 mm sac kalınlığı için 1,22 mm olarak hesaplanmıştır.

Çelik saclar için

$$c = t + 0,02\sqrt{10t} \text{ [mm]} \quad (3.3)$$

3.1.2.6. Yüzey Pürüzlülüğü ve Sürtünme Değerleri

Derin çekme işlemlerinde etkin parametrelerden biri de yağlama ya da çeşitli kaplamalara göre değişen sürtünme katsayısıdır (Ma ve ark, 2015). Derin çekme esnasında kullanılan bu yağlar kimyasal etkileri sebebiyle çevreye verdikleri zarar ve maliyet noktasında negatif etkilere sahiptir.

Bu çalışmada metal sacların ve polimer kaplamalı metal sacların derin çekme işlemlerinde parça ve kalıp elemanları arasında, polimer kaplamanın etkisini görebilmek için yağlama yapılmamıştır.

3.1.3. Sac Malzemesi ve Kaplama Özellikleri

3.1.3.1. Metal Sac Malzemesi

Bu çalışmada kullanılan 1 mm kalınlığındaki çelik sac için, DC01 malzemesi seçilmiştir. Çekme ve derin çekme işlemlerine uygun düşük karbonlu soğuk haddelenmiş çelikler sınıfında olan bu malzeme günümüzde derin çekme işlemi için yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu malzemenin farklı standartlarda gösterim şekli, mekanik ve kimyasal özellikleri Çizelge 3.2 ve 3.3'te verilmiştir.

Çizelge 3.2. DC01 malzemesinin farklı standartlarda gösterimi (Anonim, 2011)

AB (EN)	ABD (-)	ALMANYA (DIN)	JAPONYA (JIS)	FRANSA (AFNOR)
DC01	SAE1008 SAE1010	FeP01 St12	SPCC	F12 FeP01
	İNGİLTERE (BS)	İTALYA (UNI)	İSPANYA (UNE)	RUSYA (GOST)
	Cr4 FeP01	FeP01	AP00	08kp 08ps

Çizelge 3.3. DC01 EN 10130:2006 (6112) Kimyasal Bileşimi ve Mekanik Özellikleri (Anonim, 2017)

C Max. [%]	Mn Max. [%]	P Max. [%]	S Max. [%]	Si Max. [%]
0,12	≤0,60	≤0,045	≤0,045	≤0,012
Akma Dayanımı [MPa]	Çekme Dayanımı [MPa]	Uzama [%]	Elastisite Modülü [GPa]	Sertlik [HV]
225	325	32	141,7	105

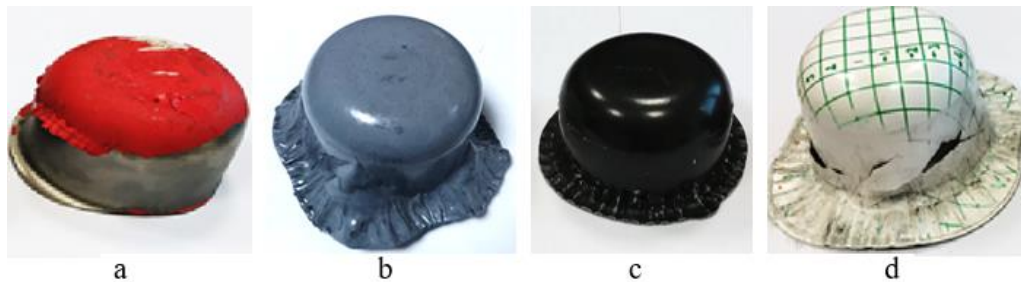
3.1.3.2. Kaplama Malzemesi

DC01 çelik sac malzemesi üzerine uygulanacak kaplama yöntemi ve malzemesi seçimi için araştırmalar yapılmıştır. Öncelikle kaplama malzemesini elde etmek için satın alınan sıvı polimer malzeme bileşenleri belirli oranlarda karıştırılarak dayanımları ve yüzeye tutunma kabiliyetleri belirlenmiştir (Resim 3.3).



Resim 3.3. Daldırma yöntemi için kullanılacak polimer karışım seçenekleri

En iyi orana sahip (1/8) karışım belirlenmiş ve daldırma yöntemi uygulanarak kaplama yapılmıştır. Fakat bu yöntemle kaplanmış numune (Resim 3.4.a) derin çekme işlemine tabi tutulduğunda aşırı düzeyde ayrılmalar meydana gelmiştir. Sonra darbeye ve neme dayanıklı bir malzeme ile kaplama (Resim 3.4.b) püskürtme yöntemi ile uygulanmış ve derin çekme işlemi sonunda tamamen metal sacdan ayrıldığı görülmüştür. Son olarak elektrostatik toz kaplama yönteminin en uygun olduğu yöntem olduğu düşünülerek Epoksi (Resim 3.4.c ve d) ve polyester bazlı toz polimer kaplama malzemeleri uygulanmıştır. Bu ön deneyler sonrası, çalışmada korozyona ve çizilmelere karşı oldukça dayanıklı elektrostatik toz kaplama yöntemi ile uygulanabilen Jotun marka Corro-Coat PE 7 serisi (B001) polyester kaplama malzemesi en uygun kaplama malzemesi olarak belirlenmiştir.



Resim 3.4. Başarısız olunan farklı yöntemler ve polimer kaplama örnekleri

Polyester bazlı PE toz kaplama malzemesi çeşitli iç ve dış mekân uygulamalarına uygun olup, dış hava direnci ve iç yüzey koruması amacıyla kullanılmaktadır. Bir dizi mimari alüminyum alt tabakaya ve ayrıca diğer demir ve demir dışı metallere uygulanabilmektedir. Tipik uygulama alanları bina bileşenleri ve aksesuarları, bahçe mobilyaları, tarım makinaları, otomotiv parçaları ve aksesuarları, bisikletler, klimalar ve aydınlatma cihazlarıdır. Kullanılan polimer kaplama malzemesinin bazı test sonuçları Çizelge 3.4’te verilmiştir.

Çizelge 3.4. Deneyde kullanılan polimer kaplamanın test sonuçları

Çapraz kesme deneyi	EN ISO 2409 (2mm)	Çapraz kesme oranı (%100)
Darbe direnci deneyi	ASTM D 2794	Film çatlağı oluşmamıştır.
Çökertme deneyi	EN ISO 1520	Film çatlağı olmadan 5mm’yi geçmiştir.
Bükme deneyi	EN ISO 1519	Film çatlağı olmadan 12 mm bükülmüştür.
Ezilme deneyi	EN ISO 2815	Uygun
Tuz deneyi	ASTM B 117	Uygun
UV deneyi	DIN 50017	Uygun

Elektrostatik kaplama öncesi malzemeler Integral markalı metal yüzey hazırlayıcı ile ön temizleme işlemine tabi tutulmuştur. 1/20 oranında su ile seyreltilen solüsyonun kullanım amacı metal yüzeyinde kaplamaya olumsuz etkisi olabilecek pas, yağ, kir gibi maddeleri uzaklaştırarak boyanın iyi tutunmasını sağlamaktır.

Resim 3.5’te deneylerde kullanılan kaplamalı numunelerin hazırlanmasında kullanılan elektrostatik toz kaplama makinası görülmektedir.



Resim 3.5. Deneyde kullanılan elektrostatik toz kaplama makinası

Resim 3.6'da derin çekme işlemi için hazırlanmış kaplamalı çelik sac numuneler görülmektedir.



Resim 3.6. Polimer kaplanmış numune örnekleri

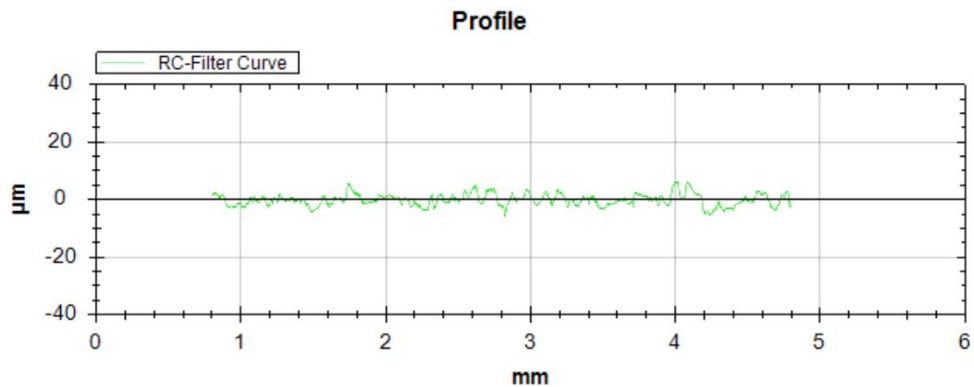
3.1.4. Pürüzlülük Değerleri ve Sürtünme

Şekillendirme sırasında sac ve kalıp elemanları arasında yağlama kullanılmadığında, yüzey pürüzlülüğünün etkisi artarak sürtünme aşırı derecede artacaktır. Sacın üzerindeki polimer kaplama estetik görünüş ve hava ile teması kesmesinin yanında parçanın yüzey pürüzlülüğünü de iyileştirerek sürtünmeyi azaltmaktadır. Bu etkinin tespit edilmesi amacıyla pürüzlülük ölçüm cihazı kullanılarak kaplamalı ve kaplamasız çelik sac numunelerin pürüzlülük değerleri ölçülmüştür (Resim 3.7).

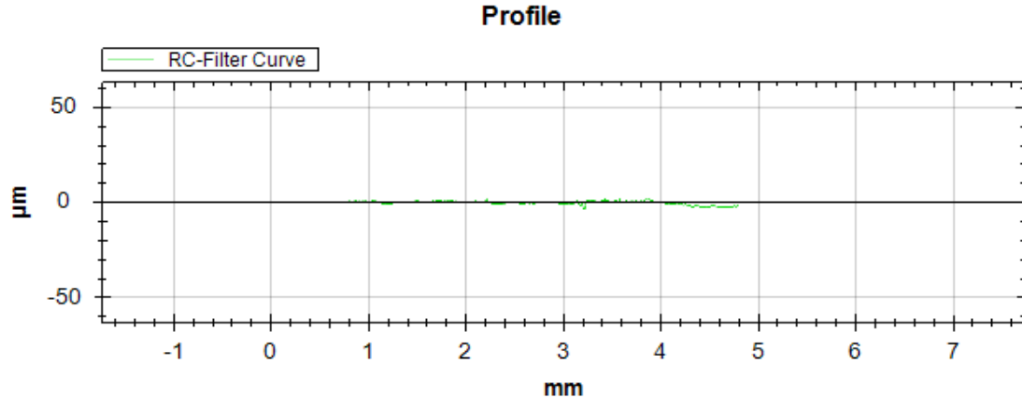


Resim 3.7. Pürüzlülük ölçümü

Deney numuneleri derin çekme işlemi öncesinde Resim 3.7’de görüldüğü gibi farklı bölgelerinden ölçümler alınarak pürüzlülük değerleri ölçülmüş ve kıyaslamalar yapılmıştır.



Şekil 3.6. DC01 deney numunesinin ölçülen pürüzlülük değeri ($R_a = 1.259 \mu\text{m}$)



Şekil 3.7. Kaplamalı deney numunesinin ölçülen pürüzlülük değeri ($R_a = 0.544 \mu\text{m}$)

Kaplamasız çelik sac yüzeyleri ile polimer kaplamalı yüzeyler arasında 2,3 kat pürüzlülük farkı görülmüştür. Bu fark, derin çekme sırasında sürtünme değerlerini etkileyerek limit çekme oranlarını değiştirmekte ve bazı derin çekme kusurlarını ortadan kaldırmakta ya da hafifletmektedir.

3.2. Derin Çekme Deneyleri

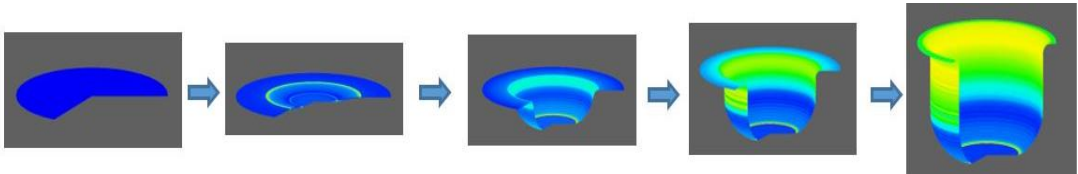
Deneylerde 1 mm kalınlığa sahip DC01 çelik sac malzeme ve her iki tarafı 0,15 mm kalınlığında elektrostatik yöntemle kaplanmış polimer kaplamalı DC01 sac malzeme kullanılmıştır. Bu malzemeler aynı deney şartlarında, farklı çekme hızı ve baskı plaka basınçlarında derin çekme deneylerine tabi tutulmuştur. Böylece polimer kaplamanın derin çekme işlemine nasıl bir etkisi olduğu ayrıntılı bir şekilde görülebilmektedir. Bu farklı girdilerle kaplamasız ve kaplamalı malzemelerin deneylerinden elde edilen veriler grafikler halinde değerlendirilerek, birbirleriyle kıyaslanmıştır. Resim 3.8'de deney numunelerinden örnekler görülmektedir.



Resim 3.8. Deney numunelerinden örnekler

3.2.1. Deneyin Yapılışı

Hesaplamalar sonucu belirlenen uygun baskı plakası basıncı ve derin çekme hızı elektronik kontrol ekranından ayarlanarak, hesaplanan farklı ilkel çaplarda lazer yöntemi ile dairesel olarak kesilmiş sac numuneler kalıp ve baskı plakası arasına yerleştirilmiştir. Derin çekme işlemi uygulandığında, çekme işlemi ile ilgili tüm bilgiler anlık olarak bilgisayara kayıt edilmekte ve daha sonra bu çıktılar kullanılarak grafikler çizilmiştir. Resim 3.9'da derin çekme sürecinde sac malzemenin şekil değiştirerek ürüne dönüşmesi görülmektedir.



Resim 3.9. Derin çekme aşamaları

Çizelge 3.5'te değişen ilkel sac çaplarına bağlı olarak farklı çekme oranlarında farklı baskı plakası basınçları ve çekme hızları için kaplamasız ve polimer kaplamalı deney numunelerine uygulanan derin çekme testleri görülmektedir. Bir takım testlerin uygulanmamasının sebebi öncesinde yapılan testlerden elde edilen sonuçların söz konusu testlerin başarıyla gerçekleştirilemeyeceğini kesin olarak göstermiş olmasıdır.

Çizelge 3.5. Deney parametreleri

Test No	Çekme Oranı (β)	Baskı Plakası Basıncı [Bar]	Çekme Hızı [mm/s]	Polimer Kaplamalı	Standart Kaplamasız
1	2,00	40	3, 12, Değişken	+	+
2	2,00	80	3, 12, Değişken	+	+
3	2,00	120	3, 12, Değişken	+	+
4	2,07	80	3, 12, Değişken	+	+
5	2,07	120	3	+	+
			12, Değişken	+	-
6	2,13	80	3	+	+
			12, Değişken	+	-
7	2,13	120	3	+	+
			12, Değişken	+	-
8	2,20	40	3	+	+
			12, Değişken	+	-
9	2,20	80	3, 12	+	+
			Değişken	+	-
10	2,20	120	3, 12	+	-
			Değişken	-	-
11	2,27	10	3, 12, Değişken	+	+
12	2,27	40	3, Değişken	+	+
			12	+	-
13	2,27	80	3, 12, Değişken	+	-
14	2,27	120	3, 12, Değişken	+	-
15	2,33	10	3, 12, Değişken	+	+
16	2,33	40	3, 12, Değişken	+	+
17	2,33	80	3	+	+
			12, Değişken	+	-
18	2,33	120	3	+	+
			12, Değişken	+	-

3.2.2. Kaplamasız Sacların Çekilmesi

Kaplama malzemesinin derin çekme işlemine etkisinin tam anlaşılabilmesi için, öncelikle DC01 çelik saclar değişik ilkel çap, baskı plakası basıncı ve çekme hızı parametrelerinde kuru, yağlı ve fırınlanmış olarak derin çekme işlemine tabi tutularak elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir. Resim 3.10'da kaplamasız derin çekilmiş ürün örnekleri görülmektedir.



Resim 3.10. Kaplamasız derin çekilmiş deney numuneleri

1 mm kalınlığındaki DC01 çelik saclardan 150 mm'den 175 mm'ye kadar 5 mm aralıklar ile ilkel çaplar belirlenmiştir. Grafiklerde derin çekme esnasında çekme derinliği [mm] ile kalıplama kuvveti [kN] arasındaki ilişki incelenmiştir.



Resim 3.11. Farklı ilkel çap ve baskı plaka basıncı uygulanmış numuneler

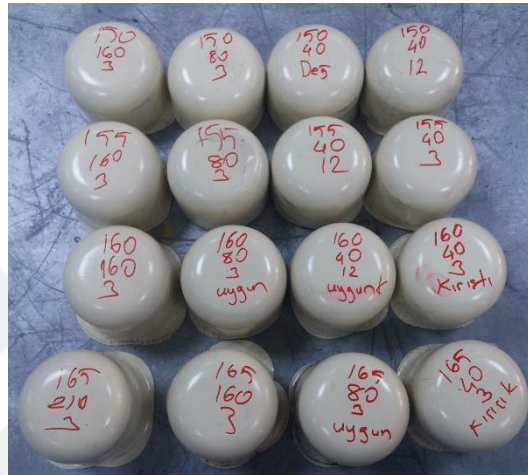
Pres üzerindeki kontrol panelinden 3 mm/s, 12mm/s sabit ve söz konusu hız aralığında azalarak değişen hızlar girilerek derin çekme işlemleri uygulanmıştır. Prese eklenen modül sayesinde istenilen çekme mesafesinde istenilen hıza ulaşılabilir. Çizelge 3.6'da değişik ilkel çaplara sahip kaplamasız saclara farklı şartlarda uygulanan derin çekme işlemlerinde elde edilen sonuçlar görülmektedir.

Çizelge 3.6. Kaplamsız DC01 çelik sac deney numuneleri

Çap [mm]	Basınç [bar]	Hız [mm/s]	Kaplama Durumu	Çekme Oranı	Maksimum Kalıplama Kuvveti [kN]	Görünüm	Strok [mm]	Ortalama Kalıplama Kuvveti [kN]
150	40	3	Kaplamsız	2,00	128	Uygun	60	110,00
150	40	12	Kaplamsız	2,00	148	Uygun	60	115,64
150	40	Değişken	Kaplamsız	2,00	119	Uygun	60	98,51
150	80	3	Kaplamsız	2,00	164	Uygun	60	129,64
150	80	12	Kaplamsız	2,00	194	Uygun	60	97,13
150	80	Değişken	Kaplamsız	2,00	176	Uygun	60	139,67
150	120	3	Kaplamsız	2,00	196	Yırtılma	40,2	142,68
150	120	12	Kaplamsız	2,00	196	Yırtılma	38,1	147,86
150	120	Değişken	Kaplamsız	2,00	190	Yırtılma	32	123,24
155	40	3	Kaplamsız	2,07	123	Uygun	60	105,24
155	80	3	Kaplamsız	2,07	179	Yırtılma	51	106,86
155	80	12	Kaplamsız	2,07	185	Yırtılma	48,6	138,74
155	80	Değişken	Kaplamsız	2,07	161	Yırtılma	57,6	127,44
155	120	3	Kaplamsız	2,07	198	Yırtılma	39,3	148,08
160	40	3	Kaplamsız	2,13	146	Yırtılma	57,7	107,13
160	80	3	Kaplamsız	2,13	157	Yırtılma	32	108,00
160	120	3	Kaplamsız	2,13	180	Yırtılma	30,8	135,91
165	40	3	Kaplamsız	2,20	129	Yırtılma	45	115,60
165	80	3	Kaplamsız	2,20	157	Yırtılma	24,8	119,48
165	80	12	Kaplamsız	2,20	187	Yırtılma	35,12	121,78
170	10	3	Kaplamsız	2,27	145	Uygun	60	113,57
170	10	12	Kaplamsız	2,27	130	Uygun	60	89,48
170	10	Değişken	Kaplamsız	2,27	115	Uygun	60	68,17
170	40	3	Kaplamsız	2,27	141	Yırtılma	46,2	95,29
170	40	Değişken	Kaplamsız	2,27	144	Yırtılma	40,2	92,62
175	10	3	Kaplamsız	2,33	126	Yırtılma	51,7	81,92
175	10	12	Kaplamsız	2,33	142	Yırtılma	42	94,45
175	10	Değişken	Kaplamsız	2,33	122	Yırtılma	53,6	78,89
175	40	3	Kaplamsız	2,33	144	Yırtılma	44,6	107,77
175	40	12	Kaplamsız	2,33	95	Yırtılma	21,6	63,78
175	40	Değişken	Kaplamsız	2,33	145	Yırtılma	39,2	99,63
175	80	3	Kaplamsız	2,33	155	Yırtılma	44,1	103,91
175	120	3	Kaplamsız	2,33	210	Yırtılma	56,8	154,68

3.2.3. Kaplamalı Sacların Çekilmesi

Sacların estetik görünüşü, derin çekme sonucu şekil almış parça için tekrar boyama ünitesine gerek kalmaması ve derin çekme işlem performansına olan olumlu etkilerinden dolayı numune saclar, elektrostatik toz boyama yöntemi kullanılarak sac yüzeyleri polyster (Polietilen Tereftalat) bazlı kaplama malzemesi ile kaplanmıştır.



Resim 3.12. Polimer kaplamalı derin çekilmiş deney numuneleri

Metal sac üzerine kaplama malzemesinin daha iyi tutunmasını sağlamak amacıyla bazı numunelerde elektro-statik kaplama yöntemi öncesi parça yüzeyi kumlamaya tabi tutuldu. Daha sonra kaplama gerçekleştirildi.

3.3. Sonuçlar

Polyester kaplamalı çelik sacların derin çekme deneyine ait genel sonuçlar Çizelge 3.7'de görülmektedir. Bu çizelgede farklı ilkel çapa sahip numunelerin farklı baskı plakası basınçlarında ve çekme hızlarında ortaya çıkan kalıplama kuvvetlerini ve işlemin uygun şekilde tamamlanıp tamamlanmadığı belirtilmiştir.

Çizelge 3.7. Polyester kaplamalı çelik sac derin çekme deney sonuçları

İlkel Çap [mm]	Baskı Plakası Basıncı [bar]	Çekme Hızı [mm/s]	Çekme Oramı [-]	Maksimum Kalıplama Kuvveti [kN]	İşlem Sonucu	Strok [mm]	Ortalama Kalıplama Kuvveti [kN]
150	40	3	2,00	124	Uygun	60	96,26
150	40	12	2,00	137	Uygun	60	106,03
150	40	Değişken	2,00	113	Uygun	60	90,45
150	80	3	2,00	146	Uygun	60	118,67
150	80	12	2,00	151	Uygun	60	122,92
150	80	Değişken	2,00	152	Uygun	60	123,57
150	120	3	2,00	181	Uygun	60	135,08
150	120	12	2,00	192	Uygun	60	159,27
150	120	Değişken	2,00	172	Uygun	60	144,38
155	40	3	2,07	127	Uygun	60	98,10
155	40	12	2,07	138	Uygun	60	105,85
155	80	3	2,07	158	Uygun	60	127,71
155	80	12	2,07	158	Uygun	60	127,13
155	80	Değişken	2,07	158	Uygun	60	127,14
155	120	3	2,07	198	Uygun	60	137,06
155	120	12	2,07	198	Uygun	60	154,49
155	120	Değişken	2,07	176	Uygun	60	146,13
160	40	3	2,13	130	Uygun	60	99,96
160	40	12	2,13	144	Ayrılma	60	106,55
160	80	3	2,13	167	Uygun	60	118,58
160	80	12	2,13	161	Uygun	60	128,33
160	80	Değişken	2,13	160	Uygun	60	128,46
160	120	12	2,13	201	Uygun	60	122,83
160	120	Değişken	2,13	183	Uygun	60	153,38
165	40	3	2,20	149	Ayrılma	60	98,51
165	40	12	2,20	137	Uygun	60	103,66
165	80	3	2,20	172	Uygun	60	136,08
165	80	12	2,20	165	Uygun	60	106,47
165	80	Değişken	2,20	162	Ayrılma	60	128,05
165	120	3	2,20	201	Uygun	60	155,84
165	120	12	2,20	182	Ayrılma	60	155,66
170	10	3	2,27	114	Uygun	60	83,59
170	10	12	2,27	115	Uygun	60	86,60
170	10	Değişken	2,27	106	Uygun	60	78,42
170	40	3	2,27	141	Uygun	60	85,47
170	40	12	2,27	136	Ayrılma	60	103,97
170	40	Değişken	2,27	133	Ayrılma	60	102,95
170	80	3	2,27	158	Yırtılma	58	129,15
170	80	12	2,27	215	Yırtılma	46,7	171,66

Çizelge 3.7 (Devam) Polyester kaplamalı çelik sac derin çekme deney sonuçları

İlkel Çap [mm]	Baskı Plakası Basıncı [bar]	Çekme Hızı [mm/s]	Çekme Oranı [-]	Maksimum Zımba Kuvveti [kN]	İşlem Sonucu	Strok [mm]	Ortalama Zımba Kuvveti [kN]
170	80	Değişken	2,27	220	Yırtılma	45,5	160,20
170	120	3	2,27	207	Ayrılma ve Yırtılma	60	168,36
170	120	12	2,27	226	Yırtılma	56,2	176,09
170	120	Değişken	2,27	222	Yırtılma	36	158,56
175	10	3	2,33	120	Uygun	60	82,21
175	10	12	2,33	122	Ayrılma	60	81,55
175	10	Değişken	2,33	111	Ayrılma	60	81,71
175	40	3	2,33	137	Uygun	60	102,93
175	40	12	2,33	140	Uygun	60	85,12
175	40	Değişken	2,33	136	Ayrılma	60	104,34
175	80	3	2,33	166	Uygun	60	130,23
175	80	12	2,33	221	Yırtılma	46,3	161,83
175	80	Değişken	2,33	169	Yırtılma	53,3	125,84
175	120	3	2,33	211	Ayrılma ve Yırtılma	54	166,56
175	120	12	2,33	225	Ayrılma ve Yırtılma	56,2	176,09
175	120	Değişken	2,33	201	Ayrılma ve Yırtılma	46,7	153,20

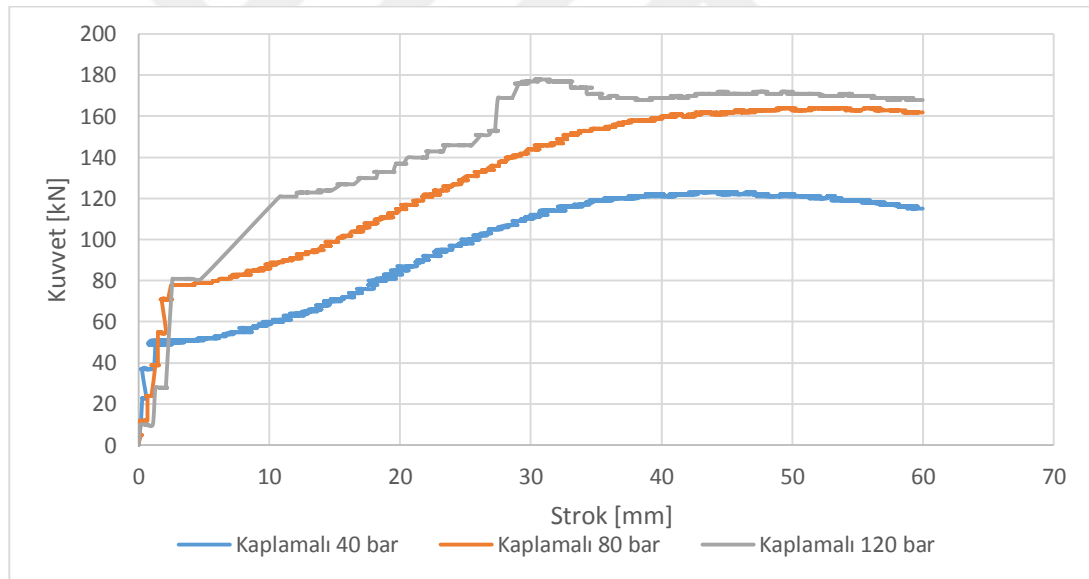
3.3.1. Farklı Baskı Plakası Basınçlarının Derin Çekme Kuvvetine Etkileri

Derin çekme kalıbı ve deney şartları değiştirilmeden polimer kaplamalı ve kaplamasız çelik sac numunelere farklı baskı plakası basınçları ve çekme hızları uygulanmıştır. Silindirik şekilde 75 mm çapında bir zımba ile derin çekme kalıbında 150, 155, 160, 165, 170 ve 175 mm ilkel çaplara sahip kaplamasız ve polimer kaplamalı DC01 çelik numunelere 10, 40, 80 ve 120 bar baskı plakası basınçları uygulanmış olup, zımba ilerleme mesafeleri ve derin çekme kuvvetleri yukarıda Çizelge 3.6 ve 3.7'de verilmiştir.

Hidrolik presin elektronik düzeneğinden her 0,1 mm zımba ilerlemesine karşılık gelen kuvvet değerleri ile grafikler oluşturulmuştur. Kuvvet-strok eğrileri ilk 3 mm sonunda baskı plakası basıncına ulaşmakta, daha sonra zımba ilerledikçe malzeme matris boşluğuna çekilmeye çalışıldığından şekil verme zorluğu artmakta ve 40-50 mm arasında kuvvet maksimumuna ulaşmaktadır. Bu aşamadan sonra malzeme baskı

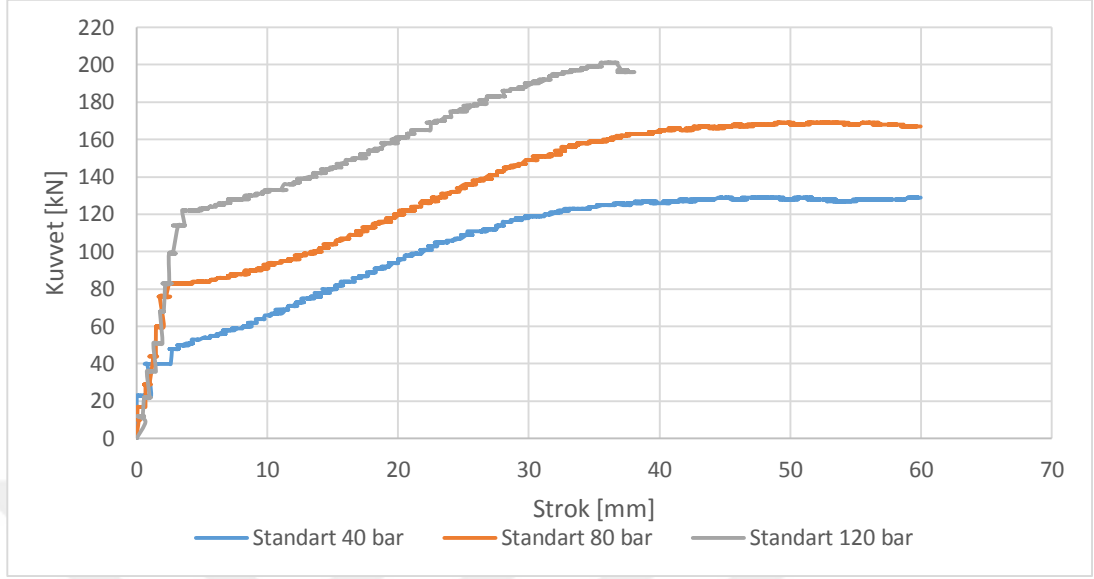
plakasının etkisinden kurtulmakta ve çekme kuvvetleri azalmaktadır. Çalışmada tüm deney numunelerine sabit baskı plakası basıncı uygulanmıştır. Dolayısıyla baskı plakası basıncı sabit kalmakla birlikte Eş. 2.9 ve Eş. 2.10'da belirtildiği üzere kuvvetin etki ettiği alan değiştiği için baskı plakasının parçaya uyguladığı kuvvet de değişmektedir.

Daha önce de belirtildiği üzere polimer kaplama sayesinde pürüzlülük yaklaşık 2,3 oranında azaldığından dolayı kalıp elemanları ve malzeme yüzeyi arasındaki sürtünmede, kaplamasız malzemeye göre önemli ölçüde bir azalma meydana gelmiştir. Bunun sonucu olarak kaplamalı numuneler her üç baskı plaka basıncında da hasara uğramadan etkin bir şekilde çekilebilmiştir (Şekil 3.8). Fakat baskı plakası basıncındaki artışla doğru orantılı olarak çekme kuvvetlerinde de artışlar görülmüştür.



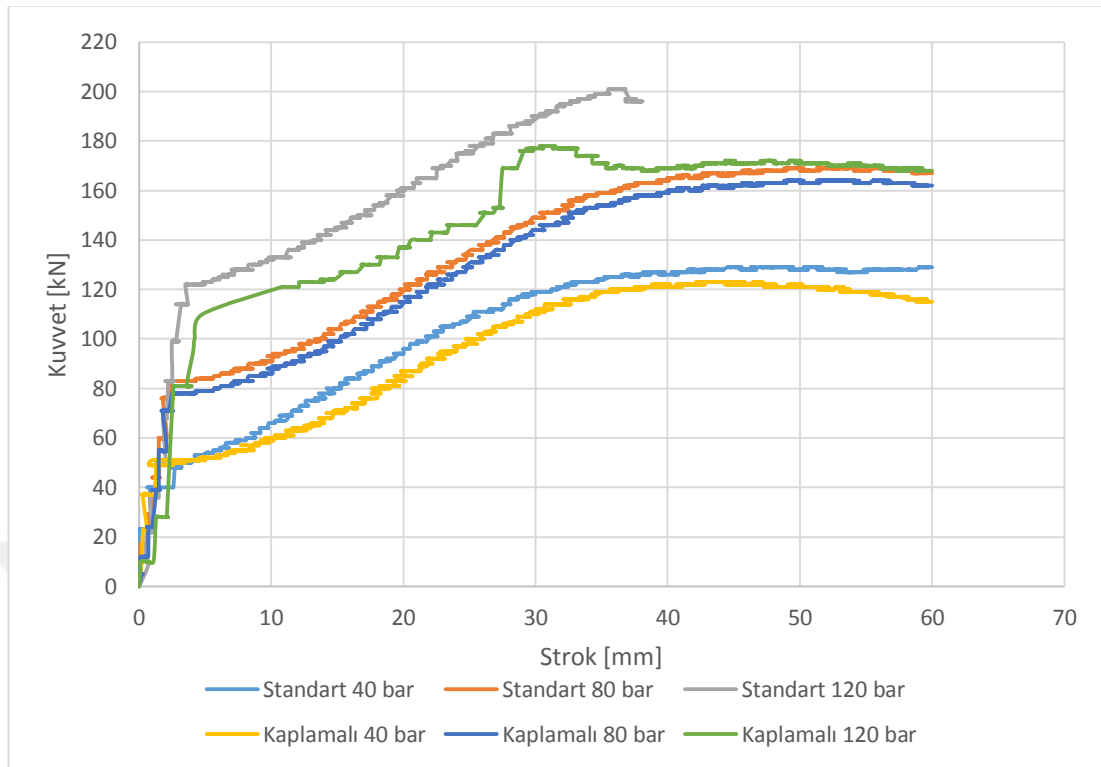
Şekil 3.8. Polimer kaplamalı deney numunelerinin grafik örnekleri (çekme oranı 2, çekme hızı 3 mm/s)

Deney şartları değiştirilmeden aynı baskı plakası basınçları kaplamasız çelik saclara da uygulanmıştır. 40 ve 80 bar baskı plakası basınçlarında hasarsız olarak derin çekme işlemi gerçekleştirilebilirken 120 bar baskı plakası basıncı uygulandığında deney numunesinde 38 mm zımba strokunda yırtılma meydana gelmiştir. Diğer basınçlarda az da olsa kuvvet artışları meydana gelse de numunelerde yırtılma ya da kırılma meydana gelmemiştir (Şekil 3.9).



Şekil 3.9. Kaplamasız deney numunelerinin grafik örnekleri (çekme oranı 2, çekme hızı 3 mm/s)

Şekil 3.10'da kaplamalı numunelerde kaplamasız olanlara göre 40 ve 80 bar baskı plakası basınçlarında çekme kuvvetleri önemli oranda azalmakla birlikte, 120 bar basınçta derin çekme süresince ortalama kuvvette %6 azalma meydana gelmiş ve parça hasarsız olarak etkin bir şekilde derin çekilebilmiştir.



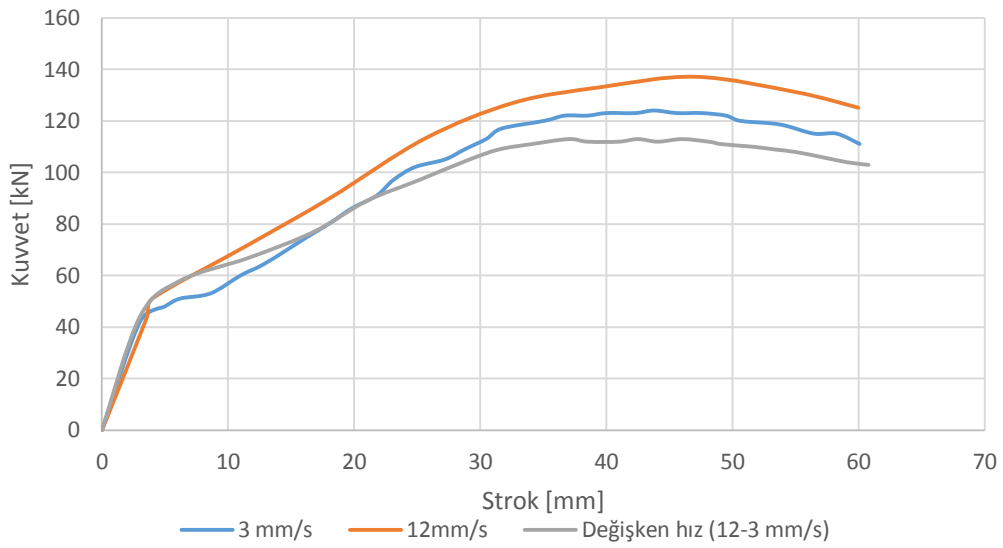
Şekil 3.10. Farklı baskı plakası basınçlarında kaplamalı ve kaplamasız numunelerin grafiklerinin karşılaştırılması (çekme oranı 2, çekme hızı 3 mm/s)

3.3.2. Farklı Çekme Hızlarının Derin Çekme Kuvvetine Etkileri

Derin çekme kalıbı ve deney şartları değiştirilmeden kaplamasız ve polimer kaplamalı çelik sac numunelere farklı derin çekme hızları uygulanmıştır. Bu hızlar 3 mm/s düşük hız, 12 mm/s yüksek hız ve 12 mm/s'den 3 mm/s'ye inen değişken hız olarak belirlenmiştir. Deney numunelerine, 3 ve 12 mm/s hızlar çekme stroğu boyunca sabit bir şekilde uygulanırken, değişken hız presin en büyük hızı olan 12 mm/s ile başlayarak 5 mm/s'ye doğrusal olarak düşürülmüş ve kuvvetlerin maksimum olduğu kritik noktada 3 mm/s'ye indirilmiştir. Literatürde bir takım çalışmalarda çekme hızının derin çekme işlemine önemli bir etkisinin olmadığı belirtilmesine rağmen, pek çok çalışmada ise malzemeye şekil değiştirmesi için yeterli zaman verildiği için çekme hızının azalmasının çekme işlemine olumlu etkileri olduğu belirtilmiştir. Bu çalışmada ise kaplamasız ve kaplamalı numunelerle gerçekleştirilen deneylerde çekme hızının derin çekme işleminde şekillendirilebilirliğin önemli bir parametresi olduğu

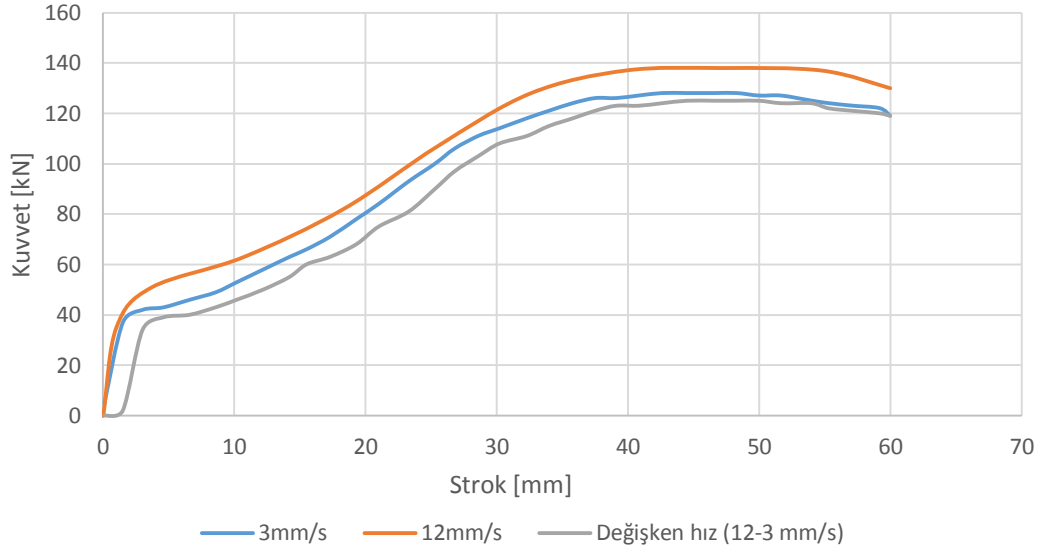
görülmüştür. Bu noktada malzemenin birim şekil değişim hızına duyarlılığı çekme hızının işlem performansına etkisi açısından önemli bir etkidir.

Şekil 3.11'deki grafikler incelendiğinde polimer kaplamalı deney numunelerinde çekme hızının kuvvetler üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu görülmekte olup değişken hızın derin çekme performansını arttırdığı anlaşılmaktadır.



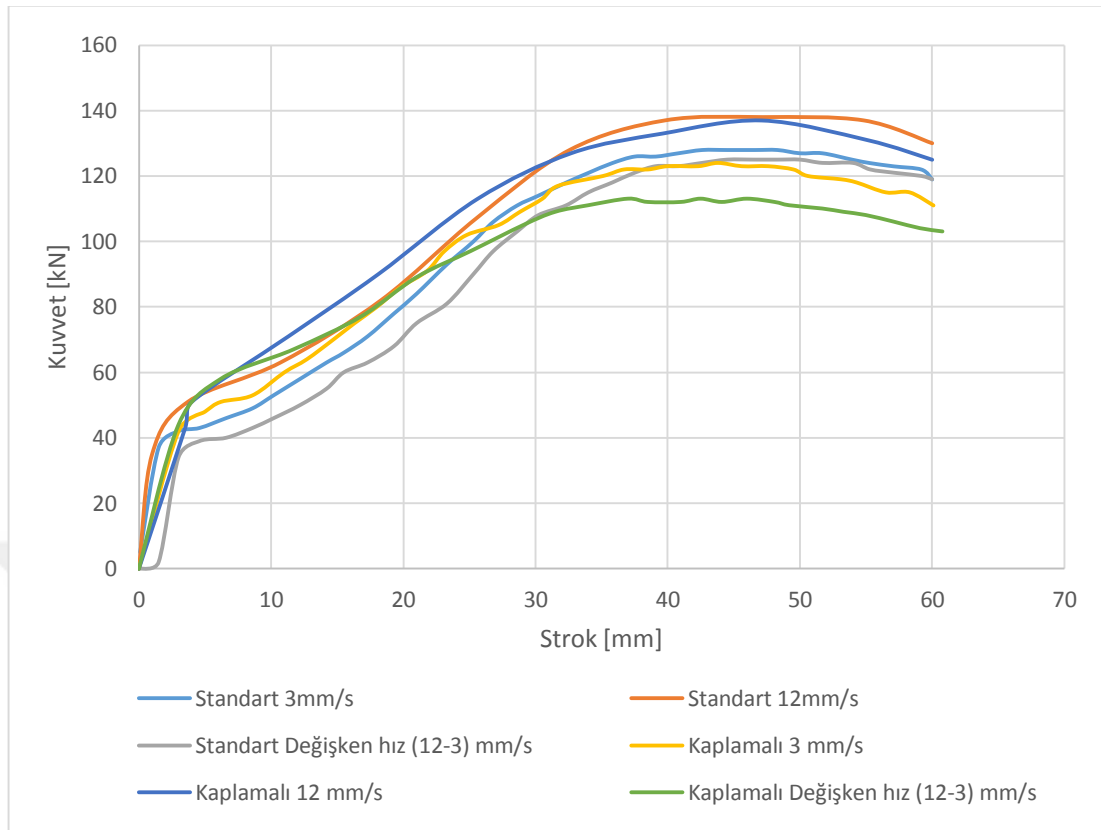
Şekil 3.11. Farklı derin çekme hızlarında polimer kaplamalı deney numunelerinin grafik örnekleri (çekme oranı 2, baskı plaka basıncı 40 bar)

Şekil 3.12'deki grafikler incelendiğinde kaplamasız deney numunelerinde çekme hızının kuvvetler üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu görülmekte olup değişken hızın derin çekme performansını arttırdığı anlaşılmaktadır.



Şekil 3.12. Farklı derin çekme hızlarında kaplamasız deney numunelerinin grafik örnekleri (çekme oranı 2, baskı plaka basıncı 40 bar)

Şekil 3.13'deki grafikler incelendiğinde en yüksek çekme kuvvetinin kaplamasız deney numunesinin sabit yüksek hızda derin çekilmesinde, en düşük çekme kuvvetinin ise kaplamalı deney numunesinin değişken hızda derin çekilmesinde ortaya çıktığı görülmektedir.

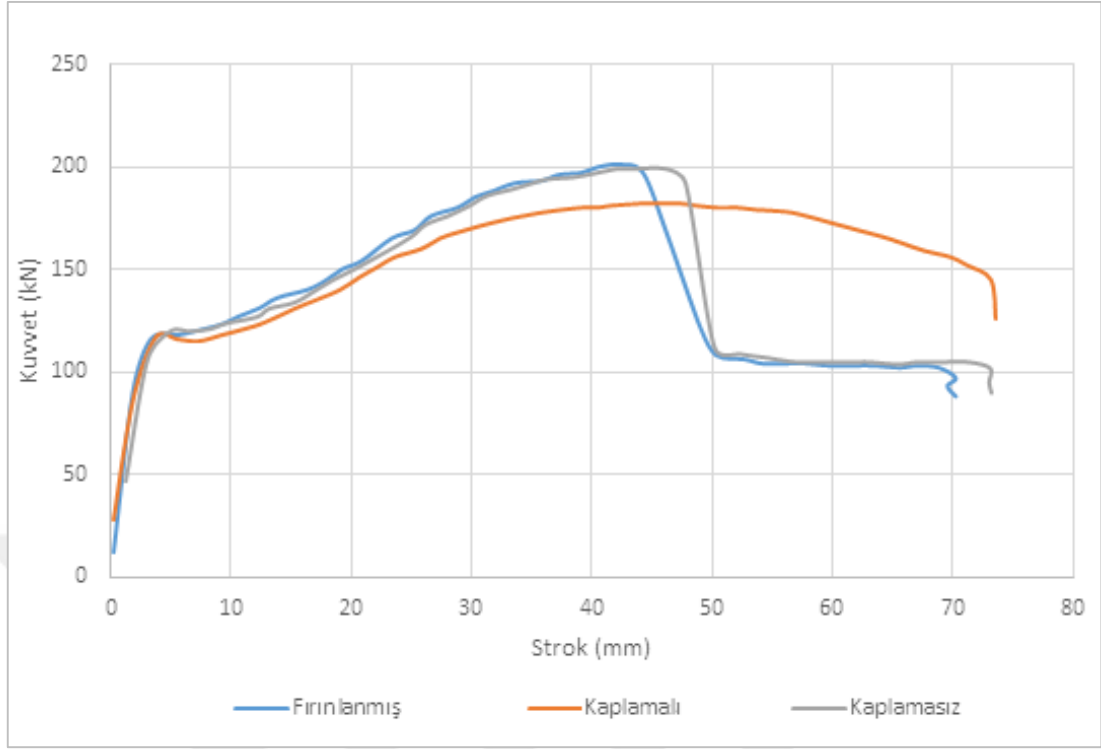


Şekil 3.13. Farklı çekme hızlarında deney numune grafiklerinin karşılaştırılması (çekme oranı 2, baskı plaka basıncı 40 bar)

Şekil 3.13’de görüldüğü üzere derin çekme hızı azaldıkça polimer kaplamalı ve kaplamasız numunelerde çekme kuvveti azalmıştır. Fakat kaplamalı numunelerde hızın etkisi çekme kuvvetleri açısından daha önemlidir.

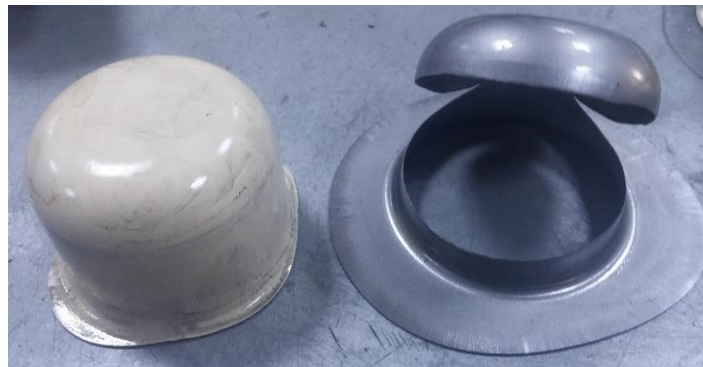
3.3.3. Aynı Şartlarda Kaplama Durumunun Değiştirilmesi

Polimer kaplamalı metal sacların kaplama işleminde parça üzerine püskürtülen toz taneciklerinin eriyerek yüzeye tutunması için yaklaşık 180 °C sıcaklıkta fırında 20 dakika bekletilmesi gerekmektedir. Bu sürecin çelik malzeme üzerindeki etkisinin görülebilmesi için bir takım deney numuneleri polimer kaplama yapılmaksızın aynı sıcaklıkta ve aynı süre boyunca fırında bekletilerek, çekme deneylerine tabi tutulmuş ve bu ısıl işlemin malzemenin mekanik özellikleri üzerinde kayda değer bir etkisinin olmadığı görülmüştür (Şekil 3.14).



Şekil 3.14. 150 mm ilkel çap, 130 bar basınç ve 3 mm/s hızda farklı kaplama durumlarının kuvvet-strok eğrileri

Resim 3.14'te 150 mm ilkel çapa sahip kaplamasız ve kaplamalı çelik sacların 130 bar baskı plakası basıncında 3 mm/s sabit hızla derin çekilmesi sonucunda ortaya çıkan ürünler görülmektedir.



(a)

(b)

Resim 3.13. Aynı parametrelerde (150 mm, 130 bar ve 3 mm/s) çekilmiş polimer kaplamalı (a) ve kaplamasız (b) numunelerin derin çekilmiş görüntüleri

3.3.4. Polimer Kaplamalı ve Kaplamasız Derin Çekme Deneylerinin Karşılaştırılması

Çizelge 3.8’de tüm deney şartlarında kaplamasız ve polimer kaplamalı çelik sacların derin çekme işleminde ortaya çıkan ortalama çekme kuvvetleri, ulaşılan zımba strokları ve ürün durumları belirtilmiştir.

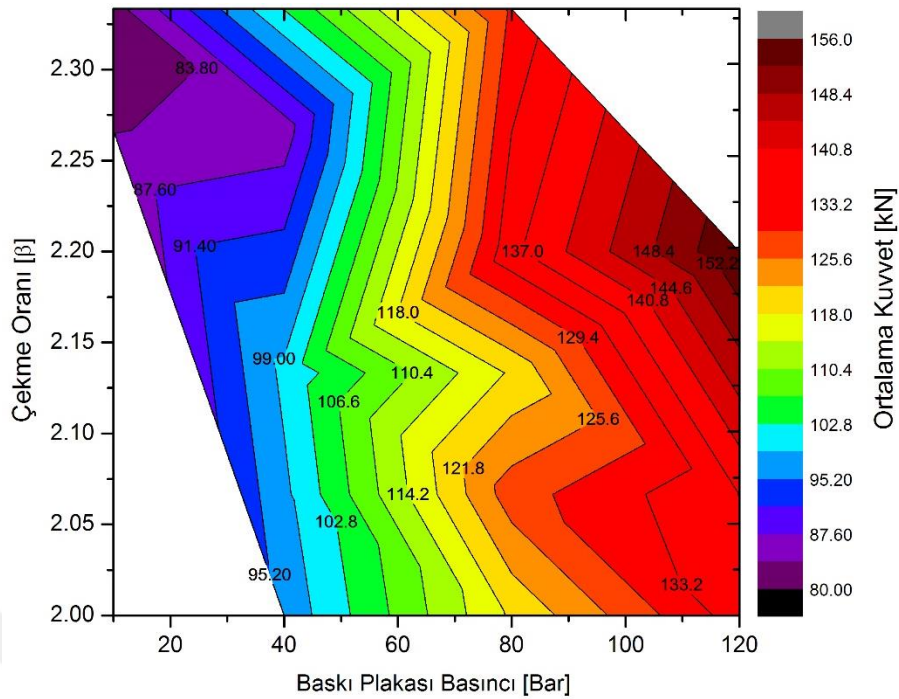
Çizelge 3.8. Deney sonuçlarının karşılaştırmalı tablosu

Çekme Oranı (β)	Baskı Plakası Basıncı [Bar]	Çekme Hızı [mm/s]	Polimer Kaplamalı			Kaplamasız		
			Durum [-]	Ort, Kuvvet [kN]	Strok [mm]	Durum [-]	Ort, Kuvvet [kN]	Strok [mm]
2,00	40	3	Uygun	96,26	60	Uygun	110,00	60
2,00	40	12	Uygun	106,03	60	Uygun	115,64	60
2,00	40	Değişken	Uygun	90,45	60	Uygun	98,51	60
2,00	80	3	Uygun	118,67	60	Uygun	129,64	60
2,00	80	12	Uygun	122,92	60	Uygun	97,13	60
2,00	80	Değişken	Uygun	123,57	60	Uygun	139,67	60
2,00	120	3	Uygun	135,08	60	Yırtılma	142,86	40,2
2,00	120	12	Uygun	159,27	60	Yırtılma	147,86	38,1
2,00	120	Değişken	Uygun	144,38	60	Yırtılma	123,24	32
2,07	40	3	Uygun	98,10	60	Uygun	105,24	60
2,07	80	3	Uygun	127,71	60	Yırtılma	106,86	51
2,07	80	12	Uygun	127,13	60	Yırtılma	138,74	48,6
2,07	80	Değişken	Uygun	127,14	60	Yırtılma	127,44	57,6
2,07	120	3	Uygun	137,06	60	Yırtılma	148,08	39,3
2,07	120	12	Uygun	154,49	60	-	-	-
2,07	120	Değişken	Uygun	146,13	60	-	-	-
2,13	40	3	Uygun	99,96	60	Yırtılma	107,13	57,7
2,13	40	3	Ayrılma	106,55	60	-	-	-
2,13	80	3	Uygun	118,58	60	Yırtılma	108,00	32
2,13	80	12	Uygun	128,33	60	-	-	-
2,13	80	Değişken	Uygun	128,46	60	-	-	-
2,13	120	3	Uygun	120,56	60	Yırtılma	135,91	30,8
2,13	120	12	Uygun	122,83	60	-	-	-
2,13	120	Değişken	Uygun	153,38	60	-	-	-
2,20	40	3	Ayrılma	98,51	60	Yırtılma	-	45
2,20	40	12	Uygun	103,66	60	-	-	-
2,20	80	3	Uygun	136,08	60	Yırtılma	119,48	24,8
2,20	80	12	Uygun	106,47	60	Yırtılma	121,78	35,12
2,20	80	Değişken	Ayrılma	128,05	60	-	-	-
2,20	120	3	Uygun	155,84	60	-	-	-
2,20	120	12	Ayrılma	155,66	60	-	-	-
2,27	10	3	Uygun	83,59	60	Uygun	113,57	60
2,27	10	12	Uygun	86,60	60	Uygun	89,48	60

Çizelge 3.8 (Devam) Deney sonuçlarının karşılaştırmalı tablosu

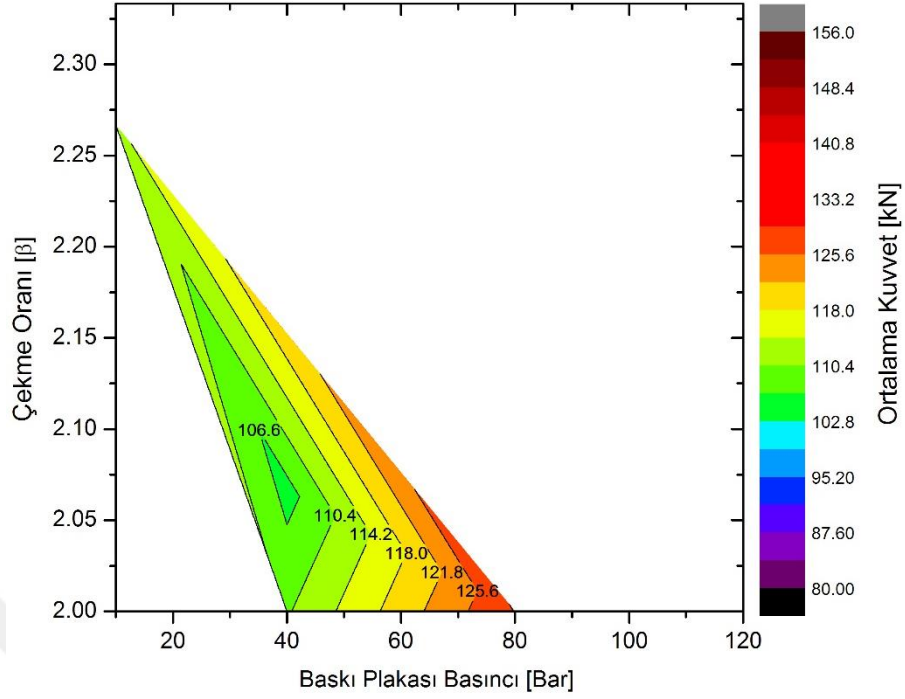
Çekme Oranı (β)	Baskı Plakası Basıncı [Bar]	Çekme Hızı [mm/s]	Polimer Kaplamalı			Kaplamasız		
			Durum [-]	Ort. Kuvvet [kN]	Strok [mm]	Durum [-]	Ort. Kuvvet [kN]	Strok [mm]
2,27	10	Değişken	Uygun	78,42	60	Uygun	68,17	60
2,27	40	3	Uygun	85,47	60	Yırtılma	95,29	46,2
2,27	40	12	Ayrılma	103,97	60	-	-	-
2,27	40	Değişken	Ayrılma	102,95	60	Yırtılma	92,62	40,2
2,27	80	3	Yırtılma	129,15	58	-	-	-
2,27	80	12	Yırtılma	171,66	46,7	-	-	-
2,27	80	Değişken	Yırtılma	160,20	45,5	-	-	-
2,27	120	3	Ayrılma	168,36	60	-	-	-
2,27	120	12	Yırtılma	176,09	56,2	-	-	-
2,27	120	Değişken	Yırtılma	158,56	36	-	-	-
2,33	10	3	Uygun	82,21	60	Yırtılma	81,92	51,7
2,33	10	12	Ayrılma	81,55	60	Yırtılma	94,45	42
2,33	10	Değişken	Ayrılma	81,71	60	Yırtılma	78,89	53,6
2,33	40	3	Uygun	102,93	60	Yırtılma	107,77	44,6
2,33	40	12	Uygun	85,12	60	Yırtılma	63,78	21,6
2,33	40	Değişken	Ayrılma	104,34	60	Yırtılma	99,63	39,2
2,33	80	3	Uygun	130,23	60	Yırtılma	103,91	44,1
2,33	80	12	Yırtılma	161,83	46,3	-	-	-
2,33	80	Değişken	Yırtılma	125,84	53,3	-	-	-
2,33	120	3	Yırtılma	166,56	54	Yırtılma	154,68	56,8
2,33	120	12	Yırtılma	176,09	56,2	-	-	-
2,33	120	Değişken	Yırtılma	153,20	46,7	-	-	-

Deneilerin sonucunda çekme oranları ve uygulanan baskı plakası basınçlarına göre oluşan ortalama kuvvetler temel veri olarak alınmıştır. Şekil 3.15 - 3.20'da gösterilen üç boyutlu grafiklerde deformasyon oluşmayan deneyler değerlendirilmiştir. Grafiklerdeki boş alanlar, yırtılma meydana gelen ya da ihtiyaç duyulmadığı için yapılmayan deneyleri ifade etmektedir. Bu grafikler sayesinde gerçekleştirilen deneylerde söz konusu kalıp geometrileri için kaplamasız ve polimer kaplamalı çelik saclara hangi çekme oranlarında ne kadar baskı plakası basıncı uygulanabileceğini ifade eden sınırlar ve bu şekillendirme işlemleri sonucunda oluşacak ortalama çekme kuvveti değerleri görülebilmektedir. Grafiklerin sağ tarafında bulunan göstergeler ortalama kuvvet seviyesine bağlı olarak değişen renk ölçekleri olup tüm grafiklerde standart şekilde belirlenmiştir. Bu sayede grafikler kendi aralarında aynı renklerle kıyaslanabilmektedirler.



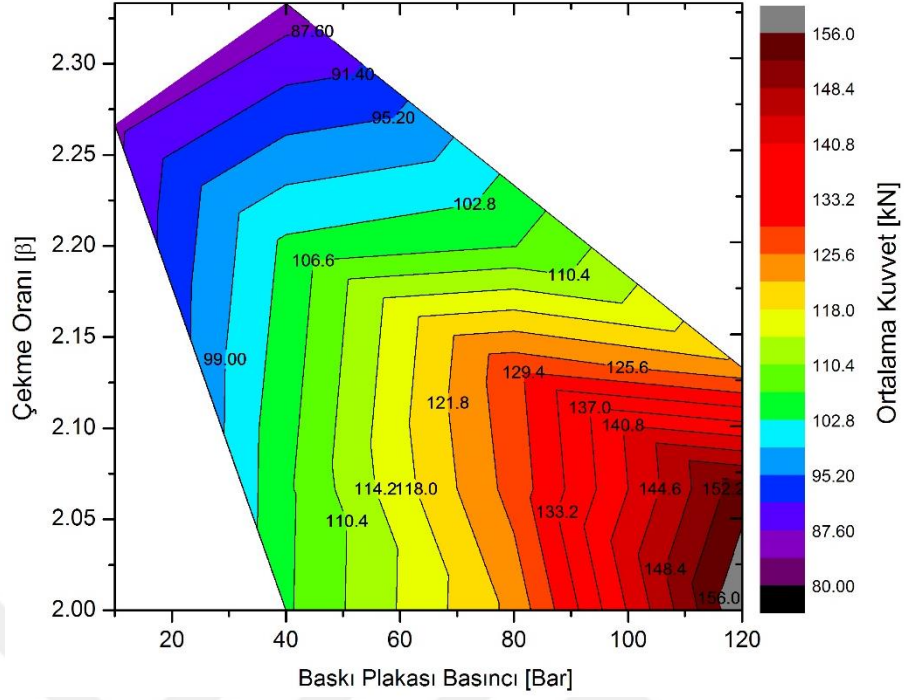
Şekil 3.15. Polimer kaplamalı çelik sacların 3 mm/s hızla derin çekilmesinde elde edilen değerler

Şekil 3.15'teki grafikte, Çizelge 3.7'de belirtilen farklı ilkel çaplara (150-155-160-165-170-175 mm) sahip polimer kaplamalı çelik sac numunelerin 3 mm/s çekme hızında aynı deney şartlarında farklı baskı plakası basınçlarında (10-40-80-120 bar) derin çekme işlemine tabi tutulması sonucunda oluşan ortalama kuvvetler görülmektedir. Beklenildiği üzere, grafikte çekme oranı ve baskı plakası basıncı arttıkça ölçülen ortalama kuvvetler de artmaktadır. 10, 40 ve 80 bar baskı plakası basınçlarında tüm çekme oranlarındaki numuneler uygun olarak çekilebilirken, 120 bar baskı plakası basıncında numuneler ancak 2,20 çekme oranına kadar çekilebilmektedir. En büyük ortalama kuvvet değerinin 156 kN ile söz konusu durumda meydana geldiği görülmektedir. En düşük ortalama kuvvet değeri olan 80 kN ise 10 ile 40 bar aralığında basınç uygulanan deneylerde 2,27 ve üzeri çekme oranlarında oluşmaktadır.



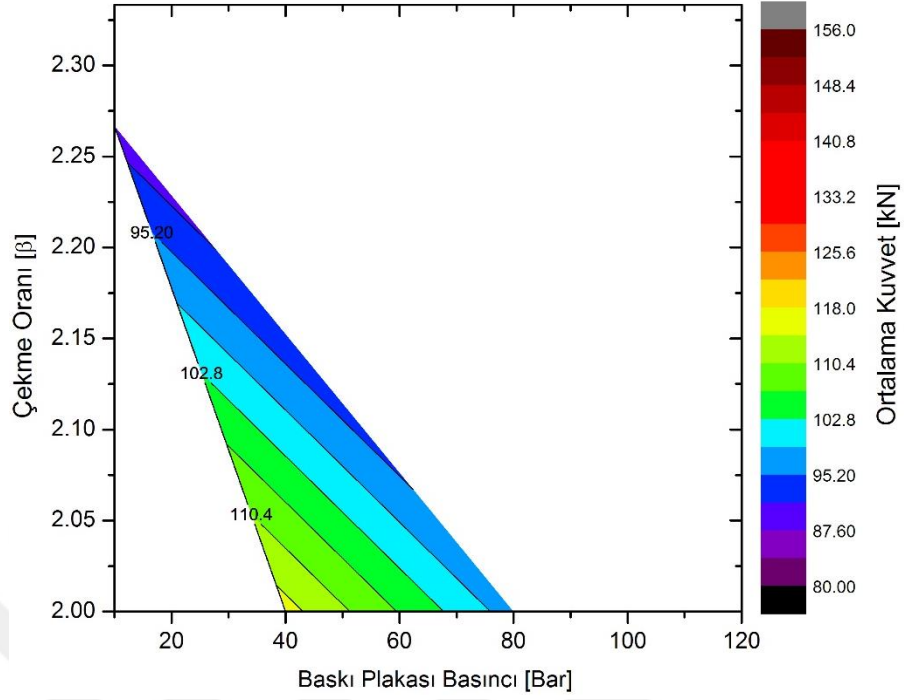
Şekil 3.16. Kaplamasız çelik sacların 3 mm/s hızla derin çekilmesinde elde edilen değerler

Şekil 3.16'teki grafikte, aynı sabit hızla (3 mm/s) gerçekleştirilen ve Çizelge 3.6'da belirtilen kaplamasız çelik sac numunelere uygulanan derin çekme işlemine ait veriler kullanılmıştır. Derin çekme işlemlerinde 80 bar baskı plakası basıncının üstündeki deneylerde başarı sağlanamamıştır. En düşük çekme oranı olan 2 için 80 bar baskı plakası basıncında işlem sorunsuz tamamlanırken, 2,27 değerine sahip maksimum çekme oranına ancak 10 bar baskı plakası basıncında sorunsuz olarak ulaşılabilmektedir. Dolayısıyla kaplama uygulanmamış çelik sac numunelerde en fazla 125 kN ortalama kuvvet meydana gelmiştir. Şekil 3.15 - 3.16'teki grafikler karşılaştırıldığında polimer kaplamanın derin çekme işleminde ne kadar etkili olduğu açıkça görülmektedir. Polimer kaplamalı numunelerin derin çekilmesinde kaplamasız çelik saclara kıyasla ortalama kalıplama kuvvetinde %10 azalma meydana gelmektedir.



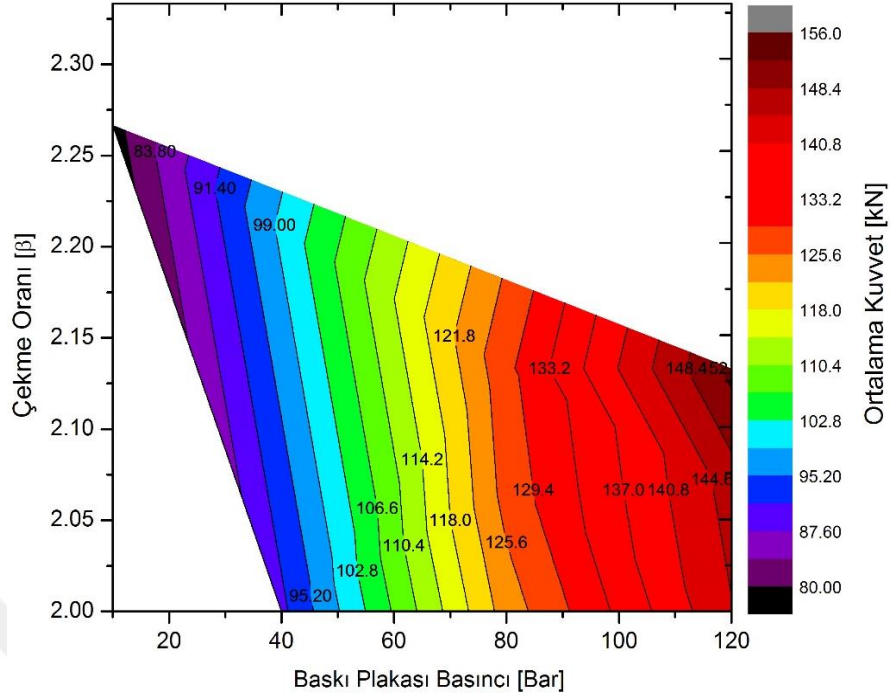
Şekil 3.17. Polimer kaplamalı çelik sacların 12 mm/s hızla derin çekilmesinde elde edilen değerler

Aynı şartlarda 3 mm/s hızla 120 bar baskı plakası basıncı uygulandığında 2,33 çekme oranına sahip deneyler hasarsız sonuçlanırken çekme hızı Şekil 3.17'de görüldüğü üzere 12 mm/s yapıldığında ancak 2,27 çekme oranına ulaşılabilmektedir. Maksimum ortalama kuvvet, 2 ile 2,07 çekme oranı aralığında ve 120 bar baskı plakası basıncında ortaya çıkmaktadır. En yüksek çekme oranına sahip numuneler 10 ile 40 bar baskı plakası basıncı aralığında hasar oluşmadan çekilebilmektedir. Buradan, derin çekme uygulamalarında çekme hızı yüksek olduğunda, çekme oranı ve baskı plakası basıncının düşük seçilmesi gerektiği görülebilmektedir.



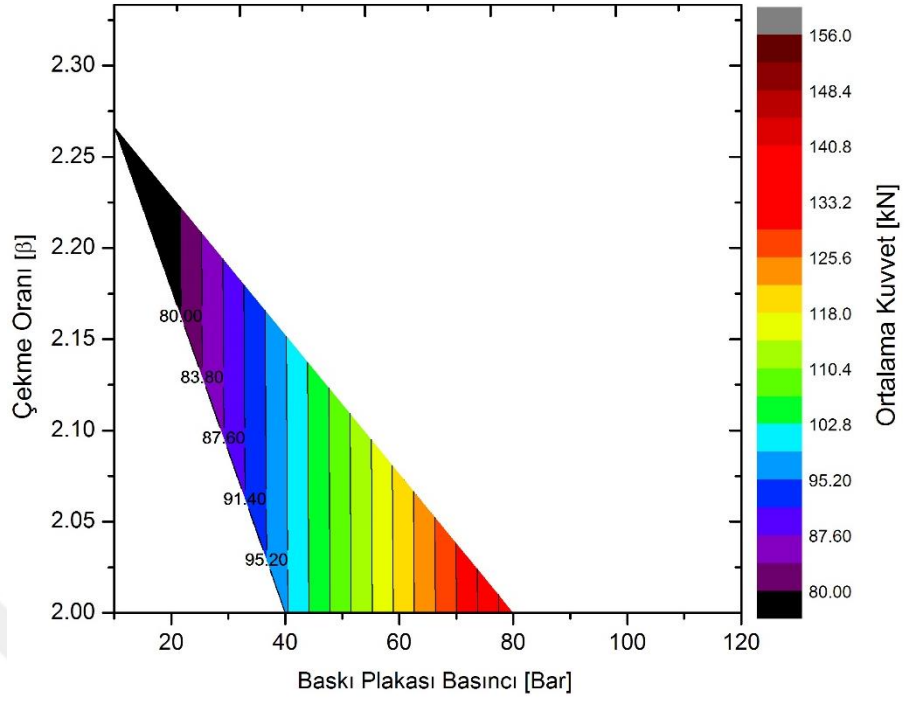
Şekil 3.18. Kaplamasız çelik sacların 12 mm/s hızla derin çekilmesinde elde edilen değerler

Kaplamasız çelik sacların 3 ve 12 mm/s çekme hızlarıyla gerçekleştirilen derin çekme işlemlerinde çekme oranı ve baskı plaka basıncı sınırlarında değişiklik olmamakla birlikte, deneylerde ortaya çıkan ortalama kuvvetlerde ortalama %12 düşüş görülmektedir. Benzer şekilde, 80 bar baskı plakası basıncı üzerinde hasar oluşmadan derin çekme işlemi tamamlanamamaktadır.



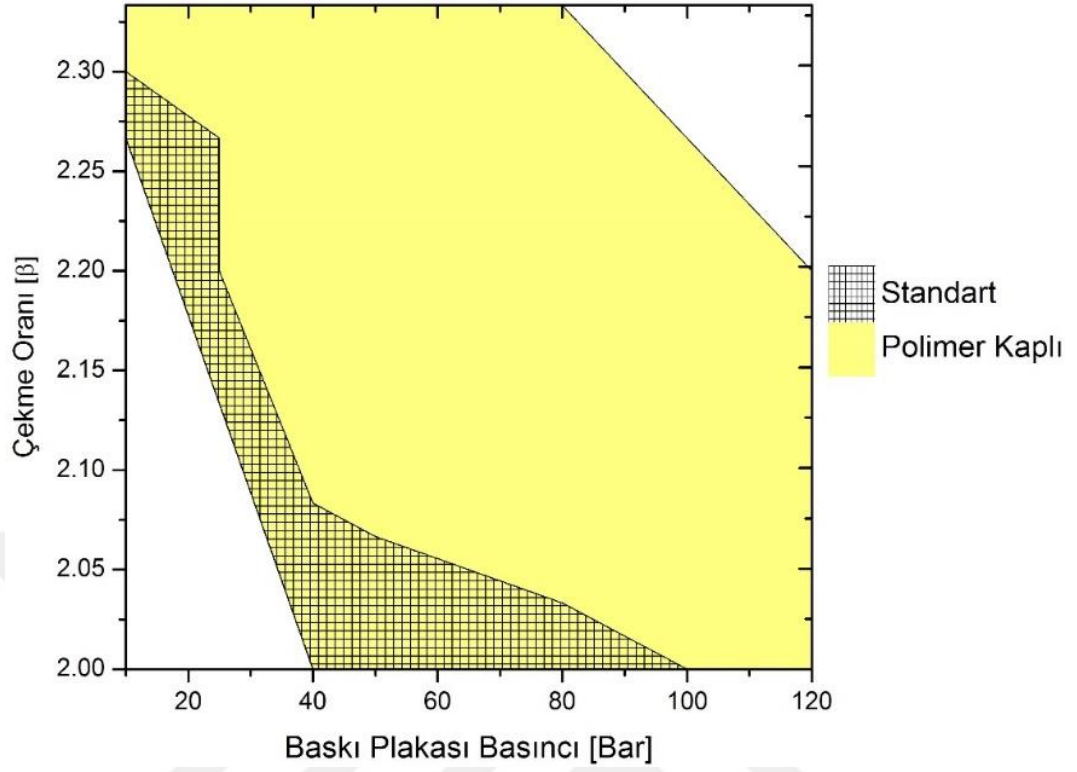
Şekil 3.19. Polimer kaplamalı çelik sacların değişken hızla derin çekilmesinde elde edilen değerler

Derin çekme işlemlerinde kullanılan hidrolik pres düzeneğinin en düşük ve en yüksek sabit hızların yanısıra en yüksek hızdan parçada en büyük çekme kuvvetlerinin oluştuğu kritik noktaya kadar azalan bir değişken hız da kullanılmıştır. Şekil 3.19'deki grafikte görüldüğü üzere değişken çekme hızı durumunda ortalama kuvvetler sabit çekme hızı durumlarına göre azalmaktadır. Bunun yanında, en büyük çekme oranı olan 2,27 değeri ile sadece 10 bar baskı plakası basıncında hasarsız bir derin çekme gerçekleştirilebilmektedir. Sabit hızlarda olduğu gibi 120 bar baskı plakası basıncı ile ancak 2,13 çekme oranı değerine ulaşılabilmektedir.



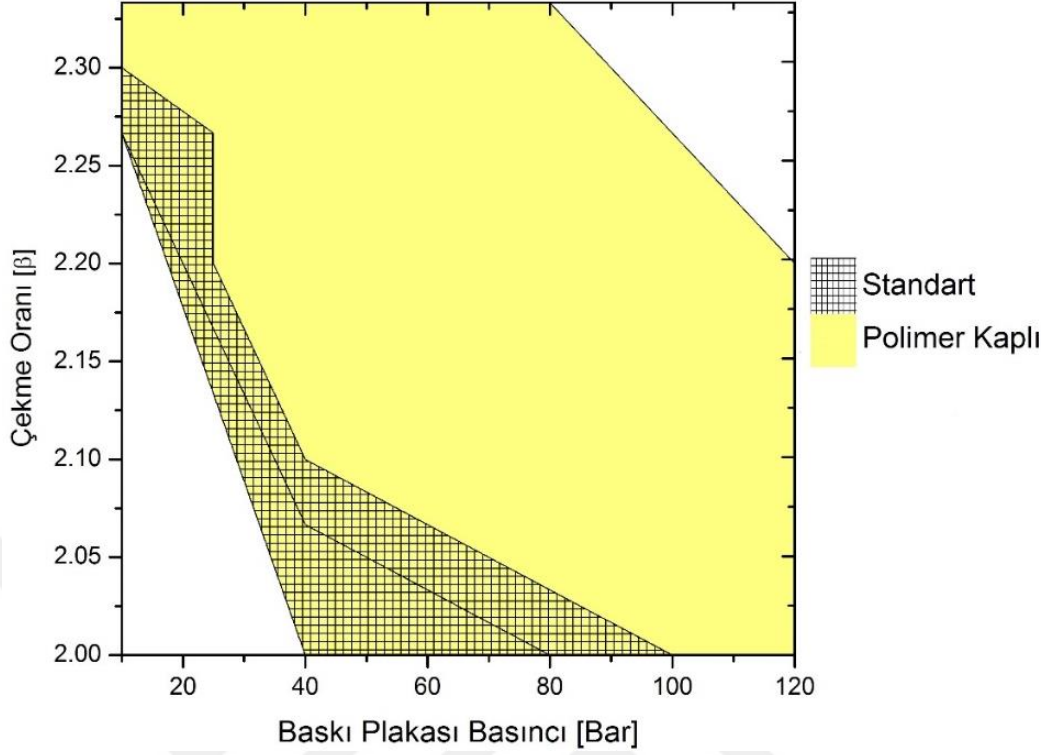
Şekil 3.20. Kaplamasız çelik sacların değişken hızla derin çekilmesinde elde edilen değerler

Şekil 3.20'deki grafikte görüldüğü üzere kaplamasız çelik sacların derin çekilebilirliği değişken hız şartlarında da oldukça kısıtlıdır. Sabit çekme hızlarındaki kaplamasız çelik sacların derin çekilmesinde olduğu gibi bu hızda da 2,27 oranına 10 barda ulaşabilmekte, 40 ile 80 bar arasında çekme oranı değeri 2'nin üzerine çıkamamaktadır.



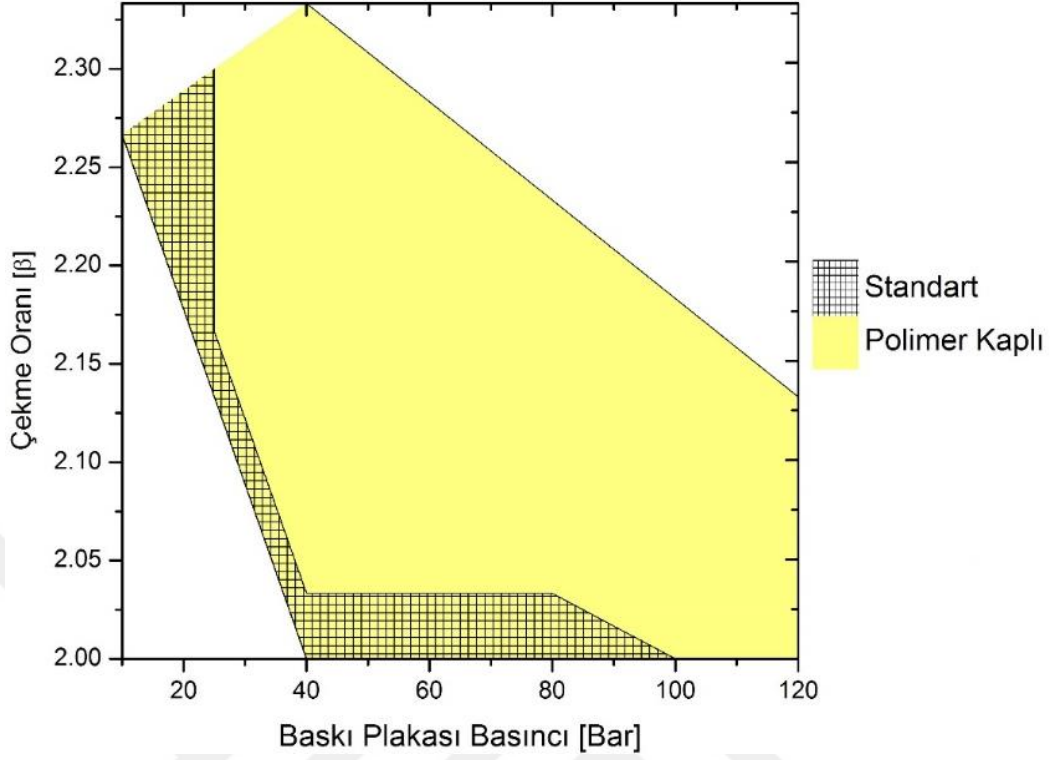
Şekil 3.21. Polimer kaplamalı ve kaplamasız hasarsız deney sonuçlarına göre derin çekme sınırları

Şekil 3.21'de görülen grafik, çalışmada yapılan tüm polimer kaplamalı ve kaplamasız çelik sac derin çekme işlemlerinden hasara uğramadan sorunsuz olarak tamamlanabilen numunelerin şekillendirilebilirlik alanlarını göstermektedir. Sarı renkli bölgeler baskı plakası basıncı ve çekme oranına bağlı olarak polimer kaplamalı çelik saclar için etkin derin çekme sınırlarını göstermektedir. Kaplamasız çelik sac numunelerin etkin derin çekilebilirlik sınırları ise taralı alanlarla ifade edilmektedir. Taralı olmayan düz sarı bölge polimer kaplama işleminin etkisini açıkça göstermektedir.



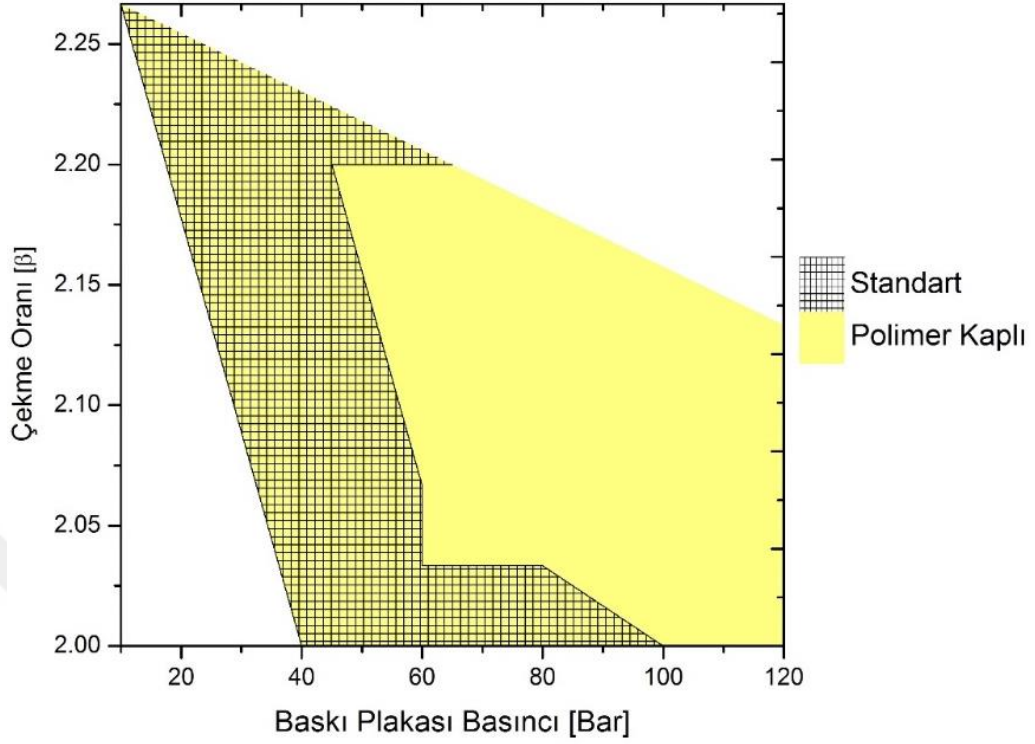
Şekil 3.22. 3 mm/s hızla hasarsız derin çekme işlemine tabi tutulmuş kaplamasız ve polimer kaplamalı çelik sac numunelerin çekme sınırları

Şekil 3.22'deki grafik, kaplamasız ve polimer kaplamalı çelik sac numunelerin 3 mm/s hızla derin çekilmiş olanlarını göstermektedir. Derin çekme işleminin düşük hızla gerçekleştirilmesi esnasında malzemenin plastik şekil değiştirmesine daha fazla zaman tanındığı için, hasar oluşmadan tamamlanan deney sayısı fazladır. Polimer kaplamalı numuneler 80 bar baskı plakası basıncı ile 2,33 çekme oranında, 120 bar baskı plakası basıncı ile 2 çekme oranında etkin bir şekilde derin çekilebilirken; kaplamasız deney numunelerinin 2,30 çekme oranına ancak 10 bar baskı plakası basıncında ulaşabilmekte ve 80 bar baskı plakası basıncı ile yaklaşık 2 çekme oranında sorunsuz olarak derin çekme işlemi gerçekleştirilebilmektedir.



Şekil 3.23. 12 mm/s hızla hasarsız derin çekme işlemine tabi tutulmuş kaplamasız ve polimer kaplamalı çelik sac numunelerinin çekme sınırları

Şekil 3.23'deki grafikte görülen sonuçlarda derin çekme hızı yüksek olduğu için şekillendirilebilirlik sınırı, hem kaplamasız hem de polimer kaplamalı numunelerde daralmıştır. 12 mm/s çekme hızıyla, 40 bar baskı plakası basıncı uygulandığında 2,33 çekme oranında derin çekme işlemi hasar oluşmadan tamamlanabilirken; 120 bar baskı plakası basıncı ile en fazla 2,13 çekme oranına ulaşılabilmektedir. Benzer şekilde, kaplamasız numuneler hasar oluşmadan ancak küçük bir bölgede derin çekilebilmektedir.

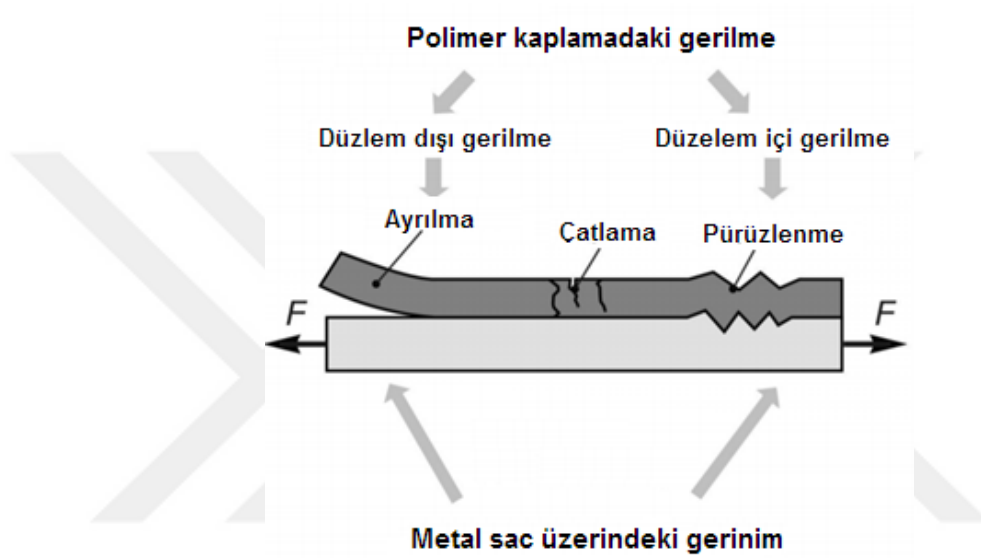


Şekil 3.24. Değişken hızla hasarsız derin çekme işlemine tabi tutulmuş kaplamasız ve polimer kaplamalı çelik sac numunelerinin çekme sınırları

Şekil 3.24'teki grafikten görüldüğü üzere, polimer kaplamalı numuneler 2,33 çekme oranında sadece 10 bar baskı plakası basıncı ile çekilebilmekte, 120 bar baskı plakası basıncı ile ancak 2,13 çekme oranına ulaşılabilir. Bununla birlikte, kaplamasız deney numunelerinin sabit çekme hızıyla gerçekleştirilen derin çekme işlemlerine göre hasar oluşmadan daha yüksek oranda çekilebildiği görülmektedir.

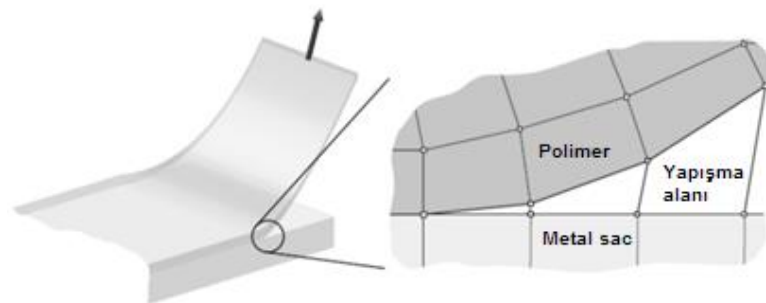
3.3.5. Kaplamalı Derin Çekme İşleminde Karşılaşılan Hatalar

Metal saclar ile yapılan derin çekme işlemlerinde karşılaşılan hatalar bilinmektedir. Fakat polimer kaplamalı metal sacların derin çekilmesinde bilinen hatalara ilave olarak kaplamanın ayrılması (delaminasyon), yırtılması, aşınması ve çizilmesi gibi hatalarla da karşılaşılabilir.



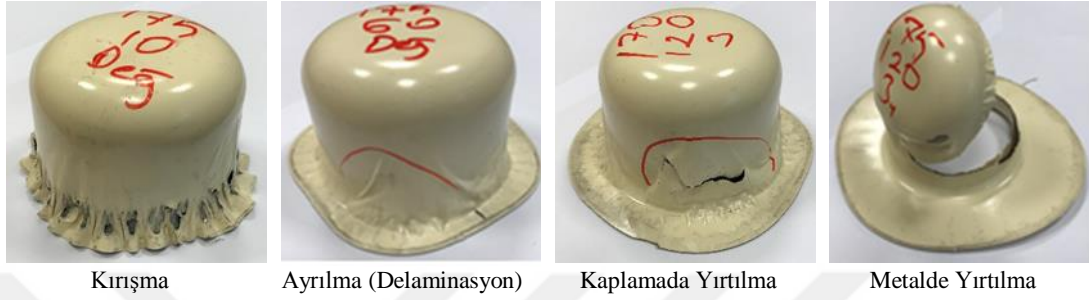
Şekil 3.24. Polimer kaplama ile metal sac arasında oluşabilecek birim şekil değişimleri (Pham, 2011)

Şekil 3.26’te tabakalı kompozit malzemelerde ortaya çıkan ayrılma hasarı şematik olarak görülmektedir.



Şekil 3.26. Polimer kaplamalı metal saclarda ayrılma (delaminasyon) (Pham, 2011)

Polimer kaplamalı bir parçanın uygun derin çekilebilmesi için yukarıda bahsedilen hataların olmaması ya da müsaade edilen sınırlar içinde olması gerekir. Resim 3.14'te polimer kaplamalı DC01 sac numunelerle gerçekleştirilen derin çekme işlemleri sonucunda karşılaşılmış hasarlar görülmektedir.



Resim 3.14. Polimer kaplamalı çelik sacların derin çekilmesinde karşılaşılan hatalar

3.3.6. Derin Çekme Sonrasında Çelik Sac ve Kaplama Kalınlık Değişiminin İncelenmesi

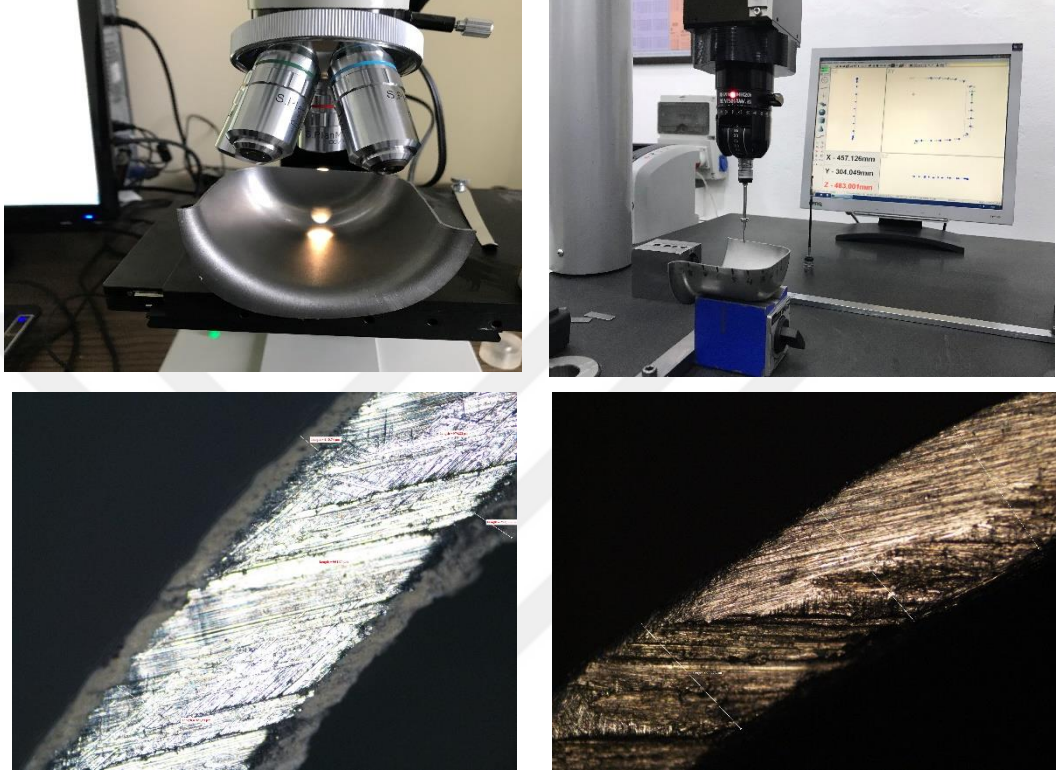
3.3.6.1. Çelik Sac Kalınlık Değişiminin İncelenmesi

Derin çekme işlemi öncesinde 1 mm kalınlığa sahip DC01 çelik sac, çekme kuvvetlerinin etkisi ile parça geometrisinin belirli bölgelerinde kalınlık değişimine uğramaktadır. Parçada istenilmeyen bu zorunlu değişim, ürünün kullanılacağı şartlar ve tasarımda istenilen sınır değerleri aşmadıkça uygun kabul edilir. Kalınlık değişimi ölçmek için Resim 3.15'te görüldüğü şekilde kaplamasız ve polimer kaplamalı numuneler kesilmiştir.



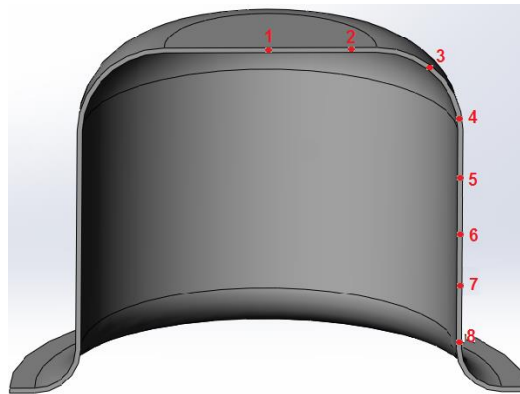
Resim 3.15. Kalınlık ölçümleri için kesit alınmış numuneler

Kalınlık ölçümünü gerçekleştirmek için nihai ürünlerden alınan kesitler mikroskop, koordinat ölçüm cihazı ve mikrometre gibi ölçüm ekipmanları (Resim 3.16) kullanılarak Şekil 3.27’da görülen kalınlık değişim grafikleri oluşturulmuştur.



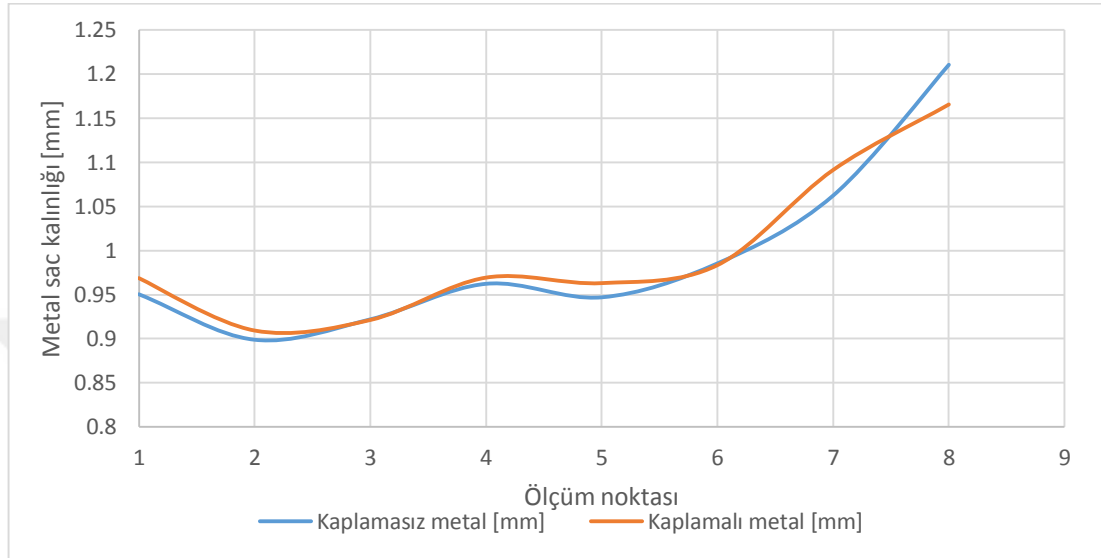
Resim 3.16. Derin çekilmiş ürünlerin farklı ölçüm yöntemleri ile kalınlık ölçümleri

Resim 3.17’de kalınlık değişim oranlarının belirlenmesinde dikkate alınan kritik ölçüm noktaları görülmektedir.



Resim 3.17. Kalınlık ölçümü yapılan deney parçalarında ölçüm noktaları

Kalınlık değişim oranının düşürülmesi ürünün mukavemeti açısından son derece önemlidir. Bu değişim oranları, sınır değerlerini aştığında 2-5 noktaları arasında aşırı incelme sonucunda yırtılma ya da 8 bölgesinde aşırı kalınlaşma meydana gelmektedir.



Şekil 3.27. Polimer kaplamalı ve kaplamasız çelik sacların derin çekme sonrası kalınlık dağılımları

Polimer kaplama yapılarak derin çekilen çelik sacın kalınlığı ile kaplama yapılmadan çekilen çelik sacın kalınlığı arasında ölçülen noktalar arasında çok büyük farklar görülmemekle birlikte, polimer kaplamalı sacların tepesinde 1 ile 2 noktaları arasında, yan duvarlarında 4 ile 5 noktaları arasında ve 6 ile 8 noktaları arasında kalınlık değişiminde azalmalar olmaktadır. Metal malzeme matris boşluğuna zımba tarafından itilirken matris yuvarlatma yarıçapına sürtünerek akan sac malzeme bir nevi sıvama uygulaması geçirerek, kalınlık parça eteklerine doğru artmaktadır. Bu durumun, kaplamanın pürüzsüzlüğü sayesinde sürtünme kuvvetinin düşerek, kalınlık artışının azalmasından kaynaklandığı düşünölmektedir.

3.3.6.2. Kaplama Kalınlığı Değişiminin İncelenmesi

Elektrostatik toz boyama sistemi ile kaplanan sacların farklı bölgelerinde kaplama kalınlığı değişebildiği için, öncelikle derin çekme yapılmadan numuneler üzerinde

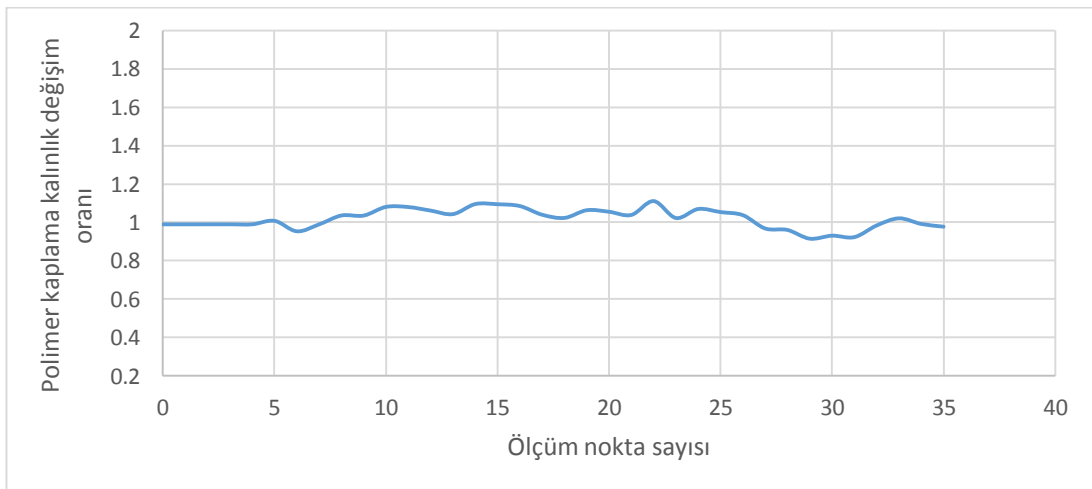
belirli noktalar işaretlenmiş ve bu noktalardaki kaplama kalınlıkları ölçülerek derin çekme sonrasındaki kalınlıklarla karşılaştırmak üzere kayıt edilmiştir.



Resim 3.18. Derin çekme öncesi numunelerin kaplama kalınlıklarının ölçümü

Polimer kaplamalı çelik sac numunelerin belirlenmiş noktalardaki polimer kalınlığı kalınlık ölçme cihazı ile ölçülüp kayıt edilmiştir. Deney numuneleri otomasyonlu bir sistem kullanılarak sabit bir hız ve mesafeden toz püskürtmesine tabi tutulmadığından ilk kaplama kalınlıkları her noktada aynı olmamakla birlikte ortalama kalınlık $150 \mu\text{m}$ civarındadır.

Şekil 3.28'deki grafikten görüldüğü üzere, derin çekme sonrasında ürünler üzerindeki aynı noktalarda kaplama kalınlıkları ölçülerek değişim oranları belirlenmiştir.

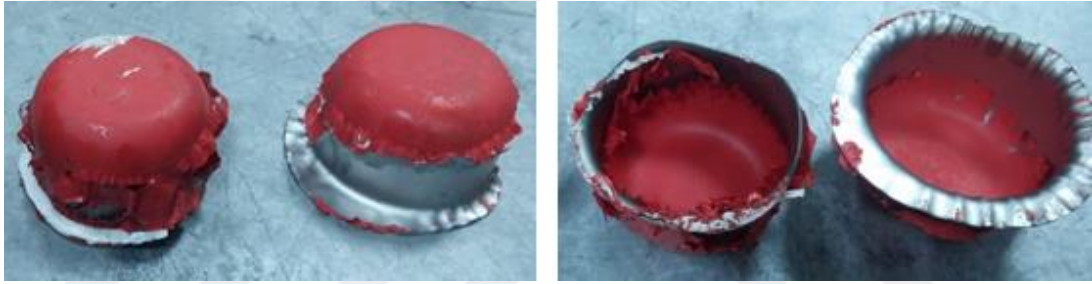


Şekil 3.28. Üzerinde çekme öncesi işaretleme yapılmış deney numunesi

Grafik incelendiğinde kaplama kalınlığında önemli oranda bir değişiklik olmadığı görülmektedir. Bu sayede, çelik malzeme ile polimer kaplama arasında bir ayrılma ya da çizilme olmadığı sürece kaplamadan dolayı bir derin çekme işlem hatası oluşmayacağı anlaşılmaktadır.

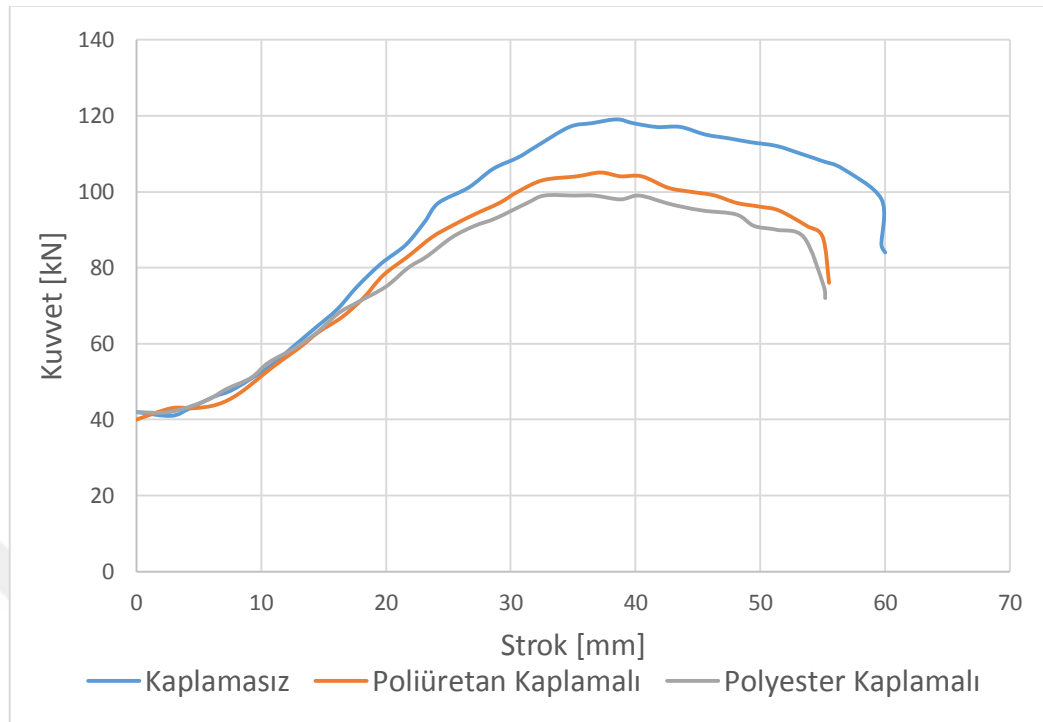
3.3.7 Poliüretan ile Kaplanmış Parçaların Derin Çekilmesi

Ortalama 40 mikron kalınlığındaki poliüretan kaplamalı numuneler üzerine koruma filmi çekilerek, çeşitli baskı plakası basınçlarında ve çekme hızlarında derin çekme işlemine tabi tutulmuştur (Resim 3.19).



Resim 3.19. Poliüretan kaplamalı derin çekme numunelerinin görünümü

İki bileşenin belirli oranlarda karıştırılmasıyla hazırlanan reçineye çelik sacın daldırılmasıyla gerçekleştirilen poliüretan kaplama işlemi sonrası yapılan derin çekme deneyleri polyester kaplamalı ve kaplamasız çelik saclara uygulanan 30 bar baskı plakası basıncında aynı şartlarda gerçekleştirilmiş ve Şekil 3.28’de görüldüğü üzere poliüretan kaplamanın derin çekme işleminin etkinliğine olumlu yönde katkısı olduğu anlaşılmıştır. Bununla birlikte, daldırma yöntemiyle poliüretan kaplamanın yalnızca derin çekmede yağlama etkisi göstermesi açısından uygulanabilecek bir yöntem olduğu anlaşılmaktadır. Çünkü deney sonrası kaplama yüzeye tutunamayarak ayrılmalar ve kaplamada ciddi deformasyonlar oluşmuştur.



Şekil 3.29. 1,8 çekme oranı ve 30 bar baskı plakası basıncında kuvvet-strok eğrilerinin karşılaştırması

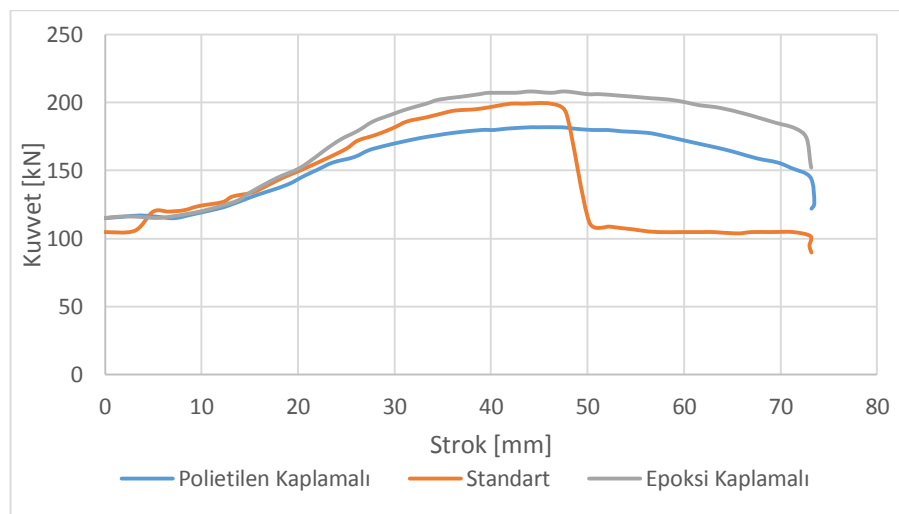
3.3.8. Epoksi ile Kaplanmış Parçaların Derin Çekilmesi

Epoksi kaplamaların, termal ve kimyasal mukavemetleri son derece iyidir. Ayrıca, atmosferik koşullara çok iyi dayanım gösterirler. Yapılarındaki epoksi gruplar sayesinde çapraz bağ yoğunluğunun artması, kaplamanın kimyasallara ve sıcaklığa karşı direncinin artmasını sağlar. Uzun zincirli polyesterlerin kullanılması ile aromatik epoksi reçinelerin çekme ve darbeye karşı özelliklerinin artması mümkündür. Epoksi kaplamaların en önemli özelliği kaplama yapıldığı metalik yüzeylere olan yapışmasıdır. Ayrıca kimyasallara karşı direncinin yüksek olması kaplamanın daha uzun süre kullanılmasına imkân sağlamaktadır (Altun, 2011). Resim 3.20’de 2 çekme oranına sahip olan ve 130 bar baskı plakası basıncıyla derin çekme işlemine tabi tutulan kaplamasız, epoksi kaplamalı ve polyester kaplamalı numunelerin işlem sonrasındaki durumları görülmektedir.



Resim 3.20. Aynı şartlarda derin çekilmiş kaplamasız, epoksi kaplamalı ve polyester kaplamalı numunelerin görünümü

Elektrostatik toz kaplama yöntemlerinde en çok kullanılan kaplama malzemeleri polyester, epoksi ve epoksi-polyester karışımlarıdır. Bu çalışmada polyester ağırlıklı polimer kullanılmakla birlikte kıyaslama olması açısından epoksi polimer ile de derin çekme uygulamaları yapılmıştır. 150 mm ilkel çapındaki çelik sac numunelerle, yırtılmayı görebilmek için baskı plakası basıncı 130 bar ayarlanarak gerçekleştirilen deneyler sonucunda kaplamasız çelik sacın 50 mm çekme yüksekliğine ulaşılmadan yırtıldığı görülmektedir. Epoksi kaplamalı çelik sac ise aynı baskı plakası basıncında hasara uğramadan derin çekme işlemini tamamlayabilmektedir. Polyester kaplamalı sac ise daha düşük kuvvetle derin çekme işlemini hasarsız olarak tamamlayabilmektedir (Şekil 3.30).

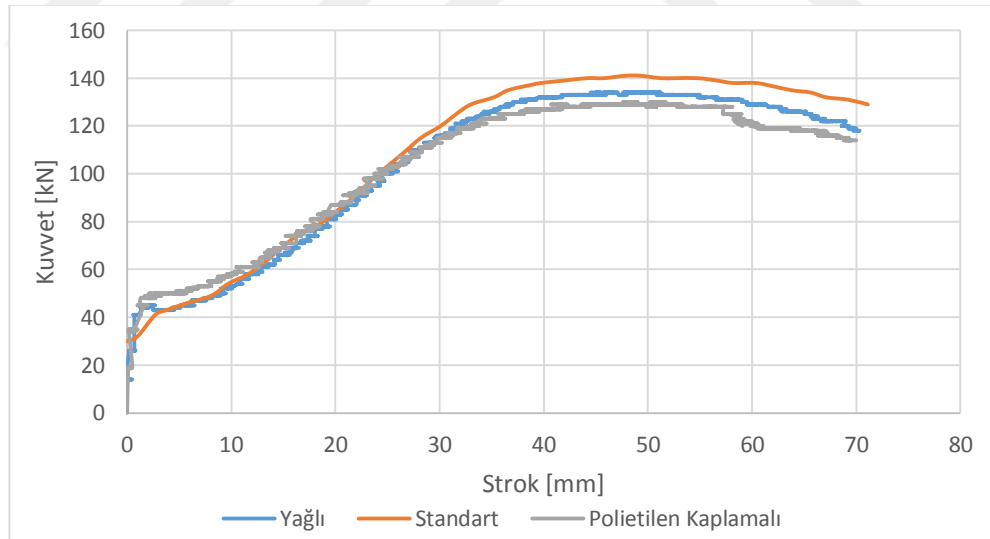


Şekil 3.30. 2 çekme oranı ve 130 bar baskı plakası basıncında kuvvet-strok eğrilerinin karşılaştırması

3.3.9. Kaplamalı ve Yağlı Numunelerin Karşılaştırılması

Uygulamada derin çekme işlemlerinde sürtünmeyi azaltarak yırtılma, kırılma ve çizilme gibi hasarları engellemek amacıyla genellikle yağlama yapılır. Bu çalışmada polimer kaplamanın etkisini görebilmek amacıyla kaplamasız ve polimer kaplamalı numunelerde yağlama yapılmamıştır. Yağlamanın etkisini kaplama ile kıyaslayabilmek için bu kısımda bor katkılı derin çekme yağı ile yağlanmış numunelerin durumu incelenmiştir.

Deneylemler sonucunda kaplamasız numune yüksek kuvvetlerle çekilirken yağlama işleminin derin çekme işlemlerini kolaylaştırdığı görülmüştür. Bununla birlikte, Şekil 3.31'da görüldüğü üzere en etkin derin çekme işlemi polietilen kaplama ile gerçekleştirilmektedir. Polimer kaplama ile aynı zamanda yağ kullanımının olumsuz etkilerinden kurtulmak mümkün olmuş ve ürünün görünümü ve korozyon direnci iyileştirilmiştir.



Şekil 3.31. 2 çekme oranı ve 40 bar baskı plakası basıncında kuvvet-strok eğrilerinin karşılaştırılması

3.3.10. Çalışmanın Kıyaslanması

Çizelge 3.9’da, sunulan çalışma literatürde bulunan yakın çalışmalarla, kullanılan malzeme, yöntem, çekme hızı, çekme oranı ve verim gibi noktalardan kıyaslanmıştır. Karşılaştırma yapılan çalışmalarda uygulanan derin çekme yöntemleri, kaplama ve parametrelerde farklılıklar bulunduğundan birebir örtüşmemektedir. Sunulan çalışmada standart derin çekme yöntemi ile sadece deney numunelerine elektrostatik toz kaplama yöntemi ile polimer kaplama yapılarak, çekme oranı ve şekillendirme veriminde diğer çalışmalara yakın ya da üstün değerler elde edildiği görülmektedir.

Çizelge 3.9. Literatürdeki çalışmalarla kıyas tablosu

	(Candra ve ark., 2015)	(Gurun ve Karaagac, 2015)	(Zumelzu ve ark., 2006)	(Kim ve ark., 2007)	(Şener, 2012)	(Allen ve Mahdavian, 2008)	Sunulan Çalışma
Malzeme cinsi	DC03	DC01		ASTM A1011	DC04	DC04	DC01
Malzeme kalınlığı [mm]	0,2	0,5 - 0,8 - 1	0,2	2,17	1,2	1	1
Çekme Yöntemi	Standart	Hidro - mekanik	Standart	Standart	Germe Testi	Standart	Standart
Baskı plakası uygulaması	Değişken	Sabit	Sabit	Sabit	Sabit	Sabit	Sabit
Yağlama durumu	Palmiye yağı		-	Mineral yağ	Silikon jel, mineral yağ	4 çeşit mineral yağ	-
Kaplama malzemesi	-	-	Polimer (PET)	4 farklı film	Polietilen, teflon, PVC	-	Polimer (PE)
Kaplama kalınlığı [µm]	-	-	30	-	-	-	150
Kaplama yöntemi	-	-	Film	Bağımsız Film	Yapışma	-	Elektrostatik Toz
Zımba çapı [mm]	40	60	-	152	100	61	75
Çekme hızı [mm/s]	1	6	-	15 - 65	5 - 50	-	3 - 12 - Değişken
Çekme oranı aralığı (β)	2,1	2,16 - 2,33	-	2	-	2	2 - 2,33
Şekillendirme verimi [%]	8	7,8	-	-	-	-	9

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Çalışmada polimer kaplamalı ve kaplamasız metal sacların derin çekme davranışları incelenmiştir. Seçilen çekme oranlarına (β) göre hesaplanan ilkel çaplarda hazırlanan deney numuneleri farklı çekme hızları ve baskı plaka basınçlarında derin çekme işlemine tabi tutulmuştur. Derin çekme işlemi için kullanılan prese eklenen PLC destekli ünite sayesinde işlem yapılırken istenilen veriler kayıt altına alınarak, sonrasında çeşitli programlar ile grafikler haline dönüştürülmüştür. Deney sonuçlarında malzemede oluşan deformasyonlar ve grafikler değerlendirilerek kaplamanın etkileri yorumlanmıştır.

4.1. Sonuçlar

- Derin çekilecek parçanın ilkel çapının ürün çapına oranı olan (çekme oranı) β , kaplamasız en yüksek hatasız derin çekme oranı 2,13 iken; polimer kaplamalı numunelerin hatasız çekme oranı 2,33'e çıkarılmıştır.
- Diğer çalışmalarda (Candra, 2015; Gurun, 2015) farklı yöntemler kullanılarak (değişken baskı plaka kuvveti, hidromekanik derin çekme vb.) elde edilen %8'lik şekillendirilebilirlik oranı, çalışmada sadece polimer kaplama ile %9 arttırılabilmektedir.
- Polimer kaplamalı numunelerin derin çekilmesinde kaplamasız metal saclarla kıyasla ortalama kalıplama kuvvetinde %10 azalma elde edilmiştir.
- Kaplamalı ve kaplamasız numunelerin derin çekilmesi sonucu, çekme kuvvetleri karşılaştırıldığında kaplamalı sacların derin çekilmesinde kuvvetlerin belirli oranlarda düştüğü görülmüştür. Böylece derin çekme işlemi için gereken enerji de düşmektedir.
- Derin çekme işlemi ile şekillendirilmiş bir ürünün, işlem sonrası boyama zorlukları ortadan kaldırılmış olur.

- Kaplanmış ürünün, sac imalat firmalarında yarı mamul halinde istenilen özellikte ve homojen olarak kaplanarak üretilmesi kolay olacaktır.
- Sac metal şekillendirme yöntemi ile makine imalatı yapan firmalarda boyama üniteleri üretim sürecinden kaldırılmış olacaktır.
- Kaplamasız metal sacın yüzey pürüzlülüğü $Ra = 1.259\mu m$ iken, kaplanmış parçanın yüzey pürüzlülüğü $Ra = 0.544\mu m$ olarak ölçülmüş olup, bu oranın derin çekme işlemlerinde sürtünme açısından olumlu etkisi olduğu görülmüştür.
- Pürüzlülüğün azalması ile sürtünme kuvvetlerinin düşmesi sonucu derin çekme işleminde kullanılan çekme sırasında parça ile teması olan kalıp elemanlarında aşınmalar azalacaktır.
- Kaplamasız sacların derin çekilmesi sırasında çevreye zararlı yoğun katkı maddeli, çeşitli yağlar veya farklı tarzda polimer filmler kullanılmaktadır. Sonuçta kaplama yapılacak ürünlerin önceden kaplanarak derin çekilmesi ile bu soruna çözüm bulunmuş olacaktır.
- Farklı metal sac malzemeler ve kalınlıklar deneylere dâhil edilememiştir.

4.2. Öneriler

Polimer kaplamalı metal sacların derin çekme davranışının incelendiği bu çalışma konusyla ilgili olarak, bundan sonra yapılacak çalışmalara katkı sağlaması bakımından aşağıdaki öneriler dikkate alınabilir;

- Polimer malzeme türü değiştirilerek derin çekme işlemi davranışları değerlendirilebilir.

- Farklı geometride (kare, konik vb.) parçalar için polimer kaplamanın durumu incelenebilir.
- Kalıp ve zımba yuvarlatma çapları, matris boşluğu gibi parametreler değiştirilerek derin çekme uygulamaları yapılabilir.
- Metal sac malzemelere uygulanan kaplama yöntemi değiştirilebilir.



KAYNAKLAR

- Aksulu, M., 2007. Polimerlerin Aşınmasında Karşı Yüzey Pürüzlülüğünün Etkisi. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Alparslan, Y. E., 2008. Merkezi Delikli Taslak Malzemelerin Derin Çekme Özelliklerinin İncelenmesi. Dumlupınar Üniversitesi.
- Altun, O., 2011. Alev Sprey Yöntemiyle Etilen-Vinil-Asetat Kaplamaların Üretilmesi ve Karakterizasyonu. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi.
- Anonim,2011.[Http://Www.Steelnumber.Com/En/Steel_Composition_Eu.Php?Name_Id=199](http://www.steelnumber.com/en/steel_composition_eu.php?name_id=199) [Online]. [Accessed].
- Anonim, 2017. Erdemir Sac Metal Katolog. Ereğli Demir Ve Çelik Fabrikaları T.A.Ş.
- Aras U, Kalaycıoğlu, H., Yel H., 2016. Orta Yoğunlukta Lif levha Yüzeylerinde Toz Boya Uygulamaları. Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi.:791-800.
- Barletta, M., 2011. Dry Sliding Wear Response Of Some Industrial Powder Coatings. Tribology International, 44, 1236-1250.
- Boelen, B., Den Hartog, H. & Van Der Weijde, H. 2004. Product Performance Of Polymer Coated Packaging Steel, Study Of The Mechanism Of Defect Growth In Cans. Progress In Organic Coatings, 50, 40-46.
- Bosch, D. J., Stephenson, K., Groover, G. & Hutchins, B. 2008. Farm Returns To Carbon Credit Creation With Intensive Rotational Grazing. Journal Of Soil And Water Conservation, 63, 91-98.
- Browne, M. T. & Hillery, M. T., 2003. Optimising The Variables When Deep-Drawing Cr1 Cups. Journal Of Materials Processing Technology, 136, 64-71.
- Candra, S., Batan, I. M. L., Berata, W. & Pramono, A. S., 2015. Analytical Study And Fem Simulation Of The Maximum Varying Blank Holder Force To Prevent Cracking On Cylindrical Cup Deep Drawing. 12th Global Conference On Sustainable Manufacturing - Emerging Potentials, 26, 548-553.
- Carlsson, P., 2005. Surface Engineering In Sheet Metal Forming.
- Cerit, A. M., 2000. Üretim Ve Tasarım, Tmmob Makina Mühendisleri Odası.
- Cheng, H. S., Cao, J., Yao, H., Liu, S. D. & Kinsey, B. 2004. Wrinkling Behavior Of Laminated Steel Sheets. Journal Of Materials Processing Technology, 151, 133-140.

- Chengzhi, S., Guanlong, C. & Zhongqin, L. 2005. Determining The Optimum Variable Blank-Holder Forces Using Adaptive Response Surface Methodology (Arsm). *International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, 26, 23-29.
- Colgan, M. & Monaghan, J. 2003. Deep Drawing Process: Analysis And Experiment. *Journal Of Materials Processing Technology*, 132, 35-41.
- Çapan, L., 1990. *Metallere Plastik Şekil Verme İstanbul, Birsen Yayınevi.*
- Çavuşoğlu, O. G., H., 2014. Deformasyon Hızının Dp600 Ve Dp780 Sac Malzemelerin Mekanik Özelliklerine Ve Derin Çekme İşlemine Etkilerinin İncelenmesi. *Journal Of The Faculty Of Engineering And Architecture Of Gazi University*
- Çetin, M., H. 2015. İlk Derin Çekme Prosesi İçin Şekillendirme Sıcaklıklarının Belirlenmesi Ve Karakterizasyonu. Doktora, Karabük Üniversitesi.
- Çetin, M. S., 2007. Derin Çekme İle Soğuk Şekillendirmenin Sonlu Elemanlar Metodu Yardımıyla Analizi. Trakya Üniversitesi.
- Demiray, K., 2006. Al 1050 Malzemesinin Derin Çekme İşleminde Baskı Plakasının Etkisinin Teorik Ve Deneysel Olarak İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi.
- Demirci, H. I., 2002. Yüksek Hızda Şekillendirmeye Etki Eden Kalıp Parametrelerinin Deneysel Olarak İncelenmesi. Marmara Üniversitesi.
- Duchene, L., & Habraken, A., M. 2005. Analysis Of The Sensitivity Of Fem Predictions To Numerical Parameters İn Deep Drawing Simulations. *European Journal Of Mechanics A-Solids*, 24, 614-629.
- Elnagmi, M., Jain, M., Bruhis, M. & Nielsen, K. 2011. Studies İn Cup Drawing Behavior Of Polymer Laminated Sheet Metal. 8th International Conference And Workshop On Numerical Simulation Of 3d Sheet Metal Forming Processes (Numisheet 2011), Pts A And B, 1383, 847.
- Erdoğan, M., 2017. Alüminyum Alaşımlarının Derin Çekme İşleminin Sonlu Eleman Yöntemi İle Analizi. Master Thesis, Hitit Üniversitesi.
- Gavas, M., 1998. Detonasyonla Derin Çekme İşlemlerine Etkili Parametrelerin İncelenmesi. Doktora, Marmara Üniversitesi.
- Gavas, M., İzçiler, M. 2006. Deep Drawing With Anti-Lock Braking System (Abs). *Mechanism And Machine Theory*, 41, 1467-1476.
- Groover, M. P., 2016. *Fundamentals Of Modern Manufacturing : Materials, Processes, And Systems*, Hoboken, Nj, John Wiley & Sons, Inc.

- Gurun, H. & Karaagac, I. 2015. The Experimental Investigation Of Effects Of Multiple Parameters On The Formability Of The Dc01 Sheet Metal. *Strojnicki Vestnik-Journal Of Mechanical Engineering*, 61, 651-662.
- Güneş, A. T., 2002. *Pres İşleri Tekniği II*, Ankara, MMO.
- Gürün, H., 2008. Derin Çekme Kalıplarındaki Parametrelerin Deneysel Olarak İncelenmesi Ve Bulanık Mantık İle Tahmini. Gazi Üniversitesi.
- Hascalık, A., Caydas, U. & Gurun, H. 2007. Effect Of Traverse Speed On Abrasive Waterjet Machining Of Ti-6al-4v Alloy. *Materials & Design*, 28, 1953-1957.
- Kismet, Y., 2015. Effects Of Hydrolyzed Electrostatic Powder Coating Wastes On Fluidity And Density Of Polyolefins. *Sigma Journal Of Engineering And Natural Sciences-Sigma Muhendislik Ve Fen Bilimleri Dergisi*, 33, 377-383.
- Kitayama, S., Natsume, S., Yamazaki, K., Han, J. & Uchida, H. 2016. Numerical Investigation And Optimization Of Pulsating And Variable Blank Holder Force For Identification Of Formability Window For Deep Drawing Of Cylindrical Cup. *International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, 82, 583-593.
- Koçar, O., 2014. Derin Çekme İşleminde Ürün Kalitesinin Tahmini Ve Kontrolü. Doktora, Sakarya Üniversitesi.
- Lee, J. M., Ko, D. C., Lee, K. S. & Kim, B. M. 2007. Identification Of The Bulk Behavior Of Coatings By Nano-Indentation Test And Fe-Analysis And Its Application To Forming Analysis Of The Coated Steel Sheet. *Journal Of Materials Processing Technology*, 187, 309-313.
- Lee, M. S., Kim, S. J., Lim, O. D. & Kang, C. G. 2016. The Effect Process Parameters On Epoxy Flow Behavior And Formability With Cr340/Cfrp Composites By Different Laminating In Deep Drawing Process. *Journal Of Materials Processing Technology*, 229, 275-285.
- Lee, Y. H., Kim, H. J., Schwartz, S., Rafailovich, M. & Sokolov, J. 2014. Synthesis And Characterization Of Silicone-Modified Polyester As A Clearcoat For Automotive Pre-Coated Metals. *Progress In Organic Coatings*, 77, 184-193.
- Lim, Y., An, T., Ko, S. & Kim, N. 2016. Formability Of Coated Vinyl On Sheet Metal During Deep Drawing Process. *Journal Of Materials Processing Technology*, 227, 178-189.
- Ma, W. Y., Wang, B. Y., Fu, L., Zhou, J. & Huang, M. D. 2015. Effect Of Friction Coefficient In Deep Drawing Of Aa6111 Sheet At Elevated Temperatures. *Transactions Of Nonferrous Metals Society Of China*, 25, 2342-2351.

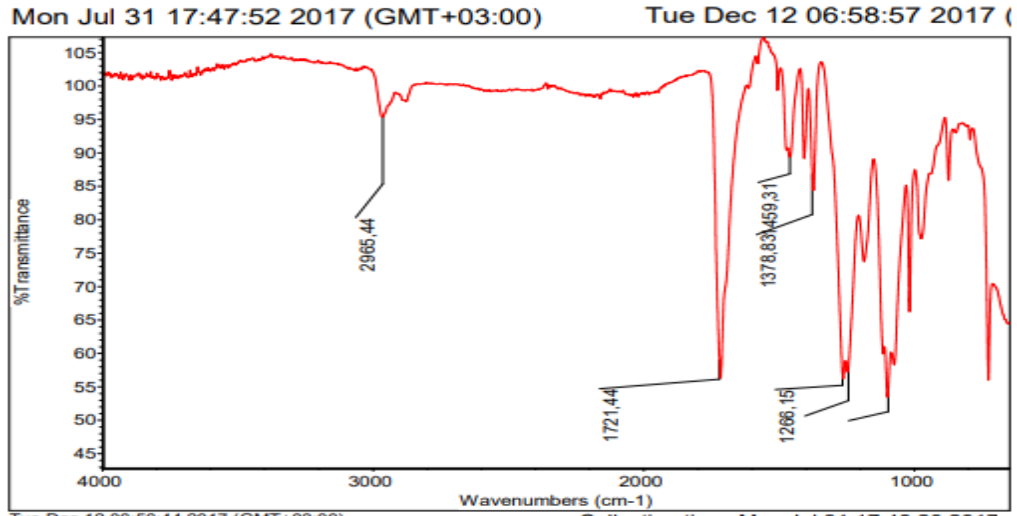
- Moon, J., Lee, Y. H. & Kim, H. J. 2012. Synthesis And Characterization Of Flexible Polyester Coatings For Automotive Pre-Coated Metal. *Progress In Organic Coatings*, 73, 123-128.
- Pham, H. D., 2011. Process Design For The Forming Of Organically Coated Sheet Metal. Doktora Tezi, Dortmund Teknik Üniversitesi.
- Pişkin, E., 1987. Polimer Teknolojisine Giriş, İstanbul, İnkılap Kitabevi.
- Prasad, L. K., McGinity, J. W. & Williams, R. O. 2016. Electrostatic Powder Coating: Principles And Pharmaceutical Applications. *International Journal Of Pharmaceutics*, 505, 289-302.
- Safaeirad, M., Toroghinejad, M. R. & Ashrafizadeh, F. 2008. Effect Of Microstructure And Texture On Formability And Mechanical Properties Of Hot-Dip Galvanized Steel Sheets. *Journal Of Materials Processing Technology*, 196, 205-212.
- Schuler, 1998. *Metal Forming Handbook*, Berlin Heidelberg, Springer-Verlag
- Sokolova, O. A., Kuhn, M. & Palkowski, H. 2012. Deep Drawing Properties Of Lightweight Steel/Polymer/Steel Sandwich Composites. *Archives Of Civil And Mechanical Engineering*, 12, 105-112.
- Son, Y. K., Ko, D. C. & Kim, B. M. 2015. Prediction Of Delamination And Tearing During Stamping Of Polymer-Coated Metal Sheet. *Journal Of Materials Processing Technology*, 220, 146-156.
- Son, Y. K., Lee, C. J., Lee, J. M., Byoen, S. D., Lee, S. B. & Kim, B. M. 2012. Experimental Evaluation Of Coating Delamination İn Vinyl-Coated Metal Forming. *Journal Of Mechanical Science And Technology*, 26, 3223-3230.
- Şener, B., 2012. Otomotiv Sektöründe Kullanılan Derin Çekme Saclarının Şekilledirilebilirliğinin Analizi. Yüksek Lisans, İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Tschaetsch, H. U. 2006. *Metal Forming Practise*, Berlin, Heidelberg, Springer Verlag.
- Ueda, K., Kanai, H. & Amari, T. 2002. Viscoelastic Properties Of Paint Films And Formability İn Deep Drawing Of Pre-Painted Steel Sheets. *Progress İn Organic Coatings*, 45, 15-21.
- Ulu, D., 2008. Derin Çekme Prsosesi İle Üretilen Alüminyum Sac Metal Parçalarına Ait Veri Tabanı Oluşturulması. Yüksek Lisans, Gazi Üniversitesi.
- Van Der Aa, H. C. E., Van Der Aa, M. A. H., Schreurs, P. J. G., Baaijens, F. P. T. & Van Veenen, W. J. 2000. An Experimental And Numerical Study Of The Wall Ironing Process Of Polymer Coated Sheet Metal. *Mechanics Of Materials*, 32, 423-443.

- Vayeda, R. & Wang, J. 2007. Adhesion Of Coatings To Sheet Metal Under Plastic Deformation. *International Journal Of Adhesion And Adhesives*, 27, 480-492.
- Volk, M., Nardin, B. & Dolsak, B. 2011. Application Of Numerical Simulations In The Deep-Drawing Process And The Holding System With Segments' inserts. *Strojniski Vestnik-Journal Of Mechanical Engineering*, 57, 697-703.
- Yoshihara, S., Manabe, K. & Nishimura, H. 2005. Effect Of Blank Holder Force Control In Deep-Drawing Process Of Magnesium Alloy Sheet. *Journal Of Materials Processing Technology*, 170, 579-585.
- Zheng, K. L., Lee, J. Y., Lin, J. G. & Dean, T. A. 2017. A Buckling Model For Flange Wrinkling In Hot Deep Drawing Aluminium Alloys With Macro-Textured Tool Surfaces. *International Journal Of Machine Tools & Manufacture*, 114, 21-34.
- Zumelzu, E., Rull, F. & Boettcher, A. A. 2006. Deformation And Fracture Of Polymer Coated Metal Sheets: Characterisation And Degradation. *Surface Engineering*, 22, 432-438.

EKLER



EK-1. Polimer malzeme analiz sonuçları

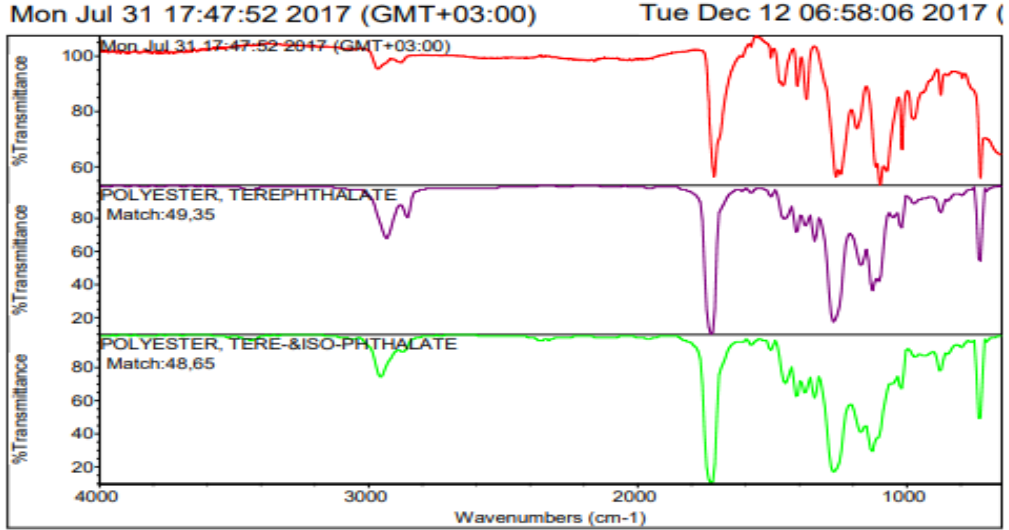


Tue Dec 12 06:56:44 2017 (GMT+03:00) Collection time: Mon Jul 31 17:48:20 2017

FIND PEAKS:

Position	Intensity
725,58	55,943
974,08	77,152
1017,16	66,171
1098,35	53,424
1185,31	73,691
1262,46	56,175
1715,91	56,284

Spectrum: Mon Jul 31 17:47:52 2017 (GMT+03:00)
 Region: 4000,19 649,90
 Absolute threshold: 80,324
 Sensitivity: 50
 Number of sample scans: 16
 Number of background scans: 16
 Resolution: 4,000
 Sample gain: 1,0
 Optical velocity: 0,4747
 Aperture: 80,00
 Detector: DTGS KBr
 Beamsplitter: KBr
 Source: IR



Tue Dec 12 06:56:44 2017 (GMT+03:00) Collection time: Mon Jul 31 17:48:20 2017

FIND PEAKS:

Position	Intensity
725,58	55,943
974,08	77,152
1017,16	66,171
1098,35	53,424
1185,31	73,691
1262,46	56,175
1715,91	56,284

Spectrum: Mon Jul 31 17:47:52 2017 (GMT+03:00)
 Region: 4000,19 649,90
 Absolute threshold: 80,324
 Sensitivity: 50
 Number of sample scans: 16
 Number of background scans: 16
 Resolution: 4,000
 Sample gain: 1,0
 Optical velocity: 0,4747
 Aperture: 80,00
 Detector: DTGS KBr
 Beamsplitter: KBr
 Source: IR

Şekil E1.1. Deneylerde kullanılan polimer kaplama malzemesinin analiz sonuçları

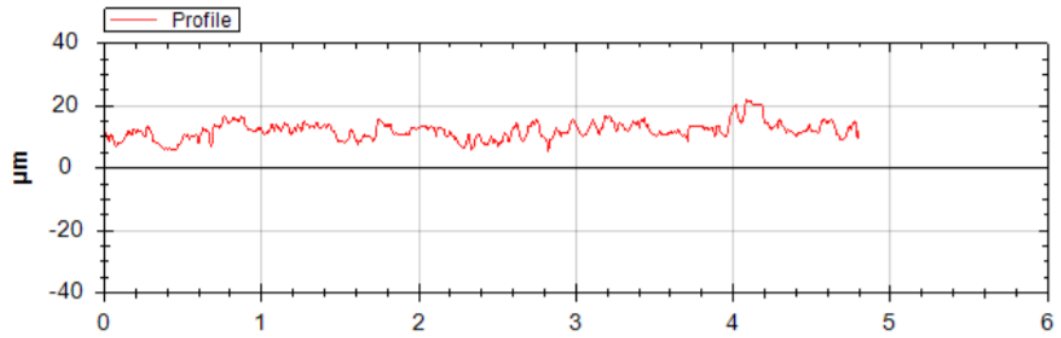
EK-2. Metal sac malzeme pürüzlülük değerleri

Surface Roughness Analysis

Test Report

ID:
 WorkPiece: DC01 standart
 Operator: Özgür
 Data: 12/4/2017
 Time: 4:19 PM
 Ir: 0.80mm
 In: 4
 Range: $\pm 40 \mu\text{m}$
 Filter: RC

Ra	=1.259 μm	Rq	=1.572 μm
Rz	=6.804 μm	Rt	=9.414 μm
Rp	=3.289 μm	Rv	=3.515 μm
RyJIS	=6.804 μm	RS	=0.0543 μm
RSm	=0.1103mm	RSk	=0.13 μm
R3z	=1.601 μm	RzJIS	=1.458 μm
Rmax	=9.414 μm	RPc	=72/cm
Rmr1	=1000	Rmr2	=1000
Rmr3	=1000	Rmr4	=1000

Profile

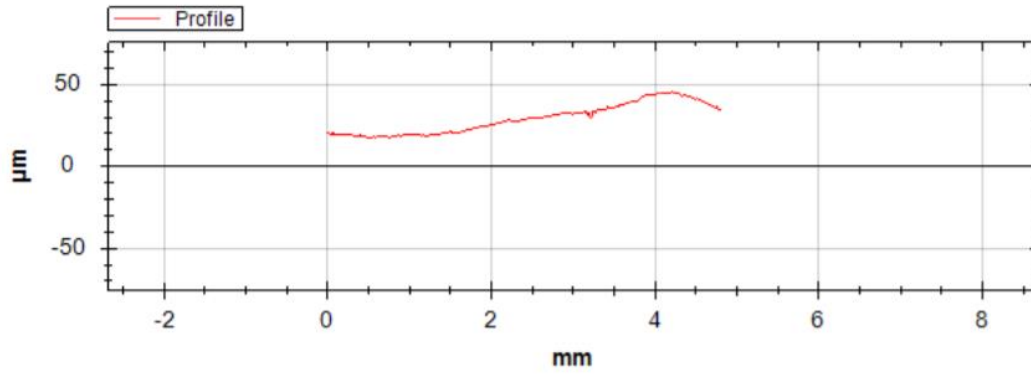
Şekil E2.1. Deneylerde kullanılan kaplamasız metal sac pürüzlülük profili

Surface Roughness Analysis

Test Report

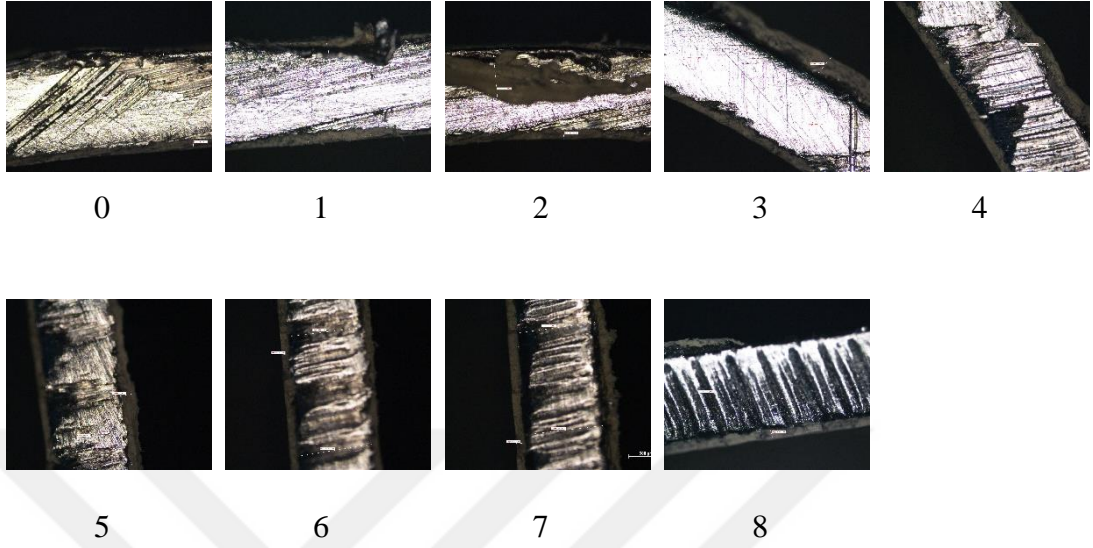
ID:
 WorkPiece: Polimer Kaplı DC01
 Operator: Özgür
 Data: 12/4/2017
 Time: 4:07 PM
 Ir: 0.80mm
 In: 4
 Range: $\pm 40 \mu\text{m}$
 Filter: RC

Ra	=0.544 μm	Rq	=0.632 μm
Rz	=1.367 μm	Rt	=3.964 μm
Rp	=0.949 μm	Rv	=0.417 μm
RyJIS	=1.367 μm	RS	=0.0459 μm
RSm	=0.1995mm	RSk	=-1.974 μm
R3z	=0.085 μm	RzJIS	=0 μm
Rmax	=3.964 μm	RPc	=10/cm
Rmr1	=1000	Rmr2	=1000
Rmr3	=1000	Rmr4	=1000

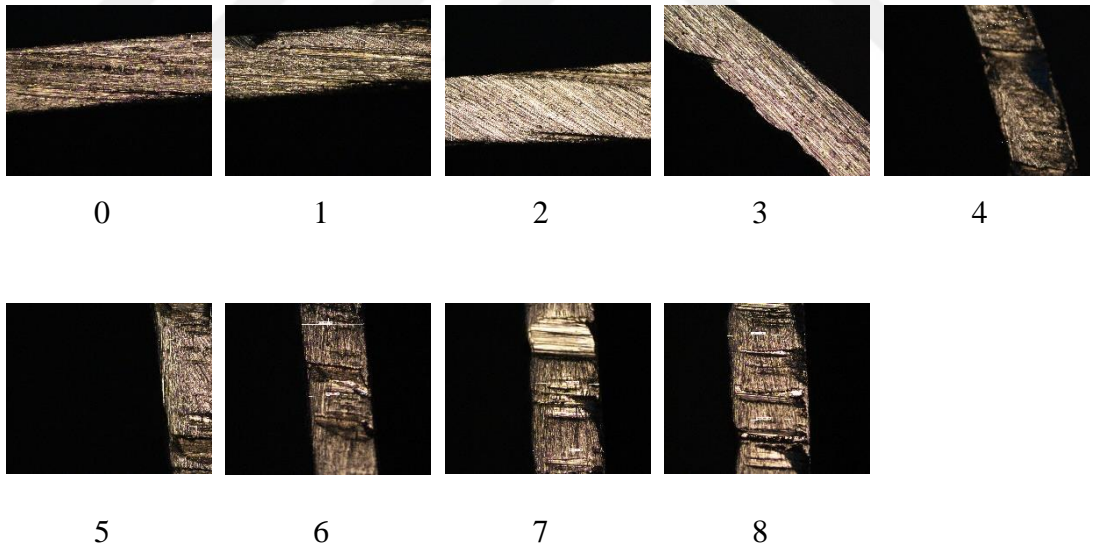
Profile

Şekil E2.2. Deneyleerde kullanılan polimer kaplama malzemesinin pürüzlülük profili

EK-3. Deney numunelerinin kalınlık ölçüm noktalarının görüntüleri



Şekil E3.1. Polimer kaplamalı deney numunelerinin mikroskop ile çekilen görüntüleri



Şekil E3.2. Kaplamasız deney numunelerinin mikroskop ile çekilen görüntüleri.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, Adı : ÖZDİLLİ, Özgür
Uyruğu : T.C.
Doğum tarihi ve yeri : 22.12.1975 – Çorum
Medeni hali : Evli
Telefon : 0 (505) 7015474
E-posta : ozgurozdilli@hitit.edu.tr

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Y. Lisans	Gazi Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü	2007
Lisans	Marmara Üniversitesi/Teknik Eğitim Fakültesi	1998
Ön Lisans	Gazi Üniversitesi/Çorum Meslek Yüksekokulu	1994
Lise	Çorum Teknik ve Endüstri Meslek Lisesi	1992

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
1999-	Hitit Üniversitesi / TBMYO	Öğretim Görevlisi

Yabancı Dil

İngilizce (YÖKDİL: 68,75)