



**MATRİS AÇILI DERİN ÇEKME KALIPLAMA
YÖNTEMİNİN HİDRO-MEKANİK
DERİN ÇEKME YÖNTEMİNE UYGULANMASI**

Hasan BALLIKAYA
Doktora Tezi
Makine Eğitimi Anabilim Dalı
Tez Danışmanı: Prof. Dr. Vedat SAVAŞ

ARALIK-2017

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MATRİS AÇILI DERİN ÇEKME KALIPLAMA YÖNTEMİNİN
HİDROMEKANİK DERİN ÇEKME YÖNTEMİNE UYGULANMASI

DOKTORA TEZİ
HASAN BALLIKAYA
(111119202)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 29.11.2017

Tezin Savunulduğu Tarih: 22.12.2017

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Vedat SAVAŞ

Diğer Jüri Üyeleri: Doç. Dr. Çetin Özay

Yrd. Doç. Dr. Zülküf DEMİR

Yrd. Doç. Dr. Faruk KARACA

Yrd. Doç. Dr. Mehmet ALTUĞ

ÖNSÖZ

Bu çalışmanın yürütülmesinde bilgi ve deneyimlerinden faydalandığım danışman hocam Sayın Prof. Dr. Vedat SAVAS' a teşekkür ve şükranlarımı sunarım. Çalışmalarım esnasında her zaman yanımda olan ve yardımlarını esirgemeyen Sn. Doç. Dr. Çetin ÖZAY' a, Sn. Yrd. Doç. Dr. Mehmet ALTUĞ' a ve Teknik Öğretmen Sn. Vedat DİRİCAN' a teşekkürlerimi sunarım.

Doktora çalışmalarım boyunca benden manevi desteklerini esirgemeyen aileme, hocalarıma, eşim Özlem BALLIKAYA' a ayrıca çalışmalarım boyunca ihmal ettiğim oğlum Kerim Alp BALLIKAYA' a teşekkür ederim.

Hasan BALLIKAYA

Elazığ, 2017

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ.....	II
İÇİNDEKİLER	III
ÖZET.....	VI
SUMMARY	VII
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	VIII
TABLolar LİSTESİ.....	XI
SEMBOLLER LİSTESİ.....	XII
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	3
3. SAC METAL KALIPCILIĞI	16
3.1. Derin Çekme Kalıplama Yöntemi	16
3.2. Plastik Deformasyon.....	18
3.3. Anizotropi.....	25
3.4. İlkel Parça Boyutunun Belirlenmesi	27
3.5. Limit Çekme Oranı.....	28
3.5.1. Silindirik Parçalar İçin Derin Çekme Adımları	29
3.6. Çekme Kuvveti.....	29
3.7. Baskı Plaka Kuvveti (BPK).....	30
3.8. Kalıp Kenar ve Zimba Radyüsleri	30
3.9. Çekme Hızı	32
3.10. Çekme Boşluğu.....	32
3.11. Derin Çekme İşleminde Kullanılan Saclar	33
3.12. Derin Çekme İşleminde Karşılaşılan Hatalar	33
3.13. Hidromekanik Derin Çekme.....	34
3.13.1. Hidromekanik Derin Çekme İşleminin Özellikleri.....	35
4. MODELLEME TEKNİKLERİ	37
4.1. Taguchi Metodu	38
4.2. Taguchi Metodunun Gelişimi ve Felsefesi	39
4.3. Taguchi Kalite kontrol sistemi.....	40
4.3.1. Sistem Tasarımı	41
4.3.2. Parametre Tasarımı.....	41
4.3.3. Tolerans Tasarımı.....	42

4.4.	Taguchi Metodunda Parametre Tasarımı	43
4.4.1.	Temel Çalışma Biçimi.....	43
4.4.2.	Deney Tasarımı	44
4.4.2.1.	Statik Sonuçlu Tasarım	45
4.4.2.2.	Dinamik Sonuçlu Deneyler	46
4.4.3.	Ortogonal Diziler	46
4.4.4.	Ortogonal Dizi Seçimi.....	47
4.4.5.	Varyans Analizi.....	48
4.4.6.	Kareler Toplamı.....	49
4.4.7.	Serbestlik Derecesi.....	50
4.4.8.	Varyans.....	51
4.4.9.	F Testi	52
4.5.	Sonlu Elemanlar Metodu	52
4.5.1.	İmplicit Yöntem	54
4.5.2.	Eksplisit Yöntem	54
5.	MATERYAL ve METOT	57
5.1.	Çalışmanın Amacı.....	57
5.2.	DeneySEL Çalışmalar	57
5.3.	Sayısal Analiz Çalışmaları	64
6.	DENEYSEL SONUÇLAR ve TARTIŞMA.....	67
6.1.	Matris Açılı Hidromekanik Derin Çekme Parametrelerinin Limit Çekme Oranı Üzerine Etkisi	68
6.1.1.	Matris Açısının Limit Çekme Oranı Üzerine Etkisi.....	69
6.1.2.	Zimba Radyüsünün Limit Çekme Oranı Üzerine Etkisi	70
6.1.3.	Kalıp Radyüsünün Limit Çekme Oranı Üzerine Etkisi	71
6.1.4.	Hazne Basıncının limit çekme oranı üzerine etkisi.....	72
6.1.5.	Baskı Plaka Kuvvetinin Limit Çekme Oranı Üzerine Etkisi	73
6.2.	Matris Açılı Hidromekanik Derin Çekme Parametrelerinin Kap Et Kalınlığı Üzerine Etkisi	74
6.2.1.	Matris Açısının Et Kalınlığına Etkisi.....	74
6.2.2.	Zimba Radyüsünün Kap Et Kalınlığına Etkisi.....	75
6.2.3.	Matris Radyüsünün Kap Et Kalınlığına Etkisi.....	76
6.2.4.	Hazne Basıncının Kap Et Kalınlığına Etkisi	77
6.2.5.	Baskı Plaka Kuvvetinin Kap Et Kalınlığına Etkisi.....	77
6.3.	Matris Açılı Hidromekanik Derin Çekme Parametrelerinin Zimba Kuvveti Üzerine Etkisi.....	78
6.3.1.	Matris Açısının Zimba Kuvveti Üzerine Etkisi.....	78

6.3.2.	Zimba Radyüsünün Zimba Kuvveti Üzerindeki Etkisi.....	79
6.3.3.	Matris Radyüsünün Zimba Kuvvetine etkisi	80
6.3.4.	Hazne Basıncının Zimba Kuvvetine Etkisi.....	81
6.3.5.	Baskı Plaka Kuvvetinin Zimba Kuvvetine Etkisi	82
6.4.	İlkel pul Çapının Kap Hasarı Üzerine Etkisi	83
6.5.	Deneyisel Çalışmaların İstatiksel Analizi	83
6.6.	Sonlu Elamanlar Metodu İle Sayısal Analiz Deneyleri	89
6.6.1.	Deney parametrelerinin sayısal analizi.....	89
7.	GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	93
7.1.	Genel sonuçlar.....	93
7.2.	Öneriler.....	94
KAYNAKÇA		95

ÖZET

Sac şekillendirme prosesleri içinde yer alan ve son yıllarda dikkatleri üzerine çeken matris açılı kalıplar ve hidromekanik derin çekme işlemi yöntemleri deneysel ve sayısal olarak incelenerek geliştirilmiştir. Bu çalışmada her iki sac şekillendirme yöntemi birleştirilerek matris açılı hidromekanik derin çekme sac şekillendirme yöntemi uygulanmıştır.

Yapılan bu çalışmada, şekillendirilen sac malzeme için; matris açısı, matris/zımba radyüsü, baskı plaka kuvveti ve hazne basıncının; limit çekme oranı (β), kap et kalınlık değişimleri ve zımba kuvvetinin etkileri araştırılmıştır. Bu çalışmada 0.9 mm kalınlığında DIN EN 10130-1999 sac malzemenin derin çekilebilirliği deneysel ve sayısal analiz yöntemlerle araştırılmıştır. Bu amaçla 30 mm çapında zımba, matris/zımba radyüslerinin $R=6$ mm, $R=8$ mm ve $R=10$ mm, matris açıları ise 0° , 2.5° , 5° , 10° , 12.5° ve 15° olarak seçilmiştir. Hazne basıncı için 6 MPa, 8 MPa ve 10 MPa basınç uygulanmıştır. Sac malzemenin kalıp içine akması esnasında kontrolü sağlamak için gerekli olan baskı plaka kuvveti 1964,95 N, 5882,78 N ve 9507,64 N olarak seçilmiştir. Deneysel ve sayısal çalışmalarda zımba hızı sabit alınmıştır. Derin çekme işlemi boyunca oluşan zımba kuvvetleri ölçümü ise yük hücresi yardımıyla 10^{-1} saniye aralığında ölçülmüştür. Deney numunelerindeki kap et kalınlık değişimi, 10^{-4} mm hassasiyetli mikrometre ile belirlenmiştir. Sayısal analiz ise ANSYS 15.0 programında gerçekleştirilmiştir. Deney planı L18 ortogonal dizinine göre Taguchi deney tasarım yöntemi ile yapılmıştır. Limit çekme oranının en düşük değeri $\beta=2.4$ iken en büyük değeri $\beta=2.6$ 'ya çıkması, 0.9 mm kalınlığındaki sac malzeme için kalınlık dağılımlarındaki en düşük alan kalınlığı 0.7635 mm iken en yüksek alan kalınlığı ise 0.9970 mm değeri elde edilmiştir. Baskı plakası ve hazne basıncı için optimum değer bu parametrelerin ikinci seviyesi olmuştur. Artan matris açısında ise zımba kuvvetinin arttığı ancak malzeme kalınlık değişiminin ise azaldığı tespit edilmiştir. Zımba radyüs değerinin artmasına bağlı olarak limit çekme oranı da paralel bir şekilde artmıştır.

Anahtar Kelimeler: Matris açılı derin çekme, Hidromekanik derin çekme, Sayısal analiz, Şekillendirilebilirlik, Taguchi, Anova, ANSYS.

SUMMARY

Application Of Die Angle Deep Drawing Molding Method To Hydro-Mechanic Deep Drawing Method

Dies with die/pressure plate angle which are among metal sheet forming processes and has attracted attention in recent years and methods of hydromechanical deep drawing process have been developed by conducting experimental and numeric analysis. In the present study, hydromechanical deep drawing process with die/pressure plate angle was applied by combining two metal sheet forming processes.

The present study investigated the effects of die/ pressure plate angle, die/punch radius, pressure plate force and chamber pressure; limit drawing ratio(β), changes in wall thickness of die and punch force for sheet material formed. Deep drawability of 0.9 mm thick DIN EN 10130-1999 metal sheet was investigated an experimental and numeric manner in the present study. In order to achieve this, punch with a 30 mm diameter was processed at R=6 mm, R=8 mm and R=10 mm of die/punch radii and 0° , 2.5° , 5° , 10° , 12.5° , and 15° of die/ pressure plate angle. Chamber pressure was applied as 6 Mpa, 8 Mpa, and 10 Mpa of pressure. Variables were used as 1964.95 N, 5882.78 N, and 9507.64 N of pressure plate forces in order to ensure control when metal sheet was flowing into die. Punch rate was taken as constant in experimental and numeric studies. The punch force occurring during deep drawing process was measured in 10^{-1} second interval with the aid of load cell. Wall thickness change of container in experimental samples was identified by a micrometer with 10^{-4} mm of precision. Numeric analysis was performed by using ANSYS 15.0 software. Experimental design was carried out by using Taguchi experimental design method according to L18 orthogonal array. While the lowest value of limit drawing ratio was $\beta=2.4$, the highest value was $\beta=2.6$; while the lowest thickness of area in thickness distributions for 0.9-mm thick metal sheet was 0.7635 mm, the highest thickness of area was 0.9970 mm. Optimum value for pressure plate and die pressure was the second level of these parameters. Punch force was identified to increase when die/pressure plate angle increased; however, wall thickness change decreased. Limit drawing ratio was determined to increase in parallel, based on increased punch radius value.

Key Words: Deep drawing with die angle, Hydromechanical deep drawing, Numeric analysis, Formability, Taguchi, Anova, ANSYS.

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 3. 1. Derin çekme işlemi a. Şematik b. Perspektif (Topaç, 2003).....	16
Şekil 3. 2. Derin Çekme İşlemi Mekanîği (Demiray, 2006)	17
Şekil 3. 3. Derin çekme yönteminde parçada boylamsal kısımda meydana gelen gerilmeler (Demiray, 2006)	18
Şekil 3. 4. Temel şekil değişimi (Çapan, 2003) a) Basma b) Çekme c) Kayma	19
Şekil 3. 5. Kayma düzlemi üzerindeki kuvvet bileşenleri(Savaşkan, 2009)	20
Şekil 3.6.. Çekme Numunesi örneği ve ölçme yönleri (Anket, 2011)	25
Şekil 3.7. Derin çekme kalıplama yönteminde kulak oluşumu(Anket, 2011)	27
Şekil 3.8. Alan Metodu ile ilkel çapın bulunması (Erişkin, 1986).....	28
Şekil 3.9. Zimba ucu ve kalıp radyüsü	31
Şekil 3.10. Derin çekme işlemi sonrası görülen hatalar	34
Şekil 3.11. Hidromekanik derin çekme işleminde zimba yarı pozisyonu(Tzchaetsch, 2006)	36
Şekil 4.1. Prosesin genel modeli (Hicks, 1985)	37
Şekil 4.2. Taguchi' nin kontrol sistemi (Canıyılmaz, 2001)	40
Şekil 4.3. Taguchi metodunun sistematîği (Kayı, 2006).....	41
Şekil 4.4. Bir problemin sonlu elemanlar modeli (Ünal, 2011)	53
Şekil 4.5. Eksplisit yöntem kullanılan dinamik durumlar (Ünal, 2011).....	53
Şekil 5.1. Deneysel çalışmanın yapıldığı pres tezgahı ve kalıp seti.....	57
Şekil 5.2. Matris ve baskı plakası imalatı.....	59
Şekil 5.3. Zimba taşlama işlemi	59
Şekil 5.4. Matris açılı Hidromekanik derin çekme deney seti tam kesit görünüşü	60
Şekil 5.5. Yüzey pürüzlülük ölçüm değerleri.....	60
Şekil 5. 6. Basınç kontrol valfi	61
Şekil 5.7. Kalibrasyon matrisi	62
Şekil 5.8. İş parçası et kalınlığı ölçümü	64
Şekil 5.9. Kalıp ekipmanları ağ yapıları.....	65
Şekil 5.10. Deney setine ait ağ yapısı.....	65

Şekil 5.11. Sayısal analiz parametrelerinin belirlenmesi	66
Şekil 6.1. Matris açısı ve zımba radyüsünün Limit çekme oranına etkisi.....	69
Şekil 6.2. Matris açısının etkisi ile elde edilen deney numuneleri	70
Şekil 6.3. Zımba radyüsü ve Matris açısının limit çekme oranına etkisi	70
Şekil 6. 4. Zımba radyüsünün etkisi ile elde edilen deney numuneleri.....	71
Şekil 6.5. Kalıp Radyüsü ve Matris açısının limit çekme oranına etkisi.....	71
Şekil 6.6. Kalıp radyüsünün etkisi ile elde edilen deney numuneleri	71
Şekil 6.7. Hazne basıncı ve Matris açısının limit çekme oranına etkisi.....	72
Şekil 6.8. Hazne basıncının etkisi ile elde edilen deney numuneleri	73
Şekil 6.9. Baskı plaka kuvveti ve Matris açısının limit çekme oranına etkisi.....	73
Şekil 6.10. Baskı plaka kuvvetinin etkisi ile elde edilen deney numuneleri	74
Şekil 6.11. Matris açısının kap et kalınlığına etkisi	75
Şekil 6.12. Zımba radyüsünün kap et kalınlığına etkisi	76
Şekil 6.13. Matris radyüsünün kap et kalınlığına etkisi	76
Şekil 6.14. Hazne basıncının kap et kalınlığına etkisi.....	77
Şekil 6.15. Baskı plaka kuvvetinin kap et kalınlığına etkisi	78
Şekil 6.16. Matris açısının zımba kuvvetlerine etkisi	79
Şekil 6.17. Zımba radyüsünün zımba kuvvetlerine etkisi	80
Şekil 6.18. Matris radyüsünün zımba kuvvetlerine etkisi	81
Şekil 6.19. Hazne basıncının zımba kuvvetine etkisi.....	82
Şekil 6.20. Baskı plaka kuvvetinin zımba kuvvetine etkisi.....	82
Şekil 6.21. Deneysel çalışmada elde edilen iş parçası hasarları.....	83
Şekil 6.22. Limit çekme oranı için S/N grafikleri	85
Şekil 6.23. Zımba kuvveti için S/N grafikleri	87
Şekil 6.24. Kap et kalınlığı için S/N grafikleri.....	88
Şekil 6.25. Matris açısının limit çekme oranına etkisi	90
Şekil 6.26. Limit çekme oranı için sayısal analiz ile deneysel analiz sonuçlarının karşılaştırılması.....	90
Şekil 6.27. Zımba kuvvetleri için sayısal analiz ile deneysel analiz sonuçlarının karşılaştırılması.....	91
Şekil 6.28. Matris açısının kap et kalınlığına etkisi	91

Şekil 6.29. Kap et kalınlığı değışimi için sayısal analiz ile deneysel analiz sonuçlarının karşılaştırılması.....	92
--	----



TABLÖLAR LİSTESİ

	Sayfa No
Tablo 3. 1. Metallerin kristal yapısı(Kayalı & Çimenoglu, 1995).....	21
Tablo 3.2. Kalıp radyüsü için önerilen değerler	31
Tablo 3.3. Malzeme cinsine göre silindirik işlemlerde çekme hızları (Kayalı & Ensari, 2000).....	32
Tablo 3.4. Hidromekanik derin çekme işleminde hazne basınçları (Tzchaetsch, 2006)	36
Tablo 4.1. Taguchi ve tam faktöryel tasarım için kombinasyonlar (Canıyılmaz, 2001)	44
Tablo 4.2. Taguchi' nin sinyal gürültü oranları	45
Tablo 4.3 2 ^k ve Taguchi dizaynı deney planları (Özay, 2009)	47
Tablo 5.1. Deney numunesi kimyasal analizi	58
Tablo 5.2. Deney numunesi mekanik özellikleri	58
Tablo 5.3. Ø30 mm zımba çapına karşılık gelen limit çekme oranları.....	59
Tablo 5.4. Matris açılı hidromekanik derin çekme deney parametreleri	61
Tablo 5.5. L18 Taguchi deney tasarımına göre yapılan deneyler.....	63
Tablo 6.1. L18 Deney tasarımına göre yapılan deneysel çalışma sonuçları.....	68
Tablo 6.2. Deney seviyeleri ve parametreler	84
Tablo 6.3. Limit çekme oranına göre ortalama S/N oranları	84
Tablo 6.4. Limit çekme oranı için ANOVA sonuçları.....	85
Tablo 6.5. Zımba kuvvetine göre ortalama S/N oranları	86
Tablo 6.6. Zımba Kuvveti için ANOVA sonuçları.....	87
Tablo 6.7. Kap et kalınlığına göre ortalama S/N sonuçları.....	88
Tablo 6.8. Kap et kalınlığı için ANOVA sonuçları	89

SEMBOLLER LİSTESİ

σ_g	: Gerçek gerilme
K	: Mukavemet katsayısı
ε	: Gerçek birim şekil değiştirme
n	: Deformasyon sertleşmesi üssü
σ	: Plastik gerilme
C	: Malzeme sabiti
m	: Deformasyon hızı duyarlılığı üssü
$\dot{\varepsilon}$	: Gerçek deformasyon hızı (mm/s)
l_0	: Numunenin deformasyon öncesi uzunluğu
l	: Numunenin deformasyon sonrası uzunluğu
v	: Pres hızı
F_z	: Çekme kuvveti
d	: Zımba çapı
s	: Sac malzeme kalınlığı
R_m	: Sac malzemenin çekme dayanımı
n	: Katsayı
r_e	: Köşe radyüsü
p	: Baskı plakası basıncı
D	: İlkel parça çapı
β_{actual}	: Gerçek çekme oranı (ilk çekme)
r_k	: Kalıp radyüsü
r_z	: Zımba radyüsü
w	: Çekme boşluğu
α	: Matris açısı
β	: Limit çekme oranı
E	: Elastikiyet modülü
ν	: Poisson oranı

1. GİRİŞ

Kaliteli ve düşük maliyetli üretim, imalat açısından makine teçhizat, çalışma zamanı ve işlenmemiş ham malzemeyi doğru kullanmak amacıyla seri imalat yöntemi önemlidir. Bu yöntem, talaşlı imalat ve talaşsız imalat yöntemleri olarak iki gruba ayrılabilir. Talaş kaldırmadan yapılan seri imalatların başında ise sac metal kalıpcılığı ve plastik hacim kalıpcılığı gelir.

Kalıpcılık günlük hayatımıza girmiş pek çok parçaların üretimini gerçekleştiren en önemli mesleklerden biri olduğu için bu meslek basit bir şekilde açıklanamaz. Parçaların üretiminde, zaman kalite ve ölçü tamlığı, malzeme tasarrufu ve özdeşliği sağlayan, ayrıca işçilik giderlerini asgari düzeye indiren, kalıpcılık mesleğidir.

Talaşsız üretim yöntemlerinden biri olan sac metal kalıpcılığı yönteminde geleneksel şekillendirme yöntemi olarak kesme, delme, bükme, şekil verme ve derin çekme gibi işlemler kolaylıkla yapılmaktadır. Bu işlemler için, sac metal kalıpcılığı tekniğinde kullanılan yöntem ve parametrelerin belirlenmesi önemlidir. Her metal şekli için ayrı bir kalıp gerekliliğinden dolayı hem zaman kaybı hem de maliyet açısından bu üretim yöntemi oldukça pahalıdır. Özellikle, bazı sac metal parça tasarımları için kesme, delme, bükme, şekil verme ve derin çekme yöntemleri ile sac metal parçanın üretilmesi mümkün olmamaktadır.

Derin çekme işlemindeki parametreler geleneksel sac metal kalıpcılığı yöntemlerine göre daha karmaşıktır. Derin çekme işleminde ürün olarak üretilen sac metal parçanın limit çekme oranı, baskı plakası kuvvetine, matris/zimba radyüslerine, çekme hızına, hadde yönüne ve zimba kuvvetine bağlıdır. Ayrıca kullanılan sac metal parçanın kimyasal birleşimi, imalat yöntemi, mekanik özellikleri de bu oranı etkilemektedir. Bu nedenle derin çekme metodunu geliştirmek için çeşitli araştırmalar yapılmış ve son geline nokta ise matris açılı derin çekme ve hidromekanik derin çekme işlemleri geliştirilmiştir.

Hidromekanik derin çekme işlemi, hem geleneksel derin çekme hem de hidrolik şekillendirme teknolojisinin ortak özelliklerini içeren yöntemdir. Hidromekanik derin çekme işlemi, matris, baskı plakası, zimba ve sıvı basıncını sağlamak için kullanılan yağ haznesinden oluşur. Hidromekanik derin çekme yönteminde karmaşık geometriye sahip parçalar kolaylıkla üretilir.

İşlemin başlamasındaki ilk aşamada alt hazne ekipmanına sıvı doldurulur ve bir sonraki adımda sac metal parça ile matris eksenleri çakışacak şekilde sac malzeme matris üzerine yerleştirilir. Sac malzemenin kalıp içerisine kontrollü akması için baskı plakası sac malzeme üzerine kapatılmalıdır. Zımba sac malzemeye doğru hareket eder. Bu esnada ön basınç oluşur. Zımba hareketine devam ederken alt hazne içerisindeki sıvı basıncı artar ve kontrol valfleri ile hazne içerisindeki basınç sabit bir değerde tutulur. Burada oluşan sıvı basıncı sac malzeme ile matris arasındaki sürtünmeyi azaltır. Bu nedenle eşit bir gerilim dağılımı oluşur. Bu durumda ise sac malzeme yırtılmadan daha büyük maksimum çekme oranını yakalar.

Hidromekanik derin çekme yönteminin avantajları, geleneksel derin çekme yöntemine göre malzeme kalınlık değişiminin en alt seviyede olması, yüzey kalitesinin iyi olması, kalıp aşınmasının daha az olması, yüksek çekme oranı ve ölçü tamlığı olarak sıralanabilir. Sıralanan bu avantajların bazıları geleneksel matris açılı derin çekme yöntemi için sağlanamamaktadır. Hidromekanik derin çekme yönteminin dezavantajları ilk kalıp maliyetinin yüksek olması ve sızdırmazlığın sağlanmasıdır.

Bu çalışmada açılı matris derin çekme yöntemi ile hidromekanik derin çekme yöntemi birleştirilmiştir. Özel olarak tasarlanan ve kalibrasyonu yapılan bir deney düzeneği kurulmuştur. Derin çekme işlemi için seçilen sac malzeme endüstride yaygın bir kullanım alanına sahiptir. DIN EN 10130-1999 sac malzeme beyaz eşya, savunma sanayi, otomotiv ve birçok alanda sıklıkla kullanılır. Diğer çalışmalardan farklı olarak DIN EN 10130-1999 sac malzeme ilk defa matris açılı hidromekanik derin çekme yönteminde kullanılmıştır. Sac malzemenin şekillendirme işleminde etkili olan parametreler Taguchi deney planına ve L18 ortogonal dizinine göre yapılmıştır. Seviyelerin optimum değerleri deneysel ve sayısal olarak belirlenmiştir.

Matris açılı hidromekanik derin çekme işlemi için ANSYS 15,0 paket programı kullanılmıştır. Deneysel sonuçlar ile sayısal sonuçlar karşılaştırılmıştır ve sonuçların uyumlu olduğu tespit edilmiştir. Sonuç olarak matris açılı derin çekme yöntemi ile hidromekanik derin çekme yönteminin birleştirilmesi; deneysel ve sayısal analiz olarak limit çekme oranı, et kalınlığı ve zımba kuvveti üzerinde olumlu etkilerinin olduğu belirlenmiştir.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Derin çekme ve hidromekanik derin çekme kalıplama yöntemlerinde çekme parametrelerinin son ürün olarak elde edilen iş parçası üzerindeki etkilerini belirlemek için çok sayıda çalışmalar yapılmıştır. Yapılan bu çalışmalar ele alındığında çekme hataları, deformasyonlar, gerilmeler ve kuvvetlerin incelendiği tespit edilmiştir. Çalışmalar esnasında en uygun ürünü elde etmek için çeşitli parametreler kullanılmış ve bu parametrelerin optimizasyonunu yapmak amacıyla çeşitli deneysel ve sayısal çalışmalar yapılmıştır.

V. Savaş ve Ö. Seçkin, baskı plakası ile kalıp arasına 0° , $2,5^\circ$, 5° , 10° ve 15° olmak üzere beş farklı açı vermek suretiyle, silindirik kapların çekme oranlarının artırılması, dolayısıyla derin çekmedeki operasyon sayısının azaltılarak kalıp ve enerji maliyetlerinin düşürülmesini hedeflemişlerdir. 0° açı da 1,75 olarak tespit edilen limit çekme oranını, 15° açı değerinde 2,175'e hatasız olarak yükseltebilmişlerdir. (Savaş & Seçkin, 2007).

V. Savaş ve diğ., dairesel kesitli kapların derin çekilmesinde, matrise farklı açı değerleri verilerek açının limit çekme oranı üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Çalışmada 0,8 mm kalınlığında Al1050 sac malzeme kullanılmış, matris açı değerlerine bağlı olarak limit çekme oranının arttığını belirtmişlerdir. (Savaş, Özay, & Aytaç, 2015)

C. Özek ve M. Bal, dairesel kesitli kapların derin çekilmesinde, matris ve zımbaya farklı radyüsler, matrise ise farklı açı değerleri verilerek radyüs ve açının limit çekme oranı üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Çalışmada 1 mm kalınlığında DKP37 sac malzeme kullanılmış, artan matris/zımba radyüsü ve matris açı değerlerine bağlı olarak limit çekme oranının arttığını belirtmişlerdir. (Özek & Bal, 2009).

C. Özek ve M. Bal, matris/zımba radyüsü ve çekme oranının sac et kalınlığı üzerine etkisini araştırmışlardır. Baskı plakası ve matris üzerine $\alpha=2,5^\circ$, $\alpha=7,5^\circ$, $\alpha=12,5^\circ$, $\alpha=15^\circ$ açılar, kalıp ve zımba köşelerine $R=4$, $R=6$, $R=8$, $R=10$ mm radyüs vermişlerdir. Limit çekme oranını β , matris açısı α ve kalıp-zımba radyüsünün artması ile birlikte et kalınlık oranının azaldığını belirtmişlerdir. (Özek & Bal, 2009)

C. Özek ve E. Ünal, kare kesitli kapların derin çekilmesinde, kalıp geometrisi ve radyüsünün limit çekme oranına etkilerini araştırmışlardır. Çalışmada, matris yüzeylerine verilen açının artmasıyla, malzemenin kalıp içerisine akışının kolaylaştığı ve limit çekme oranının da arttığını açıklamışlardır. (Özek & Ünal, 2012).

C. Özek ve V. Taşdemir, AA 5754-O alaşımının ılık derin çekilmesi üzerine kalıp yüzey açısı, sıcaklık ve baskı plakası kuvvetinin etkisini deneysel olarak araştırmışlardır. Yapılan çalışmalar neticesinde et kalınlığı, zımba kuvveti ve geri yaylanma üzerine kalıp yüzey açısı ve baskı plakası kuvvetinin etkisinin OS ve 100°C’de daha belirgin olduğu, sıcaklık arttıkça et kalınlığı dağılımının daha homojen hale geldiği; şekillendirme kuvveti, geri yaylanma miktarı ve sertlik değerinin ise önemli ölçüde düştüğünü belirtmişlerdir. Yine kap duvarı boyunca sertlik değerinin kap ağzına doğru gidildikçe arttığı ve sıcaklığın önemli etkisinin olduğunu ifade etmişlerdir. (Özek & Taşdemir, 2017)

V. Özbay, Yüksek lisans tezinde matris yüzeylerine verilen açی değerlerinin artması, malzemenin kalıp içerisine akışının daha kolay olması sağlanmış ve bu sayede çekme işlemini olumlu yönde etkilediğini ifade etmiştir. Açının artmasıyla, limit çekme oranlarının da arttığını belirtmiştir. Maksimum limit çekme oranı $\alpha=15^\circ$ ve BPK=2450 N değerinde $\beta=2,42$ olarak elde etmiştir. Açı değerinin azalmasıyla, limit çekme oranında da azalmanın olduğunu belirlemiştir. Diğer taraftan artan açi değerlerinin zımba kuvvetlerini azalttığı ve buna bağılı olarak çekme işlemi sırasında ölçülen maksimum zımba kuvvetinin de azaldığını belirtmiştir. Diğer yandan et kalınlığı değerleri artan açi değerleri ile beraber artış göstermiştir. (Özbay, 2012)

S. Thiruvarudchelvan ve M.J. Tan, metal kap yapmak için geleneksel derin çekme işleminin kapasitesini hidrolik basınçla artırılabilirliğini ifade etmişlerdir. Hidromekanik derin çekmenin avantajlarında limit çekme oranının arttığı ve kalınlık değişimlerinin azaldığını belirtmişlerdir. Hidrolik basıncın iki önemli etkisine üzerinde durmuşlardır. Bunlardan birincisi deformasyon için dışarıdan sağlanan işe katkıda bulunarak bardak etrafındaki flanşı iter ikincisi ise; kalıp boğazındaki daha büyük gerilmeleri çekmek için kalıp boşluğu ile kap duvarı arasındaki sürtünmeye yardımcı olmasıdır. (Thiruvarudchelvan & Tan, 2006)

Y. Qin ve R. Balendra, iç bükey yapıya sahip zımba ile hidromekanik derin çekme üzerinde çalışmışlardır. Sonuç olarak sac malzemenin iç bükey olarak şekillendirilmesinde oluşan kırılmalar ve sac malzeme kalınlığındaki incelmenin hazne basıncının yetersiz ya da çok fazla olduğu durumlarda meydana gelebileceği ifade etmişlerdir. (Qin & Balendra, 2004)

Z. Zhanga ve diğ., bu çalışmada hidromekanik derin çekmenin sonlu elamanlar simülasyonu için şekillendirilmiş limit diyagramına göre bir yanıt değişkeni önermişlerdir. Yeni yanıt değişkenini doğrulamak amacıyla kalıp boşluğundaki farklı hidrolik basınçlar

ile hidromekanik derin çekme işlemi için bir dizi sonlu elamanlar simülasyonunu yapmışlardır. Önceki araştırmaların temelinde; kırılan veya kırılmayan hidromekanik derin çekmenin; sonlu elamanlar simülasyonu için önerilen yeni yanıt değişkenleri bu çalışmada doğru olduğunu göstermişlerdir. Deneysel simülasyon sonuçları yeni yanıt yönteminin geçerliliğini gösterdiğini ifade etmişlerdir. (Zhang, Zhao, & Zhang, 2008)

H. Choia ve diğ., sıcaklık, baskı plaka kuvveti, hidrolik basınç ve şekillendirme hızı gibi işlem parametrelerinin etkilerini incelemek için analitik modeller geliştirmişlerdir. Analitik modelleri doğrulamak için sonlu elamanlar yöntemi ile araştırmalar yapmışlardır. Analitik modeller ile mevcut olan deneysel sonuçları ve sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilen sonuçları karşılaştırmışlardır. Geliştirilen analitik modele göre sıcaklık, hidrolik basınç, baskı plakası kuvveti ve zımba hızı durumlarına ilişkin birkaç parametrik çalışma yapmışlardır. Başarılı bir derin çekme işlemi için pahalı ve uzun süren termo-mekanik derin çekme işlemi, FEA ve deneysel çalışmalar ile karşılaştırıldığında analitik modeller ile daha hızlı bir çözüme gidileceğini öngörmüşlerdir. (Choi, Koc, & Ni, 2007)

S. K. Singh ve D. R. Kumar, hidromekanik derin çekmede; düzgün gerilme dağılımı, daha iyi yüzey kalitesi ve geliştirilmiş boyutsal doğruluk yüksek çekilebilirlik gibi özelliklerde geleneksel derin çekmeye göre çeşitli avantajlar sunduğunu ifade etmişlerdir. İşlem parametreleri, en yüksek hazne basıncı ve ilk hazne basıncı gibi ve yağ boşluğunun süreç üzerinde güçlü bir etkiye sahip olduğunu belirtmişlerdir. Bu çalışmada hidromekanik derin çekmede tamamlanmış yüzey ve kalınlık dağılımı üzerinde en yüksek hazne basıncı ve ilk hazne basıncının etkilerini araştırmışlardır. Deneylerde düşük karbon içeren sac malzeme kullanmışlardır. Kap duvarlarındaki kalınlık dağılımlarının daha homojen olduğunu belirtmişlerdir. Düşük hazne basıncında işlem geleneksel derin çekme işlemine kaydığını, yüksek hazne basınçlarında ise radyüs bölgesinin duvar bölgesine kayacağını açıklamışlardır. (Singh & Kumar, 2008)

S. K. Singh ve A. K. Gupta, hidromekanik derin çekmedeki kap duvarı boyunca kalınlık tahmini için yeni bir veri madenciliği tekniği olan destek veri regresyonu (SVR) uygulamışlardır. Hidromekanik derin çekmedeki kalınlık gerilmelerinin tahminlerini eğitim ve test için deneysel sonuçlarını kullandıktan sonra, modeli yeni verilere uygulamışlardır. SVR tahmin sonuçları yapay sinir ağı (YSA), sonlu eleman (FE) simülasyon ve deneysel gözlemler ile karşılaştırmışlardır. SVR ile elde edilen sonuçlar özellikle çekilen kaplardaki duvar bölgelerinde doğru sonuçlar verdiğini ifade etmişlerdir. (Singh & Gupta, 2010)

S.H. Zhang ve J. Danckert, hidromekanik derin çekme işlemini incelemişlerdir. İşlem ilke ve özelliklerini tanıtip hidromekanik derin çekme işleminin gelişimi sayısal simülasyon ve teorik olarak açıklamışlardır. Diğer hidrolik şekillendirme işlemleri için karşılaştırma yapmışlardır. Hidromekanik derin çekme işleminde sac malzeme ile kalıp arasındaki sürtünmenin azaldığı ve sac malzeme ile zımba arasındaki sürtünmenin arttığını ifade etmişlerdir. Böylelikle zımba uç kısmındaki kırılmaların önlenebileceğini açıklamışlardır. (Zhang & Danckert, 1998)

B. Meng ve diğ., aktif basınçlı hidrodinamik derin çekme işlemi ve kapalı çevrim kontrol sistemi uygulayarak kalıp boşluk basıncını düzenleyen ve gerçek zamanlı baskı plakası kuvvetini karmaşık parçaların üretimi için geliştirmişlerdir. Daha yüksek kontrol hassasiyeti elde etmek için, hata tahmine sahip PID kontrol cihazları kullanılmıştır. Sonuç olarak aktif basınçlı hidrodinamik derin çekme işlemi sisteminin, karmaşık yapısal bileşenleri ve yüksek mukavemetli malzemeleri oluşturmak için uygun olan baskı plakası kuvvetini ve hazne basıncının çoklu yükleme yolları sunduğunu ve önerilen PID kontrol stratejisinin, iş parçalarının duvar kalınlığı dağılımlarının şekillendirilebilirliğini ve düzgünlüğünü artırabileceğini belirtmişlerdir. (Meng, ve diğerleri, 2014)

S.H. Zhang ve diğ., yumuşak çelik kapları hidromekanik derin çekme işleminde sayısal ve deneysel olarak araştırmışlardır. Şekil varyasyonları ve kalınlık dağılımlarını değerlendirmişlerdir. Son ürün kalitesi üzerinde ön basıncın ve anizotropinin etkilerini incelemişlerdir. Limit çekme oranını $\beta=2,5$ olarak elde etmişlerdir. Sac malzemenin anizotropisi kap şekil değişikliğinin ve kap et kalınlık değişiminin üzerinde güçlü bir etkiye sahip olduğunu açıklamışlardır. (Zhang S. , ve diğerleri, 2003)

İ. Karaağaç ve diğ.nin yaptığı çalışmada, AISI 304 kalite paslanmaz sac malzemenin daire ve kare geometrilili ürünler için geleneksel derin çekme ve SBŞ (sıvı basıncı ile şekillendirme) yöntemi ile derin çekilebilirlikleri sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak AutoForm yazılımı ortamında sayısal analiz olarak incelenmiştir. Analizlerden elde edilen sonuçlar; gerilim dağılımı, kalınlık değişimi, şekillendirilebilirlik, yırtılma ve kırışıklık oluşumu gibi ölçütler açısından değerlendirmişlerdir. Sıvı basıncı ile yapılan çekme işlemi analizlerinde, geleneksel derin çekme yöntemiyle yapılan analizlere göre daha iyi çekme oranını elde etmiş ve sac incelmesinin daha az olduğunu ifade etmişlerdir. Çekme hızının artmasının her iki yöntemde de çekme oranını düşürdüğünü gözlemlemişlerdir. Zımbasındaki radyüsler $R=3$, $R=6$ ve $R=12$ mm olarak kademeli değiştirmişlerdir. Her iki

yöntemde de, zımba radyüsünün artması şekillendirilebilirliği arttırdığını belirtmişlerdir. (Karaağaç, Gürün, & Özdemir, 2009)

İ. Karaağaç ve A. Özdemir, Erdemir 6112 (DC01) kalitedeki sac malzemenin derin çekilebilirliğini deneysel olarak araştırmışlardır. Deneysel çalışmalar; çalışmanın amacına ulaşmak için, tasarımı ve imalatı özel olarak yapılan hidromekanik derin çekme deney düzeneğinde yapmışlardır. Baskı plakası kuvveti ve çekme hızı değerlerini sabit almışlardır (Çekme hızı 6 mm/s). Sac malzeme kalınlığı, ilkel sac çapı, kalıp içi basıncı ve kalıp kavisi parametrelerinin, çekme oranı, çekme kuvveti, güç tüketimi ve şekillendirilen ürünün et kalınlığı değişimine etkilerini deneysel olarak belirtmişlerdir. Çekilen numunelerde, klasik kalıplama yöntemine göre en yüksek çekme oranı $\beta=2.33$ ve en küçük et kalınlığı değişiminin elde edildiğini açıklamışlardır. (Karaağaç & Özdemir, 2011)

İ. Karaağaç ve A. Özdemir, hidromekanik derin çekme yöntemiyle, Bakır (Cu) ve Erdemir 6112 (DC01) sac metallerin kare geometrilili kap olarak şekillendirilebilirliğini araştırmışlardır. Hidromekanik derin çekme yöntemi için hazne basıncının; 10 MPa, 20 MPa, 30 MPa; kalıp radyüsünü R=4 mm, R=6 mm, R=8 mm; zımba hızını 6 mm/s, 12 mm/s, 18 mm/s; sac malzeme kalınlığını 0,5 mm, 0,8 mm, 1,0 mm ve başlangıç sac çapının 120 mm, 130 mm, 140 mm; olarak belirlemişlerdir. Bu değişkenleri kullanarak sac malzemelerin şekillendirilebilirlik üzerindeki etkilerini deneysel olarak incelemişlerdir. Bakır ve Erdemir 6112 malzeme için limit çekme oranını $\beta=2,6$ olarak elde etmişlerdir. Her iki sac malzeme için geleneksel derin çekme yöntemine göre daha homojen bir kalınlık değişimi olduğunu belirtmişlerdir. (Karaağaç & Özdemir, 2013)

P. Groche ve diğ., ısıtılmış sac malzeme ile karşı bir basınç kullanılan sistemde alüminyum sacın derin çekme işleminde aktarılan çekme kuvvetini artırmak ve iletilen çekme kuvvetini azaltmak için hidromekanik derin çekme ve sıcak derin çekme kombinesinin farklı etkilerini araştırmışlardır. Sonlu elamanlar simülasyonu ile termomekanik birleştirilerek uygun işlem parametreleri ve optime edilmiş takım dizaynlarını incelemişlerdir. FE simülasyonlarında bulunan proses kontrolünün deneysel çalışmalar sırasında uygun olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca sıcaklığa bağlı proses limitleri ile ilgili pratik testlerin sonuçları, sayısal hesaplamaların sonuçları ile iyi uyum içinde olduğunu açıklamışlardır. (Groche, Huber, Dorr, & Schmoeckel, 2002)

H. Wang ve diğ., bir radyal basınç ile hidromekanik derin çekmede çekme oranının artırılabilirliğini ve çekme kuvvetinin azaltılabilirliğini ifade etmişlerdir. Ancak geleneksel hidromekanik derin çekmede kalıp boşluğu içerisindeki basınçtan daha yüksek

radyal basınç elde edilemediğini belirtmişlerdir. Bu çalışmada sayısal simülasyon analizi ile deneysel çalışmalar birlikte kullanılarak incelenmiş ve radyal basınç tarafından içe aktarılan sıvı destekli hidromekanik derin çekme isimli bir metot geliştirmişlerdir. Bu işlemde içe akan sıvı vasıtasıyla kalıp içerisindeki basınç ile daha yüksek radyal basınç oluşturduğunu belirtmişlerdir. Geliştirilen bu yöntem ile alüminyum malzeme için limit çekme oranını $\beta=2,85$ olarak elde etmişlerdir. (Wang, Gao, & Chen, 2011)

T. Khandeparkar ve M. Liewald, kompleks zımba kullanarak hidromekanik derin çekme işlemini araştırmışlardır. Düşük karbonlu çelik (DC04) ile paslanmaz çelik (DIN 1.4301) olmak üzere iki malzeme kullanmışlardır. İki farklı geometriye sahip olan zımba ile deneyleri gerçekleştirmişlerdir. DC04 düşük karbonlu çelik için limit çekme oranını $\beta=3,0$; DIN 1.4301 paslanmaz çelik malzeme için ise limit çekme oranını $\beta=2,875$ olarak elde etmişlerdir. (Khandeparkar & Liewald, 2008)

K. Dachang ve diğ., alüminyum, bakır ve çelik gibi malzemelerin şekillendirilmesinde hidromekanik derin çekme işleminin gün geçtikçe kullanımının arttığını ifade etmişlerdir. Bu çalışmada süper alaşımlı malzemelerin hidromekanik derin çekme işlemini araştırmışlardır. Süper alaşımlı malzeme üzerinde işlem parametrelerinin etkisini incelemişlerdir. Limit çekme oranını $\beta=2,45$ olarak elde etmişlerdir. Ayrıca bu yöntem ile yüksek mukavemetli malzemelerin oda sıcaklığında şekillendirilebileceğini belirtmişlerdir. (Dachang, Yu, & Yongchao, 2005)

J. Danckert ve K. B. Nielsen, geleneksel hidromekanik derin çekme işleminde baskı plakası ve çekme kalıbı arasında akış sızmasının basınç dağılımının belirlenmesine ilişkin zorluklar yüzünden simülasyon yapmanın zor olacağını ifade etmişlerdir. Bu sorunu hidromekanik derin çekme işleminde önlemek için derin çekme işlemi boyunca baskı plakası üzerindeki basıncı üniform şekilde oluşturarak, baskı plakası üzerine yapılan bu üniform basınç hidromekanik derin çekme işlemi üzerinde kolayca simülasyonunu yapmışlardır. Geliştirilen hidromekanik derin çekme işlemi ile limit çekme oranı $\beta=3,0$ kadar ulaşılan alüminyumdan yapılmış silindirik kapların çekilmesini deneylerle elde etmişlerdir. Bu çalışmada elde edilen deney sonuçları ile FEM sonuçlarını karşılaştırmışlardır. (Danckert & Nielsen, 2000)

S.H. Zhang ve diğ., parabolik şekilli alüminyum iş parçasını hidromekanik derin çekme yöntemiyle şekillendirmişlerdir. Hidromekanik derin çekme işlemi; çeşitli işlem parametreleri ile sonlu elamanlar metodu kullanılarak araştırmışlardır. Kalınlık dağılım sonuçları ile deneysel sonuçlar iyi bir uyum içerisinde ve kırışıklık hataları ve yırtılmalar

bazı şekil durumları için tahmin etmişlerdir. Kalıp boşluk basıncı ve baskı plakası kuvveti etkileri iş parçası deformasyonu üzerinde tartışmışlardır. Sayısal sonuçlar ile deneysel sonuçları karşılaştırmışlardır. Özellikle kırışıklıklar zımba hareketinin son yarım aşamasında gerçekleştiği ve incelemelerin ise zımba hareketinin üçte bir aşamasında gerçekleştiğini belirtmişlerdir. (Zhang, Lang, Kang, Danckert, & Nielsen, 2000)

L. Lang ve diğ., ilk bombeleşme işleminin iki parametresi olan; ilk bombeleşme yüksekliği ve ilk bombeleşme basıncının şekillendirme sürecini önemli bir şekilde etkileyeceğini söylemişlerdir. Bu çalışmada Alüminyum alaşımı ve saf alüminyum kullanılarak ilk bombeleşme basıncı ve ilk bombeleşme yüksekliği için işlem penceresine ihtiyaç olduğunu ve ilk bombeleşme basıncının etkilerini, baskı plakası üzerindeki üniform basınç ile hidromekanik derin çekme işlemini deneysel olarak araştırmışlardır. Deneylerle bulunan şekillendirme sürecinin bazı sonuçlarını analiz etmek için FEM kullanmışlardır. İlk bombeleşme basıncı kap yüksekliklerini etkileyeceğini belirtmişlerdir. (Lang, Danckert, & Nielsen, 2004)

L. Lang ve diğ., Otomotiv ve havacılık endüstrisi alanlarında alüminyum alaşımlarının kullanılması yaygın olduğu ve bu yüzden derin çekmedeki kötü ve soğuk şekillendirme işleminde çekme oranını artırmak için kullanılan en etkin yöntemlerden biri de hidro şekillendirme olduğunu ifade etmişlerdir. Bu çalışmada deneysel olarak incelenen radyal basınç yardımıyla özel bir hidromekanik derin çekme işlemini araştırmışlardır. Yapılan deneyler neticesinde maksimum çekme oranının $\beta=2,46$ olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca hazne basıncı çekme oranını önemli bir şekilde etkileyeceğini açıklamışlardır. (Lang, Danckert, & Nielsen, 2004)

L. Lang ve diğ., radyal basınç ile destekli hidromekanik derin çekme olarak adlandırılan bu yeni metodu ortaya koymuşlardır. Geleneksel hidromekanik derin çekme işleminden farklı olarak radyal basınç çekme kuvvetini azaltmak için boş kenar boyunca etki etdiğini belirtmişlerdir. Karesel olmayan verim kriterleri kullanarak belirgin dinamik sonlu elemanlar hesaplamaları kullanılması ile alüminyum alaşımının şekillendirme işleminin deneyleri ve iç deformasyon mekanizmasını belirlemek için sayısal simülasyon kullanmışlardır. Malzeme akış hızı dağılımı, sac anizotropi etkileri, gerilme dağılımı, şekil değiştirme dağılımı ve sac kalınlığı dağılımı incelenmiştir. Sac malzeme kırılmalarına karşı optimum parametre seviyelerini belirlemişlerdir. (Lang, Danckert, & Nielsen, 2005)

A. Assempour ve E. Taghipour, bu çalışmada hidromekanik derin çekme işlemi üzerindeki normal gerilmenin etkilerini değerlendirmek için analitik modellemeler

geliştirmişlerdir. Zimba hareketinin artışı için şekillendirilmiş fincan şeklindeki parçanın eksenel simetrik elemanları için analizleri değerlendirmişlerdir. Elde edilen sonuçların FE ile uyumlu olduğunu belirtmişlerdir. (Assempour & Taghipour, 2011)

E. Taghipour ve A. Assempour, analitik modeller geliştirerek hidromekanik derin çekme işleminde orantılı yükleme, yüzey gerilimleri ve sabit kalınlık dağılımlarının etkilerini incelemişlerdir. Broyden algoritması ile çözülen artan gerilme teorisine dayalı sonlu fark formunda geometrik ve mekanik değişkenler arasındaki ilişkiler belirtmişlerdir. Orantılı yüklemeler altındaki modellerin sonuçları olan sabit kalınlık durumları ve düzlemsel gerilmeler ana modellerin sonuçlarına göre gerilim dağılımlarının deneysel verileri ile çok farklılık gösterdiğini açıklamışlardır. (Taghipour & Assempour, 2011)

O. Anket, doktora tezinde sac şekillendirme prosesleri içinde yer alan ve son yıllarda dikkatleri üzerine çeken hidromekanik derin çekme yönteminin deneysel ve sayısal incelemesini yapmıştır. Geleneksel derin çekme yöntemi ile hidromekanik derin çekme yönteminin karşılaştırmasını yapmıştır. Deneylerde, otomotiv sektöründe yaygın olarak kullanılan DC04 sac malzeme kullanmıştır. Geleneksel derin çekme yönteminde limit çekme oranını $\beta=2,23$ olarak elde ederken hidromekanik derin çekme yönteminde ise bu değeri $\beta=2,5$ olarak elde etmiştir. (Anket, 2011)

J. Lin ve diğ., hidromekanik derin çekme yönteminin farklı bir uygulaması olan pasif basınçlı hidromekanik derin çekme yöntemini iki piston ile tasarlayıp imal etmişlerdir. Bir piston baskı plaka kuvveti ve radyal basınç için, diğer pistonu ise sac malzemeyi kalıp içerisine itme işlevini sağlamak için kullanmışlardır. PHDD sisteminin avantajı harici bir basınç kaynağına gereksinim duymamasıdır. Deneylerde 08Al çelik malzeme için limit çekme oranını $\beta=2,63$ olarak elde etmişlerdir. (Lin, Zhao, Zhang, & Wang, 2009)

L. Lang ve diğ., uçak imalatında kullanılan alüminyum alaşımlarının karmaşık şekilli hidromekanik derin çekme yöntemi ile incelenmesi üzerinde çalışmışlardır. Çalışmalar deneysel ve sayısal analiz olarak iki kısımda incelenmiştir. Konik hidromekanik derin çekme işlemi için kap gövdesindeki kırışıklıkları gidermek için kalıp hazne basıncını değiştirmektense ilkel sac malzeme şeklini optimize ederek ortadan daha kolay kaldırılacağını belirtmişlerdir. (Lang, ve diğerleri, 2009)

Z. H. Zhang, alüminyum ve yumuşak çelik sac malzemelerin hidromekanik derin çekme yöntemi ile deneysel ve sayısal analizler yapmışlardır. Sac malzeme incelemeleri genellikle zimba radyüslerinde meydana geldiğini sayısal analiz sonuçlarında %25 inceme meydana gelirken ölçülen deney sonuçlarında ise % 26 olduğunu ifade etmişlerdir. Limit

çekme oranı çelik malzeme için $\beta=2,6$ iken alüminyum malzeme için ise $\beta=2,5$ olarak belirtmişlerdir. (Zhang S. , ve diğerleri, 2000)

H. Sato ve diğ., mikro hidromekanik derin çekme işlemi üzerinde araştırma yapmışlardır. Deneysel çalışmalar için 0,8 mm ve 2 mm çapında zımba kullanmışlardır. Deneysel çalışmalarda kullanılan fosfor-bronz, paslanmaz çelik ve saf titanyum malzemelerin kalınlıklarının $t_0=50 \mu\text{m}$ olduğunu ve başarılı bir mikro hidromekanik derin çekme işlemi gerçekleştirdiklerini belirtmişlerdir. (Sato, Manabe, Ito, Wei, & Jiang, 2015)

W. Liu ve diğ., 1 mm kalınlığında 2A12 alüminyum sac malzemesini, hazne basıncı $P_b=5 \text{ MPa}$ ve $P_b=30 \text{ MPa}$ değerleri ile hidromekanik derin çekme işlemini araştırmışlardır. Kavisli yüzey kısımlarında oluşan kırışıklıkların yalnızca hazne basıncı tarafından önlenemeyeceğini ifade etmişlerdir. Hazne basıncının düşük seviyeleri kırışıklıklar için belirli değerde uygun olabilir ancak yüksek hazne basıncı seviyelerinde ani kırılmaların meydana geldiğini belirtmişlerdir. Kavisli yüzeylerdeki kırışıklığı gidermenin ön basınç olduğu sac malzemenin zımba yüzeyine yapışan tabaka alanını artırarak kırışıklığın ortadan kalka bileceğini açıklamışlardır. (Liu, Xu, & Yuan, 2014)

S. Bagherzadeh ve diğ., hafif düşük şekillendirilebilir levhaların şekillendirilebilirliğini arttırmak için işlem ve malzeme avantajlarını içeren alüminyum-çelik levhalarını üst üste koyarak aynı anda hidro şekillendirme işleminin uygulamasını incelemişlerdir. Bu araştırmada Al/St silindirik kapların hidrodinamik derin çekme işlemi üzerindeki gerilme analizini ve kararlılık durumunu araştırmak için analitik modeller geliştirmişlerdir. Bu modellere katman kalınlığının etkisi, katman durumunun ayarlanması, çekme oranı ve işlemin kritik akışkan basıncının önemli parametresi üzerinde birkaç çalışma yapmışlardır. Maksimum zımba kuvveti St/Al yükleme durumu Al/St yükleme durumundan % 11 daha büyük olduğunu belirtmişlerdir. Yüksek mukavemet ile sacın incilmesi çekilebilirlik ve yük taşıma kapasitesinde azalmaya sebep olan bu olgudaki en önemli faktör olduğunu açıklamışlardır. (Bagherzadeh, Mollaei-Dariani, & Malekzadeh, 2012)

S. Bagherzadeh ve diğ., alüminyum (AA1050-0) ve çelik (St13) malzemeleri üst üste koyarak hidromekanik derin çekme işlemini sayısal analiz ve deneysel olarak araştırmışlardır. Deneysel çalışmalarda alüminyum için 0,7 mm ve çelik için 0,4 mm kalınlığında sac malzeme kullanmışlardır. Limit çekme oranının St/Al 'e göre Al/St 'de daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir. Kalınlık değişimleri içinde aynı durumun söz konusu olduğunu ifade etmişlerdir. (Bagherzadeh, Mirnia, & Dariani, 2015)

H. Tseng ve diğ., titanyum/alüminyum kaplı sac levhaları hidromekanik derin çekme kalıplama yöntemi ile deneysel ve sayısal analiz olarak araştırmışlardır. Deney parametreleri olarak baskı plaka kuvveti, sürtünme, hazne basıncı gibi parametrelerin kalınlık dağılım oranına etkisini incelemişlerdir. Aynı zamanda şekillendirilebilirliği düşük olan Ti/Al kaplı sac malzeme 304 paslanmaz çeliğin gösterdiği aynı ürün kalitesini sağlayabileceğini belirtmişlerdir. (Tseng, Hung, Hung, & Lee, 2001)

A. Jalil ve diğ., Al1050/St13 malzemelerini kullanarak hidromekanik derin çekme kalıplama yöntemini araştırmışlardır. Yapılan deneylerde bu iki sacı üst üste koyarak aynı anda hidromekanik derin çekme yönteminde zımba uç radyüsü, limit çekme oranı, sürtünme katsayısı, sac metal kalınlık değişimi ve malzeme özellikleri gibi deney parametrelerini kullanarak deneysel ve sayısal analiz olarak incelemişlerdir. Yüksek anizotropinin şekillendirmeyi önemli ölçüde iyileştirdiğini, zımba yarıçapının artması ile limit çekme oranının arttığını, sürtünme katsayısının arttığı (yetersiz hazne basıncı) durumlarda ise erken kırılmalara neden olduğunu belirtmişlerdir. (Jalil, Hoseinpour, Sheikhi, & Seyedkashi, 2016)

S.H. Zhang diğ., konik dikdörtgen zımba ile alüminyum ve yumuşak çelik sac malzemeleri hidromekanik derin çekme yöntemini sayısal olarak incelemişlerdir. Yapılan çalışma için iki farklı geometride (sekizgen ve daire) sac malzeme kullanmışlardır. Yapılan çalışmalar sonucunda aşırı incelme ve kırışmalar için en uygun deney parametresini elde etmişlerdir. (Zhang, Nielsen, Danckert, Kang, & Lang, 2000)

S.D. Zhao ve diğ., ters derin çekme işleminin şekillendirme üzerindeki farklı teknoloji parametrelerinin etkilerini, optimum teknoloji parametreleri ve doğrulama deneyleri ile birlikte sonlu elemanlar simülasyon metodu kullanarak araştırmışlardır. Ters derin çekmenin özellikle silindirik kapların kalınlık dağılımı ve geometrisi ön derin çekme korelasyonuna bağlı olduğunu belirtmişlerdir. (Zhao, Zhang, Zhang, & Yuan, 2007)

D. Y. Yang ve diğ., geleneksel derin çekme işleminden elde edilen deney numunelerini hidromekanik ters derin çekme kalıplama yöntemine tabi tutarak incelemişlerdir. Kullanılan bu yöntem ile kalınlık dağılımının homojen olduğunu ve limit çekme oranı $\beta=4,46$ olarak elde etmişlerdir. (Yang, Kim, & Lee, 1995)

L. Lang ve diğ., karmaşık kare kapların üretilmesini hidromekanik derin çekme kalıplama yöntemi kullanarak sayısal ve deneysel olarak araştırmışlardır. Deneysel çalışmalarda DC06 ve APP211 olmak üzere iki farklı malzeme kullanmışlardır. Çelik malzeme için limit çekme oranı $\beta=3.53$ iken alüminyum malzeme için ise bu değeri $\beta=3.44$

olarak elde etmişlerdir. Hazne içi basınç değerinin değişimi gövde kırışıklıklarını ve kırılmaları önemli ölçüde etkileyeceğini açıklamışlardır. (Lang L. , Danckert, Nielsen, & Zhou, 2005)

A. Hashemi ve diğ., radyal basınç destekli hidromekanik derin çekme yönteminde Al1050-0, bakır ve St14 çelik malzemelerini araştırmışlardır. Sonlu elamanlar yöntemi ile sac malzeme özelliği, kap et kalınlığı ve hazne basıncı parametrelerini incelemişlerdir. Şekillendirilebilirlik mukavemeti yüksek olan malzeme için kalınlık dağılımının üniform olduğunu ve işlem penceresi diyagramı ile elde edilen veriler ile kırılma ve kırışma olma olasılığını önceden tahmin edebileceklerini belirtmişlerdir. (Hashemi, Gollo, & Seyedkashi, 2015)

Hassan M.A. ve diğ., ince levha veya metal folyoları geleneksel derin çekme ve sürtünmeli yöntemi kullanarak şekillendirilebilirlik üzerine araştırma yapmışlardır. Taguchi deney tasarım yöntemini kullanarak L9 ortogonal dizine göre deneyler gerçekleştirmişlerdir. Deney sonuçlarını ANOVA varyans analizi ve FE yöntemiyle değerlendirmişlerdir. Deneylerde Al050-0 ve 0,5 mm kalınlığında sac malzeme kullanmışlardır. Limit çekme oranı $\beta=3,3$ olarak belirtmişlerdir. (Hassan, Ahmed, & Takakura, 2012)

R. Padmanabhan ve diğ., Paslanmaz çeliğin derin çekme işlemi için etki parametrelerini incelemişlerdir. Yapılan çalışmalarda kalıp radyüsü, baskı plaka kuvveti ve sürtünme kat sayısının etkisini araştırmışlardır. Deneylerde Taguchi deney tasarım yöntemini kullanmışlardır. L9 ortogonal dizine göre deneysel çalışma yapmışlardır. Kalıp radyüsünün derin çekme işlemi üzerinde en belirgin etken olduğunu ifade etmişlerdir. (Padmanabhan, Oliveira, Alves, & Menezes, 2007)

S. Raju ve diğ., AA 6061 sac malzemenin derin çekme kalıplama yönteminde kalıp radyüsü, zımba radyüsü ve baskı plaka kuvveti parametrelerinin kalınlık değişimi üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Deneysel çalışmalar neticesinde kalıp radyüsünün kap et kalınlığı üzerindeki etkisi % 66,49, zımba radyüsünün etkisi % 9,23 ve baskı plakasının etkisi ise %29,16 olduğunu ifade etmişlerdir. Yapılan deneysel çalışmalar için Taguchi deney tasarım yöntemini kullanmışlardır. (Raju, Ganesan, & Karthikeyan, 2010)

M. Colgan ve J. Monaghan, derin çekme kalıplama yöntemini deneysel ve sayısal analiz olarak incelemişlerdir. L8 ortogonal dizin tasarım metoduyla çalışmaları yapmışlardır. Kalıp radyüsünün en önemli parametre olduğunu ve radyüs değerinin ne

kadar az olursa çekme kuvvetinin arttığını ve kalıp et kalınlık değeriindeki incelmeyi ise fazla olduğunu belirtmişlerdir. (Colgan & Monaghan, 2003)

T. Srinivas ve A. C. Reddy, sıcak derin çekme yöntemi için Taguchi ve ANOVA tekniklerine dayanan istatistiksel bir yaklaşım ve FEM ile Al 1100 malzemesinin şekillendirilebilirlik üzerindeki parametrelerini araştırmışlardır. FEM analizi için D-FORM yazılımını kullanmışlardır. Deneysel çalışma parametreleri olarak sac et kalınlığı, sıcaklık, sürtünme katsayısı ve gerinim oranını incelemişlerdir. Gerinim oranı için en etkili parametre sac et kalınlığı olduğunu ifade etmişlerdir. (Srinivas & Reddy, 2015)

A. C. S. Reddy ve diğ., derin çekme proses parametrelerinin etkilerini AA6111 alüminyum alaşımı için varyans analizi ve Taguchi deney tasarım yöntemini L9 ortogonal dizin kullanarak araştırmışlardır. Optimum süreç parametrelerini sac malzemesinin farklı alanlardaki kalınlık dağılımı üzerindeki temel etkilerini belirtmişlerdir. Üç önemli işlem parametresi olan zımba radyüsü, kalıp radyüsü ve baskı plaka kuvvetini araştırmışlardır. Sac malzeme kalınlık dağılımı üzerinde bu parametreleri % olarak değerlendirmişlerdir. Baskı plaka kuvvetinin etkisi %56.98, zımba radyüsünün etkisi % 32.12 ve kalıp radyüsünün etkisi %12.90 olduğunu belirtmişlerdir. (Reddy, Rajesham, Reddy, Kumar, & Goverdhan, 2015)

B. Zareh ve diğ. FEM tabanlı Taguchi metodu kullanarak radyal basınç destekli hidromekanik derin çekme işleminde şekillendirme parametrelerinin kaliteli parça üretimi üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Bu çalışmada üç farklı zımba kullanmışlardır. L9 ortogonal dizine göre deney parametrelerini oluşturmuşlardır. Sonuç olarak hazne basıncı ve sürtünme kat sayısının önemli parametre olduğunu belirtmişlerdir. (Zareh, Gorji, Bakhshi, & Nourouzi, 2013)

A. K. Sharma ve D. K. Rout 1 mm kalınlığında sac malzemeyi Taguchi deney tasarımı yöntemini kullanarak L9 ortogonal dizine göre hidromekanik kalıplama yöntemini sayısal olarak araştırmışlardır. Bu çalışmada farklı deformasyon şekilleri için zımba ve sac malzeme yüzeyleri arasındaki sürtünme, anizotropi oranı ve gerilme sertleşmesinin etkilerini incelemişlerdir. Sonlu elemanlar modeli için LsDyna-Explicit Dynamics simülasyonunu geliştirmişlerdir. Son ürün olarak elde edilen kaplarda asgari kalınlık değişimi, limit çekme oranını, daha yüksek anizotropi oranına sahip malzeme derin çekme işlemi için etkin bir yağlama ile elde edilebileceğini ifade etmişlerdir. (Sharma & Rout, 2009)

Literatür çalışmasından da görüldüğü üzere derin çekme kalıplama yöntemleri içerisinde limit çekme oranı artışı ve homojen kalınlık dağılımı ve yüzey kalitesi olarak matris açılı kalıplama yöntemi ile hidromekanik derin çekme yönteminin avantajları ön plana çıkmaktadır. Bu iki kalıplama yöntemi birleştirilerek yapılan çalışmada ise özellikle limit çekme oranındaki artışın göz ardı edilmemesi ve kalınlık dağılımlarındaki sorunlar ihmal edilebilecek düzeyde olduğu görülmektedir. Matris açılı hidromekanik derin çekme yönteminde daha homojen ürün elde edildiğinden daha yüksek mukavemetlerde derin çekme işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu yöntemde kalınlık dağılımlarının ihmal edilebilecek düzeyde olduğundan daha ince sac malzemelerin derin çekme işlemi kolaylıkla gerçekleştirilebilir.

Derin çekme işleminde zımba kuvveti, limit çekme oranı, sacın et kalınlığı, kullanılan malzemenin cinsi, kalıbın ve zımbanın geometrisi, baskı plakasının kuvveti ve ilkel sac malzemenin geometrisi gibi birçok deney parametresi incelenmiştir. Bu parametrelerin incelenmesi maliyet ve zaman açısından çok önemlidir. Sayısal analiz sonuçlarının deneysel sonuçlar ile uyumlu olmasından dolayı üretim için maliyet ve zaman farkını en az seviyeye indirmiştir.

Bu çalışmada diğer derin çekme yöntemlerinden farklı olarak matris yüzeylerine 0° , 2.5° , 5° , 10° , 12.5° ve 15° olmak üzere farklı açı verilerek malzemenin kalıp içine doğru hareketi daha kolay hale gelmesi sağlanmıştır. Ayrıca zımba/ matris radyüsleri $R=6$ mm, $R=8$ mm ve $R=10$ mm, hazne basıncı 6 Mpa, 8 Mpa ve 10 Mpa olarak seçilmiştir. Sac malzemenin kalıp içine akması esnasında kontrolü sağlamak için baskı plakasına uygulanan kuvvetler 1964,95 N, 5882,78 N ve 9507,64 N olarak seçilmiştir. Limit çekme oranının en düşük değeri $\beta=2.4$ iken en büyük değeri $\beta=2.6$ çıkması, 0.9 mm kalınlığındaki sac malzeme için kalınlık dağılımlarındaki en düşük alan kalınlığı 0.7635 mm iken en yüksek alan kalınlığı ise 0.9970 mm değerine çıkması sağlanmıştır.

Deneysel çalışmalarda ve sonlu elamanlar yönteminde elde edilen sonuçlar ve bu sonuçların bir birine uyumlu olduğu görülmüştür. Çalışmanın, sac şekillendirme yöntemlerine katkı sağlayacağı gibi akademik çalışmalarda önemli ölçüde katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

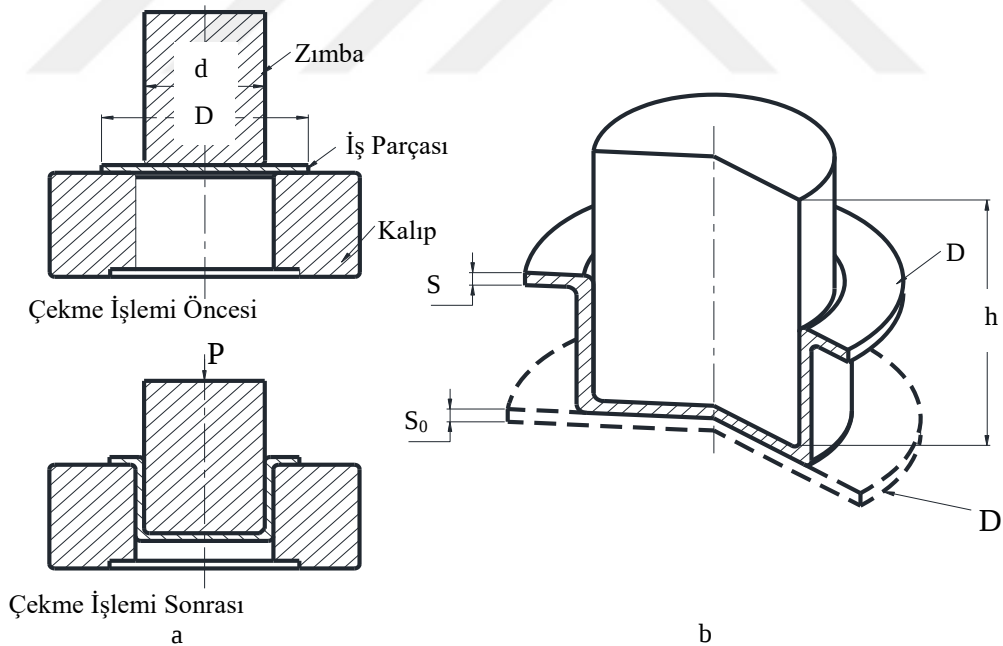
3. SAC METAL KALIPCILIĞI

Sac metal kalıpcılığı, eşit ölçülere sahip parçaların istenilen ölçü tamlığı sınırları içerisinde üretilen, malzeme sarfiyatının azalmasını ve insan gücünün en az düzeyde olmasını ve takım tezgâhları ile çalışabilen makine ekipmanına kalıp denir. Sac metal kalıplar kesme ve delme kalıbı, bükme kalıbı, derin çekme kalıpları olarak sınıflandırılabilir.

3.1. Derin Çekme Kalıplama Yöntemi

Dairesel veya çok kenarlı sac plakaların çekme kalıbı adını taşıyan elamanlar vasıtasıyla preste çöktürülerek tas, kovan, çanak v.s. gibi üç boyutlu parçalar elde edilmesi işlemine “çekme” denir. Çekilecek iş parçasına birden fazla operasyon ile istenilen şekil verilebiliyorsa bu işleme derin çekme işlemi denir.

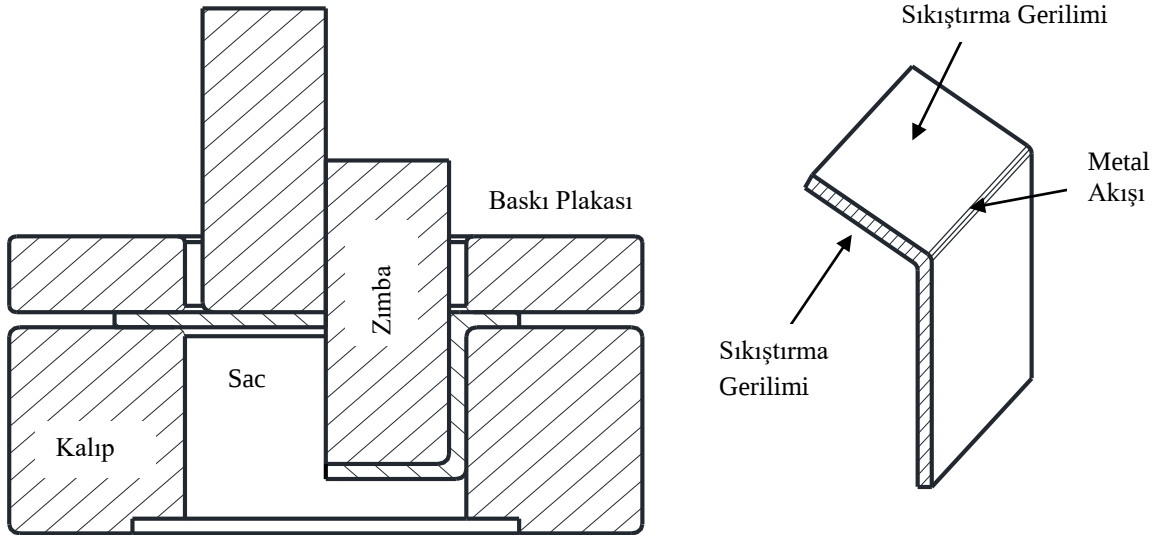
Şekil 3.1’ de dairesel iş parçasından d yarıçapına sahip bir kabın çekme işleminden sonra meydana gelen görüntüsünün şematik gösterimi verilmiştir.



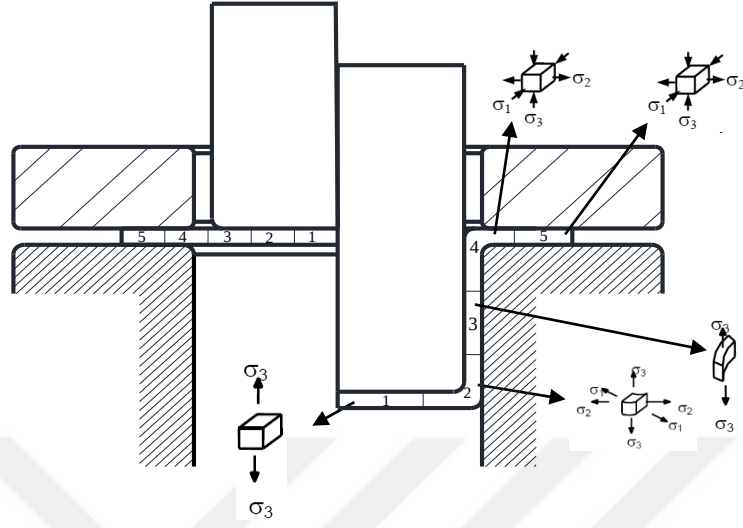
Şekil 3. 1. Derin çekme işlemi a. Şematik b. Perspektif (Topaç, 2003)

Şekil 3.1. de görüldüğü gibi S_0 kalınlığına ve D çapına sahip sac plaka d çapındaki bir zımba yardımıyla matris içerisine çekilerek, zımba geometrisi ile aynı geometriye sahip bir kap haline getirilmektedir. (Topaç, 2003)

Çekme işlemi pres tezgahı vasıtasıyla zımbaya verilen hareket doğrultusunda zımbanın sac malzemeye uyguladığı kuvvetten dolayı sac levha kalıp içerisine doğru hareket etmeye başlar. Sac levha kalıp kenarlarındaki radyüsler (kalıp kavis yarıçapı) üzerine eğilerek kalıp içerisine girmeye başlar. Zımba hareketi ile sac levha zımba ile kalıp arasında bulunan çekme boşluğundan kalıp içine doğru hareket ederek düz düşey duvar oluşturur. Bu aşamanın sonunda ise sac levhanın zımba alanının dışında kalan kısmı kalıp boşluğuna otururken sac levhanın baskı plaka ile kalıp arasında kalan kısmı sürtünme kuvvetine maruz kalarak sac levhanın kalıp içine doğru akma işlemine engel olur. Bu sürtünme kuvvetleri başlangıçta statik durumda olup sac levha zımba tarafından uygulanan kuvvet neticesinde hareket etmeye başladığında bu kuvvetler azalır. Şekil 3.2.' de ki gibi çekilmekte olan bir sac parçası için, sac levha kalıp içerisine radyal olarak akmaya başladığı andan itibaren başlangıç kalınlığı azalmaya başlar ve zımba çapından daha büyük çapa sahip olan sac levha kalıp çapına göre şekillenmeye başlayarak düşey duvarlar oluşturur. Yapılan bu işlem sonrasında levha yüzeyinde dairesel sıkıştırma gerilimine sebep olur. Zımbanın ilerleyen hareketi ile sac levhanın büyük bir kısmı zımba ile kalıp arasında düşük dairesel flanş oluşturur. Şekil 3.3.' de gösterildiği gibi sac levha düşey duvarlarda zımba ucuna doğru gittikçe büyüyen tek eksenli gerilmeler oluşur. (Demiray, 2006)



Şekil 3. 2. Derin Çekme İşlemi Mekanikliği (Demiray, 2006)



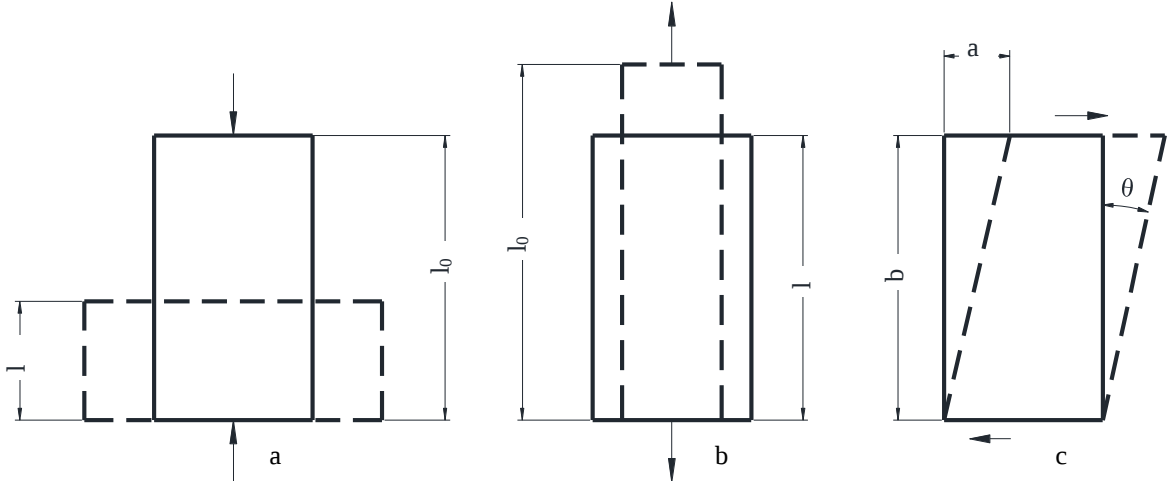
Şekil 3. 3. Derin çekme yönteminde parçada boylamsal kısımda meydana gelen gerilmeler (Demiray, 2006)

3.2. Plastik Deformasyon

Bir katı cisme uygulanan bir kuvvet nedeniyle malzemenin elastik sınırını aşması durumunda malzemenin kütle ve bileşim değişikliğine yol açmadan meydana gelen kalıcı şekil değişikliğine plastik deformasyon denir. Haddeleme, presleme, markalama, dövme, derin çekme ve tel çekme plastik deformasyon yöntemleri olarak bilinir. (Savaşkan, 2009)

Karbonlu ve alaşımlı çelik, çinko, bakır, alüminyum ve bu malzemelerin alaşımları plastik şekil verme yöntemleriyle kolaylıkla şekillendirilebilirler. (Çapan, 2003)

Plastik şekil verme işlemlerinin tümü için malzeme kayma, basma ve çekme gibi üç temel şekil değiştirme işlemlerinden biri veya birkaçına maruz kalır (Şekil 3.4.).



Şekil 3. 4. Temel şekil değişimi (Çapan, 2003) a) Basma b) Çekme c) Kayma

Basma, çekme veya kayma işlemine maruz kalan elamanda meydana gelen birim şekil değiştirme, bu elamanın şekil değiştirme işleminden önceki ve şekil değiştirme işleminden sonraki boyutlarına bağlı olarak tarif edilir. Basma ve çekme işleminde birim şekil değiştirme;

$$\varepsilon = \frac{l-l_0}{l_0} \quad (3.1)$$

olarak alınır. Denklem 3.1’de görüldüğü gibi birim şekil değiştirme, basma işleminde negatif çekme işleminde ise pozitifdir. Kayma işleminde şekil değiştirme;

$$\gamma = \frac{a}{b} = \tan \theta \quad (3.2)$$

şeklinde ifade edilir(Çapan, 2003).

Dislokasyonların hareketi sonucunda atom düzlemlerinin bir biri üzerinden hareket etmesine kayma denir. Plastik deformasyon için en büyük kayma gerilmesi teorik olarak (τ_{max});

$$\tau_{max} = G \cdot \gamma \quad (3.3)$$

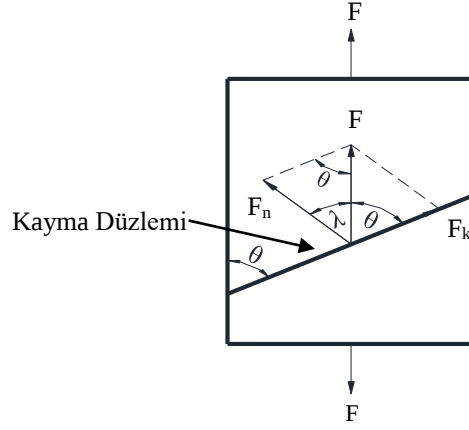
seviyesindedir. İfadede belirtilen G kayma elastisite modülüdür. Teorik olarak çekme mukavemeti (σ_{max}) ise;

$$\sigma_{max} = E \cdot \varepsilon \quad (3.4)$$

alınabilir.

Deneysel çalışmalarda elde edilen plastik şekil değişimine yol açan kayma gerilmesi, denklem 3.3’den hesaplanan teorik kayma gerilmesinden (τ_{max}) daha düşüktür. Deneysel çalışmalardan ve teorik hesaplamalardan elde edilen bu fark, yapıda bulunan malzeme kusurlarından (özellikle dislokasyon) ileri gelmektedir. Dislokasyon, yapı içerisinde eksik kalmış atomsal düzlemlerdir. Başka bir deyişle bir kristalin mükemmel iki bölümü arasında yapı düzeni bozulmuş bir bölge anlamına gelir ve kristalin kaymış bölgesi ile kaymamış bölgesi arasında sınır oluşturan çizgisel kusur olarak tanımlanır(Savaşkan, 2009).

Plastik deformasyon işlemi boyunca uygulanan kuvvetin sebep olduğu gerilmenin kayma düzlemine dik doğrultudaki bileşeni kaymayı etkilemez.



Şekil 3. 5. Kayma düzlemi üzerindeki kuvvet bileşenleri(Savaşkan, 2009)

Denklem 3.5’ de F uygulanan çekme kuvvetini, F_k kayma kuvvetini, F_n normal kuvveti, A_0 , F kuvvetine dik kesit alanını ve A_k kayma düzlemi üzerindeki kesit alanını göstermektedir.

Kayma ancak, kayma düzlemi üzerindeki gerilmenin kayma yönündeki bileşeni (τ_r) ile gerçekleşir. Kayma yönündeki gerilme ifadesi;

$$\tau = \frac{F_k}{A_k} = \frac{F \cdot \cos \theta}{A_0 / \cos \lambda} = \frac{F}{A_0} \cdot \cos \theta \cdot \cos \lambda \rightarrow \tau_r = \sigma \cdot \cos \lambda \cdot \cos \theta \quad (3.5)$$

ifadesi ile bulunabilir. Burada, σ kristale uygulanan normal gerilme olup;

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (3.6)$$

Hook kanunu olarak ifade edilir(Savaşkan, 2009).

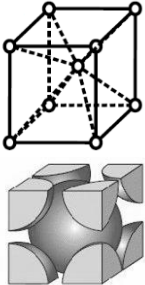
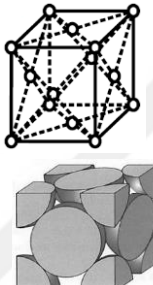
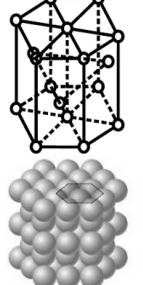
Bir kristalde kayma işleminin gerçekleşebilmesi için denklem 3.6’ da hesaplanan σ kayma gerilmesinin τ_{kr} kayma direncine eşit olması halinde gerçekleşebilir. Kayma işleminin gerçekleşebilmesi için aşılması gereken kayma direncine kritik kayma gerilmesi (τ_{kr}) denir.

Metal malzemelerin kristallerinin plastik şekil değişiminde $\tau_r > \tau_{kr}$ şartını sağlamasıyla ve denklem 3.5’ e göre en büyük τ_{rmax} kayma gerilmesi bileşeninin oluşturduğu kayma sisteminde gerçekleşir. Kristaller şekil değiştirirken deformasyon sertleşmesine maruz kalırlar ve mukavemeti artar. Bu nedenle daha fazla şekil değişimi için uygulanan gerilmeyi artırmak gerekir (Kayalı & Çimenoglu, 1995).

Metal malzemeler çok özel durumlar dışında daima kristal yapıya sahiptirler. Bu kristal yapıya bağlı olarak metaller farklı deformasyon davranışı göstermektedirler. Yüzey

merkezli kübik (YMK) ve sıkı paket hekzagonal (SPH) kafes yapısına sahip metallerde kayma sadece bir kayma sisteminde meydana gelir. Uygulanan gerilmenin artırılmasıyla ve deformasyon sertleşmesi etkisiyle, kritik kayma gerilmesi değeri artmış olan diğer kayma sistemleri de deformasyona katılır. Hacim merkezli kübik (HMK) kristal yapı daha deformasyonun başlangıcında en büyük kayma gerilmesi doğrultusunu paylaşan iki veya daha fazla kayma düzlemi üzerinde kayar, yani tek kayma düzleminde kayma yerine çok kayma düzleminde kayma olur. Çeşitli metallerin kristal yapısı Tablo 3.1’de verilmiştir.

Tablo 3. 1. Metallerin kristal yapısı(Kayalı & Çimenoglu, 1995)

Hacim Merkezli Kübik (HMK)		Yüzey Merkezli Kübik (YMK)		Sıkı Paket Hekzagonal (SPH)	
Krom Demir (α) Molibden Tungsten Vanadyum Tantal Titanyum (β) Zirkonyum (β)		Alüminyum Demir (γ) Bakır Altın Kurşun Nikel Gümüş Kobalt (β)		Berilyum Magnezyum Çinko Kobalt (α) Titanyum (α) Zirkonyum (α)	

Bir kristalde kritik kayma gerilmesinin artmasına katkıda bulunan faktörler, mukavemetin artmasına da sebep olur. Metallerdeki artık gerilme miktarı, alaşım elementlerinin oranı ve kristal yapı hatalarının (özellikle dislokasyonlar) oranının artması ile kritik kayma gerilmesi de artmaktadır. Sıcaklık ve deformasyon hızı da kritik kayma gerilmesini önemli ölçüde etkilemektedir.

Metalik malzemelerin plastik deformasyon kabiliyeti, kimyasal bileşim ve metalürjik yapı ile kontrol edile bilen özelliklerin yapı sıra şekillendirme koşullarına da bağlıdır(Kayalı & Çimenoglu, 1995).

Deformasyon esnanın da sıcaklık, malzemelerin deformasyon davranışları üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Sıcaklığın artması ile malzeme mukavemeti azalır, süneklik ise

artar. Bu nedenle şekillendirme sıcaklığına bağlı olarak deformasyon işlemleri sınıflandırılmıştır.

Malzemelerin klasik sınıflandırmasında, yeniden kristalleşme sıcaklığı (T_{yk}) ile deformasyon sıcaklığı kıyaslanır. Metallerin yeniden kristalleşme sıcaklığı mutlak ergime sıcaklığına kıyasla $1/3$ 'ü ile $1/2$ 'si arasındadır. $T > T_{yk}$ ise sıcak işlem, $T < T_{yk}$ ise soğuk işlem olarak belirtilir (Kayalı & Çimenoglu, 1995).

Şekillendirme işlemi sırasındaki deformasyon sıcaklığının (T , °K) malzemenin ergime sıcaklığına (T_m , °K) oranı olan benzeş sıcaklığı (T/T_m) göre deformasyon işlemleri üç gruba ayrılır (Kayalı & Çimenoglu, 1995).

$T/T_m > 0,5$ ise sıcak işlem
 $0,5 > T/T_m > 0,3$ ise ılık işlem
 $T/T_m < 0,3$ ise soğuk işlem olarak belirlenir.

Şekillendirmenin soğuk işlem koşullarında yapıldığı durumda malzemeye uygulanan deformasyon miktarına bağlı olarak deformasyon sertleşmesi sebebiyle mukavemet artar. Deformasyon miktarının mukavemet üzerindeki etkisi;

$$\sigma_g = K \cdot \varepsilon^n \quad (3.7)$$

şeklindeki Holloman eşitliği ile ifade edilmektedir (Kayalı & Çimenoglu, 1995).

Burada;

σ_g : Gerçek gerilme (N/mm^2),
 K : Mukavemet katsayısı (N/mm^2),
 ε : Gerçek birim şekil değiştirme,
 n : Deformasyon sertleşmesi üssü dür.

Soğuk şekillendirme etkisiyle malzemenin metalürjik yapısı, özellikle tane şekli değişikliğine uğramaktadır. Plastik deformasyon sırasında tanelerin deformasyon yönünde şekil değiştirmesi (uzaması) sonucu malzeme özellikleri yöne bağımlı hale gelir (anizotropi). Metalik malzemelerde anizotropinin iki tipi vardır. Bunlar kristallografik anizotropi ve mekanik fiberleşmedir.

Soğuk deformasyon işlemlerinde, genellikle malzeme yapısında iç gerilmeler de oluşmaktadır. Bu dezavantajların yanı sıra, malzemenin işlem gören yüzeylerinin düzgün olması ve istenen boyut toleranslarında ürün elde edilebilmesi soğuk şekillendirme

işleminin avantajlarıdır. Soğuk şekillendirme işlemi malzeme yapısında oluşturduğu etkilerden kaçınmak, şekillendirme esnasında oluşan deformasyon sertleşmesi nedeniyle azalan sünekliği artırmak için soğuk şekillendirme işlemi sırasında ara tavlama yapılmaması gerekebilir. Tavlama yapılan malzeme için, elde edilmek istenen özelliklere göre tavlama sıcaklığı, yeniden kristalleşme sıcaklığının altında veya üstünde seçilebilir.

Sıcak şekillendirme işleminde ise, deformasyon sertleşmesi ve malzemede bozulan tane yapısı, deformasyon sırasında oluşan yeniden kristalleşme sonucu yeni tanelerin oluşumu ile giderilerek büyük eksenli taneler haline dönüşür. Sıcak şekillendirme işlemi yüksek sıcaklıklarda yapıldığından tavlama işlemi artı bir maliyet olur ve aynı zamanda malzeme yüzeyinin oksitlenmesine de sebep olur. Bu oksitlenme nedeniyle iyi yüzey elde etmek oldukça zordur. Üretilen iş parçası boyut toleranslarında, sıcak şekillendirme işlemi uygulanmış iş parçaları, soğuk şekillendirme işlemi uygulanmış iş parçalarına göre daha fazladır. Sıcak şekillendirme işlemine tabi tutulmuş iş parçalarında, malzemede deformasyon sertleşmesi olmadığından, deformasyon sabit gerilme altında gerçekleşir. Yüksek sıcaklıklarda ($T > 0,5 T_m$) deformasyon hızının etkisi oldukça fazladır. Deformasyon hızının mukavemet üzerindeki etkisi;

$$\sigma = \epsilon^m \quad (3.8)$$

eşitliği ile ifade edilmektedir(Kayalı & Çimenoglu, 1995).

Burada,

σ : Plastik gerilme (N/mm²),

C : Malzeme sabiti (N/mm²),

m : Deformasyon hızı duyarlılığı üssü,

$\dot{\epsilon}$: Gerçek deformasyon hızı (mm/s),

olarak alınır.

Metallerin şekillendirme hızının, artmasıyla malzemelerin mukavemeti artarken, sünekliği azalır. HMK metaller diğer kristal yapı malzemelere göre deformasyon hızına daha duyarlıdır. Birim zamanda malzemeye uygulanan deformasyon miktarını belirten deformasyon hızı, mühendislik deformasyon hızı ($\dot{\epsilon}$) ve gerçek deformasyon hızı ($\dot{\epsilon}$) olmak üzere iki ayrı sembolle ifade edilmektedir (Kayalı & Çimenoglu, 1995).

$$\dot{\epsilon} = \frac{de}{dt} = \frac{d[\frac{L-L_0}{L_0}]}{dt} = \frac{1}{L_0} \frac{dL}{dt} = \frac{v}{L_0} \quad (3.9)$$

$$\dot{\epsilon} = \frac{de}{dt} = \frac{d[\ln(L-L_0)]}{dt} = \frac{1}{L} \frac{dL}{dt} = \frac{v}{L} \quad (3.10)$$

Burada;

L_0 : Numunenin deformasyon öncesi uzunluğu (mm),

L : Numunenin deformasyon sonrası uzunluğu (mm),

v : Pres hızı ($v = dL / dt$) (m/dk),

Mühendislik ve gerçek deformasyon hızları (sırasıyla $\dot{\epsilon}$ ve $\dot{\epsilon}$) arasında,

$$\dot{\epsilon} = \frac{\dot{\epsilon}}{1+e} \quad (3.11)$$

şeklinde bir ilişki mevcuttur. Ilık işlem koşullarında ($0,5 T_m > T > 0,3 T_m$) yapılan plastik deformasyon işlemlerinde, plastik deformasyon oranının, deformasyon sertleşmesinin ve deformasyon hızının bir birine yakın derecede ortak ilişkileri vardır. Bu durumda;

$$\sigma = D \cdot \dot{\epsilon}^m \cdot \epsilon^n \quad (3.12)$$

Şeklinde genel bir eşitliğin kullanılması öngörülmüştür.

Burada;

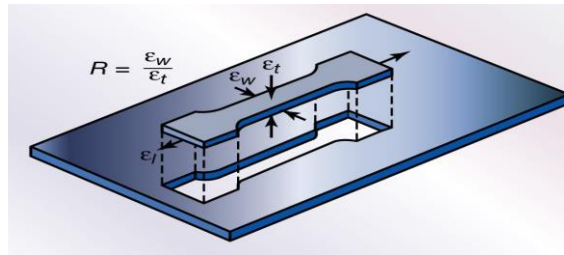
D :Malzeme sabitidir.

Ilık şekillendirme işleminin soğuk ve sıcak şekillendirme işlemine göre bir takım avantajları vardır. Sıcak şekillendirme işlemine göre en büyük avantaj, gereken sıcaklığı elde etmek için gereken enerji tasarrufudur. Soğuk şekillendirme işlemine göre en önemli avantajı ise, gerçekleştirilebilen toplam deformasyon oranının soğuk şekillendirme işleminden fazla olması, aynı zamanda soğuk işlenmiş malzeme mukavemetine yakın mukavemetlerde ürün elde edilmesidir. Ilık şekillendirme işleminde, deformasyon sertleşmesinin etkisi soğuk şekillendirme işlemdeki etkisinden daha azdır. Ilık şekillendirme işlemde, malzemede yeniden kristalleşme olmaz, dinamik toparlanma olur. Metalik malzemelerin plastik deformasyon kabiliyeti, malzeme özellikleri, deformasyon sıcaklığı, deformasyon miktarı ve deformasyon hızının yanı sıra, sürtünme ve yağlama, hidrostatik basınç, kalıntı gerilmeler ve geometrik faktörler gibi diğer faktörlere de bağlıdır(Kayalı & Çimenoglu, 1995).

Malzemenin deformasyon kabiliyeti, sürtünmeden kuvvetinden olumsuz yönde etkilenir. Sürtünme kuvvetini en aza indirmek için kalıp ile iş parçası arasını ve iş parçası ile baskı plakası arasını yağlama yapmak gerekir. Yağlayıcı maddeler fiziksel durumlarına göre katı, sıvı, yarı katı ve gaz yağlayıcılar olarak dört gruba ayrılmaktadır. Yağlama görevini üstlenecek yağların seçiminde özellikle çalışma şartları ve yağın kalitesi için doğru seçim yapılmalıdır. Plastik deformasyon işlemleri esnasında iş parçasına etki eden hidrostatik basınç, mikro boşluk oluşumuna engel olduğundan özellikle kırılma ile sınırlanmış deformasyon işlemlerinde iş parçasının şekillendirme kabiliyeti üzerine olumlu etkide bulunur. Boyun verme ile sınırlanmış deformasyon işlemlerinde ise, hidrostatik basıncın süneklik açısından şekil değiştirmeye olumlu bir etkisi yoktur. Plastik şekillendirme işlemlerinde malzemeler düzenli deformasyon gerçekleştirmediklerinde, yapılarında kalıntı gerilmeler oluşur ve bu kalıntı gerilmeler elastik gerilmeler olup, maksimum malzemenin akma mukavemeti değerinde olabilirler. Kalıntı gerilmeleri gidermenin yolu ısıtma işlemi veya plastik şekil değişimi ile azaltılabilir veya yok edilebilirler. Plastik deformasyonu etkileyen geometrik faktörler; şekillendirilecek metalin işlem öncesi şekli, kalıbın şekli, metalin istenilen şekli alması için deformasyon sırasındaki metal akışının durumu belirler(Kayalı & Çimenoglu, 1995).

3.3. Anizotropi

Anizotropi cisimlerin belirli fiziksel doğrultulara veya yönlere göre özelliğinin değişmesi olarak tanımlanabilir. Sac şekillendirme yöntemleri için önemli bir faktördür.



Şekil 3.6.. Çekme Numunesi örneği ve ölçme yönleri (Anket, 2011)

Şekil 3.6’da görüldüğü gibi çekme deneyi numunesinde, yatay doğrultuda şekil değiştirme “ ϵ_w “, numune et kalınlık doğrultusunda gerçek şekil değiştirme “ ϵ_t ” ile gösterilirse, “ $R = \epsilon_w / \epsilon_t$ ” dikey anizotropi olarak anılır. Burada belirtilen “R” değeri Lankford katsayısı olarak ta ifade edilir. Çekme deneyi işleminden önce ve sonra, deney

numunesinin eni “w₀” ve “w”, kalınlığı ise “t₀” ve “t” ile gösterilirse, “ε_w=ln(w/w₀)”, “ε_t=ln(t/t₀)” olduğundan dikey anizotropi (3.13)’deki eşitlik ile elde edilir (Anket, 2011).

$$R = \frac{\varepsilon_w}{\varepsilon_t} = \frac{\ln\left(\frac{w}{w_0}\right)}{\ln\left(\frac{t}{t_0}\right)} \quad (3.13)$$

Pozitif bir sayı olan dikey anizotropi, “R>1” olduğu takdirde, malzemenin sac düzlemindeki şekil değişimine kıyasla incelmeye karşı mukavemeti daha iyi olduğu şeklindedir; aksi halde “R<1”, izotrop bir malzemede ise “R=1”’dir (Anket, 2011).

Haddelenerek imal edilmiş sacların mekanik özellikleri hadde yönüne bağlı olarak değişir. Bir plaka sactan farklı doğrultularda alınan çekme deneyi örnekleri ile yapılan deneylerde farklı “R” değerleri elde edilebilir. Farklılık gösteren “R” değerlerine sahip bir sacda düzlemsel anizotropi olduğu ifade edilir. Düzlemsel anizotrop özelliğine sahip bir sacda dikey anizotropi için bir ortalama değer tarif edilir. Ortalama dikey anizotropi “R” (3.14) nolu formül ile hesaplanır. Hesaplanan “R” değeri arttıkça malzemenin şekillendirilebilirliği de artacaktır (Anket, 2011).

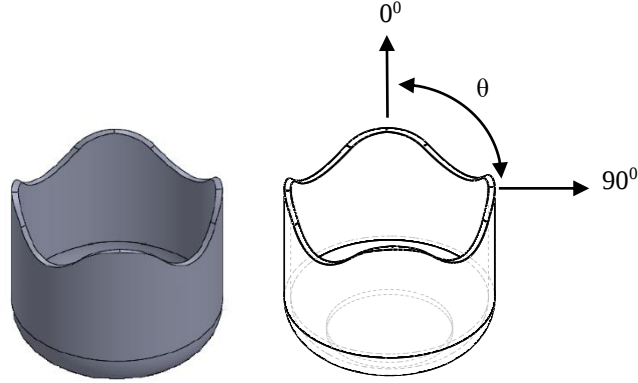
$$\bar{R} = \frac{R_0 + R_{45} + R_{90}}{4} \quad (3.14)$$

Titanyum gibi dikey anizotropisi “R>1” büyük malzemelerde tek seferde daha derin malzemeler çekilebilmektedir. Çinko gibi dikey anizotropisi birden küçük “R<1”, malzemelerde plastik şekil değiştirme malzeme et kalınlığı yönünde oluşur. Malzeme et kalınlığının bu şekilde plastik şekil değiştirmeye uğraması malzemelerde kırılmaların erken oluşmasına sebep olur. Çelik gibi malzemeler R=1,5 gibi dikey anizotropi değeri ile derin çekme kalıplama yönteminde uygun davranış gösterirler (Anket, 2011).

Düşük karbonlu çeliklerde “R” değeri yaklaşık olarak “1,35-1,96” arasında farklılık gösterir. Alüminyum alaşımları için “R” değeri “0,60-0,85” arasındadır. “R” değeri “0,85”’den büyük ise malzeme iyi derin çekilebilir, “0,65”’den küçük ise malzeme kötü derin çekilebilirlik özelliğine sahiptir. Dikey anizotropi sacın çekilebilirliğini, düzlemsel anizotropi ise kırılma sınırlarını etkiler. (Anket, 2011).

Düzlemsel anizotropi, derin çekilmiş kutularda kulak oluşumuna yol açar (Şekil 3.7). Kulak sayısı 2 veya 4’dır. Baskı plakalı çekme prosesinin dışında gerçekleştirilen derin çekme işleminde kutularda sık rastlanan hatalardan biridir. Derin çekme anında çekilen kutunun haddesi yönünde uzama meydana gelir. Çünkü hadde yönünde malzeme yuvarlanması daha fazladır. Silindirik parçalar için çevrede kulaklaşma sayısı malzeme

yuvarlanmasına göre değişiklik gösterir. Çevrede kulaklaşma oluşumunun giderilebilmesi için ilk çapın veya boyutların fazla alınması gerekir ve çekme işleminden sonra kutu ağzını düzeltme gibi ek bir işlem gerekir(Anket, 2011).



Şekil 3.7. Derin çekme kalıplama yönteminde kulak oluşumu(Anket, 2011)

Sabit baskı plaka kuvveti ile çekme derinliğinin artırılabilirdiği, fakat aynı ölçüde kulak oluşumunun da arttığı belirlenmiştir. Sabit baskı plaka kuvveti yerine değişken baskı plaka kuvveti seçilerek kulak oluşumunun en az seviyeye indirilebileceği deneysel olarak görülmüştür (Anket, 2011).

3.4. İlkel Parça Boyutunun Belirlenmesi

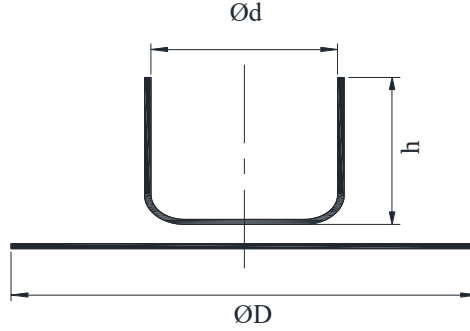
Derin çekme kalıplama yönteminde çekilecek sac parçaya “ilkel parça” denir. Çekme işlemine başlamadan önce ilkel parçanın boyutlandırılması ve şekillendirilmesi gerekmektedir. Dairesel çekmelerde kullanılan sac parçasına “ilkel pul” denir. Çekme işlemi esnasında malzeme birçok gerilmelere maruz kalır ki bunlarda eğme, basma ve çekme gerilmeleridir. Plastik şekil verme işlemlerinin tamamında olduğu gibi çekme işleminde de parçanın ilkel hacmi ile şekillendirilmiş hacmi bir birine eşittir (Erişkin, 1986).

Silindirik parçaların derin çekme işleminde ilkel parça boyu belirlenirken, iş parçasının çekilmeden önceki kesit alanı çekildikten sonraki kesit alanına eşit kabul edilir ve aşağıdaki formüllere göre hesaplanır (Erişkin, 1986).

$$\frac{D^2 \cdot \pi}{4} = \frac{d^2 \cdot \pi}{4} + d \cdot \pi \cdot h \quad (3.15)$$

$$D = \sqrt{d^2 + 4 \cdot d \cdot h} \quad (3.16)$$

mm olarak bulunur (Şekil 3.8).



Şekil 3.8. Alan Metodu ile ilkel çapın bulunması (Erişkin, 1986).

3.5. Limit Çekme Oranı

Limit çekme oranı, yırtılmadan çekilebilecek sac malzemenin en büyük ilkel çapının çekme işleminde kullanılacak zımba çapına oranı olarak belirlenmiştir (Raabe, Wang, & Roters, 2005). Limit çekme oranının hesaplanmasında ise;

$$\beta = \frac{D_{max}}{d} \quad (3.17)$$

eşitliği kullanılır (Topaç, 2003).

Silindirik derin çekme kalıplama yönteminde kullanılan ilkel parça çapının, derin çekme işlemde kullanılacak zımbanın çapına tekabül eden limit çekme oranını aşacak değerler alması durumunda parça yırtılarak hasara uğrar. Derin çekme kalıplama yönteminde iş parçasının başlangıç çapı büyüdükçe çekme işlemini gerçekleştirmek için zımba kuvvetinde bir artış söz konusu olur. Artış gösteren zımba kuvvetinden dolayı iş parçasında oluşacak bir hasar; genellikle kabın yan duvarında veya zımba radyüsünün başlangıç bölgesinde meydana gelir (Topaç, 2003).

Derin çekme işleminde şekillendirilmesi gereken iş parçası boyutlarına göre ilkel çap hesabı yapıldıktan sonra, istenilen ölçülerdeki parçaya dönüştürülmelidir.

Çekilen malzemenin plastik deformasyona zorlanması, malzeme üzerinde birçok gerilmenin ortaya çıkmasına neden olur. Çekme işleminin gerçekleştirilebilmesi için malzemenin akma mukavemeti bu gerilmelerin altında olması gerekir. Malzeme üzerindeki gerilmeler şekil değişimi ile orantılı olduğu için, her çekme işleminde malzemenin dayanabileceği ölçüde şekil değişimi uygulanmalıdır.

3.5.1. Silindirik Parçalar İçin Derin Çekme Adımları

1. çekme işlemi $d_1 = \frac{D}{\beta_0}$

2. çekme işlemi $d_2 = \frac{d_1}{\beta_1}$

3. çekme işlemi $d_3 = \frac{d_2}{\beta_1}$

n. çekme işlemi $d_n = \frac{d_{n-1}}{\beta_1}$

Silindirik derin çekme işlemlerinin kademelendirilmesinde “Hubert” eşitliği denklem 3.18’ de ifade edilmiştir (Tzchaetsch, 2006).

$$n \cong \frac{h_n}{d_n} = \frac{D^2 - d_n^2}{4 \cdot d_n^2} \quad (3.18)$$

Burada;

n : Gereken çekme sayısı

h_n : n’ inci çekim sonrası kap yüksekliği (mm)

d_n : n’ inci çekim sonrası kap çapı (mm)

D : İlkel parça çapı (mm)

3.6. Çekme Kuvveti

Çekme kuvveti, ilkel parçadan son ürüne kadar parça üzerine etki eden kuvvete denir. Bu kuvvet ilkel parça kalınlığına, malzemenin çekme mukavemetine, çekilen parçanın çapına, baskı plakasının kuvvetine, kalıp ile parça arasındaki sürtünmeye, kalıp ve zımba radyüslerine bağlı olarak değişir (Güneş, 2002). Çekme kuvvetinin hesaplanmasında denklem 3.19’ deki eşitlikten yararlanılmaktadır (Raabe, Wang, & Roters, 2005).

Silindirik parçalar için;

$$F_z = \pi \cdot d \cdot s \cdot R_m \cdot n \quad (3.19)$$

Burada;

F_z : Çekme kuvveti (N)

d : Zımba Çapı (mm)

s : Sac malzeme kalınlığı (mm)

R_m : Sac malzemenin çekme dayanımı (N/mm²)

n : Katsayı

3.7. Baskı Plaka Kuvveti (BPK)

Baskı plakası kuvveti çekme esnasında malzemenin kenarlarındaki kırışmaları önlemek için kullanılan en önemli etkenlerden biridir. Bu kuvvetin fazla olması halinde kalıp ile sac malzeme arasındaki sürtünme kuvveti artar ve sac malzemede kırılmalar meydana gelir. BPK kuvvetinin yetersiz kaldığı durumlarda ise sac malzeme etrafında kırışmalar görünür. Baskı plakası kuvvetinin hesaplanması için denklem 3.20' den yararlanılabilir (Tzchaetsch, 2006).

$$F_B = \frac{\pi}{4} [D^2 - (d + 2 \cdot w)^2] \cdot p \quad (3.20)$$

Farklı malzemeler için baskı plakası basıncı zımba çapı ve malzeme kalınlığına bağlı olarak denklem 3.21' de kullanılarak hesaplanabilir (Tzchaetsch, 2006).

$$p = \left[(\beta_{actual} - 1)^2 + \frac{d}{200 \cdot s} \right] \cdot \frac{R_m}{400} \text{ N/mm}^2 \quad (3.21)$$

Burada;

p :Baskı plakası basıncı (N/mm²)

d :Zımba çapı (mm)

D :İlkel çap (mm)

s :Sac kalınlığı (mm)

R_m :Çekme dayanımı (N/mm²)

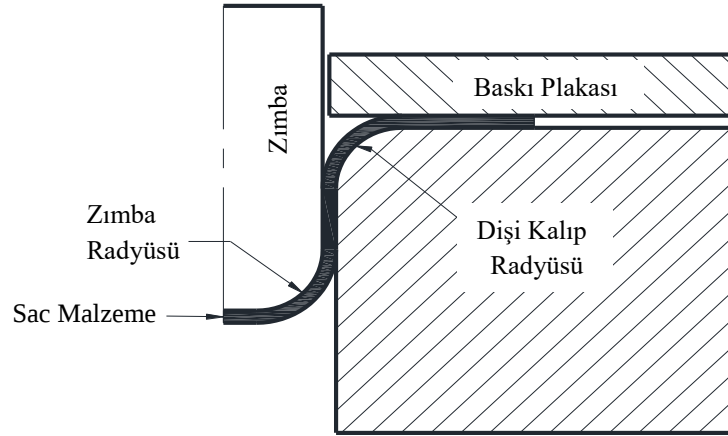
β_{actual} :Gerçek çekme oranı (İlk çekme)

w :Tek taraflı kalıp boşluğu (mm)

3.8. Matris Kenar ve Zımba Radyüsleri

Derin çekme kalıplama yönteminde sac malzemenin kalıp doğru akma işlemini kolaylaştırmak için zımba ve dişi kalıp radyüslerinin olduğunca büyük seçilmesi düşünülmektedir. Ancak gereğinden fazla büyük radyüsler baskı plakası etki yüzeyini azaltacağından sac malzemenin takım temas alanı küçüleceğinden dolayı iş parçası üzerinde istenmeyen kırışmalar meydana gelecektir. Kalıp ve zımba radyüslerinin küçük tutulması halinde ise sac malzemenin kalıp içerisine akması zorlaşacak ve çekme kalıbı ise kesme kalıbı gibi davranış sergileyecektir. Ayrıca, sac malzeme istenilen çekme oranına ulaşmadan yırtılma meydana gelecektir (Güneş, 2002) (Simith, 1990).

Zımba ucunun radyüsü ve matris radyüsü Şekil 3.9' da gösterilmiştir (Güneş, 2002).



Şekil 3.9. Zımba ucu ve kalıp radyüsü

Araştırmalar sonucu elde edilen kalıp radyüsleri Tablo 3.2’de verilmiştir.

Tablo 3.2. Kalıp radyüsü için önerilen değerler (Ünal, 2011)

Malzeme Kalınlığı (mm)	Kalıp Radyüsü (mm)	
	En az	En Fazla
0,4	4	6,5
0,5	4	7
0,6	5	7
0,7	5	7
0,8	5	8
1	5	8
1,3	6	9
1,4	6	9
1,5	6	9
1,6	6,5	10

Kalıp yarıçapının bulunması için kullanılan teorik formül denklem 3.22’ de ifade edilmiştir.

$$r_k = 0,035. [50 + (D - d)]\sqrt{s} \quad (3.22)$$

Burada;

- r_k : Kalıp radyüsü (mm)
- D : İlkel parça çapı (mm)
- s : Sac malzeme kalınlığı (mm)
- d : Zımba çapı (mm) olarak verilmiştir.

İlave derin çekme işlemlerinde $(D-d)$ yerine $[(d_{n-1})-d_n]$ kullanılmakta, 0,035 katsayı değeri ise 0,08’ e kadar artırılılabilmektedir.

Zımba radyüsünün küçük değerlerinde cidar zayıflaması görülmektedir. İkinci çekme işlemine tabi tutulan malzemeler cidar zayıflaması etkisiyle malzemede oluşan gerilmelere dayanamayarak yırtılmalar oluşur. Baskı plakası kullanılarak yapılan derin çekme işleminde yırtılmadan çekme işlemini gerçekleştirmek için kalıp ile zımba arasındaki bağıntılar kullanılır (Güneş, 2002) (Erişkin, 1986).

$$\frac{s}{D} 100 > 0,6 \quad \text{ise} \quad r_z = r_k$$

$$0,3 < \frac{s}{D} 100 < 0,6 \quad \text{ise} \quad r_z = 1,5 r_k$$

$$\frac{s}{D} 100 < 0,3 \quad \text{ise} \quad r_z = 2 r_k$$

3.9. Çekme Hızı

Derin çekme kalıplama yönteminde zımbanın iş parçasına plastik deformasyonu başlattığı andaki hızına çekme hızı adı verilir. Çekme hızı malzeme cinsine, kalıbın yüzey kalitesi ve yağlama oranına ve sac malzeme kalınlığına göre değişir. Malzeme cinsine göre çekme hızı deneyler sonucunda belirlenmiş olup çekme hızı değerleri Tablo 3.3’ te ifade edilmiştir.

Tablo 3.3. Malzeme cinsine göre silindirik işlemlerde çekme hızları (Kayalı & Ensari, 2000)

Malzeme Cinsi	Çekme hızı (m/dk)	
	Tek etkili	Çift etkili
Alüminyum	56	33
Alüminyum Alaşımları	-	10-12
Pirinç	66	33
Bakır	50	28
Çelik	20	10-18
Çinko	50	15

3.10. Çekme Boşluğu

Derin çekme kalıplama işleminde çekme boşluğunun az olması durumunda iş parçası ile kalıp arasında sürtünmenin fazla olmasına etki eder. Sürtünmenin artması ile yumuşak malzemelerde iş parçası et kalınlığı değişimini önemli ölçüde etkiler ve et kalınlığı az olan

malzemelerde ise buruşmalar meydana gelir. Bu etkenlere göre zımba ile kalıp arasında uygun toleranslarda boşluk olmak zorundadır (Çimenoglu & Kayalı, 1986).

Kalıp ile zımba arası tek taraflı boşluğun belirlenmesinde kullanılan eşitlikler aşağıdaki gibidir(Güneş, 2002).

$$\text{Çelik için} \quad w = s + 0,07\sqrt{10s} \quad (3.23)$$

$$\text{Alüminyum için} \quad w = s + 0,02\sqrt{10s} \quad (3.24)$$

$$\text{Demir olmayan metaller için} \quad w = s + 0,04\sqrt{10s} \quad (3.25)$$

3.11. Derin Çekme İşleminde Kullanılan Saclar

Saclara plastik deformasyon ile şekil vermede üretilecek parçanın malzemesi çok önemlidir. Çekme, bükme ve sıvama gibi sac şekillendirme yöntemlerinde şekil değişikliği söz konusu olduğundan malzemede kopma, yırtılma ve çatlama söz konusu olmamalıdır.

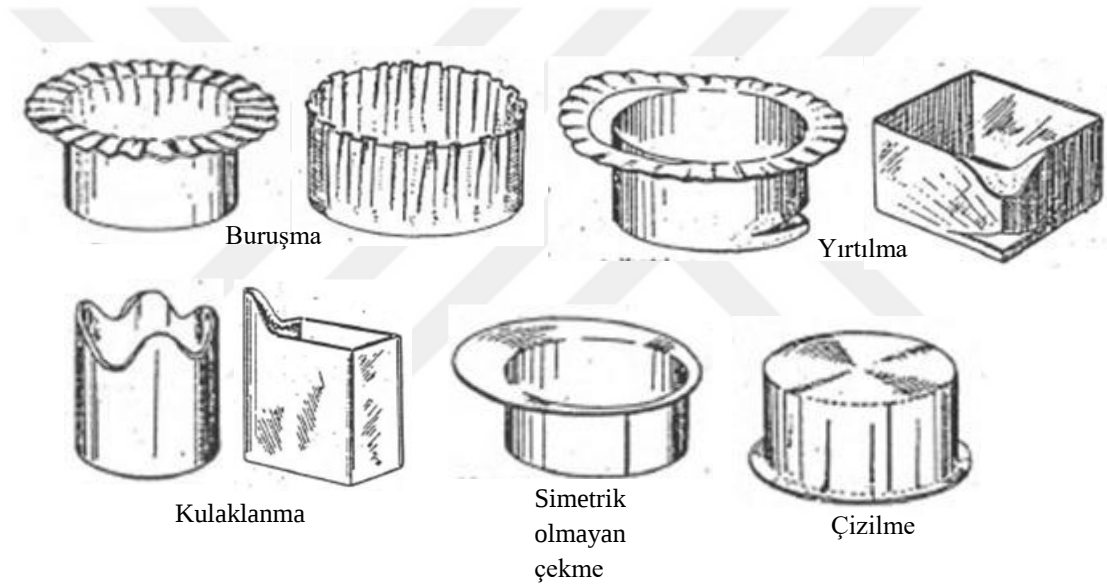
Pres tezgâhında şekil değiştirmeye zorlanan saclar yumuşak alaşımsız çelikten sıcak veya soğuk haddeleme yöntemi ile imal edilirler. Sac et kalınlığı 2 mm' nin altında olan ve pres işlerinde kullanılan saclar soğuk haddeleme yöntemi ile imal edilirler. Sıcak haddeleme sonrası sac malzeme yüzeylerinde pul şeklinde bir oksit tabakası oluşur. Bu oksit tabakası asitle giderildikten sonra “DKP” edilmiş sıcak hadde saclar olarak piyasaya verilir. Et kalınlığı fazla olan sacları soğuk haddelenmiş olarak, et kalınlığı az olan sacları ise sıcak haddelenmiş olarak temin etmek çok zordur. Boyut toleransı açısından soğuk haddelenmiş saclar sıcak haddelenmiş saclardan daha üstündür(Güneş, 2002).

3.12. Derin Çekme İşleminde Karşılaşılan Hatalar

Sac malzemelerin plastik deformasyonu esnasında bazı hatalar meydana gelmektedir. Bu hatalar erken çatlama, parça mukavemetinin yetersiz olması, geri yaylama nedeniyle ölçü hatası, kırılma ve burkulma olarak sıralaya biliriz (Uzun & Erişkin, 2002). Bu hataların yanı sıra tane boyutu yapısı büyük olan malzeme yüzeyinde ise pürüzleşme oluşur.

Derin çekme işlemlerinde yırtılmalar hemen zımba radyüsünün üst bölgesinde meydana gelir. Yırtılmaya sebep olan en önemli nedenleri malzeme özellikleri, zımba ve kalıp radyüslerinin az olması, ilkel sac çapının büyük seçilmesi, baskı plaka basıncının yüksek olması, yağlamanın yetersiz ve çekme boşluğunun az olması gibi sıralayabiliriz

(Kayalı, 1997). Bu nedenlere bağılı olarak zımba kuvvetinde bir atış söz konusu olur ve malzeme zımba radyüsü üst bölgesinde incelererek kırılma meydana gelir. Bazı durumlarda yırtılma olayı malzemenin üst kısmı veya dış kısmında meydana gelir. Bunun sebebi ise malzemeye uygulanan baskı plaka kuvvetinin fazla olmasıdır. Malzeme özelliklerinin artırılması veya baskı plaka kuvvetini azaltıcı etkenlerde bulunulması bu hatayı ortadan kaldıracaktır. Malzeme üzerinde deformasyona uğramış bölgelerde çentik oluşumu da bu hatayı artırıcı sebep olabilir. Çekme işlemi sonrası iş parçasında görülen buruşmalar ise çekme boşluğunun büyüklüğünden, çok ince malzemelerde ve baskı plaka kuvvetinin yetersizliğinden kaynaklanabilir (Alpers, Bergmann, Galanulis, & Winter, 2000). Şekil 3.10’ da derin çekme işlemi sonrası görülen hatalar ifade edilmektedir.



Şekil 3.10. Derin çekme işlemi sonrası görülen hatalar

3.13. Hidromekanik Derin Çekme

Hidromekanik derin çekme kalıplama yöntemi hem geleneksel derin çekme hem de hidrolik şekillendirme teknolojisinin ortak özelliklerini sunan yeni bir yöntemdir. Hidromekanik derin çekme işleminin üstünlüklerinden dolayı otomotiv ve havacılık endüstrisinde artan bir uygulama alanı olarak imalat yöntemleri arasında yerini almıştır.

Zhang’ a göre hidromekanik derin çekme işleminin üstünlükleri aşağıdaki gibi açıklanabilir (Zhang & Danckert, 1998).

- Kalıp alt hazne içerisindeki sıvı zımbaya hareket yönüne ters kuvvet uyguladığından zımba ile iş parçası arasındaki sürtünme kuvveti artar.

- Sac malzeme ile kalıp arasında yağ filmi tabakasının oluşması nedeni ile iş parçası ve kalıp arasındaki sürtünme kuvveti azalır.
- Ön şişirme basıncının etkisi ile malzemede pekleşme (metal malzemenin soğuk şekil değiştirme sırasında çekme dayanımının, akma dayanımının ve sertliğin artması durumudur) olur.

Hidromekanik derin çekme işleminde sac malzemelerin baskı plakası ile kuvvet uygulanamayan bölgeleri sıvı basıncı altında kaldığından kırışmalarda engellenmiş olur. Hidromekanik derin çekme yönteminin üstünlüklerini aşağıdaki gibi açıklayabiliriz.

- Kırılma ve kırışma hatalarını en aza indirmesi ile daha yüksek derin çekme oranlarına ulaşılabilir.
- Proses basamaklarının azaltılması ve daha iyi bir ürün kalitesine, maliyetin azalmasına olanak sağlar.
- Hidromekanik derin çekme yönteminde zımba ile sac malzemenin sürtünme kuvvetinin artmasına, kalıp ile iş parçası arasında sürtünme kuvvetinin azalmasına, geleneksel derin çekme kalıplama yöntemine göre daha iyi bir yüzey kalitesinin oluşmasına ve kalıp aşınmasının azalmasına imkân sağlamaktadır.
- Son ürün olarak elde edilen iş parçası et kalınlık dağılımları homojen bir dağılıma sahiptir.
- Proses daha karmaşık şekilli iş parçalarının üretimini kolaylaştırmaktadır(Anket, 2011).

3.13.1. Hidromekanik Derin Çekme İşleminin Özellikleri

Hidromekanik derin çekme işleminde zımba içi sıvı dolu kalıp alt haznesine doğru hareketi ilerledikçe haznede durgun halde bulunan sıvıyı aktif hale getirmesinin çekme işlemi üzerinde birçok etkisi vardır. Aktif hale geçen sıvı sac malzemeye doğru bir basınç uygular. Bu basınç sayesinde sac malzeme ile zımba arasındaki sürtünme kuvvetinde artış olur. Artan basınç ile hidromekanik derin çekmede gerekli olan zımba kuvveti de geleneksel derin çekme işlemine göre artış gösterir. Kalıp haznesinde bulunan sıvı ise sac malzemeyi zımba hareket yönüne göre zıt yönde iterek malzemenin kalıp ile arasında oluşacak sürtünme kuvvetini azaltmaktadır. Bu plastik deformasyon işleminde radyal gerilme basıncı ve teğetsel sıkılma basıncına neden olmaktadır. Oluşan bu basınçlar sayesinde hidromekanik derin çekme işleminde elde edilen limit çekme oranı geleneksel

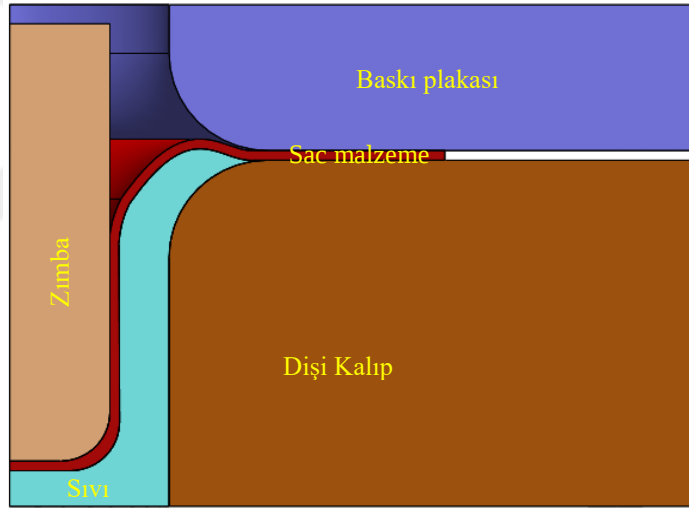
derin çekme işleminde elde edilen limit çekme oranına nazaran daha yüksektir. Bu sayede malzemeye ara çekme işlemi veya sıcak çekme işlemi uygulanmadan çekme oranındaki artışın elde edilmesi ile diğer yöntemlere göre daha avantajlıdır ve maliyet açısından daha uygundur. Bu yöntemin başka bir avantajı ise son ürün olarak elde edilen malzemenin yüzey kalitesidir. Sac malzeme sıvı içerisinde şekil değiştirdiğinden daha iyi bir yüzey kalitesi elde edilir (Altan, 1998).

Bazı malzemeler için kullanılan hazne basınçları Tablo 3.4’ de verilmiştir.

Tablo 3.4. Hidromekanik derin çekme işleminde hazne basınçları (Tzchaetsch, 2006)

Malzeme	Al ve Al alaşımları	Derin çekme çelikleri	Yüksek alaşımlı çelikler (Paslanmaz çelikler)
Çalışma basıncı p (Mpa)	6-30	20-70	30-100

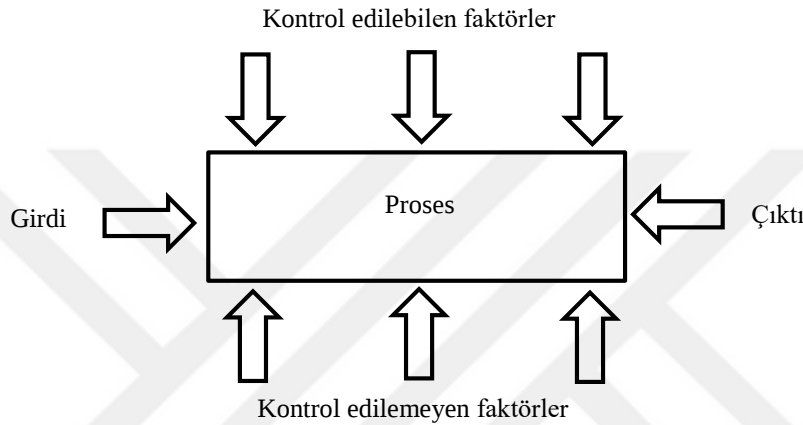
Hidromekanik derin çekme işlemi şekil 3.11’de ifade edilmiştir.



Şekil 3.11. Hidromekanik derin çekme işleminde zımba yarı pozisyonu(Tzchaetsch, 2006)

4. MODELLEME TEKNİKLERİ

Deney tasarımı, üzerinde inceleme yapılacak parametrelerin deneysel çalışmanın sonuçlarını etkileyecek faktörler üzerinde değişiklikler yaparak proses tepkisinin incelenmesini sağlayan testler serisidir. Deneysel çalışmalar Şekil 4.1’de gösterildiği gibi özel proses ya da sistemler hakkında az yada çok bilgiler elde etmek için kullanılır (Şahin, 2001) (Hicks, 1985).



Şekil 4.1. Prosesin genel modeli (Hicks, 1985)

Proses makinelerin birleşimi, yöntem, insanlar ve çıktı verebilen kaynaklar topluğu olarak ifade edilebilir. Faktörler bir başka deyişle deney parametreleri ise deneysel çalışma sonucunda önemli bir etki olan kontrol altına alına bilen veya alınamayan çevre değişkenleridir. Deneysel çalışmalarda kullanılacak parametrelerin sonuçları deneysel çalışmayı doğrudan etkileyeceğinden parametre seçimi son derece önemlidir. Deney tasarım metotları birçok mühendislik alanında yerini almıştır ve üretim prosesinin performansını iyileştirmede önemli rol oynamıştır. Üretim prosesinin gelişmesi ise üretilen ürün gelişir, maliyet azalır ve hedef gereksinimlere yakın sonuçlar elde edilir.

Deneysel çalışmalardan en iyi sonucu elde edebilmek için sistematik bir yaklaşım dikkate alınmalıdır. Genel olarak deneysel bir çalışma; problemin belirlenmesi, bağımlı ya da yanıt değişkenlerinin seçimi, bağımsız değişkenlerin belirlenmesi, bağımsız değişkenlerin seviyelerinin belirlenmesi ve etken düzeylerinin nasıl birleştirileceği basamaklarını içermektedir. Deneysel çalışma tasarımı; elde edilen gözlemlerin sayısı, deney sırası ve deneyi tanımlayan matematiksel model gibi temel bileşenlerden oluşur. Elde edilen verilerin sonuçlarını çözümlemede ise; veri toplama ve işleme, deney istatiksellerinin hesaplanması ve sonuçların yorumlanıp değerlendirilmesini içerir.

Matematiksel modelleme ise işlemin temel özelliklerini formül şeklinde veya eşitlik olarak verilmesidir. Bir matematiksel formül genel olarak aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

Bağımlı değişken= f (deney parametreleri, bağımsız değişkenler, etkili fonksiyon)

Bağımlı değişken, davranışlarını ya da sistemin durumunu yansıtan bir özellik olup eşitliğin sağındaki değerlere bağlı olarak değişkenlik gösterir. Bağımsız değişken ise, sistemin davranış ya da durumlarının belirlendiği zaman veya uzay olarak ifade edilebilir. Parametreler, sistemin yapısını veya özelliklerini belirleyen katsayılardır. Etkili fonksiyonlar ise sistem üzerine etkisi olan dış kuvvetlerdir (Hicks, 1985) (Muluk, Saraçbaşı, Aktaş, & Başar, 1998).

4.1. Taguchi Metodu

Üretim yapan tüm işletmeler, ürünlerini müşterilerin beklentisinin ötesinde sunabilmek için daima rekabet halindedirler. Üretici firmaların müşterilerine işlevsel beceriyi tam olarak yerine getirebilen, kaliteli, ucuz ve hızlı bir şekilde müşterilerine sunabilmek adına gösterdikleri çaba, müşteriler arasında tercih sebebi olmuştur. İşletme yöneticileri verimliliği artırmak ve rekabet avantajlarını artırmak için sadece kalitenin üretim hattı ile değil mamul ve proses aşamalarının da uygun bir şekilde planlanması gerektiğini ifade etmişlerdir (Canıyılmaz, 2001) (Kayı, 2006).

Tasarımın gelişmesi için teklif edilen istatistiksel deneyler, ürün parametre çeşitlerinin ve parametre sayılarının artması sonucu, ürün maliyetinin yükselmesine sebep olmuştur. Ayrıca hızlı bir şekilde sonuca ulaşamadığından dolayı da uygulanabilirliğini tamamen yitirmektedir. Bunun yanı sıra Taguchi uzun yıllar yaptığı çalışmalar ile elde ettiği sonuçlara göre çok az deney ile çok iyi neticeler veren ortogonal dizileri geliştirmiştir (Kayı, 2006).

Geliştirilen ortogonal dizinler parametre seviyelerini teker teker değiştirmek yerine eş zamanlı değiştirmeyi önermektedir. Taguchi metodunun temel amacı; kontrol edilebilen değişkenlerin belirli seviyelerinde etkin olan ve aynı zamanda kontrol edilemeyen faktörlerin tüm birleşimlerine karşı duyarsız ürünler tasarlamaktır. Taguchi deney tasarım yöntemi kaliteli ürünlerin üretilmesinin yanı sıra çok az deneysel çalışma ile daha iyi sonuç alma imkânını sağlamaktadır.

4.2. Taguchi Metodunun Gelişimi ve Felsefesi

Taguchi deney tasarımı, 1920'lerde İngiliz istatistikçi Sir Ronald Fisher tarafından, tarımsal alanlarda araştırmalar yaparken bulunmuş ve geliştirilmiştir. Fisher, ayrıca deney verilerinin analizi için "varyans analizi" (ANOVA) yöntemini de geliştirmiş ve başarı elde etmiştir (Lazic, 2004).

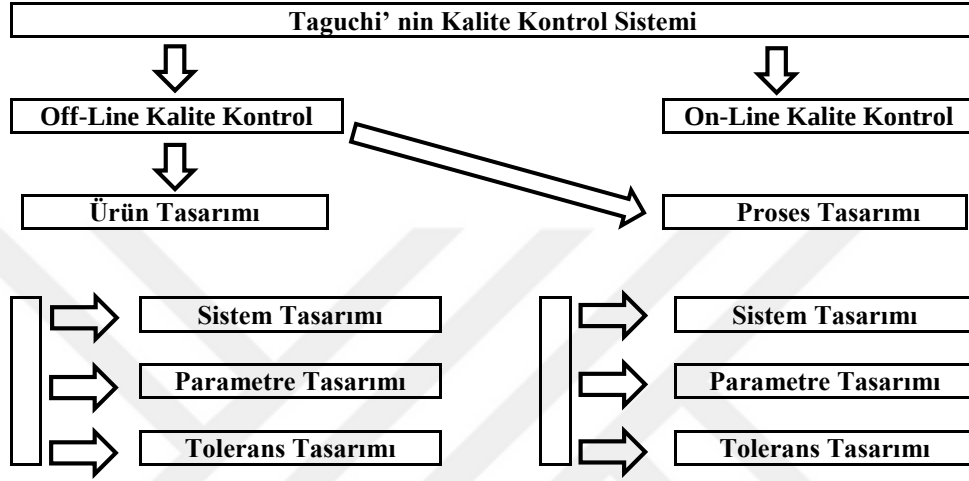
İkinci dünya savaşının sonlarına doğru, Japonya'nın en önemli projelerden biri Japon telefon ağ sisteminin geliştirilmesiydi. Projenin temel amacı A.B.D'de Bell Laboratuvarlarında kullanılan telefon sisteminin Japonya'ya kurulmasıydı. Ancak Japon Nippon Telefon ve Telgraf Araştırma Merkezi, Bell Laboratuvarlarının ancak %2'si kadardı. Bu nedenle projenin bitirilmesinin 20 yıl süreceği tahmin ediliyordu. Genichi Taguchi, proje süresini en aza indirmek amacıyla, tüm araştırma personeli için metodların standardize edilmesini ve faktöriyel tasarımların kullanılmasını önerdi. Kabul edilen önerisi sayesinde proje 4 yılda bitirilmiş ve Taguchi çok ünlü olmuştur (Canıyılmaz, 2001)

Taguchi'nin felsefesi şu şekilde özetlenebilir;

- Üretilen bir ürünün kalitesinin artmasındaki temel sebep üretilen ürünün toplumda meydana getirdiği kayıptır.
- İşletmelerin kalıcı hale gelmesi için rekabet ortamında kaliteyi sürekli geliştirmeli ve maliyetleri azaltmalıdır.
- Ön imalatın deneysel sürecini değiştirerek, aynı anda tek faktörün değil aynı anda birçok faktörün incelenmesi gerektiğini savunmaktadır. Böylece, kalite ürünün ve sürecin içerisine yerleştirilmektedir. Bir ürünün performansındaki bir sapmadan dolayı tüketicide meydana gelen kayıp yaklaşık olarak o sapmanın karesi ile orantılıdır.
- Üretilen bir ürünün nihai kalitesi ve maliyeti (geniş bir şekilde) ilgili ürünün tasarım mühendisliği ve üretim prosesi tarafından belirlenir.
- Bir ürünün performansındaki sapmayı azaltmak için ürünün performans karakteristikleri üzerinde etkili olan parametrelerin lineer olmayan etkilerini kontrol altına almak gerekir. Sürekli azaltmayı içerir.
- İstatistikî olarak tasarlanmış deneyler ürün veya proseslere ait performans sapmalarını azaltmak için kullanılır (Canıyılmaz, 2001).

4.3. Taguchi Kalite kontrol sistemi

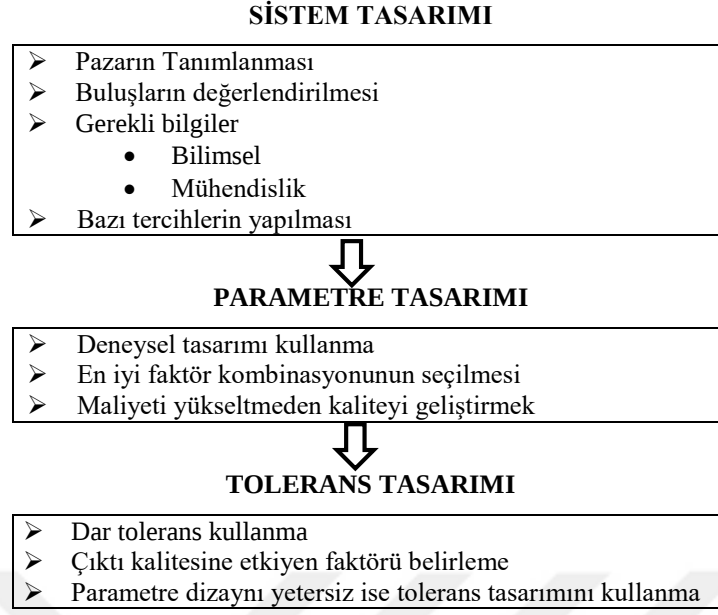
Taguchi tarafından kaliteyi geliştirmek için yapılan faaliyetler On-line (Çevirim içi) ve Off-line (Çevrim dışı) olmak üzere iki kısma ayrılmıştır. Deney tasarımı, Taguchi' nin kalite sisteminde altında, off-line kalite kontrol içinde, ürün ve proses tasarımı aşamalarında kullanılmaktadır. Bu durum Şekil 4.2'de gösterilmiştir.



Şekil 4.2. Taguchi' nin kontrol sistemi (Canıylmaz, 2001)

On-line kalite kontrol; ürünün imalatı esnasındaki ve imalatı gerçekleştirildikten sonraki kalite faaliyetlerini kapsar. İstatistiksel işlem kontrolü ve çeşitli muayeneler, on-line kalite kontrol faaliyetleri altındadır.

Off-line kalite kontrol; pazar araştırması ile ürün ve üretim işlemlerinin geliştirilmesi esnasında gerçekleştirilen kalite faaliyetlerini içermektedir. Bu faaliyetler üretime başlamadan önce gerçekleştirilen tasarım çalışmalarıdır (Şirvancı, 2011). Taguchi Off-line kalite kontrolün ürün tasarımı ve proses tasarımı olmak üzere her iki aşamasında da kalite güvenilirliğini elde etmek için 3 aşamalı bir yaklaşım getirmiştir. Kalite sağlama aşaması olarak hem ürün tasarımı için hem de proses tasarımı için tanımlanan kalite aşamaları; sistem tasarımı, parametre tasarımı ve tolerans tasarımı aşamalarıdır (Kayı, 2006). Taguchi metodunun sistematüğini oluşturan, kalite aşamaları Şekil 4.3.'te gösterilmiştir.



Şekil 4.3. Taguchi metodunun sistematığı (Kayı, 2006).

4.3.1. Sistem Tasarımı

Taguchi metodunun ilk basamağı sistem tasarımıdır. Üründe istenen fonksiyonları elde edebilmek için yeni teknolojiler tasarlanır ve en uygun tasarım seçilir. Üretimi yapılacak olan ürünün pazarlama işleminin tanımlanması, bilimsel ve mühendislik verilerin toplanması, malzeme ve gerekli ekipmanların seçiminin yapılması bu aşamanın konusunu oluşturur (Kayı, 2006).

Sistem tasarımının temel amacı üretim esnasında özel limitler ve toleranslar dâhilinde en düşük maliyet ile üretimi gerçekleştirmektir. Bu nedenle pazar araştırmasının iyi yapılması, teknolojik gelişmeler ve bilimsel buluşlardan faydalanılabilir (Canıyılmaz, 2001).

4.3.2. Parametre Tasarımı

Taguchi'ye ürün kalitesini artırmada en belirleyici deneylerin yapılacağı aşama ürün ve proses tasarımı için parametre tasarımı aşamasıdır. Ürün parametre tasarımı ürün parametreleri, kalınlık değişim değerleri, malzeme özellikleri, boyutlar, yüzey örnekleri gibi değerlerin belirlenmesi anlamını içerir (Birici, 1997).

Ürün ve proses için parametre tasarımındaki genel amaç, üründe ve üretim aşamasında varyasyon (hedef değerden farklılık yani kalitesizlik) yaratan kontrol dışı olan parametrelere karşı, kontrol altında olan parametrelerin değerlerini optimal seçerek, varyasyonu en alt seviyelerde olmasını sağlamaktır. Taguchi, bu amaçla yapılan ürün ve

proses tasarımına sağlam tasarım demektedir. Kontrol edilemeyen faktörlere, nem, toz, ısı gibi çevre koşullarına, müşteri kullanımındaki farklı uygulamalara ve malzemedeki farklılıklara karşı duyarsız, yani onlardan etkilenmeyen, ürün ve proses anlamında kullanılmaktadır (Özay, 2009).

Ürün ve proses parametre tasarım aşamalarında, optimal değerlerin belirlenmesi ve optimal ayarların yapılması gereken çok sayıda faktör vardır. Üstelik bu faktörlerin birçoğu birbirleriyle etkileşim durumundadır. Bu kontrol edilebilen ve kontrol edilemeyen faktörlerin, ürün ve ürünün performansına olan etkilerinin belirlenebilmesi için en etkin yöntem istatistiksel deney tasarımı yöntemidir. Deney tasarımı aracılığıyla, birçok faktörün ürün üzerindeki etkisi ekonomik olarak (düşük maliyetle) belirlemek ve varyasyon yaratan faktörlere karşı önlemleri tasarım aşamasına almak mümkün olmaktadır (Şirvancı, 2011).

4.3.3. Tolerans Tasarımı

Tolerans tasarımı, parametre tasarımının varyasyonu azaltmada yeterli olmadığı durumlarda kullanılır. Parametre tasarımında düşük maliyetli, geniş ölçüde değişen bileşenler veya faktörler kullanılabilir. Varyasyonu istenilen değere düşürmek için bu bileşenlerin kalitesinin geliştirilmesi halen gerekiyorsa, tolerans tasarımı uygulanır. Tolerans tasarımında üç tür kalite değişkeni vardır (Özay, 2009).

Bunlar;

- En büyük en iyi,
- En küçük en iyi

Hedef değer en iyi'dir

4.3.3.1. En Büyük En İyi

Bu tip tolerans çalışmalarında istenilen sonucun bir son değeri yoktur ve dolayısıyla hedef değer de yoktur. Sonuç değeri büyüdükçe verimlilik artacaktır. Buna örnek olarak limit çekme oranı verilebilir (Özay, 2009).

4.3.3.2. En Küçük En İyi

Bu karakteristik tipi negatif yönden bir sapma göstermez. Daima alt sınırın olması istenir. Tolerans azaldıkça durumda iyileşme artar. Bu tipe örnek olarak bir üretim sürecindeki hurda miktarı verilebilir (Özay, 2009).

4.3.3.3. Hedef Değer En İyi

Bu durumda sapmalar iki yönlü olarak değişebilir. Dolayısıyla iki taraflı toleransa sahiptir. Buna en iyi örnek olarak boyut kriterleri verilebilir (Özay, 2009).

4.4. Taguchi Metodunda Parametre Tasarımı

Genichi Taguchi sağlam parametre dizaynının öncülerinden biri olarak kabul edilmektedir, parametre dizaynı, üretim ve proses dizaynı sırasında, varyasyon ve kontrol edilemeyen faktörlere karşı olan duyarlılığın azaltılması için kullanılan bir mühendislik metodudur. Taguchi dizaynları uygun bir şekilde kullanıldığı takdirde, çeşitli çalışma koşullarında çok güçlü ve etkili bir metottur (Özay, 2009).

Sağlam parametre tasarımında temel amaç, proses hedef değerini korurken varyasyonu minimize edecek faktör seviyelerini belirlemektir. Varyasyona etki eden faktörleri belirledikten sonra, kontrol edilebilir faktörler üzerinde ayarlamalar yapılabilir. Kontrol edilemeyen faktörler ise değişikliklere karşı duyarsız hale getirilmeye çalışılır. Proses tasarımında temel amaç, sürekli aynı çıktıyı üretmektir. Üretim dizaynında ise temel amaç, çevre faktörlerine rağmen sürekli bir performans ölçüsü yakalamaktır (Kayı, 2006).

4.4.1. Temel Çalışma Biçimi

Taguchi metodu, birden fazla parametrenin bağlı olduğu ürün ve prosesin kalitesini iyileştirmek için geliştirilmiştir. Mühendislik projeleri çok sayıda parametre içerdiği için, parametrelerin kombinasyonunu denemek çok zordur. Taguchi deneyler için özel bir deneysel tasarım geliştirmiştir. Bu deneysel tasarım ortogonal dizilerden oluşmaktadır. Bu dizaynların kullanılması verilen parametrelerin en az sayıda deneyle incelenmesine olanak sağlaması tüm parametrelerin sabit seviyeli olduğu ve etkileşimlerin önemsiz olduğu durumlarda standart ortogonal diziler tercih edilmelidir. Faktörlerin karışık seviyeli olduğu ve etkileşimlerin inceliği durumlarda ortogonal dizilerin modifiye edilmesi gerekmektedir. Tam faktöriyel tasarım verilen deney seti için tüm parametrelerin kombinasyonları denemektedir. Çoğu mühendislik deneyleri genellikle çok sayı da parametre içerir. Örneğin tam faktöriyel deney tasarımında 7 parametrelili ve her bir parametrenin 2 seviyeli olduğu bir deney için tam 128 (2^7) deneye ihtiyaç vardır (Canıyılmaz, 2001).

Taguchi metodu bu konuda iki önemli boşluğu tamamlamaktadır.

Bunlar;

- Deney koşullarına uygun olarak seçilebilecek ortogonal diziler net bir şekilde tanımlanmıştır.
- Sonuçların analizinde standart metotlar belirlenmiştir

Örneğin tek bir A(sıcaklık) faktörü ile ilgilendiğimizi düşünelim. A faktörünün eğer 2 seviyesi varsa (200°C ve 400°C) her iki seviye içinde ayrı ayrı deneme yapmak gerekir.

Faktör A: Seviye 1 = A1(200°C) Seviye 2 = A2(400°C)

Faktör sayısını 2'ye çıkardığımızda ve her bir faktörde 2 seviye olduğu durumda, kombinasyon sayısı aşağıda gösterildiği şekilde 4' e çıkar.

A₁B₁, A₁B₂, A₂B₁ ve A₂B₂

Yukarıda verilen örneklerde görüldüğü gibi bütün kombinasyonların denendiği tam faktöryel deney tasarımı, parametre seviyesi arttıkça, deney sayısı 2 seviyeli deneylerde ikinin katları şeklinde artmaktadır. Farklı parametre ve farklı seviyeli deneyler için tam faktöryel deneysel tasarım ve Taguchi metodu deneysel tasarım için gerekli deneme sayıları Tablo 4.1. de verilmiştir. Deney sayılarındaki farklılık açık bir şekilde görülmektedir (Canıyılmaz, 2001).

Tablo 4.1. Taguchi ve tam faktöryel tasarım için kombinasyonlar (Canıyılmaz, 2001)

Faktör	Seviye	Deney Sayısı	
		Tam Faktöryel Tasarımı	Taguchi Metodu
2	2	4(2 ²)	4
3	2	8 (2 ³)	4
4	2	16 (2 ⁴)	8
7	2	128(2 ⁷)	8
15	2	32768 (2 ¹⁵)	16
4	3	81 (3 ⁴)	9

4.4.2. Deney Tasarımı

Deney tasarımı, içerisinde bulunan tasarım kelimesinin anlamı yapılacak olan plan ve projelerin zihinsel olarak yapılmasıdır. Mühendislik biliminde tasarım denildiği zaman genellikle akla gelen ilk şey ürün tasarımı ve proses dizaynıdır (Şirvancı, 2011).

Deney tasarımına başlamadan önce ürün ve proses hakkında yeteri kadar bilgi sahibi olunmalı ve deneysel çalışmada kullanılacak parametrelerin çıktılar üzerindeki etkileri tanımlanmalıdır.

Taguchi tasarımı seçilirken;

- Kontrol parametre sayısı
- Herbir parametrenin seviye sayısı
- Deney çalışma sayısı ve
- Diğer şartların sisteme etkileri (maliyet, zaman, üretilebilme) göz önüne alınır.

Deneyisel çalışmalar statik ve dinamik sonuçlar olmak üzere iki şekilde değerlendirilir. Kalite değişkenleri sabit seviyeli ise statik sonuçlu deneyler, kalite değişkenleri verilen değer aralığında ise dinamik sonuçlu deneyler olarak adlandırılırlar (Şirvancı, 2011).

4.4.2.1. Statik Sonuçlu Tasarım

Taguchi metodu 2 temel amaca sahiptir. Bu amaçlar;

- Kaliteyi hedef değere mümkün olduğunca yaklaştırmak,
- Varyansı yani hedef değerden sapmayı minimize etmektir.

Taguchi deney sonuçları ile arasındaki farklılığı minimize etmek için S/N (Signal/ Noise) oranlarını geliştirmiştir (Kayı, 2006).

Statik bir tasarımda Taguchi tarafından belirlenmiş S/N oranları, sistemden istenen amaçlar doğrultusunda kullanılabilir. Bu aşamada iyi bir mühendislik bilgisi ve sistemin iyi analiz edilmesi çok önemlidir. Seçilebilecek S/N oranları Tablo 4. 2.' de verilmiştir (Özay, 2009).

Tablo 4.2. Taguchi' nin sinyal gürültü oranları (Özay, 2009)

Seçim	Amaç	Sonuç
En Büyük En İyi $S/N = -10(\log(\sum \frac{1}{Y^2})/n)$	Sonucun maximize edilmesi	Pozitif
Hedef Değer En İyi $S/N = -10(\log(s^2))$	Sadece standart sapmanın azaltılması	Pozitif, sıfır ya da negatif
Hedef Değer En İyi $S/N = 10(\log(Y^2)/s^2)$	Standart sapmanın ve ortalamanın belli bir hedef değerinde olması	Ortalama sıfır olduğu zaman standart sapma da sıfır
En Küçük En İyi $S/N = -10(\log(\sum Y^2)/n)$	Sonucun minimize edilmesi	Pozitif

4.4.2.2. Dinamik Sonuçlu Deneyler

Kalite değişkeninin belirli bir değer aralığında olduğu tasarımlardır. Dinamik sonuçlu deneylerde, işleme başlama anı ile sonuç arasındaki fonksiyonel ilişkiyi analiz etmek ve geliştirmek için kullanılır. Genel olarak gürültü faktörünün, kalite değişkenlerinin sistemin giriş anına bağlı olarak belirli değerler aldığı durumlarda kullanılır. Buna Örnek olarak otomobilin ivmelenmesi verilebilir. Burada işleme başlama anı, otomobilin gaz pedalına basılmasıdır ve dinamik sonuç otomobilin hızıdır. İdeal olarak işleme başlama anı ile sonuç arasında doğrusal bir ilişki olması gerekir. Duyarsızlık bu ilişki içerisinde gürültü faktörleri yüzünden minimum varyasyona ihtiyaç duyar. Bu yüzden dinamik tasarımlarda mümkün olduğunca deneme sayısı fazla tutulmalıdır (Şirvancı, 2011).

4.4.3. Ortogonal Diziler

Fransız matematikçi, Jacques Hadamard tarafından matematiksel bir buluş olarak ortaya konulan ortogonal düzen ilk kez 1897 yılında ortaya çıkmıştır. Ortogonal dizilerin temel amacı olarak hangi denemede hangi parametrenin kaçınıcı seviyesinin kullanılacağını belirler (Özay, 2009).

Ortogonal düzenin üreticilere sağladığı en önemli özelliği, birçok faktörün minimum sayıda test ile değerlendirilmesini sağlamasıdır. Geleneksel metottan farklı olarak faktör kademelerini teker teker değiştirmek yerine eş zamanlı olarak birden fazla parametreyi değiştirmeyi önermesidir. Normal 2^k parametrelili bir deneysel tasarım gerçekleştirilecekse tam faktöriyel tasarım gereği 2^k adet deneyin yapılması beklenir. Parametre seviyelerinden biri değiştirilip diğeri sabit tutularak deney gerçekleştirilir. Fakat Taguchi uzun çalışmalar sonucu standart deney planları geliştirdi ve bu planların vereceği sonuçla 2^k denemenin sonuçları arasında bir fark olmayacağını iddia etti. Bu iddiasının doğruluğunu çalışmalarıyla pratik olarak ispatladı. Söz konusu standart deney planlarının temelinde eş zamanlı olarak bir kaç parametrenin seviyelerini değiştirerek deney sayısında ciddi bir oranda azalma olmasına dayanmaktadır. Örneğin yedi parametrenin tespit edildiği bir deney için $2^7=128$ adet deney yapılması gerekir. Hâlbuki Taguchi bunun için 8 denemeyi yeterli görmektedir. Tablo 4.3’de 2 deney tasarım planı görülmektedir. Buna göre 1 ilk seviyeyi, 2 ise ikinci seviyeyi gösterir. İlk 6 parametre sabit iken 7. parametrede seviye değişikliği yapılmaktadır. Bu yolla bütün faktörler teker teker denenmektedir. Sonuçta 128 deneme gerçekleşmiş olmaktadır. Hâlbuki Taguchi dizaynına göre ilk denemeden ikinciye geçilince 7 faktörden 4’ü değiştirilmektedir. Daha sonraki denemeler için de 4’ü

2.seviyede, 3'ü 1. seviyede olmak üzere her seferinde değişiklik yapılmaktadır. Bunda da toplam 8 deneme gerekli bilgiyi verebilmektedir. Sonuçta Taguchi'nin teklifi çok önemli bir maliyet ve zaman tasarrufu getirmektedir (Kayı, 2006).

Tablo 4.3 2^k ve Taguchi dizaynı deney planları (Özay, 2009)

Deney No	Parametre No						
	1	2	3	4	5	6	7
1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1	1	2
3	1	1	1	1	1	2	1
4	1	1	1	1	1	2	2
5	1	1	1	1	2	1	1
6	1	1	1	1	2	1	2
:	:	:	:	:	:	:	:
128	2	2	2	2	2	2	2

2^k Dizaynı

Deney No	Parametre No						
	1	2	3	4	5	6	7
1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	2	2	2	2
3	1	2	2	1	1	2	2
4	1	2	2	2	2	1	1
5	2	1	2	1	2	1	2
6	2	1	2	2	1	2	1
7	2	2	1	1	2	2	1
8	2	2	1	2	1	1	2

Taguchi Dizaynı

Bu dizilere her parametrede eşit miktarda farklı seviye sahip olduğu için ortogonal dizi olarak ifade edilmektedir. Ortogonal diziler 2 seviyeli, 3 seviyeli ve 2 ve 3 seviyeli olmak üzere üç türlü belirlenmişlerdir. Taguchi deneysel tasarım için belirlenen bu diziler standart olup tasarımın temelini oluştururlar. Taguchi metodu kullanılarak gerçekleştirilecek her deneysel çalışma için bu standart dizilerden birinin seçilmesi gerekir. Şayet deneysel çalışma için başlangıçta faktörlere uygun dizi bulunamadıysa, faktörlerde bir takım yeni düzenlemeler yapıp dizilerden birine uydurmak gerekmektedir. En çok kullanılan diziler 2 seviyeliler için L4, L8, L12 ve L32 iken 3 seviyeliler için L9, L18, L27 dizileri olmaktadır. Her iki seviyenin karışık kullanıldığı dizilerden bazıları L18, L36, L54 dizileridir (Canıylmaz, 2001).

4.4.4. Ortogonal Dizi Seçimi

Dizilerin seçimi seviye sayısı ve toplam serbestlik derecesi yardımıyla yapılır. Seviye sayısı dizilerin sınıflandırılmasında belirleyici unsurdur. Eğer seviyelerde karşılık varsa düzeltmelere gidilerek faktörlerde seviye homojenliği sağlanır. Bundan sonra toplam serbestlik derecesine bakılır. Bir dizinin toplam serbestlik derecesi her bir faktörün ayrı ayrı serbestlik derecelerinin toplamına eşittir. Dizide sütunlara atanan faktörler tek başına faktör veya iki faktörün etkileşimi olabilmektedir. Serbestlik dereceleri sırasıyla şöyle hesaplanır: (Özay, 2009)

V_A : A faktörünün serbestlik derecesi

V_{A*B} : A ve B etkileşiminin serbestlik derecesi

k_A : A faktörü seviye sayısı

Faktör grubunun serbestlik derecesi ise tüm faktör ve etkileşimlerin serbestlik dereceleri toplamına eşittir. Bu aynı zamanda toplam deney sayısından bir çıkarmakla da bulunur (Özay, 2009).

V_T : Dizinin toplam serbestlik derecesi

N : Dizideki toplam deney sayısı

$$V_T = N - 1 \quad (4.1)$$

Serbestlik derecesi belli olmuş bir faktörler grubu için ortogonal dizi seçimi rahatlıkla yapılabilir. Serbestlik derecesi hangi dizinin deneme sayısına uygun düşüyorsa o tercih edilir. Toplam serbestlik derecesi en fazla; seçilecek olan dizinin deneme sayısından bir eksik olabilir. Yoksa eşit olursa o zaman bir üst diziyi seçmek zorunda kalınacaktır. O halde mevcut serbestlik derecesine 1 eklendiğinde eldeki dizilerden hangisine eşit olursa o seçilir. Şayet hiç birine eşit olmuyor da herhangi ikisinin arasında kalıyorsa bir alt değil bir üstteki seçilir (Şirvancı, 2011).

4.4.5. Varyans Analizi

Ürün veya proses geliştirmenin temel amacı; müşteri istekleri ve ihtiyaçları ile ilgili olan ürün veya prosesin performans karakteristiğini geliştirmektir. Deneylerin temel amacı ise ürün veya prosesin değişimini kontrol etmek ve azaltmaktır. Bir sonraki adımda ise performansı etkileyen parametrelerin hangileri olduğu ile ilgili bir karar verilmelidir. Kalite ile ilgili tartışmaların büyük bir bölümü varyans ile ilgili olduğundan dolayı, deneysel verilerin yorumlanmasında ve gerekli kararların verilmesinde varyans analizi (ANOVA) istatistiksel metotları kullanılmaktadır. ANOVA test edilen parça gruplarının ortalama performansları arasındaki farklılığı ortaya koymak için kullanılan istatistiğe dayalı bir araçtır. Varyans analizi toplam varyasyonu bileşenlerine ayıran matematiksel bir tekniktir ve serbestlik derecesi, karelerin toplamı, ortalama kareler (varyans) vb. gibi niceliklerin hesaplanmasında kullanılmaktadır. Deneysel tasarım esasında varyans analizine dayanmaktadır. Bu metot 1930’larda İngiliz istatistikçisi Fisher tarafından geliştirilmiştir. İsminin baş harfi F’ye dayanılarak yönteme F testi diyenlerde vardır.

Varyans analizi tek faktörlü, iki faktörlü ve çok faktörlü olmak üzere geniş bir kullanım yelpazesi sunmaktadır. Taguchi ortogonal dizileri iki ve üç kademeli olduklarından çoğunlukla ikili veya üçlü kademe için varyans analizi bu aşamada kullanılır (Ross, 1988) (Durmaz, 2008).

Faktör etkilerinin belirlenmesinde kullanılan varyans analizi hesaplamalarında kullanılan notasyonlar şöylece sunulabilir (Özay, 2009).

SS_T	: Tüm değerlerin kareleri toplamı
SS_A	: A faktörü için kareler toplamı
SS_0	: Hata kareleri toplamı
V_T	: Toplam serbestlik derecesi
V_A	: A'nın serbestlik derecesi
$V_{A \times B}$	: A ve B interaksyonunu serbestlik derecesi
V_0	: Hata varyansı
N	: Elde edilen toplam veri sayısı
n_A	: A faktörü için veri sayısı
T	: Mevcut tüm verilerin aritmetik ortalaması
y_i	: Gözlenmiş değer
k_A	: A faktörünün kademe sayısı

4.4.6. Kareler Toplamı

Toplam varyasyonu bileşenlerine ayırırsak 3 çeşit varyasyon elde edilir (Özay, 2009).

- Performans karakteristiğini etkileyen faktörlere göre (A, B, C,...) varyasyon
- Bu faktörlerin etkileşimine göre varyasyon
- Hataya göre varyasyon

Eğer A ve B gibi iki parametremiz ve bu parametreler arasında bir etkileşim var ise toplam varyasyon aşağıdaki gibi yazılır.

$$SS_T = SS_A + SS_B + SS_{A \times B} + SS_0 \quad (4.2)$$

$A \times B$, A ve B parametreleri arasındaki etkileşimi temsil etmektedir (Özay, 2009).

$$SS_T = \left[\sum_{i=1}^N y_i^2 \right] - \frac{T^2}{N} \quad (4.3)$$

$$SS_A = \left[\sum_{i=1}^{k_A} \left(\frac{A_i^2}{n_{A_i}} \right) \right] - \frac{T^2}{N} \quad (4.4)$$

Hata varyasyonunu hesaplamının en kolay yöntemi toplam kareler toplamından tüm kareler ve etkileşimlerin kareler toplamının çıkarılmasıdır (Özay, 2009).

$$SS_o = SS_T - SS_A - SS_B - SS_{A \times B} \quad (4.5)$$

Ortogonal düzende sütunların toplam kareler toplamı SS_T ’ yi verir.

$$SS_T = \sum SS_{SÜTUN} \quad (4.6)$$

4.4.7. Serbestlik Derecesi

ANOVA hesaplarını tamamlamak için bir diğer özellik olan serbestlik dereceleri dikkate alınmalıdır. İstatistiksel olarak serbestlik derecesi, verilerden elde edilen her bir parça bilgi ile ilişkilendirilmektedir(Ross, 1988). Genel bir tanımlamada bir sonuca varabilmek için yapılması gereken bağımsız karşılaştırmaların sayısıdır. Kareler toplamı gibi serbestlik derecelerinin toplamı da toplam serbestlik derecesini verir (Durmaz, 2008).

V_T = Toplam serbestlik derecesi

$$V_T = V_A + V_B + V_{A \times B} + V_o \quad (4.7)$$

Toplam serbestlik derecesi deney sayısının bir eksiğine eşittir (Özay, 2009).

$$V_T = N - 1 \quad (4.8)$$

Bir parametrenin serbestlik derecesi de o parametrenin bir eksiğine eşittir (Özay, 2009).

$$V_A = k_A - 1 \quad (4.9)$$

$$V_B = k_B - 1 \quad (4.10)$$

Etkileşimin serbestlik derecesi de etkileşen parametrelerin serbestlik derecelerinin çarpımına eşittir (Özay, 2009).

$$V_{A \times B} = (V_A) * (V_B) \quad (4.11)$$

Hata serbestlik derecesi de toplam serbestlik derecesinden tüm parametre ve etkileşimlerin serbestlik dereceleri çıkarılarak bulunur (Özay, 2009).

$$V_o = V_T - V_A - V_B - V_{A \times B} \quad (4.12)$$

Denemelerin tekrarı söz konusu olduğunda ise toplam serbestlik derecesi

$$V_T = \text{Deneme Sayısı} \times \text{Tekrar Sayısı} - 1 \quad (4.13)$$

4.4.8. Varyans

ANOVA tablosundan hesaplanabilen bir değer tanımlayıcısı istatistikte varyanstır. Hata varyansı, genellikle varyans olarak bilinir ve hata kareleri toplamının hata serbestlik derecesi ile bölümünden elde edilen değere eşittir (Özay, 2009).

Ve=Hata Varyansı

$$V_T = \frac{SS_o}{V_o} \quad (4.14)$$

Hata varyansı, hata (kontrol edilemeyen) faktörlerden kaynaklanan değişimin ölçüsüdür ve deneylerdeki ölçüm hatalarını da içine almaktadır. Faktörler ve etkileşimlerinin varyanslarında aynı şekilde hesaplanmaktadır (Özay, 2009).

A parametresi için varyans

$$V_A = \frac{SS_A}{V_A} \quad (4.15)$$

B parametresi için varyans

$$V_B = \frac{SS_B}{V_B} \quad (4.16)$$

AXB etkileşimi için varyans

$$V_{AxB} = \frac{SS_{AxB}}{V_{AxB}} \quad (4.17)$$

şeklinde bulunur (Özay, 2009).

Ortogonal düzende atama yapılmamış olan sütunların toplam kareler toplamı, hata kareler toplamını vermektedir(Ross, 1988). Sütunların hata varyansının kestiriminde kullanılması yaklaşımı tüm sütunlara faktörler atandığında da kullanılabilir. Deneyler yönlendirilmeden önce performans karakteristiğini etkileyeceği düşünülen faktörler gerçekte önemli olmayabilirler. Bu faktörlerin atandığı sütunların varyansı küçük olduğundan bunlar hata varyansının kestiriminde kullanılırlar. Bir faktörün deney sonucuna katkısı yüzde olarak küçük bir rakamsa, analiz hesaplamalarında göz ardı edilmesi tasarımda daha büyük önem taşıyan faktörlerin belirlenmesi için gereklidir. Yüzdesel etkinin yanı sıra, kareler toplamı da hata varyansının hesaplanmasında hangi sütunların birleştirileceğinin belirlenmesi için kullanılabilir. Hata varyansı için sütun belirleme işlemi yapılırken F-testi de uygulanabilir. Buna göre; etkisi en çok olan sütunu takip eden küçük etkili sütuna göre önemli olup olmadığını görmek için F-testi uygulanır.

Eğer önemli bir F oranı ortaya çıkmazsa, bu iki sütunun etkisi bir sonraki küçük etkili sütunla karşılaştırılmak üzere birleştirilir. Bu işlem önemli bir F oranı buluncaya kadar devam eder(Durmaz, 2008).

4.4.9. F Testi

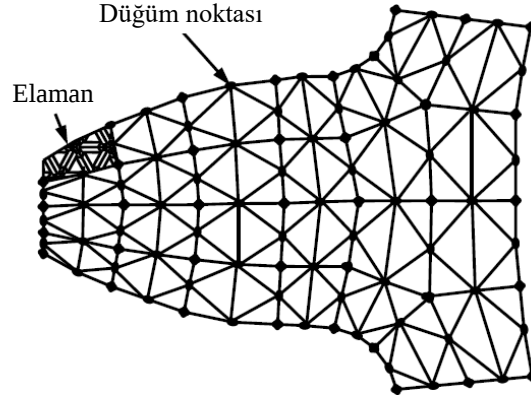
Testler yapıp veriler elde edildikten ve varyanslar bulunduktan sonra hangi faktörlerin önemli bir etkiye sahip olduğunu görmek için F-testi uygulanmaktadır. Standart F-testi uygulanırken, hataların eşit sapmalarla normal dağıldığı ve bağımsız olduğu varsayılmaktadır. F-testi varsayımları yerine getirilmediği takdirde, önem derecesi hesapları doğru sonuçları yansıtmayabilir. Bununla birlikte standart F testinin varsayımlardan sapmalara karşı duyarsız olması nedeniyle bazı varsayımları sağlamasa da kullanılabileceği belirtilmektedir (Phadke, 1989). F- testi uygulanırken analiz sırasında hesaplanan F değerleri ile belirlenen güven seviyesindeki F tablo oranları karşılaştırılarak, tablo oranından büyük F değerine sahip faktörlerin performans karakteristiği üzerinde etkili olduğu düşünülür. Verilerden elde edilen F değeri faktör ya da etkileşimi varyansının hata varyansına oranıdır (Özay, 2009).

$$F_A = \frac{V_A}{V_e} \quad (4.18)$$

4.5. Sonlu Elemanlar Metodu

Sonlu Elemanlar Metodu (Finite Element Method-FEM) ya da Sonlu Elemanlar Analizi (Finite Element Analysis-FEA) ilk kez 1956 yılında uçak gövdelerinin gerilme analizi için geliştirilmiş olup, daha sonraki on yıl içerisinde uygulamalı bilimler ve mühendislik problemlerinin çözümünde de kullanılmaya başlanmıştır. Daha sonraki yıllarda da bu metot ve çözüm teknikleri hızla geliştirilmiş ve günümüzde pek çok mühendislik probleminin çözümü için kullanılan en iyi metotlardan birisi haline almıştır.

Sonlu elemanlar metodunda temel amaç karmaşık bir problemi basite indirgeyerek çözüme ulaştırmaktır. Bir birine çok sayıda düğüm noktaları ile bağlanmış parçalara ayrılmış problemin çözümü basitçe gerçekleştirile bilmektedir. Şekil 4.4' te parçalara ve düğüm noktalarına ayrılan yapı gösterilmektedir.



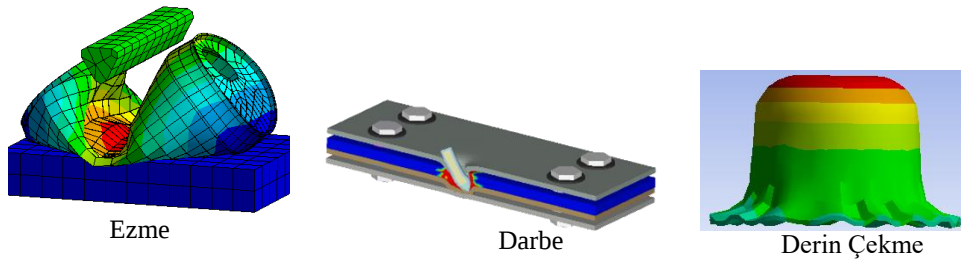
Şekil 4.4. Bir problemin sonlu elemanlar modeli (Ünal, 2011)

Sonlu sayıda bilinmeyişi olan sonlu elemanlar modeli sonsuz miktarda bilinmeyişi içeren fiziki modellerle yalnızca benzeşim yapar, asla gerçeğin yerini tutmaz. Sistemin başarısı hangi sistemin simüle edildiğine ve simülasyon için nelerin kullanıldığına bağlıdır (Ünal, 2011)

Mühendislikte FEM'in uygulama alanları başlıklar halinde sıralanacak olursa;

- Makine, Uzak, İnşaat ve Otomotiv endüstrisinde,
- Yapısal analizlerde (statik/ dinamik, linear/nonlinear),
- Isıl ve Akış analizlerinde,
- Elektromanyetik alanlarda,
- Geometrik yapılarda,
- Biyomekanik ve benzeri alanlarda geniş bir şekilde uygulanmaktadır (Yaşar, 2001)

Sonlu elemanlar yöntemi ile yapılan çözümler statik, yarı statik ve dinamik durumlar için ayrı ayrı değerlendirilir ve duruma uygun çözüm yöntemi seçilir. Statik durumlar için implisit yöntem kullanılırken, dinamik durumlar için eksplisit yöntemi daha uygun ve doğru çözümler sunmaktadır. Derin çekme yönteminde malzemenin kalıp içerisine akışı ve bir takım dinamik yüklemelere maruz kalması dikkate alındığında, eksplisit yönteminin kullanılması daha uygun olacaktır. Şekil 4.5' de dinamik durumlar için bu yöntemin uygulamalarından bazı örnekler verilmiştir (Ünal, 2011).



Şekil 4.5. Eksplisit yöntem kullanılan dinamik durumlar (Ünal, 2011).

4.5.1. İmplicit Yöntem

Bu yöntemde denge denklemleri $t+Dt$ anında çözülür. Sac şekillendirmedeki birçok nonlinear davranış nedeni ile denge konumu iteratif olarak elde edilir. Genelde, Denklem 4.19’ da verilen Newton-Raphson yöntemi kullanılarak çözülür (Ünal, 2011).

$$\Delta u^{(i+1)} = \Delta u^{(i)} + K_t^{-1}(F^{(i)} - I^{(i)}) \quad (4.19)$$

Burada, K_t bilinen teğetsel direngenlik matrisi, F dış kuvvetlerin vektörü, I ise iç kuvvetlerin vektörü olup, Δu bir zaman adımındaki deplasmanların vektörüdür. Bu yöntemde her iterasyon adımımda teğetsel direngenlik matrisinin yeniden oluşturulması ve ayrıştırılması gerekir. Yöntem teoride iki artış arasındaki adım aralığı istenen büyüklükte seçilebilmesine karşın pratikte nonlinear temas şartları nedeni ile sınırlıdır. Çözümde bir yakınsama kriterine ulaşıldığında hesaplama durur (Demiray, 2006).

4.5.2. Eksplisit Yöntem

Bu yöntemde denge denklemi t anında çözülür ve iterasyona gerek yoktur. Biçimlendirme işlemi statik değil dinamik bir işlem olarak algılanır ve hareket denkleminin integrasyonu için merkezi farklara dayalı bir çözüm adımı kullanılır:

$$\begin{aligned} u^{(i+1)} &= u^{(i)} + \Delta t^{(i+1)} + \dot{u}^{(i+\frac{1}{2})} \\ u^{(i+\frac{1}{2})} &= \dot{u}^{(i-\frac{1}{2})} + \frac{\Delta t^{(i+1)} + \Delta t^i}{2} \ddot{u}^{(i)} \end{aligned} \quad (4.20)$$

buradaki merkezi farklar operatörü bir önceki artışlardan bilinen hız ve ivme değerlerini kullandığından yöntem eksplisit olarak adlandırılır. İvme için;

$$\ddot{u}^{(i)} = M^{-1}(F^{(i)} - I^{(i)}) \quad (4.21)$$

formülü kullanılır ki burada M^{-1} kütle matrisinin tersi olup “lumped mass” yöntemi kullanıldığı takdirde ters alma işlemi diyagonal bir matrisin tersini alma işlemi şeklinde kolaylaşır. Kararlılık açısından kullanılabilecek zaman ise adımı genişliği sınırlıdır.

l : karakteristik sonlu elaman büyüklüğü,

c : malzemedeki ses hızı,

olmak üzere kararlı bir zaman adımı yaklaşık olarak

$$\Delta t = \frac{1}{c} \quad (4.22)$$

eşitliği ile bulunur. Yani bir zaman adımı içinde bir dalga en fazla bir sonraki sonlu elemana ulaşabilir. Ağ yoğunluğunda mm seviyesinde eleman büyüklükleri kullanıldığında μs mertebesinde zaman adımları elde edilir. Bu demektir ki bir derin çekme işleminin simülasyonu $10^5 - 10^6$ kadar zaman adımına gerek duyulabilir. Bu da doğrudan hesaplama zamanına yansır. Bu problemi gidermek için şekillendirme işlemleri gerçekte olduğundan daha hızlı şekilde oluyormuş gibi benzeştirilir. Benzeşim sırasında ortaya çıkabilecek atalet etkilerini gidermek için (örneğin sönüm elemanları kullanmak gibi) önlemler alınmalıdır. Yapılan araştırmalar, işlem hızının sonuçları etkilemeden on kata kadar çıkarılabileceğini göstermiştir. Malzeme özelliklerinin ve katsayıların şekil değiştirme hızına bağlı olduğu malzeme modelleri için ise hızın değiştirilmesi söz konusu olamaz. Alternatif bir yöntem de işlem hızı sabit tutularak malzemenin yoğunluğunun artırılması ve buna bağlı olarak malzeme içindeki ses hızı küçültülmesidir. Yoğunluğun 100 kat artırılması ses hızını 10 kat düşürür ve problem 10 kat hızlı çözülür (Yaşar, 2001).

4.5.3. Eksplisit ve İmplicit Yöntemlerin Karşılaştırılması

- Eksplisit Yöntem (EY) mevcut durumda daha az hesap zamanına ve hafızaya gerek duymaktadır. İmplicit Yöntem (IY) ise mevcut yazılımların geliştirilmesi ile oluşturulmuştur.
- Eksplisit yöntemler çarpma gibi kısa süreli dinamik problemlerin çözümü için çok elverişlidir. Ancak çok sayıda zaman adımına gerek duyarlar. İmplicit yöntemler de adım aralığı teorik olarak sınırsızdır. Hesap zamanını kısaltmak için Eksplisit yöntemler de yapay olarak bir ivmelendirmeye veya yoğunluğu arttırmaya gidilir. Bunun sonucu ortaya çıkacak kütle etkileri ancak yazılım çok iyi tanıyan kullanıcılar tarafından alınacak önlemlerle giderilebilir. İmplicit yöntemler de fiziksel sistemi değiştirmek gerekmez, çünkü çözüm zaten iteratif olarak yapılmaktadır.
- Eksplisit yöntemler nümerik açıdan oldukça kararlıdır. Temas şartları küçük zaman adımları sayesinde tam anlamı ile tarif edilebilir. Pot oluşması gibi kararsızlık olguları kolayca belirlenir ve yakınsama problemleri ile karşılaşmaz. İmplicit yöntemler ise bu durumda işlemeyebilir veya burkulma sonrası gibi ek hesaplara gereksinim duyulabilir.

- Geriye yaylanma ve iç gerilmeler konusunda İmplicit yöntemler daha üstündür. Bu tip hesaplamalarda takım parçalarının birbirlerinden uzaklaştırılmasının simülasyonu çok önemlidir. Bu yükleme boşaltması Eksplisit yöntemler de ancak iş parçası hareketini tamamlamışsa, yani dinamik etkiler sönülmüş ise uygulanabilir. Hesap zamanını azaltma kaygısı, elemanlarda kullanılan düşük dereceli integrasyon gerilmelerinin hassas hatta doğru hesaplanmasını engeller. Ancak, geriye yaylanmanın temel şartı ise gerilmelerin doğru hesaplanmasıdır. Dolayısıyla Eksplisit yöntemlerle elde edilen geriye yaylanmalar ancak tendense olarak doğru sonuç verir. Eleman integrasyon derecesi yükseltilerek buna karşı gelinebilir, ancak hesap zamanı oldukça artar ve İmplicit yöntemlere karşı olan avantaj kaybedilir(Yaşar, 2001).



Şekil 5.1’de gösterilen deney seti parçaları aşağıda belirtilmiştir.

- | | |
|-------------------------|--------------------|
| a. C tipi pres tezgahı | h. Yük hücresi |
| b. Hidrolik pompa | i. Matris |
| c. Yön kontrol valfi | j. Kalıp alt hazne |
| d. Manometre | k. Baskı plakası |
| e. Basınç kontrol valfi | l. Zimba |
| f. Alt hazne tahliyesi | m. İndikatör |
| g. Hidrolik piston | n. Hız ayar valfi |

Bu çalışmada 0,9 mm kalınlığında DIN EN 10130-1999 sac malzeme deney numunesi olarak kullanılmıştır. Kullanılan deney numunesine ait malzemenin kimyasal birleşimi Tablo 5.1’ de gösterilmiştir. Sac malzemenin mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla 5000 kN kapasiteli SHIMATZU marka çekme test cihazında 5 mm/dak çekme hızında 0°, 45° ve 90° olmak üzere üç farklı haddeleme yönünde toplam 9 adet numune çekme testine tabi tutulmuştur. Çekme deneyinden elde edilen veriler ise Tablo 5.2’ de verilmiştir.

Tablo 5.1. Deney numunesi kimyasal analizi

Element	%	Element	%
Karbon (C)	0.0440	Nikel (Ni)	0.0261
Fosfor (P)	0.108	Bakır (Cu)	0.00452
Kükürt (S)	0.0085	Niobyum (Nb)	0.00241
Krom (Cr)	0.0116	Titanyum (Ti)	0.00027
Mangan (Mn)	0.241	Kalay (Sn)	0.0864
Molibden (Mo)	0.0116	Demir (Fe)	99.46

Tablo 5.2. Deney numunesi mekanik özellikleri

Hadde Yönü (°)	Akma Dayanımı (N/mm ²)	Çekme Dayanımı (N/mm ²)	Uzama (%)	Elastikiyet Modülü (kN/mm ²)	Poission Oranı
0	185.45	310.78	35.88	195	0,3
45	203.30	333.55	32.17		
90	189.46	303.65	34.25		

Deneysel çalışmaların gerçekleştirilebilmesi tabaka halinde temin edilen sac 100x100 mm kare parçalara ayrılmıştır. İlkel pul çapını elde edebilmek için Ø90 mm çapında kesme kalıbı ile pul haline getirilmiştir. Bu işlemden sonra limit çekme oranını belirlemek için Ø60 mm çaptan 1mm aralıklar ile Ø80 mm’ ye kadar torna tezgâhında işlenerek ilkel parça

boyutları elde edilmiştir. Tablo 5.3' te Ø30 mm zimba çapına karşılık gelen limit çekme oranları verilmiştir.

Tablo 5.3. Ø30 mm zimba çapına karşılık gelen limit çekme oranları

İlkel Parça Çapı (mm)	Limit Çekme Oranı (β)	İlkel Parça Çapı (mm)	Limit Çekme Oranı (β)	İlkel Parça Çapı (mm)	Limit Çekme Oranı (β)
60	2,00	67	2,23	74	2,46
61	2,03	68	2,26	75	2,50
62	2,06	69	2,30	76	2,53
63	2,10	70	2,33	77	2,56
64	2,13	71	2,36	78	2,60
65	2,16	72	2,40	79	2,63
66	2,20	73	2,43	80	2,66

Deneysel çalışmalarda kullanılan matrisler ve zimbalar 1.2379 soğuk iş takım çeliği ve baskı plakalar için ise Ck 45 çeliği kullanılarak TAKSAN TTC-630 markalı CNC torna tezgâhında ve işleme yönü kalıp merkezine doğru olacak şekilde işlenmiştir. Matris ve baskı plakası imalatı Şekil 5.2' de gösterilmiştir. Deneysel çalışmalarda kullanılan zimbalar ise ölçü tamlığını sağlaması ve yüzey pürüzlülüğünü azaltmak için Taksan BU 28/1000 silindirik taşlama tezgahında taşlanmıştır (Şekil 5.3).

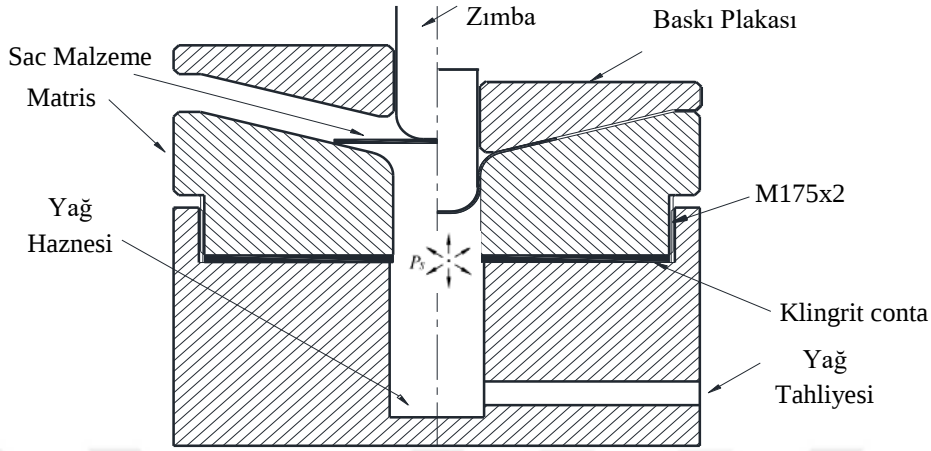


Şekil 5.2. Matris ve baskı plakası imalatı



Şekil 5.3. Zimba taşlama işlemi

Matris açılı hidromekanik derin çekme kalıplama yönteminin matris, baskı plaka, zımba, kalıp alt hazne ve sac malzemenin tam kesit görünüşü Şekil 5.4’ de ifade edilmiştir.



Şekil 5.4. Matris açılı hidromekanik derin çekme deney seti tam kesit görünüşü

Sac şekillendirme yöntemlerinde (Form kalıpları, Derin çekme, Bükme v.s.) sacın temas halinde olduğu bölgelerde kalıp ekipmanlarının yüzey pürüzlülüğü oldukça önemlidir. İmalatı gerçekleştirilen kalıp ekipmanlarının yüzey pürüzlülüğü değerleri Mitutoyo marka Surf test Sj-210 model ölçüm cihazı ile yapılmıştır. Ölçülen yüzey pürüzlülük değerleri matris üst yüzey için 0,661 μm , Zımba yüzeyi için 0,255 μm ve baskı plakası için ise 1,034 μm olarak ölçülmüştür. Bütün kalıp ekipmanlarının yüzey pürüzlülük değerleri Şekil 5.5’ te gösterilen değerler ile çok yakın değerlerdir.

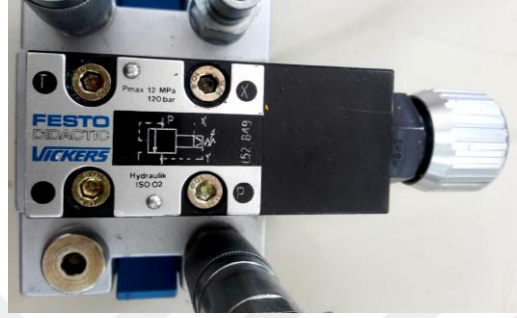


Şekil 5.5. Yüzey pürüzlülük ölçüm değerleri

Deneysel çalışmalar esnasında zımbaya etki eden kuvvetin belirlenmesi için CAS LS-20T marka ve 0-20 ton aralığında tek yönlü kuvvet ölçümü yapan bir yük hücresi kullanılmıştır. Yük hücresinden elde edilen verileri bilgisayar ortamına alınması ve kaydedilmesi amacı ile CAS 1500A marka indikatör RS 232 bağlantısı kullanılarak DNC bilgisayar programı yardımı ile veriler 10^{-1} saniye aralığında bilgisayara kaydedilmiştir.

Matris açılı hidromekanik derin çekme yönteminde kalıp hazne basıncını sağlamak için şekillendirici sıvı olarak ISO 11158 standartlarına uygun, kinematik viskozitesi 40 $^{\circ}\text{C}$ ’ de

46 mm/s² olan hidrolik yağ (Hydro Oil Aw 46) kullanılmıştır. Kalıp içi basınç ölçümleri için FESTO marka ve maksimum 12 MPa çalışma şartlarında olan basınç kontrol valfi kullanılmıştır. Basınç kontrol valfi hidrolik pompaya bağlanarak manometre yardımıyla kalibrasyonu yapılmış ve daha sonra deney düzeneğine bağlanmıştır. Deneysel çalışmalarda değişen her hazne basıncı değerleri için kalibrasyon işlemi yapılmıştır. Basınç kontrol valfi Şekil 5.6’ da gösterilmektedir.



Şekil 5. 6. Basınç kontrol valfi

Hidromekanik derin çekme deneyleri için işlem parametreleri ve bu parametrelere ait seviyeler Tablo 5.4’ te verilmiştir. Bu değerler kullanılarak Taguchi deney tasarımına göre L18 ortogonal dizin oluşturularak deneyler gerçekleştirilmiştir.

Tablo 5.4. Matris açılı hidromekanik derin çekme deney parametreleri

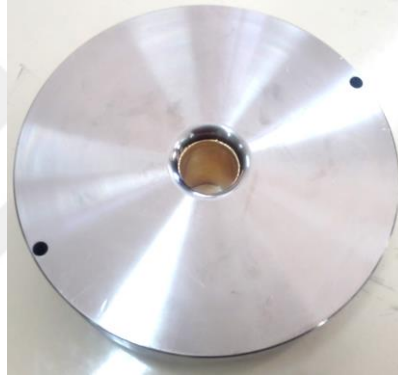
Deney Seviyeleri	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3	Seviye 4	Seviye 5	Seviye 6
Matris Açısı (°)	0°	2,5°	5°	10°	12,5°	15°
Zımba Radyüsü (mm)	6	8	10	-	-	-
Matris Radyüsü (mm)	6	8	10	-	-	-
Kalıp Hazne Basıncı (Mpa)	6	8	10	-	-	-
Baskı Plaka Kuvveti (N)	1964,95	5882,78	9507,64	-	-	-

Deneysel çalışmalar için gerekli olan baskı plaka kuvvetini elde etmek için deney setinin kurulu olduğu C tipi pres tezgahından bağımsız çalışan hidrolik pompa yardımıyla sağlanmıştır. Hidrolik pompaya basınç kontrol valfi, yön kontrol valfi, manometre ve iki hidrolik silindir bağlanmıştır. Piston kalibrasyonu için manometrede okunan basınç değerine karşılık gelen basınç yük hücresi sayesinde belirlenmiş olup deneysel çalışmalarda belirlenen basınç değerlerine göre baskı plaka kuvvetleri belirlenmiştir.

Bu çalışma, Fırat Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Makine Mühendisliği Atölyesinde bulunan C tipi 600 kN basma kapasiteli Şahinler marka hidrolik pres tezgahında

gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalarda zımba hızı, pres tezgahında bulunan hız ayar valfi üzerinden ayarlanmış ve 4 mm/sn hızında sabit alınmıştır.

Deneysel çalışmanın yapıldığı kalıp seti, pres tezgahına bağlanmadan önce kalıp ile zımba arasında çekme boşluğu olduğundan dolayı kalıp eksenini ile zımba ekseninin çakışması için matris içerisine pirinç malzemeden bir burç yapılarak çakılmıştır. Bir sonraki adımda ise burç zımba çapından 0,02 mm büyük olacak şekilde delik içi tornalama işlemine tabi tutulmuştur. Kalıp alt hazne alt plakaya, baskı plakası ise üst plakaya sabitleme pimleri ile merkezlenmiş ve sabitlenmiştir. Deney seti kurulup tezgah üzerine sabitleme yapılmadan önce pres tezgahı üzerine yerleştirilip zımba aşağı doğru hareket ettirilip zımba burç içerisine girdikten sonra kalıp pres tezgahına sabitlenmiştir. Bu çalışma sonunda ise matris ve zımba eksenleri çakışacak şekilde kalibre edilmiştir.



Şekil 5.7. Kalibrasyon matrisi

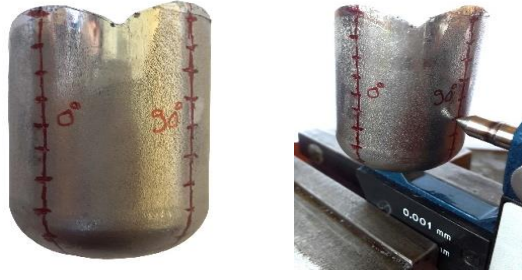
Tablo 5.5 'te L18 deney tasarımına göre yapılan deneysel çalışma planı gösterilmektedir.

Tablo 5.5. L18 Taguchi deney tasarımına göre yapılan deneyler

D.N	Matris açısı ($^{\circ}$)	Zımba Radyüsü (mm)	Kalıp Radyüsü (mm)	Kalıp Hazne Basıncı (Mpa)	Baskı Plaka Kuvveti (N)
1	0	6	6	6	1964,95
2	0	8	8	8	5882,78
3	0	10	10	10	9507,64
4	2,5	6	6	8	5882,78
5	2,5	8	8	10	9507,64
6	2,5	10	10	6	1964,95
7	5	6	8	6	9507,64
8	5	8	10	8	1964,95
9	5	10	6	10	5882,78
10	10	6	10	10	5882,78
11	10	8	6	6	9507,64
12	10	10	8	8	1964,95
13	12,5	6	8	10	1964,95
14	12,5	8	10	6	5882,78
15	12,5	10	6	8	9507,64
16	15	6	10	8	9507,64
17	15	8	6	10	1964,95
18	15	10	8	6	5882,78

Deneysel çalışmaların gerçekleşmesi için yukardaki deney planını uygulayarak her deney için çekilebilecek en büyük çap değerine kadar çalışmalar tekrarlanmıştır. Çekilen numunelerden hasara uğramış çap ölçüsünden bir önceki çap ölçüsü o deneyin limit çekme oranını belirlemiştir. Limit çekme oranını doğrulamak için maksimum çekilebilecek çap ölçüsü deneyi 3 kez tekrarlanmıştır.

Matris açılı hidromekanik derin çekme yönteminde elde edilen deney numuneleri Tel Erozyon tezgâhında kesilmiştir. Kesilen iş parçasının merkezinden başlayarak hadde yönüne doğru 5 mm aralıklar ile kalınlık ölçümü yapılmıştır. Kalınlık ölçümleri 10^{-4} mm hassasiyetinde QLR Digit marka mikrometre ile ölçülmüştür. Et kalınlığını belirlemek için her parametrenin en büyük limit çekme oranına ait seviyesi için ölçüm alınmıştır. Kalınlık ölçüm işlemi için kesilen deney numunesi ve ölçüm şekli Şekil 5.8’ de gösterilmiştir.



Şekil 5.8. İş parçası et kalınlığı ölçümü

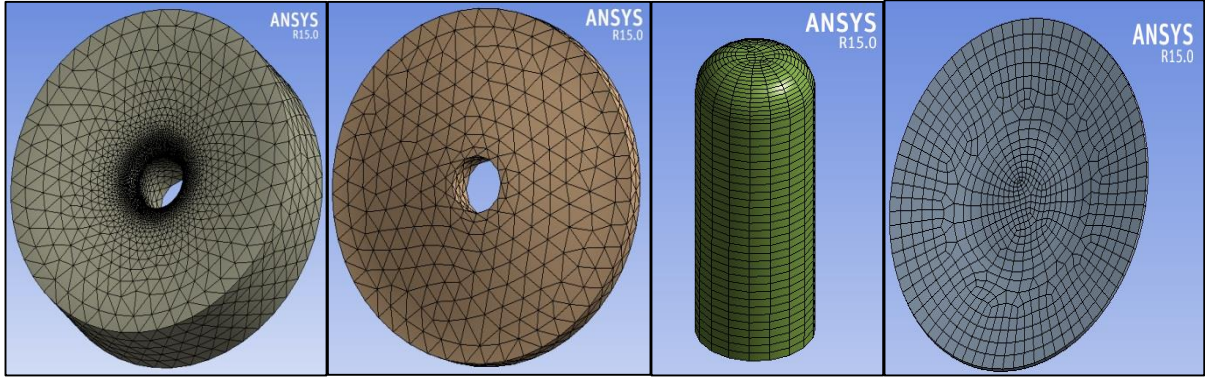
5.3. Sayısal Analiz Çalışmaları

Matris açılı hidromekanik derin çekme kalıplama yönteminde şekillendirilen sac malzeme üzerinde meydana gelen deformasyonların sonlu elmanlar yöntemine dayalı analizleri, ANSYS Workbench 15 paket programında gerçekleştirilmiştir.

Yapılan deneysel çalışmanın sayısal analizini gerçekleştirmek için kalıp ekipmanlarının ve sac malzemenin bilgisayar ortamında modellenmesi ve paket programda analiz edilmesi gerekmektedir. Deneysel çalışmalarda kullanılan matrisler, bunlara ait aç ve radyüsü ölçüleri, zımba ölçüsü ve radyüsü değerleri dikkate alınarak ANSYS Workbench paket programında Explicit Dynamics- Design Modeler menüsünden deney seti çizimleri 3B’lu olarak oluşturuldu ve .agdb dosya uzantısı ile kaydedildi. Kaydedilen dosyalar Explicit Dynamics analiz yöntemi kullanılarak sayısal analizler yapıldı.

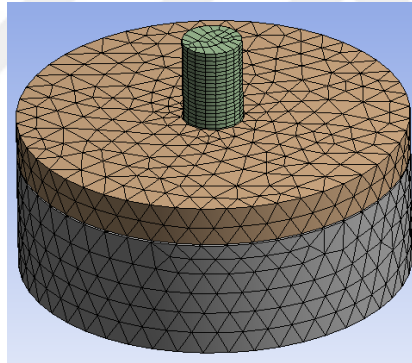
Sayısal analiz deneyleri için tasarlanan 3B’lu deney setinden sonra sac malzeme tanımlama işlemi yapılmıştır. Oluşturulan sac modeli için Engineering Data Sorce menüsünden Bilinear Isotropic Hardening modeli seçilmiştir. Sayısal analizde kullanılacak olan malzeme özellikleri için gerekli olan akma ve çekme dayanımları daha öncesinde yapılan çekme deneyi işlemi sonucuna göre belirlenirken bulk modülü (hacimsel modülü), kayma modülü, elastisite modülü (E), poisson oranı (ν) ve malzeme yoğunluğu (ρ) ise paket programdan alınmıştır.

Sac malzeme özellikleri programda belirtildikten sonra matris, zımba, baskı plaka ve sac ekipmanlarının ağ yapıları oluşturuldu. Deney setine ait ağ yapıları Şekil 5.9’ da gösterilmiştir.



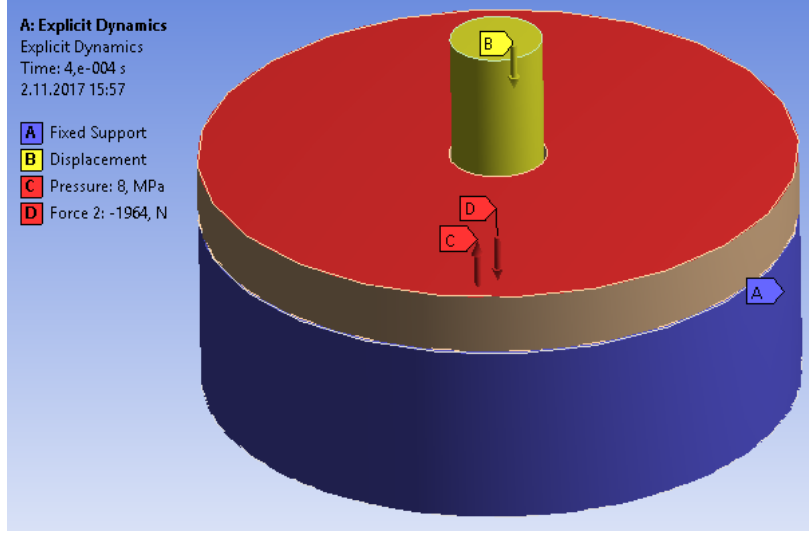
Şekil 5.9. Kalıp ekipmanları ağ yapıları

Ağ yapılarının oluşumu esnasında kalıp ve zımba radyüsü bölgelerinde temasın daha hassas olması için ağ aralığı 1 mm olarak seçilmiştir. İş parçası yüzeyi ağ aralığı 3 mm ve matris ve baskı plakası yüzeyleri ise çözüm işlemi zaman açısından dolayı 10 mm olarak seçilmiştir. Farklı matris, baskı plakası ve radyüsler için kalıp ekipmanlar yeniden modellenmiştir. Ağ yapısı oluşturulan deney seti Şekil 5.10’ da gösterilmektedir.



Şekil 5.10. Deney setine ait ağ yapısı

Deneysel çalışma parametreleri malzeme özellikleri, baskı plaka kuvvetleri, zımba hızı ve kalıp alt hazne basınç değerleri program içerisine tanımlanarak çekme işlemi modellenmiştir. Modellenen deney düzeneği Şekil 5.11’ de gösterilmiştir.



Şekil 5.11. Sayısal analiz parametrelerinin belirlenmesi

Şekil 5.11’ da gösterilen sayısal analiz deney parametreleri, Explicit Dynamics analiz yönteminde zımbaya “*displacement*”, baskı plaka kuvveti için “*force*”, matrisi sabitlemek için “*fixed support*” ve sac malzemeye uygulanan hazne basıncı için “*pressure*” tanımlanmıştır.

6. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada DIN EN 10130-199 malzemesi matris açılı hidromekanik derin çekme yöntemi ile çekilmiştir. Yapılan uygulamada Taguchi deney tasarım planı ile belirlenen L18 ortogonal dizinindeki deneyler yapılarak Tablo 6.1’ de verilmiştir. Tablo 6.1’ de belirlenen deney parametrelerinin limit çekme oranı, sac et kalınlığı ve zımba kuvvetleri üzerindeki sonuçları görülmektedir.

Deney sonuçları değerlendirmeleri yapılırken her bir parametrenin deney sonucu üzerindeki etkisi ayrı ayrı incelenmiştir. Ayrıca deneysel çalışma sonuçları Taguchi deney tasarım yöntemi ile S/N oranına dönüştürülmüş ve varyans analizi yapılarak parametrelerin sonuçlar üzerindeki etkisi % oranı olarak belirtilmiştir.

Bu işlemlerin yanı sıra ANSYS paket programı ile deneysel çalışmanın modeli oluşturularak çözümleme işlemi yapılmıştır. Elde edilen deneysel ve sayısal sonuçlar karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Matris açılı hidromekanik derin çekme işleminde Tablo 5.5 ‘te verilen deney planına göre yapılan deneysel çalışma sonuçları Tablo 6.1 de gösterilmiştir.

Tablo 6.1. L18 Deney tasarımına göre yapılan deneysel çalışma sonuçları

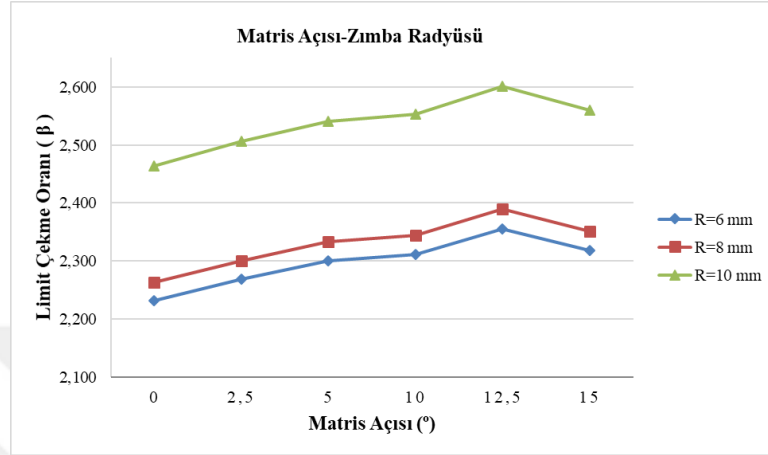
D.N	Matris Açısı (°)	Zimba Radyüsü (mm)	Kalıp Radyüsü (mm)	Kalıp Hazne Basıncı (Mpa)	Baskı Plaka Kuvveti (N)	Limit Çekme Oranı (β)	Zimba Kuvveti (N)	Kap et Kalınlığı (mm)	
								Min	Mak
1	0	6	6	6	1964,95	2,2	35708,4	0,822	0,965
2	0	8	8	8	5882,78	2,3	37552,68	0,82	0,992
3	0	10	10	10	9507,64	2,4	39730,5	0,822	0,964
4	2,5	6	6	8	5882,78	2,26	39308,67	0,814	0,989
5	2,5	8	8	10	9507,64	2,33	38455,2	0,827	0,979
6	2,5	10	10	6	1964,95	2,5	43056,09	0,8	0,959
7	5	6	8	6	9507,64	2,23	39848,22	0,806	0,946
8	5	8	10	8	1964,95	2,36	42212,43	0,82	0,979
9	5	10	6	10	5882,78	2,53	46980,09	0,784	0,970
10	10	6	10	10	5882,78	2,3	40976,37	0,801	0,988
11	10	8	6	6	9507,64	2,3	41967,18	0,827	0,997
12	10	10	8	8	1964,95	2,53	45959,85	0,78	0,952
13	12,5	6	8	10	1964,95	2,33	41035,23	0,813	0,997
14	12,5	8	10	6	5882,78	2,36	43389,63	0,827	0,969
15	12,5	10	6	8	9507,64	2,6	47097,81	0,764	0,952
16	15	6	10	8	9507,64	2,3	41368,77	0,825	0,981
17	15	8	6	10	1964,95	2,3	42820,65	0,809	0,974
18	15	10	8	6	5882,78	2,56	47823,75	0,8	0,973

6.1. Matris Açılı Hidromekanik Derin Çekme Parametrelerinin Limit Çekme Oranı Üzerine Etkisi

Derin çekme parametrelerin etkisi ile elde edilen limit çekme oranı ilkel pul çapının zimba çapına oranıdır. Tek seferde ne kadar büyük limit çekme oranı elde edilirse yapılan çalışmalar için o kadar başarı sağlanmıştır. Limit çekme oranını artırmanın birçok yolu vardır. Bunların başında kademeli çekme işlemi gelmektedir. Ancak bu yöntem ise hem maliyet açısından hem de zaman açısından uzun ve maliyet açısından ise oldukça pahalı yöntemlerdir. Bu başlık altında matris açılı hidromekanik derin çekme kalıplama yönteminde kullanılan parametrelerin limit çekme oranına etkisi araştırılmıştır.

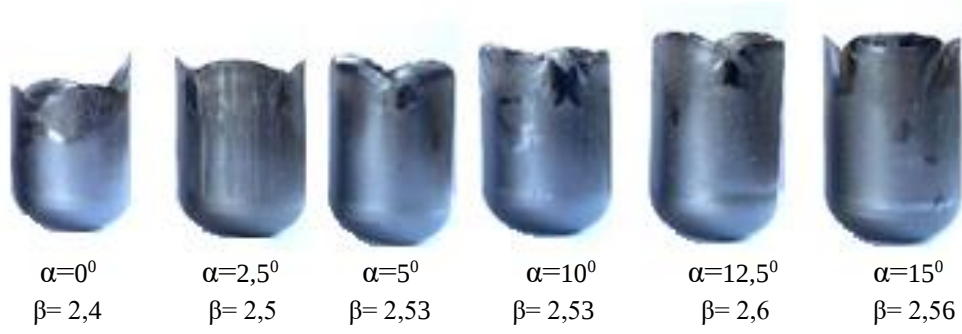
6.1.1. Matris Açısının Limit Çekme Oranı Üzerine Etkisi

Matris açılı hidromekanik derin çekme yönteminde kullanılan zımba radyüsleri ($R=6$ mm, $R=8$ mm, $R=10$ mm) için matris açısının (α) değişmesi ile elde edilen limit çekme oranları (β) değerlendirilmiştir.



Şekil 6.1. Matris açısı ve zımba radyüsünün limit çekme oranına etkisi

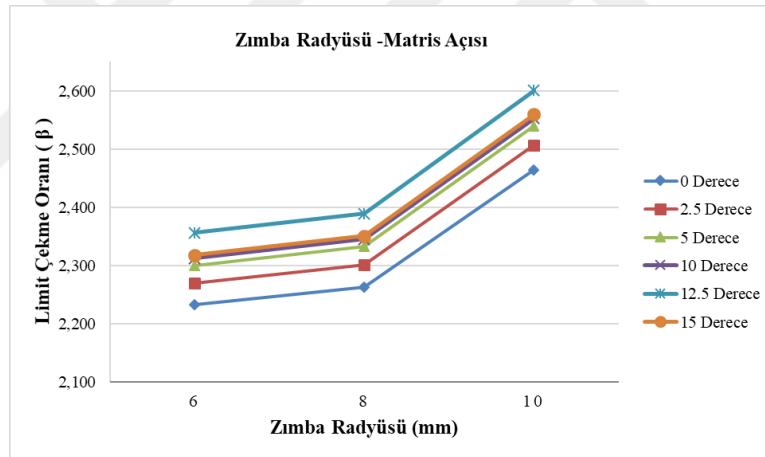
Şekil 6.1 incelendiğinde matris açısı limit çekme oranını olumlu yönden etkilemektedir. Artan açı değerine bağlı olarak limit çekme oranında ki artış ise göz ardı edilmeyecek kadar büyük değerdedir. Sac malzeme açılı derin çekme kalıp yöntemlerinde kalıp içerisine akması daha kolay olduğu için açının 0° 'den $12,5^\circ$ 'ye kadar artması limit çekme oranını artırmıştır. $12,5^\circ$ 'den sonraki açı değerinde ise limit çekme oranının azaldığı belirlenmiştir. Geleneksel matris açılı kalıplama yöntemlerinde de matris açısı arttıkça sac malzemenin kalıp içerisine akması daha kolay olduğu için limit çekme oranının arttığı belirtilmiştir (Savaş & Seçkin, 2007). Bu nedenle sac malzemenin kalıp ağız bölgesinden kalıp içerisine akışı kolaylaşarak malzemede oluşan gerilmelerin, sac malzemenin kopma gerilmesi sınırı altında kalarak daha yüksek çekme oranları elde edilebilir (Ünal, 2011). Matris açısına bağlı elde edilen deney numuneleri Şekil 6.2' de gösterilmektedir.



Şekil 6.2. Matris açısının etkisi ile elde edilen deney numuneleri

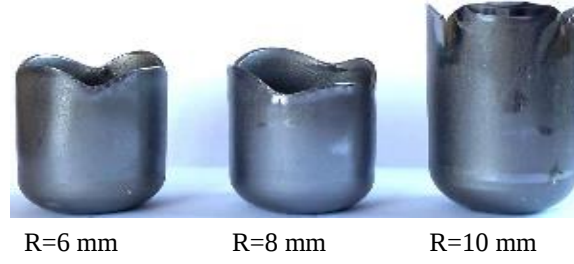
6.1.2. Zımba Radyüsünün Limit Çekme Oranı Üzerine Etkisi

Yapılan çalışmalarda sac malzemenin matris açılı hidromekanik derin çekme işleminde zımba radyüsünün limit çekme oranı ve zımba kuvvetleri araştırılmıştır. Zımba uç kısımlarına radyüsler (R=6 mm, R=8 mm; R=10 mm) verilerek çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Şekil 6.3’ de zımba radyüsünün limit çekme oranı üzerindeki etkisi gösterilmektedir.



Şekil 6.3. Zımba radyüsü ve Matris açısının limit çekme oranına etkisi

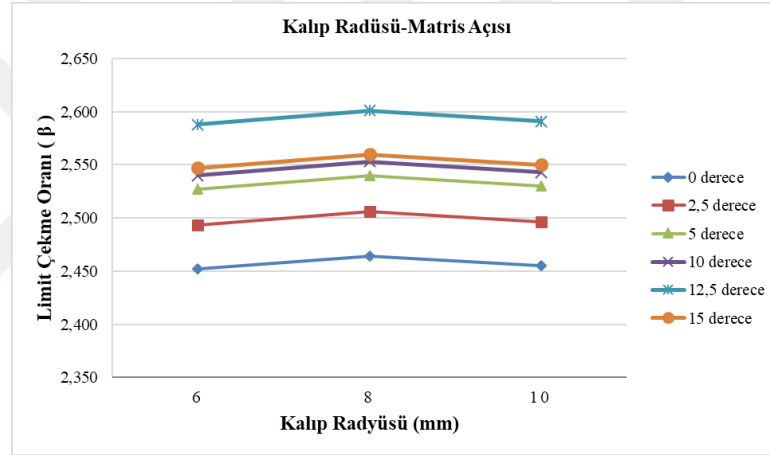
Artan zımba radyüs değerlerine bağlı olarak limit çekme oranının arttığı gözlenmiştir (Karaağaç, Gürün, & Özdemir, 2009) (Özek & Bal, 2009). Zımba radyüs değeri arttıkça zımba yüzey alanında artmaktadır. Gerilme formülü dikkate alındığında ($\sigma = F/A$) alan arttığı için gerilme değeri de azalacaktır. Böylece sac malzemeye etkiyen gerilme kuvvetleri malzemenin kopma sınırı altında kalarak çekme işlemi olumlu olarak sonuçlanmıştır. Zımba radyüsü R=6 mm, R=8 mm ve R=10 mm için elde edilen deney numuneleri Şekil 6.4’ te gösterilmiştir.



Şekil 6. 4. Zimba radyüsünün etkisi ile elde edilen deney numuneleri

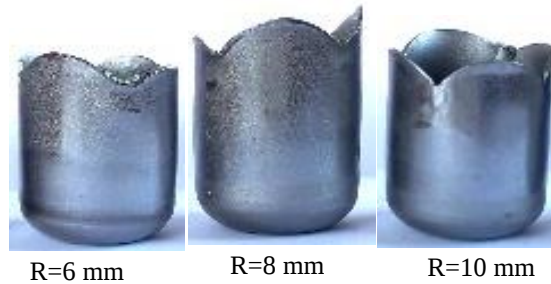
6.1.3. Matris Radyüsünün Limit Çekme Oranı Üzerine Etkisi

Sac malzemenin kalıp içerisine daha kolay bir şekilde akması için matris kenarlarına (R=6 mm, R=8 mm; R=10 mm) radyüsler verilerek hidromekanik derin çekme deneyleri yapılmıştır. Matris radyüslerinin limit çekme oranı üzerindeki etkisi Şekil 6.5’ te gösterilmiştir.



Şekil 6.5. Matris Radyüsü ve Matris açısının limit çekme oranına etkisi

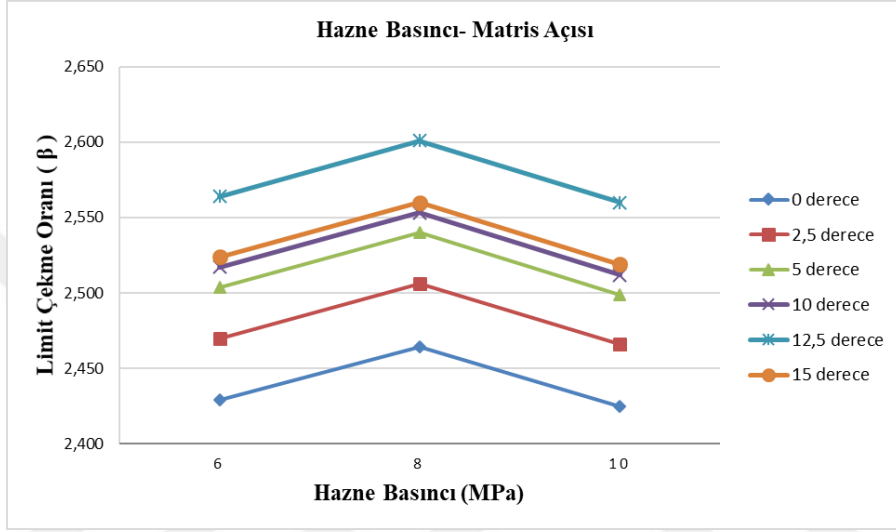
Hidromekanik derin çekme işleminde artan matris radyüs değerleri ile sac malzemenin kalıp içerisine akması daha kolay hale gelmektedir. Ancak matris radyüs değerlerinin optimum değerlerden fazla olması durumunda ise ürün olarak elde edilen sac malzemenin üst kısımlarında kırışmalar oluşmaktadır (Ünal, 2011). Bu kırışmalar ise yapılan derin çekme işlemini olumsuz etkiler. Kalıp radyüsü R=6 mm, R=8 mm ve R=10 mm için elde edilen deney numuneleri Şekil 6.6’ da gösterilmiştir.



Şekil 6.6. Matris radyüsünün etkisi ile elde edilen deney numuneleri

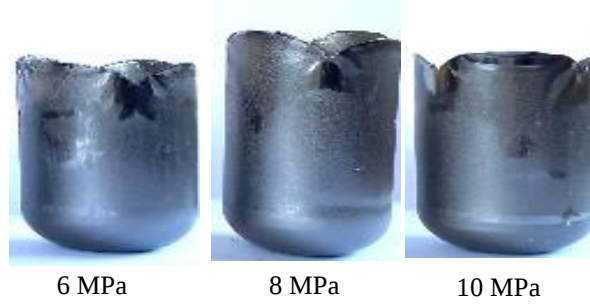
6.1.4. Hazne Basıncının Limit Çekme Oranı Üzerine Etkisi

Matris açılı hidromekanik derin çekme deneyleri için 3 farklı hazne basıncı kullanılmıştır. Kullanılan hazne basıncı değerleri 6 MPa, 8 MPa, ve 10 MPa dır. Kalıp alt haznede kullanılmakta olan basınç ayar valfinin üst basınç değeri sınırından dolayı 10 MPa üzerindeki basınç değerlerinde deneysel çalışmalar yapılamamıştır. Hazne basıncının limit çekme oranına etkisi Şekil 6.7’ de ifade edilmektedir.



Şekil 6.7. Hazne basıncı ve Matris açısının limit çekme oranına etkisi

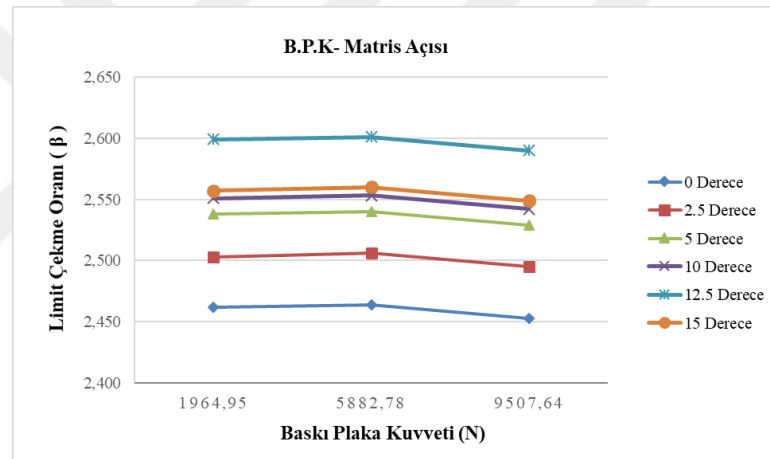
Hazne basıncı hidromekanik derin çekme işlemi için en önemli etkenler arasında olduğu söylenebilir. Sac malzeme zımba tarafından kalıp içerisine doğru itilmeye başladığı andan itibaren sıvı dolu hazne içerisindeki akışkan ise zımba hareket yönüne zıt bir kuvvet uygulamaktadır. Hazne basıncı; düşük değerinde gerekli basınç göstermeyerek yağ filmi oluşumunu azaltıp işlemi geleneksel derin çekme haline dönüştürmüştür. (Anket, 2011). Derin çekme işlemi yapılan deney numunelerinde radyüs bölgesinde erken kırılmalara neden olmuştur. Hazne basıncı için optimum değer üzerine çıkıldığı zaman ise sızdırmazlığı sağlamak çok zor olmuştur. Yağ sızdırmazlığını sağlamak için ise baskı plaka kuvvetinin artmasına ihtiyaç duyulmakta ve baskı plakası kuvveti arttığı durumda ani kırılmalara sebep olmaktadır. Sac malzemedeki incelmanın ve ani kırılmaların meydana geldiği durumlar ise yine hazne basıncının en düşük ve en yüksek değerlerinde meydana gelmiştir (Qin & Balendra, 2004). Hazne basıncı 6 MPa, 8 MPa ve 10 MPa, için elde edilen deney numuneleri Şekil 6.8’ te gösterilmiştir.



Şekil 6.8. Hazne basıncının etkisi ile elde edilen deney numuneleri

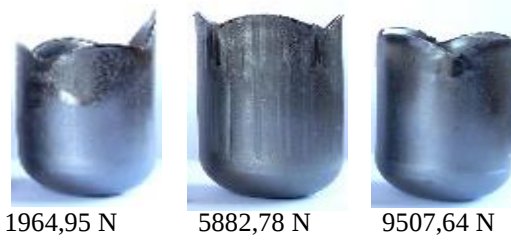
6.1.5. Baskı Plaka Kuvvetinin Limit Çekme Oranı Üzerine Etkisi

Derin çekme işlemlerinde sac malzemenin kalıp içerisine akmasını kontrol altında tutmak ve sac malzemede oluşacak kırışıkları engellemek için baskı plakası üzerine kuvvet uygulanmalıdır. Bu çalışmada baskı plaka kuvveti olarak 3 değişken kullanılmıştır. Baskı plaka kuvveti değişkenleri 1964,95 N; 5882,78 N ve 9507,64 N dur. Baskı plaka kuvvetinin limit çekme oranına etkisi Şekil 6.9’ da gösterilmiştir.



Şekil 6.9. Baskı plaka kuvveti ve Matris açısının limit çekme oranına etkisi

Hidromekanik derin çekme işleminde, sac malzemenin kontrollü bir şekilde kalıp içerisine akmasını sağlayan baskı plakası derin çekme işlemi için gerekli bir ekipmandır. Optimum kuvvet değerinin altındaki seviyede baskı kuvveti yetersiz olduğu için sac malzeme ve kalıp yüzeyi arasında yağ sızdırması meydana gelmektedir. Bu da hidromekanik derin çekme işlemini geleneksel derin çekme işlemine olan benzerliği artmıştır. Yüksek baskı plaka değerinde ise sac malzemenin kalıp yüzeyi ve baskı plaka yüzeyinde oluşan yüksek sürtünme kuvvetlerine maruz kalmış ve malzemenin kopma sınırını aştığı için yapılan deneylerde uygun olmayan sonuçlar elde edilmiştir. Yüksek baskı plaka kuvvetinde ayrıca radyal kuvvetler artış göstererek iş parçasında kulaklanmanın fazla olduğu gözlenmektedir. Baskı plakası kuvvetinin etkisi ile elde edilen deney numuneleri Şekil 6.10’ da gösterilmiştir.



Şekil 6.10. Baskı plaka kuvvetinin etkisi ile elde edilen deney numuneleri

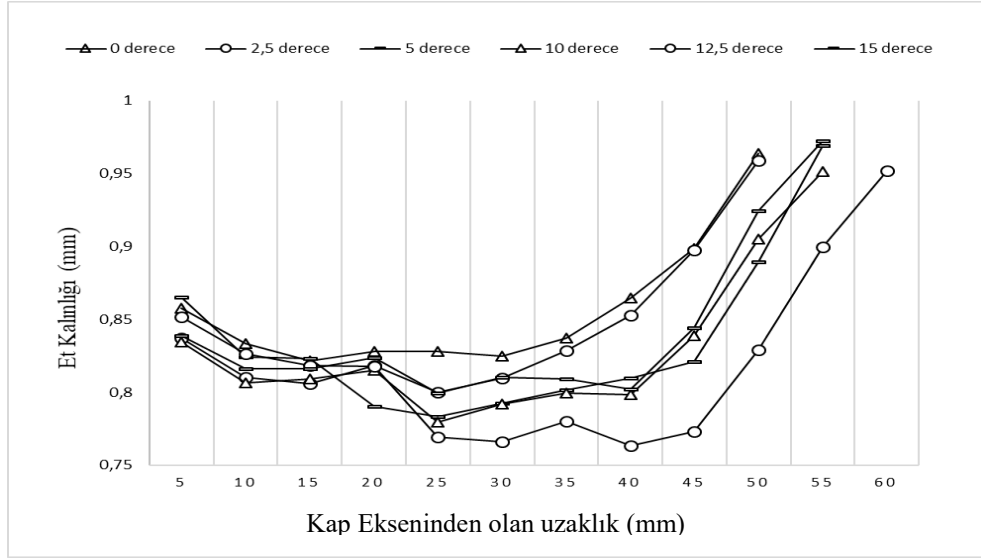
6.2. Matris Açılı Hidromekanik Derin Çekme Parametrelerinin Kap Et Kalınlığı Üzerine Etkisi

Hidromekanik derin çekme ve geleneksel derin çekme yöntemlerinde limit çekme oranının büyüklüğünün önemi olması kadar sac malzemedeki kalınlık değişimi de o kadar önemli bir sonuçtur. Et kalınlığı elde edilen ürünün dayanımı açısından büyük önem arz etmektedir.

Yapılan çekme işlemi esnasında meydana gelen çeşitli gerilmeler etkisi ile iş parçası et kalınlığında belirli bir oranda değişimler söz konusudur. Bu değişimler ile iş parçasının taban kısmındaki et kalınlığındaki değişim çok azdır. Genellikle et kalınlığında, zımba radyüsünün ve bu bölgeye yakın noktalarında incelmeler, iş parçası üst bölgelerinde ise kalınlaşmalar meydana gelir.

6.2.1. Matris Açısının Et Kalınlığına Etkisi

Derin çekme kalıplama yönteminde son ürün olarak elde edilen iş parçasının et kalınlığı dağılımı homojen olması istenir. Genellikle homojenliği sağlamak amacı ile derin çekme işlemleri tekrarlanır. Bu işlem ise hem imalat maliyetini artırır hem de zaman kaybına yol açar. Bu nedenle dereceli kaplar ve hidromekanik yöntem ile kalınlık değişimi ihmal edilecek boyutlarda değişiklik gösterir. Şekil 6.11’ da 0.9 mm kalınlığındaki sac malzemenin matris açılı hidromekanik derin çekme işleminden sonra elde edilen deney numunesi için matris açısının kap et kalınlığına etkisi görülmektedir.

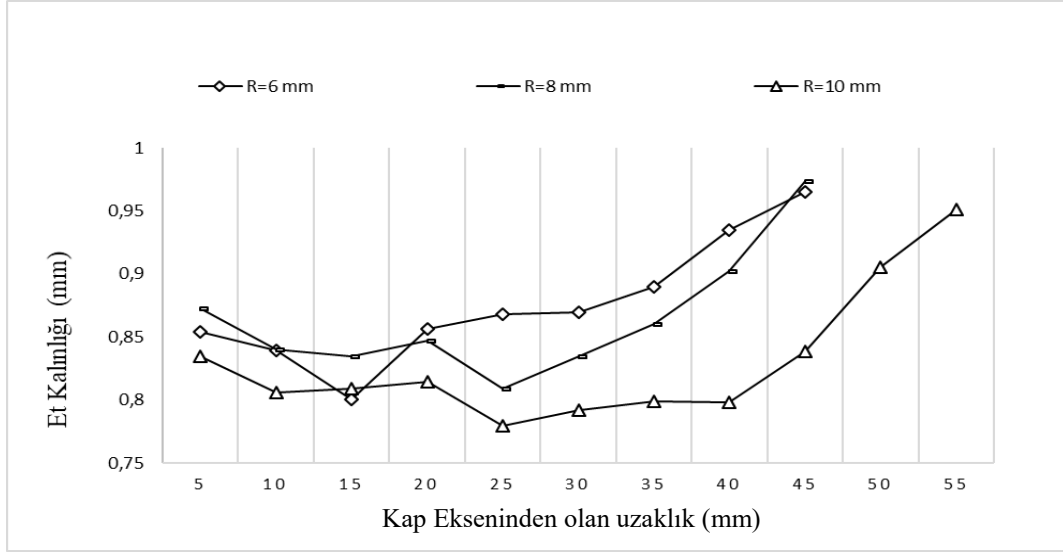


Şekil 6.11. Matris açısının kap et kalınlığına etkisi

Matris açısı α arttıkça malzemede incelmeye artmıştır. İlkel parça çapı, baskı plaka kuvveti ve temas alanında artıştan dolayı çekme esnasında meydana gelen radyal kuvvetleri de beraberinde artırmıştır. Radyal kuvvetlerin artmasından dolayı kap et kalınlığındaki değişim ise α 'nın artması ile incelmeler meydana gelmiştir. Şekil 6.39 incelendiğinde matris açısı $\alpha=12,5^\circ$ elde edilen en büyük limit çekme oranına sahip deneyde bu durum görülmektedir.

6.2.2. Zımba Radyüsünün Kap Et Kalınlığına Etkisi

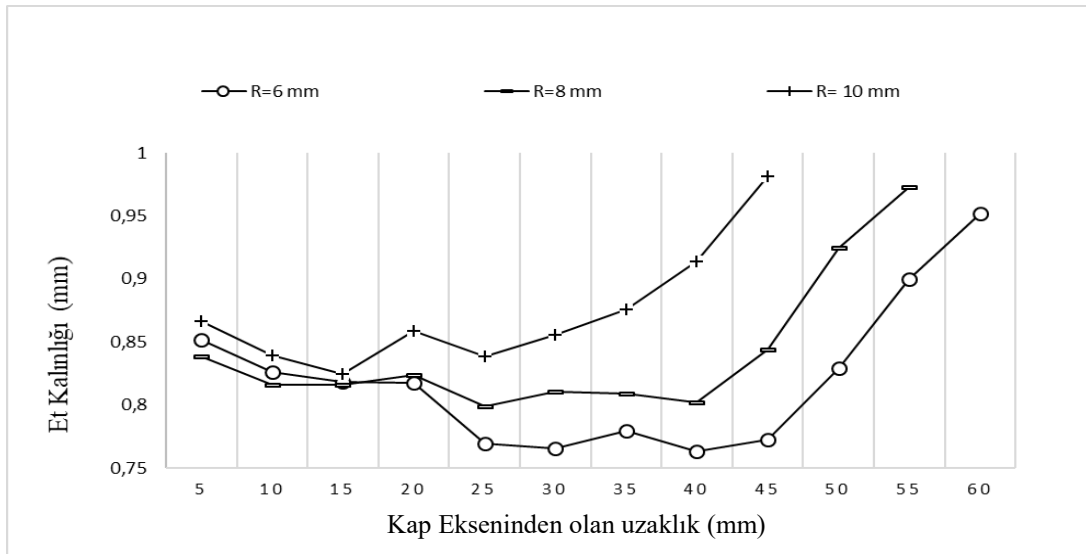
Zımba radyüsünün kap et kalınlığına etkisini incelemek için elde edilen deney numunelerinde ölçülen en ince noktalarında R=6 mm için 0,801 mm, R=8 mm için 0,809 ve R=10 mm için ise 0,780 mm olarak ölçülmüştür. Zımbanın radyüs değeri arttıkça kabın et kalınlığının azaldığı görülmektedir. Zımba radyüsüne bağlı olarak limit çekme oranlarının değiştiği, radyal ve eksenel kuvvetlerin artmasından dolayı R değerindeki artış beraberinde sacın et kalınlığındaki incelmeleri meydana getirmiştir. Zımba radyüsünün kabın et kalınlığına etkisi Şekil 6.12' de gösterilmiştir.



Şekil 6.12. Zimba radyüsünün kap et kalınlığına etkisi

6.2.3. Matris Radyüsünün Kap Et Kalınlığına Etkisi

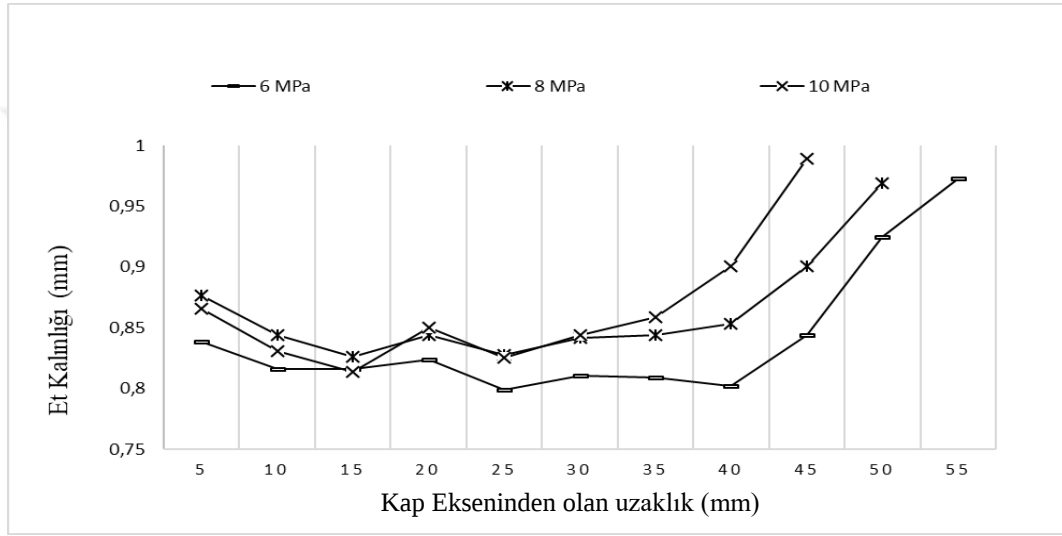
Şekil 6.13' de matris radyüsünün kap et kalınlığına etkisi görülmektedir. Deney numunesi üzerinde en büyük incelmanın olduğu bölgede et kalınlığı R=6 mm de 0,764 mm, R=8 mm de 0,8 mm ve R=10 mm de ise 0,825 mm olarak ölçülmüştür. Matris radyüs değerinin artması ile birlikte kap et kalınlığı da artmaktadır. Artan R değerine bağlı olarak derin çekme esnasında malzemenin kalıp içerisine akması daha kolay olmaktadır. İşlem esnasında matris radyüs bölgesinde meydana gelen basma ve çekme gerilmelerinin azalmasından kaynaklanmaktadır. Matris radyüsünün kap et kalınlığına oranı Şekil 6.13' de gösterilmiştir.



Şekil 6.13. Matris radyüsünün kap et kalınlığına etkisi

6.2.4. Hazne Basıncının Kap Et Kalınlığına Etkisi

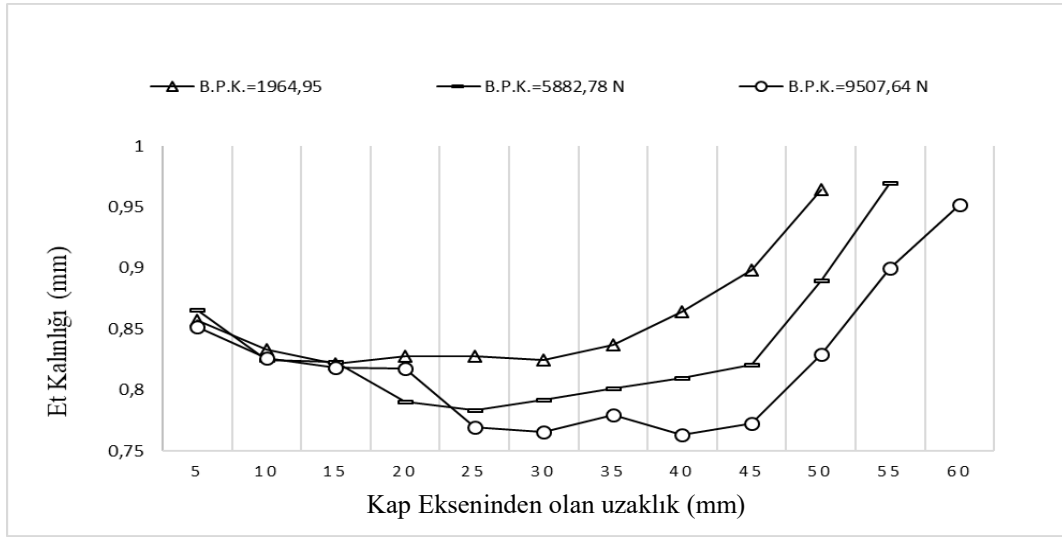
Şekil 6.14’ de hazne basıncının kap et kalınlığına etkisi görülmektedir. Deneysel çalışmalar sonunda elde edilen sonuçlara göre incelmenin en büyük değerlerinin 6 MPa da 0,8 mm; 8 MPa da 0,814 mm ve 10 MPa da ise 0,827 mm olarak ölçülmüştür. Hazne basınç değerindeki artış matris radyüs bölgelerindeki sürtünme kuvvetini azaltarak radyal kuvvetlerin azalmasına sebep olmuştur. Bu nedenle artan hazne basıncı değerlerine göre kap et kalınlığında kalınlaşmalar meydana gelmiştir. Hazne basıncının kap et kalınlığına etkisi Şekil 6.14’ de gösterilmiştir.



Şekil 6.14. Hazne basıncının kap et kalınlığına etkisi

6.2.5. Baskı Plaka Kuvvetinin Kap Et Kalınlığına Etkisi

Şekil 6.15’ de baskı plaka kuvvetinin kap et kalınlığına etkisi görülmektedir. Deneysel çalışmalarda incelmenin en büyük olduğu değerde B.P.K.=1964,95 N için 0,822 mm; 5882,78 N için 0,801 mm ve 9507,64 N da ise 0,764 mm olarak ölçülmüştür. Baskı plakasının artışına bağlı olarak kalıp ile sac malzeme arasındaki sürtünme kuvveti de artmaktadır. Artan sürtünme kuvveti nedeni ile derin çekme esnasında oluşan radyal kuvvetlerin artmasına sebep olmuştur. Bu nedenle artan B.P.K. değerlerine göre kap et kalınlığında incelmeler meydana gelmektedir. Baskı plaka kuvvetinin kap et kalınlığına etkisi Şekil 6.15’ de gösterilmiştir.



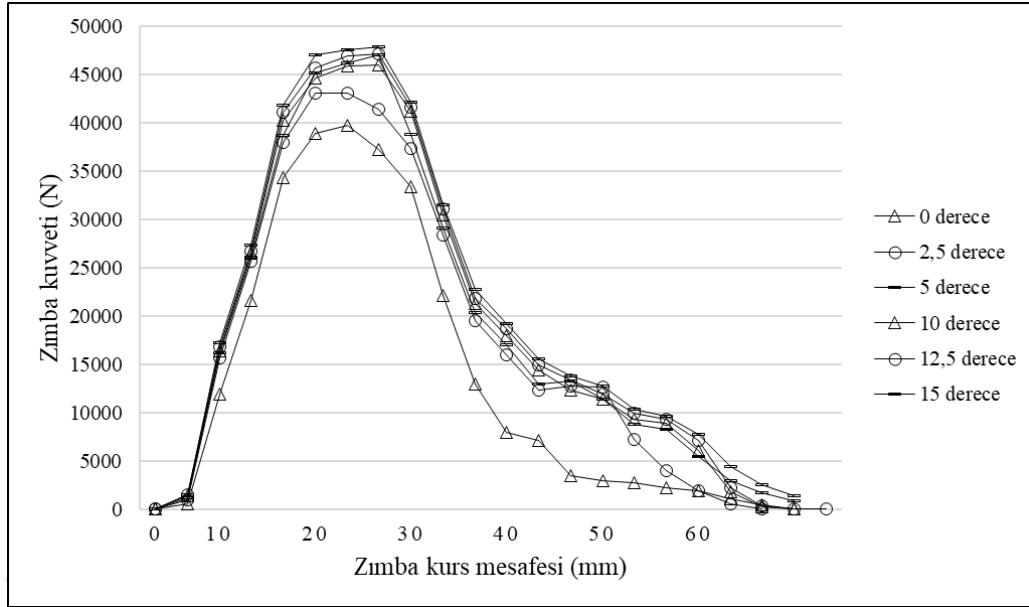
Şekil 6.15. Baskı plaka kuvvetinin kap et kalınlığına etkisi

6.3. Matris Açılı Hidromekanik Derin Çekme Parametrelerinin Zımba Kuvveti Üzerine Etkisi

Yapılan deneysel çalışmaların gerçekleşmesi için sac malzemeyi plastik deformasyon ile şekil değiştirmesini sağlayan zımba için gereken bir kuvvet vardır. Bu kuvvet pres tezgahından elde edilmektedir. Sac malzemelerin şekillendirilmesi için ne kadarlık pres gücüne ihtiyacın olduğunu belirlemek için gereken zımba kuvvetlerinin bilinmesi gerekir. Bu başlık altında deney parametrelerinin zımba kuvvetine etkisi incelenmiştir.

6.3.1. Matris Açısının Zımba Kuvveti Üzerine Etkisi

Yapılan matris açılı hidromekanik derin çekme yöntemindeki deneysel çalışmalarda zımba kuvveti ölçümleri yapılmıştır. Elde edilen verilere göre artan matris açısı değerlerine göre ölçülen zımba kuvvetlerinde de bir artış söz konusu olmuştur. Matris açısının zımba kuvvetlerine etkisi Şekil 6.16' de verilmiştir.

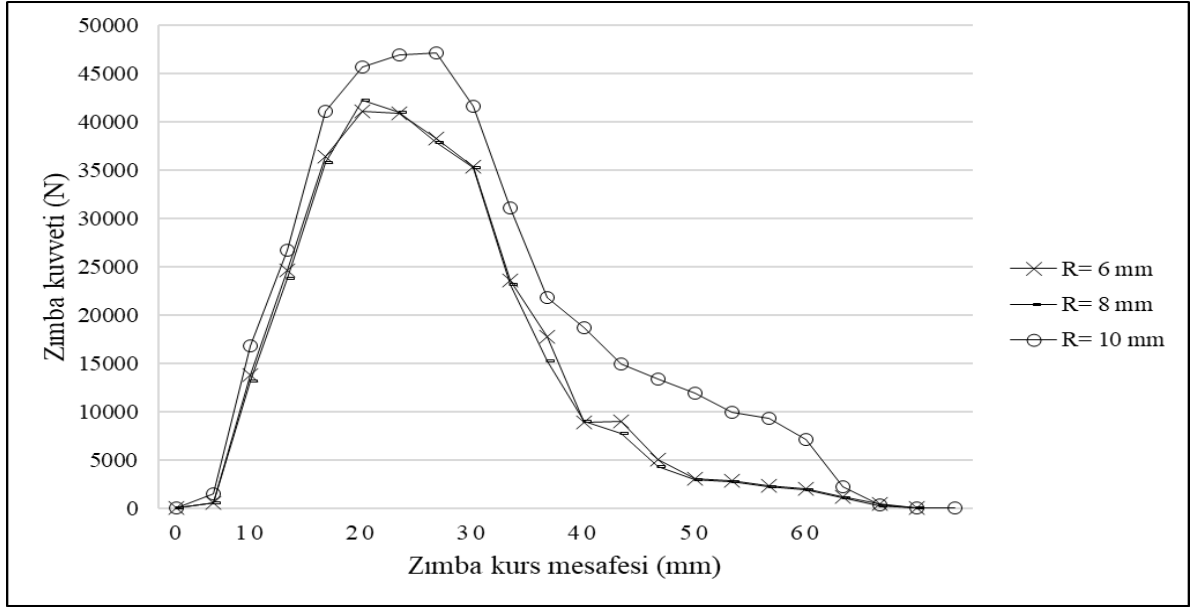


Şekil 6.16. Matris açısının zımba kuvvetlerine etkisi

Matris açısı 0^0 için elde edilen en büyük zımba kuvveti 39730,5 N; $2,5^0$ için elde edilen en büyük zımba kuvveti 43056,09 N; 5^0 için elde edilen en büyük zımba kuvveti 46980,09 N; 10^0 için elde edilen en büyük zımba kuvveti 45959,85 N; $12,5^0$ için elde edilen en büyük zımba kuvveti 47097,81 N ve 15^0 için ise elde edilen en büyük zımba kuvveti 47823,75 N'dir. Matris açısına bağlı olarak artan limit çekme oranına göre sac malzemeyi plastik deformasyona uğratmak için gerekli zımba kuvveti de beraberinde artış göstermektedir. Ayrıca artan baskı plaka alanına bağlı olarak temas alanının artması ve sürtünme kuvvetlerindeki artışta şekillendirme için gereken zımba kuvvetini artırmıştır.

6.3.2. Zımba Radyüsünün Zımba Kuvveti Üzerindeki Etkisi

Deneysel çalışma sonucunda elde edilen zımba radyüsünün zımba kuvvetine etkisi Şekil 6.17 'de gösterilmiştir.

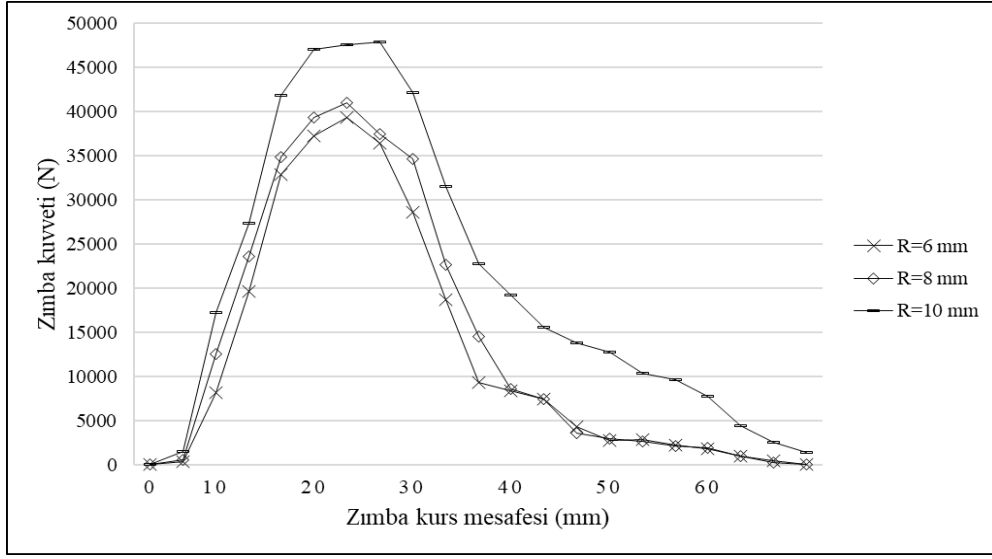


Şekil 6.17. Zımba radyüsünün zımba kuvvetlerine etkisi

Zımba radyüs değeri $R=6$ mm için elde edilen en büyük zımba kuvveti 41035,23 N; $R=8$ mm için elde edilen en büyük zımba kuvveti 42212,43 N ve $R=10$ mm için ise elde edilen en büyük zımba kuvveti 47097,81 N dur. Zımba radyüs değeri için elde edilen zımba kuvvetleri Şekil 6.17’ de gösterilmiştir. Artan zımba radyüs değerine bağlı olarak zımba kuvvetinde artmıştır. Zımba radyüs değeri arttıkça zımba radyüs alanı da büyümektedir. Malzemeye uygulanan zımba kuvveti daha büyük bir alana uygulandığından malzemeye şekil değiştirmesi için gereken zımba kuvveti daha geniş bir alana etki etmiştir. Buna bağlı olarak limit çekme oranı artmış ve şekillendirme için gereken zımba kuvvetini de beraberinde artırmıştır.

6.3.3. Matris Radyüsünün Zımba Kuvvetine etkisi

Matris açılı hidromekanik derin çekme yönteminde elde edilen sonuçlara göre matris radyüsünün zımba kuvvetine etkisi Şekil 6.18’ de gösterilmektedir.

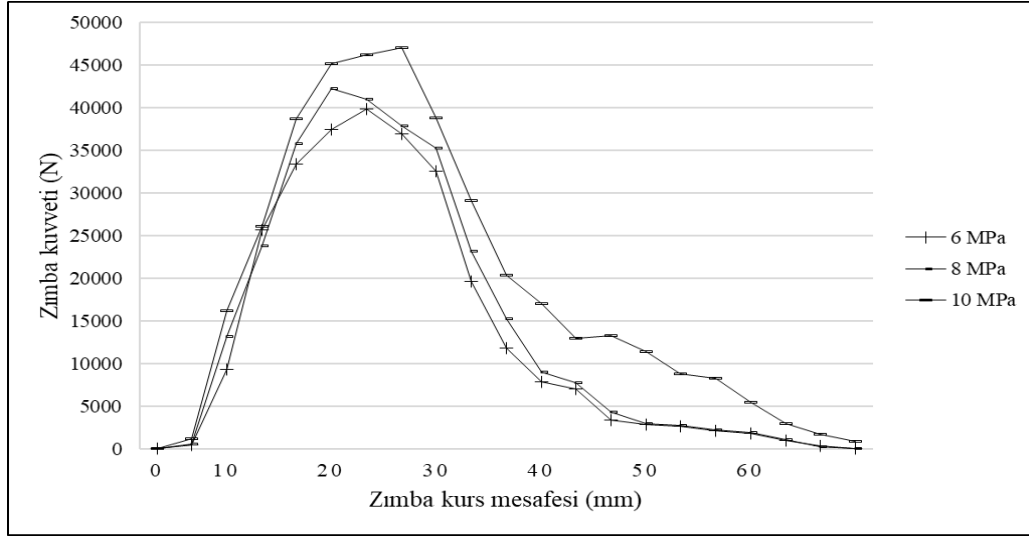


Şekil 6.18. Matris radyüsünün zımba kuvvetlerine etkisi

Matris radyüs değeri $R=6$ mm için elde edilen en büyük zımba kuvveti 39308,67 N; $R=8$ mm için elde edilen en büyük zımba kuvveti 40976,37 N ve $R=10$ mm için ise elde edilen en büyük zımba kuvveti 47823,75 N dur. Matris radyüs değeri için elde edilen zımba kuvvetleri Şekil 6.18’ de gösterilmiştir. Kalıp radyüsünün artışına bağlı olarak sac malzemenin matris içine akması daha kolay olmaktadır. Ancak en büyük radyüs değerinde baskı plaka alanının azalmasından dolayı kabın üst kısımlarında ondülasyonlar meydana gelerek sac malzeme zımba ile matris arasına sıkışmaktadır. Bu da elde edilen zımba kuvvetinin artmasına sebep olmaktadır.

6.3.4. Hazne Basıncının Zımba Kuvvetine Etkisi

Şekil 6.19’ da verilen grafikte hazne basıncının zımba kuvvetine etkisi görülmektedir.

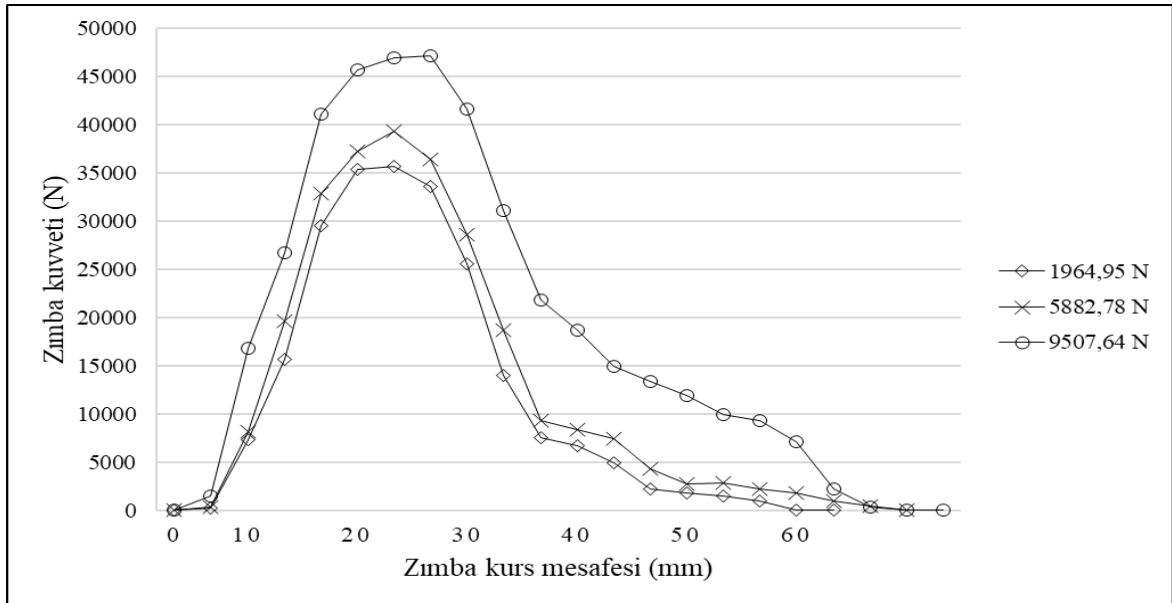


Şekil 6.19. Hazne basıncının zımba kuvvetine etkisi

Hazne basıncı değeri 6 MPa için elde edilen en büyük zımba kuvveti 39848,22 N; 8 MPa için elde edilen en büyük zımba kuvveti 42212,43 ve 10 MPa için ise elde edilen en büyük zımba kuvveti 46989,09 N dur. Hazne basıncı zımba hareketine göre ters kuvvet uygulamaktadır. Bu nedenle hazne basıncının artması ile elde edilen zımba kuvvetleri de artış göstermektedir.

6.3.5. Baskı Plaka Kuvvetinin Zımba Kuvvetine Etkisi

Şekil 6.20' de verilen grafikte baskı plaka kuvvetinin zımba kuvvetine etkisi gösterilmektedir.



Şekil 6.20. Baskı plaka kuvvetinin zımba kuvvetine etkisi

Baskı plaka kuvveti 1964,95 N için elde edilen en büyük zımba kuvveti 35708,4 N; 5882,78 N için elde edilen en büyük zımba kuvveti 39308,67 ve 9507,64 N için ise elde edilen en büyük zımba kuvveti 47097,81 N dur. Baskı plaka kuvveti sac malzemenin kontrollü bir şekilde matris içine akışını sağlaması için gerekli bir parametredir. Baskı plakasının artması ile sac malzeme matris ve baskı plaka yüzeyleri arasındaki sürtünme kuvvetleri de artmaktadır. Artan sürtünme kuvvetlerine bağlı olarak malzemede deformasyon esnasında meydana gelen radyal ve eksenel kuvvetlerde artış göstermektedir. Artan gerilme kuvvetlerine bağlı olarak zımba kuvvetlerinde de artış meydana gelmektedir.

6.4. İlkel Pul Çapının Kap Hasarı Üzerine Etkisi

Matris açılı hidromekanik derin çekme yönteminde hatasız bir ürün elde etmek için uygun pul çapının doğru seçilmesi gerekmektedir. Doğru pul seçimi yapmadan çekilen deney numunelerinde yırtılmalar, çatlaklar, buruşmalar hatalar tespit edilmiştir. Bilindiği gibi ilkel pul çapının artışı beraberinde zımba kuvveti de artırmaktadır. Bu nedenle deneyler esnasında büyük zımba kuvvetlerine dayanamayan iş parçalarında yırtılmalar meydana gelmektedir. Çeşitli yırtılma şekilleri Şekil 6.21’ de gösterilmiştir.



Şekil 6.21. Deneysel çalışmada elde edilen iş parçası hasarları

6.5. Deneysel Çalışmaların İstatistiksel Analizi

Deneysel çalışmaların sonunda performansı etkileyen parametreleri doğru bir şekilde seçilmelidir. Kalite ile ilgili tartışmaların büyük bir bölümü varyans ile ilgili olduğundan dolayı, deneysel verilerin yorumlanmasında ve gerekli kararların verilmesinde de varyans analizi (ANOVA) istatistiksel metotları kullanılmaktadır.

Tablo 6.2’de S/N oranlarının belirlenmesinde kullanılan deney parametreleri ve bu parametrelere ait seviyeler verilmiştir.

Tablo 6.2. Deney seviyeleri ve parametreler

Deney Seviyeleri	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3	Seviye 4	Seviye 5	Seviye 6
Matris Açısı ($^{\circ}$)	0°	$2,5^{\circ}$	5°	10°	$12,5^{\circ}$	15°
Zimba Radyüsü (mm)	6	8	10	-	-	-
Kalıp Radyüsü (mm)	6	8	10	-	-	-
Kalıp Hazne Basıncı (Mpa)	6	8	10	-	-	-
Baskı Plaka Kuvveti (N)	1964,95	5882,78	9507,64	-	-	-

Tablo 6.2’ de verilen matris açısının 6 farklı seviyesi, zimba radyüsü, kalıp radyüsü, hazne basıncı ve baskı plaka kuvvetinin ise 3 farklı seviyesi mevcuttur.

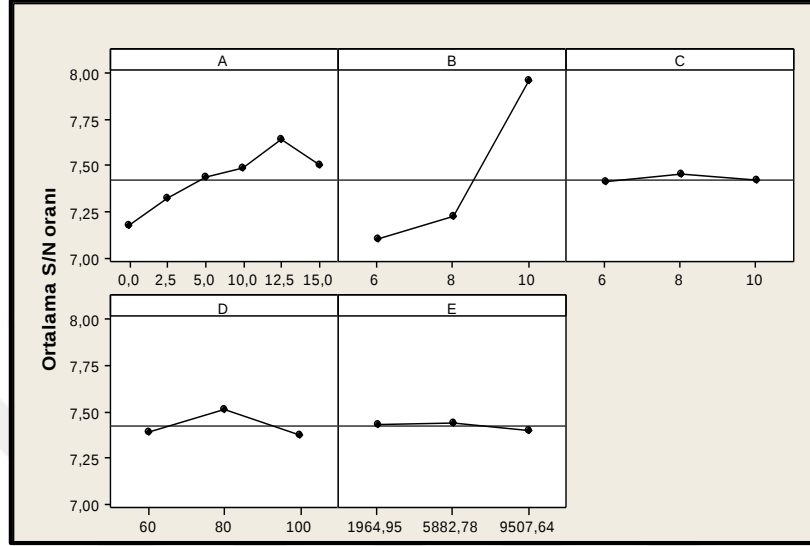
Tablo 6.3’ de verilen ortalama S/N değerleri için matris açısının beşinci, zimba radyüsünün üçüncü, kalıp radyüsünün, hazne basıncının ve baskı plaka kuvvetinin ise ikinci seviyeleri en yüksek değerlere sahip olduğu görülmektedir.

Tablo 6.3. Limit çekme oranına göre ortalama S/N oranları

Sembol	Çekme Parametreleri	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3	Seviye 4	Seviye 5	Seviye 6
A	Matris Açısı	7,833	7,980	8,097	8,141	8,303 ^a	8,165
B	Zimba Radyüsü	7,444	7,564	8,303 ^a	-	-	-
C	Kalıp Radyüsü	8,259	8,303 ^a	8,269	-	-	-
D	Kalıp Hazne Basıncı	8,178	8,303 ^a	8,165	-	-	-
E	Baskı Plaka Kuvveti	8,30	8,30 ^a	8,27	-	-	-

Deney parametrelerinin en iyi seviyeleri “^a” indisi olarak belirtilmiştir. Tablo 6.3’ deki verilere bağlı olarak oluşturulan Şekil 6.22’ deki grafikler incelendiğinde bu durum daha net bir şekilde görülmektedir. Matris açısı grafiği dikkate alındığında artan aç değeriye bağlı olarak $12,5^{\circ}$ ’ ye kadar artış gösterdiği ve 15° de tekrar azaldığı görülmüştür. Zimba radyüsü grafiğinde, ilk iki değ için ortalama çizgisi altında kalırken üçüncü seviye değeri için olumlu yönde artış göstererek en iyi seviye olduğu görülmektedir. Kalıp radyüsü grafiğinde, birinci seviye değeri için ortalama çizgisi altında kalırken ikinci seviye değeri en iyi değeri olarak ortalama çizgisi üzerindedir. Üçüncü seviye değeri ise ortalama çizgisine eşit bir değeri göstermektedir. Kalıp hazne basıncı grafiğinde, birinci ve üçüncü seviye değeri ortalama çizgisi altında kalmıştır. Bu parametrenin en uygun seviye değeri

ortalama çizgisi üzerinde olan ikinci seviyedir. Baskı plaka kuvveti grafiğinde ise, birinci seviye değeri ortalama çizgisine eşit, üçüncü seviye değeri ise ortalama çizgisinin altında kalmaktadır. Bu parametrenin en iyi seviye değeri ortalama çizgisi üzerinde kalan ikinci seviye olmuştur.



Şekil 6.22. Limit çekme oranı için S/N grafikleri

Varyans analizinin (ANOVA) amacı matris açılı hidromekanik derin çekme parametrelerinin limit çekme oranı üzerindeki etkinlik derecelerini belirlemektir. Deney parametrelerinin etkisi ANOVA'ya dayanarak istatistiksel olarak elde edilmiştir.

Yapılan ANOVA analizleri % 95 güvenilirlik aralığında gerçekleştirilmiştir. Tablo 6.4' te deney parametrelerine ait ANOVA tablosu sonuçları gösterilmektedir. Ayrıca tablo 6.4' te gösterilen son sütun parametrenin limit çekme oranına % olarak etkisini göstermektedir. Bu sütun incelenerek hangi parametrenin ne derece etkili olduğu söylenebilir.

Tablo 6.4. Limit çekme oranı için ANOVA sonuçları

	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Varyans	F Değeri	% Dağılımı
Matris açısı	5	0,3945	0,0789	437,664	12,761
Zimba radyüsü	2	2,6070	1,3035	7230,476	84,512
Kalıp radyüsü	2	0,0065	0,0033	18,102	0,200
Hazne basıncı	2	0,0706	0,0353	195,715	2,276
Baskı plaka kuvveti	2	0,0050	0,0025	13,882	0,151
Hata	4	0,0007	0,0002	-	0,0993
TOPLAM	-	3,0843	-	-	100

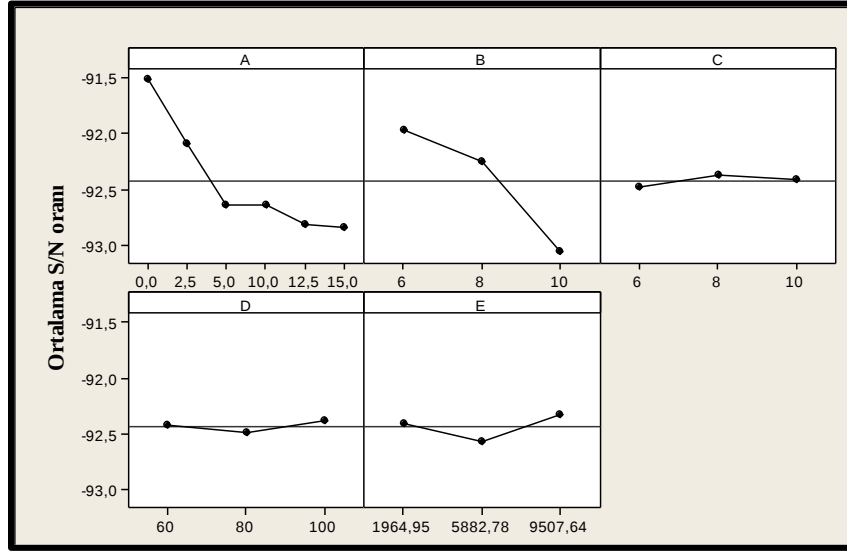
Tablo 6.2’ de verilen deney parametrelerine göre elde edilen en büyük zımba kuvvetlerinin S/N oranları Tablo 6.4’ te verilmiştir.

Tablo 6.5’ de verilen ortalama S/N değerleri için matris açısının altıncı, zımba radyüsünün üçüncü, kalıp radyüsünün, hazne basıncının ve baskı plaka kuvvetinin ise ikinci seviyeleri optimum değerlere sahip olduğu görülmektedir.

Tablo 6.5. Zımba kuvvetine göre ortalama S/N oranları

Sembol	Çekme Parametreleri	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3	Seviye 4	Seviye 5	Seviye 6
A	Matris Açısı	-91,510	-92,090	-92,652	-92,652	-92,824	-92,853 ^a
B	Zımba Radyüsü	-91,967	-92,257	-93,067 ^a	-	-	-
C	Kalıp Radyüsü	-92,489	-92,384 ^a	-92,417	-	-	-
D	Kalıp Hazne Basıncı	-92,424	-92,489 ^a	-92,378	-	-	-
E	Baskı Plaka Kuvveti	-92,40	-92,57 ^a	-92,32	-	-	-

Deney parametrelerinin en iyi seviyeleri “a” indisi olarak belirtilmiştir. Şekil 6.23’ deki grafikler incelendiğinde bu durum daha net bir şekilde görülmektedir. Matris açısı grafiği dikkate alındığında artan açı değerine bağlı olarak zımba kuvvetinin arttığı görülmüştür. Zımba radyüsü grafiğinde, ilk iki değer için ortama çizgisi üzerinde kalırken üçüncü seviye değeri için olumlu yönde artış göstererek en iyi seviye olduğu görülmektedir. Kalıp radyüsü grafiğinde, birinci seviye değeri için ortalama çizgisi üzerinde kalırken ikinci seviye değeri en iyi değer olarak ortalama çizgisi altındadır. Üçüncü seviye değeri ise ortalama çizgisine yakın bir değer göstermektedir. Kalıp hazne basıncı grafiğinde, birinci ve üçüncü seviye değerleri ortalama çizgisi üzerinde kalmıştır. Bu parametrenin en uygun seviye değeri ortalama çizgisi altında olan ikinci seviyedir. Baskı plaka kuvveti grafiğinde ise, birinci seviye değeri ortalama çizgisine yakın, üçüncü seviye değeri ise ortalama çizgisinin üzerinde kalmaktadır. Bu parametrenin en iyi seviye değeri ortalama çizgisi altında kalan ikinci seviye olmuştur.



Şekil 6.23. Zımba kuvveti için S/N grafikleri

Yapılan ANOVA analizleri % 95 güvenilirlik aralığında gerçekleştirilmiştir. Tablo 6.6' te deney parametrelerine ait ANOVA tablosu sonuçları gösterilmektedir. Ayrıca Tablo 6.6' te gösterilen son sütun parametrenin zımba kuvvetine % olarak etkisini göstermektedir. Bu sütun incelenerek hangi parametrenin ne derece etkili olduğu söylenebilir.

Tablo 6.6. Zımba Kuvveti için ANOVA sonuçları

	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Varyans	F Değeri	% Dağılımı
Matris açısı	5	4,1825	0,8365	619,3127	49,9988
Zımba radyüsü	2	3,9023	1,9511	1444,5793	46,6931
Kalıp radyüsü	2	0,0346	0,0173	12,8320	0,38271
Hazne basıncı	2	0,0372	0,0186	13,8020	0,41408
Baskı plaka kuvveti	2	0,1894	0,0947	70,1376	2,23628
Hata	4	0,0054	0,0013	-	0,27493
TOPLAM	-	8,3516	-	-	100

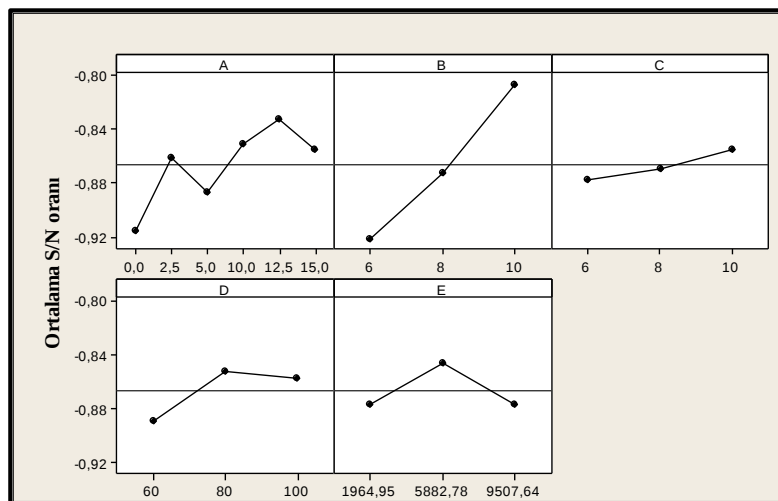
Tablo 6.2' de verilen deney parametrelerine göre elde edilen et kalınlığı için optimum S/N oranları Tablo 6.7' te verilmiştir.

Tablo 6.7' de verilen ortalama S/N değerleri için matris açısının beşinci, zımba ve matris radyüsünün üçüncü, hazne basıncının ve baskı plaka kuvvetinin ise ikinci seviyeleri optimum değerlere sahip olduğu görülmektedir.

Tablo 6.7. Kap et kalınlığına göre ortalama S/N sonuçları

Sembol	Çekme Parametreleri	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3	Seviye 4	Seviye 5	Seviye 6
A	Matris Açısı	-0,915	-0,861	-0,887	-0,851	-0,832 ^a	-0,854
B	Zimba Radyüsü	-0,922	-0,872	-0,806 ^a	-	-	-
C	Matris Radyüsü	-0,877	-0,869	-0,854 ^a	-	-	-
D	Kalıp Hazne Basıncı	-0,890	-0,853 ^a	-0,857	-	-	-
E	Baskı Plaka Kuvveti	-0,88	-0,85 ^a	-0,88	-	-	-

Deney parametrelerinin en iyi seviyeleri “a” indisi olarak belirtilmiştir. Şekil 6.24’ de verilen grafikte Matris açısı grafiği dikkate alındığında artan aç değeriyle kap et arttığı görülmüştür. Zimba radyüsü grafiğinde, ilk iki değeri için ortalama çizgisi altında kalırken üçüncü seviye değeri için olumlu yönde artış göstererek en iyi seviye olduğu görülmektedir. Kalıp radyüsü grafiğinde, birinci ve ikinci seviye değeri için ortalama çizgisi altında kalırken üçüncü seviye değeri en iyi değeri olarak ortalama çizgisi üzerindedir. Kalıp hazne basıncı grafiğinde, ikinci ve üçüncü seviye değerleri ortalama çizgisi üzerinde kalmıştır. Bu parametrenin en uygun seviye değeri en yüksek S/N oranına sahip ikinci seviyedir. Baskı plaka kuvveti grafiğinde ise, birinci seviye değeri ve üçüncü seviye değeri ortalama çizgisinin altında kalmaktadır. Bu parametrenin en iyi seviye değeri ortalama çizgisi üzerinde kalan ikinci seviye olmuştur.

**Şekil 6.24.** Kap et kalınlığı için S/N grafikleri

Yapılan ANOVA analizleri % 90 güvenilirlik aralığında gerçekleştirilmiştir. Tablo 6.7’ da deney parametrelerine ait ANOVA tablosu sonuçları gösterilmektedir. Ayrıca Tablo

6.7' te gösterilen son sütun parametrenin kap et kalınlığına % olarak etkisini göstermektedir. Bu sütun incelenerek hangi parametrenin ne derece etkili olduğu söylenebilir.

Tablo 6.8. Kap et kalınlığı için ANOVA sonuçları

	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Varyans	F Değeri	% Dağılımı
Matris açısı	5	0,0132	0,0026	16,6864	19,34
Zımba radyüsü	2	0,0401	0,0200	126,7185	62,02
Kalıp radyüsü	2	0,0015	0,0007	5,0129	1,97
Hazne basıncı	2	0,0048	0,0024	15,4438	7,12
Baskı plaka kuvveti	2	0,0037	0,0018	11,7859	5,32
Hata	4	0,0006	0,0001	-	4,19
TOPLAM	-	0,0641	-	-	100

Tez çalışması için bu hesapların tamamı Minitap R14 paket programında hesaplanmıştır.

6.6. Sonlu Elemanlar Metodu İle Sayısal Analiz Deneyleri

Bu bölümde sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak matris açılı hidromekanik derin çekme deneylerinin sayısal analizi yapılmıştır. Sonlu elemanlar metodu birçok mühendislik alanı için karşılaşılan problemlerin çözümü için kullanılan bir yöntemdir. Yöntemde elde edilen veriler gerçeğe çok yakındır.

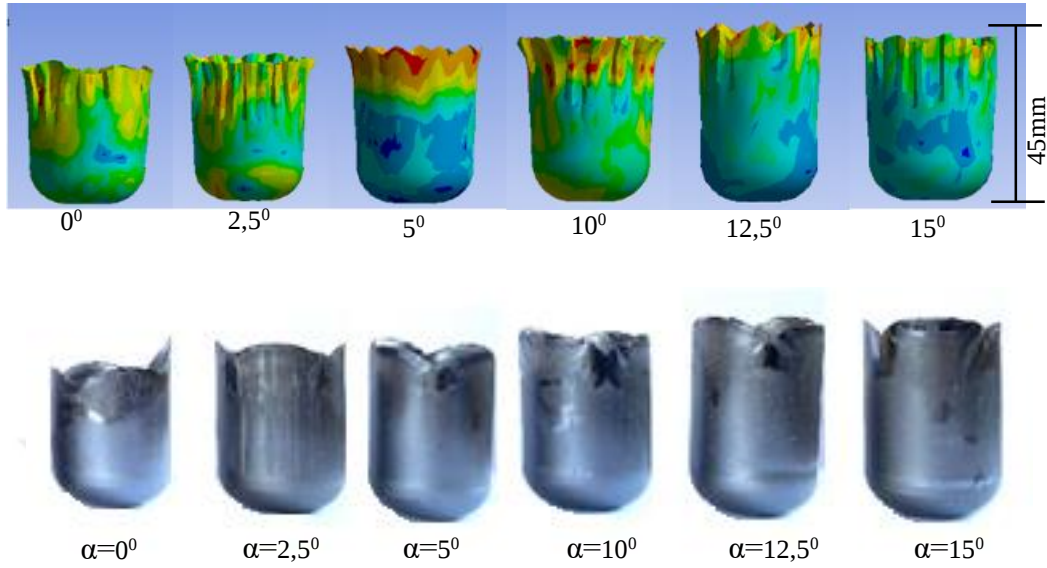
Deneyisel çalışma için kullanılan kalıbın bütün geometrik özellikleri ve kuvvet yüklemeleri dikkate alınarak çözüm gerçekleştirilmiştir.

6.6.1. Deney parametrelerinin sayısal analizi

Yapılan deneySEL çalışmaların sayısal analizi matris açısının farklı değerleri (0^0 ; $2,5^0$; 5^0 ; 10^0 ; $12,5^0$ ve 15^0) için limit çekme oranları (β) analiz edilmiştir.

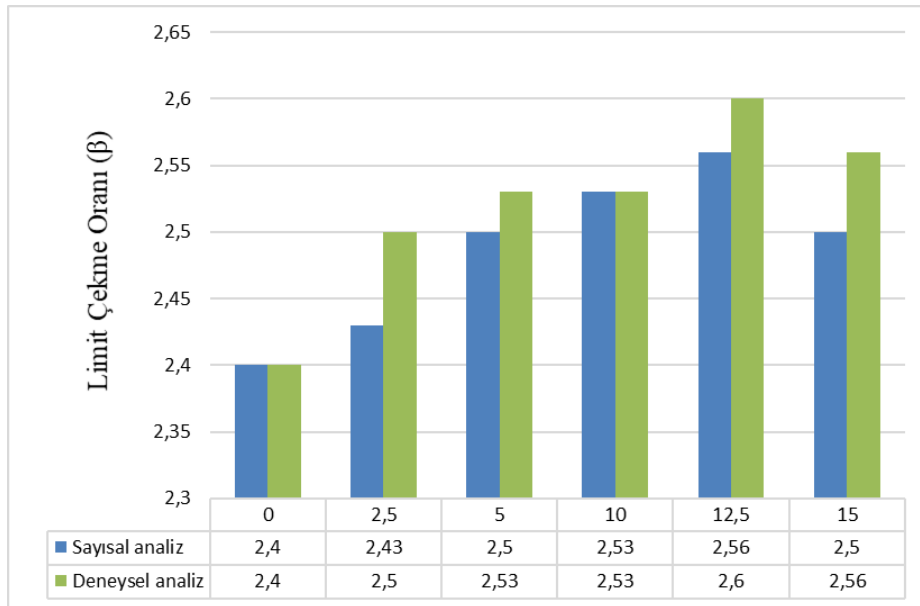
Limit çekme oranının (β) maksimum olduğu zımba radyüsü $R=10$ mm ve matris açısı $\alpha=0^0$ için limit çekme oranı $\beta=2,4$ ve en büyük zımba kuvveti 32284 N; $\alpha=2,5^0$ için limit çekme oranı $\beta=2,43$ ve en büyük zımba kuvveti 40356 N; $\alpha=5^0$ için limit çekme oranı $\beta=2,5$ ve en büyük zımba kuvveti 48472 N; $\alpha=10^0$ için limit çekme oranı $\beta=2,53$ ve en büyük zımba kuvveti 53247 N; $\alpha=12,5^0$ için limit çekme oranı $\beta=2,56$ ve en büyük zımba kuvveti 61318 N; $\alpha=15^0$ için limit çekme oranı $\beta=2,5$ ve en büyük zımba kuvveti 68605 N

olarak elde edilmiştir. Şekil 6.25’ de zımba radyüsü R=10 mm için α ’nın değişimine bağlı olarak elde edilen analiz sonuçları verilmiştir.

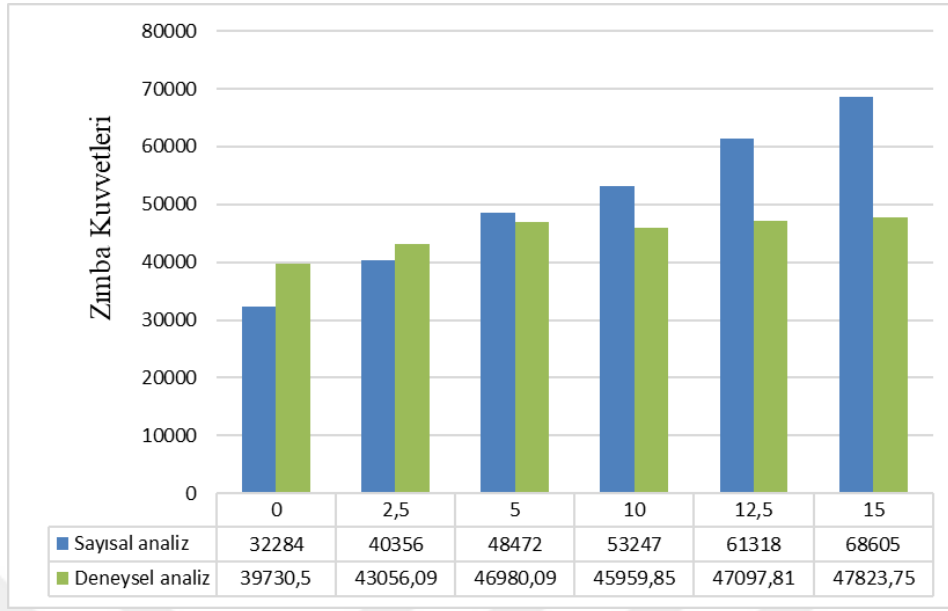


Şekil 6.25. Matris açısının limit çekme oranına etkisi

Sonlu elemanlar metodu kullanılarak elde edilen sonuçlar ile deneysel çalışma sonuçları karşılaştırıldığında 0° ve $2,5^\circ$ ’de sadece eşit limit çekme oranı elde edilmiştir. Diğer açı değerlerinde ise gerçek değerlerden çok uzaklaşma olmamıştır. Sayısal ve deneysel sonuçların karşılaştırılması Şekil 6.26 da gösterilmektedir.

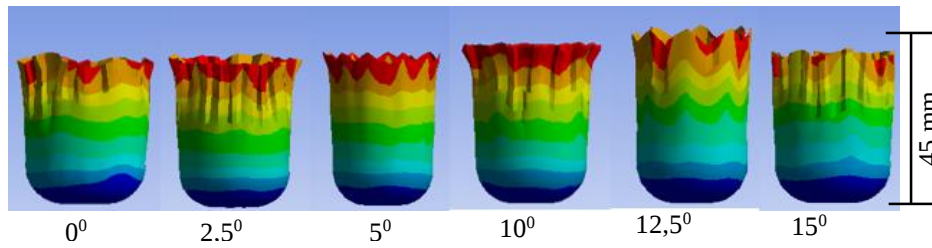


Şekil 6.26. Limit çekme oranı için sayısal analiz ile deneysel analiz sonuçlarının karşılaştırılması



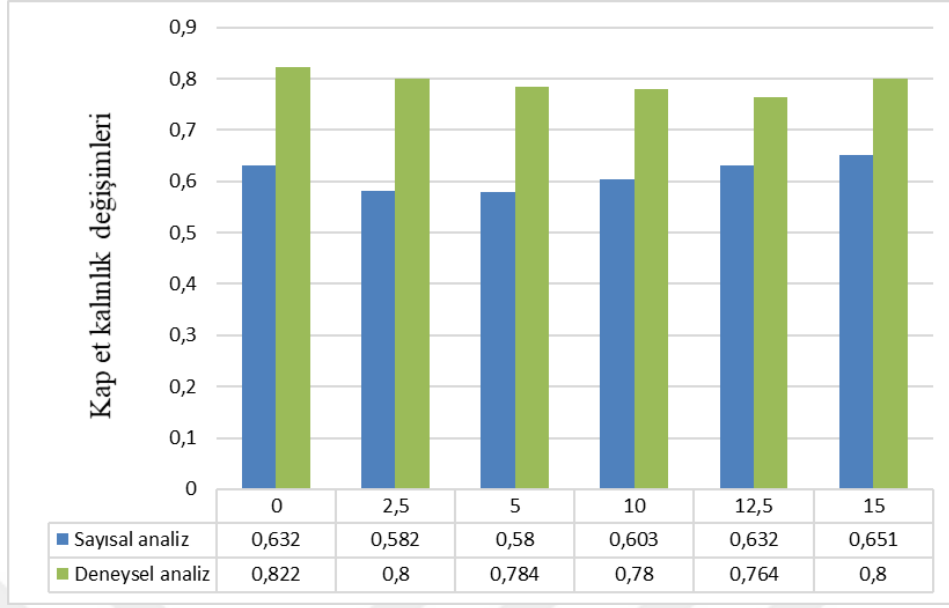
Şekil 6.27. Zımba kuvvetleri için sayısal analiz ile deneysel analiz sonuçlarının karşılaştırılması

Matris açısı $\alpha=0^\circ$ için limit çekme oranı $\beta= 2,4$ ve kritik bölgedeki et kalınlığı 0,632 mm; $\alpha=2,5^\circ$ için limit çekme oranı $\beta= 2,43$ ve kritik bölgedeki et kalınlığı 0,582 mm; $\alpha=5^\circ$ için limit çekme oranı $\beta= 2,5$ ve kritik bölgedeki et kalınlığı 0,580 mm; $\alpha=10^\circ$ için limit çekme oranı $\beta= 2,53$ ve kritik bölgedeki et kalınlığı 0,603 mm; $\alpha=12,5^\circ$ için limit çekme oranı $\beta= 2,56$ ve kritik bölgedeki et kalınlığı 0,632 mm; $\alpha=15^\circ$ için limit çekme oranı $\beta= 2,5$ ve kritik bölgedeki et kalınlığı 0,651 mm olarak elde edilmiştir. Şekil 6.28’ de zımba radyüsü $R=10$ mm için α' nın değişimine bağlı olarak elde edilen analiz sonuçları verilmiştir.



Şekil 6.28. Matris açısının kap et kalınlığına etkisi

Sonlu elamanlar metodu kullanılarak elde edilen sonuçlar ile deneysel çalışma sonuçları karşılaştırıldığında, deneysel analiz sonuçları sayısal analiz sonuçlarından çok daha iyi değerlerde kap et kalınlık değişimi oranını göstermektedir. Sayısal ve deneysel sonuçların karşılaştırılması Şekil 6.29’ de gösterilmektedir.



Şekil 6.29. Kap et kalınlığı değışimi için sayısal analiz ile deneysel analiz sonuçlarının karşılaştırılması

7. GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada matris açılı hidromekanik derin çekme kalıplama yöntemi ile sac malzemenin limit çekme ve sacın et kalınlığına etkisi olan deney parametreleri incelenmiştir. Çalışmalarda 0,9 mm kalınlığa sahip DIN EN 10130-1999 sac malzeme kullanılmıştır. Limit çekme oranı, sacın et kalınlığı ve zımba kuvvetine etki eden parametreler, matris açısı, matris/zımba radyüsü, hazne basıncı ve baskı plaka kuvvetidir. Bu parametrelerin farklı seviyeleri deneysel çalışmaya uygulanarak elde edilen en iyi numuneler için en uygun parametreler ve bu parametrelere ait seviyeleri belirlenmek amacı ile çalışmalar yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar, Minitab paket programı ile istatistiksel analiz edilerek, ANOVA varyans analizi ile yapılarak parametre etkinlikleri ve optimum seviyeleri belirlenmiştir. Ayrıca çalışmada sonlu elamanlar yöntemi ile bilgisayar ortamında ANSYS 15.0 paket programı kullanarak analiz yapılmıştır. Analiz sonuçları ile deneysel sonuçlar karşılaştırılmıştır.

7.1. Genel Sonuçlar

Matris açısı limit çekme oranını olumlu yönden etkilemektedir. Sac malzeme açılı derin çekme kalıp yöntemlerinde kalıp içerisine akması daha kolay olduğu için açının 0° 'den 12,5° 'ye kadar artması limit çekme oranını artırmıştır. 12,5° 'den daha büyük açılarda ise limit çekme oranı azalmıştır.

Hazne basıncı hidromekanik derin çekme işlemi için en önemli parametredir. Hazne basıncının yüksek değeri için ani kırılmalar ortaya çıkarken düşük basınç değerlerinde ise geleneksel derin çekme işlemine olan benzerliği artmıştır. Parametrenin en iyi seviyesi ikinci seviye olan 8 MPa seviyesi olmuştur.

Baskı plaka kuvveti optimum kuvvet değerinin altındaki seviyede baskı kuvveti yetersiz olduğu için yapılan hidromekanik derin çekme işlemini geleneksel derin çekme işlemine yakınsatmıştır. Yüksek baskı plaka değerinde ise sac malzemenin kalıp yüzeyi ve baskı plaka yüzeyinde oluşan yüksek sürtünme kuvvetlerine maruz kalmış ve malzemenin kopma sınırını aştığı için yapılan deneyler olumsuzluk göstermiştir. Bu parametre için en iyi seviye ikinci seviye (B.P.K=5882.78 N) olmuştur.

Deneysel çalışmalarda artan zımba radyüs değerlerine bağlı olarak limit çekme oranın arttığı gözlenmiştir. Düşük zımba radyüs değerlerinde çekilen kap erken kırılmıştır. En uygun parametre seviyesi ikinci seviye (R=8 mm) olarak elde edilmiştir.

Kalıp radyüsünün artması ile limit çekme oranı artmıştır. Ancak kalıp radyüsünün büyük değeri için baskı plaka alanının azaldığından dolayı çekilen sac malzemenin üst bölgelerinde kırışmalar meydana gelmiştir. Parametrenin en uygun seviyesi ($R=8$ mm) ikinci seviyedir.

Deneyisel çalışma için kullanılan bütün deney parametreleri ve bu parametrelere ait seviyeler sayısal analizde de kullanılmıştır. Çekme deneylerinde elde edilen veriler ile sayısal analizden elde edilen veriler karşılaştırıldığında limit çekme oranı, kap et kalınlığı ve zımba kuvveti sonuçlarında önemli bir farklılık olmadığı, sonuçların uyumlu olduğu tespit edilmiştir.

Sonuç olarak matris açısının ve hazne basıncının limit çekme oranı, kap et kalınlığı ve iş parçası yüzey kalitesi üzerindeki etkisi geleneksel derin çekme işlemlerine göre daha iyi sonuç vermiştir.

Kabın yan yüzeylerinde et kalınlığının daha homojen olduğu belirlenmiştir. Kabın üst kısımlarında kalınlaşma kritik bölgelerinde (zımba radyüsüne yakın bölgeler) ise incelmeler meydana gelmiştir. Ancak bu incelme değerleri ihmal edilebilecek boyuttadır. Yapılan deneyisel çalışmalarda et kalınlığının minimum olduğu değer 0,7635 mm ve maksimum sac et kalınlığı değeri ise 0,997 mm olarak ölçülmüştür. Sonuçta incelmenin yaklaşık olarak en fazla % 15 gibi bir oranda kalınlaşmanın ise %10 gibi bir oranda olduğu tespit edilmiştir.

Mevcut hidromekanik derin çekme çalışmalarında kullanılan çok yüksek alt hazne basınç değerinde elde edilen limit çekme oranı bu yöntem ile yaklaşık olarak hazne basıncının 10 kat daha az değerinde kullanılmasına rağmen daha yüksek limit çekme değeri elde edilmiştir.

7.2. Öneriler

Yapılan bu tez çalışmasının devamı olabilecek çalışmalar aşağıdaki gibi sıralanabilir.

- Şekillendirme faktörü olarak zımba hızının araştırması yapılabilir.
- Sac malzeme hadde yönünün etkisi araştırılabilir.
- Kalıp elamanları üzerindeki aşınmalar incelenebilir.
- Şekillendirilmesi zor olan (bakır, paslanmaz çelik, alüminyum v.s.) gibi malzemelerin matris açılı hidromekanik derin çekme yönteminde incelenebilir.

KAYNAKÇA

- Alpers, B., Bergmann, D., Galanulis, K., & Winter, D. (2000). *Advanced Deformation Measurement In Sheet Metal Forming*. Germany: Gesselschaft für Optisch Mebtechnik.
- Altan, T. (1998). *Metal Forming Handbook/Schuler*. Verlag Berlin Heidelberg: Springer.
- Anket, O. (2011). *DC04 Otomotiv Sacının Hidromekanik Yöntem İle Şekillendirilebilirliğinin Sonlu Elemanlar Yöntemi ve Deneyisel Olarak İncelenmesi*. Doktora Tezi: Balıksir Üniversitesi Fen Bilimleri Entitüsü.
- Assempour, A., & Taghipour, E. (2011). The Effect Of Normal Stress On Hydro-mechanical Deep Drawing Process. *International Journal of Mechanical Sciences*(53), 407–416.
- Bagherzadeh, S., Mirnia, M., & Dariani, B. M. (2015). Numerical And Experimental Investigations Of Hydro-mechanical Deep Drawing Process Of Laminated Aluminum Steel Sheets. *Journal of Manufacturing Processes*(18), 131–140.
- Bagherzadeh, S., Mollaei-Dariani, B., & Malekzadeh, K. (2012). Theoretical Study On Hydro-mechanical Deep Drawing Process Of Bimetallic Sheets And Experimental Observations. *Journal of Materials Processing Technology*(212), 1840– 1849.
- Birici, A. (1997). *Plastik Enjeksiyon Kalıplarının İncelenmesi*. İstanbul: İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Entitüsü Yüksek Lisans Tezi.
- Canıyılmaz, E. (2001). *Kalite Geliştirmede Taguchi Metodu ve Bir Örnek Uygulama*. Ankara: Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Entitüsü Yüksek Lisans Tezi.
- Choi, H., Koc, M., & Ni, J. (2007). A Study On The Analytical Modeling For warm Hydromechanical Deep Drawing Of Lightweight Materials. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*(47), 1752–1766.
- Colgan, M., & Monaghan, J. (2003). Deep Drawing Process: Analysis And Experiment. *Journal of Materials Processing Technology*(132), 35–41.
- Çapan, L. (2003). *Metallere Plastik Şekil Verme,*. İstanbul: Çağlayan Kitap Evi.
- Çimenoglu, H., & Kayalı, E. S. (1986). *Malzemelerin Yapısı ve Dinamik Davranışları*. İstanbul: İ.T.Ü. Kimya – Metalürji Fakültesi Ofset Atölyesi.
- Dachang, K., Yu, C., & Yongchao, X. (2005). Hydromechanical Deep Drawing Of Superalloy Cups. *Journal of Materials Processing Technology*(166), 243–246.
- Danckert, J., & Nielsen, K. (2000). Hydromechanical Deep Drawing With Uniform Pressure On The Flange. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*(49), 217-220.

- Demiray, K. (2006). *Al 1050 Malzemesinin Derin Çekme İşleminde Baskı Plakasının Etkisinin Teorik Ve DeneySEL Olarak İncelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi: Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Durmaz, S. (2008). *Taguchi Metodunun Kauçuğun Vulkanizasyonu Prosesine Uygulanması*. Sakarya: Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi.
- Erişkin, Y. (1986). Uygulamalı Sac Metal Kalıp Konstrüksiyonu,. *Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Yayınları*.
- Groche, P., Huber, R., Dorr, J., & Schmoedel, D. (2002). Hydromechanical Deep-Drawing of Aluminium-Alloys at Elevated Temperatures. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*(51), 215-218.
- Güneş, A. (2002). *Pres İşleri Tekniği Cilt 2*. Ankara: Makine Mühendisleri Odası.
- Hashemi, A., Gollo, M., & Seyedkashi, S. M. (2015). Process Window Diagram Of Conical Cups In Hydrodynamic Deep Drawing Assisted By Radial Pressure. *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*(25), 3064–3071.
- Hassan, M. A., Ahmed, K. I., & Takakura, N. (2012). A Developed Process For Deep Drawing Of Metal Foil Square Cups. *Journal of Materials Processing Technology*(212), 295– 307.
- Hicks, R. C. (1985). *Deney Düzenlemede İstatistiksel Yöntemler*. Ankara: Akademi Matbaası.
- Jalil, A., Hoseinpour, M., Sheikhi, M., & Seyedkashi, S. M. (2016). Hydrodynamic Deep Drawing Of Double Layered Conical Cups. *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*(26), 237–247.
- Karaağaç, İ., & Özdemir, A. (2011). Erdemir 6112 Sac Malzemenin Hidromekanik Derin Çekme Yöntemiyle Şekillendirilebilirliği. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*(26), 841-850.
- Karaağaç, İ., & Özdemir, A. (2013). Kare Geometrinin Hidromekanik Derin Çekme Yöntemi İle Şekillendirilebilirliğinin DeneySEL İncelenmesi. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*(28), 33-41.
- Karaağaç, İ., Gürün, H., & Özdemir, A. (2009). AISI 304 Paslanmaz Çelik Sac Malzemenin Klasik Olarak ve Sıvı Basıncıyla Derin Çekilebilirliklerinin Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Karşılaştırmalı Analizi. *5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS'09)*. Karabük.
- Kayalı, E. S. (1997). *Mekanik İşlem Hasarları*. İstanbul: T.M.M.O.B. Metalurji Mühendisleri Odası Hasar Analizi Seminer Notları.
- Kayalı, E. S., & Çimenoglu, H. (1995). *Plastik Şekil Verme İlke ve Uygulamaları*. İstanbul: Bilim Teknik Yayınevi.
- Kayalı, E. S., & Ensari, C. (2000). *Metallere Plastik Şekil Verme İlke ve Uygulamaları*. İstanbul: İ.T.Ü. Kimya – Metalürji Fakültesi Ofset Atölyesi.

- Kayı, Y. (2006). *Plastik Enjeksiyon Prosesindeki Parametrelerin Çekme Problemine Etkilerinin Taguchi Metodu İle İncelenmesi*. Sakarya: Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi.
- Khandeparkar, T., & Liewald, M. (2008). Hydromechanical Deep Drawing Of Cups With Stepped Geometries. *Journal of Materials Processing Technology*(202), 246–254.
- Lang, L., Danckert, J., & Nielsen, K. B. (2004). Investigation Into Hydrodynamic Deep Drawing Assisted By Radial Pressure Part I. Experimental Observations Of the Forming Process Of Aluminum Alloy. *Journal of Materials Processing Technology*(148), 119–131.
- Lang, L., Danckert, J., & Nielsen, K. B. (2004). Investigation Into The Effect Of Pre-Bulging During Hydromechanical Deep Drawing With Uniform Pressure Onto The Blank. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*(44), 649–657.
- Lang, L., Danckert, J., & Nielsen, K. B. (2005). Investigation Into Hydrodynamic Deep Drawing Assisted By Radial Pressure Part II. Numerical Analysis Of The Drawing Mechanism And The Process Parameters. *Journal of Materials Processing Technology*(166), 150–161.
- Lang, L., Danckert, J., Nielsen, K. B., & Zhou, X. (2005). Investigation Into The Forming Of A Complex Cup Locally Constrained By A Round Die Based On An Innovative Hydromechanical Deep Drawing Method. *Journal of Materials Processing Technology*(167), 191–200.
- Lang, L., Li, T., An, D., Chia, C., Nielsen, K. B., & Danckert, J. (2009). Investigation Into Hydromechanical Deep Drawing Of Aluminum Alloy—Complicated Components In Aircraft Manufacturing. *Materials Science and Engineering A*(499), 320–324.
- Lazic, Z. R. (2004). *Design of Experiments in Chemical Engineering A Practical Guide*. WILEY-VCH.
- Lin, J., Zhao, S. D., Zhang, Z. .., & Wang, Z. W. (2009). Deep Drawing Using a Novel Hydromechanical Tooling. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*(49), 73–80.
- Liu, W., Xu, Y., & Yuan, S. (2014). Effect Of Pre-Bulging On Wrinkling Of Curved Surface Part By Hydromechanical Deep Drawing. *Procedia Engineering*(81), 914 – 920.
- Meng, B., Wan, M., Wu, X., Yuan, S., Xu, X., & Liu, J. (2014). Development Of Sheet Metal Active-Pressurized Hydrodynamic Deep Drawing System And Its Applications. *International Journal of Mechanical Sciences*(79), 143–151.
- Muluk, Z., Saraçbaşı, T., Aktaş, S., & Başar, Ç. (1998). *Taguchi Üzerine Araştırma*. Ankara: Devlet Planlama Teşkilatı.
- Özay, Ç. (2009). *Teğetsel Tornalama-Frezeleme Yönteminde İşleme Parametrelerinin Teorik ve Deneysel Olarak Araştırılması*. Elazığ: Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Özbay, V. (2012). *Küresel Kesitli Kapların Derin Çekilmesinde Kalıp Geometrisinin Çekme Oranına Etkisinin Araştırılması*. Yüksek Lisans Tezi: Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

- Özek, C., & Bal, M. (2009). Derin Çekme Kalıplarında Matris-Zimba Radyüsü ve Çekme Oranının Et Kalınlığı Üzerindeki Etkisi. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*(24), 33-41.
- Özek, C., & Bal, M. (2009). The Effect Of Die/Blank Holder And Punch Radiuses On Limit Drawing Ratio In Angular Deep-Drawing Dies. *Int J Adv Manuf Technol*(40), 1077–1083.
- Özek, C., & Taşdemir, V. (2017). AA 5754-O Alaşımının İlık Derin Çekilmesi Üzerine Kalıp Yüzey Açısı ve Baskı Plakası Kuvvetinin Etkisinin Deneyisel Araştırılması. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*(32), 171-179.
- Özek, C., & Ünal, E. (2012). Kare Kapların Derin Çekilmesinde Kalıp/Baskı Plakası Açısının Limit Çekme Oranı ve Et Kalınlığı Üzerindeki Etkisi. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*(27), 615-622.
- Padmanabhan, R., Oliveira, M., Alves, J. L., & Menezes, L. F. (2007). Influence Of Process Parameters On The Deep Drawing Of Stainless Steel. *Finite Elements in Analysis and Design*(43), 1062 – 1067.
- Phadke, M. S. (1989). *Quality Engineering Using Design of Experiments, Quality Control, Robust Design and The Taguchi Method*. California: Edited by K. Dehnad, Wadsworth & Brooks / Cole.
- Qin, Y., & Balendra, R. (2004). Design Considerations For Hydromechanical Deep Drawing. *Journal of Materials Processing Technology*(145), 163–170.
- Raabe, D., Wang, Y., & Roters, F. (2005). Crystal Plasticity Simulation Study On The Influence Of Texture On Earing In Steel. *Computational Material Science*(34), 221-234.
- Raju, S., Ganesan, G., & Karthikeyan, R. (2010). Influence Of Variables In Deep Drawing Of AA 6061 Sheet. *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*(20), 1856–1862.
- Reddy, A. C., Rajesham, S., Reddy, P. R., Kumar, T. P., & Goverdhan, J. (2015). An Experimental Study On Effect Of Process Parameters In Deep Drawing Using Taguchi Technique. *International Journal of Engineering, Science and Technology*(7), 21-32.
- Ross, P. J. (1988). *Taguchi Techniques for Quality Engineering*. Newyork: McGraw – Hill,.
- Sato, H., Manabe, K., Ito, K., Wei, D., & Jiang, Z. (2015). Development Of Servo-Type Micro-Hydromechanical Deep-Drawing Apparatus And Micro Deep-Drawing Experiments Of Circular Cups. *Journal of Materials Processing Technology*(224), 233–239.
- Savaş, V., & Seçkin, Ö. (2007). A New Type Of Deep Drawing Die Design And Experimental Results. *Materials and Design*(28), 1330–1333.
- Savaş, V., Özay, C., & Aytaç, F. (2015). The Experimental Investigation Of Drawing Parameters On The Deep Drawing Of Al1050 Sheets In Angular Deep-Drawing Dies. *Optoelectronics And Advanced Materials – Rapid Communications*(9), 230-233.

- Savaşkan, T. (2009). *Malzeme Bilgisi ve Muayenesi*. Trabzon: Çağlayan Kitap Evi.
- Sharma, A. K., & Rout, D. K. (2009). Finite Element Analysis Of Sheet Hydromechanical Forming Of Circular Cup. *Journal Of Materials Processing Technology*(209), 1445–1453.
- Simith, A. D. (1990). *Die Design Handbook*. Michigan: Society of Manufacturing Engineers.
- Singh, S. K., & Gupta, A. K. (2010). Application Of Support Vector Regression In Predicting Thickness Strains In Hydro-Mechanical Deep Drawing And Comparison With ANN and FEM. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*(3), 66–72.
- Singh, S. K., & Kumar, D. R. (2008). Effect Of Process Parameters On Product Surface Finish And Thickness Variation In Hydro-Mechanical Deep Drawing. *Journal of Materials Processing Technology*(204), 169–178.
- Srinivas, T., & Reddy, A. C. (2015). Parametric Optimization of Warm Deep Drawing Process of 1100 Aluminum Alloy: Validation through FEA. *International Journal of Scientific & Engineering Research*,(6), 425-433.
- Şahin, Y. (2001). *Talaş Kaldırma Prensipleri*. Ankara: Nobel Yayın Dağıtım.
- Şirvancı, M. (2011). *Kalite İçin Deney Tasarımı , Taguchi Yaklaşımı*. İstanbul: Literatür Yayıncılık.
- Taghipour, E., & Assempour, A. (2011). The Effects Of Proportional Loading, Plane Stress, And Constant Thickness Assumptions On Hydro-Mechanical Deep Drawing Process. *International Journal of Mechanical Sciences*(53), 329–337.
- Thiruvarudchelvan, S., & Tan, M. (2006). A Note On Fluid-Pressure-Assisted Deep Drawing Processes. *Journal of Materials Processing Technology*(172), 174–181.
- Topaç, M. M. (2003). *Karbonlu Çeliklerde Derin Çekmeye Etki Eden Faktörlerin İncelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi: Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Tseng, H., Hung, J., Hung, C., & Lee, M. (2001). Experimental And Numerical Analysis Of Titanium Aluminum Clad Metal Sheets In Sheet Hydroforming. *Int J Adv Manuf Technol*(54), 93–111.
- Tzchaetsch, H. (2006). *Metal Forming Practice*. Germany: Verlag Berlin Heidelberg.
- Uzun, İ., & Erişkin, Y. (2002). *Sac Metal Kalıpcılığı*. Ankara: Milli Eğitim Bakanlığı Yayınları.
- Ünal, E. (2011). *Kare Kesitli Kapların Derin Çekilmesinde Kalıp Geometrisi ve Radyüsünün Çekme Oranına Etkisinin Araştırılması*. Elazığ: Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Wang, H., Gao, L., & Chen, M. (2011). Hydrodynamic Deep Drawing Process Assisted By Radial Pressure With Inward Flowing Liquid. *International Journal of Mechanical Sciences*(53), 793-799.

- Yang, D. Y., Kim, J. B., & Lee, D. W. (1995). Investigation into Manufacturing of Very Long Cups by Hydromechanical Deep Drawing and Ironing with Controlled Radial Pressure. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*(44), 255-258.
- Yaşar, M. (2001). *Yüksek Hızda Şekillendirilen Alüminyum Alaşımlarında Oluşan Deformasyon İncelenmesi*. İstanbul: Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Zareh, B., Gorji, A. H., Bakhshi, M., & Nourouzi, S. (2013). Study on the Effect of Forming Parameters in Sheet Hydrodynamic Deep Drawing Using FEM-based Taguchi Method. *Int J Advanced Design and Manufacturing Technology*,(6), 87-99.
- Zhang, S. H., & Danckert, J. (1998). Development of hydro-mechanical deep drawing. *Journal of Materials Processing Technology*(83), 14–25.
- Zhang, S., Jensen, M. R., Danckert, J., Nielsen, K. B., Kang, D. C., & Lang, L. H. (2000). Analysis Of The Hydromechanical Deep Drawing Of Cylindrical Cups. *Journal of Materials Processing Technology*(103), 367±373.
- Zhang, S., Jensen, M., Nielsen, K., Danckert, J., Lang, L., & Kang, D. (2003). Effect Of anisotropy and prebulging on hydromechanical deep drawing of mild steel cups. *Journal of Materials Processing Technology*(142), 544–550.
- Zhang, S., Lang, L., Kang, D., Danckert, J., & Nielsen, K. B. (2000). Hydromechanical Deep-Drawing Of Aluminum Parabolic Workpieces Experiments And Numerical Simulation. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*(40), 1479–1492.
- Zhang, S., Nielsen, K., Danckert, J., Kang, D., & Lang, L. (2000). Finite Element Analysis Of The Hydromechanical Deep-Drawing Process Of Tapered Rectangular Boxes. *Journal of Materials Processing Technology*(102), 1-8.
- Zhang, Z., Zhao, S., & Zhang, Y. (2008). A Novel Response Variable For Finite Element Simulation Of Hydro-Mechanical Deep Drawing. *Journal of Materials Processing Technology*(208), 85–89.
- Zhao, S., Zhang, Z. Y., Zhang, Y., & Yuan, J. H. (2007). The Study On Forming Principle In The Process Of Hydro-Mechanical Reverse Deep Drawing With Axial Pushing Force For Cylindrical Cups. *Journal of Materials Processing Technology*(187-188), 300–303.

ÖZGEÇMİŞ

1986 tarihli Elazığ doğumlu olan Hasan BALLIKAYA İlk, orta ve lise eğitimini Elazığ'da tamamladıktan sonra, yükseköğrenimini yaptığı Fırat Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Makine Eğitimi Bölümünde 2005-2009 yılları arasında lisans eğitimini tamamlayarak mezun oldu. 2009-2011 yılları arasında Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Eğitimi A.B.D.'nda Yüksek lisans eğitimini tamamlamıştır. 2011 yılında ise Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Eğitimi A.B.D.'nda doktora eğitimine başlamıştır. Hasan BALLIKAYA; Aksaray Üniversitesinde Öğretim Görevlisi olarak görev yapmaktadır. Hasan BALLIKAYA, evli ve bir çocuk babasıdır yabancı dili İngilizcedir.

