T.C.
DİCLE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİENSTİTÜSÜ

DERİN ÇEKME İŞLEMİNDE KALIP TASARIMININ SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE OPTİMİZASYONU

Baver YILDIZ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DİYARBAKIR
Temmuz 2017

T.C

DİCLE ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜ

DİYARBAKIR

Baver Yıldız tarafından yapılan "Derin Çekme İşleminde Kalıp Tasarımının Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Optimizasyonu" konulu bu çalışma, jürimiz tarafından Makine Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir

Jüri Üyesinin

Ünvanı Adı Soyadı

Başkan: Doç. Dr. Kadir TURAN

Üye : Yrd. Doç. Dr. Sedat BİNGÖL

Üye : Yrd. Doç. Dr. Zülküf DEMİR

Tez Savunma Sınavı Tarihi: 27/07/2017

Yukarıdaki bilgilerin doğruluğunu onaylarım.

31/07/2017

Doç.Dr.Sevtap SÜMER EKER

ENSTİTÜ MÜDÜR V.

(MÜHÜR)

TEŞEKKÜR

Öncellikle, tez danışmanım Sayın Yrd.Doç.Dr. Sedat BİNGÖL'e yapmış olduğum bu yüksek lisans çalışmasında vermis olduğu her türlü katkı ve destek için sonsuz teşekkür ve şükranlarımı sunarım.

Yaptığım çalışma boyunca vermiş oldukları maddi ve manevi destekten dolayı sevgili aileme teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR ..... **I**
ABSTRACT ..... **VI**
ÇİZELGE LİSTESİ ..... **VII**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **VIII**
KISALTMA ve SİMGE LİSTESİ ..... **XI**
1. GİRİŞ **1**
2. KAYNAK ÖZETLERİ **3**
3. MATERYAL VE METOD **7**
3.1 Derin Çekme İşlemi 7
3.1.1 Zımba Hızı 8
3.1.2 Çekme Derinliği 9
3.1.3 Pot Çemberi Kuvveti 10
3.1.4 Model Geometrisi 11
3.1.5 Taslak Malzemenin Türü ve Geometrisi 13
3.1.6 Çekme Boşluğu 15
3.1.7 Yağlama 16
3.1.8 Derin Çekme İşleminde Oluşan Gerilme Bölgeleri 18
3.1.9 Derin Çekme İşleminde Oluşan Hatalar 19
3.2 Sonlu Elemanlar Yöntemi 21
3.2.1 Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Analizde Yeralan Adımlar 23
3.2.2 Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Yapılan Analizlerin Avantajları 23
3.2.3 Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Yapılan Analizlerin Dezavantajları 24
3.2.4 Sonlu Elemanlar Yöntemindeki Algoritmalar 24
3.2.5 Sonlu Elemanlar Yönteminin Matematiği 25
3.2.6 Çalışmanın Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Modellenmesi 30
3.3 Taguchi Metodu 33
3.3.1 Deney Tasarımı 35
3.3.2 Ortogonal Diziler 36
3.3.3 Taguchi'de Sinya/Gürültü (S/N) Oranı 37
3.3.4 Varyans Analizi (ANOVA) 38

3.3.5 Çalışmada İncelenen Parametrelerin Uygunluğu 39
3.3.6 Çalışmada İncelenen Parametrelerin Taguchi Metodu ile Modellenmesi 40
4. NÜMERİK ÇALIŞMA VE BULGULAR 43
4.1 Literatür Karşılaştırma Sonuçları 44
4.2 Sonlu Elemanlar Simülasyon Sonuçları 46
4.2.1 Derin Çekme Kalınlık Bulguları 46
4.2.2 Derin Çekme Gerilme Bulguları 52
4.3 Taguchi Sonuçları 58
4.3.1 Minimum Kalınlık Sonuçlarının Taguchi ile Analizi 58
4.3.2 Maksimum Kalınlık Sonuçlarının Taguchi ile Analizi 60
4.3.3 Maksimum Gerilme Sonuçlarının Taguchi ile Analizi 62
5. SONUÇ VE TARTIŞMA 66
6. KAYNAKLAR 68
ÖZGEÇMİŞ 72

ÖZET

DERIN ÇEKME İŞLEMINDE KALIP TASARIMININ SONLU ELEMANLAR YÖNTEMI ILE OPTIMIZASYONU

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Baver YILDIZ

DİCLE ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

2017

Derin çekme;bir tarafı dolu içi boş kap şeklinde parçalar üretmek için kullanılan bir sac metal şekillendirme işlemidir. Derin çekme işlemi hızlı, birçok farklı geometriye sahip parçaların üretiminde kullanılan, ekonomik bir üretim metodu olduğu için endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır.Bu yüzden birçok araştırmanın konusu olan derin çekme işlemi, içerdiği birçok parametreden dolayı sonuçlarının incelenmesi bakımından karmaşık bir işlemdir.Çekme derinliği, zımba hızı, pot çemberi kuvveti, kalıp ağzı yarıçapı, zımba ucu yarıçapı, çekme boşluğu, çekme oranı gibi birçok etken derin çekme yönteminde ürün kalitesine direkt etkide bulunur.Ayrıca işlem sırasında parçada oluşan kuvvetlerin ve gerilmelerinhesaplanması oldukça zor olduğundan detaylı işlem analizi için bilgisayar destekli hesaplama programlarına gerek duyulmaktadır.Bu yüzden bu çalışmada sonlu elemanlar yöntemi ile çözüm yapan ANSYS programı kullanılmıştır.Yapılan simülasyonlarda incelenen parametreler, zımba hızı, pot çemberi kuvveti, zımba ucu yarıçapı ve kalıp ağzı yarıçapı uzunluklarıdır.Seçilen parametrelerin sayısı fazla olduğu için Taguchi deney tasarımı metodu ile 81 olan simülasyon sayısı 9'a düşürülmüştür. Çalışmada yer alan işlem parametrelerinin minimum parça kalınlığı, maksimum parça kalınlığı ve maksimum gerilme değeri üzerine etkisi incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre optimum parametre değerleri belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Derin Çekme, Kalıp Tasarımı, Optimizasyon, FEM, Taguchi

ABSTRACT

THE OPTİMİZATİON OF DİE DESİGN İN DEEP DRAWİNG PROCESS WİTH FİNİTE ELEMENT METHOD

M. SC. THESİS

Baver YILDIZ

DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINERING
INSTITUTE OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES
UNIVERSITY OF DICLE

2017

Deep drawing is a sheet metal forming process that is used to produce the container shaped parts. Deep drawing process is very popular in industry because its high production rate, low cost andwide product range. Deep drawing that is the subject of many studies is very complex process due to high number of parameters. There are a lot of parameters which affect the quality of finished product such as punch stroke, punch speed, blank holder force, die radius, punch radius, clearance and drawing rate.In addition, the computer aided calculation software are essential for detailed results since the determination of the forces and stressesare very difficult. Therefore, the simulations are generated with ANSYSsoftware which solves the problems with the finite element method in this study.The examined parameters are punch speed, blank holder force, die radii and punch radii in the conducted research. The number of simulation is reduced from 81 to 9 with Taguchi experiment design method because of the high number of simulations. In this study, the effects of those parameters on the minimum thickness, maximum thickness and maximum stress of the finished product are observed. The optimum parameter values are determined according to obtained results.

Key Words: Deep Drawing, Die Design, Optimization, FEM, Taguchi

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge No		Sayfa
Çizelge 3.1.	Farklı malzemelerde tek ve çift eylemli çekme hızı değerleri	8
Çizelge 3.2.	Farklı malzemelerde pot çemberi basınç değerleri	11
Çizelge 3.3.	Taslak parçanın kalınlık değerine göre bazı kalıp ağzı yarıçapı değerleri	12
Çizelge 3.4.	B_1 ve B_2 değerleri	14
Çizelge 3.5.	Farklı malzeme türleri ve kalınlık değerlerinde, taslak parçada meydana çap azalma yüzdeleri	15
Çizelge3.6.	Farklı malzeme türleri için çekme boşluğu değerleri	16
Çizelge3.7.	Farklı malzemeler için kullanılan yağlar	17
Çizelge3.8.	Çelik, alüminyum ve alüminyum alaşımının farklı yağlama ortamlarındaki sürtünme değerleri	18
Çizelge3.9.	Eksplisit ve implisit yöntemler arasındaki temel farklar	19
Çizelge 3.10.	Modelde kullanılan parçaların boyutsal özellikleri 1 numaralı simülasyona ait profil sıcaklıkları	30
Çizelge 3.11.	Derin çekme sacının mekanik özellikleri	31
Çizelge 3.12.	Taguchi metodunda kullanılan bazı ortogonal diziler	36
Çizelge 3.13.	2^7 ve L_8 ortogonal dizilerin deney çizelgeleri	37
Çizelge 3.14.	Varyans analizinde hesaplanan değerler ve formülleri	39
Çizelge 3.15.	Çalışmada kullanılan parametreler ve seviyeleri	41
Çizelge 3.16.	L_9 ortogonal diziye sahip deney tasarımı	41

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil No		Sayfa
Şekil 1.1.	Derin çekme yöntemi ile üretilmiş parçalar	1
Şekil 3.1.	Derin çekme işleminde kullanılan temel araçlar	7
Şekil 3.2.	Derin çekme işlem adımları	8
Şekil 3.3.	Buruşma ve yırtılma hatalarının pot çemberi kuvveti, parça kalınlığı ve çekme derinliği arasındaki ilişkisi	10
Şekil 3.4.	Model geometrisi gösterimi; rp zımba ucu yarıçapı rd kalıp ağzı yarıçapı,Rp zımba yarıçapı, Rd kalıp boşluğu yarıçapı, S çekme derinliği, C çekme boşluğu	12
Şekil 3.5.	Derin çekme işleminde farklı gerilme bölgeleri	18
Şekil 3.6.	Derin çekme sonucu oluşan basma kuvvetleri	19
Şekil 3.7.	Derin çekme sonucu oluşan hatalar 1. Flanş bölgesinde kırışıklık 2. Duvar bölgesinde kırışıklık 3. Parçada oluşan kırışıklık 4.Duvarda oluşan çizgiler 5. Parçada oluşan izler 6. Portakal yüzeyi 7. Lüder şeritleri 8. Parça alt yüzeyinin yırtılması, 9. Köşe yırtılması 10,11,12. Katlanma ve kulaklanma 13,14. Köşe katlanması	20
Şekil 3.8.	Sonlu elemanlar metodu ile analiz yapan ticari programlardaki ağ yapısı gösterimi	22
Şekil 3.9.2	düğüm noktası arasındaki rijitlik elemanları	25
Şekil 3.10.	Yerel koordinat sisteminde iki düğüm noktası	26
Şekil 3.11.	Yerel koordinat sisteminin transformasyonu	27
Şekil 3.12.	Modelin boyutsal tanımı	30
Şekil 3.13.	Derin çekme sacına ait gerilme-gerinim eğrisi	31
Şekil 3.14.	Modelde yer alan parçalar	32
Şekil 3.15.	a)Modelin b) Taslak parçanın ağ örgüsü yapısı	32
Şekil 3.16.	Japonya ve Amerika'da 3 farklı yöntemin farklı yıllarda kaliteye olan etkileri	33
Şekil 3.17.	Taguchi'nin kalite kontrol sistemi	34

Şekil 3.18. Taguchi metodundaki sistematik 35

Şekil 4.1. Bu çalışmanın akış şeması 43

Şekil 4.2. 40mm çekme derinliği ve 6750N pot çemberi kuvveti ile gerçekleştirilensimülasyon sonuçlarının karşılaştırılması
(a. Yapılan simülasyon b. Literatürde yapılmış simülasyon) 44

Şekil 4.3. 500mm/sn zımba hızı ve 40mm çekme derinliğinde yapılan simülasyonların karşılaştırılması(a. Yapılan simülasyon
b. Literatürde yapılmış simülasyon) 45

Şekil 4.4. 20mm çekme derinliği ve 500mm/sn zımba hızıyla yapılan simülasyonların karşılaştırılması (a. Yapılan simülasyon
b. Literatürde yapılmış simülasyon) 45

Şekil 4.5. 1 numaralı simülasyona ait kalınlık değerleri 47

Şekil 4.6. 2 numaralı simülasyona ait kalınlık değerleri 47

Şekil 4.7. 3 numaralı simülasyona ait kalınlık değerleri 48

Şekil 4.8. 4 numaralı simülasyona ait kalınlık değerleri 48

Şekil 4.9. 5 numaralı simülasyona ait kalınlık değerleri 49

Şekil 4.10. 6 numaralı simülasyona ait kalınlık değerleri 49

Şekil 4.11. 7 numaralısimülasyona ait kalınlık değerleri 50

Şekil 4.12. 8 numaralısimülasyona ait kalınlık değerleri 50

Şekil 4.13. 9 numaralısimülasyona ait kalınlık değerleri 51

Şekil 4.14. 1 numaralı simülasyona ait gerilme değeleri 53

Şekil 4.15. 2 numaralı simülasyona ait gerilme değeleri 53

Şekil 4.16. 3 numaralı simülasyona ait gerilme değeleri 54

Şekil 4.17. 4 numaralı simülasyona ait gerilme değeleri 54

Şekil 4.18. 5 numaralı simülasyona ait gerilme değeleri 55

Şekil 4.19. 6 numaralı simülasyona ait gerilme değeleri 55

Şekil 4.20. 7 numaralı simülasyona ait gerilme değeleri 56

Şekil 4.21. 8 numaralı simülasyona ait gerilme değeleri 56

Şekil 4.22. 9 numaralı simülasyona ait gerilme değeleri 57

Şekil 4.23. En düşük kalınlık değerleri için elde edilen S/N oranları 58

Şekil 4.24. En düşük kalınlık değerleri için elde edilen etki oranları 59

Şekil 4.25. En yüksek kalınlık değerleri için elde edilen S/N oranları 60

Şekil 4.26. En yüksek kalınlık değerleri için elde edilen etki oranları 61

Şekil 4.27. En yüksek gerilme değerleri için elde edilen S/N oranları 62

Şekil 4.28. En yüksek gerilme değerleri için elde edilen etki oranları 63

KISALTMA ve SİMGE LİSTESİ

FEM	:Finite Element Method
FEA	:Finite Element Analysis
S	:Sinyal
N	:Gürültü
S/N	:Signal / Noise
ANOVA	:Analysis Of Variance
TM	:Taguchi Metodu

1. GİRİŞ

Günümüz teknolojisinde; döküm, plastik metal şekillendirme talaşlı ve kaynaklı imalat gibi birçok üretim yöntemi bulunmaktadır. Bu yöntemler arasında en yaygın olarak kullanılanlardan biri plastik metal şekillendirme işlemidir. Malzeme içerisindeki kristal yapısındaki çizgisel hatalar, dışarıdan etki eden bir kuvvet ile birlikte kayma düzlemi boyunca kayma işlemini meydana getirir. Kayma işlemi ile kristal yapı içerisindeki ötelenen atomlar malzemenin plastik olarak şekil değiştirmesine sebep olur. Kısaca, plastik metal şekillendirme, şekli değiştirilmek istenen parçanın kendisine uygulanan kuvvete karşı gösteridği tepki olarak tanımlanabilir. Plastik şekil değiştirme yöntemleri içerisinde dövme, haddeleme, ekstrüzyon, bükme, sıvama, kesme ve derin çekme en yaygın kullanılan yöntemlerdir.

Üretim teknikleri arasında yer alan derin çekme, ince sac malzemelerin plastik şekillendirilmesinde sıkça kullanılan bir üretim metodudur. Derin çekme yöntemi ile karmaşık geometriye sahip konik ve silindirik, bir tarafı kapalı, içi boş kap şeklindeki parçalar üretmek mümkündür (Şekil 1.1). Metal şekillendirme yöntemleri arasında önemli bir yere sahip olan derin çekme ile şekillendirme işlemi, metallerin yaklaşık 50%'sinin şekillendirilmesinde kullanılmaktadır (Grote ve Antonsson 2011). Günümüzde, hızlı ve ekonomik olması gibi birçok üstün özellikleri sayesinde otomotiv, havacılık, savunma sanayi ve gıda sanayi gibi birçok alanda tercih edilme sebebidir. Otomobil parçaları, pişirme kapları, alüminyum konserve ve teneke kutuları, mutfak lavaboları gibi birçok farklı alanda kullanılan ürünler bu yöntem ile oluşturulmuş ürünler arasında örnek gösterilebilir. Derin çekme yöntemi ile üretilen malzemelerin birçok alanda kullanılmaktadır. Bu işlem karmaşıklığından dolayı konu ile ilgili araştırmalar devam etmektedir.



Şekil 1.1. Derin çekme yöntemi ile üretilmiş parçalar (Yalçın 2010)

Son yıllarda, birçok alanda olduğu gibi mühendislik alanında da bilgisayar programları, özellikle ürün ve üretim uygulamalarının tasarımında ve araştırmasında yaygın olarak kullanılmaktadır. Sonlu elemanlar yöntemi(FEM) kullanılarak çözüm yapan simülasyon ve analiz programları, elde edilen parçalarda oluşan deformasyon miktarı, gerilme, sıcaklık gibi malzeme kalitesini etkileyen faktörlerin incelenmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Bilgisayar destekli yapılan simülasyonlar ve bu simülasyonların analizleri sayesinde elde edilen ürünlerin üretim aşamasında teknik incelemeler yapılmakta, oluşabilecek birçok hatanın önüne geçilmektedir.

Rekabetin çok yüksek olduğu günümüz dünyasında, endüstri imalatçılarının piyasada tutunabilmeleri için daha kaliteli ürünleri, daha uygun maliyetlerle ve daha kısa zamanda üretmeleri gerekmektedir. Kalite, bir ürüne etki eden bütün faktörlerin bilinmesi ve bu faktörlerin birbirleri ile etkileşiminin ürün üzerindeki etkisinin kontrol edilmesi ile elde edilir. En iyi kontrol sistemi, üretim aşamasında parçaya etki eden bütün parametrelerin tek tek ele alınması ve sonuçlarının incelenmesi ile olabilir. Ancak her zaman bütün parametrelerin incelenmesi mümkün olmayabilir. Çünkü ürün kalitesine etki eden bütün parametre etkileşimlerinin eş zamanlı uygulanması zaman ve maliyet kaybına neden olmaktadır. Bütün bu olumsuzlukların önüne geçebilmek için deney tasarım yöntemlerinin uygulanması gerekmektedir. Deney tasarım yöntemi ile ürün kalitesine etki eden etkileşim parametrelerin optimizasyonu, kontrol edilemeyen parametrelerin ise en az seviyeye düşürüldüğü üretim yönteminin geliştirilmesi mümkündür. Deney tasarım yöntemlerinden biri olan Taguchi yöntemi, geliştirme imkânı sağladığı ortagonal diziler sayesinde, birçok parametre ve seviyeyi optimize ederek deney sayılarını en aza indirmektedir.

Yapılan bu çalışmada, derin çekme işlemine etki eden 4 farklı parametrenin (baskı plakası kuvveti, zımba hızı, zımba geometrisi ve kalıp geometrisi) derin çekilen malzemede sebep olduğu gerilme ve derin çekme sonrasında çeper kalınlık değerleri ANSYS FEM ile analiz edilmiştir. Çalışmada incelenecek parametre sayısının ve bu parametrelere bağlı seviyelerin fazla sayıda olmasından dolayı Taguchi deney tasarım metodu uygulanmıştır. Böylece deney sayılarında azalma yapılmış, sonuçların analizinde ANOVA varyans analizi kullanılmıştır.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Endüstride imalat yöntemleri içerisinde yaygın olarak kulanılan derin çekme işlemi, birçok parametre içerdiğinden dolayı analiz edilmesi zor bir yöntemdir. Bu nedenle bu parametrelerin araştırılması ve kendi aralarındaki etkileşimlerinin analizi için akademik düzeyde birçok deneysel çalışma yapılmıştır.

Derin çekme işleminde kalıp (matris) ve zımba geometrileri, malzeme türü, baskı plakası kuvveti, zımba hızı, çekme derinliği, çekme boşluğu gibi birçok parametre vardır. Bu parametrelerden kalıpve zımba geometrileri malzemenin çekilebilirlik kabiliyetini etkileyen en önemli parametrelerdendir. Bal (2007), yaptığı çalışmada, farklı ağız yarıçaplarına ve eğim açılarına sahip kalıp ve zımbalar kullanarak farklı modeldeki çekme oranlarını incelemiştir. Bu yarıçaplardan 10 mm ağız yarıçapına sahip zımba ve kalıbın olduğu modelde en yüksek çekme oranı tespit edilmiştir. Bir diğer çalışmada Aytaç (2007), farklı matris açılarına sahip kalıplarda derin çekme oranlarını incelemiştir. Bu çalışma bellirli bir değere kadar artan açılarda çekme oranının da arttığını göstermektedir. Gürün (2008),kare ve silindir şeklinde boşluklara sahip kalıpları kullanarak, parça üzerinde etkili olan çekme kuvvetlerini incelemiştir. Ayrıca farklı kalıp ağzı ve zımba ucu yarıçapılarında malzemede oluşan gerilme değerlerini karşılaştırmıştır.

Yapılan bazı araştırmalar ise derin çekme işleminin farklı malzemeler için uygulanabilir bir yöntem olduğunu göstermiştir. Wallmeier ve ark.(2015), derin çekme işleminde mukavva malzemesini kullanarak yaptığı çalışmada, farklı kalıp sıcaklığı, parça çeper kalınlığı ve baskı plakası kuvvetlerinde oluşan zımba kuvvetlerini incelemiştir. Erbaş (2014), yaptığı deneysel ve sayısal analizlerle farklı iki alüminyum alaşımı olan AA5457-H22 ve AA6061-T6 malzemelerinin derin çekme kabiliyetlerini karşılaştırmıştır. AA5457-H22 malzemesinin çekilebilirlik kabiliyetinin AA6061-T6 malzemesinden daha iyi olduğunu tespit etmiştir. Yang ve ark.(2007), magnezyum alaşımı olan AZ31 malzemesinin farklı parametreler altında (zımba ucu yarıçapı, çekme boşluğu ve tavlanmış malzeme) derin çekme sınır oranlarını incelemiştir. Elde edilen sonuçlar, 450° de tavlanmış magnezyum AZ31 malzemesi ile yapılan derin çekme işleminde daha yüksek derin çekme limit oranının elde edildiğini göstermiştir.

Bir diğer parametre olan baskı plakası kuvveti hata oranı daha az olan ürün elde edebilme bakımından çok önemli bir etkiye sahiptir. Choubeyve ark. (2015), farklı baskı plakası kuvvetlerinde yaptığı çalışmada deneysel sonuçlar ile sayısal sonuçları kıyaslamıştır. Baskı plakası kuvveti arttıkça parçada oluşan hatalarda azalma olduğunu göstermiştir. Mostafapur ve ark. (2013), durağan (statik) baskı plakası kuvveti yerine titreşimli (dinamik) baskı plakası kuvveti kullanılmıştır. Uygun bir frekansa sahip dinamik baskı plakası kuvveti ile parçada oluşan kırışıklık ve yırtılma miktarı statik baskı plakası kuvvetinin kullanıldığı derin çekme işleminindeki kırışıklık ve yırtılma miktarına göre azalmıştır

Yapılan bazı çalışmalar zımba hızının parçaların derin çekme kabiliyetleri üzerinde etkili olduğunu göstermiştir. Ma ve ark. (2015), yaptığı deneysel ve sayısalanalizlerde zımba hızının derin çekme işleminde son üründe oluşan çeper kalınlığınn dağılımda etkili olan diğer parametrelerden (baskı plakası kuvveti, farklı işlem sıcaklıkları ve sürtünme katsayısı) daha etkin olduğu görülmektedir. Deney sonuçlarının değerlendirilmesinde deney tasarım yöntemi kullanılmış ve sırasıyla zımba hızının % 44.35, baskı plakası kuvvetinin % 24.88, sürtünme katsayısının % 15.77 ve işlemin başlangıç sıcaklığının % 14.995 oranında etkili olduğu saptanmıştır. Le ve ark.(2008), AZ31 magnezyum alaşımını kullanarak derin çekmenin sınır değerini hesaplamışlardır. 0.2 mm/sn 10 mm/sn ve 100 mm/sn olan zımba hızlarında malzemede oluşan en yüksek gerinim miktarlarını karşılaştırmışlardır. Hız arttıkça gerinim değerleri artmış ve çekilebilirliği olumsuz yönde etkilemiştir. Özçelik (2008), farklı zımba hızları ve zımba ucu yarıçaplarında gerçekleştirdiği simülasyonlarda elde edilen ürünün çeper kalınlık değerlerini ve elde edilen en büyük çekme derinliğini incelemiştir. Simülasyon sonuçlarına göre düşük hızlarda daha yüksek çekme derinlikleri elde edilirken, yüksek hızlarda ise düşük çekme derinlikleri elde edilmiş ayrıca parçada hatalar meydana geldiği görülmüştür.

Çekme derinliği arttıkça malzeme üzerinde oluşan deformasyon ve gerilme artmakta böylece parçada bazı düzensizlikler ve hatalar oluşmaktadır. Dwivedi ve Agnihotri (2015), alüminyum ve pirinç malzemelerini kullanarak yaptıkları derin çekme simülasyonlarında çekme derinliği ile taslak parçada oluşan gerinim arasındaki ilişkiyi şematik olarak göstermiştir. Bu çalışmada çekme derinliği arttıkça malzeme üzerinde oluşan gerinim miktarının arttığı görülmektedir.Li ve ark. (2014), farklı çekme derinliklerinde malzemede meydana gelen minimum parça kalınlığını tespit etmiştir. Farklı bölgelerdeki minimum parça kalınlıkları karşılaştırılmıştır. Dengeli bir kalınlık dağılımı elde etmek için çekme derinliğinin önemli bir parametre olduğu tartışılmıştır.

Yapılan bazı çalışmalarda ise farklı çekme boşlukları kullanılarak son üründe meydana gelen değişiklikler gözlenmiştir. Simoes (2012), farklı kalıp ağzı yarıçapları ve kalıp boşluğu çaplarının zımba kuvveti ve parçada oluşan kalınlık üzerinde etkisini incelemiştir. Yaptığı analizler sonucunda artan kalıp boşluğu çaplarında zımba kuvvetinde azalma, malzemede oluşan maksimum kalınlık değerinde artış olduğu tespit etmiştir. Hassan ve ark. (2014), yaptıkları çalışmada küp şekline sahip kapların derin çekilebilme özelliklerini incelemişlerdir. Çalışmada çekme boşluğunun, kalıp ağzı ve zımba ucu yarıçaplarının ve taslak malzeme kalınlığının derin çekme limiti, maksimum çekme yükü, malzeme kalınlığı, çekme derinliği gibi sonuçları üzerindeki etkilerini incelemiştir. Yaptığı analizlerde çekme boşluğunun azalması sonucu elde edilen çekme yükünde artış meydana gelmiştir.

FEM tabanlı çözüm yapan ticari bilgisayar programları, üretim metotlarının simülasyonunda kullanılması ile birlikte birçok araştırmacı çalışmalarında bu programları kullanmıştır. Ipsir ve ark. (2011),yarı silindirik konik konteynır üretiminin

simülasyonunda FEM tabanlı LS-DYNA ticari bilgisayar programını kullanmıştır. Yaptığı simülasyonda değişken baskı plakası basınçlarında parçanın et kalınlığında oluşan incelmeler hesaplanmıştır. Ayrıca parçada oluşan kusurlar açık bir şekilde gözle görülebilmektedir. Candra ve ark. (2015),derin çekme işleminde hatasız ürün elde etmek amacı ile sabit ve değişken olmak üzere iki farklı türde pot çemberi kuvvetini kullanarak gerçekleştirdiği analitik deneyleri, FEM simülasyonları ile kıyaslamıştır. Yaptığı çalışmada simülasyonlar ile analitik deneyler arasında uyumlu sonuçlar elde etmiştir. Zein ve ark. (2013), derin çekmede elde edilen parçadaki kalınlık incelmesini ABAQUS adlı ticari bilgisayar programı ile analiz etmiştir. Farklı kalıp ve zımba parametrelerinde elde ettiği sonuçları deneysel sonuçlarla mukayese etmiştir.

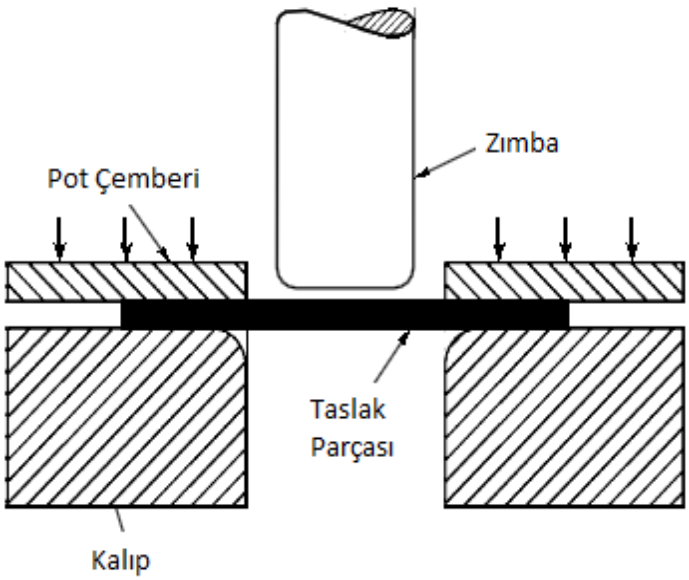
Bazı araştırmacılar, yaptıkları analizlerde birden fazla işlem parametresinin, son ürün üzerindeki etkisini incelemek istemektedirler. Birden fazla işlem parametresi ve bu parametrelere bağlı farklı seviyelerden dolayı deney sayılarında artış olmaktadır. Deney tasarım yöntemlerinden biri olan Taguchi metodu, derin çekme yöntemi ile ilgili bazı araştırmalarda kullanılmıştır. Bunlardan biri Raju S. ve ark. (2010), AA6061 malzemesinin derin çekilmesinde kullanılan parametrelerin etkileşimini incelemişlerdir. Bu çalışmada düzenli bir çeper kalınlığına sahip parçaları elde etmek için işlem parametresi olarak kalıp ağzı yarıçapı, zımba ucu yarıçapı ve baskı plakası kuvveti ve bu parametrelerin farklı seviyelerini kullanmışlardır. Taguchi yöntemi ile optimize edilen parametreler sonucunda zımba ucu yarıçapı 3 mm, kalıp ağzı yarıçapı 8 mm ve baskı plakası kuvveti 4 kN olarak tespit edilmiştir. Diğer bir çalışmada Padmanabhan ve ark. (2007), kalıp ağzı yarıçapı, baskı plakası kuvveti ve sürtünme katsayısının paslanmaz çeliğin derin çekmesine etkisini araştırmışlardır. Parametrelerin optimizasyonu için Taguchi deney tasarım yöntemini kullanmışlardır. Çalışmadan elde edilen verilere göre parça kalitesine etki eden kalıp ağzı yarıçapının diger parametrelerden daha etkili olduğu ve bu değerin % 89.2 oranında olduğunu tespit etmişlerdir.

Bu çalışma ile birlikte 4 farklı parametrenin (zımba hızı, pot çemberi kuvveti, zımba ucu ve kalıp ağzı yarıçapı) elde edilen ürün üzerinde yarattığı gerilme ve parçadaki çeper kalınlığındaki değişim sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak incelenmiştir. Her bir parametrenin 3 farklı seviyesi ele alındığından dolayı Taguchi deney tasarımı kullanılarak simülasyon deney sonuçları 81'den 9'a düşürülmüştür. Yapılan bu çalışma, derin çekme işlemi sonucu elde edilen üründe oluşan farklı çeper kalınlıkları ve gerilme değerlerinin bilgisayar ortamında analizinin mümkün olduğunu göstermitir. Ayrıca Taguchi deney tasarımı kullanılarak simülasyon deney sayıları azaltılmış böylelikle işlem parametrelerin sonuçlar üzerindeki etkisi daha kısa zamanda elde edilmiştir.

3. MATERYAL VE METOD

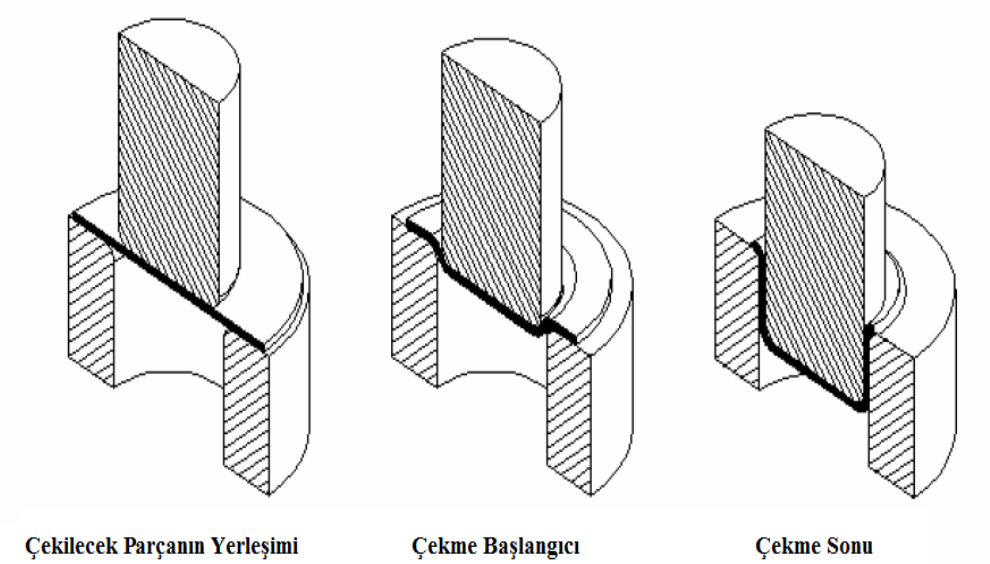
3.1 Derin Çekme İşlemi

Derin çekme işlemi; içi boş, bir tarafı kapalı kap şeklindeki parçaları elde etmek için kullanılan bir sac metal şekillendirme işlemidir. Derin çekme ile sac metal şekillendirme işleminde istenilen boyutlarda ürün elde etmek amacı ile uygun özelliklere sahip zımba, kalıp, pot çemberi ve taslak parçası kullanılır (Şekil 3.1).



Şekil 3.1. Derin çekme işleminde kullanılan temel araçlar (Black ve Kohser 2008)

Şekil 3.1'de görüldüğü üzere kalıp boşluğunun üzerine oturtulmuş daire biçiminde taslak parça silindirik zımba yardımı ile kalıp boşluğundan içeriye doğru bastırılır(Bal 2007).Pot çemberi ise kalıbın üst duvarına doğru kuvvet uygulayarak taslak parçayı sıkıştırır. Pot çemberinin sağladığı kuvvet yardımı ile parçanın flanş bölgesinde oluşan kırışma en aza indirilir ve parçanın kalıp boşluğu içerisindeki akışı düzenlenir. İşlem sonunda plastik deformasyona uğrayan taslak parça, kalıp ve zımbanın geometrilerine bağlı olarak nihai şeklini alır (Şekil 3.2).



Şekil 3.2. Derin çekmenin işlem adımları(Gürün 2008)

Derin çekme işlemi, talaşlı imalat ile kıyaslandığında malzeme kaybının çok düşük olması ve ek bir işleme ihtiyaç duyulmadan son ürünü elde etme avantajı ile birlikte bir takım dezavantajlara da sahiptir. Nihai ürün kalitesine doğrudan etki eden çok fazla sayıda işlem parametrelerinin bulunması derin çekme işlemini karmaşık hale getiren dezavantajlardan biridir. İşlem parametreleri: zımba hızı, çekme derinliği, pot çemberi kuvveti, model geometrisi, taslak malzemenin türü ve geometrisi, çekme boşluğu ve yağlama olarak sıralanabilir.

3.1.1 Zımba Hızı

Derin çekme işlemi diğer sac metal şekillendirme işlemlerinden farklı olarak zımba hızından etkilenen önemli bir parametredir. Derin çekme işleminde zımba; taslak parçanın kalıp boşluğuna doğru akmasını sağlar. Malzemenin kalıp boşluğuna ilerleme hızı, zımba hızına bağlıdır. Malzeme türüne ve zımbanın vuruş sayısına göre uygulanması gereken zımba hızı farklılık gösterir (Çizelge3.1.).

Çizelge 3.1. Farklı malzemelerde tek ve çift eylemli çekme hızı değerleri(Suchy 2006)

Malzeme	**Tek-Eylemli Çekme m/sn**	**Çift-Eylemli Çekme m/sn**
Çelik	0.3	0.15-0.25
Paslanmaz Çelik	0.2	0.1-0.15
Alüminyum alaşımı	0.25	0.15-0.2
Bakır	0.75	0.45
Pirinç	0.9	0.50

Derin çekme işlemi, mekanik veya hidrolik presler yardımı ile gerçekleştirilir. Hidrolik preslerde piston hızı sabit olduğu için mekanik preslere göre daha çok tercih edilir.

Zımba hızı aşağıdaki formül yardımı ile bulunabilir(Suchy 2006).

$Speed_{DR} = 2L_{ST}$(PS/min)(3.1)

Burada;

L_{ST}= Zımba vuruşun yüksekliği (mm)
PS/min= Dakikadaki zımba vuruş sayısı (adet/dk)

3.1.2 Çekme Derinliği

Çekme derinliği, zımbanın kalıp içerisindeki ilerleme miktarıdır. Yani, malzemenin kalıp içerisinde ulaştığı son nokta ile zımbanın parçaya temas ettiği noktalar arasındaki mesafedir. Çekme derinliği miktarı parçanın çeper kalınlığına ve ilk çapına bağlıdır.

Çekme derinliği aşağıdaki denklemler yardımı ile hesaplanabilir (Suchy 2006).

$$h = \frac{D^2 - d^2}{4d} \quad (3.2)$$

Burada;

h= parçanın çekme derinliği (mm)
D= taslak parçasının çapı (mm)
d= çekme sonucu oluşan parçanın ortalama çapı (mm)

Eğer taslak parça birden fazla çekme işlemine tabi tutuluyorsa her bir ayrı işlem için çekme derinliği hesaplanır (Suchy 2006).

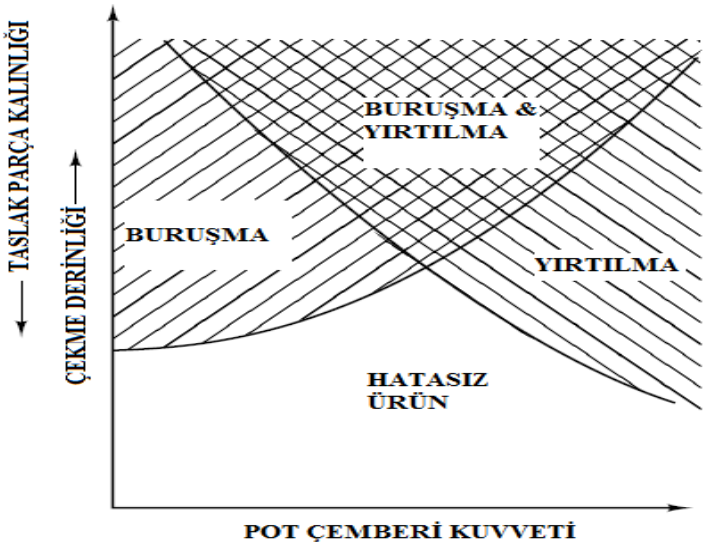
$$h_n = \frac{t(D^2 - d_n^2)}{4 d_n t_n} \quad (3.3)$$

Burada;

h_n= n defa çekilen parçanın çekme derinliği (mm)
t= taslak parçasının kalınlığı (mm)
D= taslak parçasının çapı (mm)
d_n= n defa çekilen parçanın ortalama çapı (mm)
t_n= n defa çekilen parçanın çeper kalınlığı (mm)

3.1.3 Pot Çemberi Kuvveti

Pot çemberi ile kalıp arasına yerleştirilen taslak parça, pot çemberine uygulanan kuvvet yardımı ile sıkıştırılır. Pot çemberine uygulanan kuvvet, yay kuvveti, hidrolik ya da pnömatik sistemler aracılığıyla uygulanır. Uygun seçilmiş bir pot çemberi kuvveti, derin çekmede taslak malzemede oluşabilecek buruşma ve yırtılma hatalarını önler. Pot çemberi kuvvetinin çok düşük olması durumunda elde edilen parçanın flanş kısımlarında buruşma (kırışma) meydana gelir. Bu kuvvetin çok yüksek olması durumunda ise parçada yırtılmalar meydana gelir (Şekil 3.3.).



Şekil 3.3. Buruşma ve yırtılma hatalarının pot çemberi kuvveti, parça kalınlığı ve çekme derinliği arasındaki ilişkisi (Black ve Kohser 2008)

Derin çekme işleminde, pot çemberi kullanımı taslak parça malzemesi, çeper kalınlığı, kalıp boşluğu çapı ve parça çapına bağlıdır. Kalıp boşluğunun çapı ile parçanın çapı arasındaki oran, derin çekme işleminde pot çemberini kullanma gerekliğini belirten önemli bir parametredir.

$$A = 50(z - \frac{\sqrt{t_0}}{\sqrt[3]{D_0}}) \qquad (3.4)$$

Burada;

z = Sabit sayısı derin çekme çeliği için 1.9
Pirinç için 1.95
Alüminyum için 2.0

$$A \geq \frac{100d}{D_0}\ ise\ pot\ çemberi\ gereklidir \qquad (3.5)$$

$$A < \frac{100d}{D_0}\ ise\ pot\ çemberi\ gereksizdir \qquad (3.6)$$

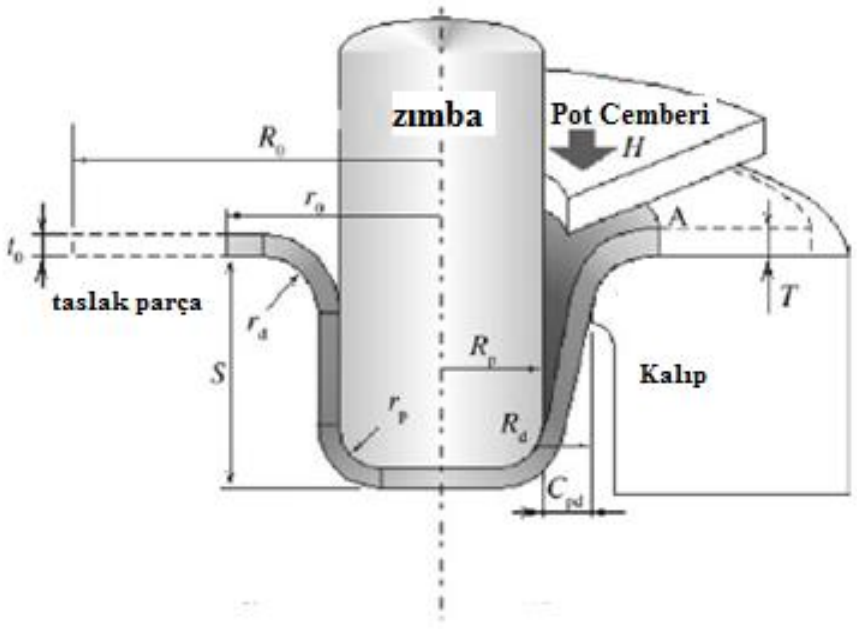
Pot çemberi kuvvetinin değeri kullanılan taslak malzeme türlerine bağlı olarak farklılık gösterir. Pot çemberine uygulanan kuvvet, etki ettiği yüzey alanın değerine bağlı olarak basınç birimi şeklinde ifade edilir. Genel olarak, pot çemberinin basınç değeri, çekme işleminde kullanılan malzemenin akma dayanımı ve çekme dayanımının ortalama değerlerinde yüzde 0,005 ya da 0,067 katı olarak alınır. Çizelge 3.2. malzeme türlerine göre bağlı olarak pot çemberinin yaklaşık basınç değerlerini göstermektedir. Pot çemberinin basınç değeri, malzeme türü ile birlikte ayrıca çekme adım sayısına ve zımbanın boyutuna da bağlıdır (Suchy 2006).

Çizelge 3.2. Farklı malzemelerde pot çemberi basınç değerleri (Suchy 2006)

Malzeme Türü	Basınç Değeri (MPa)
Derin çekme çeliği	2.0–3.0
Düşük karbonlu çelik	3.5
Alüminyum ve alaşımları	0.85–1.40
Alüminyum alaşımları, özel	3.5
Paslanmaz Çelik, genel	2.0–5.0
Paslanmaz Çelik, östenik	7.0
Bakır	1.25–1.75
Pirinç	1.40–2.0

3.1.4 Model Geometrisi

Derin çekme işleminde, istenilen şekilde parça elde etmek için modelin geometrisi tasarlanırken, zımbanın, kalıp boşluğunun ve pot çemberinin şekli çekilen parçanın kalitesini önemli ölçüde etkiler. Modelin geometrisi olarak düşünüldüğü zaman; zımba, kalıp, zımba ucu ve kalıp ağzı yarıçapı dikkate alınmaktadır. Şekil 3.4.zımba ucu ve kalıp ağzı yarıçapı, zımba ve kalıp yarıçapları değerleri, çekme boşluğu ve çekme derinliği gibi parametreler gösterilmiştir.



Şekil 3.4. Model geometrisi gösterimi; r_p zımba ucu yarıçapı, r_d kalıp ağzı yarıçapı, R_p zımba yarıçapı, R_d kalıp boşluğu yarıçapı, S çekme derinliği, C_{pd} çekme boşluğu(Yoshihara ve ark 2005).

Elde edilen üründe meydana gelebilecek hataları en az sayıya indirmek için modelin geometrisi çok iyi tasarlanmalıdır. Zımba ucunun ve kalıp ağzının yarıçapları büyüdükçe parça üzerinde kırışıklıklar meydana gelmektedir. Zımba ucu ve kalıp ağzı yarıçaplarının küçülmesi halinde yırtılmalar oluşmaktadır.

Taslak parçanın çeper kalınlığı arttıkça kalıp ağzının yarıçapı da artar. Çizelge 3.3.'de taslak parçanın çeper kalınlık değerine göre bazı kalıp ağzı yarıçap değerleri verilmiştir (Cerit 1996).

Çizelge 3.3.Taslak parçanın kalınlık değerine göre bazı kalıp ağzıyarıçapı değerleri

Taslak Parça Kalınlığı	0.4	0.8	1.2	1.6	2	2.4	3.2
KalıpKavisi	1.6	3.2	4.8	6.4	9.5	11	14

Kalıp ağzının yarıçap değeri için; taslak parça alüminyum ve pirinç kullanılacaksa aşağıdaki formül kullanılabilir (Cerit 1996).

$$R_k = 0{,}035\ [50 + (D - d)]\sqrt{s} \quad (3.7)$$

Burada;

R_k: Kalıpağzıyarıçapı (mm)
D: Taslak parçanın ilkçapı (mm)
s: Taslak malzeme kalınlığı (mm)
d: Elde edilen ürünün son çapı (mm) olarak verilmiştir.

Zımba ucunun yarıçap değeri ise kalıp ağzının yarıçap değerine bağlı olarak değişebilmektedir. Çok küçük "Rz" değerlerinde parçada yırtılmalar gözleneceği için büyük değerler verilmektedir. Derin çekme işlemlerinde genellikle zımba ucu ve kalıp ağzı yarıçapları arasındaki oran aşağıdaki bağıntılarla bulunmaktadır (Cerit 1996).

$$\frac{s}{D}100 > 0{,}6 \text{ ise } \mathrm{Rz} = \mathrm{Rk} \qquad (3.8)$$

$$\frac{s}{D}100 = 0{,}6 - 0{,}3 \text{ ise } \mathrm{Rz} = 1{,}5\ \mathrm{Rk} \qquad (3.9)$$

$$\frac{s}{D}100 < 0{,}3\ ise\ Rz = 2\ Rk \qquad (3.10)$$

Burada;
D: Taslak parçanın ilk çapı (mm)
s: Taslak malzeme kalınlığı (mm)

Çekme boncuğu ise, kalıbın üst duvarında bulunan, kalıp boşluğundan aşağıya doğru ilerleyen taslak parçasını yavaşlatan yapısal bir ektir. Yüksekliği ve köşelerindeki yarıçapların uzunluğuna göre parçanın kalıp içerisindeki ilerlemesi kontrol altına alınabilir. Aşırı büyük yükseklik ve küçük yarıçaplara sahip çekme boncuğu, parçanın kalıp boşluğu içerisinde çok yavaş ilerlemesinden dolayı parçada deformasyon sertleşmesine neden olabilir (Suchy 2006).

3.1.5 Taslak Malzemenin Türü ve Geometrisi

Derin çekme işleminde kullanılan taslak malzemenin türü, çeper kalınlığı ve çapı, parçanın çekilebilme kabiliyetini etkileyen en önemli parametrelerdir.

Taslak parçanın çap uzunluğuna göre, elde edilecek ürünün çapı hesaplanabilmektedir. Aşağıdaki denklemler, tek, iki ve üç adımlı çekme işlemleri için elde edilen çap uzunluklarını vermektedir (Suchy 2006).

Tek adımlı çekme işlemleri için:

$$d_1 = \frac{B_1 \times D}{100 - 0.635D} \qquad (3.11)$$

İki ve üç adımlı çekme işlemleri için:

$$d_2 = \frac{B_2 \times d_1}{100 - 0.635d_1} \qquad (3.12)$$

$$d_3 = \frac{B_2 \times d_2}{100 - 0.635d_2} \qquad (3.13)$$

Burada;

D= taslak parçanın çapı (mm)
d_1 = tek adımlı çekmedeki ürünün ortalama çapı (mm)
d_2 = iki adımlı çekmedeki ürünün ortalama çapı (mm)
d_3 = üç adımlı çekmedeki ürünün ortalama çapı (mm)
B_1veB_2 = çekilen parçanın çeper kalınlığına bağlı olan katsayı değerleri (Çizelge 3.4.)

Çizelge 3.4.B_1 ve B_2 değerleri

Taslak Parça Kalınlığı mm	B_1	B_2
0.38–0.46	61	74
0.53	58	73
0.56–0.61	56	72
0.69	54	71
0.79	50	70-71
1.57–2.77	47	70
3.18–6.35	51	65

Çekme işleminde, silindir kap şeklinde elde edilen ürünün nihai çapı taslak parçanın çeper kalınlığına ve malzeme türüne bağlıdır. Erişkin (1986), bir ve daha fazla adımlı çekme işlemlerinde malzeme türü ve çeper kalınlığına bağlı olarak parçanın çapındaki azalma oranlarını yüzde olarak göstermiştir (Çizelge 3.5.).

Çizelge 3.5. Farklı alzeme ve çeper kalınlık değerlerinde, taslak parçanın çapında meydana gelen azalma miktarı (%) (Gürün 2008)

	Baskı plakalı çekme		Baskı plakasız çekme
	Birinci çekmede azalma oranı, (d/D) (%)	İki ve daha fazla adımlı çekmelerde azalma oranı, (d/D) (%)	azalma oranı, (d/D) (%)
Çelik Sac Kalınlığı 2 mm den küçük Kalınlığı 2 mm den büyük	 0,56 0,56	 0,58 0,83	 0,9-0,93
Pirinç, Bakır, Gümüş Kalınlığı 2 mm den küçük Kalınlığı 2 mm den büyük	 0,50 0,52	 0,75 0,75	 0,9-0,93 0,9-0,93
Çinko	0,75	0,91	0,9-0,93
Alüminyum Kalınlığı 2 mm den küçük Kalınlığı 2 mm den büyük	 0,55 0,55	 0,80 0,83	 0,9-0,93 0,9-0,93
Paslanmaz Çelik	0,60	0,80	0,9-0,93

3.1.6 Çekme Boşluğu

Çekme boşluğu, zımba yarıçapı ve kalıp boşluğunun yarıçapı arasındaki fark olarak tanımlanır ve "*c"* ile gösterilir ($c=R_d-R_p$).Bu değer derin çekme işleminde kullanılan taslak parçanın kalınlığı ile doğru orantılıdır. Çekme boşluğuna, taslak parçanın çeper kalınlığının dışında işlemin baskı plakalı ya da baskı plakasız olarak gerçekleşmesi, işlemin adım sayısı, taslak parçanın fiziksel özellikleri, prizmatik ya da silindirik çekim hali vb. etki eder(Cerit 1996).

Çekme boşluğunun uygundeğerde olması önemlidir. Boşluğun yetersiz olması durumunda, sürtünme değerleri büyür, kalıp aşın ısınr ve taslak parça aşırı zorlanır. Bu boşluk aşırı büyük tutulursa katlanma ve kırışma olur. Aynca, kullanılan taslak parçanın levha ya da rulo halinde olması da toleranslarının farklılığı nedeniyle çekme boşluğuna etki eder. Çekme gerilmesi düşük olan taslak malzemelerde boşluk değeri artar, büyük olan malzemelerde ise boşluk azalır. Yalnız paslanmaz çeliklerde gerilmenin değeri büyük olmasına rağmen bu boşluk büyük seçilir. Tekrarlı çekme işlemlerinde ilk çekme ile sonraki çekmelerde de boşluklar farklıdır. Ölçüye getirme çekmeleri dışındaki işlemlerde ise, ek çekmelerdeki boşluklar, ilk çekmeye göre biraz fazla alınır. Çekme derinliği fazla olan parçalarda çekme derinliği sığ çekmeye göre daha fazla alınır (Cerit 1996).

Çekme boşluğu için farklı eşitlikler verilmektedir. Genel olarak, derin çekme uygulamalarında çekme boşluğu değeri için 3.11. denklemi kullanılmaktadır (Suchy 2006).

c=çekme boşluğu (mm) = 1.4t (t= taslak parça kalınlığı) (mm) (3.14)

Flanşlı parçaların çekme işlemlerinde flanşsız parçalara göre çekme boşluğu daha büyük değerlerde olabilir.

CSN 22 7301'e göre (Ulusal Çek Standartı, DIN'e benzer olarak) ise;

$$c = 1.2t \qquad (3.15)$$

olarak gösterilmiştir (Suchy 2006).

Çekme boşluğu için Oehler eşitliği;

$$c = t + k\sqrt{10t} \qquad (3.16)$$

olarak tanımlanmaktadır.

Burada;

Çelik için $k = 0.07$
Demir içermeyen metaller için $k = 0.04$
Alüminyum için $k = 0.02$ olarak alınır.

Ayrıca Çizelge 3.6.'da farklı malzeme türlerine göre farklı çekme boşlukları değerleri verilmiştir (Suchy 2006).

Çizelge 3.6. Farklı malzeme türleri için çekme boşluğu değerleri

Malzeme	Çekme Boşluğu
Alüminyum	1.25t
Çelik	(1.1 - 1.25)t
Paslanmaz Çelik	(1.75 - 2.25)t

3.1.7 Yağlama

Yağlama, birçok plastik şekillendirme işleminde oluğu gibi derin çekme işleminde de önemli parametrelerden biridir. Çekme işlemi ile birlikte parça üzerinde meydana gelen yüksek sıcaklık, ürün kalitesini istenmeyen ölçülerde etkiler. Yağlama ile çekme işlemi sırasında oluşan sürtünme azaltılarak, parça aşırı ısınmadan kaynaklı hatalardan etkilenmez. Yağlamanın fazla olması ise derin çekmede kullanılan araçlar üzerinde aşırı kayganlık oluşturur. Aşırı kayganlıktan dolayı zımba ve kalıp zarar görebilir. Her malzemenin farklı sürtünme katsayısına sahip olmasından dolayı farklı yağlarla yağlama işlemi yapılır (Çizelge 3.7.) (Cerit 1996)..

Çizelge 3.7. Farklı malzemeler için kullanılan yağlar(Cerit 1996)

	Sığ Çekme	Derin Çekme	Çok Derin Çekme
Çelik	**1.** Mineral yağ (orta kalın-kalın vizkoziteli) **2.** Sabun çözeltisi (%0.03-2) **3.** İç yağı, ya da sabun esaslı karışım içinde mineral yağlı ve hayvansal yağlı **4.** İnce domuz yağı ve diğer hayvansal yağ karışımları (% 10-30 hayvansal yağ)	**1.** Hayvansal yağ ya da litopon (baryum sülfat üstübeci) ve benzeri maddelerle doldurulmuş sabun esaslıkarışım içinde yağlar. **2.** Hayvansal yağ ya da sülfiirize yağ içeren sabun esaslı karışım içindeki yağlar. **3.** Hayvansal yağ ya da sülfiirize yağlı ya da dolgu maddeli sabun esaslı karışım içindeki yağlar. **4.** Sabun çözeltisi ya da yağlayıcı karışım eklenerek çelik üzerinde söktürülmüş metaller. **5.** Sabun çözeltisi ya da yağlayıcı karışımı eklenmiş fosfat ve pas çözeltileri. **6.** Kuru sabun filmi.	**1.** Fosfat, hafif pas ya da metal örtülü kuru sabun ya da balmumu tabakası, **2.** Dolgu maddeli ya da bazen sülfürize yağlı karışımlar eklenmiş sülfît ya da fosfat tabakası, **3.** Dolgu maddesi ve sülfit kombinasyonlu kükürt içeren karışım ve yağlayıcılar **4.**Dolgu maddesi eklenmiş sülfürize yağ esaslı karışımlar
Paslanmaz Çelikler	**1.** Hint yağı ya da mısır yağı, **2.** Sabun karışımı eklenmiş hint yağı, **3.** Balmumlu ya da yağlı kağıt.	**1.** İşlemden önce kurutulmuş toz grafit. **2.** Ağır konsantrasyonda dayanıklı dolgulu karışımlı yağlayıcılar. **3.** Katı balmumu filmi.	**1.** Litopon (baryum sülfat üstübeci) ve kaynatılmış keten tohumu yağı. **2.** Kıvamlı üstübeç ve kaynatılmış keten tohumu yağı.
Pirinç	**1.** Sabun çözeltisi (%0.03-2) **2.** Sabunlu yağ ya da hayvansal yağ, **3.** Domuz yağı karışımları (mineral yağ içinde % 10-20 domuz yağı).	**1.** Sabun çözeltisi, sabun oranı yüksek (%39-42) yağ asidi ve serbest alkali %0.07 den az olmalıdır. Çözelti düşük konsantrasyonlu olmalı (%0.3-l) fakat yağlayıycı iş parçası ile en az 30 saniye temas etmelidir. Orta ve ağır çekmelerde istenirse %l-2 lik sabun çözeltisine yaklaşık %1 eritilmiş donyağı ve %0.25 stearik asit eklenir. **2.** Sabun karışımlı zengin hayvansalyağ karışımları, **3.** Domuz yağı karışımları (mineral yağ içinde %25-50 domuz yağı). Karışımın serbest yağ asidi miktarı % 1.5-5 olmalıdır.	**1.** %l-2 donyağı ya da %0.25 stearik asit içeren %l-2 lik sabun çözeltileri, yağlayıcı ve iş parçası temas etmelidir. **2.** Zengin domuz yağı karışımları (%50-100) **3.** Uygun kuru sabun.
Alüminyum	**1.** İşlemin zorluğuna göre yükselen viskozitede mineral yağ, **2.** Mineral yağ içinde hayvansal yağ-yağ karışımları (%10-20 hayvansal yağ) ya da petrol peltesi.	**1.** Parafın ve donyağı (iç yağı), **2.** Sülfürize hayvansal yağ karışımları (%10-15; daha iyisi %10 hayvansal yağ ile zenginleştirilmiş).	**1.** Kuru sabun ya da balmumu filmi (tabakası), **2.** Dolgu maddeli mineral yağ ya da hayvansal yağ karışımları ya da sülfürize yağ karışımları, **3.** Dolgu maddeli sabun suyu içinde hayvansal yağ karışımları.

Çelik, alüminyum ve alüminyum alaşımları için farklı yağlar kullanılarak elde edilen sürtünme değerleri Çizelge 3.8.'de verilmiştir (Cerit 1996).

Çizelge 3.8.Çelik, alüminyum ve alüminyum alaşımının farklı yağlama ortamlarındaki sürtünme değerleri

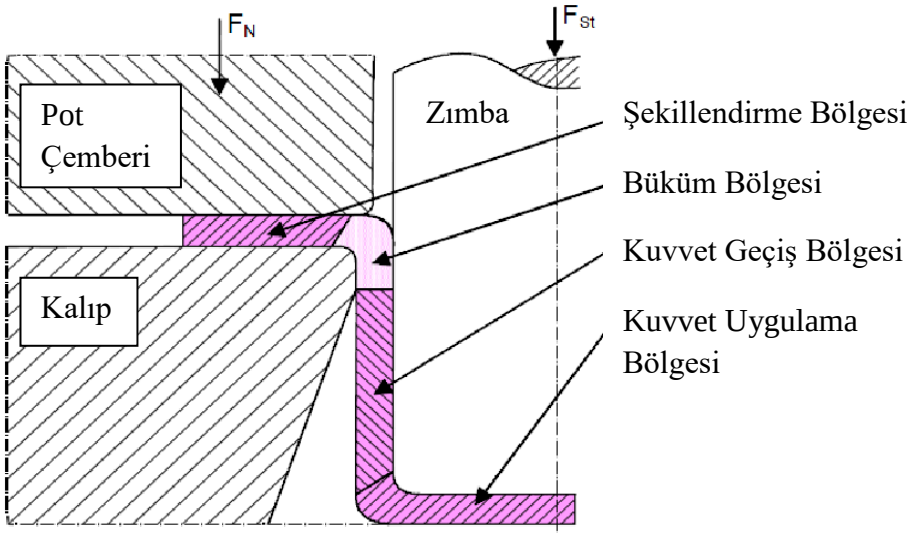
Yağlama Maddesi	**Taslak Parçası Malzemesi**		
	Çelik sac	Alüminyum	Al. Alaşımı
Dolgu maddesiz makina yağı	0.14-0.16	0.15	0.16
Dolgu maddeli makina yağı	0.06-0.10	0.10	0.08-0.10
Kuru çekme	0.18-0.20	0.25	0.22

3.1.8 Derin Çekme İşleminde Oluşan Gerilme Bölgeleri

Derin çekme işlemi, parça üzerinde çekme ve basma gerilmelerini aynı anda meydana getiren karmaşık bir işlemdir. Çekme ve basma gerilmelerini oluşturan en büyük faktör zımba kuvveti ve pot çemberi kuvvetidir. Bu gerilmelerden dolayı 4 farklı gerilme bölgesi oluşur. Bunlar;

- Şekillendirme bölgesi
- Büküm bölgesi
- Kuvvet geçiş bölgesi
- Kuvvet uygulama bölgesi

olarak sıralanabilir. Derin çekme işlemi sonucu parça üzerinde oluşan bölgeler Şekil 3.5.'de gösterilmiştir (Yalçın 2010).

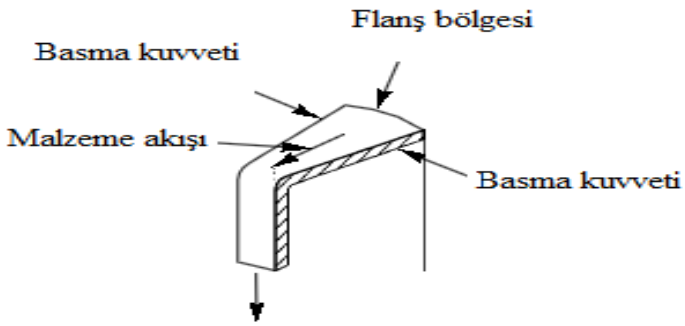


Şekil 3.5. Derin çekme işleminde farklı gerilme bölgeleri (Siegert ve Wagner 1994)

Kuvvet uygulama bölgesi,taslak parçasının zımba ucunun hemen altında kalan kısmında meydana gelen bölgedir. Bu bölgede, çekme kuvvetleri oluştuğundan dolayı çeperin kalınlığı azalır. Hemen sonrasında kuvvet geçiş bölgesi meydana gelir. Radyal çekim kuvvetlerinden dolayı bu bölgede boyuna uzama gerçekleşir ve parça çeper kalınlığında azalma olur. Kırışıklık ve yırtılma gibi hataların meydana geldiği bölgedir (Yalçın 2010).

Büküm bölgesinde, parça bükülerek kalıbın içerisine doğru hareket eder. Bu bölgede radyal çekim kuvvetlerinin yanısıra çevresel basma kuvvetleri de gözlenir. Çekme kuvveti değerlerinin çok yüksek olmasından dolayı incelme meydana gelir. Bu bölgedeki kuvvetlerin etkisi, kalıp ağzı yarıçapının uzunluğu ile doğrudan bağlantılıdır. Çok düşük yarıçap değerlerinde, parça üzerinde yırtılma görülebilir (Yalçın 2010).

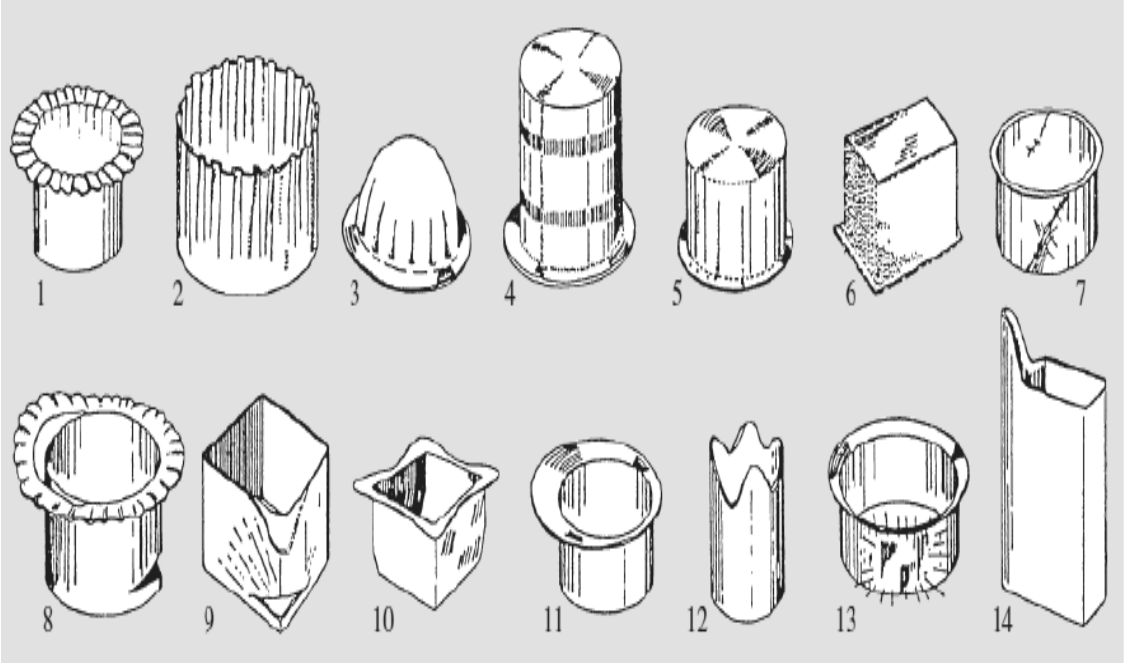
Şekillendirme bölgesi olarak adlandırılan, parçanın flanş kısmında radyal çekme kuvvetleri ve çevresel basma kuvvetleri büyük rol oynamaktadır (Şekil 3.6.). Çevresel basma kuvveti değerlerinin çok yüksek olması bu bölgede kalınlığın artmasına neden olmaktadır. Çok yüksek basma kuvvetleri, flanş bölgesi üzerinde burulmalara neden olmaktadır. Burulmalar neticesinde parça üzerinde kırışıklık hatası oluşmaktadır. Pot çemberi kuuveti ve çekme boncuğu tasarımı bu bölgede oluşan basma kuvvetlerine karşı alınan tedbir olarak düşünülebilir (Yalçın 2010).



Şekil 3.6. Derin çekme sonucu oluşan basma kuvvetleri (Black ve Kohser 2008)

3.1.9 Derin Çekme İşleminde Oluşan Hatalar

Çok hassas ve karmaşık bir işlem olan derin çekme işleminde, parametrelerin ve kalıp tasarımının yanlış seçilmesinden kaynaklanan birçok hata gözlenmektedir. Meydana gelen başlıca hatalar; flanş ve duvar bölgesindeki kırışıklıklar, yırtılmalar, köşelerdeki yırtılma, buruşma, cidar incelmesi, kötü yüzey görünümü (portakal kabuğu görüntüsü), katlanma, köşe katlanması ve tarak oluşumu (taraklanma) olarak görülür (Şekil 3.7.).



Şekil 3.7. Derin çekme sonucu oluşan hatalar 1. Flanş bölgesinde kırışıklık 2. Duvar bölgesinde kırışıklık 3. Parçada oluşan kırışıklık 4. Duvarda oluşan çizgiler 5. Parçada oluşan izler 6. Portakal yüzeyi 7. Lüder şeritleri 8. Parça alt yüzeyinin yırtılması, 9. Köşe yırtılaması 10,11,12. Katlanma ve kulaklanma 13,14. Köşe katlanması (Grote ve Antonsson 2011)

Flanş ve duvar bölgesinde oluşan kırışıklık, derin çekme işlemlerinde sık görülen bir durumdur. Bu durumun ortaya çıkmasının nedeni flanş bölgesinde etkili olan basma kuvvetlerinin çok yüksek değerlere çıkmasıdır. Kırışma hatasının önüne geçmek için 2 farklı metod geliştirilmiştir. Birincisi, pot çemberi kullanılarak, parçanın flanş bölgesinde etkili olan basma kuvvetlerinin etkisini azaltmaktır. İkinci yöntem ise, çekme boncuğunun kullanımıdır. Kalıbın taslak parçasıyla temas eden üst yüzeyinde yer alan çekme boncukları sayesinde, parçanın akışı kontrol altına alınabilmektedir. Parça üzerinde oluşan gerinim dağılımı, çekme boncukları vasıtasıyla değiştirilebilmektedir. Flanş bölgesindeki kalınlışma bir miktar azaltılmakta ve kırışıklığın önüne geçilebilmektedir.

Yırtılma hatası, parçanın en çok inceldiği köşe bölgelerinde görülür. Köşe bölgelerinde çekme kuvvetlerinin şiddetini arttıran veya azaltan bir faktör olan kalıp ağzı ve zımba ucu yarıçap değerleri küçüldükçe malzemenin yırtılma olasılığı artar. Ayrıca, taslak parçanın çapı ile zımba çapı arasındaki oran olan çekme oranı arttıkça parçanın alt kısmında yırtılma görülebilir. Bunlara ek olarak, pot çemberi kuvvetinin aşırı değerlerinde, yetersiz çekme boşluklarında, parçalar arasındaki aşırı yüksek sürtünme değerleri yırtılmaya sebep olmaktadır (Suchy 2006).

Cidar incelmesi olarak bilinen, parçanın duvar kısmında meydana gelen aşırı incelme, çok düşük olan çekme boşlukları sonucu oluşmaktadır. Çekme boşluğunun çok düşük olmasından dolayı, kalıp boşluğu içerisinde zımba ve kalıp iç duvarı arasında

sıkışan parça, yüksek değerlerde olan radyal çekme kuvvetlerine maruz kalmaktadır. Böylece parça duvarında aşırı incelme ve dolayısı ile parça mukavemetinde azalma olur. Çekme boşluğu değerinin çok yüksek olması ise, parça duvarında istenmeyen buruşmalara neden olmaktadır.

Kötü yüzey görünümüne neden olan portakal kabuğu görüntüsü, parça üzerinde oluşan pürüzlenmenin bir sonucudur. Pürüzlenme, sac malzemenin kalitesiyle ilgili olduğu kadar, pot çemberinin yetersiz olması ile de bağlantılıdır. Ayrıca, kalıp boşluğundan dışarıya hava çıkışının olmaması pürüzlenmeye neden olan etkenlerden biridir.

Katlanma, genellikle parçanın köşe ve kenarlarında meydana gelen fazla yağlama, kalıp ağzı yarıçap değerinin çok yüksek olması, pot çemberi kuvveti parça üzerinde homojen dağılmamış olması, çekme boşluğunun uygun olmaması gibi faktörler sonucu ortaya çıkar.

Tarak oluşumu veya diğer adıyla kulaklanma hatası, uygun olmayan çekme boşluğu, zımba veya kalıbın eksenden kaçık olması, sac malzemenin kalıba uygun yerleştirilmemesi ve yetersiz yağlama gibi durumlarda ortaya çıkar.

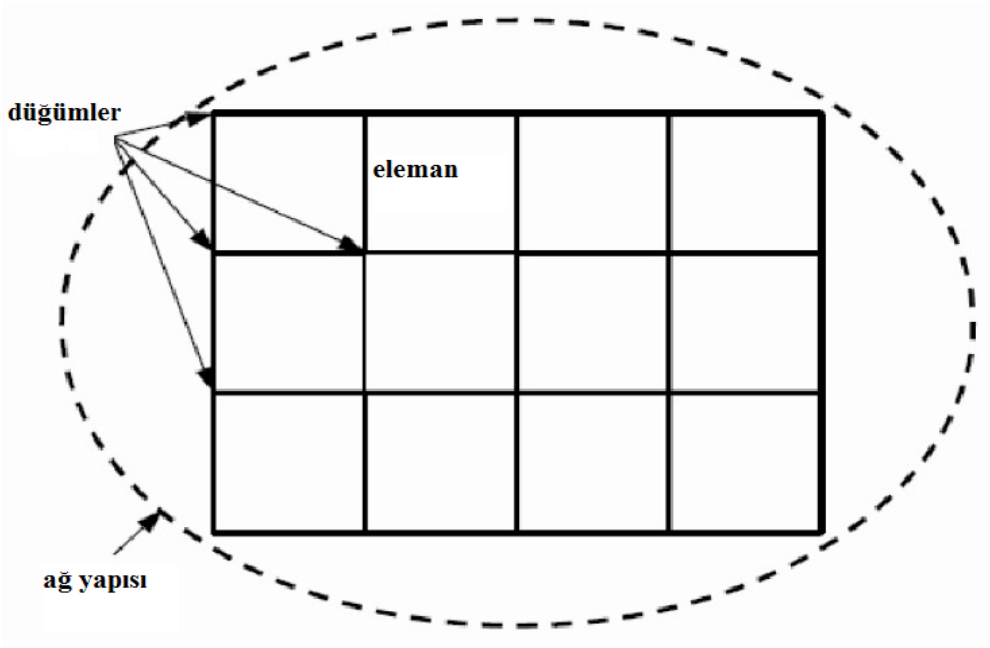
Geleneksel olarak deneme yanılma yöntemi ile en az hataya sahip ürün elde etme işlemi bilgisayar yardımı ile işlem simülasyon yapılarak üründe oluşacak hatalar önceden hesaplanabilmektedir. Kırışıklık, parça kalınlığının incelmesi, yırtılma gibi birçok hata bilgisayar ortamında sonlu elemanlar yöntemi ile analiz yapan programlar sayesinde gözlenebilmektedir.

3.2 Sonlu Elemanlar Yöntemi

Mühendislik uygulamaları kapsamında yapılan çalışmaların, daha iyi anlaşılması ve geliştirilmesi bakımından sonuçlarının bilinmesi şarttır. Karmaşık ve anlaşılması güç yapısından dolayı birçok mühendislik uygulaması sonuçlarının elde edilmesi noktasında oldukça zahmetlidir. Yapılacak bir işlemin hesaplamaları ve sonuçların elde edilmesi günlerce hatta haftalarca sürebilmektedir. Ayrıca, mühendislik hesapları yapılmadan elde edilmek istenen ürünlerde, deneme-yanılma yoluyla yapılan incelemeler hem zaman hem de maddi olarak üretimi olumsuz yönde etkilemektedir. Çok hızlı işlem yapma kapasitesine sahip bilgisayarlar sayesinde çözümü çok zaman alan, zor mühendislik uygulamaları kolayca çözülebilmektedir. Sonlu elemanlar yöntemi ile çözüm yapan ticari bilgisayar programları ile birlikte, farklı birçok mühendislik alanında çalışma yapılabilmektedir. Üretime geçmeden, yaptığı simülasyon ve sonuçların analizi ile birlikte zaman ve para kaybına neden olan deneme yanılma yöntemini ortadan kaldırmaktadır. Bu üstün özellikleri sayesinde, sonlu elemanlar yöntemi endüstride ve akademik çalışmalarda yoğun bir biçimde kullanılmaktadır.

Sonlu elemanlar analizi, sınır değer problemlerinin sonuçlarını yaklaşık olarak hesaplayan ve simüle eden bir sayısal metodtur. Bu metod ile metal şekillendirme, termodinamik problemler, statik analizler, akışkan problemleri gibi farklıalanlarda hesaplamalar yapmak mümkündür. Bu analizler sonucunda, parça üzerinde oluşan deformasyon, gerilme, gerinim, sıcaklık, hız güvenlik katsayısı gibi birçok veri sayısal olarak hesaplanabilmektedir.

Sonlu elemanlar yöntemini kullanarak analiz yapan ticari programlar, çözümü yapılacak fiziksel problemi sonlu sayıda ideal elemanlara böler. Bu elemanlar arasındaki bağlantı düğümleri ile birlikte sağlanır. Problemin fonksiyonu ve türevi bu düğümlerin içerisinde tanımlanmıştır. Sonlu sayıdaki bu eleman ve düğümler, ağ yapısı sistemini (mesh) meydana getirir (Şekil 3.8.).



Şekil 3.8. Sonlu elemanlar metodu ile analiz yapan ticari programlardaki ağ yapısının gösterimi (Yalçın 2010)

Ağ yapısı modeli, fiziksel problemde yer alan, rijit (şekil değiştirmeyen) ve rijit olmayan (şekil değiştiren) bütün elemanların özelliklerini yansıtırlar. Rijit olan elemanların ağ yapısı, rijit olmayan elemanların ağ yapısından farklı olarak rijit elemanın sadece şeklini temsil eder. Rijit olmayan elemanın ağ yapısı ise elemanın şeklini ve malzeme özelliklerini temsil eder. Ağ yapısı içerisinde yer alan sonlu elemanlar ve düğümlerin her biri birer fonksiyon olduğundan, bu fonksiyonların çözümü iterasyonlar şeklinde yapılır. Ağ yapısı içerisindeki elemanların şekli ne kadar küçük olursa eleman sayısıda o kadar artar ve sonuç olarakproblemin çözümü için yapılan iterasyon sayısı fazla olur. Böylece elde edilen sonucun hassasiyeti artar. Ancak işlem süresi uzar. Eğer ağ yapısı içerisindeki elemanların şekli büyürse, ağ içerisindeki eleman miktarı da azalır. Buna bağlı olarak problemin çözümü için yapılan iterasyon

sayısı ve elde edilen çözümün hassasiyeti azalır. İşlem süresi de azalan iterasyon sayısı ile birlikte azalır. Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapılan analizlerde ağ yapısı içerisindeki elemanların sayısı en uygun bir seviyede tutularak, uygun bir işlem süresinde en iyi hassasiyete sahip sonuçlar elde etmek istenir.

3.2.1 Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Analiz Metodu

Sonlu elemanlar yöntemi ile problemin analizini yapmak için bazı adımların bilinmesi gerekmektedir. Bu adımlar;

1. Problem tipinin (statik, dinamik, termodinamik) belirlenmesi.

2. Bilgisayar destekli çizim programları ya da analiz programları içerisinde gömülü çizim programları kullanılarak iş parçasının ve araçların şekillerinin oluşturulması.

3. İş parçasının, elastik, elasto-plastik, rijit-plastik gibi malzeme davranışlarının ve mekanik özelliklerinin tanımlanması.

4. Modelin hareketli ve sabit parçaları, temas yüzeylerinin, temas türlerinin (kaynaklı birleşme, sürtünmeli veya sürtünmesiz birleşme vb.) sürtünme verileri gibi sınır koşullarının belirlenmesi.

5. Sonlu eleman ağ yapısı, türü, zaman adımları ve sonuç parametreleri olarak sıralanabilir.

3.2.2 Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Yapılan Analizlerin Avantajları

1. Özellikle endüstride ve akademik çalışmalarda, pratik uygulamalardan ve deneysel çalışmalardan önce işlemin bilgisayar ortamında yapılması, işlem öncesi tedbirlerin alınmasında büyük rol oynamaktadır.

2. Pratikte deneme-yanılma gibi maddi ve zaman kaybına neden olan işlemler yerine, bilgisayar ortamında daha hızlı ve ekonomik bir şekilde yapılmasına olanak sağlamaktadır.

3. İçeridiği çeşitli ağ örgüsü modelleri sayesinde çok farklı karmaşık şekillere sahip problemlerin çözümünü kolaylaştırmaktadır.

4. Sonradan tanımlanabilir malzeme özellikleri ve kütüphanesinde içerdiği farklı malzemeler, problem çeşitliliğini arttırmaktadır.

5. Problemin sınır koşulları model üzerine kolay bir şekilde uygulanabilir.

6. Problemler 3 boyutlu veya 2 boyutlu olarak tanımlanabilir.

3.2.3 Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Yapılan Analizlerin Dezavantajları

1. Sonlu elemanlar yöntemi ile çözüm yapan ticari bilgisayar programları, yüksek kapasiteli bilgisayarlara gereksinim duyarlar.

2. Gerçekçi sonuçlar almak için, problemin çok iyi tanımlanması gerekmektedir.

3. Çok hassas sonuçlar almak için, ağ yapısı çok sık olmalıdır. Dolayısıyla işlem süresi artmaktadır.

3.2.4 Sonlu Elemanlar Yöntemindeki Algoritmalar

Sayısal simülasyon çözücüler, iki ana algoritmaya sahiptir. Bu algoritmalar eksplisit ve implisit olarak adlandırılır.

Eksplisit yöntem, genel olarak metal şekillendirme işlemlerinde kullanılırlar. Eksplisit yöntem; dinamik geçiş analizlerinde, lineer olmayan analizlerde, mekanik kırılma ve kopma gibi lineer olmayan zamana bağlı problemlerin analizlerinde kullanılır. Bu tipproblemlere; havacılıkta kuş çarpması, otomotivde çarpısma, devrilme simülasyonları,gemi tasımacılıgında iskeleye çarpma simülasyonu, insaat mühendisliginde yıkılmasimülasyonu ve benzeri problemler örnek olarak gösterilebilir.

Eksplisit yöntemlerle analiz yapılacak ise bazı hususlara dikkat edilmesi gerekmektedir. Bu hususlardan biri, ağ yapısında yer alan elemanların şekilleridir. Eksplisit yöntemlerle yapılan analizlerde tanımlanan ağ yapıları üçgen, piramit ve tetragonal prizma şeklindeki elemanlar kullanılmamalıdır. Küçük boyuttaki elemanlardan kaçınılmalıdır. (Çetin 2007).

İmplisit yöntem ise zamana bağlı olmayan, durağan problemlerin çözümünde tercih edilirler. Çelik konstrüksiyonların yük analizinde, civata bağlantılı mekanik parçalardaki dayanım, basınçlı kaplarda oluşan gerilme gibi problemler örnek gösterilebilir.

Eksplisit yöntem implisit yöntemine göre daha hızlı sonuç vermektedir. Eksplisit yöntemdeproblemin analizi ile elde edilen kararsız sonuçların değerlendirilmesi implisit yöntemine göre daha kararlıdır. Kararsız sonuçlar, derin çekme işlemi sonucu elde edilen parçada oluşan kırışıklık ya da buruşma hatası sonucu oluşmaktadır. Kısaca, kırışıklık problemi eksplisit yöntemi ile daha sağlıklı bir şekilde görülebilmektedir. Eksplisit yöntemin, implisit yönteme göre birçok üstünlük içermesine karşı bazı dezavantajları da vardır. Model içerisinde eleman sayısı arttıkça işlemin çözüm süresi uzamaktadır. Daha hızlı sonuç elde edilebilmesi içini ağ örgüsü yapısı dört köşeli şekillere sahip elemanlardan oluşmalıdır. Ancak sonuçların doğruluk oranı azalmaktadır.

Eksplisit ve implisit yöntemler arasındaki temel farklar Çizelge 3.9.'de kısaca verilmiştir.

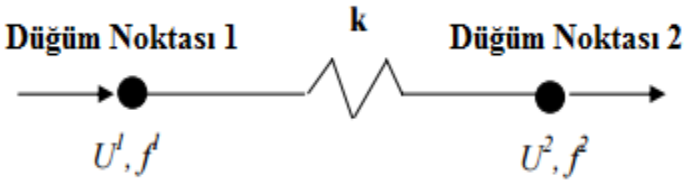
Çizelge 3.9. Eksplisit ve implisit yöntemler arasındaki temel farklar

Eksplisit Yöntem	**İmplisit Yöntem**
Çok düşük zaman adımları gerektirir.	Yüksek zaman adımları gerektirir.
Düşük zaman adımlarında gerçekçi sonuçlar verir.	Yüksek deformasyonlarda, yüksek temas yüzeylerinde ve lineer olmayan malzeme özelliklerinde gerçekçi sonuçlar vermez.
Yüksek CPU zamanı gerektirir.	Düşük CPU zamanı gerektirir.
Lineer olmayan malzeme davranışlarında iyi sonuç veririr.	Durağan davranışlarda iyi sonuç veririr.
Düşük hafıza gerektirir.	Yüksek hafıza gerektirir.

3.2.5 Sonlu Elemanlar Yönteminin Matematiği

Sonlu elemanlar yöntemi ile çözüm yapan programlar, üzerinde işlem yaptığı parçalar üzerinde ağ örgüsü modeli oluşturur. Ağ örgüsü modeli üzerinde bulunan her bir düğüm noktası, beklenen sonuçları veren, probleme özgü denklemleri içerirler.

Bu denklemlerden biri, "eleman rijitlik" denklemidir. Şekil 3.9.'da basit olarak farklı 2 düğüm noktası (Düğüm noktası 1 ve düğüm noktası 2) arasındaki eleman rijitliği ile alakalı parametreler gösterilmiştir (Sönmez 2005). Burada, "U" düğüm noktasının yer değiştirmesi, "k" yayın rijitlik katsayısı, "f" düğüm noktası üzerinde etki eden kuvvettir.



Şekil 3.9.2 düğüm noktası arasındaki rijitlik elemanları

Düğüm noktasına etki eden kuvvetler, yay kuvveti olarak düşünülür. Her iki düğüm noktasına etki eden kuvvetleri eşitlersek denklem 3.17, 3.18 ve 3.19 elde edilir.

$$f^1 = k.(U^1-U^2) \quad (3.17)$$

$$f^2 = -k.(U^1-U^2) \quad (3.18)$$

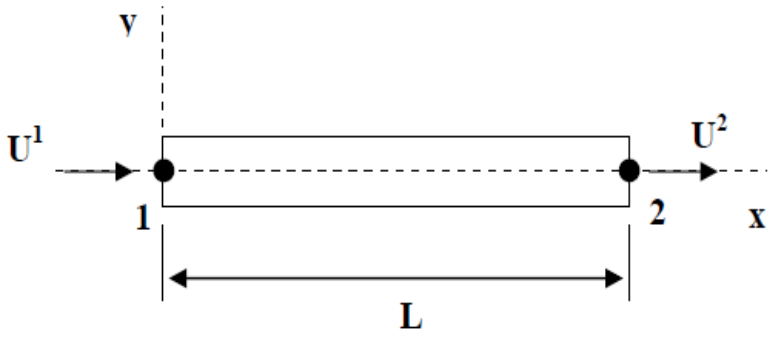
$$f^1=f^2 \quad (3.19)$$

Yukarıdaki denklemler denklem 3.21'de gösterildiği gibi matris formunda da yazılabilir.

$$\{f\} = [k].\{U\} \qquad (3.20)$$

$$\begin{pmatrix} f^1 \\ f^2 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} k & -k \\ -k & k \end{bmatrix} . \begin{pmatrix} U^1 \\ U^1 \end{pmatrix} \qquad (3.21)$$

Sonlu elemanlar yönteminde kullanılan denklemlerden diğeri ise "şekil fonksiyonu" denklemidir. Şekil 3.10.'da iki düğüm noktası yerel koordinat sisteminde gösterilmiştir (Sönmez 2005).



Şekil 3.10. Yerel koordinat sisteminde iki düğüm noktası

Değişkeni "x" olan U fonksiyonun denklemi U(x);

$$U(x) = Ax+B \qquad (3.22)$$

olarak yazılabilir.

Bilinmeyen A ve B katsayıları, U(x) denklemine sınır koşulları uygulanarak bulunabilir.

$$U(0) = U^1 \text{ve } U(L) = U^2 \qquad (3.23)$$

Yukardaki 3.22 ve 3.23 numaralı denklemlerin ortak çözümünden denklem 3.24 elde edilir.

$$U(x) = \left(1 - \frac{x}{L}\right) . U^1 + \left(\frac{x}{L}\right) . U^2 \qquad (3.24)$$

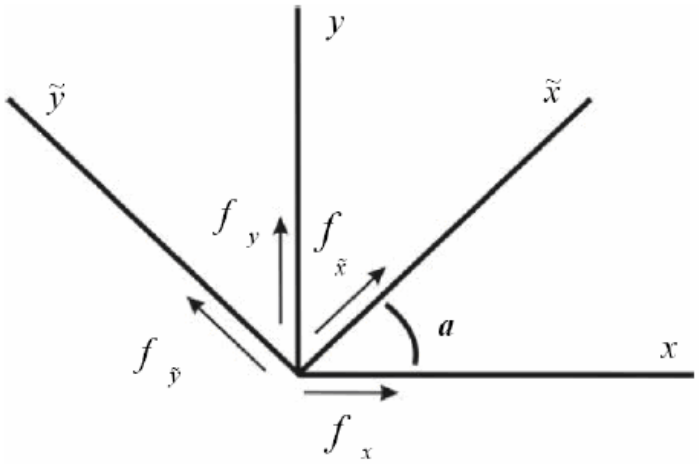
Denklemdeki U^1 ve U^2 değerlerinin çarpanları N^1 ve N^2 olarak gösterilebilir.

$$U(x) = N^1 \cdot U^1 + N^2 \cdot U^2 \qquad (3.25)$$

Denklem 3.22, 3.26'da görüldüğü üzere matris formunda da yazılabilir.

$$U(x) = [N] \cdot \{U\} \qquad (3.26)$$

Sonlu elemanlar yönteminde yer alan bir diğer fonksiyon türü "dönüştürme fonksiyonu" dur. Dönüştürme matrisi, yerel koordinat sisteminde bulunan elemanı polar koordinat sistemine taşımak için kullanılır.



Şekil 3.11. Yerel koordinat sisteminin transformasyonu

Şekil 3.11.'de iki farklı koordinat sistemi arasındaki α açısı yardımı ile bu koordinat sistemleri arasındaki ilişki bulunabilir.

$$f_x^1 = f_{\tilde{x}}^1 . \cos\alpha \qquad (3.27)$$

$$f_y^1 = f_{\tilde{y}}^1 . \cos\alpha \qquad (3.28)$$

Matris formda bütün değişkenler bir arada yazılabilir.

$$\begin{Bmatrix} f_x^1 \\ f_y^1 \\ f_x^2 \\ f_y^2 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\alpha & 0 \\ \sin\alpha & 0 \\ 0 & \cos\alpha \\ 0 & \sin\alpha \end{bmatrix} . \begin{Bmatrix} f_{\tilde{x}}^1 \\ f_{\tilde{y}}^1 \end{Bmatrix} \qquad (3.29)$$

Genel olarak, dönüştürme denklemi, dönüştürme matrisi ile ifade edilir.

$$\{f\} = [A]^T \cdot \{f\} \qquad (3.30)$$

Denklem 3.30. ile denklem 3.17'nin ortak çözümünden denklem 3.31. elde edilir.

$$\{f\} = [A]^T \cdot [K] \cdot \{U\} \qquad (3.31)$$

Kuvvet denklemlerinde olduğu gibi, yerdeğiştirme denklemleri de dönüştürme fonksiyonu yardımı ile tekrar yazılabilir.

$$\tilde{U}^1 = U^1 . \cos\alpha + V^1 . \sin\alpha \quad (3.32)$$

$$\widetilde{U}^2 = U^2.\cos\alpha + V^2.\sin\alpha \qquad (3.33)$$

Denklem 3.29, matris formda yazılırsa aşağıdaki bağıntılar elde edilir.

$$\begin{Bmatrix}\widetilde{U}^1\\ \widetilde{U}^2\end{Bmatrix} = [A].\begin{Bmatrix}U^1\\ V^1\\ U^2\\ V^2\end{Bmatrix} \qquad (3.34)$$

$$\{\tilde{U}\} = [A]\cdot\{U\} \qquad (3.35)$$

Denklem 3.27 ve 3.31'in ortak çözümünden denklem 3.36 elde edilir.

$$\{f\} = [A]^T\cdot[K]\cdot[A]\{U\} \qquad (3.36)$$

Denklem 3.32'nin yardımıyla global rijitlik matrisi elde edilir.

$$[K] = [A]^T\cdot[K]\cdot[A] \qquad (3.37)$$

Dinamik eksplisit çözüm algoritması, cisim kuvvetlerinin ihmal edilmesiyle edinimsiz (virtüel) iş ilkesine dayanır (Tekkaya 2000).

$$\int_V T_{ij}\,\delta u_{i,j}dV = \int_A t_i\,\delta u_i dA \qquad (3.38)$$

Burada;
T_{ij}; Cauchygerilme tensörü,
$u_{i,j}$;yerdeğiştirme gradyanı,
t_i;çekme vektörü,
d ; değişken operatörüdür.

Edinimsiz iş ilkesi denklemi, atalet kavramıyla birlikte yeniden düzenlenirse denklem 3.39 elde edilir.

$$\int_V T_{ij}\,\delta u_{i,j}dV = \int_A t_i\,\delta u_i dA - \int_V p\ddot{u}_i\,\delta u_i \text{ dui dV} \qquad (3.39)$$

Burada;
p; yoğunluk (gr/cm^3)
$\ddot{u}_i$; parçanın ivmesidir (m/s^2)

Denklem 3.39, ayrıştırılarak denklem 3.40 elde edilir.

$$[M]\ddot{u}^t = \{F^t\} - \{I^t\} \qquad (3.40)$$

Bu denklemde;

[M]; parçalı kütle matrisi,
{F}; dış kuvvet,
{I}; verilen t zamanındaki iç kuvvet vektörüdür.

İlerleyen zaman için eksplisit merkez fark şeması Rebelo ve ark. (1992) tarafından formülize edilmiştir.

$$u^{t+\Delta t} = u^{t} + \Delta t^{t+\Delta t} \cdot \dot{u}^{\,t+\Delta t/2} \quad (3.41)$$

$$\dot{u}^{\,t+\Delta t/2} = \dot{u}^{\,t-\Delta t/2} + (\Delta t^{t+\Delta t} + \Delta t^{t})/2 \cdot \ddot{u}^{t} \quad (3.42)$$

Schweizerhof ve Hallquist (1991) tarafından; denklem 3.40, yapıda oluşabilecek yoğunluk manipülasyonlarını telafi etmek için yapay sönümleme kavramıyla birlikte tekrar düzenlenmiştir.

$$[M]\ddot{u}^{\,t} + [C]\dot{u}^{\,t} = \{F^{t}\} - \{I^{t}\} \quad (3.43)$$

Merkez fark algoritması şartlı olarak durağandır. Bu yüzden zaman adımı denklem 3.44. ile sınırlandırılmıştır (Tekkaya 2000).

$$\Delta t \leq \frac{L}{C_d} \approx \frac{2}{\omega} \approx \frac{L}{\sqrt{E/\rho}} \quad (3.44)$$

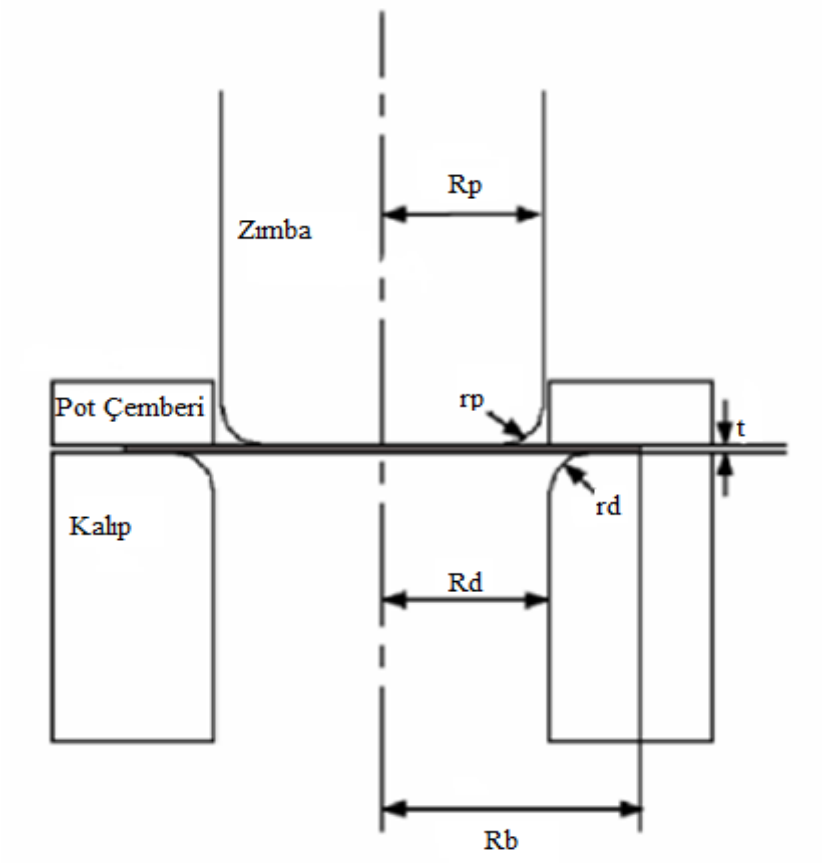
Burada;
*L;*elemanın karakteristik uzunluğu,
*Cd;*iş parçasındaki ses hızı,
*ω;*sistemin en geniş karaktersitik kök değeri(eigenvalue),
*E;*Young modülüs
ρ;malzemenin yoğunluğudur.

Denklem 3.44. derin çekme işlemi için; çelik malzemesinin ses hızı 5000 m/s, eleman boyutu 1 mm olarak düşünüldüğündeen düşük zaman adımı Denklem 3.40'a göre 2×10^{-7} olarak bulunur. Zımba hızı 0.5 m/s ve çekme derinliği 300mm olduğunda derin çekme işlemi 0.6 saniyede gerçekleşir. Toplam işlem süresini, en düşük zaman adımına oranı zaman fark adımı 3×10^{6} olduğu görülür. Derin çekme işleminin analizini imkânsız kılan çok yüksek adım farkları kabul edilebilir değildir

Derin çekme işlemini sonlu elemanlar yöntemi ile analizini mümkün kılmak için bazı adımlar, geliştirilmiştir. Bu adımlardan birincisi, zımba hızını gerçek işlem hızıyla birlikte arttırmaktır. İstenmeyen yapay kütle kuvvetlerinin etkisini azaltmak için nümerik sönümleme kullanılmaktadır. Sönümleme matrisi, kütle matrisiyle orantılı olarak alınır. İkinci bir adım ise, malzemenin yoğunluğu ile ilgilidir. Yoğunluk artırılırsa malzemedeki ses hızı düşer ve buna bağlı olarak zaman farkı adımı da artar Yoğunluktaki 100 kat artış, ses hızında 10 kat azalmaya neden olur. Sonuç olarak fark adımı 10 kat artar. Bu durumda sayısal sönümleme mümkün olmamaktadır (Tekkaya 2000).

3.2.6 Çalışmanın Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Modellenmesi

Yapılan çalışmanın geometrik özellikleri Şekil 3.12.'de yer almaktadır (Yalçın 2010).



Şekil 3.12. Modelin boyutsal tanımı

Literatürden alınan değerlere göre boyutsal özellikler Çizelge 3.10.'da gösterilmiştir (Yalçın 2010).

Çizelge 3.10. FEM Modelinde kullanılan parçaların boyutsal özellikleri

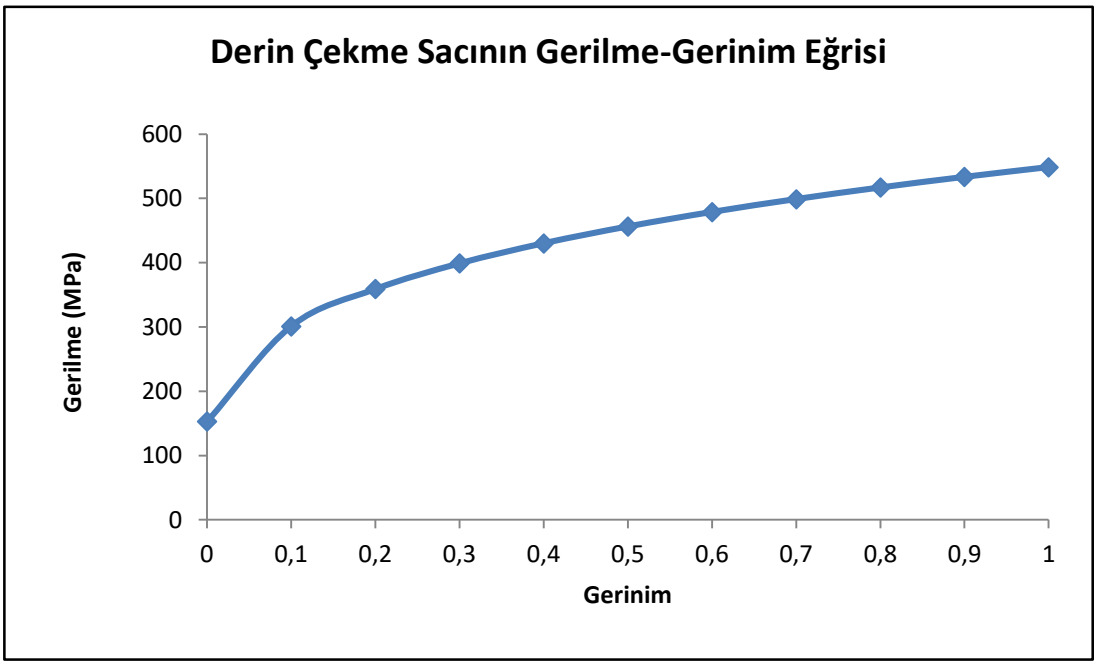
Boyutsal Tanım	Gösterimi	Değeri (mm)
Zımba yarıçapı	Rp	50
Kalıp yarıçapı	Rd	51.25
Taslak parça yarıçapı	Rb	105
Zımba ucu yarıçapı	rp	7
Kalıp ağzı yarıçapı	rd	9.5

Taslak malzemesi literatürde yer alan orta karbonlu çelik olarak bilinen derin çekme sacı seçilmiştir. Mekanik özellikleri Çizelge 3.11.'de yer almaktadır.

Çizelge 3.11. Derin çekme sacının mekanik özellikleri

Malzeme	E (GPa)	ρ (gr/cm^3)	v	ε_0	K (MPa)	n	
Derin çekme sacı	221.368	7.8	0.3	0.00876	547.3	0.2692	

Şekil 3.12 derin çekme sacının çekme testi sonucu elde edilengerçek gerilme ve gerçek gerinim eğrisi ve eğriye ait eşitlik Denklem 3.41'de verilmiştir.Denklemde yer alan sabit "K" ve "n" değerleri malzemelerin mekanik özelliklerine göre değişiklik göstermektedir. Yüksek "n" değerlerinde malzemenin plastik şekillendirilebilme oranı düşük "n" değerlerine sahip malzemelere göre daha düşüktür.

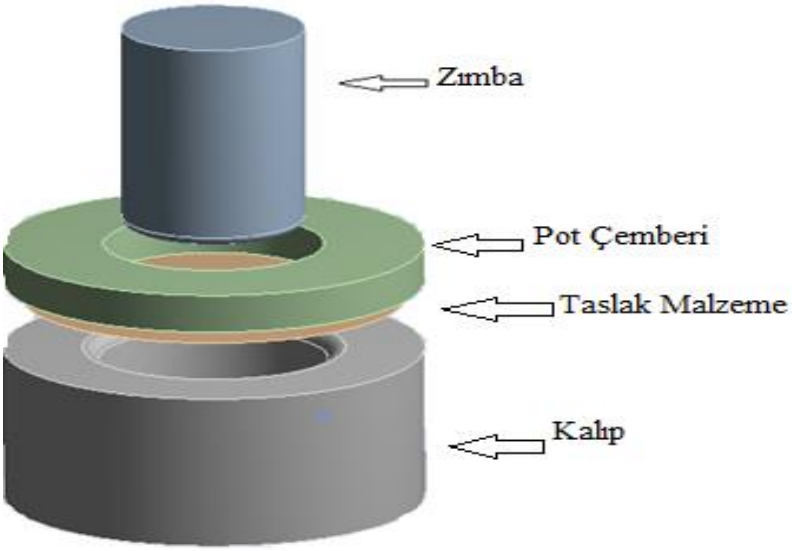


Şekil 3.13. Derin çekme sacına ait gerilme-gerinim eğrisi

$$\sigma = K(\varepsilon + \varepsilon_0)^n \quad (3.41)$$

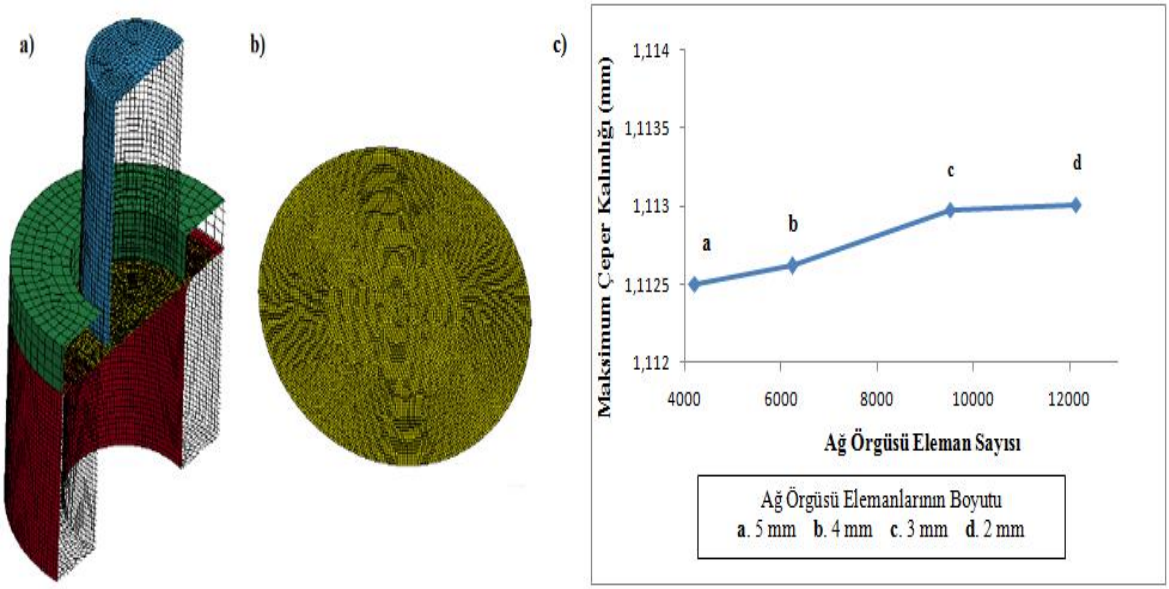
Burada;
σ: gerilme değeri
K: mukavemet katsayısı
ε: gerinim
ε_0: başlangıç gerinimi
n: deformasyon sertleşmesi kuvveti

Bu çalışmada derin çekme işlemi sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak ANSYS Workbench ile modellenmiştir. Modelde, kalıp, zımba, taslak parça ve pot çemberi bilgisayar destekli çizim yapan programlar ile tasarlanmış ve analiz programına aktarılmıştır. Temel parçalar Şekil 3.14'de görülmektedir.



Şekil 3.14. Modelde yer alan parçalar

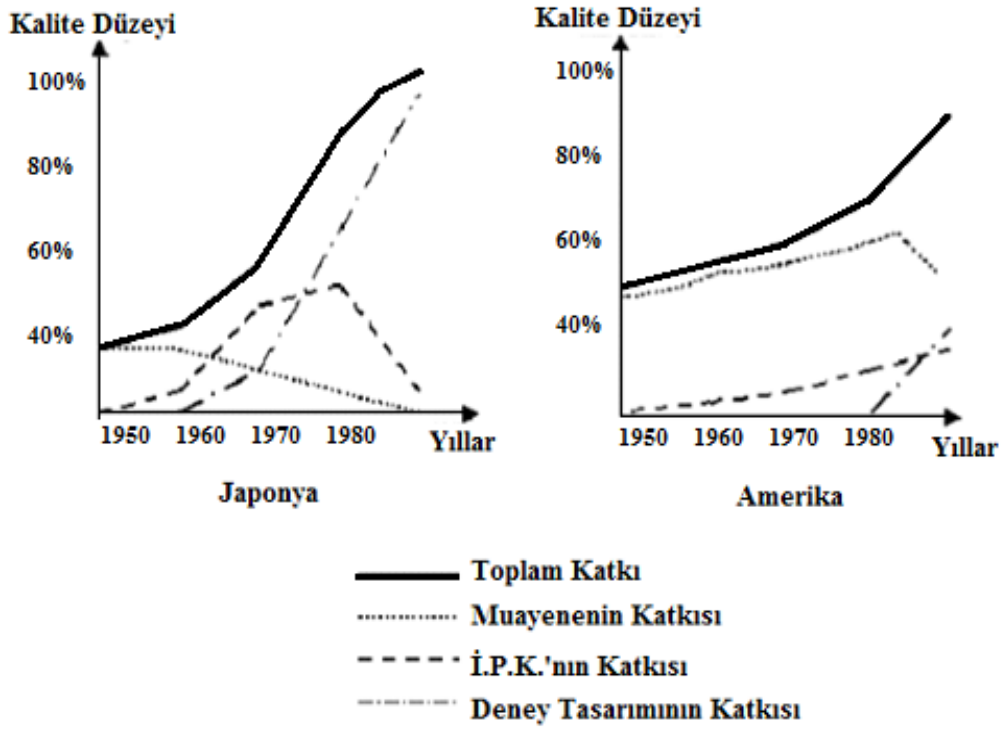
Parçaların tasarımı aşamasında, taslak parçası kabuk, diğer parçalar ise katı model olarak modellenmiştir. Çalışmada, sadece taslak parça üzerinde oluşan deformasyon ve gerilme değerleri incelendiği için, diğer parçalar rijit cisim olarak atanmıştır. Sürtünme katsayısı literatürden 0,0426 olarak alınmıştır. Elde edilen sonuçların uygun değerlerde olması için Şekil 3.15 c.'de görülen taslak malzemenin ağ örügü yapısının eleman sayısı, maksimum çeper kalınlığı sonucuna göre optimize edilmiştir. Bu optimizasyon işlemi sırasında 4 ayrı ağ örgüsü eleman boyutu (5 mm, 4 mm, 3 mm ve 2 mm) kullanılarak simülasyonlar yapılmıştır. Yapılan simülasyonlar sonucu kalıp, zımba, pot çemberi ve taslak parçasının ağ örgüsünün yapısı sırasıyla 67165, 22800, 1468 ve 9515 eleman olarak hesaplanmıştır.



Şekil 3.15.a)Modelin b) Taslak parçanın ağ örgüsü yapısı c) Ağ örgüsü eleman sayısının optimizasyon grafiği

3.3 Taguchi Metodu

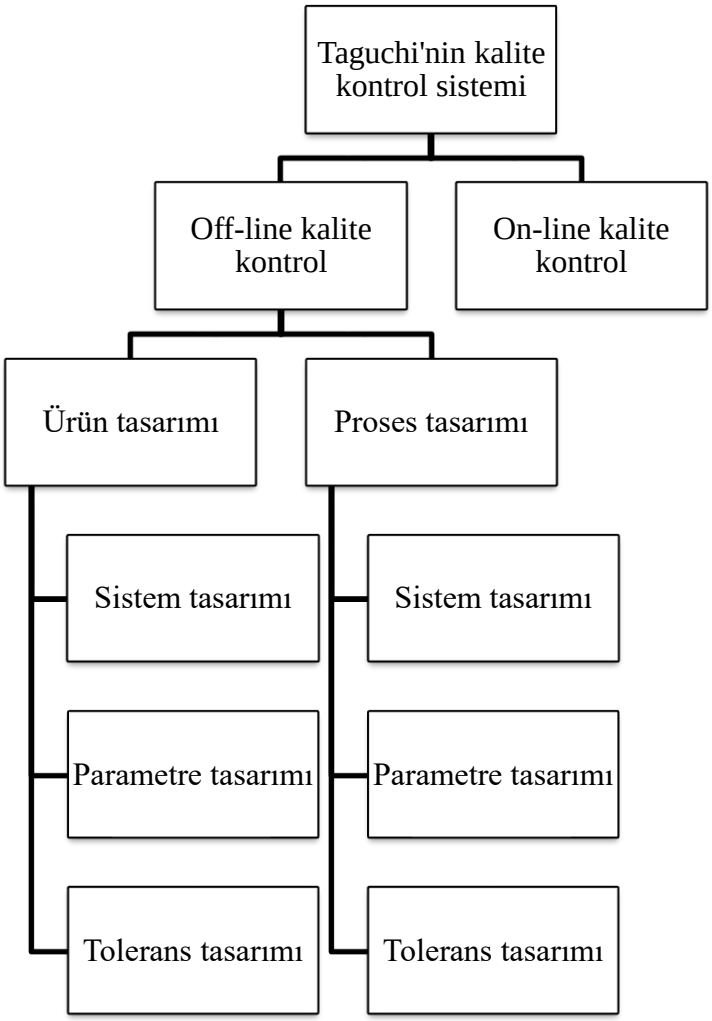
Üretim alanında yaşanan yüksek rekabet, her geçen gün düşük maliyetle daha kaliteli ürünler üretme zorunluluğu getirmektedir. Kalite ise üretilen ürünler üzerinde yapılan bir takım kontrol çalışmalarını (muayeneler, istatistiksel işlem kontrolleri, parametre analizleri) gerektirmektedir. Üretimden önce ve sonra yapılan kalite çalışmaları üretim maliyetlerinde artışa neden olmaktadır. 1900'lerin başında Amerika'da, tarım sektöründe, farklı dozlarda gübre, farklı miktarda sulama gibi faktörlerin çeşitli ürünler üzerindeki etkisini araştırmak için deney tasarımı yöntemi kullanılmaktaydı. Ancak deney tasarım yöntemleri ilk defa Geniçi Taguchi tarafından 1970'lerin başında Japonya'da uygulamaya sokulmuştur. Taguchi, tasarladığı deney tasarımı yöntemleriyle imalat sektöründe büyük kazanımlar elde etmiştir. Şekil 3.16.'da 1950 ve 1990 yılları arasında Japonya ve Amerika'da muayene, istatistiksel proses kontrol ve deney tasarımı yönteminin yüzde kaliteye olan etkisi gösterilmiştir.(Şirvancı 1997).



Şekil 3.16. Japonya ve Amerika'da 3 farklı yöntemin farklı yıllarda kaliteye olan etkileri

Yukarıdaki grafiklerden görüldüğü üzere 1970'lerden sonra deney tasarımı yönteminin kullanılmasından sonra Japonya'da üretilen ürünlerin kalitesinde büyük bir sıçrama görülmüştür. Amerika'da ise 1980'lerin sonlarına doğru kullanılmaya başlanan deney tasarımı yöntemi kalite düzeyi üzerinde artışa neden olmuştur.

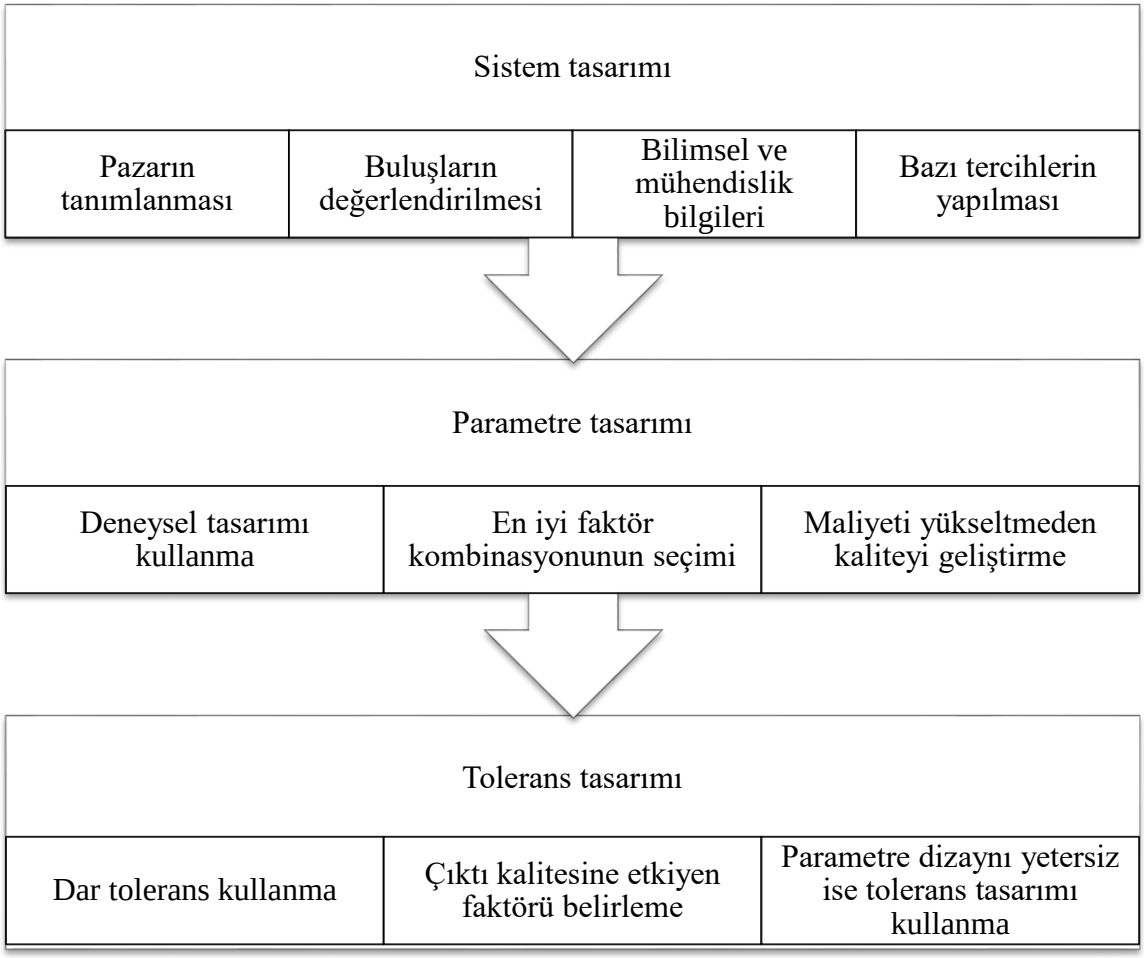
Şekil 3.17.'de gösterildiği üzere Taguchi yönteminde yer alan kalite kontrol sistemleri On-line ve Off-line olarak 2'ye ayrılır.



Şekil 3.17. Taguchi'nin kalite kontrol sistemi (Sünkür 2016)

On-line kalite kontrol sistemi, ürün üretimine geçildikten sonra yapılan istatistiksel proses kontrolü, muayeneler vb. gibi işlemleri içerir. Off-line kontrol ise ürün tasarımı ve proses tasarımı olarak 2 farklı grup altında incelenir.

TM sistematiği, sistem tasarımı, parametre tasarımı ve tolerans tasarımından meydana gelir (Şekil 3.18). Ürünün kalitesini etkileyen en önemli parametre olan ürün tasarımı, sistem tasarımı ile başlar. Bu adımda, üretilen ürünün Pazar boyutu, ürünün şekli, içerdiği teknolojiler, üretim metodu gibi teknik bilgiler belirlenerek sonraki adım olan parametre tasarımına geçilir. Parametre tasarımı, ürünün kalitesini etkileyen bütün parametre değerlerinin belirlenmesidir. Bu aşamadaki amaç, ürün ya da işlem kalitesine etki ederek değişkenlik yaratan kontrol edilebilen faktörlerin en uygun olanlarının seçilmesi böylelikle ürün ve işlem kalitesinin iyileştirilmesidir. Malzeme, sıcaklık, kuvvet, hız, geometrik şekil gibi değişken özellikler ürün parametresi olarak düşünülebilir.



Şekil 3.18. Taguchi metodundaki sistematik (Kamber 2008)

3.3.1 Deney Tasarımı

Deney tasarımı, üretim aşamasına geçmeden önce, ürün kalitesini etkileyen parametrelerin ve bu parametrelerin bir birleri arasındaki ilişkiyi bulmaya yarayan bir yöntemdir. Deney tasarımı yöntemi genel olarak aşağıdaki adımlardan oluşmaktadır (Taylan 2009).

- Problemin Tanımlanması
- Amacın Belirlenmesi
- Performans Karakteristiğinin Seçilmesi
- Performans Karakteristiğini Etkileyen Faktörlerin Seçilmesi
- Faktörlerin Düzeylerinin Seçilmesi
- Deney Tasarımının Seçilmesi
- Verilerin Toplanması
- Verilerin Analiz Edilmesi
- Sonuçların Yorumlanması
- Doğrulama Deneylerinin Yapılması

3.3.2 Ortogonal Diziler

Çok sayıda parametre ve bu parametrelere bağlı seviyelerden oluşan mühendislik problemlerinde yapılan deney sayıları çok yüksek rakamlara ulaşmaktadır. Ortogonal dizilerden oluşan deney tasarımları sayesinde deney içerisinde belli gruplar çıkartılarak deney sayıları azaltılabilmektedir. Fisher tarafından geliştirilen bu yöntem, Taguchi tarafından yeniden dizayn edilerek standart metotlar haline getirilmiştir.

Taguchi yönteminde yer alan ortogonal diziler "L" ile gösterilir. L'nin yanında yer alan sayı, deneyin ne kadar denemeden oluştuğunu gösterir. 2 seviyeden oluşan deney tasarımları için; L4, L8, L12 ve L32 ortogonal dizileri kullanılırken, 3 seviyeliler için L9, L18, L27 dizileri kullanılmaktadır. Her iki seviyenin karışık kullanıldığı dizilerden bazıları L18, L36, L54 dizileridir.

Ortogonal diziler 2^k deney tasarımı yöntemine göre deney sayılarını azaltarak, zamandan tasarruf sağlayarak ekonomik açıdan kazanç sağlamaktadır. Örneğin Çizelge 3.12.'de gösterilmiş 4 faktör ve bu faktörlere bağlı olarak 2 seviyeden oluşan bir deneyde tam faktöriyel tasarımı ile 16 (2^4) adet deneme yapılması gerekmektedir. Ancak TM ile L_8 ortogonal dizisi kullanılarak 8 adet deneme yapılabilmektedir.

Çizelge 3.12. Taguchi metodunda kullanılan ortogonal diziler (Kamber 2008)

Faktör	Seviye	Deney Sayıları		
		Tam Faktöriyel Tasarım		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

Çizelge 3.13'te 2^k **ve** ortogonal diziler arasındaki fark açık bir şekilde görülmektedir. 7 parametre ve 2 seviyeden oluşan bir deneyde "1" parametrelerin birinci seviyelerini, "2" parametrelerin ikinci seviyelerini göstermektedir. 2^k dizileri uygulandığı zaman 128 (2^7) adet deney sayısı ortaya çıkmaktadır. Ortogonal diziler ise bütün parametrelerin birinci seviyelerini birinci deney aşamasında denemektedir. Geri kalan deney aşamalarında 7 faktörden 4'ü 2. seviye 3'ü 1. seviyeden seçilerek toplam deney sayısı 8'e düşmektedir.

Çizelge 3.13. 2^7ve L_8ortogonal dizilerin deney çizelgeleri (Kamber 2008)

Deneme No	Faktör 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

Deneme No	Faktör 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

3.3.3 Taguchi'de Sinya/Gürültü (S/N) Oranı

TM'de, incelenen işlem üzerinde oluşan birtakım varyasyonları azaltmak için performans kriteri olan sinyal değerlerinin gürültü değerlerine oranı geliştirilmiştir. Sinyal değeri kontrol edilebilen değeri, gürültü ise kontrol edilemeyen değeri ifade etmektedir. Yapılan bir işlemde gürültü değerlerinin düşük olması, ürüne ya da işleme etki eden kontrol edilemeyen değerlerin düşük olduğu anlamına gelir. Bu oran sistemi bir takım istatistiksel eşitliklerden oluşmaktadır. Bu eşitlikler, yapılan işlem sonucu elde edilen sonuçların amaçlarına uygun olarak üçe ayrılmıştır (Şirvancı 1997).

- **En Küçük - En İyi**

Kalite değişkeni olarak adlandırılan "Y" değerinin hedefi sıfırdır. Yani kalite değişkeninin küçük olması istenir. Örnek olarak ekstrüzyon işlemi verilirse, zımba kuvveti değerinin küçük olması ürün kalitesine olumlu anlamda etki eder. Sinyal/Gürültü oranı değeri aşağıdaki formül ile hesaplanır.

$$S/N \text{ Oranı} = -10.\log(\Sigma Y^2/n) \quad (3.42)$$

- **En Büyük - En İyi**

Hedef "Y" değeri sonsuzdur. Yani büyük olması istenir. Bu gibi problemlere örnek olarak parça ömrü verilebilir. Sinyal/gürültü değeri ise aşağıda verilen formül ile bulunur.

$$S/N \text{ Oranı} = -10.\log[\Sigma(1/Y^2)/n] \quad (3.43)$$

- **Hedef Değer - En İyi**

Hedef değer en iyi yada nominal olan problemlerde "Y" değeri orta bir değer olarak alınır. Genellikle boyut ve uzunluk gibi sonuç değerleri nominal ölçülerde olması istenir. Aşağıdaki formül ile sinyal/gürültü oranı bulunabilir.

S/N Oranı = $10.\log(\Sigma(Y-m)^2/S^2)$(3.44)

m = elde edilmesi istenen sonuç değeri

Yukarıda verilen her üç problem türünde amaç yüksek S/N değerleri elde etmektir.

3.3.4 Varyans Analizi (ANOVA)

Deney tasarım yönteminin temeli sayılan varyans analizi (ANOVA), Fisher tarafından 1930'larda geliştirilmiştir. Varyans analizi yapılarak, ürün kalitesine etki eden faktörlerin sonuçlarını mukayese edilir ve bu faktörler arasındaki etkileşim gözlenir. Varyans analizi, elde edilen sonuçların performanslarını bir takım formüller yardımı ile ortaya çıkarır. Bu performans değerleri hesaplanırken, her bir parametrenin serbestlik derecesi, parametrelere bağlı olarak elde edilen sonuçların kareleri toplamı ve bu kareler toplamının bütün sonuçların kareler toplamına oranı olan varyans değeri ile hesaplanır.

Serbestlik derecesi ise her bir parametrenin sahip olduğu seviye miktarının bir eksiği kadardır. Örneğin A parametresinin üç tane seviyesi varsa, serbestlik derecesi ikidir (3-1=2). Bir işlemde bütün parametrelerin serbestlik dereceleri toplamının bir fazlası kullanılacak ortogonal diziyi vermektedir. Mesela 3 seviyeli 4 parametreden oluşan bir deney tasarımında her bir parametrenin serbestlik derecesi 2 dir (3-1=2). Deney tasarımında 4 parametre olduğu için tasarımın toplam serbestlik derecesi 8'dir (2x4=8). Bu tasarımda kullanılması gerek ortogonal dizi L_9 olmalıdır (8+1).

Kareler toplamı aşağıdaki denklem ile ifade edilir;

$$KT = \frac{k}{N \times n}\sum_{t=1}^{k} T_t^2 - \frac{T^2}{N \times n} \quad (3.45)$$

Burada;

KT = Kareler toplamı
k = Ortogonal dizindeki seviye sayısı
t = Her faktörün seviyesi
T_t = Her faktöre ait sonuçların toplamı
T = Deney sonuçlarının toplamı
N = Deneme sayısı

n = Deneme tekrar sayısıdır.

Yukarıdaki eşitlik ile her bir parametre için hesaplanan kareler toplamı değeri, toplam sonucun kareler toplamı değeri oranı ile performans değeri hesaplanır. Varyans analizi ile elde edilen değerlerin dizilimi sembolik olarak Çizelge 3.14.'te verilmiştir.

Çizelge 3.14. Varyans analizinde hesaplanan değerler ve elde edilen formüller

Faktörler	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Varyans	F değeri
A	S_A-1 S_A=A'nın Seviye Sayısı	KT_A	V_A= KTA/S_A	F_A=V_A/V_E
B	S_B-1 S_B=B'nin Seviye Sayısı	KT_B	V_B= KT_B/S_B	F_B=V_B/V_E
Hata	Sd_E	KT_E	V_E= KT_E/S_E	
Toplam	(N-1) N:Toplam Deneme Sayısı			

3.3.5 Çalışmada İncelenen Parametrelerin Uygunluğu

Çalışmada, derin çekme işleminde farklı parametreler sonucu elde edilen üründeki et kalınlığı değişimi, gerilme değerleri ve zımba kuvveti gibi değerler incelenerek, en uygun parametreler belirlenmiştir. Derin çekme işleminin analizi için farklı parametre değerleri, literatürde yer alan bazı formüllerışığında hesaplanmış, işlem kalitesine önemli ölçüde etki edecek değerler seçilmiştir.

İncelenen model için maksimum çekme derinliği; Denklem3.2 ile hesaplanmış, 82,25 mm değeri elde edilmiştir. Çalışmada, çekme derinliği 40 mm olarak sabit tutulmuştur.

Farklı seviyelerinin incelendiği diğer bir parametre olan zımba hızı, denklem3.1'e göre 200 mm/sn olarak hesaplanmıştır. Seçilen üç farklı seviye değeri literatür ile uyum sağlamaktadır.

Pot çemberi kuvveti, derin çekme işleminde ürün kalitesini etkileyen en önemli parametredir. Çalışmada pot çemberi kuvveti kullanımı Denklem 3.4 göz önünde bulundurulduğu zaman gerekli görülmektedir. Çizelge 3.2.'de yer alan değerler ışığında farklı seviyeler seçilmiştir.

Çalışmada kullanılan farklı zımba ucu yarıçapı değerleri literatürde yer alan hesaplar ile uyumlu olmalıdır. Zımba ucu yarıçapı değeri, Denklem 3.9 ele alındığında 8.4 mm olarak hesaplanmaktadır. Seçilen seviye değerleri, elde edilen sonuçların incelenebilirliği açısından mantıklı olmalıdır.

Kalıp ağzı yarıçapı, parçadaki hata oluşumunda kritik bir öneme sahiptir. Denklem 3.7'deki değerler yerine yazıldığı zaman 5,6 mm uzunluğu elde edilmektedir. Çalışmada incelenen kalıp ağzı yarıçapı değerleri denklem 3.7 göz önünde tutularak belirlenmiştir.

3.3.6 Çalışmada İncelenen Parametrelerin Taguchi Metodu ile Modellenmesi

Yapılan bu çalışmada, derin çekme yöntemi ile farklı zımba hızı, pot çemberi kuvveti,zımba ucu yarıçapıve kalıp ağzı yarıçaplarında parça üzerinde oluşan bölgesel kalınlık değişimi (en küçük ve en büyük değerler), gerilme ve oluşan zımba kuvveti değerleri incelenmektedir (Çizelge 3.15.). Her bir parametre 3 farklı seviyeden oluşmaktadır. TM uygulanmadığı takdirde simülasyonların 81 (3^4) deneme ile gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Çalışmada kullanılan parametre ve seviyelere uygun bir ortogonal dizi bulunarak deneme sayısı 9'a düşürülmüştür.

Çizelge 3.15. Çalışmada kullanılan parametreler ve seviyeleri

PARAMETRELER	**SEVİYELER**			**SERBESTLİK DERECESİ**
	Seviye 1	**Seviye 2**	**Seviye 3**	
Pot Çemberi Kuvveti (N)	1000	5000	10000	2
Zımba Hızı (m/s)	0.25	0.5	1	2
Zımba ucu yarıçapı (mm)	4	7	10	2
Kalıp Ağzı Yarıçapı (mm)	6.5	9.5	12.5	2

Çizelge 3.15'te görüldüğü üzere her bir parametrenin serbestlik derecesi 2'dir. Çalışmada kullanılan bütün parametrelerin serbestlik derecesi toplamı 8 olmaktadır. Yani kullanılması gereken ortogonal dizi L_9'dur.

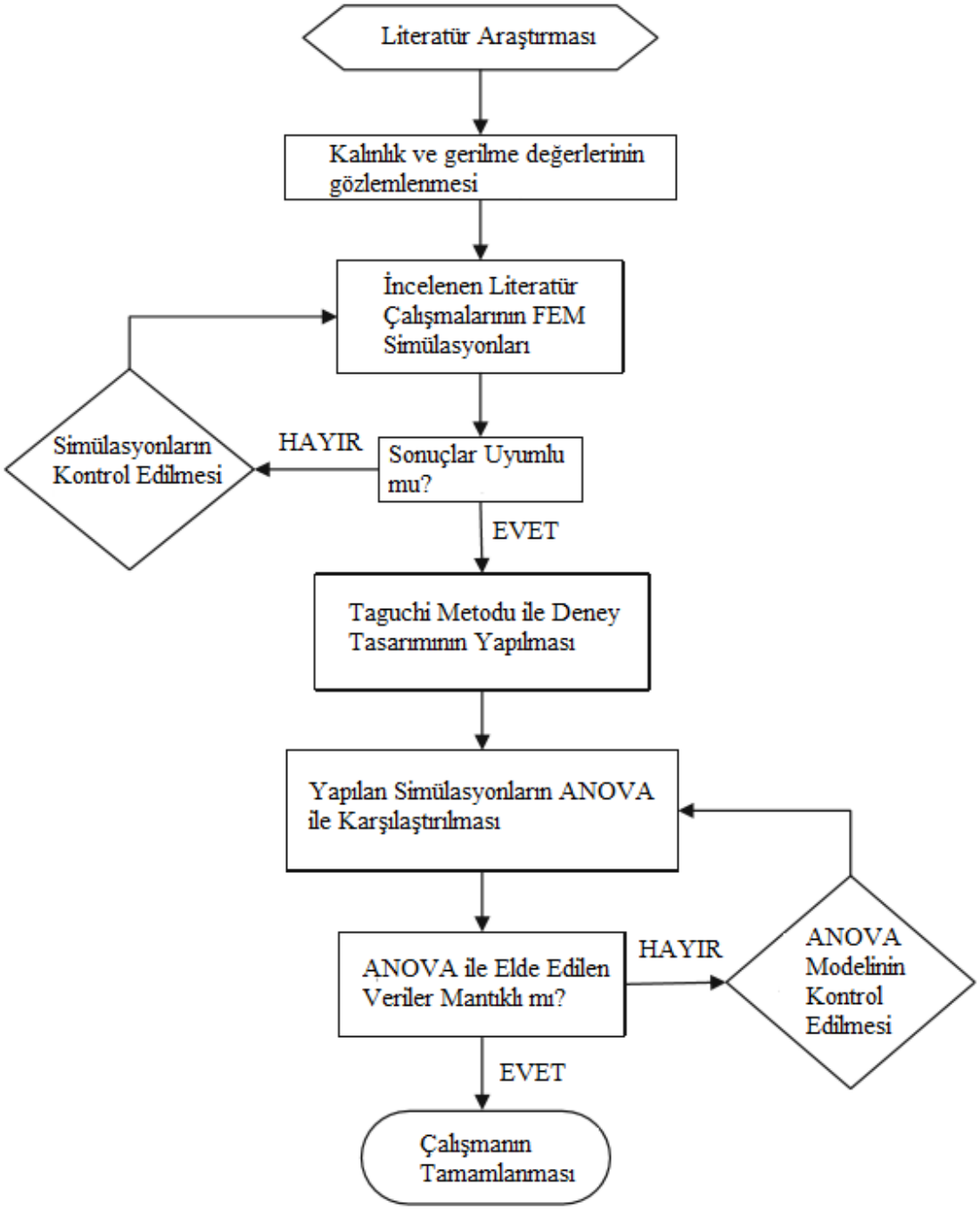
Çizelge 3.16. L_9 ortogonal diziye sahip deney tasarımı

Simülasyon numarası	Pot çemberi kuvveti	Zımba hızı	Zımba ucu yarıçapı	Kalıp ağzı yarıçapı
	A	**B**	**C**	**D**
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

Çizelge 13.16'da L_9 ortogonal diziye ait deney tasarımı matrisi verilmiştir. Tasarımda yer alan parametreler (zımba hızı, pot çemberi kuvveti, zımba ucu yarıçapı, kalıp ağzı yarıçapı) A, B, C ve D harfleri ile eşleştirilmiş, parametrelerin seviyeleri ise Çizelge 3.15'te yer alan seviyeler baz alınarak 1, 2 ve 3 olarak numaralandırılmıştır. Simülasyonlar çizelgede belirlenmiş sıraya göre yapılmıştır.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu çalışma ile sac metallerin plastik şekillendirilmesi işlemi olan derin çekme işleminin,sonlu elemanlar metodu yardımı ile elde edilenparça üzerinde oluşan kalınlık değişiminin ve gerilme miktarının tahmin edilmesi ve sonuçların Taguchi metodu kullanılarak hızlı bir şekilde yorumlanması amaçlanmıştır. Derin çekme işleminin analizinde yer alan bütün adımlar Şekil 4.1.'deki akış şemasında gösterilmiştir.

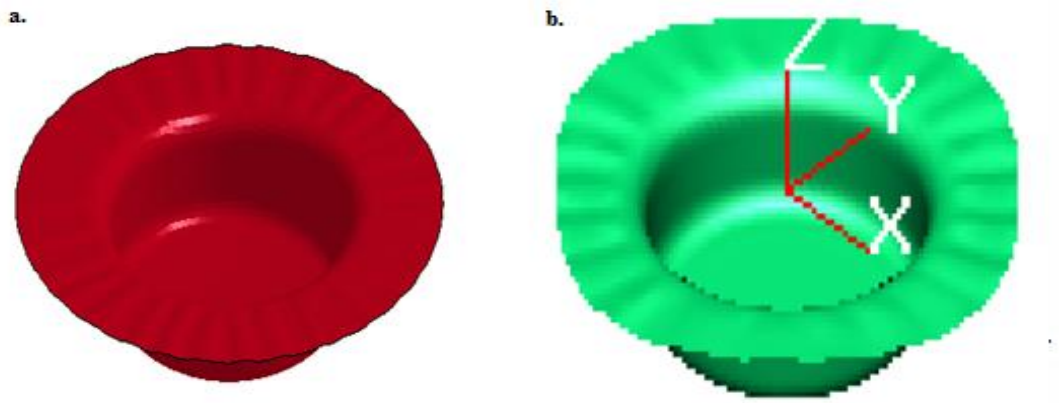


Şekil 4.1. Çalışmanın akış şeması

Literatür araştırması ile başlayan çalışma akışı, literatürde yer alan çalışmaların FEM simülasyonları ile karşılaştırılması ve bunun sonucunda literatürde yer alan sonuçlarla uyumlu verilerin elde edilmesinin ardından Taguchi deney tasarımı yardımı ile belirlenen sırayla simülasyonların yapılması şeklinde devam etmektedir. Elde edilen sonuçların ANOVA analizi ile modellemesi yapıldıktan sonra elde edilen grafikler incelenerek sonuçlar arasında karşılaştırma yapılmaktadır. Elde edilen sonuçlar sade ve anlaşılır bir şekilde açıklanarak çalışma tamamlanmıştır.

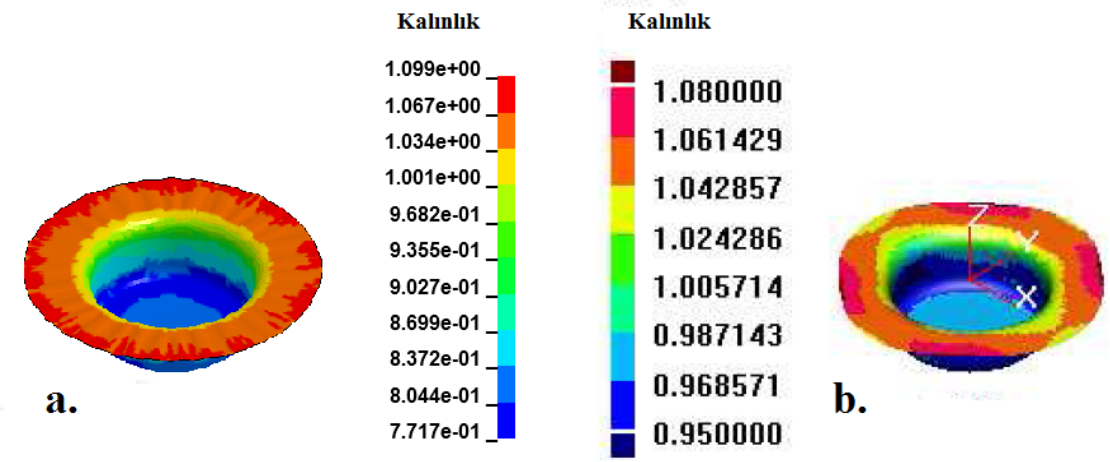
4.1 Literatür Karşılaştırma Sonuçları

Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak elde edilen simülasyon sonuçlarının doğruluğunu tespit etmek amacı ile Yalçın (2010) tarafından yapılan çalışmada yer alan simülasyon sonuçlarıile karşılaştırmalar yapılmıştır. Literatürden alınan sonuçlar ile yapılan simülasyon sonuçları sırası ile Şekil 4.1., Şekil 4.2. ve Şekil 4.3.'de görülmektedir.



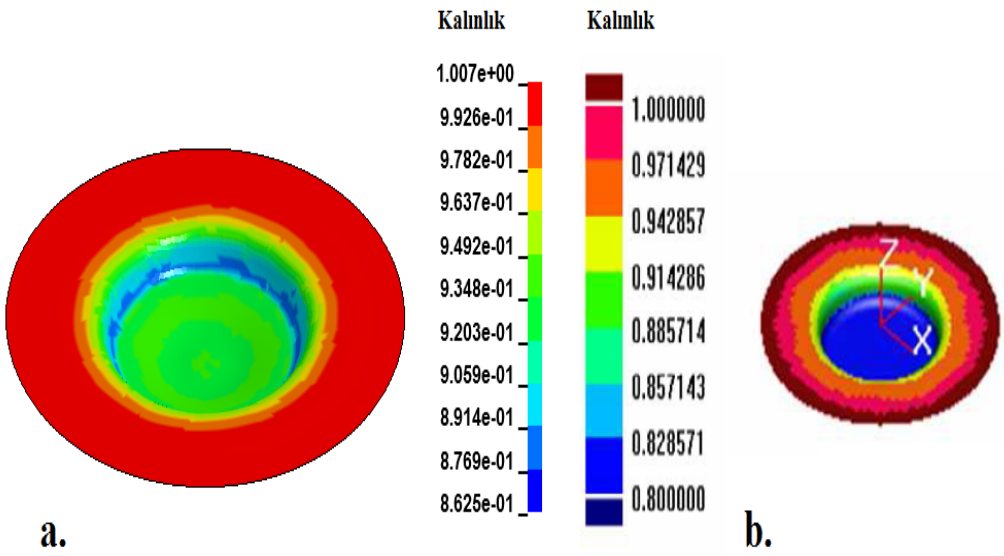
Şekil 4.2. 40 mm çekme derinliği ve 6750 N pot çemberi kuvveti ile gerçekleştirilen simülasyonsonuçlarının karşılaştırılması (a. Yapılan simülasyon b. Literatürde yapılmış simülasyon)

Şekil 4.2.'de görüldüğü üzere a'da yapılan simülasyon ve b'de yer alan literatür çalışması görülmektedir. Yapılan simülasyon, literatürde yer alan çalışmada olduğu gibi malzeme DDQ (derin çekme sacı) olarak seçilmiştir. Parça çeper kalınlığı 1 mm, yarıçapı 105 mm'dir. Her iki çalışmada modelde yer alan parçaların boyutsal özelliği Çizelge 3.10'da gösterildiği gibidir Karşılaştırma çalışması 40 mm çekme derinliği ve 6750 N'luk pot çemberi kuvveti kullanılarak elde edilmiştir. Elde edilen parçanın flanş bölgesinde oluşan kırışıklık literatür çalışmasındaki sonuç ile uyumludur.



Şekil 4.3.500 mm/sn zımba hızı ve 40 mm çekme derinliğinde yapılan simülasyonların karşılaştırılması (a. Yapılan simülasyon b. Literatürde yapılmış simülasyon)

Şekil 4.3.'de a'da yer alan 500 mm/sn zımba hızı ve 40 mm çekme derinliğinde yapılan simülasyon ile aynı parametrelerde gerçekleştirilmiş b'de yer alan literatür çalışması ile kıyaslanmaktadır. Yukarıdaki şekilde görüldüğü üzere elde edilen parçanın flanş bölgesinde kalınlık artışı görülmüştür. Literatürde en yüksek kalınlık değeri 1.08 mm ile 1.061 mm değerleri arasında olduğu görülmektedir. Yapılan simülasyonda ise en yüksek değerlerin 1.09 mm ile 1.067 mm arasında kalınlık değerleri elde edilmiştir. Her iki çalışmanın da en yüksek değerleri göz önüne alındığı zaman hata oranı %1,75 olarak hesaplanmaktadır. Her iki çalışmada en düşük kalınlık değerlerinin parçanın zımba ucu yarıçapı ile temas ettiği yerde olduğu görülmektedir.



Şekil 4.4. 20 mm çekme derinliği ve 500 mm/sn zımba hızıyla yapılan simülasyonların karşılaştırılması (a. Yapılan simülasyon b. Literatürde yapılmış simülasyon)

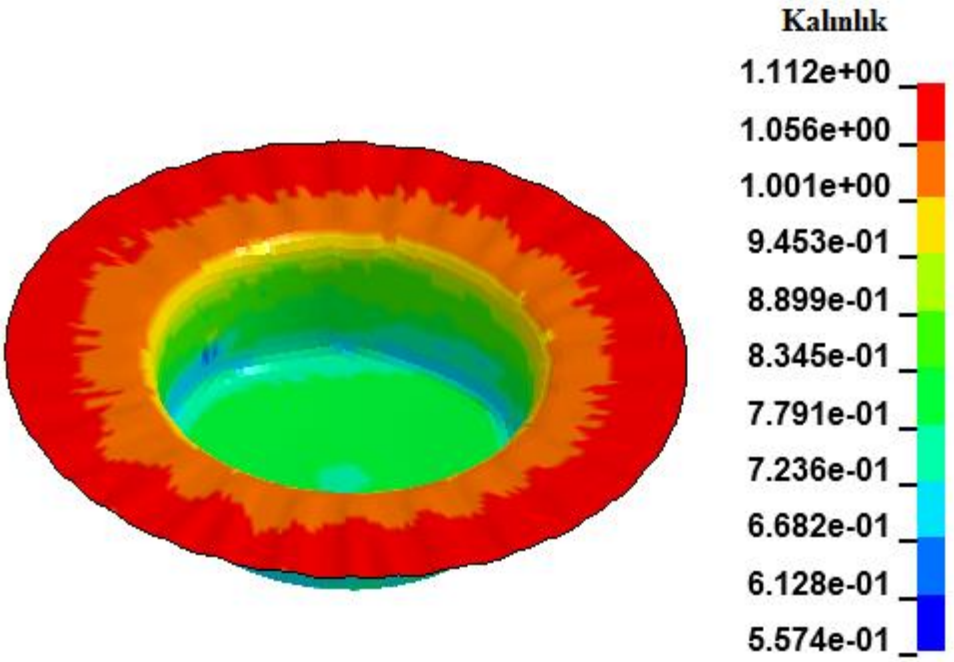
Şekil 4.4'te yer alankarşılaştırmada 20 mm çekme derinliği ve 500 mm/sn zımba hızı kullanılarak yapılan simülasyon aynı giriş parametrelerinde yapılmış literatür çalışması ile mukayese edilmiştir. Yapılan simülasyon sonucu incelendiği zaman, en kalın bölge parçanın flanş bölgesidir. Parça, kalıp boşluğunda ilerledikçe et kalınlığında azalma görülmekte ve en düşük et kalınlığı değer zımba ucu yarıçapının parçaya temas ettiği bölgede görülmektedir. Literatürde yer alan çalışma ile kıyaslandığı takdirde yapılan çalışma ile uyum içerisinde olduğu görülmektedir. Buna bağlı olarak ve ya bu noktadan hareketle bir sonraki aşamada Taguchi deney tasarımına göre tasarlanan simülasyonlarANSYS programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

4.2 Sonlu Elemanlar Simülasyon Sonuçları

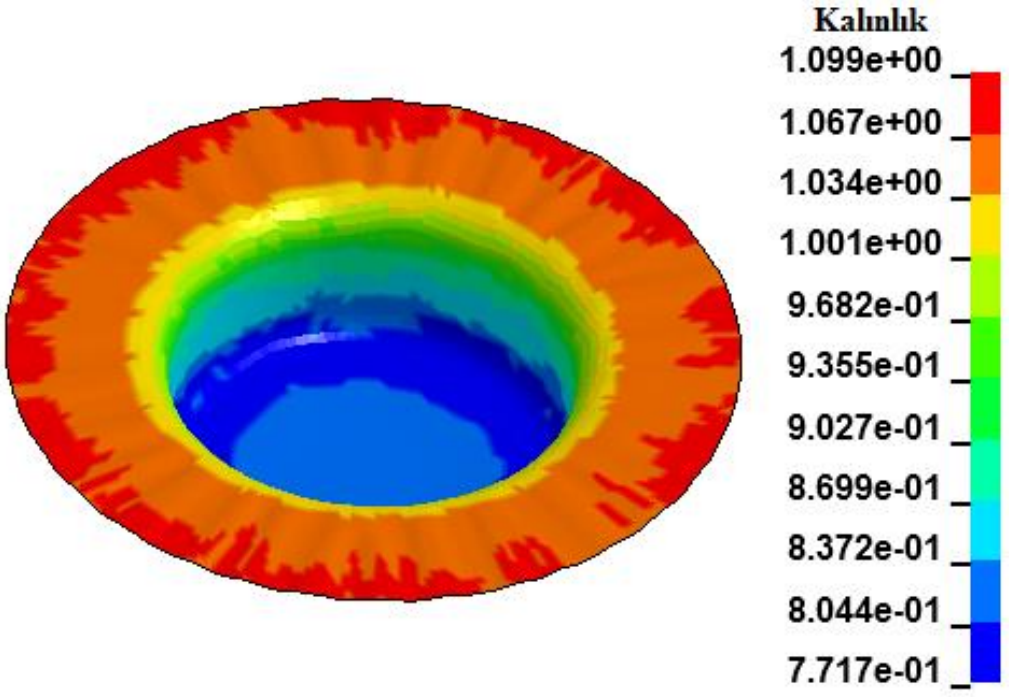
Sonlu elemanlar yöntemi ile analiz yapan ANSYS Workbench ile derin çekme işleminin simülasyonları yapılmış ve elde edilen parça üzerinde oluşan kalınlık değerleri ile maksimum gerilme değerleri incelenmiştir. Şekil 4.5' ten 4.13'e kadar olan şekiller, işlem sonunda parça üzerindeki farklı bölgelerde değişen et kalınlığı değerlerini göstermektedir. Şekil 4.13 ile 4.21 arasındaki şekillerde ise derin çekme işlemi sonucunda parça üzerinde oluşan gerilme değerleri gösterilmektedir.

4.2.1 Derin Çekme Kalınlık Bulguları

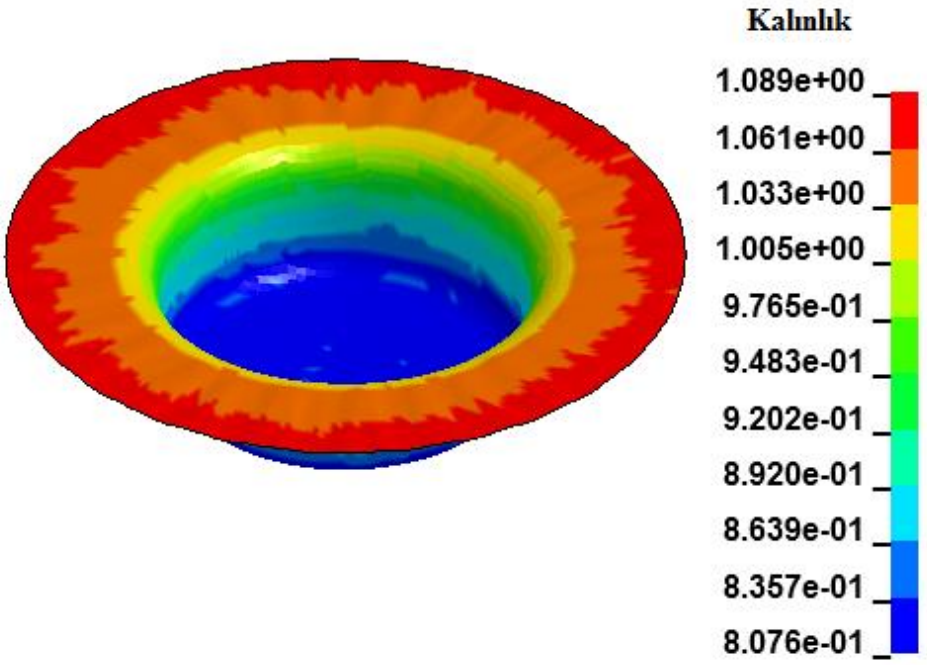
Derin çekme işleminde zımbanın iş parçasına baskısından dolayı karmaşık çekme ve basma kuvvetlerine maruz kalan taslak parçada oluşan değişimlerin önceden tahmin edilmesi kolay değildir. Farklı çekme ve basma kuvvetlerinin varlığı derin çekme sonucu elde edilen parçanın farklı bölgelerinde farklı et kalınlığı değerleri oluşmasına sebep olmaktadır. Basma ve çekme kuvvetlerinin görüldüğü flanş bölgesinde kalınlık artışı görülmektedir. Bu bölgede en yüksek kalınlık değerine ulaşılır. En düşük et kalınlığı değerleri, çekme kuvvetlerinin görüldüğü parçanın kuvvet geçiş bölgesinde yani yan duvar kısımlarında görülmektedir. Şekil 4.5 ile 4.13 arasında ANSYS programından elde edilen şekillerde işlem sonucu elde edilen parça ve parçaya ait kalınlık skalası görülmektedir.



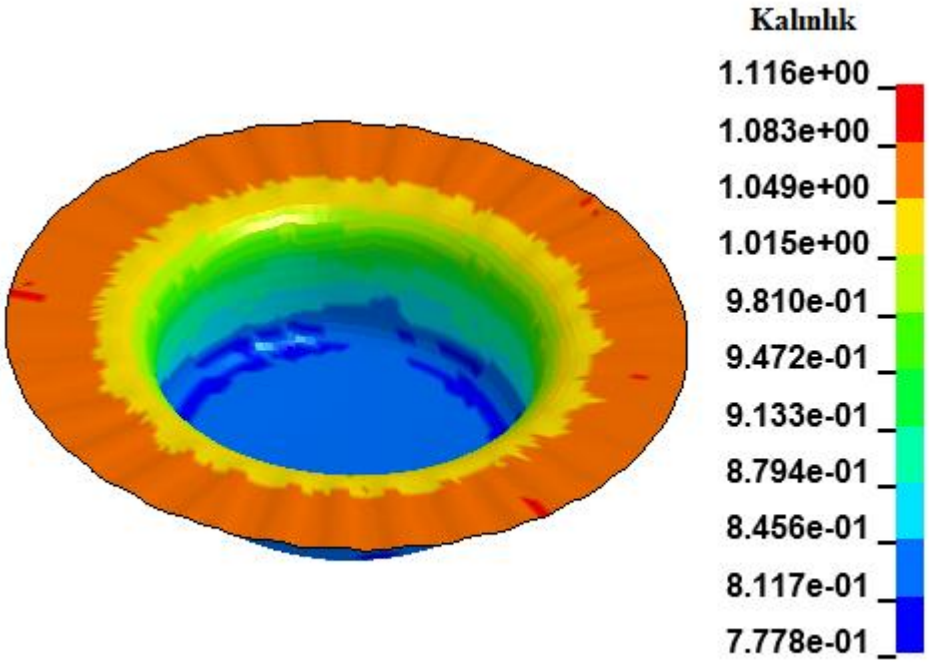
Şekil 4.5. 1 numaralı simülasyona ait çeper kalınlık değerleri



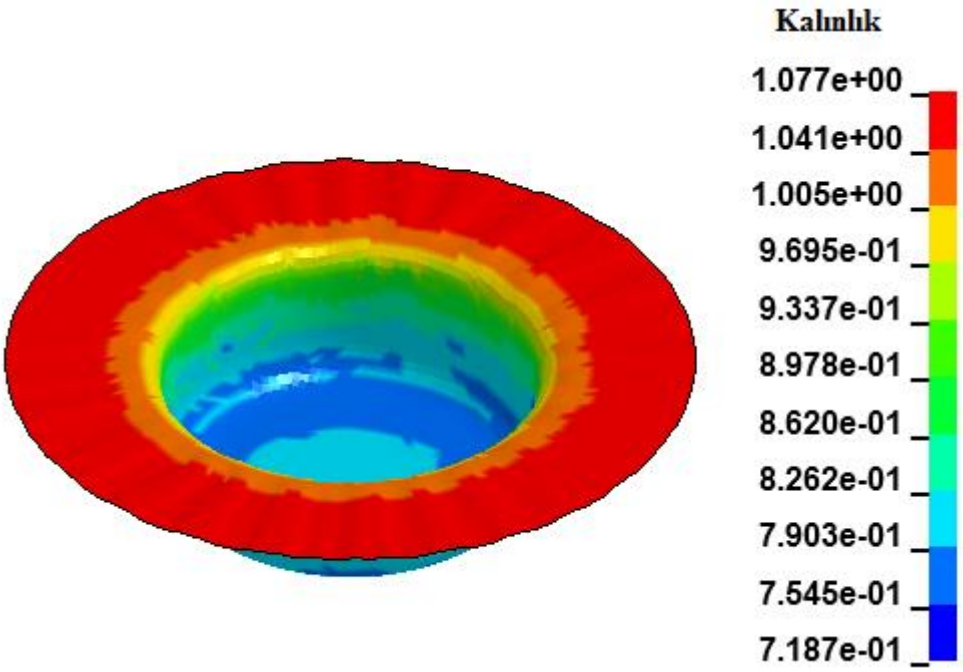
Şekil 4.6. 2 numaralı simülasyona ait çeper kalınlık değerleri



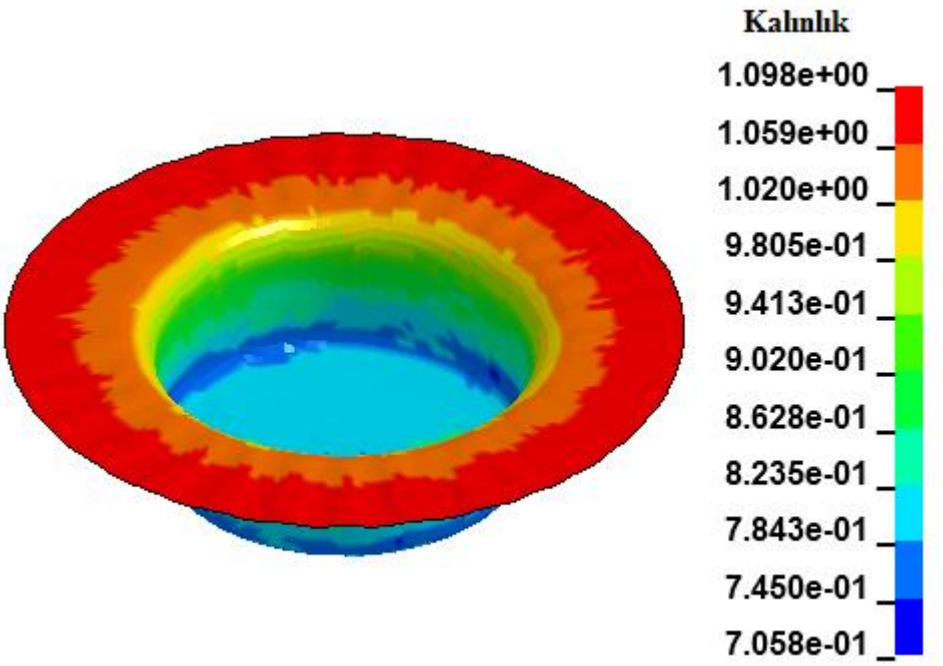
Şekil 4.7. 3 numaralı simülasyona ait çeper kalınlık değerleri



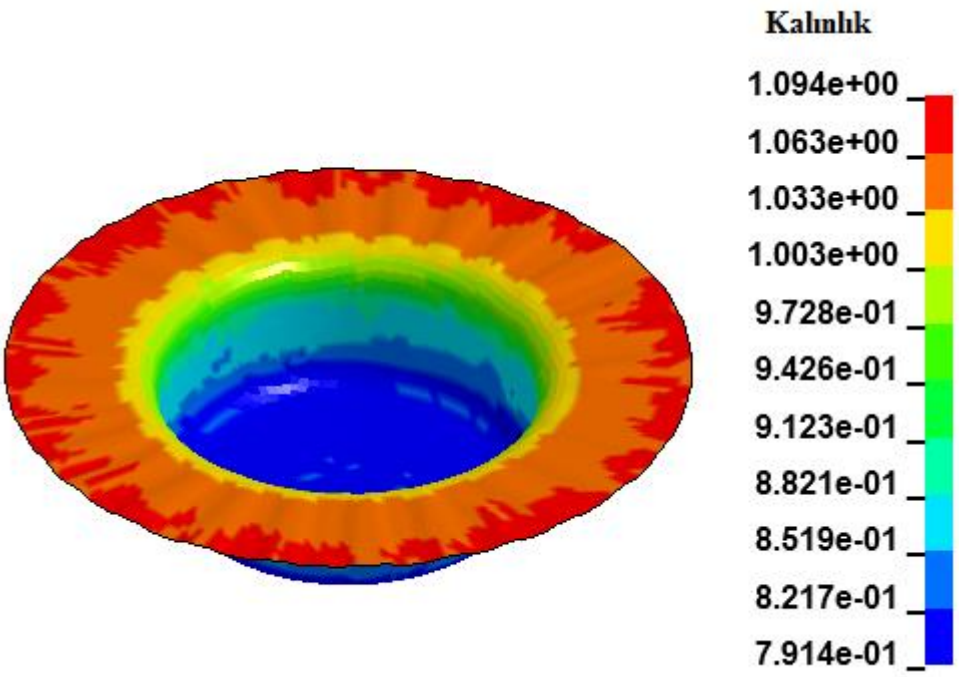
Şekil 4.8. 4 numaralı simülasyona ait çeper kalınlık değerleri



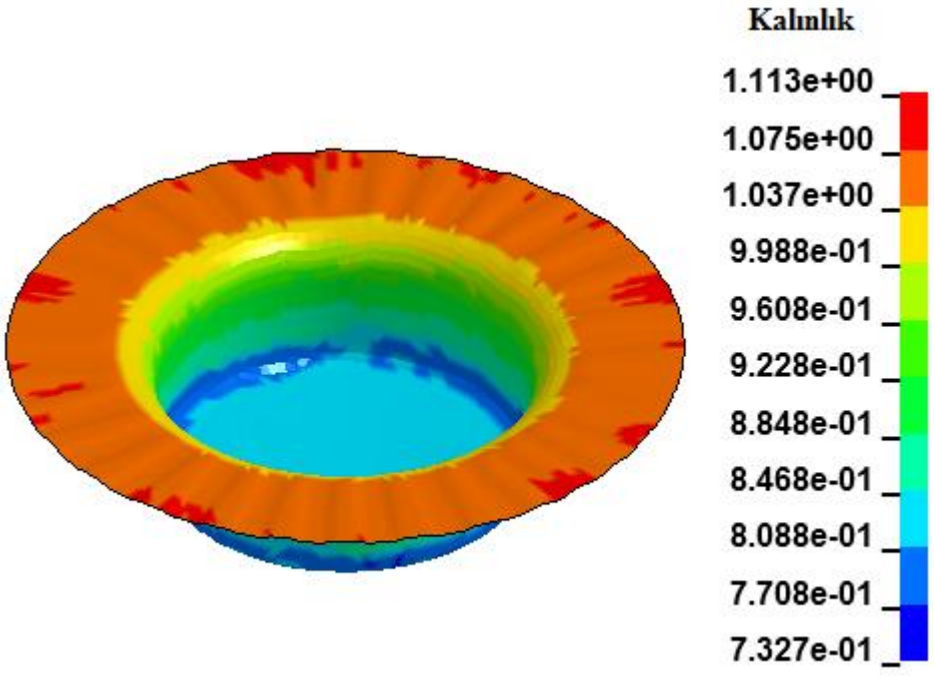
Şekil 4.9. 5 numaralı simülasyona ait çeper kalınlık değerleri



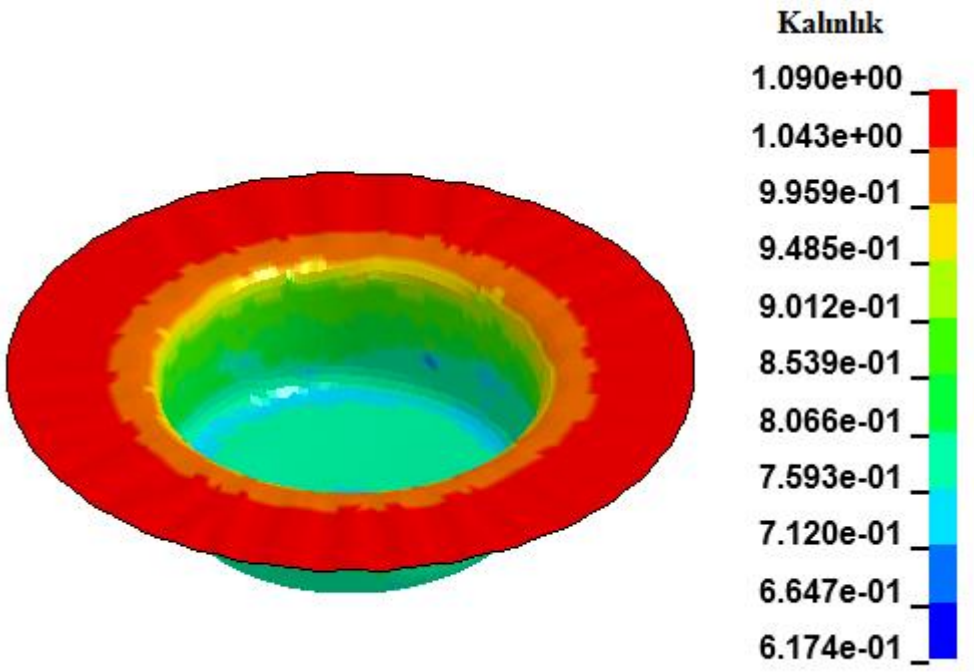
Şekil 4.10. 6 numaralı simülasyona ait çeper kalınlık değerleri



Şekil 4.11. 7 numaralı simülasyona ait çeper kalınlık değerleri



Şekil 4.12. 8 numaralı simülasyona ait çeper kalınlık değerleri



Şekil 4.13. 9 numaralı simülasyona ait çeper kalınlık değerleri

Şekil 4.5 ile 4.13 arasında en yüksek kalınlık değerleri ile en düşük kalınlık değerlerinin yer aldığı simülasyon sonuçları gösterilmektedir. Şekillerde görüldüğü üzere en yüksek et kalınlığı değerleri parçaların flanş bölgelerinde olmaktadır. Çekme ve basma kuvvetlerinin etkisi ile flanş bölgelerinde kalınlık artışı gözlemlenmektedir. Parçaların kenarlarından merkezlerine doğru gidildikçe kalınlık değerlerinde çekme kuvvetlerinin etkisi ile azalma meydana gelmektedir. En düşük kalınlık değeri zımba ağzı yarıçapı üzerinde görülmektedir.

Simülasyon sonuçları incelendiği zaman en yüksek kalınlık değerleri en düşük pot çemberi kuvveti değerlerinde oluşmaktadır. Pot çemberine kuvvet uygulanarak, parçanın flanş bölgesine basınç uygulanmaktadır. Basıncın etkisi ile parçanın flanş bölgesinde basma gerilmelerine karşı ters gerilmeler oluşmaktadır. Flanş bölgesinde oluşan kırışıklık, pot çemberi kuvveti arttırılarak azalmaktadır.

Derin çekme sonucu elde edilen parçalarda en düşük kalınlık değerleri, zımba ucu yarıçapının küçük değerlerinde oluşmaktadır. Parça kalınlığı azaldıkça, en çok görülen hata olan yırtılma problemi meydana gelmektedir. Yırtılma, genellikle parçanın zımba ucu ile temas ettiği yerde görülmektedir.

Kırışıklık ve yırtılma gibi ürün kalitesini önemli ölçüde etkileyen hatalar, ürünü kullanılamaz duruma getirdiğinden zaman ve malzeme kaybına neden olmaktadır. Yapılan simülasyonlar yardımı ile bu hataların ön görülmesi önem arz etmektedir.

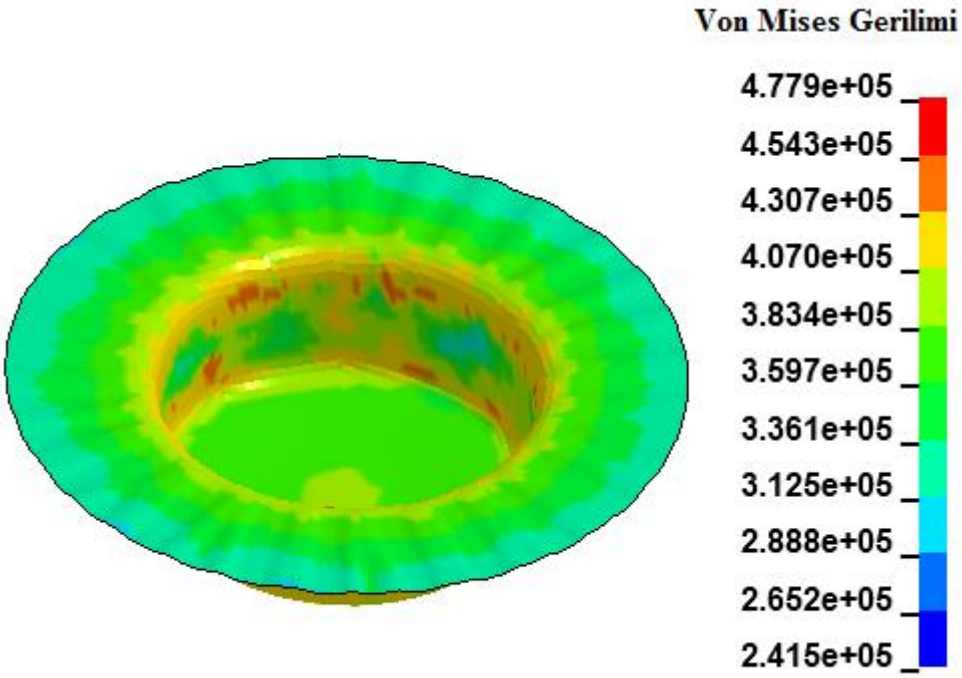
Şekillerde yer alan kalınlık skalasında, maksimum ve minimum parça kalınlık değerleri gösterilmektedir. Simülasyon sonuçlarına bakıldığı zaman, en yüksek kalınlık

değerinin 1,11mm dolaylarında olduğu tespit edilmiştir. En yüksek kalınlık değerleri pot çemberi kuvvetinin düşük olduğu simülasyonlardaelde edilmiştir. En düşük kalınlık değeri 0,70 mm civarında olduğu gözlemlenmiştir. Zımba ucunun düşük yarıçapı uzunluklarında en düşük kalınlık değerleri elde edilmişir. Zımba ucunun yarıçapı değeri düştükçe, parça üzerinde zımba ucunun temas ettiği yerde gerilmekonsantrasyonu artmaktadır. Parça kalınlığında oluşan değişimler sadece model geometrisi ve pot çemberi kuvveti ile açıklanması doğru değildir. Zımba hızı da parça kalınlığına etki eden bir diğer parametredir. Artan zımba hızının, en yüksek ve en düşük kalınlık değerlerinde olumsuz bir etki yarattığı söylenebilir. Bu çalışmada incelenen diğer parametre değerlerinin sonuçlara olan etkisi Taguchi bulguları başlığında tartışılmıştır.

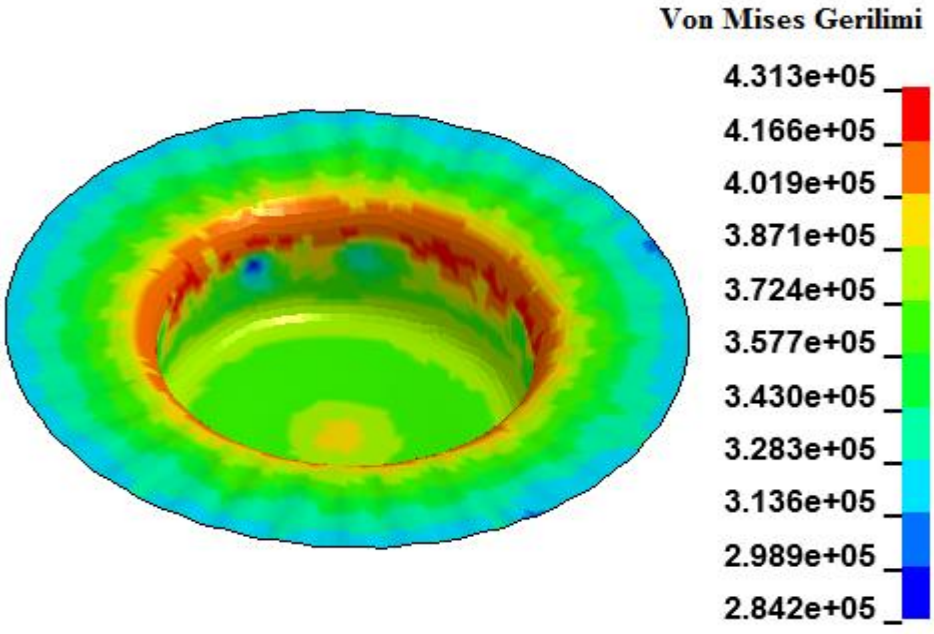
4.2.2 Derin Çekme Gerilme Bulguları

Üretimde elde edilen ürünün işlem boyunca yaşadığı değişimin bilinmesi, üretimden sonra parçanın kullanılacağı ortam şartlarında göstereceği tepkilerin tahmin edilmesini mümkün kılmaktadır. Bu yüzden üretim anında parçada meydana gelen mekanik değişimleri gözlemlemek önemlidir. Mühendislik problemleri çözümünde kullanılan analiz programları derin çekme işlemi sırasında parçada oluşan gerilme değerlerlerinin gözlemlenmesini kolaylaştırmaktadır. Derin çekme işlemi sırasında taslak malzeme, birden fazla çekme ve basma kuvvetleri etkisi altında kalmaktadır. Farklı gerilme değerlerinin parça üzerine etkisini Von Mises gerilme değerleri ile incelemek, derin çekme işleminde incelenen parametrelerin uygunluğu için daha pratik tahminler yapılmasına olanak sağlamaktadır.

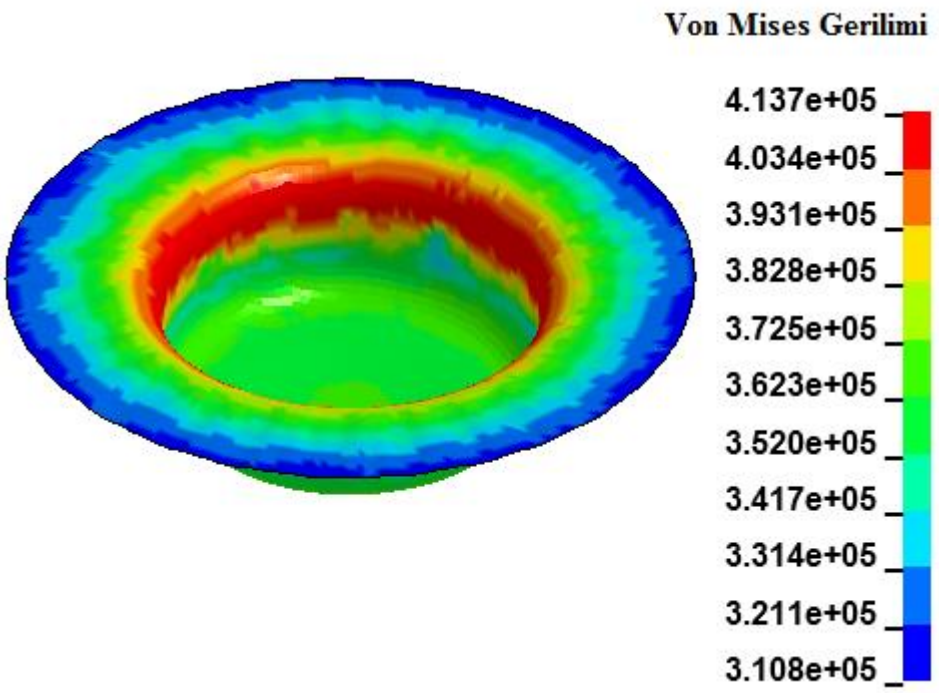
Şekil 4.14ile 4.22 arasındaki simülasyon sonucu elde edilen şekiller, işlem sonunda parça üzerinde oluşan Von Mises gerilme değerlerini ve her bir parçaya ait gerilme skala değerlerini göstermektedir.



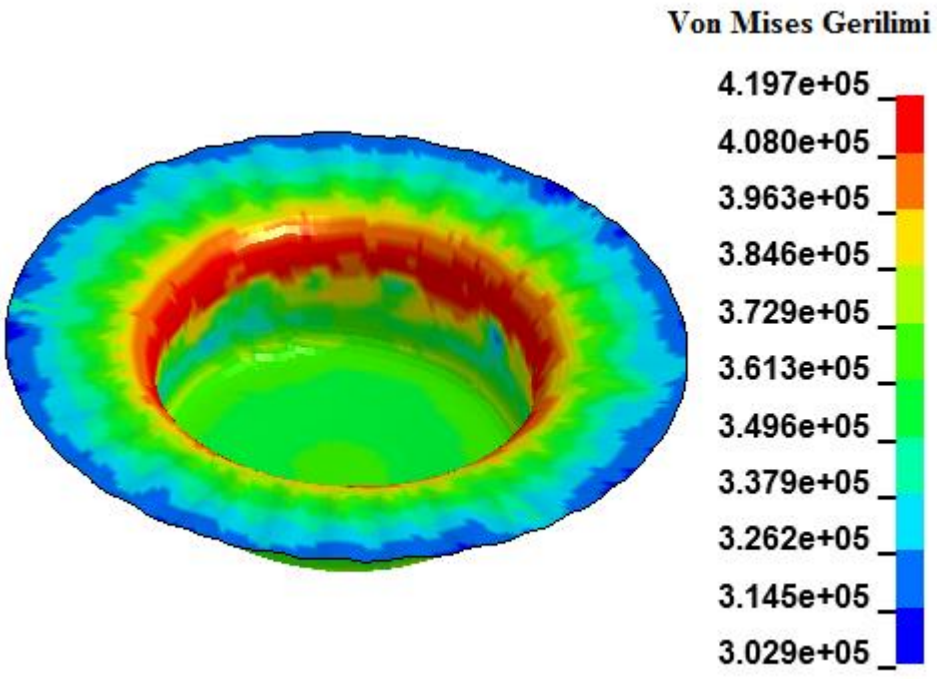
Şekil 4.14. 1 numaralı simülasyona ait gerilme değerleri



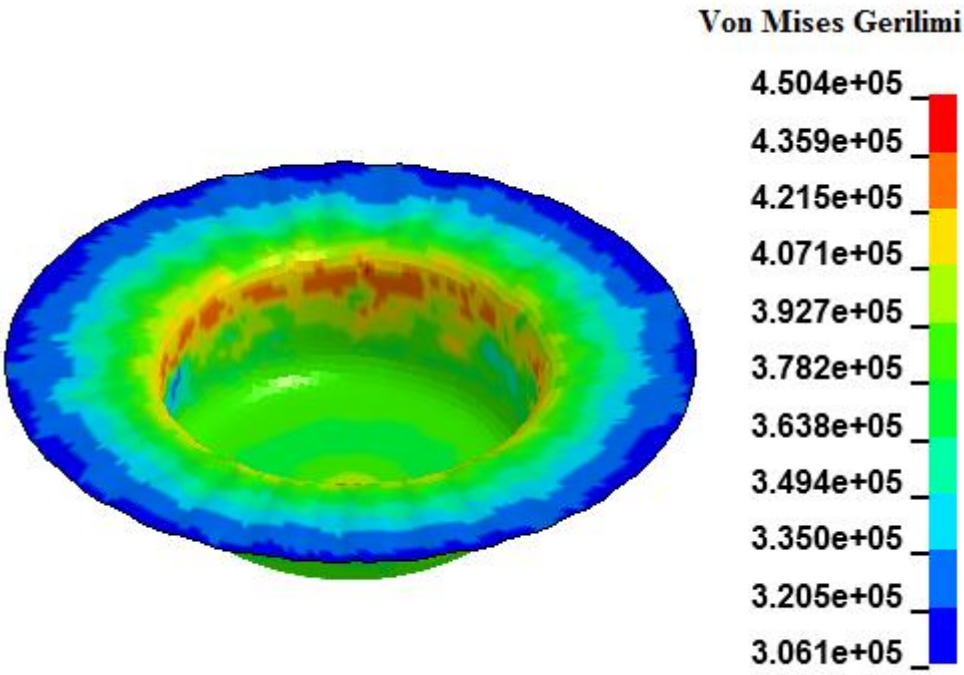
Şekil 4.15. 2 numaralı simülasyona ait gerilme değerleri



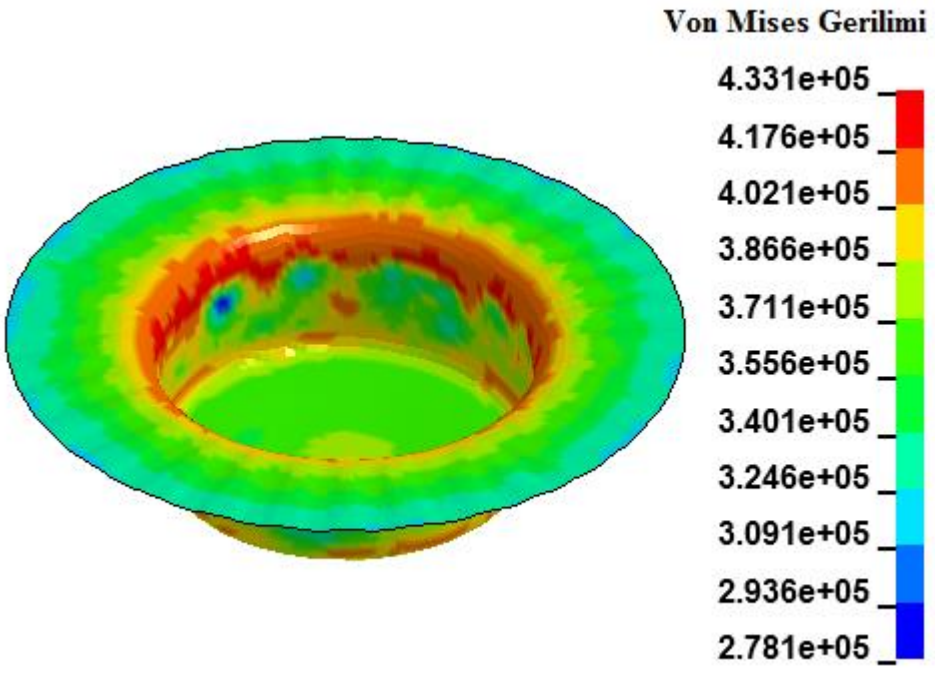
Şekil 4.16. 3 numaralı simülasyona ait gerilme değerleri



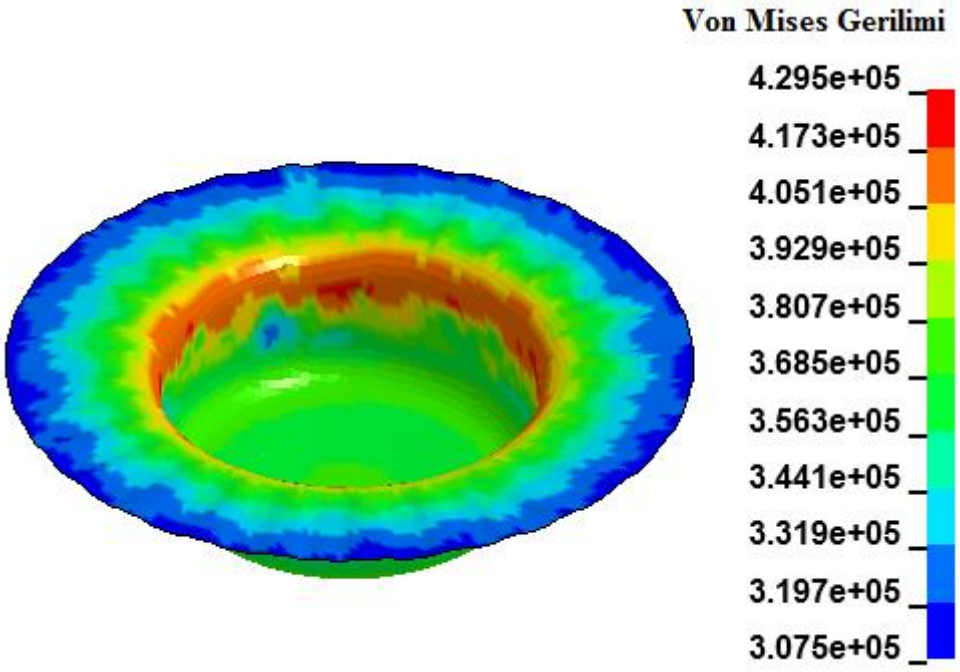
Şekil 4.17. 4 numaralı simülasyona ait gerilme değerleri



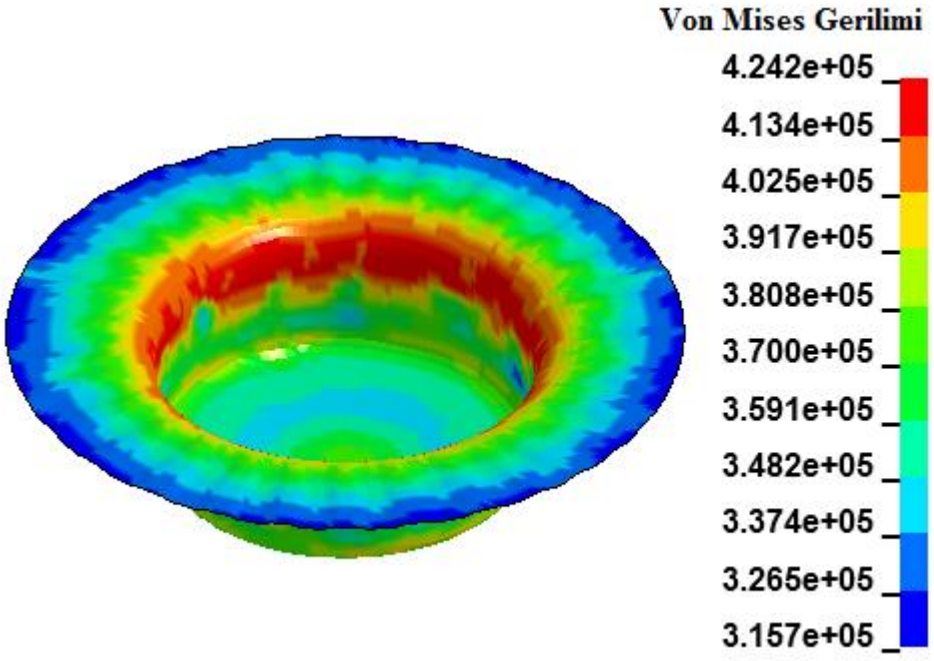
Şekil 4.18. 5 numaralı simülasyona ait gerilme değerleri



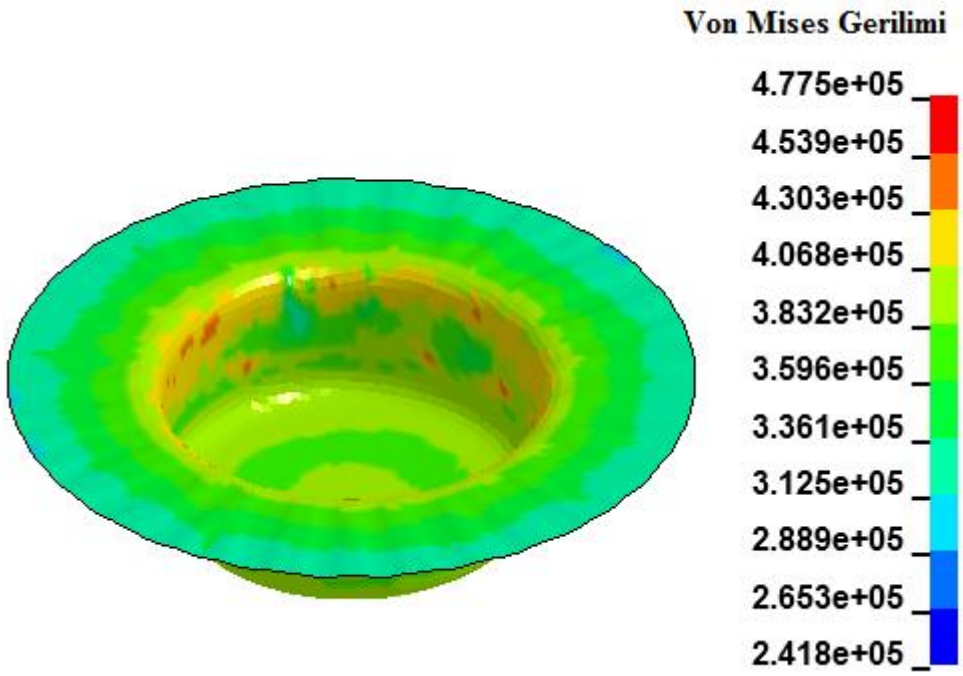
Şekil 4.19. 6 numaralı simülasyona ait gerilme değerleri



Şekil 4.20. 7 numaralı simülasyona ait gerilme değerleri



Şekil 4.21. 8 numaralı simülasyona ait gerilme değerleri



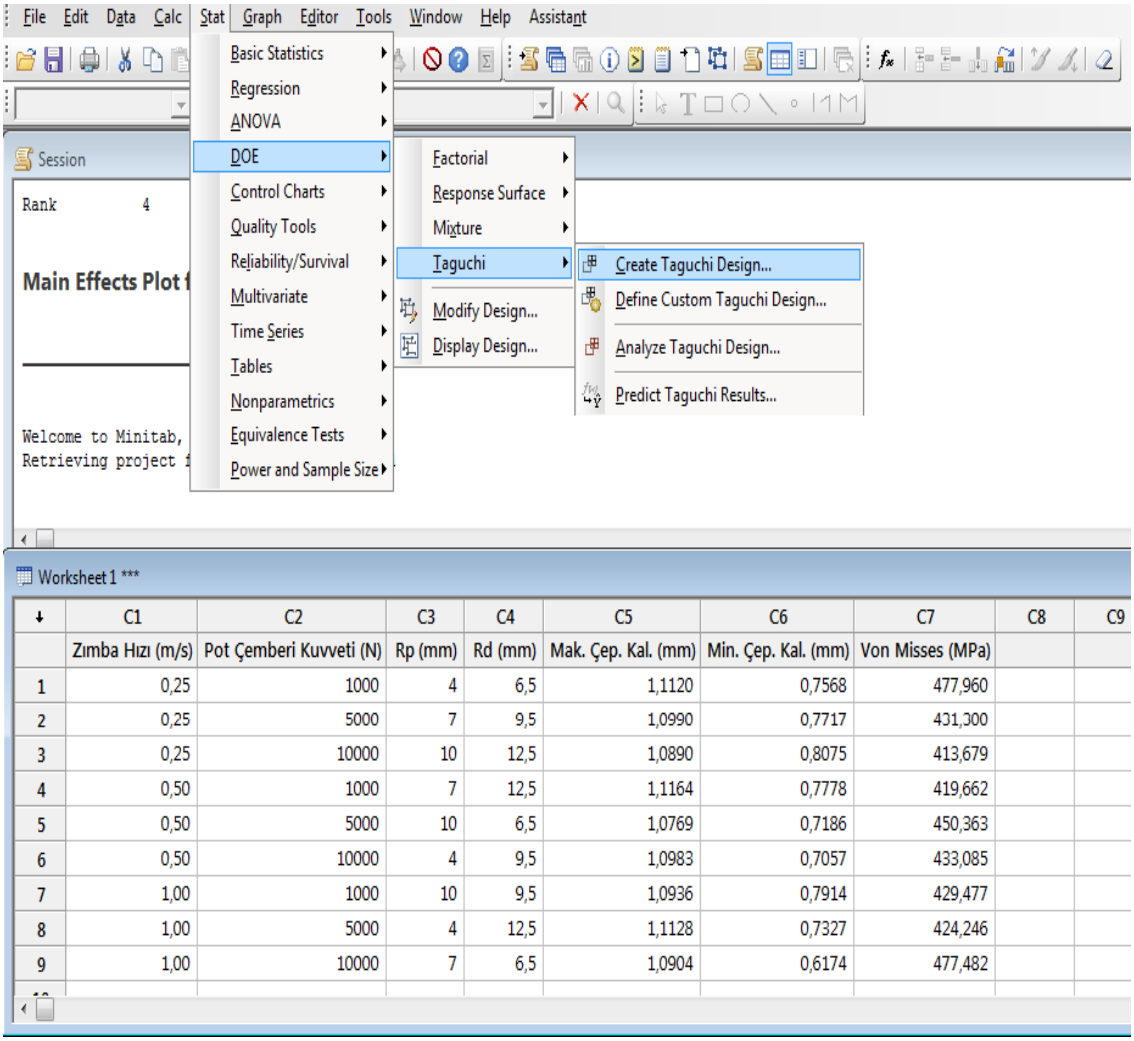
Şekil 4.22. 9 numaralı simülasyona ait gerilme değerleri

Şekil 4.14 ile 4.22 arasında yer alan simülasyon sonuçlarında görülebileceği üzere en yüksek gerilme değerleri parçanın, kalıp ağzı yarıçapı üzerinde kayan kısımlarında görülmektedir. Daha önce belirtildiği üzere, parçanın kalıp ağzı yarıçapı üzerinde kalan kısmı büküm bölgesi olarak adlandırılır. Bu bölgede çekme kuvvetlerinin etkisi çok fazladır. Taslak parçası bu bölgede devamlı olarak büküm işlemine maruz kalmaktadır. Gerilme değerlerleri, parçaların dış flanş kenarlarında en düşük seviyededir. Bu bölgelerde çekme ve basma kuvvetlerinin etkisi daha az hisedilmektedir. Büküm bölgesinden iç taraflara doğru gerilme değerleri azalmaktadır.

Şekil 4.14'ten 4.22'ye kadar olan şekillerde yer alan Von Mises gerilme değerleri incelendiği zaman en yüksek değerin 477 MPa olduğu görülmektedir. Şekil 3.13'te yer alan orta karbonlu çelik olan derin çekme sacının gerilme gerinim grafiğine göre 477 MPa değeri, izin veilen değerler içerisinde gösterilebilir. Ancak işlem sırasında yüksek deformasyon ve gerilme miktarı elde edilen üründe gerinim sertleşmesine neden olmaktadır. Parçanın kullanım ömrü de göz önünde tutulursa, parçanın üretim aşamasında maruz kalacağı yüksek gerilme miktarları ileride kullanılacağı ortam şartlarına bağlı olarak parçanın düşük ömür süresine sahip olacağı söylenebilir. Bundan dolayı üretim aşamasında parçada oluşacak gerilmenin düşük tutulması beklenir. En düşük gerilme değerlerini veren parametre ve bu parametrelere bağlı seviye değerleri Taguchi bulguları başlığında tartışılmıştır.

4.3 Taguchi Sonuçları

Çizelge 3.16'da gösterilen Taguchi deney tasarımına göre seçilen L_9 ortogonal dizisine göre gerçekleştirilen simülasyon sonunda en yüksek ve en düşük kalınlık değerleri yanısıra en yüksek gerilme değerleri hesaplanmıştır. Şekil 4.23'de görüldüğü üzere sonuçlar Minitab içerisine aktarılmış sırası ile "Stat - DOE – Taguchi – Create Taguchi Design" seçilmiş ve analize başlanmıştır.



Worksheet 1 ***

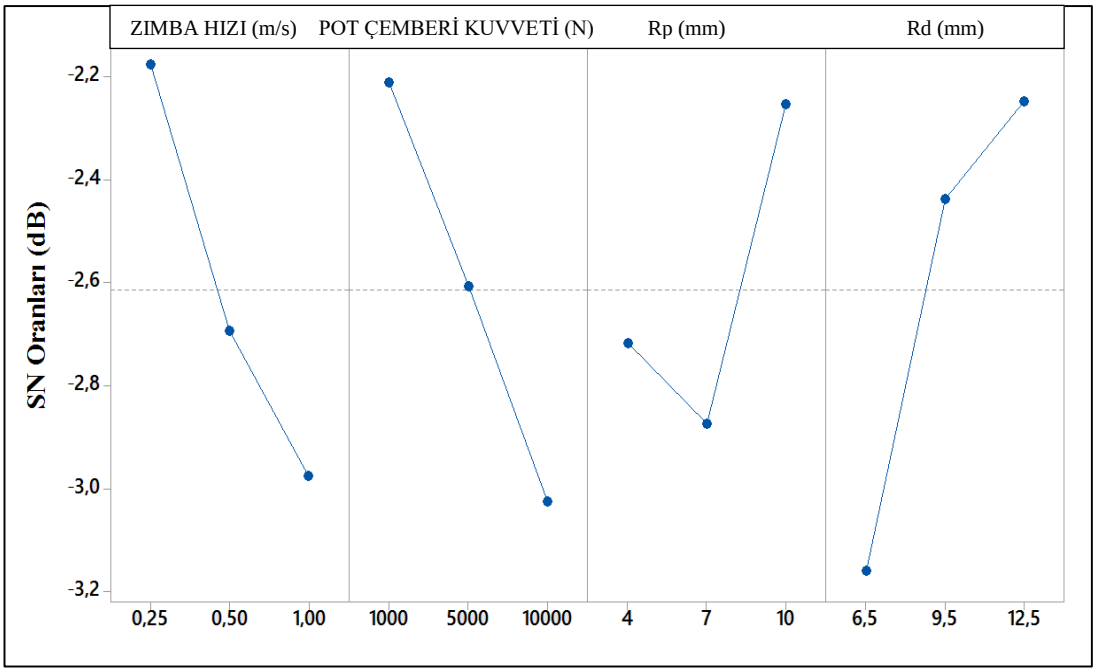
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
	Zımba Hızı (m/s)	Pot Çemberi Kuvveti (N)	Rp (mm)	Rd (mm)	Mak. Çep. Kal. (mm)	Min. Çep. Kal. (mm)	Von Misses (MPa)		
1	0,25	1000	4	6,5	1,1120	0,7568	477,960		
2	0,25	5000	7	9,5	1,0990	0,7717	431,300		
3	0,25	10000	10	12,5	1,0890	0,8075	413,679		
4	0,50	1000	7	12,5	1,1164	0,7778	419,662		
5	0,50	5000	10	6,5	1,0769	0,7186	450,363		
6	0,50	10000	4	9,5	1,0983	0,7057	433,085		
7	1,00	1000	10	9,5	1,0936	0,7914	429,477		
8	1,00	5000	4	12,5	1,1128	0,7327	424,246		
9	1,00	10000	7	6,5	1,0904	0,6174	477,482		

Şekil 4.23. Minitab ile Taguchi analizi

4.3.1 Minimum Çeper Kalınlık Sonuçlarının Taguchi Analizi

Simülasyondan elde edilen veriler Taguchi metodu kullanılarak kontrol edilen değerlerin kontrol edilemeyen değerlere oranı olan Sinyal/Gürültü (S/N) değerleri elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar ve incelemeler ışığında minimum çeper kalınlık değerlerinin en yüksek olduğu değerlerde, maksimum çeper kalınlık ve maksimum gerilme değerlerinin ise en düşük değerlerde olması gerektiği düşünülmektedir. Bundan dolayı elde edilen 3 farklı çıkış parametresi için 3 ayrı S/N oranı içeren grafik elde edilmiştir. Tespit edilen minimum çeper kalınlık değerleri arasında en yüksek değere sahip kalınlık değeri istendiği için "en büyük en iyidir" iyilemesi kullanılmıştır. En

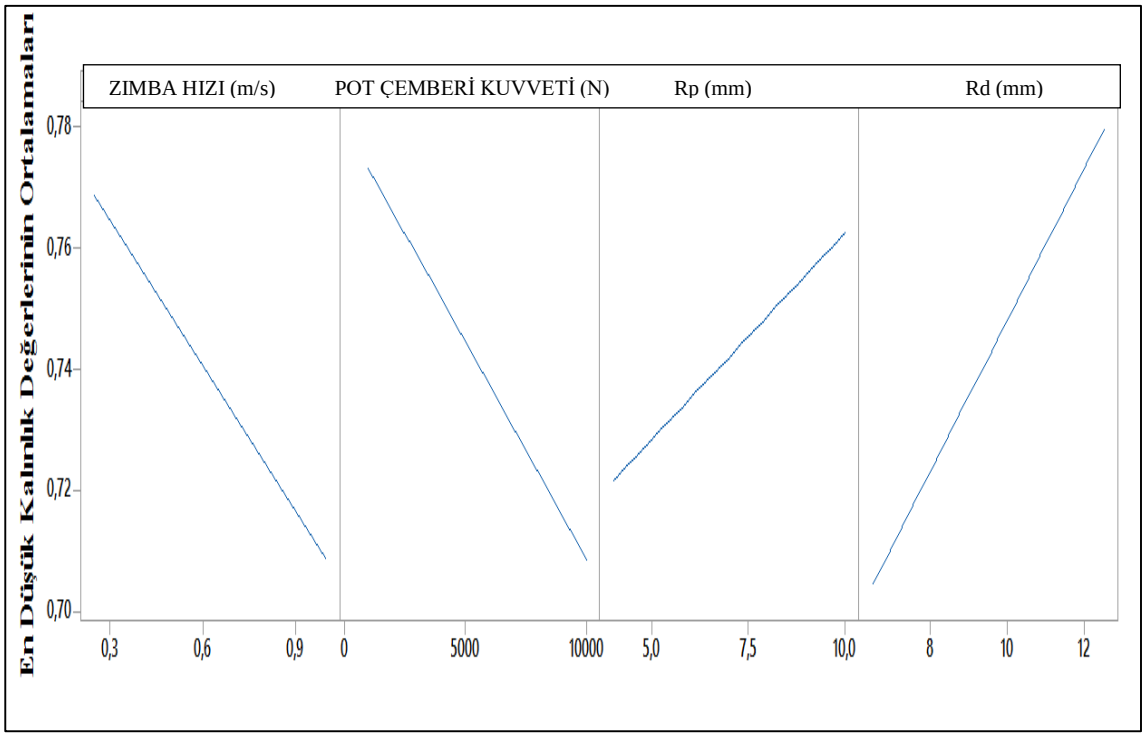
yüksek kalınlık ve gerilme değerleri için “en küçük en iyidir” eşitliği kullanılarak S/N oranları elde edilmiştir.Ayrıca, elde edilen S/N değerleri incelendiğinde, çalışmada kullanılan parametrelerin derin çekme işlemi üzerine etkisi, S/N oranlarını veren eğrilerin genliği ile yorumlanabilir.



Şekil 4.24. Minimum çeper kalınlık değerleri için elde edilen S/N oranları

Şekil 4.24’de görüldüğü üzere, en düşük kalınlık değerleri için her bir parametreye ait seviye değerlerine karşılık gelen S/N değerleri yer almaktadır. Grafiğin ortasında yer alan kesikli çizgi ortalama S/N değerini göstermektedir.“En büyük en iyi”iyilemesi uygulanarak elde edilen çizelgede her bir parametrenin en düşük kalınlık değerleri üzerine etkisi görülmektedir. Eğrilerin genliği göz önünde tutulursa, her 4 parametrenin de işlem üzerine etkisinin yüksek olduğu söylenebilir. Ancak zımba ucu yarıçapı parametresinin diğer parametrelerden daha az etkili olduğu anlaşılmaktadır.

Şekil 4.25’de yer alan eğriler, elde edilen üründe meydana gelen en düşük kalınlık değerlerinin, çalışmada incelenen parametre seviyelerine bağlı değişimi göstermektedir. Zımba hızının ve pot çemberi kuvvetinin yüksek değerlerinde parça üzerinde görülen en düşük kalınlık değeri azalmaktadır. Yüksek zımba ucu ve kalıp ağzı yarıçapı değerlerinde en düşük kalınlık seviyesinde artma görülmüştür. Taslak parçasına temas eden kalıp ağzı ve zımba ucu yarıçapı değerleri azaldıkça kalıp ağzında ve zımba ucunda keskin kenarlar oluşacağından, parça üzerinde oluşan gerilme konsantrasyonunu artıracaktır. Buna bağlı olarak parça üzerinde oluşan plastik deformasyon artmaktadır. Sonuç olarak parça üzerinde oluşan minimum çeper kalınlığı değerinde azalma yani incelme görülmektedir.

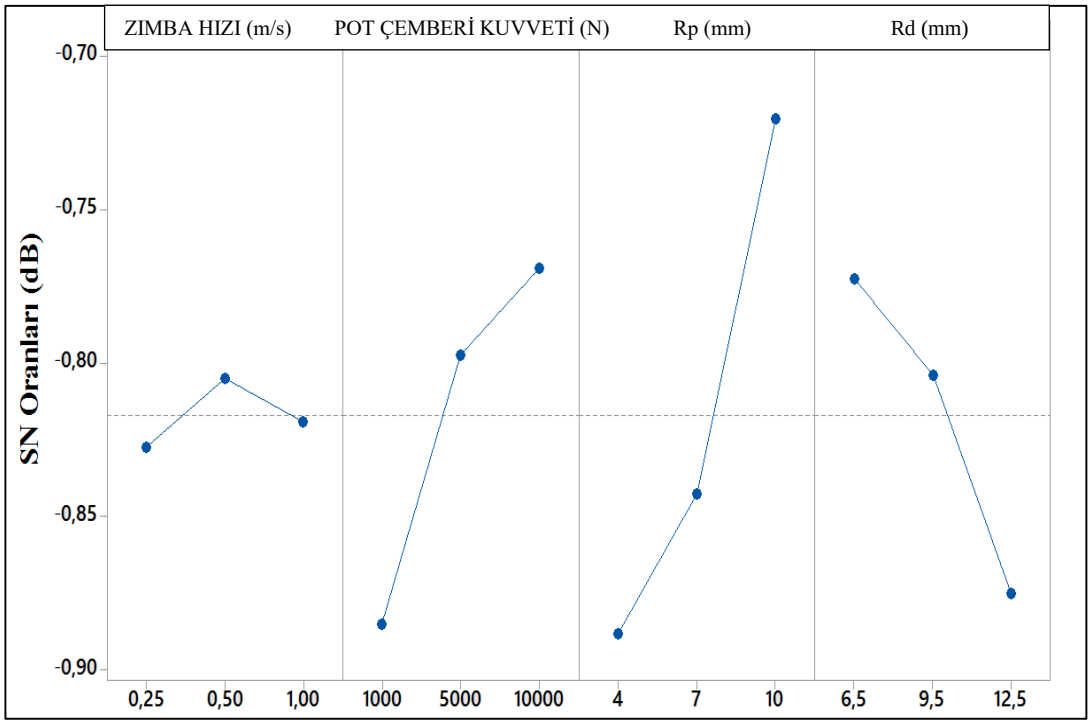


Şekil 4.25. Minimum çeper kalınlık değerleri için elde edilen etki oranları

Minimum çeper kalınlık değerleri içerisinde en büyük kalınlık değerine sahip üründe meydana gelebilecek yırtılma problemin riski daha azdır. Yukarıdaki çizelgede yer alan 4 farklı eğri için ortadaki kesikli çizginin üstünde yer alan en küçük S/N oranları seçilerek, minimum çeper kalınlık değerleri arasında en büyük kalınlık değerlerini veren parametreler saptanmıştır. Sonuç olarak; zımba hızının 0,25 m/sn, pot çemberi kuvvetinin 1000 N, Rp ve Rduzunluğununsırasıyla 10 mm 12,5 mm olduğuparametre değerleri, en düşük çeper kalınlık değerleri içerisinde en yüksek kalınlık değerini vermektedir.

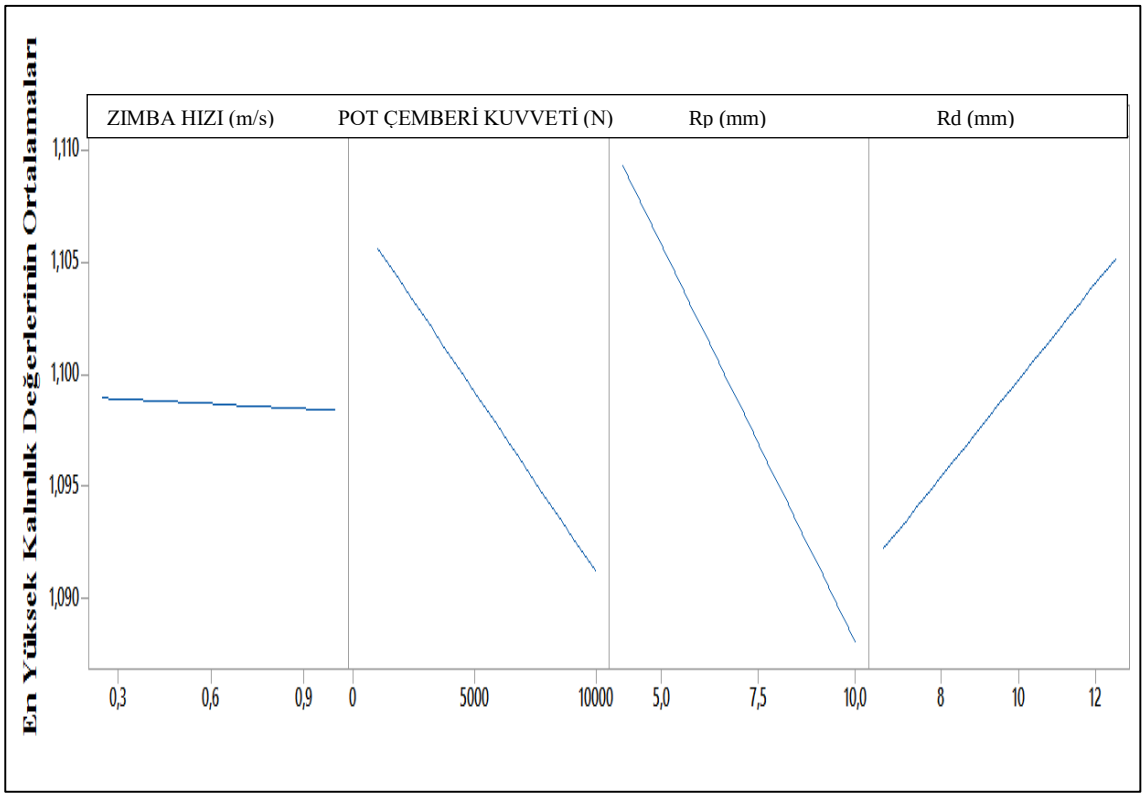
4.3.2 Maksimum Çeper Kalınlık Sonuçlarının Taguchi Analizi

Şekil 4.26, 4 farklı parametreye ait en yüksek kalınlık değerlerinin S/N oranlarını göstermektedir. Çalışmada kullanılan parametrelerin en yüksek kalınlık değerine etkisi aynı değildir. Çizelge 4.2.'de yer alan eğrilerin genliği incelenirse parçanın flanş bölgesinde oluşan kalınlık artışına en düşük etkide bulunan parametrenin, zımba hızı, en yüksek etkide bulunan parametrenin ise Rp olduğu görülmektedir. Rp parametresinden sonra en fazla etkiye sahip parametreler pot çemberi kuvveti ve Rd parametresidir.



Şekil 4.26. En yüksek çeper kalınlık değerleri için elde edilen S/N oranları

Çizelge 4.27.'de, çalışmada yer alan parametrelerin parçada oluşan kalınlık artışına etkisi daha açık bir şekilde görülmektedir. Zımba hızı arttıkça, parçanın flanş bölgesinde oluşan kalınlık değişiminin sabit kaldığı söylenebilir. Pot çemberi kuvvetinin artması ile parçanın flanş bölgesinde kalınlık artışına neden olan basma kuvvetlerine karşı oluşan çekme kuvvetlerinde artış meydana gelmektedir. Rp değerinin artması ile taslak parçada oluşan gerilme değerlerinde düşüş olmakla beraber minimum et kalınlığı değerinin arttığı görülmektedir. Parçanın zımba ucu ile temas eden bölgede oluşan minimum kalınlık değerinin artması, parçanın flanş bölgesinde oluşan maksimum kalınlık değerinde düşüşe neden olmaktadır. Rd uzunluğu arttıkça kalıp ağzı yarıçapı üzerinde büküme uğrayan taslak mazleme akışı kolaylaşır. Parça üzerinde oluşan gerilmelerde düşüş görülür. Flanş bölgesinde oluşan çekme gerilmelerinde oluşan azalma parçanın maksimum kalınlığında artışa neden olmaktadır. Çok yüksek kalıp ağzı yarıçaplarında, flanş bölgesinde oluşan kalınlık artışı ile birlikte kırışıklık görülme riski daha fazladır.

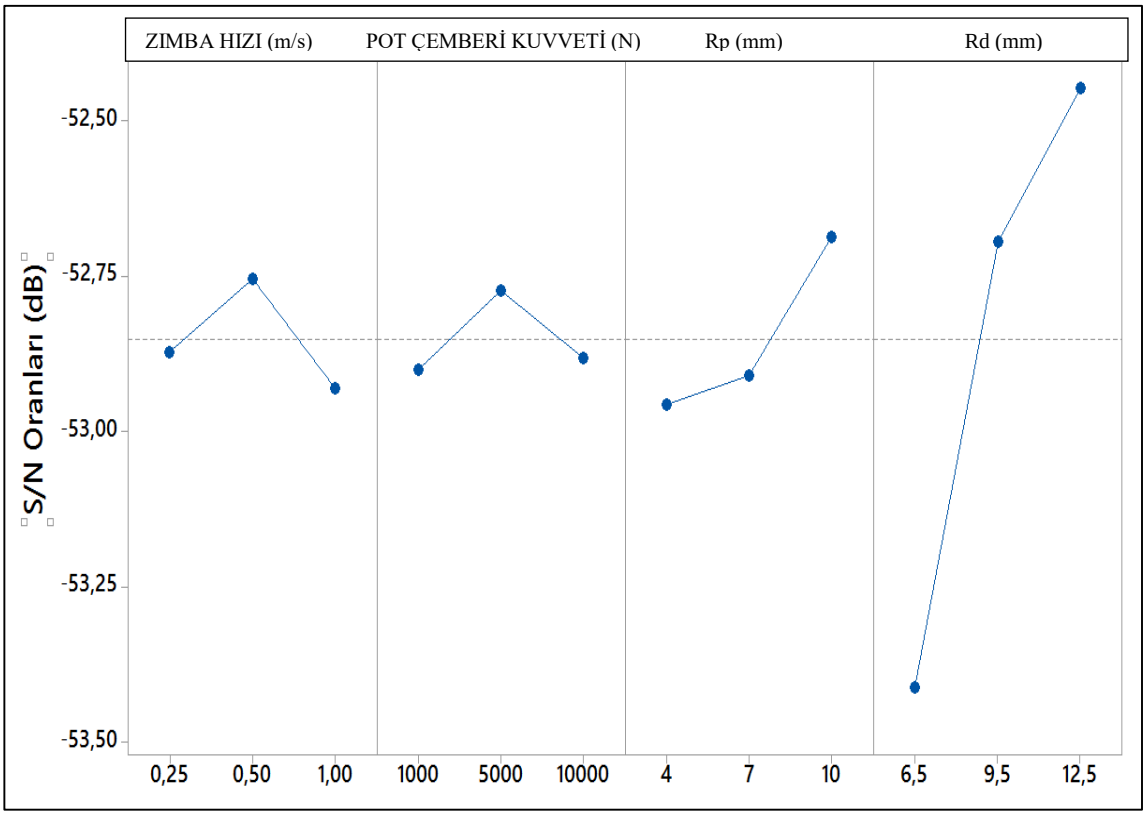


Şekil 4.27. En yüksek çeper kalınlık değerleri için elde edilen etki oranları

Parçanın çekme ve basma kuvvetlerinin oluştuğu flanş bölgesinde kalınlık artarken diğer bölgelerde parça kalınlığında azalma görülmektedir. Flanş bölgesinde oluşan kalınlık artması kırışıklık probleminin ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Bu yüzden oluşan en yüksek kalınlık değerinin en düşük seviyede tutulması istenmektedir. En düşük değerdeki en yüksek kalınlık değeri "en küçük en iyi" iyilemesi ile elde edilir. S/N oranlarını veren Şekil 4.26'ya göre, kesikli çizginin üstünde kalan S/N değerleri dikkate alınırak, en yüksek kalınlık değerleri arasında bulunan en düşük kalınlık değerleri elde edilir. Böylece, zımba hızı için 0,50m/sn, pot çemberi kuvveti için 10000N, Rp için 10mm ve Rd için 6,5mm seçilmiştir.

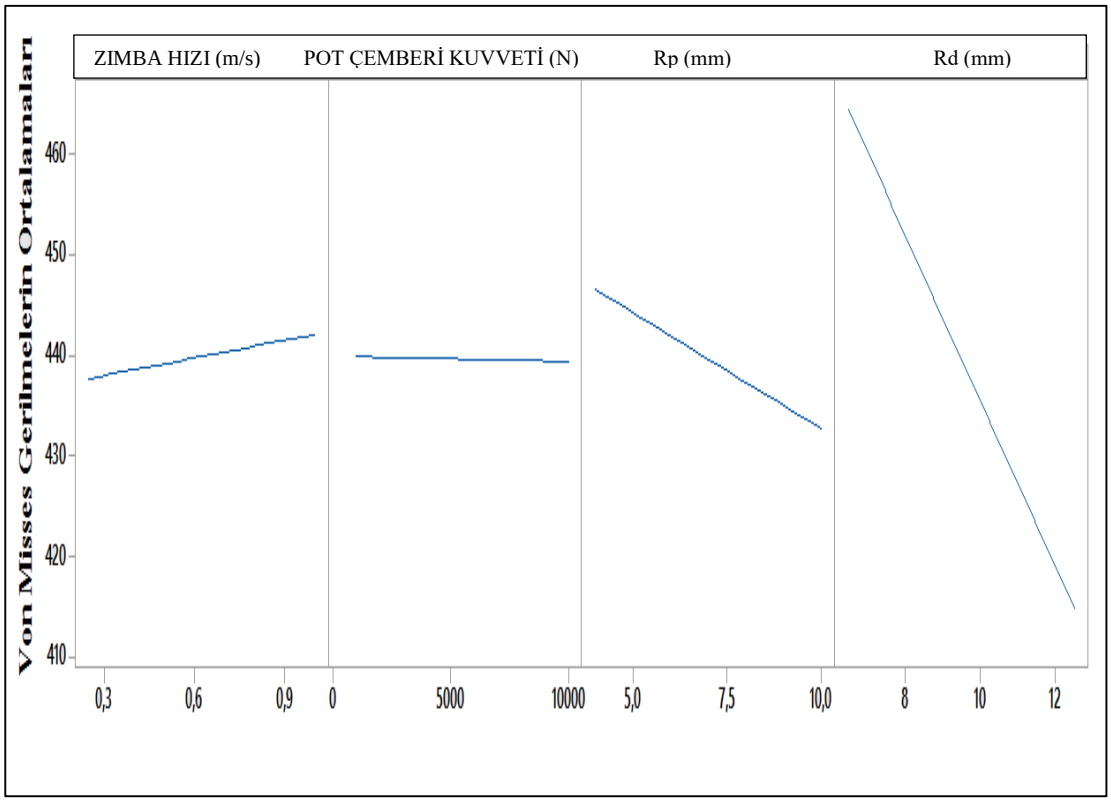
4.3.3 Maksimum Gerilme Sonuçlarının Taguchi Analizi

Şekil 4.28'de maksimum gerilme değerlerinin S/N oranları, değişen parametre seviyelerine göre karşılaştırmaları verilmiştir. Her bir parametrenin gerilme değerlerine etkisi bakımından incelenirse en fazla etki Rd tarafından meydana gelmektedir. Rp parametresinin etkisi Rd kadar olmasa da diğer parametrelerden daha fazladır. Zımba hızı ve pot çemberi kuvvetinin etkisi yaklaşık olarak aynı kabul edilebilir.



Şekil 4.28. En yüksek gerilme değerleri için elde edilen S/N oranları

Şekil 4.29'da maksimum gerilme değerinin, zımba hızı, pot çemberi kuvveti, Rp ve Rd uzunluğu değerleri ile değişimini göstermektedir. Zımba hızı arttıkça elde edilen parça üzerinde oluşan maksiumum gerilme değerleri üzerinde çok düşük bir artış meydana getirmiştir. Pot çemberi kuvvetinin ise parça üzerinde oluşan maksimum gerilmeye etkisi fazla olmamıştır. Kalıp geometrisi içerisinde değerlendirilen kalıp ağzı ve zımba ucu yarıçapı uzunlukları parça üzerinde oluşan maksimum gerilme değerlerinde en fazla etkiye sahip olduğı Şekil 4.28'e bakılarak kolayca söylenebilir. Rp ve Rd uzunluklarındaki artış parça üzerinde oluşan maksimum "Von mises" değerlerinde düşüşe neden olmaktadır. Rd ve Rp uzunlukların artması ile birlikte kalıp içerisinde karmaşık çekme ve basma kuvvetlerine maruz kalan taslak parçasının akışı kolaylaşmaktadır. Azalan Rd ve Rp uzunlukları ile keskinleşen kalıp ağzı ve zımba ucu kenarları, işlem sırasında taslak parçaya yüksek basınç uygulamakta ve bunun neticesinde yüksek gerilmelere sebep olmaktadır.



Şekil 4.29. En yüksek gerilme değerleri için elde edilen etki oranları

Üretim aşamasında parçada oluşan gerilmenin düşük tutulması, yüksek gerilmelerden kaynaklı parrçada oluşacak deformasyonu düşüreceğinden dolayı gerilmenin kontrol altına alınarak, düşük seviyelerde tutulması istenir. Bu çalışmada sonunda elde edilen Von mises gerilme değerleri için "en küçük en iyi" eşitliği kullanılmıştır. Şekil 4.28'de yer alan her bir parametre için kullanılan seviye değerleri içerisinde en yüksek S/N oranını veren girdi verileri zımba hızı için 0,5m/s, pot çemberi kuvveti için 5000N, Rp için 10mm ve Rd için 12,5mm olarak görülmektedir.

5. SONUÇ VE TARTIŞMA

Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak, derin çekme işleminde yer alan parametrelerin minimum kalınlık, maksimum kalınlık ve maksimum gerilme üzerine etkisi incelenmiş, derin çekme işleminin optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. İncelenen literatür ve çalışmaları ışığında incelenmek istenen parametreler ve bunlara bağlı seviye değerleri belirlenmiştir. Zımba hızı, pot çemberi kuvveti, kalıp ağzı ve zımba ucu yarıçapı olmak üzere 4 farklı parametre ve her bir parametreye ait 3 farklı seviye belirlenmiştir. Taguchi metodu kullanılarak belirlenen deney tasarımı yardımı ile 81olan simülasyon sayısı 9'a indirilmiştir. Çalışmanın tutarlılığı için sonlu elemanlar yöntemi ile analizi yapmayı sağlayan ANSYS programı ile yapılan simülasyon sonuçları literatür sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Yapılan karşılaştırmalar bu çalışmada yapılan simülasyon sonuçlarının kabul edilebilir olduğunu göstermiştir. Simülasyon çalışmalarından elde edilen minimum çeper kalınlığı, maksimum çeper kalınlığı ve maksimum gerilme verileri Taguchi yöntemi ile incelenerek çalışmada yer alan zımba hızı, pot çemberi kuvveti, zımba ucu ve kalıp ağzı yarıçapı ile etkileşimi belirlenmiştir.

Derin çekme işleminde parça kalınlığındaki değişimler birçok sorunu beraberinde getirmektedir. Bundan dolayı, minimum kalınlık değerlerinin yüksek olması istenmektedir. Taguchi yöntemi ile minimum kalınlık bulguları incelendiği zaman, çalışmada yer alan parametrelerin etkisinin fazla olduğu görülmektedir. Zımba hızı ve pot çemberi kuvveti arttıkça kalınlık değerlerinde düşüş, Rp ve Rd yarıçap uzunlukları arttıkça minimum kalınlık değerlerinde artış görülmektedir. Yapılan analizlerde minimum kalınlık seviyesi yüksek tutulmak istenirse zımba hızının 0,25 mm/sn, pot çemberi kuvvetinin 1000 N, Rp değerinin 10 mm ve Rd değerinin 12,5 mm olduğu model optimum sonucu vermiştir.

Minimum kalınlık değerinin en düşük olduğu uygulmalarda yırtılma görüldüğü gibi, maksimum kalınlık değerlerinin en yüksek değerlerinde parça üzerinde istenmeyen kırışma problemi de meydana gelmiştir. Bu problemi önlemek için pot çemberi kuvvetinin arttırılması gerektiği literatürde yer almaktadır. Bu çalışmada da görüldüğü üzere pot çemberi kuvveti arttılırsa maksimum kalınlık düşük değerlere çekilebilmektedir. Ayrıca zımba ucu yarıçapı uzunluğunun arttırılması da maksimum kalınlık üzeirnde azaltıcı bir etkiye sahip olduğu anlaşılmıştır. Kalıp ağzı yarıçapı uzunluğunun artması maksimum kalınlık üzerinde arttırıcı bir etki meydana getirdiği görülmüştür. En fazla Maksimum kalınlığın en düşük tutulması istenirse zımba hızı için 0,50 mm/sn, pot çemberi kuvveti için 10000 N, Rp için 10 mm ve Rd için 6,5 mm seçilmelidir.

Derin çekme işlemi ile üretimi yapılan parçalar üzerinde karmaşık çekme ve basma kuvvetleri etki etmektedir. Bu kuvvetler parça üzerinde çekme ve basma gerilmelerine neden olan gerilmelerden kaynaklanan deformasyonlar meydana gelmiştir. Gerilmelerin kontrol altına alınması ve mümkün olan en düşük seviyelerde

tutulması önemlidir. Çalışmada yer alan parametrelerin farklı seviyelerinde zımba ucu yarıçapı ve kalıp ağzı yarıçapı uzunluğunun artması ile gerilmelerin düşürüldüğü görülmüştür. En düşük maksimum gerilme değerleri için zımba hızı 0,5 mm, pot çemberi kuvveti 5000 N, Rp 10 mm ve Rd 12,5 mm olduğu tespit edilmiştir.

Bilindiği üzere derin çekme işlemi içerdiği birçok parametreden dolayı incelenmesi çok zor üretim yöntemlerinden biridir. Ayrıca her bir parametrenin üretilen parça üzerinde etkisi aynı değildir. Derin çekme işlemi, içerdiği karmaşık çekme ve basma kuvvetlerinden dolayı işlem sonuçlarının hesaplanmasını zorlaştırmaktadır. Bundan dolayı derin çekme işlemi araştırmacıların ilgisini çekmektedir. Ancak incelenen çalışmalarda da görülmüştür ki derin çekme ile ilgili yapılan çalışmalarda, işlem parametrelerinin fazla olmasından dolayı sınırlı sayıda parametrenin işlem üzerine etkisi incelenmiştir. Bu çalışmada birçok parametrenin derin çekme işlemi üzerindeki etkisi Taguchi metodu kullanılarak incelenmiştir. Taguchi metodu sayesinde birçok parametrenin etkisi daha az sayıda simülasyon yapılarak bulunabilmekte ancak elde edilen sonuçların daha fazla detaylı olması için bu parametrelere bağlı daha çok sayıda simülasyon yapılma gerekliliği de düşünülmelidir. Bu çalışmada kullanılan derin çekme sacı yerine başka malzemeler kullanılarak daha farklı sonuçlar elde edilebilir. Deneme yanılma yöntemi ile üretim yapılan yerlerde sonlu elemanlar yöntemi ile çözüm yapan bilgisayar programları kullanılarak üretim aşamasında parçada gerçekleşen olaylar sanal ortamda görülebilir ve herhangi bir maddi ve zaman kaybına neden olmadan alınması gereken tedbirler önceden alınabilir.

6. KAYNAKLAR

Aytaç, F. 2007. Matris açılı derin çekme kalıplarında alüminyumun derin çekilmesinde açı değişiminin çekme oranı üzerine etkisinin deneysel araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.

Bal, M. 2007. Açılı derin çekme kalıplarında matris ve zımba radyüsünün çekme oranına etkisinin araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.

Black, J., Kohser, R. 2008. Sheet Forming Processes. De Garmo's Materials and Processes in Manufacturing. Singapur, 512.

Candra, S., Batan, L., Berata, W., Pramono A. 2015. Analytical study and fem simulation of the maximum varying blank holder force to prevent cracking on cylindrical cup deep drawing. ***12th Global Conference on Sustainable Manufacturing, Procedia CIRP 26***, Endonezya, 548 – 553.

Cerit, A. M., 1996. Makina Mühendisliği El Kitabı Üretim ve Tasarım Cilt 2. TMMOB Makina Mühendisleri Odası Yayınları, Yayın No: 170, Sayfa:720, Ankara.

Choubey, A., Agnihotri, G., Sasikumar, C. 2015. Numerical validation of experimental result in deep drawing***. Materials Today: Proceedings***, 2 (2015): 1951 – 1958.

Çetin, M., S. 2007. Derin çekme ile soğuk şekillendirmenin sonlu elemanlar metodu yardımıyla analizi. Yüksek Lisans Tezi, Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Edirne, 64.

Dwivedi, R., Agnihotri, G. 2015. Numerical simulation of aluminum and brass material cups in deep drawing process. ***Materials Today: Proceedings***, 2 (2015): 1942 – 1950.

Erbas, O. 2014. Experimental and numerical analysis of deep drawability of aluminum alloys AA5754-H22 and AA6061-T6. Türk Alman Üniversitesi, Almanya.

Erişkin, Y., 1986. Uygulamalı Sac Metal Kalıp Konstrüksiyonu. Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Yayınları, Ankara, 127-159.

Grote, K., H., Antonsson, E. K. 2011. Springer Handbook of Mechanical Engineering. 1231, İngiltere.

Gürün, H. 2008. Derin çekme kalıplarındaki parametrelerin deneysel olarak incelenmesi ve bulanık mantık ile tahmini. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

Hassan, M., Hezam, L., El-Sebaie, M., Purbolaksono, J. 2014. Deep drawing characteristics of square cups throuh conical dies. ***Procedia Engineering***, 81 (2014): 873-880.

Ispir, I., Esen, I., I. Kadi I., M. Yasar, M. 2011. Analysis of deep drawing process of a semi-spherical-conical container made of aısı 304l using ansys ls-dyna**.** ***6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11)***, 16-18 May 2011, Elazığ.

Kamber, Ö., Ş. 2008. Plastik enjeksiyon kalıplarında basınç ve sıcaklık parametrelerinin ürün kalitesine etkileri ve Taguchi yöntemi ile optimizasyonu. Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 176.

Lee, Y.S., Kwon, Y.N., S.H., Kang, Kim, S.W., Lee, J.H. 2008.Forming limit of AZ31 alloy sheet and strain rate on warm sheet metal forming.***Journal of Materials Processing Technology***, 201 (2008): 431–435.

Li, J.,Wang, B., Zhou, T. 2014. Analysis and optimization of variable depth increments in sheet metal incremental forming**.** ***J. Cent. South Univ***.,21 (2014): 2553−2559.

Ma, W,,Wang, B., Fu, L., Zhou, J., Huang, M. 2015. Influence of process parameters on deep drawing of AA6111 aluminum alloy at elevated temperatures. ***J. Cent. South Univ***., 22 (2015): 1167−1174.

Mostafapur, A., Ahangar S., Dadkhah R. 2013. Numerical and experimental investigation of pulsating blankholder effect on drawing of cylindrical part of aluminum alloy in deep drawing process**.** ***Int J Adv Manuf Technol***, 69 (2013): 1113–1121.

Özçelik, G., 2008. Derin çekme işleminin simülasyonu. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 162.

Padmanabhan, R., Oliveira, M. C., 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 (2007): 1062 – 1067.

Raju, S., Ganesan, G., Karthikeyan, R., 2010. Influence of variables in deep drawing of AA 6061 sheet. ***Trans. Nonferrous Met. Soc. China,*** 20 (2010): 1856-1862.

Schweizerhof, K.; Hallquist, J.O. 1991. Explicit integration schemes and contact formulations for thin sheet metal forming in: FE-Simulation of 3D Sheet Metal Forming Processes in Automotive Industry. ***VDI-Berichte*** Vol. 894, , 405-439.

Siegert, K., Wagner, S. 1994. TALAT Lecture Deep Drawing. Institut für Umformtechnik, Universität Stuttgart, 15.

Simões, V. M. N., 2012. Analysis of the influence of process parameters in the deep drawing of a cylindrical cup. Yüksek Lisans Tezi, Universidade Coimbra Faculdade de Ciencias e Tecnologia, Coimbra, 88.

Sönmez, Ç., 2005. Investıgatıon of the deep drawability of steel and aluminum sheets by finite element simulation Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 245.

Suchy, I. 2006. Handbook of die design. New York, 711.

Sünkür, E., 2016. Ekstrüzyon işleminde proses parametrelerinin etkisinin sonlu elemanlar ile analizi ve taguchi yöntemi ile optimizasyonu. Yüksek Lisans Tezi, Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Diyarbakır, 70.

Şirvancı, M., 1997. Kalite için deney tasarımı, Literatür yayınları. İstanbul, 110.

Taylan, D., 2009. Taguchi deney tasarımı uygulaması. Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, 62.

Tekkaya, A. E. (2000). State of the Art of Simulation of Sheet Metal Forming. Journal of Materials Processing Technology, 103 (2000): 15-23.

Wallmeier, M., Linvill, E., Hauptmann, M., Majschak, J. P., Östlund, S. 2015. Explicit FEM analysis of the deep drawing of paperboard**.** ***Mechanics of Materials***, 89: 202–215.

Yalcin, S. 2010. Analysis and modeling of plastic wrinkling in deep drawing. Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 3.

Yang, L., Mori, K., Tsuji, H. 2007. Deformation behaviors of magnesium alloy AZ31 sheet in cold deep drawing. ***Trans. Nonferrous Met. Soc. China***, 18 (2008): 86-91.

Yoshihara, S., Manabe, K., Nishimura, H. 2005. Effect of blank holder force control in deep-drawing process of magnesium alloy sheet. ***Journal of Materials Processing Technology***, 170 (2005): 579–585.

Zein,H., El-Sherbiny, M., Abd-Rabou, M., El Shazly, M. 2013.Effect of die design parameters on thinning of sheet metal in the deep drawing process. ***American Journal of Mechanical Engineering***, 1 (2013): 20-29.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı: Baver YILDIZ

Doğum Tarihi: 23.03.1992

Doğum Yeri: Diyarbakır

Yabancı Dil: İngilizce, İtalyanca

EĞİTİM DURUMU

İlköğretim: Ali Emiri İlköğretim OkuluDiyarbakır/ Yenişehir

Lise: Nevzat Ayaz Anadolu Lisesi Diyarbakır/Yenişehir

Lisans:Çukurova Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Adana 2015

Yüksek Lisans: Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Diyarbakır 2017

T.C.
DİCLE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS TEZ ÇALIŞMASI İNTİHAL RAPORU FORMU

ÖĞRENCİ BİLGİLERİ	
ADI VE SOYADI	BAVER YILDIZ
ÖĞRENCİ NO	15818004
EĞİTİM – ÖĞRETİM YILI	2016-2017
YARIYIL	☐ Güz ☒ Bahar
ANABİLİM DALI	MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ
PROGRAM	Yüksek Lisans
TEZ KONUSU	DERİN ÇEKME İŞLEMİNDE KALIP TASARIMININ SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE OPTİMİZASYONU
İNTİHAL RAPORU BİLGİLERİ	
RAPOR TÜRÜ	Tez Savunma Sınavı Sonrası
SAYFA SAYISI	83
BENZERLİK ORANI	%14
RAPORLAMA TARİHİ	30/05/2017

Yukarıda başlığı/konusu gösterilen tez çalışmamın kapak sayfası, giriş, ana bölümler, sonuç ve tartışma kısımlarından oluşan toplam 83 sayfalık kısmına ilişkin, 30/05/2017 tarihinde şahsım/tez danışmanım tarafından TURNİTİN adlı intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan intihal raporuna göre, tezimin benzerlik oranı %14'tür.

Uygulanan filtrelemeler:

☐ Kabul/Onay sayfaları hariç,
☐ Kaynakça hariç
☐ Alıntılar hariç/dâhil
☐ Diğer

Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Programlarda Tez Çalışması İntihal Raporu Uygulama Esasları'nı inceledim ve bu Uygulama Esasları'nda belirtilen azami benzerlik oranlarına göre tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini; aksinin tespit edilmesi durumunda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Gereğini saygılarımla arz ederim.

(İmza)
Baver YILDIZ

(İmza) 27/07/2017 Yrd. Doç. Dr. SEDAT BİNGÖL **Tez Danışmanı**	(İmza) 27/07/2017 Doç. Dr. Vedat ORUÇ **Anabilim Dalı Başkanı**