

**T.C.
SAKARYA UYGULAMALI BİLİMLER ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**DC04 SACININ KADEMELİ ARTIMLI ŞEKİLLENDİRME
YÖNTEMİ İLE ŞEKİLLENDİRİLEBİLİRLİĞİNİN
ARAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ümit ÖNAL

Enstitü Anabilim Dalı : İMALAT MÜHENDİSLİĞİ
Tez Danışmanı : Prof. Dr. İbrahim ÖZSERT
Ortak Danışmanı : Dr. Öğr. Üyesi Ömer SEÇGİN

Ağustos 2020

T.C.
SAKARYA UYGULAMALI BİLİMLER ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

DC04 SACININ KADEMELİ ARTIMLI ŞEKİLLENDİRME
YÖNTEMİ İLE ŞEKİLLENDİRİLEBİLİRLİĞİNİN
ARAŞTIRILMASI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ümit ÖNAL

Enstitü Anabilim Dalı : İMALAT MÜHENDİSLİĞİ

Bu tez 28/08/2020 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği/oyçokluğu ile kabul edilmiştir.

JÜRİ	BAŞARI DURUMU
Jüri Başkanı: Prof. Dr. İbrahim ÖZSERT	BAŞARILI
Üye: Prof. Dr. Durmuş KARAYEL	BAŞARILI
Üye: Doç. Dr. Ahmet Demirer	BAŞARILI
Üye: Dr. Öğr. Üyesi Osman Hamdi METE	BAŞARILI
Üye: Dr. Öğr. Üyesi Ömer SEÇGİN	BAŞARILI

BEYAN

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.

Ümit Önal

28/08/2020

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca değerli bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım, her konuda bilgi ve desteğini almaktan çekinmediğim, araştırmanın planlanmasından yazılmasına kadar tüm aşamalarında yardımlarını esirgemeyen değerli danışman hocam Prof. Dr. İbrahim ÖZSERT'e teşekkürlerimi sunarım.

Çalışma boyunca sürekli danıştığım, değerli bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım, her konuda bilgi ve desteğini almaktan çekinmediğim ve her konuda bana yardımcı olan, teşvik eden, aynı titizlikte beni yönlendiren değerli ortak danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Ömer SEÇGİN'e ayrıca teşekkürlerimi sunarım.

Bugünlere gelmemde büyük emekleri olan, her zaman desteklerini yanımda hissettiğim değerli annem, babam, ablam ve ailesine teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

BEYAN.....	ii
TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
KISALTMALAR	iv
SİMGELER	v
TABLOLAR LİSTESİ.....	vii
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	viii
ÖZET.....	xi
SUMMARY	xii

BÖLÜM 1.

GİRİŞ	1
-------------	---

BÖLÜM 2.

LİTERATÜR TARAMASI	4
2.1. Bükme Yöntemi	4
2.2. Derin Çekme Yöntemi	5
2.3. Diğer Sac Şekillendirme Yöntemleri	6
2.4. Artımlı Şekillendirme Yöntemi.....	6
2.4.1. Tek noktadan artımlı şekillendirme yöntemi	6
2.4.2. İki noktadan artımlı şekillendirme yöntemi	7
2.4.3. Çift taraflı artımlı şekillendirme yöntemi	9
2.4.4. Kayar artımlı şekillendirme yöntemi	10

BÖLÜM 3.

MATERYAL VE YÖNTEM.....	16
3.1. Materyal	16
3.2. Yöntem	16
3.2.1. Deney geometrisinin belirlenmesi	16
3.2.2. Deney parametrelerinin belirlenmesi	18

3.2.3. Deney düzeneğinin oluşturulması	19
3.2.4. Deneyin yürütülmesi	25
3.2.5. Et kalınlığının belirlenmesi	30
3.2.6. Yüzey pürüzlülüğü ölçümü	32
3.2.7. Şekillendirme kuvvetinin belirlenmesi	34
3.2.8. Geometrik doğruluk analizi	36
3.2.9. İstatistiksel analiz	38
3.2.9.1. Varyans analizi	38
3.2.9.2. Cevap yüzey metodu	38
3.2.9.3. Gri ilişkisel analiz	39

BÖLÜM 4.

DENEYSEL ÇALIŞMA SONUÇLARI	42
4.1. Et Kalınlığı	42
4.2. Yüzey Pürüzlülüğü	46
4.3. Şekillendirme Kuvveti	50
4.4. Geometrik Doğruluk Analizi	71
4.5. Gri İlişkisel Analiz	73
4.6. Amortisör Yay Sacı İmalatı	75

BÖLÜM 5.

SONUÇ VE ÖNERİLER	85
KAYNAKLAR	89
ÖZGEÇMİŞ	95

KISALTMALAR

ANOVA	: Varyans Analizi
CNC	: Bilgisayar Sayımlı Yönetim
CAD	: Bilgisayar Destekli Tasarım



SİMGELER

A	: Açı Artımı
Al	: Alüminyum
C	: Karbon
Cr	: Krom
dak	: Dakika
F	: İlerleme Hızı
Fe	: Demir
F_x	: X eksenindeki kuvvet
F_y	: Y eksenindeki kuvvet
F_z	: Z eksenindeki kuvvet
mm	: Milimetre
Mn	: Manganez
Mo	: Molibden
MoS₂	: Molibdendisülfid
Nb	: Niyobyum
Ni	: Nikel
nm	: Nanometre
P	: Basınç
PC	: Polikarbonat
PCL	: Polikaprolakton
PP	: Polipropilen
PVC	: Polivinil klorür
Ra	: Yüzey pürüzlülüğü
S	: Kükürt
Si	: Silisyum
Sn	: Kalay

t : Et Kalınlığı
Ti : Titanyum
UHMWPE : Ultra yüksek moleköl ağırlıklı polietilen
° : Derece
µm : Mikrometre
Z : Artım Miktarı



TABLolar LİSTESİ

Tablo 3.1 : DC04 sacının mekanik özellikleri.	16
Tablo 3.2 : DC04 sacının kimyasal özellikleri.....	16
Tablo 3.3 : Pnömatik klemp baskı kuvvetleri (Seçgin, 2019b).....	22
Tablo 3.4 : Deney parametreleri ve seviyeleri.	26
Tablo 3.5 : Deney planı.	28
Tablo 4.1 : Et kalınlığı değerleri (mm).	43
Tablo 4.2 : Et kalınlığı ölçümü varyans analizi.	44
Tablo 4.3 : Yüzey pürüzlülük ölçümü sonuçları.....	47
Tablo 4.4 : Yüzey pürüzlülüğü varyans analizi.	48
Tablo 4.5 : Şekillendirme kuvveti maksimum değerleri.....	66
Tablo 4.6 : Şekillendirme kuvveti varyans analizi.....	68
Tablo 4.7 : Gri ilişkisel analiz sonuçları.	74
Tablo 4.8 : Amortisör yay sacı et kalınlığı dağılımı.	83

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1 : Düz eksen de v bükme yöntemi (Demirkol, 2010).....	4
Şekil 1.2 : Düz eksen de kenar bükme yöntemi (Demirkol, 2010).....	4
Şekil 1.3 : Derin çekme yöntemi (Demirkol, 2010).....	5
Şekil 1.4 : Tek noktadan artımlı şekillendirme yöntemi düzeneği (Silva ve Martins, 2013).....	7
Şekil 1.5 : İki noktadan artımlı şekillendirme yöntemi düzeneği (Silva ve Martins, 2013).....	8
Şekil 1.6 : Kısmi modellen i iki noktadan artımlı sac şekillendirme yöntemi düzeneği (Silva ve Martins, 2013).....	9
Şekil 1.7 : Çift taraflı artımlı şekillendirme yöntemi düzeneği (Shankar, Jadhav, Goebel, Homberg ve Kleiner, 2005).....	9
Şekil 1.8 : Kayar artımlı şekillendirme yöntemi düzeneği (Seçgin ve Özsert, 2019b).....	10
Şekil 2.1 : Çift taraflı artımlı şekillendirme yönteminde yine bir takım yolu stratejisi (Malhotra ve diğerleri, 2011).....	15
Şekil 3.1 : Deney geometrisinin CAD datası.....	17
Şekil 3.2 : Deney geometrisinin teknik çizimi.....	17
Şekil 3.3 : Şekillendirmeye hazır deney parçası.....	18
Şekil 3.4 : Kayar artımlı şekillendirme yöntemi (Seçgin, 2019b).....	19
Şekil 3.5 : Modelin teknik çizimi.....	20
Şekil 3.6 : 10° açı artımının model üzerinde görünümü.....	21
Şekil 3.7 : Pnömatik klemp kuvvet ölçümü (Seçgin, 2019b).....	22
Şekil 3.8 : Pnömatik klempelerin düzeneği.....	23
Şekil 3.9 : Form takımı.....	24
Şekil 3.10 : Form takımına ait teknik bilgiler.....	24
Şekil 3.11 : Şekillendirme sırasından bir görsel.....	25
Şekil 3.12 : DAHLIH MCV 860 CNC freze tezgâhı.....	26
Şekil 3.13 : Spiral takım yolu.....	27
Şekil 3.14 : Deneylere ait şekillendirilen saclar.....	29
Şekil 3.15 : Tez planı.....	30
Şekil 3.16 : Et kalınlığı ölçümü için kesilmiş deney parçası.....	31
Şekil 3.17 : Master yardımı ile et kalınlığı ölçüm noktalarının belirlenmesi.....	31
Şekil 3.18 : Et kalınlığı ölçümü için markalanmış parça.....	32
Şekil 3.19 : Et kalınlığı ölçümü.....	32
Şekil 3.20 : Yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı.....	33
Şekil 3.21 : Yüzey pürüzlülüğü ölçüm anı.....	33
Şekil 3.22 : Farklı açıdan yüzey pürüzlülüğü ölçüm anı.....	34
Şekil 3.23 : Kuvvet ölçüm sistemi mekanik tasarımı. A: Perspektif görünüm. B:Detaylar.(Seçgin, 2019b).....	35
Şekil 3.24 : Kuvvet ölçüm sistemi arayüzü.....	36
Şekil 3.25 : Kuvvet ölçüm sistemi (Seçgin, 2019b).....	36

Şekil 3.26 : Optimizasyon parçalarının 3D tarama anı.	37
Şekil 3.27 : Geometrik doğruluk analizi ölçüm anı.	38
Şekil 4.1 : En yüksek et kalınlığı için parametrelerin optimum seviyeleri.	45
Şekil 4.2 : Deneylerin yüzey pürüzlülüğü dağılım grafiği.	48
Şekil 4.3 : Yüzey pürüzlülüğü için parametrelerin optimum seviyeleri.	49
Şekil 4.4 : Deney 1'e ait kuvvet grafiği.	50
Şekil 4.5 : Deney 2'ye ait kuvvet grafiği.	51
Şekil 4.6 : Deney 3'e ait kuvvet grafiği.	52
Şekil 4.7 : Deney 4'e ait kuvvet grafiği.	52
Şekil 4.8 : Deney 5'e ait kuvvet grafiği.	53
Şekil 4.9 : Deney 6'ya ait kuvvet grafiği.	53
Şekil 4.10 : Deney 7'ye ait kuvvet grafiği.	54
Şekil 4.11 : Deney 8'e ait kuvvet grafiği.	54
Şekil 4.12 : Deney 9'a ait kuvvet grafiği.	55
Şekil 4.13 : Deney 10'a ait kuvvet grafiği.	56
Şekil 4.14 : Deney 11'e ait kuvvet grafiği.	56
Şekil 4.15 : Deney 12'ye ait kuvvet grafiği.	57
Şekil 4.16 : Deney 13'e ait kuvvet grafiği.	57
Şekil 4.17 : Deney 14'e ait kuvvet grafiği.	58
Şekil 4.18 : Deney 15'e ait kuvvet grafiği.	59
Şekil 4.19 : Deney 16'ya ait kuvvet grafiği.	59
Şekil 4.20 : Deney 17'ye ait kuvvet grafiği.	60
Şekil 4.21 : Deney 18'e ait kuvvet grafiği.	60
Şekil 4.22 : Deney 19'a ait kuvvet grafiği.	61
Şekil 4.23 : Deney 20'ye ait kuvvet grafiği.	61
Şekil 4.24 : Deney 21'e ait kuvvet grafiği.	62
Şekil 4.25 : Deney 22'ye ait kuvvet grafiği.	62
Şekil 4.26 : Deney 23'e ait kuvvet grafiği.	63
Şekil 4.27 : Deney 24'e ait kuvvet grafiği.	64
Şekil 4.28 : Deney 25'e ait kuvvet grafiği.	64
Şekil 4.29 : Deney 26'ya ait kuvvet grafiği.	65
Şekil 4.30 : Deney 27'ye ait kuvvet grafiği.	65
Şekil 4.31 : X ekseninde oluşan şekillendirme kuvvetleri dağılımları.	67
Şekil 4.32 : Y ekseninde oluşan şekillendirme kuvvetleri dağılımları.	67
Şekil 4.33 : Z ekseninde oluşan şekillendirme kuvvetleri dağılımları.	68
Şekil 4.34 : Şekillendirme kuvveti için optimum parametrelerin belirlenmesi.	69
Şekil 4.35 : Optimum parametre seviyeleri deneyi kuvvet dağılım grafiği.	70
Şekil 4.36 : Et kalınlığı optimizasyon parçasının geometrik doğruluk analiz sonucu.	71
Şekil 4.37 : Yüzey pürüzlülüğü optimizasyon parçasının geometrik doğruluk analiz sonucu.	72
Şekil 4.38 : Şekillendirme kuvveti optimizasyon parçasının geometrik doğruluk analiz sonucu.	73
Şekil 4.39 : Amortisör yay sacının teknik resmi.	75
Şekil 4.40 : Amortisör yay sacının izometrik görünümü.	76
Şekil 4.41 : Küçük form takımı teknik resmi.	76
Şekil 4.42 : Amortisör yay sacı modelinin kesit alınmış teknik çizmi.	77
Şekil 4.43 : Amortisör yay sacı modelinin kesit alınmış izometrik görünümü.	77
Şekil 4.44 : Modelin sisteme bağlanması.	78
Şekil 4.45 : Amortisör yay sacı için her açı artımının model üzerinde kesit görünümü	78

Şekil 4.46 : Amortisör yay sacı ilk futuranın şekillendirilmesi.	79
Şekil 4.47 : Amotrisör yay sacı gövde bölgesinin şekillendirilmesi.	79
Şekil 4.48 : Amotrisör yay sacı negatif faturanın şekillendirilmesi.	80
Şekil 4.49 : Amotrisör yay sacı dördüncü adımın şekillendirilmesi.	81
Şekil 4.50 : Amortisör yay sacı.	81
Şekil 4.51 : Flanş bölgesi kesilmiş amortisör yay sacı.	82
Şekil 4.52 : Et kalınlığı ölçümü için kesilip markalanan parça.	82
Şekil 4.53 : Amortisör yay sacı parçasının geometrik doğruluk analiz sonucu.	83



DC04 SACININ KADEMELİ ARTIMLI ŞEKİLLENDİRME YÖNTEMİ İLE ŞEKİLLENDİRİLEBİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI

ÖZET

Artımlı şekillendirme yöntemi prototip üretimlerde kullanılan hızlı ve düşük maliyet avantajı sağlayan bir metottur. Bu yöntemde, istenilen geometri doğrultusunda takım yolu oluşturulur. Bu takım yolu, kesici olmayan bir takım ile sacı tasarlanan geometri doğrultusunda plastik deformasyona uğratarak şekillendirme gerçekleştirir. Sac şekillendirme yöntemlerinde, üretilmek istenen geometrinin üzerindeki dik kenarlar sacda yırtılmalara neden olabilmektedir. Yırtılmaların önüne geçmek için farklı açılarda kademeli olarak şekillendirme yapılabilmektedir.

Çalışma kapsamında, kademeli kayar artımlı şekillendirme yöntemi kullanılarak 0,98 mm kalınlığa sahip DC04 sacı şekillendirilmiştir. Şekillendirmeye etkisi olan sıkma basıncı, ilerleme hızı, açı artımı ve artım miktarı parametreleri için üç farklı seviye belirlenip Box-Behnken deney seti kullanılarak deney düzeneği oluşturulmuştur. Deney geometrisi aksel simetrik olup 90° dik duvar açısına sahiptir. Form takımı civa çeliğinden üretilmiş olup tüm çalışma boyunca aynı takım kullanılmıştır. Yağlayıcı olarak molibden disülfid kullanılmıştır. Tüm deneylerde sac önce direk olarak 50°'ye ardından deney parametresine göre açı artım miktarı doğrultusunda artımlarla ve son olarak 90°'ye şekillendirilmiştir. Deney düzeneğinin sunduğu 27 deney gerçekleştirilerek elde edilen veriler doğrultusunda Cevap – Yüzey Analizi yöntemiyle yüzey pürüzlülüğü, et kalınlığı ve şekillendirme kuvveti için ayrı ayrı optimum parametre seviyeleri belirlenmiştir. Bu parametre seviyeleri doğrulama deneyleri yapılarak başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Sonuçların tahmini için regresyon denklemleri elde edilmiştir. Doğrulama deneyi parçalarının 3D tarama işlemi yapılarak tasarlanan geometri ile üretilen geometri karşılaştırılıp geometrik doğruluk ölçülmüştür. Yüzey pürüzlülüğü, et kalınlığı ve şekillendirme kuvveti faktörlerinin, birbirleriyle olan etkisini araştırmak ve optimum parametre seviyelerini elde edebilmek için Gri ilişkisel analiz gerçekleştirilmiştir. Et kalınlığı optimum parametre seviyeleri kullanılarak otomotiv sektöründe amortisör yay sacı olarak adlandırılan parçanın imalatı gerçekleştirilmiştir.

Çalışmadan elde edilen veriler doğrultusunda, DC04 sacının kullanım yerine göre hangi faktörde optimum sonuç isteniyorsa, çalışmada belirlenen parametre seviyeleri kullanılarak elde edilebilir. Tüm faktörler için optimum parametre isteniyorsa, çalışmada gerçekleştirilen Gri ilişkiler analizi parametresi kullanılarak elde edilebilir. Elde edilen regresyon denklemleriyle kullanılan parametre seviyeleri doğrultusunda tahmini olarak elde edilecek değere ulaşılabilir.

Anahtar Kelimeler: DC04, Artımlı Sac Şekillendirme, Kademeli Kayar Artımlı Sac Şekillendirme, Box-Behnken, Cevap Yüzey Analizi.

INVESTIGATION OF THE FORMABILITY OF DC04 SHEET WITH MULTI-STAGE INCREMENTAL FORMING METHOD

SUMMARY

The incremental forming method provides rapid and low cost advantages and is used in prototype production. In this method, the tool paths formed are forming take advantage of plastic deformation with a non-cutting tool in accordance with the designed geometry. In sheet metal forming methods, perpendicular edges on the geometry desired to be produced can cause tearing of the sheet. Multi stage shaping can be done at different angles for prevent tearing..

In this study, DC04 sheet with a thickness of 0.98 mm was shaped using multi-stage rolling blank holder incremental forming method. Clamping pressure, feed rate, angle increment and increment amount were determined as shaping parameters. Three different levels were determined for all parameters. An experimental setup was created using the Box-Behnken experiment set. Shaping geometry is axially symmetrical and has a 90° vertical wall angle. Forming tool is produced from mercury steel and the same tool is used throughout the study. Molybdenum disulfide is used as lubricant. In all experiments, the sheet is first shaped directly to 50 °, then according to the experimental parameter with increments in line with the angle increment quantity and finally to 90°. In accordance with the data obtained by performing 27 experiments presented by the experimental setup, the optimum parameter levels were determined separately for the surface roughness, wall thickness and shaping force by the Answer - Surface Analysis method. Successful results were obtained by verifying experiments with these parameter levels. Regression equations were obtained to estimate the results. The geometric accuracy was measured by performing 3D scanning of the parts of the verification experiment. Gray Relational analysis was performed to investigate the effect of surface roughness, wall thickness and forming force factors on shaping, with each other and to obtain optimum parameter levels. In the automotive sector, the part called the shock absorber spring plate was manufactured by using the optimum wall thickness parameters.

In accordance with the data obtained from the study, the surface roughness, wall thickness and shaping force factors of the DC04 sheet can be obtained by using the parameter determined in the study, whichever factor is desired according to the usage place. If the optimum parameter is desired for all factors, it can be obtained using the Gray Relations analysis parameter performed in the study. The estimated value can be reached in line the parameter levels used with the regression equations obtained.

Keywords: DC04, Incremental Sheet Forming, Rolling Blank Holder Incremental Forming, Sheet Forming, Box-Behnken, Response-Surface Analysis.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Endüstriyel uygulamalarda ağırlık-dayanım avantajlarından dolayı sac metal malzemeler sıkça kullanılmaktadır (Esener ve diğ., 2018). Otomotiv, havacılık, beyaz eşya ve diğer endüstriyel sektörlerde kullanılan birçok parça yassı hadde mamülleri olarak adlandırılan saclar ve levhaların şekillendirilmesiyle imal edilmektedir (Demirkol, 2010). Sac şekillendirme işlemlerinde metallere, kalıplar veya çeşitli takımlarla elde edilmek istenen geometri doğrultusunda kuvvet uygulanır. Bu işlemde metallerin, plastik akma kabiliyetinden faydalanılır. Bu özellik sayesinde malzemenin yapısı bozulmadan katı halde şekillendirme gerçekleştirilir (Karamış, 2012).

Endüstride, ürünlerin hızlı geliştirilmesi adına tedarik sürelerinin kısaltılması ve üretim maliyetlerinin düşürülmesiyle ilgili çok sayıda çalışmalar yapılmaktadır. Bu gereklilikleri karşılamak için pek çok hızlı prototipleme işlemi denenmiştir. Ancak hızlı prototipleme işlemleri yüksek malzeme maliyeti, düşük kalite ve düşük mukavemet gibi kaçınılmaz sınırlamalara sahiptir. Endüstrinin ihtiyaç duyduğu, sac metali esnek bir şekilde istenilen şekle deforme edebilen yöntem olarak artımlı sac şekillendirme işlemi geliştirilmektedir (Kim ve Yang, 2000).

Artımlı şekillendirme yöntemi ilk olarak Amerika Birleşik Devletleri'nde 1967 yılında patentlenmiştir (Anonim, 1967). Kullanımı ve geliştirilmesi son yirmi yılda önemli ölçüde artmıştır. Bunun nedeni iki farklı faktör olarak belirtilebilir. Birinci olarak üretim alanında hızla gelişen bilgisayar destekli tasarım programları ve imalat yazılımlarıdır. Bu gelişmeler yöntemi oldukça basit hale getirmiştir. İkinci olarak az sayıda parti ve prototip üretimlerinde diğer sac şekillendirme yöntemlerine kıyasla düşük maliyet imkanı sağlamasıdır (Jackson, 2008). Ayrıca bu yöntem, parçalar doğrudan CAD dosyası üzerinden üretilebildiği için tasarımda esnek ve hızlı değişiklik imkanı sunmaktadır. Bir diğer avantaj olarak bu yöntemde form takımının parça üzerinde oluşturduğu küçük deformasyon bölgeleri nedeniyle diğer sac şekillendirme yöntemlerine göre daha yüksek gerilme değerleri elde

edilmektedir. Bu da düşük kuvvet ile yüksek deformasyon sağlamaktadır (Tisza, 2012). Yöntemin avantajlarının yanı sıra dezavantajları da bulunmaktadır. En büyük dezavantaj olarak şekillendirme süresinin derin çekme gibi benzer proseslerden çok daha uzun olmasıdır (Reddy ve Cao, 2008). Otomotiv endüstrisinde, havacılık ve uzay sanayi uygulamalarında, medikal uygulamalarda ve ev aletleri, beyaz eşya sanayi gibi alanlarda kullanılmaktadır ve bu yöntemle kullanım yerine göre metaller, plastikler, termoplastikler, titanyum ve magnezyum alaşımları gibi malzemeleri şekillendirmek mümkündür (Sakin ve Durgun, 2011).

Bu çalışmanın amacı, artımlı şekillendirme yönteminin endüstride farklı sektörlere yönelik uygulanabilirliğini etkileyen et kalınlığı, yüzey pürüzlülüğü ve şekillendirme kuvveti parametrelerinin optimum değerlerini belirleyerek uygun protatip üretim kalitesi sağlamaktır. Bu nedenle özellikle otomotiv endüstrisinde yaygın olarak kullanılan DC04 sacı çalışma malzemesi olarak belirlenmiştir. Şekillendirmeyi etkilediği bilinen açı artımı, z ekseninde artım miktarı, baskı plakası basıncı ve ilerleme hızı deney parametreleri olarak belirlenmiştir. Çalışma parçası olarak 90° derece duvar açısına sahip aksel simetrik geometri belirlenmiştir. Et kalınlığı, yüzey pürüzlülüğü ve şekillendirme kuvveti faktörleri açısından sonuçlar elde edilerek optimum parametre seviyeleri belirlenip, parametrelerin birbirleriyle olan ilişkileri gri ilişkisel analiz ile incelenmiştir. Tüm faktörler için ayrı ayrı olarak, istenilen sonuçlara deneye ihtiyaç duymadan ulaşabilmeyi sağlayan regresyon denklemleri elde edilmiştir. Ayrıca otomotiv sektöründe kullanılan ve yüksek et kalınlığına ihtiyaç duyulan amortisör yay sacı, bu yöntemle şekillendirilerek yöntemin otomotiv sektöründe uygulanabilirliği gösterilmiştir. Optimum parametre ile şekillendirilen parçalar ve amortisör yay sacı 3D kamera ile taranıp geometrik doğruluk belirlenmiştir.

Giriş bölümünde artımlı şekillendirmenin yönteminin önemi ve endüstride kullanım yerleri, avantajları ve dezavantajları, geliştirilmesi ve uygulanabilirliği üzerine kısaca bilgiler verilmiştir. Literatür taraması bölümünde sac şekillendirme yöntemlerinden, artımlı şekillendirme yönteminden ve alt dallarından ve bu yöntemlerle ilgili yapılan çalışmalardan bahsedilerek örnekler verilmiştir. Materyal bölümünde çalışma kapsamında kullanılan sacdan bahsedilmiş olup mekanik özellikleri ve kimyasal bileşenleri hakkında bilgiler verilmiştir. Yöntem bölümünde deney geometrisinin belirlenmesinden, deney parametrelerinin belirlenmesinden, deney düzeneğinin

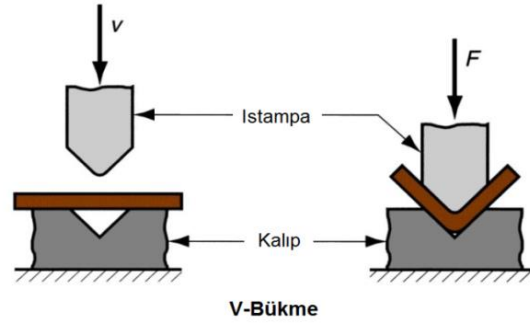
oluşturulmasından, deneyin yürütülmesinden, tez planından, deney planından, istatistiksel analizlerden, geometrik doğruluk analizinden ve çalışmada kullanılan ölçme değerlendirme yöntemleri açıklanmıştır. Deneysel çalışmaların sonuçları bölümünde deney sonuçlarından, ölçüm sonuçlarından, optimum parametre seviyelerinin belirlenmesinden, regresyon denklemlerinin elde edilmesinden, varyans analizi yapılarak parametrelerin etki oranları ve gri ilişkisel analiz yapılarak tüm bağımlı değişkelerin birlikte optimum parametre seviyelerinin elde edilmesinden bahsedilmiştir. 3B optik tarama yapılarak saclarda meydana gelen geometrik doğruluk miktarı belirlenmiştir. Sonuçlar ve öneriler bölümünde ise çalışmadan elde edilen sonuçlar, öneriler ve yapılabilecek çalışmalardan bahsedilmiştir.



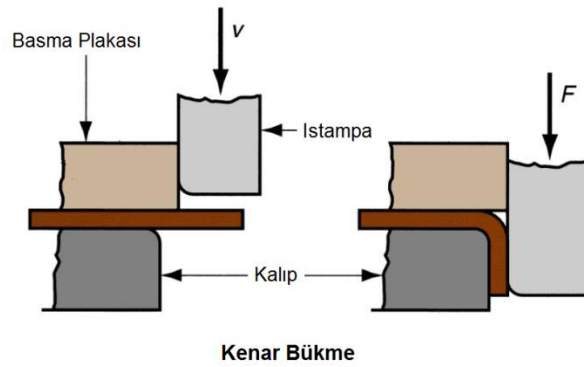
BÖLÜM 2. LİTERATÜR TARAMASI

2.1. Bükme Yöntemi

Bu yöntem, sac şekillendirme işlemleri arasında en fazla kullanılan yöntemlerden birisidir. En yaygın olarak kullanılan v bükme yöntemi ve düz eksende kenar bükme yöntemi Şekil 1.1’de ve Şekil 1.2’de sırasıyla verilmiştir. Bunların yanı sıra karmaşık geometrilere de şekillendirme yapabilmek mümkündür. Bu işlemlerde sacın belli bölgelerinden farklı profillerde büküm işlemi gerçekleştirilebilir.



Şekil 1.1 : Düz eksende v bükme yöntemi (Demirkol, 2010).



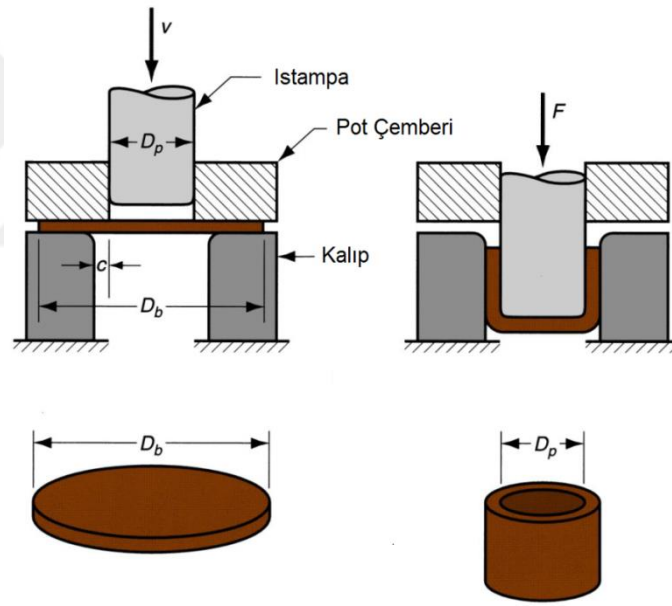
Şekil 1.2 : Düz eksende kenar bükme yöntemi (Demirkol, 2010).

Bükme esnasında, bükülen sacın dış yüzeyinde çekme, iç yüzeyinde basma gerilmeleri oluşur. Basma ve çekmeye zorlanan bölgeleri ayıran çizgiye nötr eksen denilmektedir. Çekme gerilmesine maruz kalan dış yüzey liflerinde, basma

gerilmesine maruz kalan iç yüzey liflerinden daha fazla gerilme meydana gelir. Bu durumun sonucu olarak sabit hacim yasası gereği sac kalınlığı bükme bölgesinde azalmaktadır (Asmaz, 2007).

2.2. Derin Çekme Yöntemi

Metal sac parçaların şekillendirilmesinde kullanılan en önemli metotlardan biri derin çekme yöntemidir. Bu yöntemle üretilen malzemeler otomotiv, beyaz eşya ve mutfak gereçleri gibi sektörlerde kullanılmaktadır (Asmaz, 2007; Demirkol, 2010). Derin çekme işleminde, dairesel sac çembersel kalıp boşluğunun üstüne yerleştirilir. Pot çemberi denen bir kalıp ile belirli bir kuvvet uygulanarak sacın kalıp ile ıstampa arasına sıkıştırılması sağlanır (Şekil 1.3) (Asmaz, 2007).



Şekil 1.3 : Derin çekme yöntemi (Demirkol, 2010).

Bu yöntemde kalıp boşluğu içine çekilen metalin miktarı şekillendirilen parçaların kalitesini etkilemektedir. Fazla metal çekildiği takdirde parça üzerinde kırışıklıklar, az metal çekildiğinde ise çatlaklıklar oluşmaktadır. Bunu önlemenin yolu malzemenin kalıp içerisine akma miktarının ıstampa baskı kuvveti ile kontrol edilebilmesidir (Seçgin, 2005).

2.3. Diğer Sac Şekillendirme Yöntemleri

Germe yönteminde, çenelerle sabitlenerek gerilen saca, kalıp baskı uygulayarak şekillendirme gerçekleştirir. Sıvama yöntemi ise aksenal simetriye sahip parçaların üretimi için uygundur. Daire şeklindeki sac bir baskı aparatı yardımıyla mandrelle sabitlenir ardından mandrel, sabitleyici ve sac birlikte döndürülür. Dönme esnasında sac takım vasıtasıyla mandrelin üzerine sıvanarak mandrelin şeklini alması sağlanır (Demirkol, 2010).

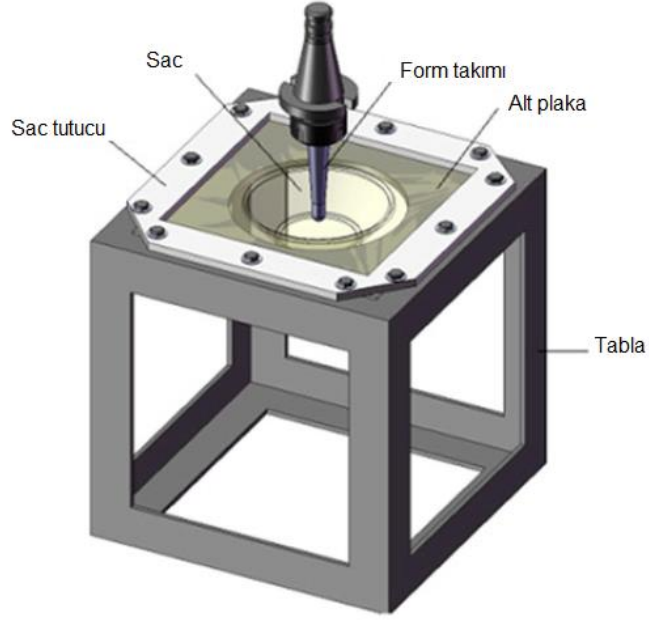
2.4. Artımlı Şekillendirme Yöntemi

Bu yöntemde art arda tanımlanmış geçişlere sahip form takımı, cıvatalarla sabitlenmiş düz sacı istenilen geometri doğrultusunda plastik deformasyona uğratmasıyla şekillendirme gerçekleşir. Genel olarak, altta sacı destekleyen model olup olmadığına göre yöntem tek noktalı artımlı şekillendirme ve iki noktalı artımlı şekillendirme olarak ikiye ayrılır (Wang ve diğ, 2017). Yapılan çalışmalarda iki noktalı artımlı şekillendirmenin tek noktalı artımlı şekillendirmeye göre daha iyi şekillendirilebilirlik ve daha iyi geometrik doğruluğa sahip olduğu görülmektedir (Silva ve Martins, 2013).

Bu yöntemin sıvama yönteminden farkı, sıvama yönteminde kalıpla birlikte parça dönerken, artımlı şekillendirme yönteminde hareketli kısmın form takımı olmasıdır. Bu durumda sıvama yöntemiyle sadece aksenal simetrik parçalar üretilebilirken bu yöntemle simetrik olmayan parçalar üretilebilmektedir (Baraoğlu ve diğ, 2012).

2.4.1. Tek noktadan artımlı şekillendirme yöntemi

Tek noktadan artımlı şekillendirme, az miktarda üretim ve hızlı prototiple üretim için son derece düşük maliyete sahip sac şekillendirme yöntemidir. Bu yöntemde plakayı alttan destekleyen hiçbir modele ihtiyaç yoktur (Silva ve diğ, 2008). Tek noktadan artımlı şekillendirme yönteminin düzeneği Şekil 1.4'te gösterilmiştir.

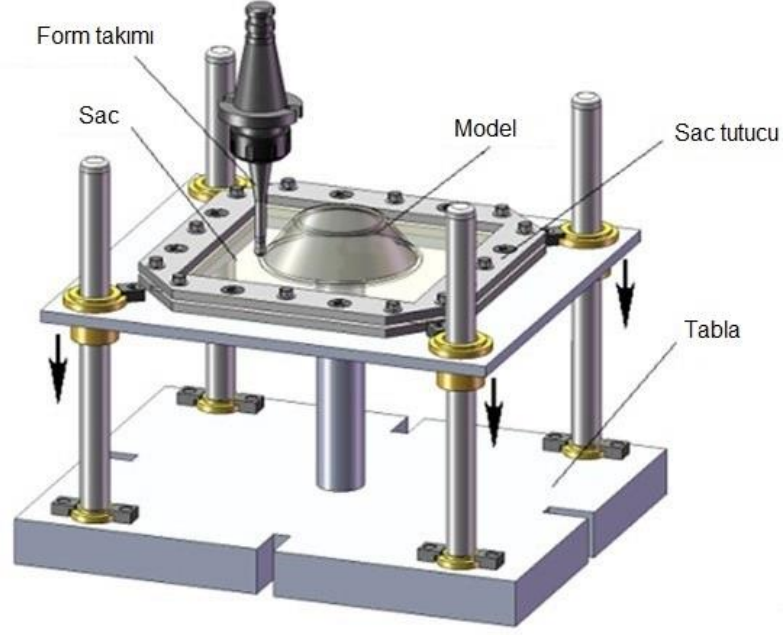


Şekil 1.4 : Tek noktadan artımlı şekillendirme yöntemi düzeneği (Silva ve Martins, 2013).

Yöntemin bileşenleri sac, sac tutucu, alt plaka ve form takımıdır. Alt plaka şekillendirme esnasında sacı cıvatalar yardımıyla sabit tutarak hareketini önlemektedir. Form takımını, CNC işleme merkezinde oluşturulan takım yollarıyla sacı tasarlanan geometriye getirmek için kuvvet uygular (Martins ve diğ., 2008).

2.4.2. İki noktadan artımlı şekillendirme yöntemi

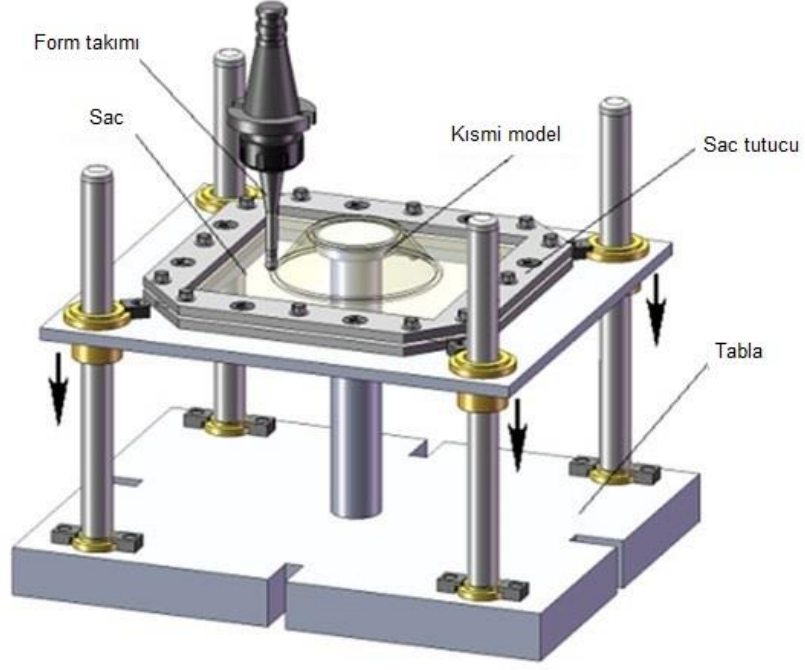
İki noktadan artımlı şekillendirme yönteminde, sacın altına üretilmek istenen geometrinin modeli konur ve form takımını sacı modelin üzerine sıvar. İki noktadan artımlı şekillendirme yönteminin düzeneği Şekil 1.5'te gösterilmiştir.



Şekil 1.5 : İki noktadan artımlı şekillendirme yöntemi düzeneği (Silva ve Martins, 2013).

İki noktadan artımlı şekillendirmenin diğer bir farkı sac tutucunun hareket etmesidir. Sac tutucu, sisteme bağlanmış olan direklerin üzerinde serbest konumdadır. Burada sac tutucuya sabitlenen sac, modelin üzerine yerleştirilir, aşağı yönde sac ile sac tutucuyu tutan sadece modeldir. Form takımının uyguladığı kuvvetle birlikte sac tutucu aşağı doğru hareket eder ve sac modelin şeklini almaya başlar.

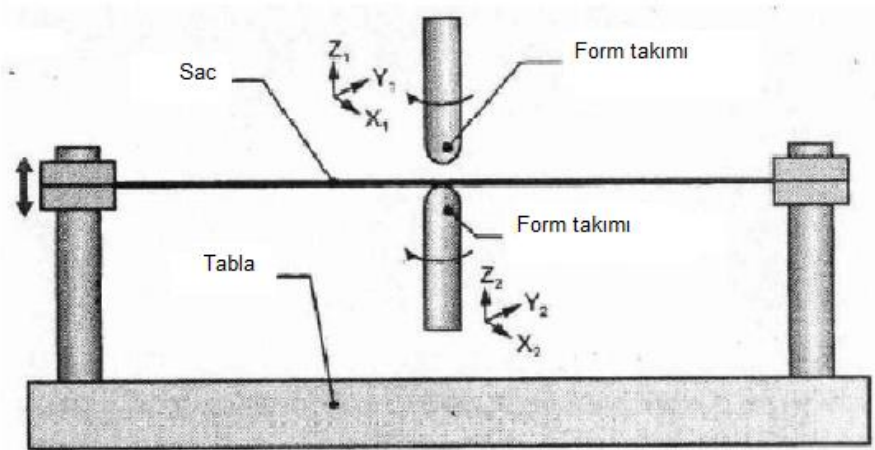
İki noktadan artımlı şekillendirme yönteminde tam model yerine kısmi model kullanılabilir. Kısmi model kullanımı tek noktadan şekillendirme yöntemine göre daha az elastik geri esneme nedeniyle daha iyi geometrik doğruluk sağlamaktadır (Silva ve Martins, 2013). Kısmi modelli iki noktadan artımlı şekillendirme düzeneği Şekil 1.6'da verilmiştir.



Şekil 1.6 : Kısmi modelli iki noktadan artımlı sac şekillendirme yöntemi düzeneği (Silva ve Martins, 2013).

2.4.3. Çift taraflı artımlı şekillendirme yöntemi

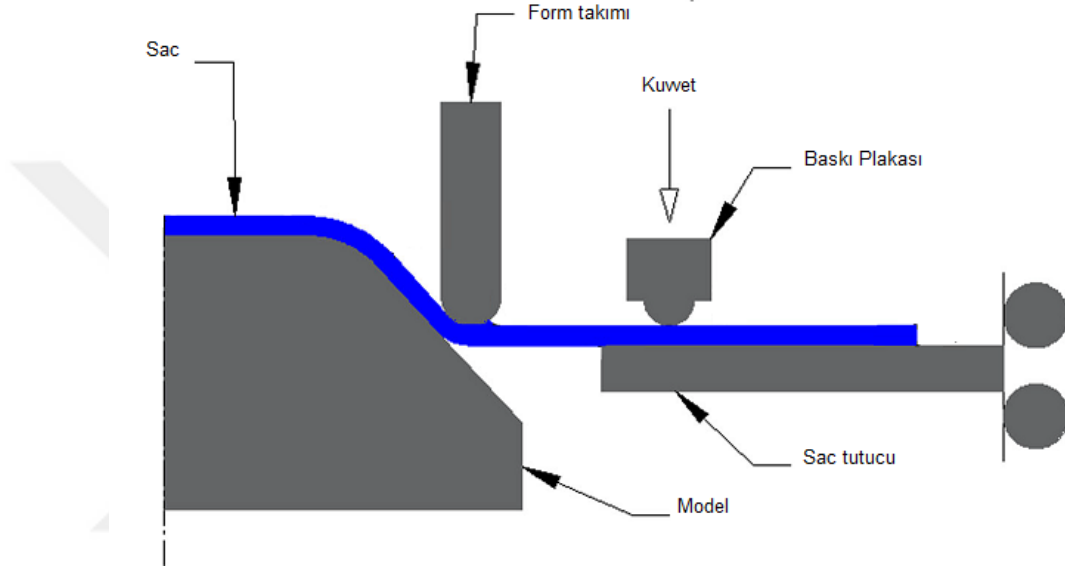
Bu yöntemde sacın iki tarafında birer adet form takımı şekillendirme yapmaktadır. Diğer yöntemlere göre daha fazla işlem esnekliği, daha yüksek şekillendirilebilirlik ve çok daha fazla geometrik doğruluk elde edilir (Zhang ve diğ., 2015). Şekillendirmeye ait görsel Şekil 1.7’de verilmiştir.



Şekil 1.7 : Çift taraflı artımlı şekillendirme yöntemi düzeneği (Shankar ve diğ., 2005).

2.4.4. Kayar artımlı şekillendirme yöntemi

Kayar artımlı şekillendirme yöntemi yeni geliştirilen bir metottur. Geleneksel artımlı şekillendirme yöntemlerinden farklı olarak bu yöntemde sacın civatalarla sabitlenmesinin yerine sacın kenarlarına çizgisel kuvvet uygulayan ve bu kuvveti pnömatik klemplerle kontrol edilebilen baskı plakaları kullanılır (Seçgin ve Özsert, 2019a). Bu yöntem diğer yöntemlere kıyasla daha iyi et kalınlığı sağlamaktadır (Seçgin ve Özsert, 2019b). Şekillendirmeye ait görsel Şekil 1.8’de verilmiştir.



Şekil 1.8 : Kayar artımlı şekillendirme yöntemi düzeneği (Seçgin ve Özsert, 2019b).

Yapılan çalışmalar, sacın et kalınlığının, bir tam turda z eksenindeki artım miktarının, devir-ilerleme hızının ve form takımı çapının şekillendirilebilirliğe etkisi olduğunu göstermektedir. Jeswiet ve diğ. (2005) yaptıkları çalışma kapsamında; ilerleme hızını arttırmak şekillendirilebilirliği arttırdığını ancak yüzey pürüzlülüğünü olumsuz etkilediğini, et kalınlığı azaldıkça şekillendirilebilirliğin azaldığını, küçük takım çapının şekillendirilebilirliği arttırdığını, anizotropinin şekillendirilebilirliğe etkisi olduğunu enine yönde daha küçük çapa sahip form takımının şekillendirilebilirliği arttırdığını, büyük çapa sahip form takımının şekillendirme kuvvetini arttırdığını, artım miktarındaki yükselişin şekillendirilebilirliği azalttığını, yüksek artım miktarlarının yüzey pürüzlülüğünü arttırdığını hatta portakal kabuğu efektini oluşturabileceğini, bu yöntemde maksimum şekillendirebilme açısı olduğunu, şekillendirme açısı arttıkça sacın incelmesini ve minimum inceliğin olduğu

noktada yırtılmalar oluştuğunu, tek yönlü şekillendirmelerde burulmalar meydana gelebileceğini sunmuşlardır

Park ve Kim (2003) yaptıkları çalışmada pozitif yönde ve negatif yönde artımlı şekillendirme yöntemini karşılaştırmışlardır. Negatif şekillendirme yönteminde aksel deformasyondan dolayı keskin köşeler ve kenarlar oluşturmanın zor olduğunu, pozitif şekillendirmede ise düzlem-gerilme deformasyonu baskın hale geldiği için keskin köşe ve kenarlarla karmaşık şekillerin üretilebileceğini belirtmişlerdir.

Yapılan bir çalışmada tek noktadan artımlı şekillendirme ile konik olarak AA1050-O malzemenin maksimum 80° duvar açısına, AA1050-H111 sacının maksimum 76° duvar açısına, AA5052 sacının maksimum 74° duvar açısına, DC01 sacının maksimum 76° duvar açısına, DC04 sacının maksimum 74° duvar açısına, AISI 304L sacının maksimum 74° duvar açısına, 2.seviye titanyum malzemenin maksimum 65° duvar açısına şekillendirildiği görülmüştür (Alkas Yonan ve diğ., 2014).

Duflou ve diğ. (2007) yaptıkları çalışmada, tek noktadan artımlı şekillendirme yöntemiyle, Z ekseninde maksimum, Z ekseninde ortalama ve X, Y eksenlerindeki kuvvetlerin regresyon denklemlerini elde etmişlerdir. Deney kapsamında Al-3003O kalite sac kullanarak duvar açısı parametre seviyeleri 40°-50°-60°, artım miktarı 0,45 mm-0,60 mm-0,75 mm, form takımı çapı 10 mm-15 mm-20 mm ve 0,85 mm-1,2 mm-1,5 mm et kalınlığı parametreleriyle konik bir geometride 27 deney yaparak sonuca ulaşmışlardır. Ayrıca elde edilen denklemleri kullanarak 20° ve 70° duvar açısına sahip parça şekillendirerek kuvvet analizi yapmışlar ve denklemlerden elde edilen sonuç ile deneyden elde edilen sonucun birbirlerine yakın olduğunu görülmüştür.

Ham ve Jeswiet (2006) yaptıkları çalışmada tek noktadan artımlı şekillendirme yöntemiyle AA3003 sacı için şekillendirme açısını etkileyen parametreleri analiz etmişlerdir. Artım miktarının maksimum şekillendirme açısına etkisinin çok az olduğunu, malzemenin kalınlığı, form takımı büyüklüğü ve bunların birlikte etkileşiminin büyük bir etkiye sahip olduğunu göstermişlerdir.

Yapılan bir çalışmada tek noktadan artımlı şekillendirme yöntemi ile AA6016 malzemeyi alt çapı 172 mm, üst çapı 79 mm ve 80 mm derinlikte koni olarak şekillendirilmiştir. Elde ettiği parçanın geometrik doğruluk analizini gerçekleştirmiş

ve en fazla sapmanın parçanın alt radyüs bölgesinde gerçekleştiğini göstermiştir (Durgun, 2017).

Seçgin (2019a) tek noktadan artımlı şekillendirme yöntemini kullanarak 1 mm et kalınlığına sahip DC01 sacının maksimum şekillendirilebilme açısını elde etmiştir. Çalışma geometrisini dairesel kesitli konik piramit olarak belirlemiştir. Deney parametresi olarak ilerleme hızı, artım miktarı ve form takımı çapı faktörlerinin üç farklı seviyesini belirlemiştir. Parametre seviyeleri, ilerleme hızı 300 mm/dak, 600 mm/dak, 900 mm/dak, artım miktarı 0,15 mm, 0,3 mm, 0,6 mm olarak, form takımı ise 5 mm, 10 mm ve 15 mm olarak belirlemiştir. Bu geometride DC01 sacının şekillendirilebileceği maksimum açının $75,7^\circ$ olduğunu göstermiştir

Mulay ve diğ. (2018) yaptıkları çalışmada DC04 sacının tek noktadan artımlı şekillendirme yöntemiyle şekillendirme süresini kısaltmayı amaçlamışlardır. 65° duvar açısına sahip konik bir geometriyi, 0,8 mm artım miktarı ve 1400 mm/dak hızla 1220 saniyede şekillendirmişlerdir.

Ambrogio ve diğ. (2013) tek noktadan artımlı şekillendirme yöntemini çok hızlı bir şekilde üretim gerçekleştirebilmek için cnc torna tezgâhında uygulamışlardır. Yaptıkları çalışmada 30° duvar açısına sahip 2. seviye titanyum malzemeyi 600 m/dak ilerleme hızıyla 1,5 saniyede şekillendirmişlerdir. Ti6Al4V malzemeyi 25° duvar açısına 500 m/dak ilerleme hızıyla 3 saniyede şekillendirmişlerdir. Malzeme şekillenirken, ilerleme hızının artışı malzemenin mikro yapısını etkileyecek sıcaklığa ulaşmadığı için malzemenin yapısının bozulmadığını belirtmişlerdir. Sadece 500 m/dak ilerleme hızında Ti6Al4V malzemenin sertlik oranının %20 arttığını gözlemlemişlerdir.

Bagudanch ve diğ. (2017) tek noktadan artımlı şekillendirme yöntemiyle polimer malzemeler üzerine çalışmışlardır. Form takımı çapı, ilerleme hızı, artım miktarı ve devir parametreleri için üç farklı seviye belirleyerek kesik piramit geometriyi şekillendirmişlerdir. Çalışmalarında PVC, PC, PCL, PP ve UHMWPE malzemelerini kullanmışlardır ve 40 mm derinliğe sahip geometride PP ve UHMWPE malzemelerini başarıyla şekillendirmişlerdir. Erime sıcaklığı düşük olan polimerlerde form takımının malzemeye sürtünmesinden dolayı oluşan sıcaklık malzemede lokal erimenin başlangıcına sebep olabileceğini, bu sıcaklık miktarında iş mili hızının etkisinin yüksek olduğunu belirtmişlerdir.

Sakin ve Durgun (2013) yaptıkları çalışmada polietilen ve poliamid malzemeleri tek noktadan artımlı şekillendirme yöntemiyle şekillendirdiklerini ancak iki malzemenin geometrik doğruluk açısından farklılık gösterdiğini, geometrik sapmanın otomotiv sektörü test parçası gerekliliğini karşılamadığını belirtmişlerdir.

Yöntemle ilgili medikal alanlarda da çalışmalar mevcuttur. R. Araújo ve diğerleri tek noktadan artımlı şekillendirme yöntemiyle 2. seviye titanyum malzeme kullanarak yüz impantı çalışması yapmışlardır. Ancak bu malzemenin maksimum çekme acısının düşük olması nedeniyle tasarımın kritik bölgelerinde yırtılmalar meydana geldiğini belirtmişlerdir. Üretimin kademeli artımlı şekillendirme yöntemiyle denenmesi önerisinde bulunmuşlardır (Araújo ve diğ, 2014).

Durgun ve Sakin (2016) yapmış oldukları çalışmada otomotiv sektöründe kullanılan çamurluk sacını üretmişlerdir. Çalışma kapsamında 1 mm et kalınlığına sahip DC04 sacının kalıpsız, dişi kalıplı ve erkek kalıplı olarak şekillendirilebilirliğini karşılaştırmışlardır. Kalıpsız şekillendirmede katlanma ve lokal deformasyonlar olduğu için kalıplı şekillendirmede daha iyi sonuçlar elde ettiklerini, erkek kalıp ile yapılan çalışmalarda sacın sürekli gergin olarak kaldığını, her z seviyesi ilerlemesinden sonra sac tutucunun plakanın ağırlığı ile aşağı yönde hareketi sayesinde daha iyi sonuçlar elde etmişlerdir.

Tek noktadan artımlı şekillendirme yöntemiyle mümkün olmayan 90° duvar açısına sahip geometrinin kademeli artımlı şekillendirme yöntemiyle üretimi üzerine çalışmalar yapılmıştır. Yapılan bir çalışmada 1 mm et kalınlığına sahip AA1050 H111/O sacı kullanılmıştır. Kademe sayısını 5 olarak belirlemişlerdir. Kalınlık dağılımı, geometrik doğruluk ve gerilmelerde iyi sonuçlar elde edilmiştir (Skjoedt ve diğ, 2008).

Yapılan bir başka çalışmada 4 kademeli tek noktadan artımlı şekillendirme yöntemini kullanarak 1 mm et kalınlığına sahip AA1060, Q235 ve DC04 malzemeleri negatif artımlı olarak 30 mm derinlikte şekillendirilmiştir. Parametre seviyeleri olarak form takım çapını 10 mm, artım miktarını 0,5 mm ve ilerleme hızını 250 mm/dak olarak alınmıştır. Çalışma kapsamında şekillendirilebilirlik ve geometrik sapmalar belirlenmiştir. AA1060 malzemenin sapmasını 10 mm, Q235 malzemenin sapmasını 5 mm ve DC04 malzemenin sapmasını 3 mm olarak belirtmişlerdir (Li ve diğ, 2017).

Verbert ve diğ. (2008) kademeli tek noktadan artımlı şekillendirme yöntemini kullanarak yapmış oldukları çalışmada 1,5 mm et kalınlığına sahip AA3103 sacını 128 mm çapında 30 mm derinliğinde 10'ar derece açı artımlarıyla 5 kademedeki şekillendirmişlerdir. Artım miktarı 1 mm ve form takımının çapını 10 mm'dir.

Wang ve diğ. (2014) yaptıkları çalışmada iki noktadan artımlı şekillendirme ile tek noktadan artımlı şekillendirme yöntemini karşılaştırmışlardır. Çalışma malzemesi, 1 mm et kalınlığına sahip AA1060 sacı ve çalışma parçası konik geometridir. Deneysel sonuç olarak aynı şekillendirme parametreleri kullanıldığında iki noktadan artımlı şekillendirme hassasiyetinin açıkça tek noktadan artımlı şekillendirme hassasiyetinden daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir.

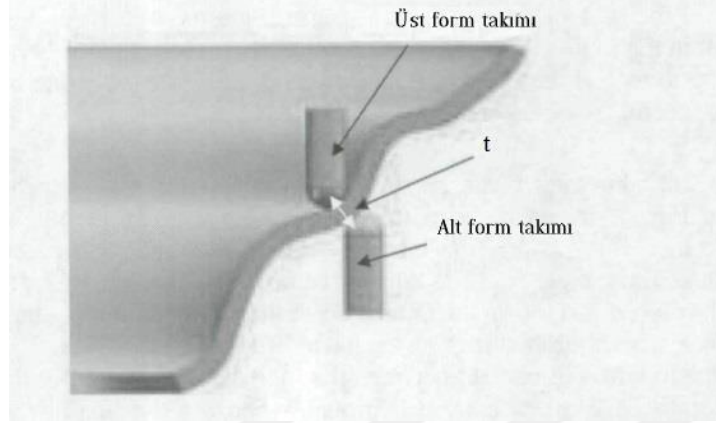
Mostafanezhad ve diğ. (2018) iki noktadan artımlı şekillendirme yöntemi kullanarak AA1050 sacının inceltme oranını ve şekillendirme kuvvetini araştırmışlardır. Deney parametreleri olarak duvar açısı 45°- 60°-75°, takım çapı 10 mm-12,5 mm-15 mm et kalınlığı 1 mm-1,5 mm-2 mm ve artım miktarı 0,5 mm-0,75 mm-1 mm belirlemiştir. Box-Bhenken yöntemiyle deney seti cevap yüzey analizi gerçekleştirilerek 45° duvar açısı, 15 mm takım çapı, 0,5 mm et kalınlığı, 1 mm artım miktarı seviyelerinin optimum parametre seviyeleri olduğunu elde etmişlerdir.

Safari ve Joudaki (2019) iki noktadan artımlı şekillendirme yöntemini kullanarak AA3105 sacını negatif ve pozitif geometriye sahip bir biçimde şekillendirmişlerdir. Şekillendirme parametreleri olarak, artım miktarı, form takımının devri ve işleme sırasını kullanmışlardır. En iyi et kalınlığını 0,2 mm artım miktarı, 800 dev/dak dönme hızı ve işleme sırası olarak önce negatif yönü ardından pozitif yönü parametre seviyelerini kullanarak elde etmişlerdir.

Meier ve diğ. (2007) çift taraflı artımlı şekillendirme yöntemini kullanarak, 0,8 mm et kalınlığına sahip AA 99,5 sacını Ø50x Ø110x60° koniye ve 0,6 mm et kalınlığına sahip K16449388IF sacını Ø50xØ100x60° koniye şekillendirmişlerdir. Form takımının kuvvet uygulaması robotlar tarafından gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında geometrik doğruluk analizi gerçekleştirmişlerdir. İki malzeme için de en fazla geometrik sapmanın alt radyüsün olduğu bölgelerde oluştuğunu ve en yüksek değerin 3 mm olduğunu belirtmişlerdir.

Malhotra ve diğ. (2011) yaptıkları çalışmada çift taraflı artımlı şekillendirme yönteminde yine bir takım yolu stratejisi geliştirmişlerdir. Bu stratejide sac, iki

takımın radyüs bölgeleri arasına sıkışmaktadır (Şekil 2.1). Bu yöntemle elde ettikleri geometrinin duvarlarında tek noktadan artımlı şekillendirmeye kıyasla çok daha iyi geometrik doğruluk elde etmişlerdir.



Şekil 2.1 : Çift taraflı artımlı şekillendirme yönteminde yine bir takım yolu stratejisi (Malhotra ve diğ., 2011).

Önal ve diğ. (2019) kademeli kayar artımlı şekillendirme yöntemiyle dik kenarları olan aksenal simetrik geometri şekillendirmişlerdir. Çalışmalarında 1 mm et kalınlığına sahip DC04 sacını kullanmışlardır. Şekillendirme parametreleri olarak açı artımı, artım miktarı ve sıkma basıncını kullanmışlardır. Taguchi yöntemiyle 9 farklı deney yapıp et kalınlığını optimize edecek parametre seviyelerini elde etmişlerdir. Optimum parametre seviyeleri, sıkma basıncı 2 bar, açı artımı 5° ve artım miktarı 0,75 mm'dir. Yaptıkları doğrulama deneyinde tüm deneylere kıyasla daha iyi et kalınlığı elde ettiklerini belirtmişlerdir.

Seçgin ve Özsert (2019a) yaptıkları çalışmada kayar artımlı şekillendirme yöntemini kullanarak DKP37 sacını 40° açılı kare piramit geometrisine şekillendirmişlerdir. Çalışmalarında şekillendirme parametreleri sıkma basıncı, ilerleme hızı, artım miktarı ve form takımı çapıdır. Yüzey pürüzlülüğü ve şekillendirme kuvveti için parametrelerin etki oranlarını elde edip, optimum parametre seviyelerini belirlemişlerdir. Yüzey pürüzlülüğü için optimum parametre seviyeleri, ilerleme hızı 500 mm/dak, basınç 2 bar, artım miktarı 0,25 mm ve form takımı çapı 15 mm'dir. Şekillendirme kuvvet için optimum parametre seviyeleri ise basınç 9 bar, ilerleme hızı 1500 mm/dak, artım miktarı 0,25 mm ve form takımı çapı 5 mm'dir. Doğrulama deneyiyle optimum parametre seviyelerinin doğruluğunu ispatlamışlardır.

BÖLÜM 3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Materyal

DC04 kalite saclar beyaz eşya üretiminde ve otomotiv endüstrisinde kullanılan, derin çekme işlemine uygun düşük karbonlu malzemelerdir (Parlar ve diğ, 2017; Sierra ve diğ, 2007). Bu nedenle çalışmada 0,98 mm et kalınlığına sahip DC04 sacı kullanılmıştır. Malzemenin mekanik özelliklerini incelemek için çekme testi yapılmıştır. Testler ALŞA marka hidrolik çekme tes teihazıyla yapılmıştır. Saca ait mekanik özellikler Tablo 3.1’de verilmiştir.

Tablo 3.1 : DC04 sacının mekanik özellikleri.

Akma Dayanımı (N/mm ²)	Çekme Dayanımı (N/mm ²)	Poisson Oranı	Young Modülü (Mpa)	Toplam Uzama (%)
258.08	326.68	0.28	207	24.87

Malzemenin kimyasal özelliklerini belirlemek için kimyasal test yapılmıştır. Testler SPECTROMAXx AMETEK marka cihazda gerçekleştirilmiştir. Saca ait kimyasal özellikler Tablo 3.2’de verilmiştir.

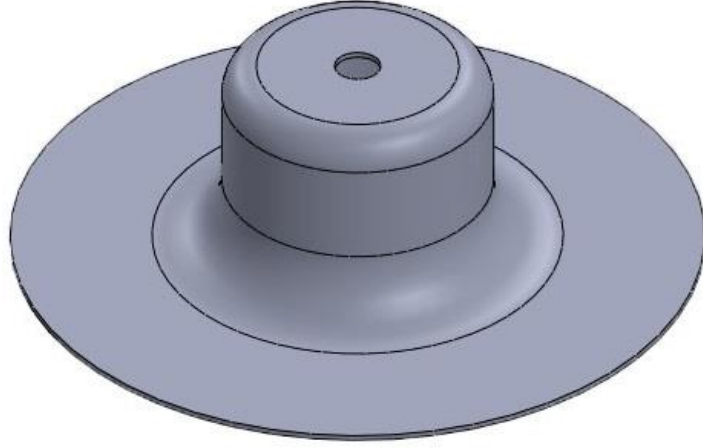
Tablo 3.2 : DC04 sacının kimyasal özellikleri.

C (%)	Mn (%)	Mo (%)	Cr (%)	S (%)	Ni (%)
0.0391	0.224	0.006	0.0328	0.0112	0.0326
Al (%)	Nb (%)	Ti (%)	Sn (%)	Fe (%)	Si (%)
0.0614	0.0023	0.00035	0.0068	99.4	0.0161

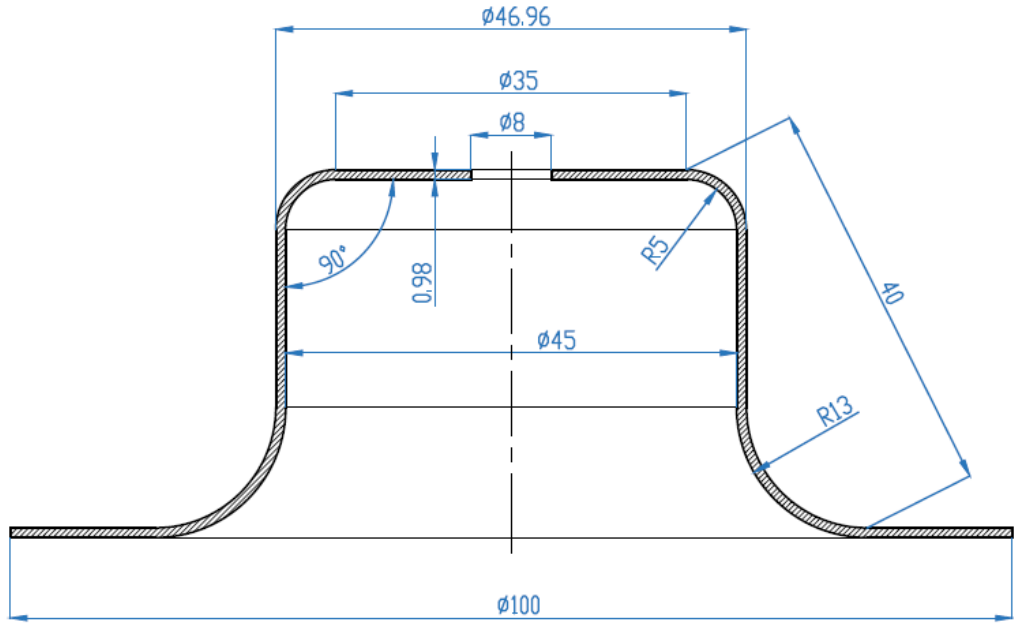
3.2. Yöntem

3.2.1. Deney geometrisinin belirlenmesi

Deney geometrisi olarak 90° duvar açısına sahip aksel simetrik parça belirlenmiştir. Parçanın CAD data görüntüsü Şekil 3.1’de teknik çizimi Şekil 3.2’de verilmiştir.

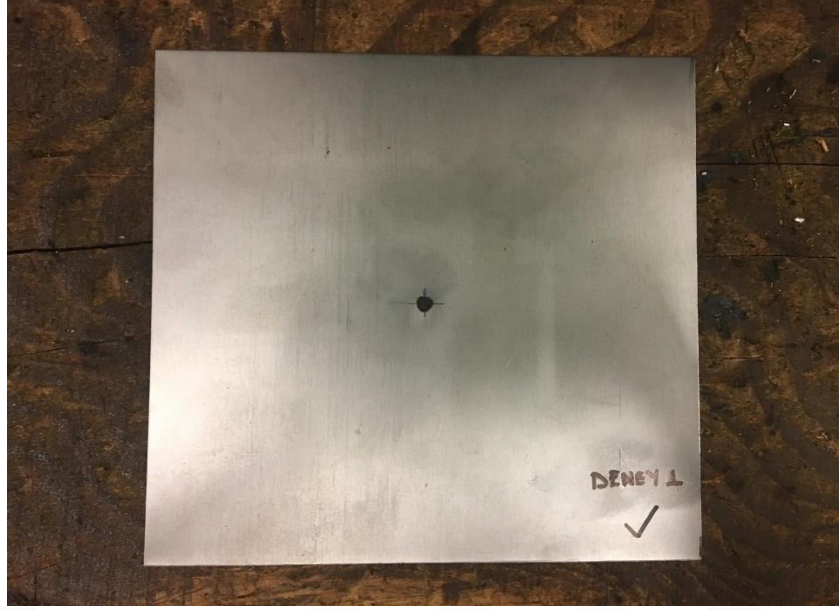


Şekil 3.1 : Deney geometrisinin CAD datası.



Şekil 3.2 : Deney geometrisinin teknik çizimi.

Üst radyüs bölgesinden başlayıp alt radyüs bölgesinin bitişinden verilen 40 mm ölçüsü tüm açılı artımları için aynıdır. Sacın tutucuya tam olarak yerleştirilebilmesi için şekillendirilecek sacın kesim ölçüleri 199x206 mm olarak belirlenmiştir. Form takımı, tüm takım yollarında saat yönünde ilerlemiştir. Bu durum sacda burulmalara neden olabilmektedir. Burulmaları minimize etmek için parçaların üzerindeki şekillendirilmeyen bölgenin merkezinden, parçanın altında kalan modele M6 civata ile sabitlenmiştir. Deney parçalarını modele civata ile sabitleyebilmek için $\varnothing 8$ mm delik açılmıştır. Şekillendirilmeye hazır deney parçası Şekil 3.3'te gösterilmiştir.



Şekil 3.3 : Şekillendirmeye hazır deney parçası.

3.2.2. Deney parametrelerinin belirlenmesi

Yapılan çalışmalar neticesinde, kademeli şekillendirme işlemi artımlı şekillendirme yönteminde et kalınlığı incelmesini önlemek için doğrulanmıştır. Kademesiz olarak üretmenin imkânsız olduğu yüksek duvar açılara kademeli şekillendirerek ulaşılabilir (Gupta ve Jeswiet, 2019). Ancak hangi parça için kaç adet aşama sayısına ihtiyaç duyulduğu belli değildir. Çok fazla aşama kabul edilemez bir çalışma döngüsü anlamına gelir ve az sayıda aşama ise et kalınlığı için tatmin edici sonuçlar vermeyebilir. Uygun miktarda aşama seviyesi tanımlanması için etkili bir yöntem ihtiyacı vardır (Li ve diğ, 2012). Bu nedenle açı artımı deney parametresi olarak belirlenmiştir. Tüm parçalar önce direk olarak 50°'ye şekillendirilip ardından parametre seviyesine göre açı artımı gerçekleştirilmiştir. Tüm deneylerde son şekillendirme açısı 90°'dir.

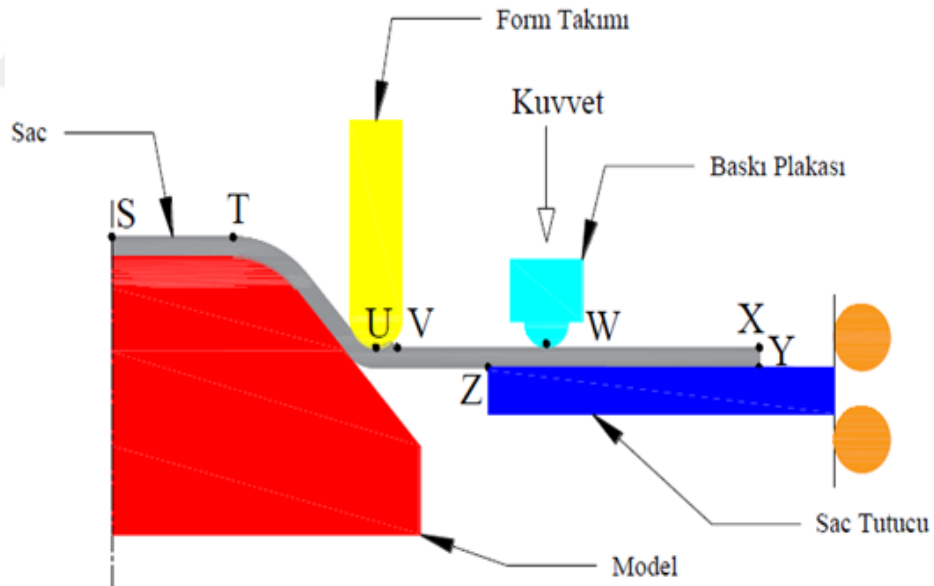
Şekillendirme esnasında en büyük gerilme parçanın tabanında meydana gelmektedir. Bu durum artımlı şekillendirmeyi olumsuz etkilemektedir. Bu gerilme et kalınlığı değişikliğinde önemli bir role sahiptir (Hussain ve diğ, 2011). Z ekseninde bir turda artım miktarı ve ilerleme hızı gibi parametreler değiştirmek bu gerilmeleri azaltılabilmektedir (Seçgin, 2019b). Bu nedenle artım miktarı ve ilerleme hızı deney parametresi olarak belirlenmiştir.

Artımlı şekillendirme yönteminde sac iş bağlama aparatı üzerine sabitlenmektedir (Ambrogio ve diğ, 2005; Emmens ve diğ, 2010; Seçgin, 2019a). Sabitleme işlemi

cıvatalar veya çeşitli klemler kullanılarak gerçekleştirilmektedir (Allwood ve diğ., 2010; Hussain ve Gao, 2007). Ancak bu durum şekillendirme sırasında sacın hareketini tamamen engellediği için sacın et kalınlığında büyük değişimler meydana gelmektedir (Attanasio ve diğ., 2008). Kayar artımlı şekillendirme yönteminde cıvata veya klemlerin yerine ayarlanabilir pnömomatik piston kullanılarak sacın akması sağlanmaktadır. Bu durum daha iyi et kalınlığı elde edilmesini sağlamaktadır (Seçgin, 2019b). Bu nedenle sıkma basıncı deney parametresi olarak belirlenmiştir.

3.2.3. Deney düzeneğinin oluşturulması

Deneyle Seçgin (2019b) tarafından geliştirilen deney düzeneğinde yürütülmüştür. Bu kayar artımlı şekillendirme düzeneğinde sacın altında şekillendirilmek istenen geometrinin modeli bulunmaktadır. Form takımı oluşturulan takım yolları doğrultusunda sacı modelin üzerine sıvamaktadır. İşlem esnasında rijitliği sağlamak için sacın kenarlarına çizgisel kuvvet uygulayan ayarlanabilir pnömomatik klemler yerleştirilmiştir. Yönteme ait görsel Şekil 3.4'te verilmiştir.



Şekil 3.4 : Kayar artımlı şekillendirme yöntemi (Seçgin, 2019b).

Burada,

S-T: Form takımının temas etmediği yüzey

T: Şekillendirmeye başlanılan nokta

T-U: Şekillendirilmiş bölge

U-V: Yığılma bölgesi

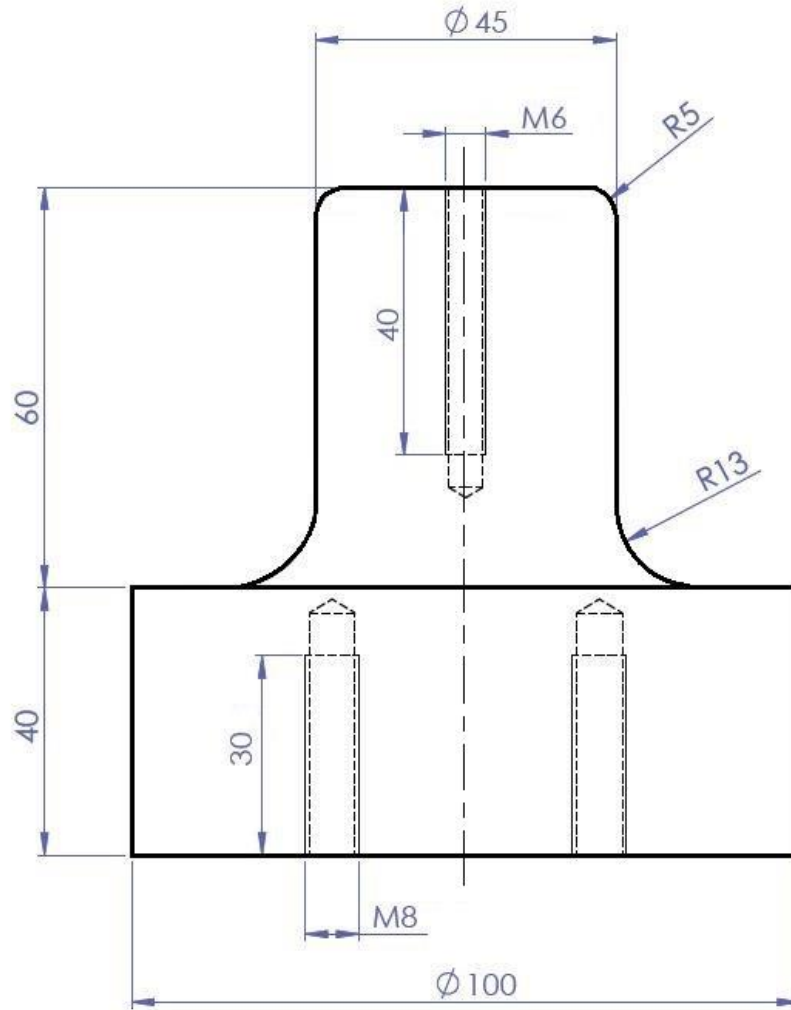
V-W: Şekillendirilmemiş gergin bölge

W: Sıkma kuvvetinin uygulandığı nokta

W-X: Şekillendirilmemiş ve gergin olmayan bölge

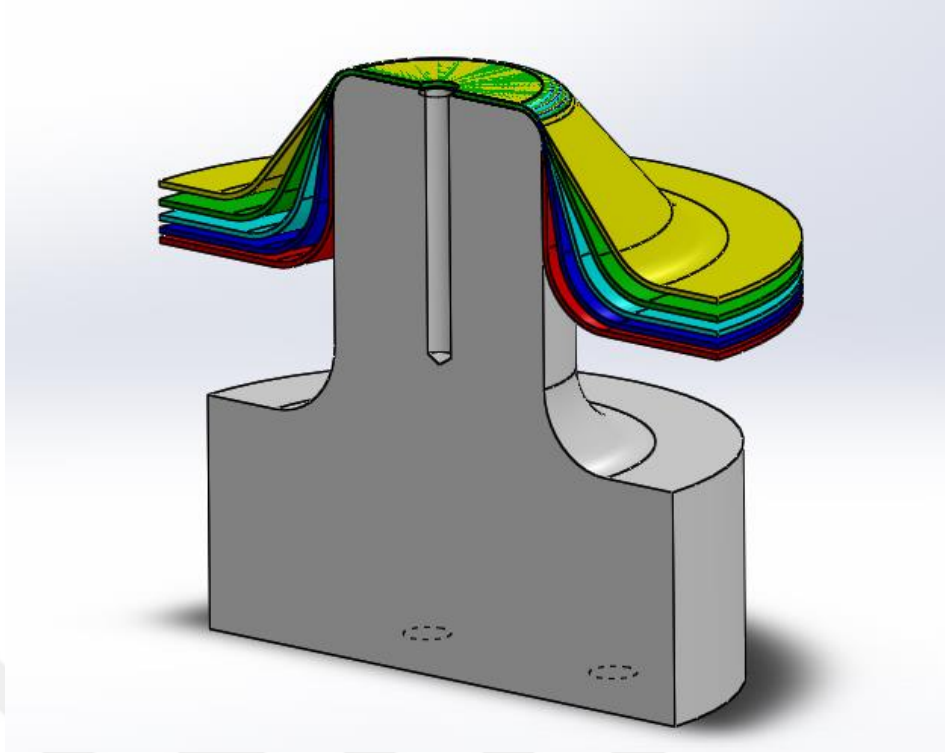
Y-Z: Sacın tutucu çerçeveye temas ettiği bölge

Tüm açılı artımları için model yapılması maliyet ve zaman kaybına neden olmaktadır. Bu nedenle tasarlanan model CK45 kalite malzemeden olup 90° açılıya sahiptir. Modelin teknik çizimi Şekil 3.5'te verilmiştir.



Şekil 3.5 : Modelin teknik çizimi.

Parçalar yalnızca 90° açı şekillendirilirken tam olarak modelin üzerine sıvanmaktadır. Diğer açı artımları şekillenirken gövde bölgelerinin model ile teması yoktur. Diğer açı artımlarının ve 90°nin şekillendirme esnasında model üzerinde oluşan görüntüsü 10° açı artımı olarak Şekil 3.6'da verilmiştir.

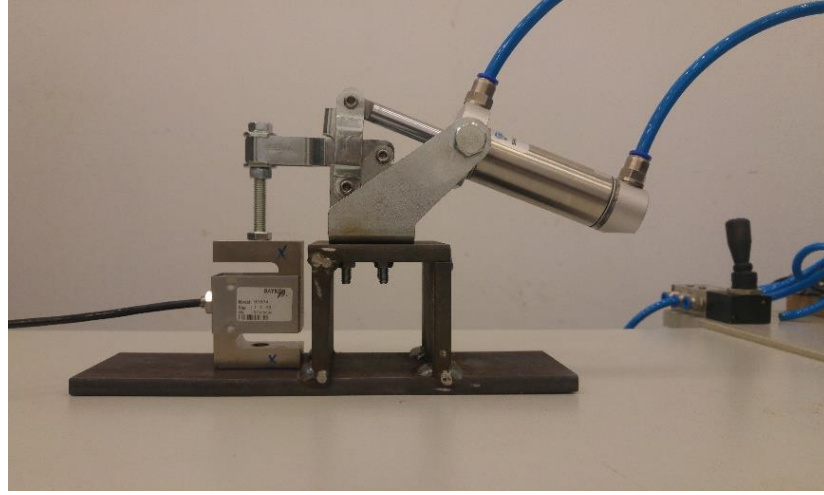


Şekil 3.6 : 10° açının artmasının model üzerinde görünümü.

Şekilde 50° açıdan başlayarak sırasıyla 60°, 70°, 80° ve son olarak 90° açının model üzerindeki görünümü verilmiştir.

Sacın tutturulduğu plaka, köşelerde bulunan silindirik kolonların üzerinde bilyeli yataklar sayesinde aşağı yukarı hareket edebilmektedir. Sabitlenmiş sacı bulunduğu seviyede tutan yalnızca modelin üzerine bindiği bölgedir. Takım yolları doğrultusunda form takımı kuvvet uygulayarak sacı, tutucuyla birlikte aşağı doğru itmektedir.

Sacı, sac tutucuya sıkıştırmak için pnömatik klemler kullanılmıştır. Pnömatik klemlerin basınç seviyelerine göre kuvvet değerleri ölçülmüştür. Şekil 3.7'de pnömatik klempin ve basınç ölçümünün görseli verilmiştir.



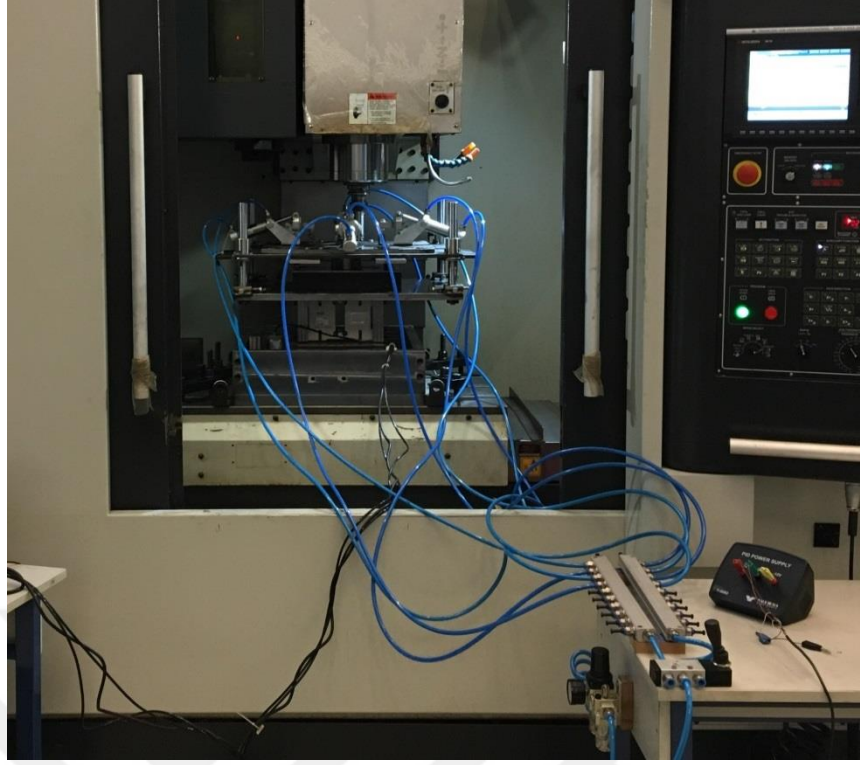
Şekil 3.7 : Pnömatik klemp kuvvet ölçümü (Seçgin, 2019b).

Ölçüm sonucu basınca karşılık gelen kuvvet değerleri belirlenmiştir. Bu değerler parametre seviyesine göre saca uygulanacak olan kuvvet miktarını göstermektedir. Sonuçlar basınç ve ölçülen kuvvet olarak Tablo 3.3'te gösterilmiştir.

Tablo 3.3 : Pnömatik klemp baskı kuvvetleri (Seçgin, 2019b).

Basınç (Bar)	Ölçülen Kuvvet (Newton)
2	187.28
5.5	613.15
9	1039.02

Klemlere hava kompresörden gelmekte, gelen hava şartlandırıcıdan geçirilerek deneyde kullanılacak seviyeye ayarlanmaktadır. Hazırlanan deney setinde 5 yollu 3 konumlu yön kontrol valfi kullanılmıştır. Yön kontrol valfinin uçlarına iki adet distribütör bağlanmıştır. Şekil 3.8'de pnömatik klemlerin düzeneği verilmiştir.



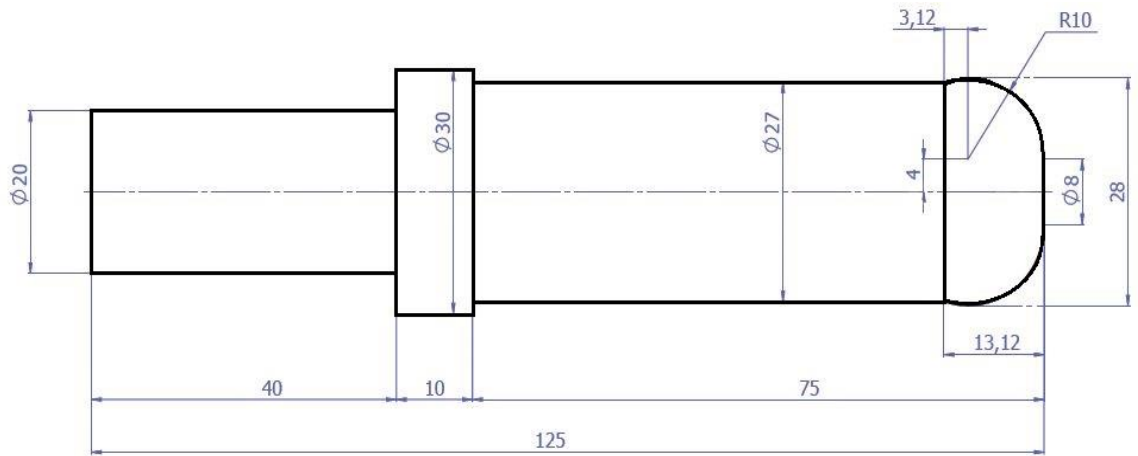
Şekil 3.8 : Pnömatik klemplerin düzeneği.

Artım miktarının değerinin yüksek olduğu durumlarda küçük çaplı form takımları yüzey kalitesinin azalmasına neden olmaktadır (Vijayakumar ve diğ, 2020). Deneylede yapılan ön çalışmalarda en iyi sonucu veren form takımı kullanılmıştır (Şekil 3.9) (Önal ve diğ, 2019).



Şekil 3.9 : Form takımı.

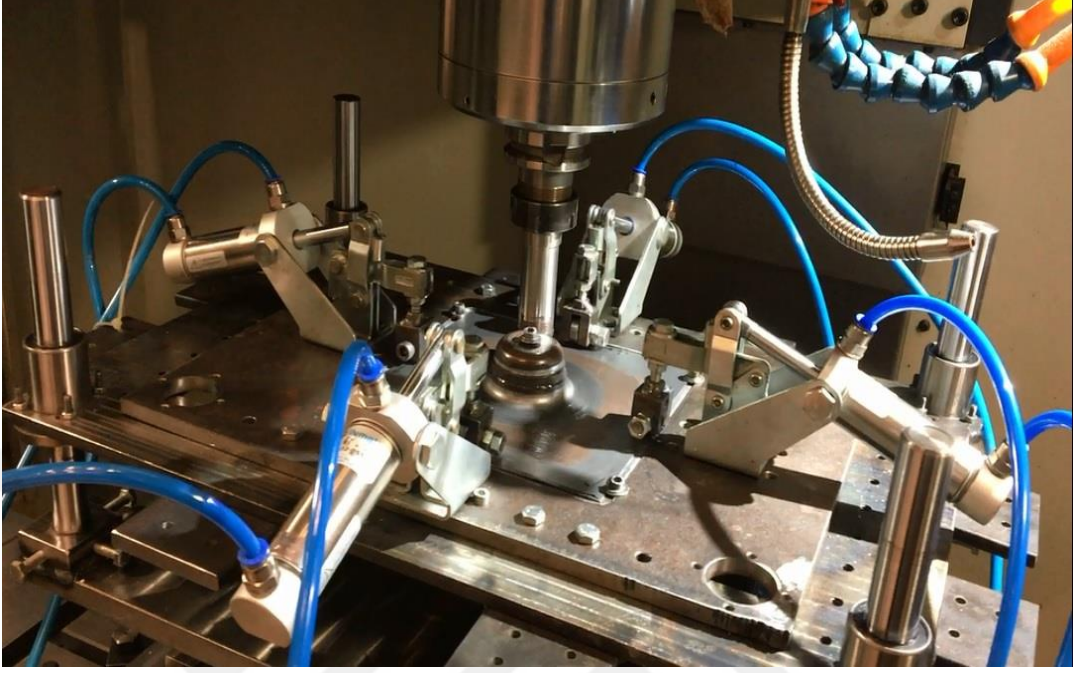
Form takımı cıva çeliğinden (115CrV3) üretilmiştir. Takıma ait teknik detay Şekil 3.10'da gösterilmiştir.



Şekil 3.10 : Form takımına ait teknik bilgiler.

Form takımının sadece üç bölgesindeki 13,12 mm uzunluğundaki kısmı şekillendirme yapmaktadır. Takımın ucundaki 8 mm'lik düz kısım flanş bölgesi

şekillenirken daha düzgün bir yüzey elde edebilmek adına bulunmaktadır. Şekillendirme esnasından bir görüntü Şekil 3.11’de verilmiştir.



Şekil 3.11 : Şekillendirme sırasından bir görsel.

3.2.4. Deneyin yürütülmesi

Deneyle DAHLIH MCV 860 CNC dik işleme merkezinde yapılmıştır. Tezgâhın işleme kapasitesi 950 mm X 550 mm’dir. Kesme hareket hızı maksimum 10 m/dak ve iş mili motor gücü 11 kW’dır. Çalışmanın gerçekleştirildiği CNC freze tezgâhı Şekil 3.12’de verilmiştir.



Şekil 3.12 : DAHLIHCNC MCV 860 CNC freze tezgâhı.

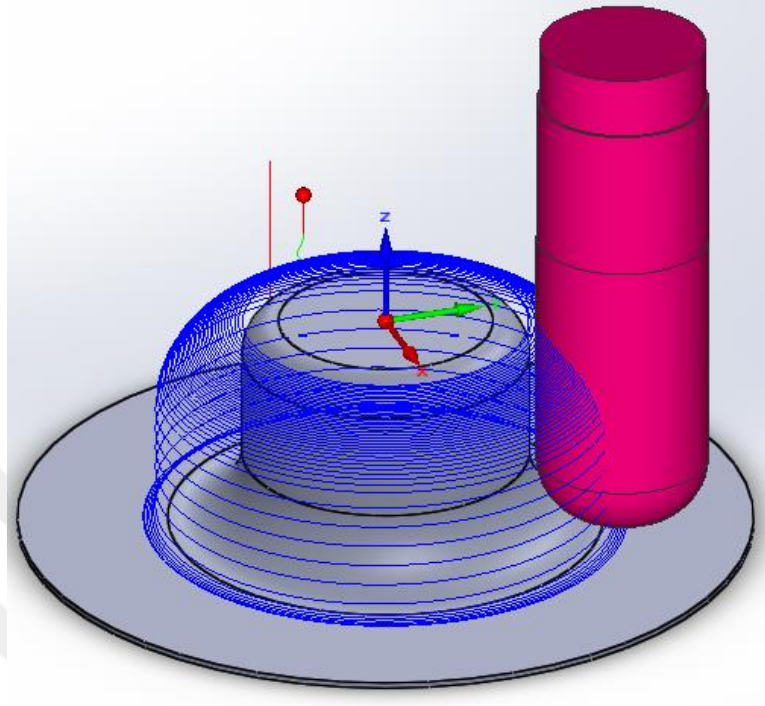
Çalışmada sıkma basıncı, açı artımı, artım miktarı ve ilerleme hızı parametrelerinin her birinden üç farklı seviye baz alınmıştır. Parametre seviyeleri alt değer, üst değer ve bunların ortalaması olan ortanca değer olarak belirlenmiştir. Bu sayede parametre seviyeleri aralarındaki artışın aynı olması sağlanmıştır. Tablo 3.4'te deney parametreleri ve seviyeleri belirtilmiştir.

Tablo 3.4 : Deney parametreleri ve seviyeleri.

Parametre	Seviyeler			Birim
	1	2	3	
Basınç	2	5.5	9	bar
Açı Artımı	5	7.5	10	derece (°)
Artım Miktarı	0.25	0.50	0.75	mm
İlerleme	2000	3500	5000	mm/dak

Tasarımda üç eksen de ilerleme olduğundan ve et kalınlığı dağılımını daha homojen oluşturduğu için spiral takım yolu kullanılarak şekillendirme yapılmıştır

(Duflou ve diğ, 2010; Skjoedt ve diğ, 2007). Oluşturulan spiral takım yolu Şekil 3.13'te verilmiştir.



Şekil 3.13 : Spiral takım yolu.

Şekillendirmeye olumlu etkisi nedeniyle fener mili serbest bırakılmıştır (Araújo ve diğ, 2014). Şekillendirme esnasında oluşan gerilme kuvvetleri nedeniyle form takımı kendiliğinden 35-40 dev/dak ile dönebilmektedir (Seçgin, 2019b). Yüzeylerde meydana gelen pürüzlülükleri ve aşınmayı önlemek için yağlayıcı olarak molibden disülfid (MoS_2) kullanılmıştır. Yapılan çalışmalar MoS_2 'nin artımlı şekillendirme yönteminde iyi sonuç verdiğini göstermektedir (Azevedo ve diğ, 2015; Zhang ve diğ, 2010).

Deney tasarımları, endüstriyel şartlar göz önüne alındığında maliyet ve zamansal kısıtlamalar nedeniyle büyük önem taşımaktadır. Ayrıca sonuçların kontrolü ve optimizasyonların elde edilebiliyor olması çalışmalarda kolaylıklar sağlamaktadır. Deney tasarımı yöntemleri sadece istatistiksel bir yaklaşım olarak değil, araştırma-geliştirme faaliyetlerinde kullanılabilir, maliyeti azaltan, kaliteyi artıran, sonuçların güvenilirliğini sağlamaştıran, tüm diğer kalite standartlarını destekleyen tekniklerdir (Savaşkan ve diğ, 2004). Çalışma kapsamında Box-Behnken deney tasarımı kullanılmıştır. Bu tasarım, ikinci derece model parametrelerinin tahminlenmesinde kullanılmaktadır. Üç seviyeli tamamlanmamış çok etkenli

tasarımlardan olup dñnersel tasarımların bir çeşididir (Baş, 2010). Parametreler ve seviyeler girildiğinde yöntem 27 farklı deney oluşturmuştur. Deney seti Minitab 18 programı kullanılarak oluşturulmuştur. Bu program deney tasarımı, cevap yüzey analizi, varyans analizleri ve optimum parametre seviye belirleme analizlerinin tümünü yapabilmek mümkün olduğu için tercih edilmiştir (Minitab, 2019). Deneylerin parametre seviyeleri ve deney süreleri Tablo 3.5'te verilmiştir.

Tablo 3.5 : Deney planı.

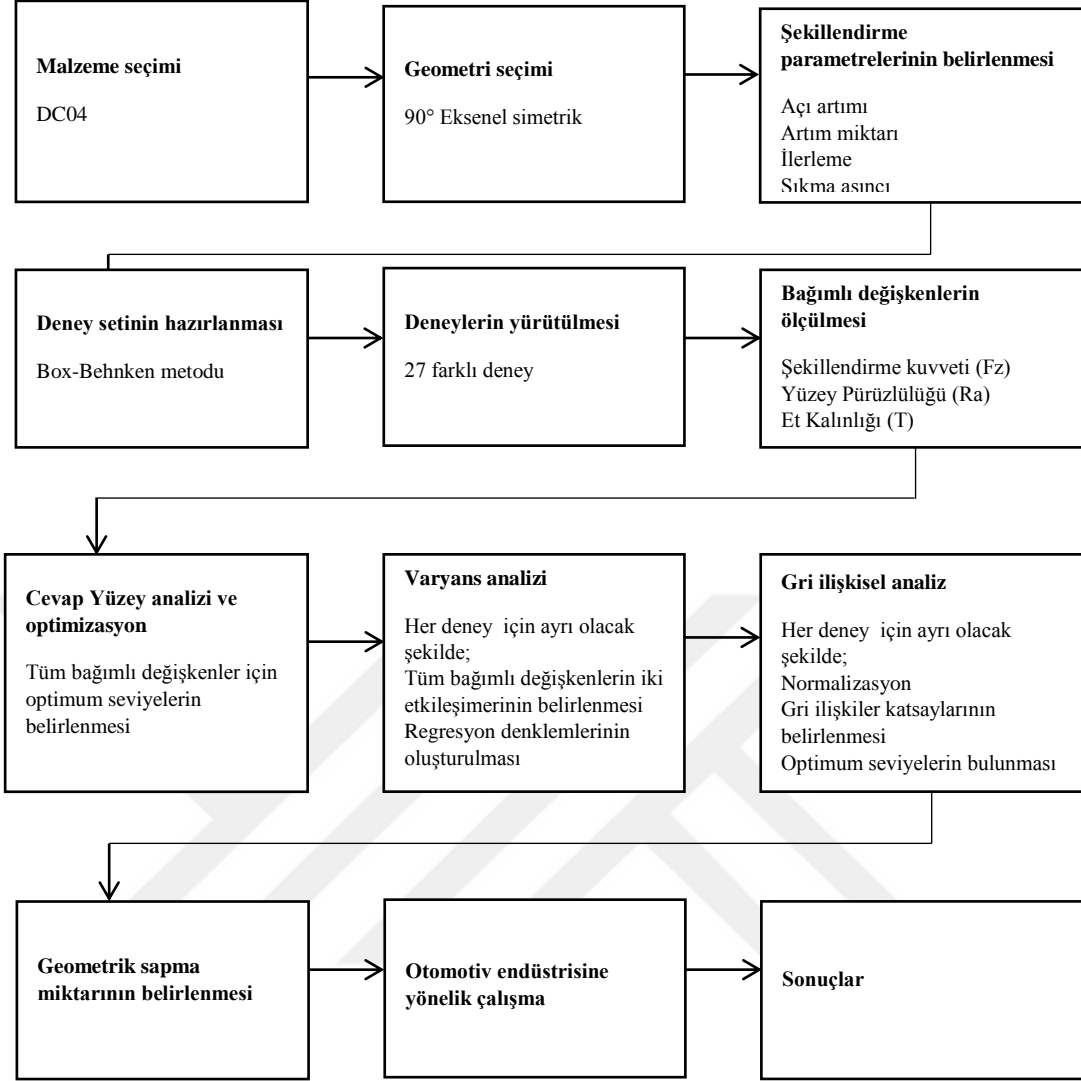
Deney No	Basınç (bar)	Aı Artımı (°)	İlerleme (mm/dak)	Artım Miktarı (mm)	Deney Süreleri (dak)
1	5.5	10	3500	0.75	24 dak
2	5.5	5	5000	0.5	35 dak
3	9	7.5	2000	0.5	67 dak
4	5.5	10	2000	0.5	47 dak
5	5.5	7.5	3500	0.5	38 dak
6	5.5	7.5	3500	0.5	38 dak
7	5.5	7.5	5000	0.75	23 dak
8	2	7.5	5000	0.5	27 dak
9	5.5	7.5	3500	0.5	38 dak
10	5.5	7.5	2000	0.75	57 dak
11	9	7.5	5000	0.5	27 dak
12	5.5	5	2000	0.5	85 dak
13	5.5	7.5	2000	0.25	111 dak
14	5.5	5	3500	0.75	42 dak
15	9	7.5	3500	0.25	64 dak
16	2	5	3500	0.5	49 dak
17	9	5	3500	0.5	49 dak
18	5.5	10	3500	0.25	45 dak
19	2	7.5	3500	0.75	33 dak
20	2	7.5	2000	0.5	67 dak
21	5.5	5	3500	0.25	81 dak
22	5.5	7.5	5000	0.25	45 dak
23	2	10	3500	0.5	27 dak
24	5.5	10	5000	0.5	19 dak
25	2	7.5	3500	0.25	64 dak
26	9	10	3500	0.5	27 dak
27	9	7.5	3500	0.75	33 dak

Tüm deneylerin şekillendirme işlemleri başarıyla gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.14'te tüm deneylerin şekillendirilen sacları verilmiştir.



Şekil 3.14 : Deneylere ait şekillendirilen saclar.

Çalışmanın akış planı oluşturulmuştur. Bu planda çalışmanın ilerleyişi görülmektedir. Teze ait çalışma planı, Şekil 3.15'te akış diyagramı olarak verilmiştir.



Şekil 3.15 : Tez planı.

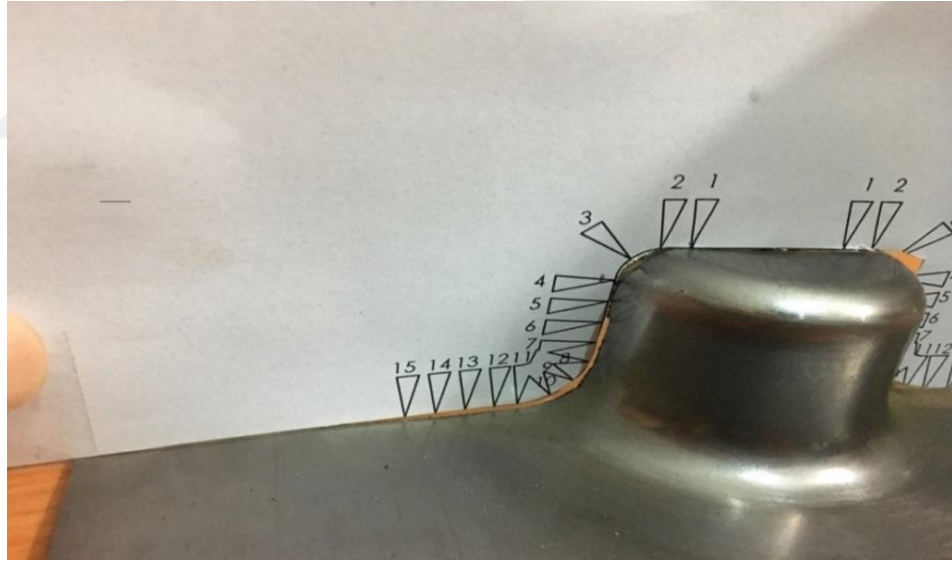
3.2.5. Et kalınlığının belirlenmesi

Deneiler sonucunda elde edilen parçaların et kalınlığını ölçmek için parçalar merkezlerinden kesilmiştir. Kesilmiş parça görseli Şekil 3.16’da verilmiştir.



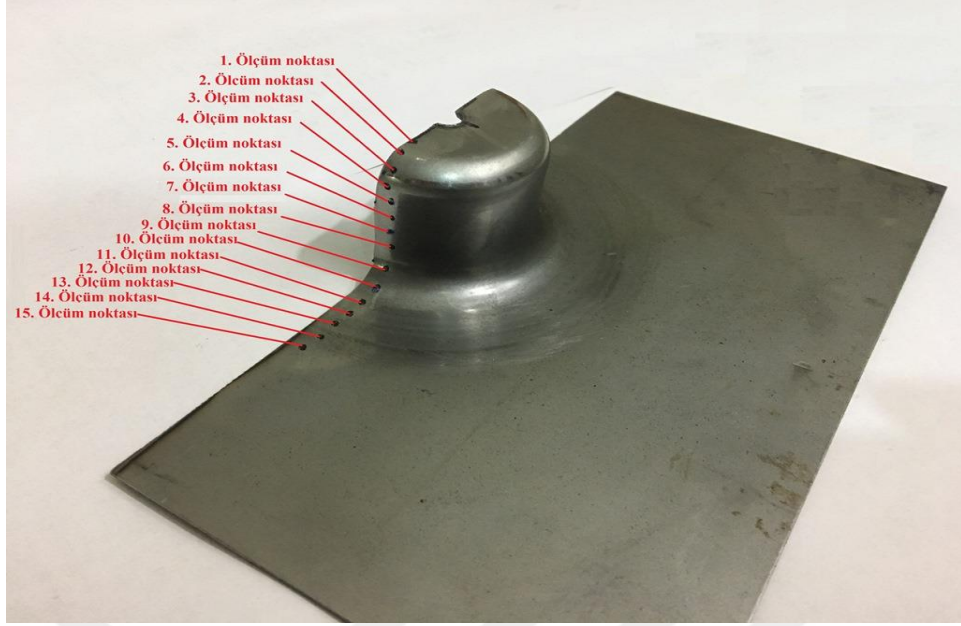
Şekil 3.16 : Et kalınlığı ölçümü için kesilmiş deney parçası.

Ölçümü gerçekleştirmek için ilk noktası şekillendirilmemiş bölgeden başlayarak 5 mm aralıklarla 15 ölçüm noktası master yardımıyla oluşturulmuştur. Noktaların işaretlenmesine ait görsel Şekil 3.17’de verilmiştir.



Şekil 3.17 : Master yardımı ile et kalınlığı ölçüm noktalarının belirlenmesi.

Tüm parçalar aynı noktalardan markalanmıştır. Markalanması gerçekleştirilmiş sacın görseli Şekil 3.18’de verilmiştir.



Şekil 3.18 : Et kalınlığı ölçümü için markalanmış parça.

Ölçümler 0,01 mm hassasiyetli 0-25 mm sivri uçlu mikrometre ile gerçekleştirilmiştir. Ölçüm esnasından bir görsel Şekil 3.19’da verilmiştir.



Şekil 3.19 : Et kalınlığı ölçümü.

3.2.6. Yüzey pürüzlülüğü ölçümü

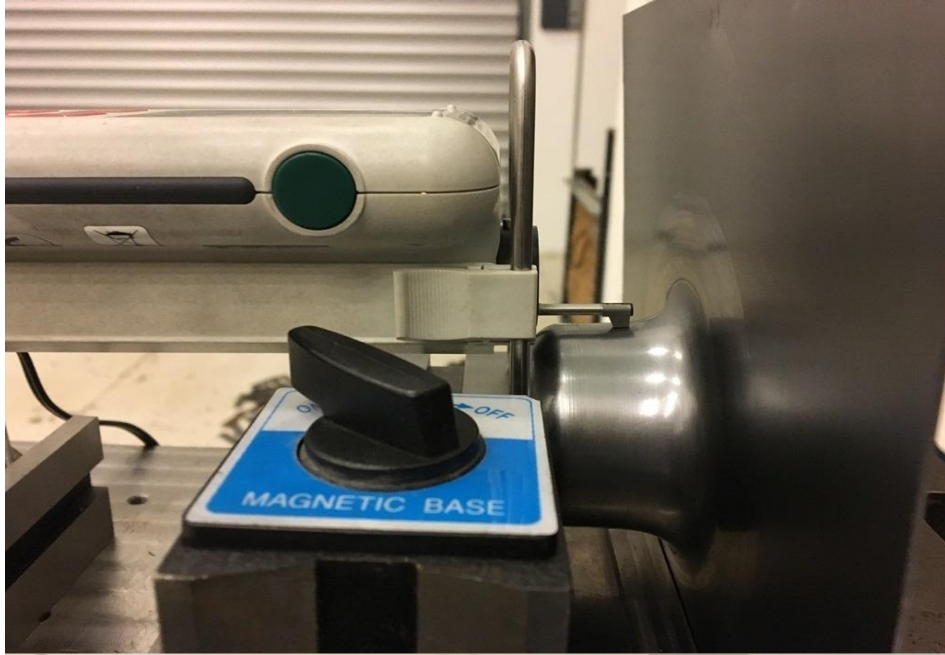
Yüzey pürüzlülüğü ölçümleri Mahr Marsurf PS1 yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Cihazın ölçüm aralığı 350 μm 'dir. Profil çözünürlüğü 32 nm'dir. Örnekleme sayısı 5 olup, örnekleme uzunluğu ise 12,5 mm'dir. Ölçümler form takımının saca temas ettiği işlenmiş bölgede gerçekleştirilmiştir. Her parça üçer defa

ölçülmüştür. Ardından bu ölçümlerin aritmetik ortalaması alınarak parçanın yüzey pürüzlülük değeri belirlenmiştir. Şekil 3.20’de yüzey pürüzlülük ölçüm cihazına ait görsel verilmiştir.



Şekil 3.20 : Yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı.

Parçalar sabitlenerek ölçümlerin aynı noktalardan yapılması sağlanmıştır. Ölçüm anından görseller Şekil 3.21 ve Şekil 3.22’de belirtilmiştir.



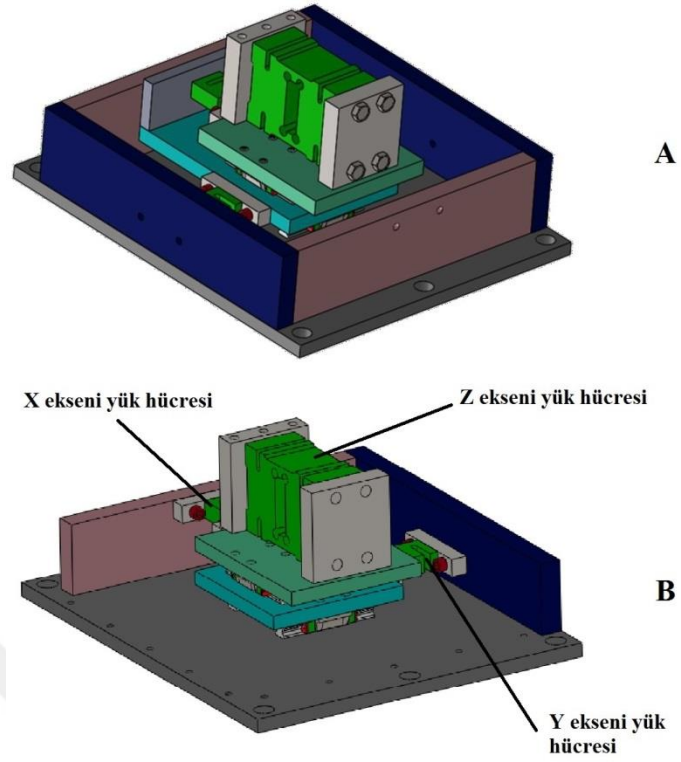
Şekil 3.21 : Yüzey pürüzlülüğü ölçüm anı.



Şekil 3.22 : Farklı açıdan yüzey pürüzlülüğü ölçüm anı.

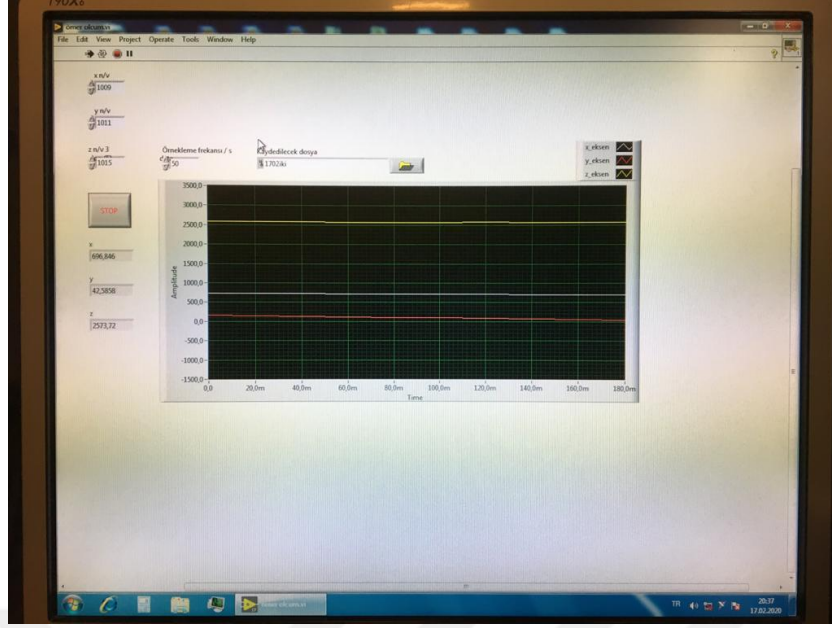
3.2.7. Şekillendirme kuvvetinin belirlenmesi

Kuvvet ölçümleri Seçgin (2019b) tarafından geliştirilen üç eksenli kuvvet ölçüm sistemiyle yapılmıştır. Sistemde kullanılan yük hücrelerinin kapasiteleri 1000 kg, hassasiyetleri 0,2 kg'dır. X ve Y eksenlerindeki kuvveti ölçmek için S tipi yük hücreleri, düşey yöndeki kuvveti belirlemek için ise platform tipi yük hücresi kullanılmıştır. Kuvvet ölçüm sisteminin tasarımı Şekil 3.23'te verilmiştir.

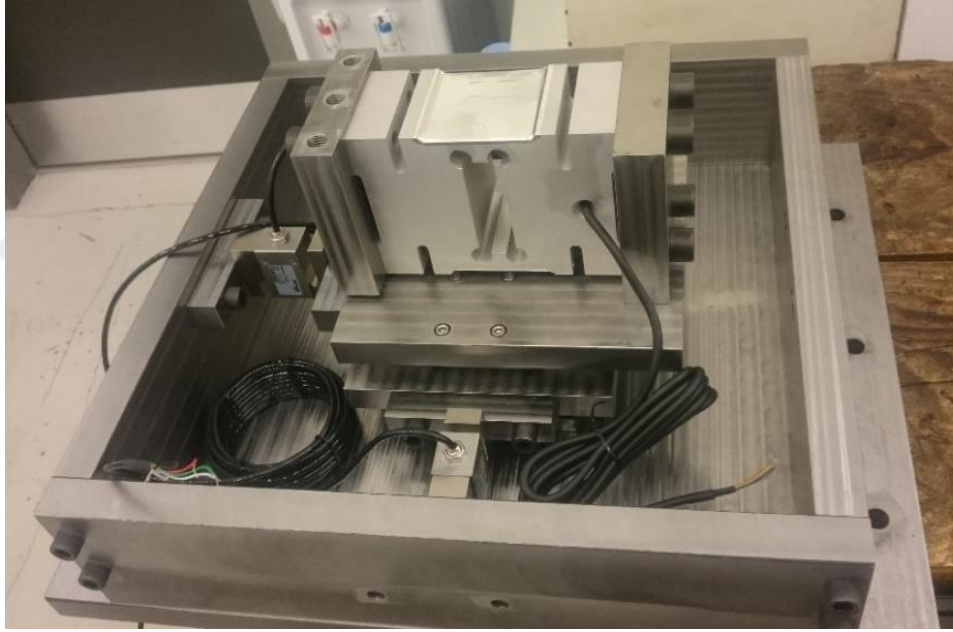


Şekil 3.23 : Kuvvet ölçüm sistemi mekanik tasarımı. A: Perspektif görünüm. B:Detaylar.(Seçgin, 2019b)

Arayüz oluşturmak için Labview 2017 programı kullanılmıştır (Şekil 3.24). Bu arayüz üç farklı yük hücresinden alınan yük verisini görselleştirmektedir. Ayrıca ölçülen değerler *.tdms uzantılı olarak dosya halinde kaydedilmektedir (Seçgin, 2019b). Deneylerde örnekleme frekansı 50 ölçüm/sn olarak alınmıştır. Sistemin görseli Şekil 3.25'te verilmiştir.



Şekil 3.24 : Kuvvet ölçüm sistemi arayüzü.



Şekil 3.25 : Kuvvet ölçüm sistemi (Seçgin, 2019b).

3.2.8. Geometrik doğruluk analizi

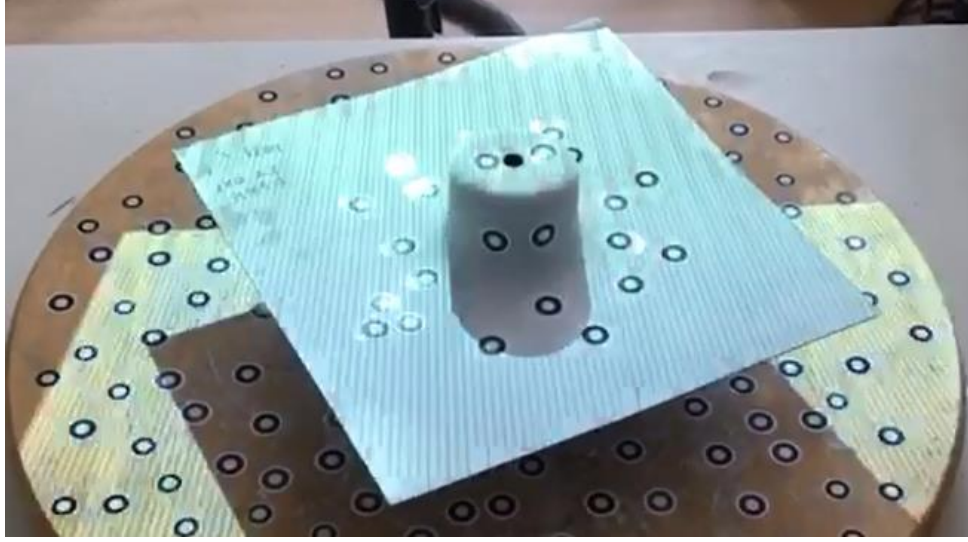
Sac şekillendirme yöntemlerinde şekillendirilen bölgeye uygulanan kuvvet doğrultusunda o bölgelerde oluşan elastik deformasyonlar parçanın geometrik sapmasına neden olabilmektedir (Demirkol, 2010). Bu durum tasarlanan geometri ile elde edilen parça arasında ölçüsel farklılıklara neden olmaktadır. Geometrik doğruluk analizinde tasarımı yapılan parçanın üretildikten sonraki ölçüleri ile tasarım ölçülerinin karşılaştırılması yapılmaktadır. Analiz için öncelikle üretimi gerçekleşen

parça 3D tarama cihazı ile taranıp nokta bulutu oluşturulmuştur. Ardından nokta bulutlarından *.stl formatında parça geometrisi çıkarılmıştır. Son olarak taranan geometri ile tasarım geometrisi karşılaştırılarak geometrik sapma miktarı belirlenmiştir. Ölçümler ATOS marka 3D optik tarama cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Tarama anından görsel Şekil 3.26 :’da verilmiştir.



Şekil 3.26 : Optimizasyon parçalarının 3D tarama anı.

Cad datası ile tarama datasının karşılaştırılıp geometrik sapma miktarlarının belirlenmesi Rapidform2006 programı kullanılarak elde edilmiştir. Ölçüm anından görsel Şekil 3.27’de verilmiştir.



Şekil 3.27 : Geometrik doğruluk analizi ölçüm anı.

3.2.9. İstatistiksel analiz

3.2.9.1. Varyans analizi

Parametrelerin birbirleriyle etkileşimlerini belirlemek için varyans analizi kullanılmaktadır (Meral ve diğ, 2011; Uzun ve diğ, 2017). Bu çalışmada deney sonuçlarına göre yüzey pürüzlülüğü, et kalınlığı değişimi ve şekillendirme kuvveti için ayrı ayrı varyans analizi (ANOVA) yapılmıştır.

3.2.9.2. Cevap yüzey metodu

Bu yöntem, bazı etkenlerin değerlerinin, cevap değişkeni üzerindeki etkisini belirlemek ve etken değerlerinin kombinasyonları arasından cevap değişkenini maksimum ya da minimum yapan değeri bulmak için kullanılır. Cevap ve bağımsız değişkenlerinin arasındaki ilişkinin tanımlanması için bir dizi matematiksel ve istatistiksel teknikler kullanılmaktadır. Bu teknikler işlemdeki bağımsız değişkenlerin tek başına ya da kombinasyonu olarak cevap üzerindeki etkisini araştırır. Bu yöntemde ilk olarak cevap değişkeni üzerinde etkisi olduğu düşünülen etkenler yani bağımsız değişkenler belirlenmektedir. Ancak gerçek cevap fonksiyonunun şekli bilinmediğinden cevap ve bağımsız değişkenler arasında gerçek bir fonksiyonel ilişki için uygun yaklaşıma ihtiyaç vardır. Bu yaklaşım eğer cevap sistemi, bağımsız değişkenin lineer bir fonksiyonu olarak uyum sağlıyorsa yaklaşım birinci dereceden 3.1 denklemidir :

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \varepsilon \quad (3.1)$$

Sistemin cevap yüzeyinde eğrilik varsa ikinci dereceden 3.2 denklemi daha uygun olur.

$$y = \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j x_j + \sum_{j=1}^k \beta_{jj} x_j^2 + \sum_i^{k-1} \sum_j^k \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (3.2)$$

Denklemlerde y cevap değişkenini, $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k$ bilinmeyen regresyon parametrelerini, x_i, x_j karar değişkenlerini ($i = 1, 2, 3, \dots, k$) ve ($j = 1, 2, 3, \dots, k$) son olarak ε hatayı ifade etmektedir. Bu denklemler hesaplamalarıyla sistem optimizasyon değerlerini ve ikinci dereceden denklem olan regresyon modellemesini verir (Baş ve Boyacı, 2007; Mayers ve Montgomery, 2016).

3.2.9.3. Gri ilişkisel analiz

Çok kriterli karar alma tekniklerinden biri olan gri ilişkisel analiz karar alma süreçlerinde kararın kalitesini artırmaktadır (Rajesh ve Ravi, 2015). Bu yöntem sayesinde birden fazla bağımlı değişken seviyesini optimize edecek parametre seviyelerine ulaşılır (Asghari ve diğ, 2017; Panda ve diğ, 2016).

Gri ilişkisel analizinde, siyah renk bilgiye sahip olunmadığını, beyaz renk bilgiye tamamen sahip olduğunu, gri renk ise siyah ile beyaz arasındaki bilginin seviyesini göstermektedir. Yani bazı bilgiler bilinirken bazı bilgiler bilinmemektedir (Julong, 1989; Wang ve diğ, 2001). Yöntem beş ana adımdan oluşmaktadır. Önce karar matrisi oluşturulur. Karar matrisinde alternatiflerin her bir kriter için aldıkları değerler gösterilir (3.3).

$$x_{ii} = \begin{bmatrix} x_1(1) & x_1(2) & \dots & x_1(m) \\ x_2(1) & x_2(2) & \dots & x_2(m) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_n(1) & x_n(2) & \dots & x_n(m) \end{bmatrix} \quad i = 1, \dots, n \quad j = 1, \dots, m \quad (3.3)$$

Denklemden n alternatifi, m kriterden oluşan karar matrisini, $x_i(j)$ i alternatifinin j kriteri için aldığı değeri göstermektedir. Daha sonra verilerin standartlaştırma işlemi gerçekleştirir. Bu işlem, farklı birimlerle ölçülen kriterleri birbirleriyle karşılaştırılabilir

hale getirir. Standartlaştırma işleminde düşük, yüksek ya da ideal değerin tercih edilmesine göre üç farklı denklemden yararlanılır :

$$x'_i(j) = \frac{\max_{i=1}^n x_i(j) - x_i(j)}{\max_{i=1}^n x_i(j) - \min_{i=1}^n x_i(j)} \quad (\text{düşük değer daha iyi}) \quad (3.4)$$

$$x'_i(j) = \frac{x_i(j) - \min_{i=1}^n x_i(j)}{\max_{i=1}^n x_i(j) - \min_{i=1}^n x_i(j)} \quad (\text{yüksek değer daha iyi}) \quad (3.5)$$

$$x'_i(j) = 1 - \frac{|x_i(j) - x_{idl}(j)|}{\max\{\max_{i=1}^n x_i(j) - x_{idl}(j), x_{idl}(j) - \min_{i=1}^n x_i(j)\}} \quad (\text{ideal değer daha iyi}) \quad (3.6)$$

Burada $x_{idl}(j)$ ideal değeri gösterir. Standartlaştırma işleminin uygulanmasıyla tüm durumlar için büyük değerler daha iyi duruma getirilmiş olur. Bağımlı değişkenin sahip olduğu değerler birbirlerinden çok farklı olabildiği için standartlaştırma işleminin ardından değerler 0 ile 1 arasında değer alır. Bu işlem gerçekleşirken bağımsız değişkenin en büyük değerinin mi yoksa en küçük değerinin mi optimum olduğuna dikkat edilmesi gerekmektedir. Standartlaştırma işleminin ardından standartlaştırılmış karar matrisi (3.7) oluşturulur. Matris oluşturulurken bir önceki adımdan elde edilen değerler kullanılır.

$$x'_{ij} = \begin{bmatrix} x'_1(1) & x'_1(2) & \cdots & x'_1(m) \\ x'_2(1) & x'_2(2) & \cdots & x'_2(m) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x'_n(1) & x'_n(2) & \cdots & x'_n(m) \end{bmatrix} \quad i = 1, \dots, n \quad j = 1, \dots, m \quad (3.7)$$

Standartlaştırılmış karar matrisinin her sütununda bulunan en büyük değerlerden (3.8) referans serisi oluşturulur.

$$x'_0 = x'_0(1), x'_0(2), \dots, x'_0(m) \quad (3.8)$$

Bir sonraki adım fark matrisinin oluşturulmasıdır. Standartlaştırılmış karar matrisinden referans serisi çıkartılarak (3.9) fark matrisi elde edilir.

$$\Delta_{ij} = \begin{bmatrix} \Delta_{01}(1) & \Delta_{01}(2) & \cdots & \Delta_{01}(m) \\ \Delta_{02}(1) & \Delta_{02}(2) & \cdots & \Delta_{02}(m) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \Delta_{0n}(1) & \Delta_{0n}(2) & \cdots & \Delta_{0n}(m) \end{bmatrix} \quad i = 1, \dots, n \quad j = 1, \dots, m \quad (3.9)$$

Sonraki adım olarak fark matrisindeki her bir adım için gri ilişkisel katsayı hesaplaması (3.10) eşitliğine göre yapılır :

$$\gamma_{0i}(j) = \frac{\min_{i=1}^n \min_{j=1}^m \Delta_{0i}(j) + \xi \times \max_{i=1}^n \max_{j=1}^m \Delta_{0i}}{\Delta_{0i} + \xi \times \max_{i=1}^n \max_{j=1}^m \Delta_{0i}} \quad (3.10)$$

Burada 0 ile 1 arasında değer alan bir katsayıdır. Genellikle 0.5 olarak alınır. Son olarak gri ilişki derecesi hesaplanır. Elde edilen gri ilişkisel katsayılar, ilgili olduğu kriterin ağırlığıyla çarpılıp, her bir alternatif için toplanarak gri ilişki derecesi elde edilir (3.11).

$$\Gamma_{0i} = \sum_{j=1}^m w(j) \gamma_{0i}(j), \sum_{j=1}^m w(j) = 1 \quad (3.11)$$

Burada $w(j)$, j. kriterin ağırlığını göstermektedir. Gri ilişki derecesinin her bir alternatif için aldığı değerler büyükten küçüğe doğru sıralandığında, alternatifler en iyiden en kötüye doğru sıralanmış olur (Tayyar ve diğ., 2014).

BÖLÜM 4. DENEYSEL ÇALIŞMA SONUÇLARI

Çalışma kapsamında kademeli kayar artımlı şekillendirme yöntemi kullanılarak 27 farklı deney yapılmıştır. Elde edilen değerlerin varyans analizi yapılarak farklı parametrelerin şekillendirmeye etki oranları belirlenmiştir. Ayrıca cevap yüzey analizi yapılarak optimum parametre seviyeleri belirlenmiştir. Belirlenen optimum parametre değerleriyle de et kalınlığı, yüzey pürüzlülüğü ve şekillendirme kuvveti doğrulama deneyleri yapılarak optimum parametre değerlerinin doğruluğu teyit edilmiştir. Gri ilişkisel analiz yapılarak et kalınlığı, yüzey pürüzlülüğü ve şekillendirme kuvveti faktörlerinin birbirleriyle ilişkileri araştırılıp bu üç faktörün birlikte en iyi sonuca sahip olduğu parametre seviyeleri belirlenmiştir. Yine geometrik doğruluk analizleri yapılarak parçalarda meydana gelen geometrik sapma miktarı belirlenmiştir. Son olarak yöntemin endüstriye uygulanabilirliğine örnek olmak üzere amortisör yay sacı bu yöntemle imal edilmiştir.

4.1. Et Kalınlığı

Et kalınlığı ölçümü Şekil 3.18 ve Şekil 3.19’da belirtildiği üzere ilk ve son noktası deney parçalarının şekillendirilmemiş bölgesinde olacak şekilde 5’er mm aralıklarla markalanarak ölçülmüştür. Tüm deneyler için markalama işlemi gerçekleştirilerek deney parçalarının aynı noktadan ölçümü sağlanmıştır. Deneyler sonucunda belirlenen et kalınlığı dağılımı Tablo 4.1’de verilmiştir.

Tablo 4.1 : Et kalınlığı değerleri (mm).

Deney Parametreleri					Ölçüm Noktaları ve Et Kalınlığı Dağılımı														
Deney No	Basınç (bar)	Açı Artımı (°)	İlerleme (mm/dak)	Artım Miktarı (mm)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	5.5	10	3500	0.75	0.98	0.9	0.93	0.82	0.76	0.68	0.64	0.52	0.35	0.28	0.4	0.54	0.73	0.9	0.98
2	5.5	5	5000	0.5	0.98	0.88	0.93	0.82	0.77	0.72	0.66	0.55	0.4	0.3	0.37	0.49	0.69	0.91	0.98
3	9	7.5	2000	0.5	0.98	0.88	0.93	0.81	0.78	0.74	0.68	0.55	0.37	0.24	0.34	0.52	0.73	0.92	0.98
4	5.5	10	2000	0.5	0.98	0.91	0.91	0.82	0.77	0.7	0.62	0.52	0.36	0.32	0.43	0.54	0.76	0.93	0.98
5	5.5	7.5	3500	0.5	0.98	0.91	0.91	0.84	0.78	0.73	0.66	0.55	0.38	0.3	0.38	0.54	0.76	0.94	0.98
6	5.5	7.5	3500	0.5	0.98	0.91	0.91	0.83	0.81	0.77	0.69	0.58	0.39	0.29	0.42	0.56	0.71	0.94	0.98
7	5.5	7.5	5000	0.75	0.98	0.88	0.91	0.85	0.79	0.75	0.66	0.56	0.39	0.28	0.4	0.56	0.75	0.9	0.98
8	2	7.5	5000	0.5	0.98	0.89	0.91	0.86	0.1	0.73	0.65	0.57	0.44	0.3	0.38	0.46	0.7	0.89	0.98
9	5.5	7.5	3500	0.5	0.98	0.92	0.91	0.82	0.78	0.72	0.63	0.47	0.33	0.29	0.39	0.53	0.67	0.89	0.98
10	5.5	7.5	2000	0.75	0.98	0.88	0.91	0.82	0.79	0.77	0.68	0.56	0.38	0.25	0.37	0.51	0.68	0.96	0.98
11	9	7.5	5000	0.5	0.98	0.91	0.94	0.84	0.81	0.78	0.67	0.57	0.38	0.26	0.38	0.52	0.73	0.93	0.98
12	5.5	5	2000	0.5	0.98	0.9	0.93	0.83	0.78	0.72	0.64	0.55	0.34	0.26	0.35	0.5	0.66	0.93	0.98
13	5.5	7.5	2000	0.25	0.98	0.91	0.92	0.85	0.78	0.72	0.66	0.49	0.33	0.29	0.44	0.54	0.77	0.92	0.98
14	5.5	5	3500	0.75	0.98	0.91	0.93	0.81	0.76	0.67	0.66	0.54	0.36	0.26	0.35	0.48	0.69	0.94	0.98
15	9	7.5	3500	0.25	0.98	0.91	0.94	0.8	0.73	0.67	0.61	0.51	0.33	0.24	0.4	0.58	0.81	0.93	0.98
16	2	5	3500	0.5	0.98	0.91	0.91	0.83	0.77	0.74	0.68	0.56	0.34	0.23	0.35	0.46	0.73	0.95	0.98
17	9	5	3500	0.5	0.98	0.87	0.91	0.84	0.81	0.76	0.71	0.6	0.38	0.25	0.39	0.52	0.67	0.91	0.98
18	5.5	10	3500	0.25	0.98	0.9	0.93	0.84	0.78	0.7	0.62	0.47	0.36	0.34	0.44	0.55	0.77	0.94	0.98
19	2	7.5	3500	0.75	0.98	0.89	0.92	0.83	0.79	0.76	0.66	0.52	0.41	0.25	0.37	0.54	0.74	0.94	0.98
20	2	7.5	2000	0.5	0.98	0.88	0.93	0.85	0.79	0.74	0.64	0.55	0.43	0.29	0.38	0.48	0.72	0.91	0.98
21	5.5	5	3500	0.25	0.98	0.89	0.9	0.84	0.8	0.77	0.71	0.54	0.34	0.25	0.36	0.5	0.74	0.96	0.98
22	5.5	7.5	5000	0.25	0.98	0.91	0.93	0.81	0.76	0.72	0.64	0.46	0.34	0.3	0.43	0.52	0.74	0.95	0.98
23	2	10	3500	0.5	0.98	0.88	0.91	0.84	0.82	0.72	0.6	0.51	0.39	0.29	0.4	0.51	0.71	0.92	0.98
24	5.5	10	5000	0.5	0.98	0.9	0.92	0.82	0.76	0.7	0.59	0.45	0.34	0.29	0.41	0.56	0.77	0.94	0.98
25	2	7.5	3500	0.25	0.98	0.89	0.92	0.83	0.77	0.69	0.6	0.46	0.38	0.31	0.4	0.53	0.69	0.92	0.98
26	9	10	3500	0.5	0.98	0.89	0.92	0.85	0.8	0.74	0.64	0.49	0.33	0.27	0.42	0.53	0.77	0.94	0.98
27	9	7.5	3500	0.75	0.98	0.88	0.92	0.82	0.77	0.74	0.67	0.52	0.31	0.23	0.35	0.48	0.76	0.92	0.98
Et. Opt.	2.77	10	2000	0.25	0.98	0.91	0.93	0.86	0.78	0.7	0.59	0.45	0.38	0.36	0.46	0.57	0.77	0.96	0.98

Tablo 4.1’de verilen et kalınlığı dağılımları incelendiğinde şekillendirilmemiş olan 1. ve 15. ölçüm noktalarında inceleme meydana gelmemiştir. Deneylerin çoğunda üst radyüsün başlangıç yeri olan 2. ölçüm noktasındaki inceleme miktarının, üst radyüsün ortasında olan 3. ölçüm noktasına göre daha fazla olduğu görülmektedir. Ölçüm sonuçlarına göre en çok incelen bölge alt radyüsün bulunduğu yer olan 10. ölçüm noktasıdır. Bu noktada oluşan en düşük et kalınlığı 0,23 mm’dir. Et kalınlığı 0,98 mm olan sac 0,23 mm ye düşerek 0,75 mm incelendiği görülmektedir. Genel olarak kalınlığın 10. ölçüm noktasına kadar sürekli azaldığı, sonraki ölçüm noktalarında giderek arttığı görülmektedir.

Deney parametrelerinin et kalınlığına etkilerini ve parametre etkileşimlerini ortaya koymak amacıyla varyans analizi yapılmış ve sonuçlar Tablo 4.2’de verilmiştir.

Tablo 4.2 : Et kalınlığı ölçümü varyans analizi.

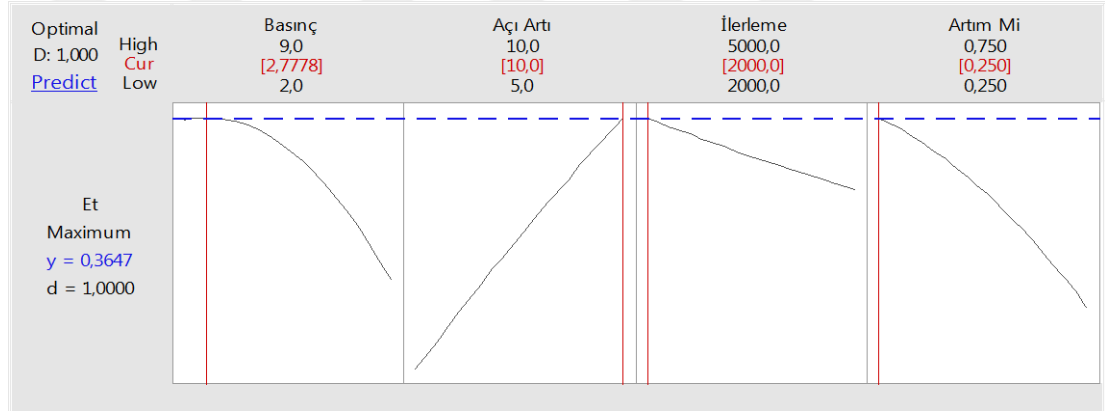
Kaynak	SD	Etki	KT	KO	F	P
Model	14	89.22%	0.018763	0.00134	7.1	0.00081
Doğrusal		51.04%				
Basınç	1	12.84%	0.0027	0.0027	14.29	0.00262
Açı Artımı	1	22.82%	0.0048	0.0048	25.41	0.00029
İlerleme	1	2.54%	0.000533	0.000533	2.82	0.11871
Artım Miktarı	1	12.84%	0.0027	0.0027	14.29	0.00262
Kare		21.06%				
Basınç*Basınç	1	17.26%	0.003559	0.003559	18.84	0.00096
Açı Artımı*Açı Artımı	1	0.03%	0.000059	0.000059	0.31	0.58571
İlerleme*İlerleme	1	0.79%	0.000015	0.000015	0.08	0.7842
Artım Miktarı*Artım Miktarı	1	2.98%	0.000626	0.000626	3.31	0.09372
2’li Etkileşim		17.12%				
Basınç*Açı Artımı	1	1.90%	0.0004	0.0004	2.12	0.17127
Basınç*İlerleme	1	0.12%	0.000025	0.000025	0.13	0.72233
Basınç*Artım Miktarı	1	2.97%	0.000625	0.000625	3.31	0.09394
Açı Artımı*İlerleme	1	5.83%	0.001225	0.001225	6.49	0.02562
Açı Artımı*Artım Miktarı	1	5.83%	0.001225	0.001225	6.49	0.02562
İlerleme*Artım Miktarı	1	0.48%	0.0001	0.0001	0.53	0.48081
Hata	12	10.78%	0.002267	0.000189		
Toplam	26	100.00%				

(SD= Serbestlik Derecesi, KT= Düzeltilmiş Kareler Toplamı, KO= Düzeltilmiş Kareler Ortalaması)

Et kalınlığı optimizasyonu için varyans analizi incelendiğinde, şekillendirmeye parametrelerin doğrudan etkisinin %51,04 olduğu, parametrelerinin kendileriyle etkisinin %21,06 olduğu, parametrelerin birbirleriyle etkisinin %17,12 olduğu ve

hata payının %10,78 olduğu görülmektedir. Doğrudan etkiler incelendiğinde şekillendirmeyi en çok etkileyen parametre %22,82 oranla açılı artıdır ($P < 0,01$). Basınç ve artım miktarının oranları %12,84 ile aynı olduğundan et kalınlığı için şekillendirmeye etkilerinin eşit olduğu görülmektedir ($P < 0,01$). En az etkiye sahip olan ilerleme hızının oranı ise %2,54'tür. İkili etkileşimler incelendiğinde sonuçları çok önemli düzeyde etkileyen açılı artımının etkisi artım miktarı ve ilerleme hızına önemli düzeyde ($P < 0,01$) bağlı olmuştur. Analizin güven seviyesi incelendiğinde güven oranının %89,22 olduğu görülmektedir.

En yüksek et kalınlığını elde edebilmek adına optimum parametre seviyeleri belirlemek için cevap yüzey analizi gerçekleştirilmiştir. Analize ait seviyeler Şekil 4.1'de gösterilmektedir.



Şekil 4.1 : En yüksek et kalınlığı için parametrelerin optimum seviyeleri.

Şekilde, parametrelerin en yüksek ve en düşük değerleri, bu değerler arasından optimum sonuca ulaşılacak parametre değerlerini ve bu değerlerle yapılacak deneyde elde edilecek tahmini et kalınlığı değeri verilmektedir. Cevap yüzey analizinin sunmuş olduğu optimum parametre seviyeleri ile deney yapılırsa elde edilecek tahmini et kalınlığı 0,36 mm olacaktır. Bu sonuç için olması gereken parametre seviyeleri sıkma basıncı 2,77 bar, açılı artımı 10° , ilerleme hızı 2000 mm/dak ve artım miktarı 0,25 mm olarak belirlenmiştir. Bu durumu doğrulamak için anılan parametre seviyeleri ile optimizasyon deneyi yapılmıştır. Optimum parametre seviyeleriyle yapılan deneye ait ölçümlerde Tablo 4.1'de son satırda verilmiştir.

Tablo incelendiğinde şekillendirilmeyen 1. ve 15. bölgelerde et kalınlığının değişmediği görülmektedir. Deney sonucunda tüm deneylerde en fazla incelleme oluşan 10. ölçüm noktasında daha iyi et kalınlığı elde edilmiştir. Bu noktada

deneylerden elde edilen et kalınlığı değeri 0,23 mm ile 0,34 mm aralığında, elde edilen optimum parametre seviyeleri ile yapılan deneyde ise bu noktada et kalınlığı cevap yüzey analizinin sunmuş olduğu tahmini değer olan 0,36 mm olarak ölçülmüştür. Bu iki deney için parametre seviyeleri incelendiğinde artım miktarlarının 0,25 mm olarak aynı olduğu ve açı artımlarının 10° olarak aynı olduğu görülmektedir. Varyans analizi sonuçlarında da verildiği üzere şekillendirmeyi en fazla etkileyen bu parametrelerdir. Basınç değerleri karşılaştırıldığında ise birbirlerine yakın oldukları 18. deney için 5,5 bar optimum deneyi için ise 2,77 bar olduğu görülmektedir. İlerleme hızının et kalınlığına etkisinin çok küçük olduğu varyans analizinden bildiği üzere, sıkma basıncı azaldıkça başka bir tabirle sacın akması sağlandıkça et kalınlığının arttığı sonucu elde edilmektedir. Diğer parametreler için inceleme yapıldığında, artım miktarının deney seti seviyelerinden en küçüğü olduğunda en iyi et kalınlığı, açı artımı ise en yüksek olduğunda en iyi et kalınlığı elde edilmiştir. Cevap yüzey analizinin vermiş olduğu parametre seviyelerinin ve sunmuş olduğu tahmini et kalınlığı değerinin doğruluğu ispatlanmıştır. Anılan tabloda görüldüğü gibi, deneylerde en ince kalınlıkların görüldüğü 10. ölçüm noktasında 0,23 mm ile 0,34 mm arasında değişen kalınlık optimum seviyelerle yapılan doğrulama deneyinde 0,36 mm olmuş, kritik bölge olan alt radyüs bölgesinde daha düzgün bir kalınlık değişimi sağlanmıştır.

Et kalınlığı dağılımı tahmini için parametrelerin etkilerini ve etkileşimlerini dikkate alan ikinci dereceden regresyon denklemleri oluşturulmuştur (4.1) :

$$\begin{aligned}
 t = & -0,060 + 0,0187 * P + 0,0526 * A + 0,000025 * F + 0,198 * Z - \\
 & 0,002109 * P * P - 0,000533 A * A + 0,0000001 * F * F - 0,1733 * Z * Z - \\
 & 0,001143 * P * A + 0,000000 * P * F + 0,01429 P * Z - 0,000005 * A * F - \\
 & 0,0280 A * Z + 0,000013 * F * Z
 \end{aligned} \tag{4.1}$$

Denklemden t et kalınlığını, P basıncı, A açı artımını, Z artım miktarını ve F ilerleme hızını belirtmektedir.

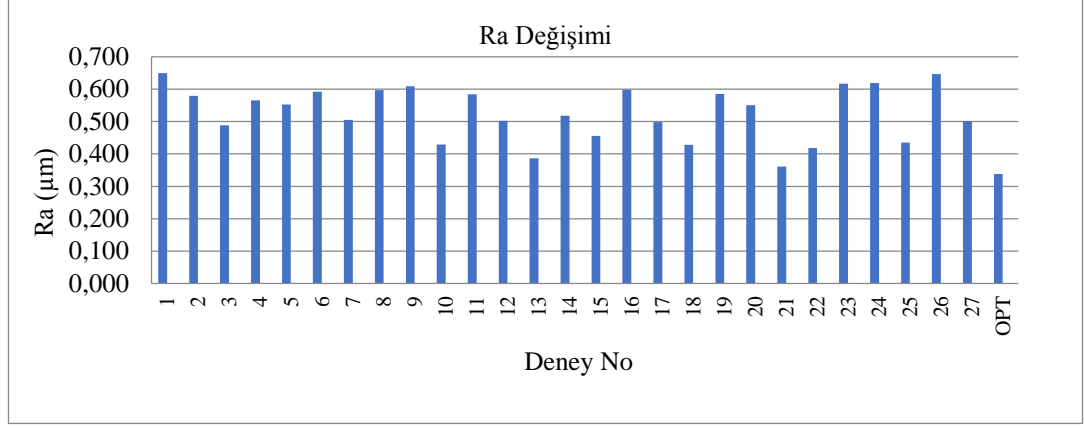
4.2. Yüzey Pürüzlülüğü

Tüm deneylerden elde edilen parçaların yüzey pürüzlülükleri üçer defa ölçülerek çıkan sonuçların ortalama değerleri ölçüm sonuçları olarak baz alınmıştır. Ölçüm sonuçları ve optimum parametre değerleri Tablo 4.3'te ve Şekil 4.2'de verilmiştir.

Tablo 4.3 : Yüzey pürüzlülük ölçümü sonuçları.

Deney No	Deney Parametreleri				Yüzey Pürüzlülüğü			
	Basınç (bar)	Açı Artımı (°)	İlerleme (mm/dak)	Artım Miktarı (mm)	1.Ölçüm (Ra µm)	2.Ölçüm (Ra µm)	3.Ölçüm (Ra µm)	Ortalama (Ra µm)
1	5.5	10	3500	0.75	0.652	0.643	0.653	0.649
2	5.5	5	5000	0.5	0.534	0.631	0.572	0.579
3	9	7.5	2000	0.5	0.447	0.467	0.550	0.488
4	5.5	10	2000	0.5	0.604	0.511	0.583	0.566
5	5.5	7.5	3500	0.5	0.588	0.520	0.549	0.552
6	5.5	7.5	3500	0.5	0.567	0.618	0.593	0.593
7	5.5	7.5	5000	0.75	0.501	0.524	0.490	0.505
8	2	7.5	5000	0.5	0.638	0.614	0.539	0.597
9	5.5	7.5	3500	0.5	0.586	0.602	0.639	0.609
10	5.5	7.5	2000	0.75	0.423	0.451	0.414	0.429
11	9	7.5	5000	0.5	0.621	0.597	0.536	0.585
12	5.5	5	2000	0.5	0.489	0.516	0.503	0.503
13	5.5	7.5	2000	0.25	0.379	0.379	0.403	0.387
14	5.5	5	3500	0.75	0.534	0.527	0.492	0.518
15	9	7.5	3500	0.25	0.438	0.427	0.503	0.456
16	2	5	3500	0.5	0.648	0.523	0.625	0.599
17	9	5	3500	0.5	0.431	0.557	0.507	0.498
18	5.5	10	3500	0.25	0.446	0.404	0.434	0.428
19	2	7.5	3500	0.75	0.586	0.646	0.525	0.586
20	2	7.5	2000	0.5	0.561	0.555	0.536	0.551
21	5.5	5	3500	0.25	0.386	0.354	0.342	0.361
22	5.5	7.5	5000	0.25	0.418	0.442	0.396	0.419
23	2	10	3500	0.5	0.570	0.683	0.599	0.617
24	5.5	10	5000	0.5	0.620	0.582	0.656	0.619
25	2	7.5	3500	0.25	0.435	0.441	0.430	0.435
26	9	10	3500	0.5	0.620	0.676	0.645	0.647
27	9	7.5	3500	0.75	0.447	0.520	0.537	0.501
Ra. Opt.	9	5	2000	0.25	0.356	0.331	0.327	0.338

Ölçüm sonuçları grafik olarak incelenmiştir. Tüm deneylerin yüzey pürüzlülüğü dağılım grafiği Şekil 4.2’de verilmiştir.



Şekil 4.2 : Deneylelerin yüzey pürüzlülüğü dağılım grafiği.

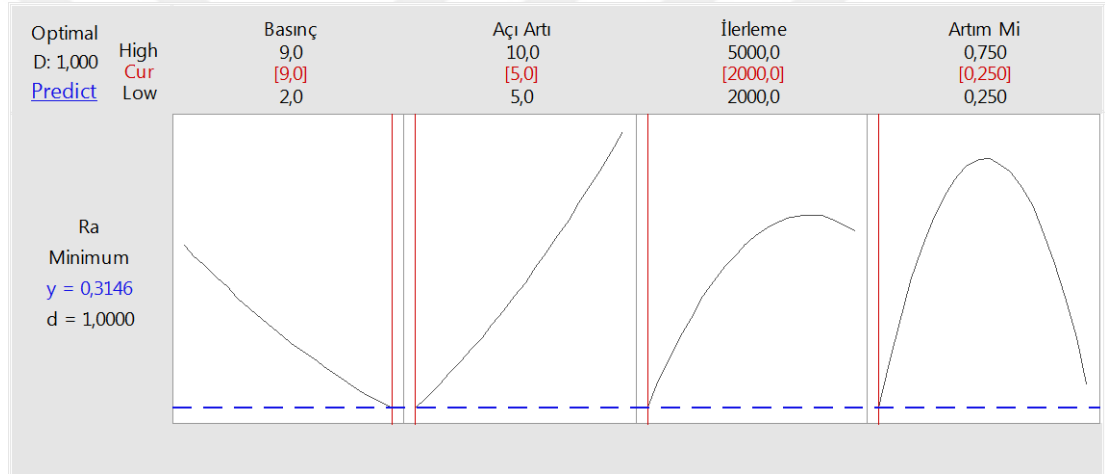
Elde edilen sonuçlar incelendiğinde tüm deneyler için ortalama pürüzlülük değerleri 0,361 µm ile 0,649 µm arasındadır. Deneyler sonucunda en düşük pürüzlülük değeri 0,361 µm ile deney 21'e aittir. Deney parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne etkisini incelemek için varyans analizi gerçekleştirilmiştir. Analize ait sonuçlar Tablo 4.4'te verilmiştir.

Tablo 4.4 : Yüzey pürüzlülüğü varyans analizi.

Kaynak	SD	Etki	KT	KO	F	P
Model	14	92.75%	0.16248	0.011606	10.96	0
Doğrusal		42.95%				
Basınç	1	2.08%	0.003652	0.003652	3.45	0.088
Açı Artımı	1	10.51%	0.018408	0.018408	17.39	0.001
İlerleme	1	6.87%	0.012033	0.012033	11.37	0.006
Artım Miktarı	1	23.49%	0.041145	0.041145	38.86	0
Kare		44.51%				
Basınç*Basınç	1	3.95%	0.000185	0.000185	0.17	0.683
Açı Artımı*Açı Artımı	1	7.08%	0.000421	0.000421	0.4	0.54
İlerleme*İlerleme	1	0.00%	0.006795	0.006795	6.42	0.026
Artım Miktarı*Artım Miktarı	1	33.48%	0.058645	0.058645	55.39	0
2'li Etkileşim		5.29%				
Basınç*Açı Artımı	1	2.41%	0.004225	0.004225	3.99	0.069
Basınç*İlerleme	1	0.36%	0.000633	0.000633	0.6	0.454
Basınç*Artım Miktarı	1	1.57%	0.002756	0.002756	2.6	0.133
Açı Artımı*İlerleme	1	0.08%	0.000132	0.000132	0.12	0.73
Açı Artımı*Artım Miktarı	1	0.59%	0.001035	0.001035	0.98	0.342
İlerleme*Artım Miktarı	1	0.28%	0.000484	0.000484	0.46	0.512
Error	12	7.25%	0.012705	0.001059		
Total	26	100.00%				

(SD= Serbestlik Derecesi, KT= Düzeltilmiş Kareler Toplamı, KO= Düzeltilmiş Kareler Ortalaması)

Analiz sonuçları incelendiğinde, parametrelerin yüzey pürüzlülüğüne doğrudan etki oranları %42,95'tir ($P < 0,01$). Bunlardan en fazla etkiye sahip olan parametre ise %23,49 ($P < 0,01$) ile artım miktarıdır. İkinci en fazla etkiye sahip parametre %10,51 ile açı artımıdır. İlerleme hızının etkisi %6,87 son olarak basıncın etkisi ise %2,08'dir. Buna göre artım miktarının etkisi diğer parametrelere göre çok daha fazla olduğu görülmektedir. Parametrelerin birbirleriyle olan etkileşimleri incelendiğinde oranlar oldukça küçüktür ve önemli bir etkileşim söz konusu değildir ($P > 0,05$). Yüzey pürüzlülüğü için varyans analizi güven seviyesi %92,75 olarak görülmektedir. En düşük yüzey pürüzlülüğünü elde edebilmek adına optimum parametre seviyeleri belirlemek için cevap yüzey analizi gerçekleştirilmiştir. Analiz sonuçları Şekil 4.3'te gösterilmiştir.



Şekil 4.3 : Yüzey pürüzlülüğü için parametrelerin optimum seviyeleri.

Yapılan deneylerden elde edilen en düşük ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri 0,361 iken, cevap yüzey analizi basınc değerini 9 bar, açı artımını 5°, ilerlemeyi 2000 mm/dak ve artım miktarını 0,25 mm olarak alınırsa yüzey pürüzlülüğü değerinin 0,314 olarak elde edileceğini göstermektedir. Bu parametreler ile yapılan deneyde üç farkı ölçüm gerçekleştirilmiştir. Bu değerler sırasıyla 0,356-0,331-0,327 μm 'dir. Ortalama değer ise 0,338 μm 'dir. Doğrulama deneyi ile elde edilen sonuçların önceki deneylerden elde edilen yüzey pürüzlülüğü değerlerinden daha iyi olduğu görülmektedir.

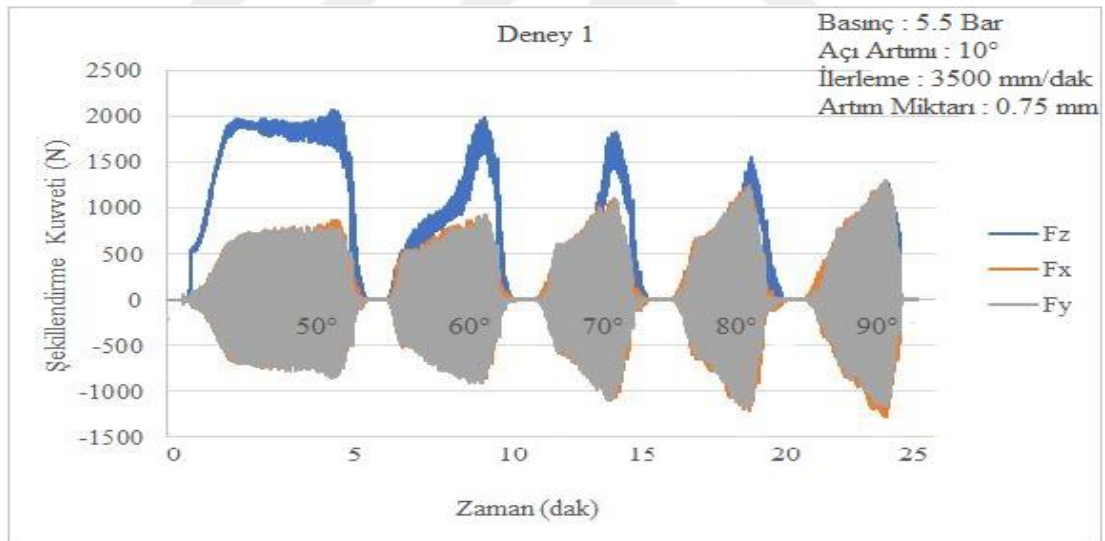
Yüzey pürüzlülüğü tahmini için parametrelerin etkilerini ve etkileşimlerini dikkate alan ikinci dereceden regresyon denklemleri oluşturulmuştur (4.2) :

$$\begin{aligned}
Ra = & 0,009 - 0,315 * P - 0,0336 * A * 0,000116 * F + 1,781 * Z + 0,00048 * \\
& P * P + 0,00142 * A * A - 0,0000001 * F * F * -1,67 * Z * Z + 0,00371 * P * \\
& A + 0,000002 * P * F - 0,0300 * P * Z * -0,000002 * A * F + 0,0257 * A * Z + \\
& 0,000029 * F * Z
\end{aligned} \tag{4.2}$$

Denklemden Ra yüzey pürüzlülüğünü, P basıncı, A açı artımını, Z artım miktarını ve F ilerleme hızını belirtmektedir.

4.3. Şekillendirme Kuvveti

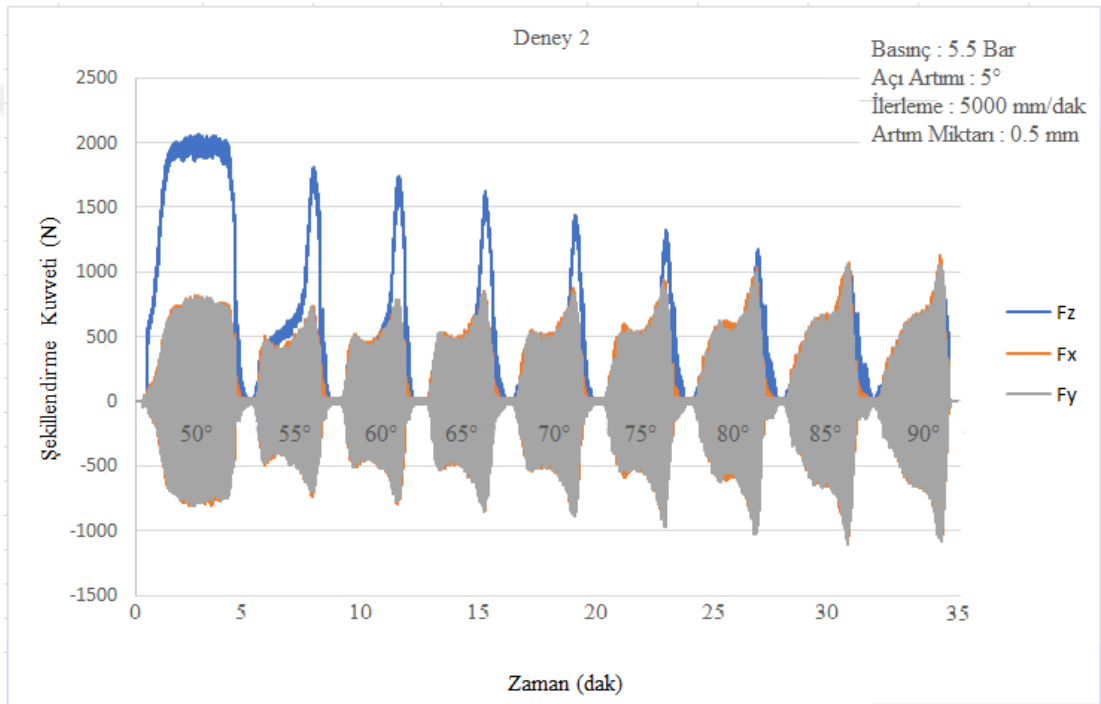
Deneysel süreçte X, Y ve Z eksenlerinde oluşan şekillendirme kuvvetleri kayıt altına alınmıştır. Bu kuvvet değerleri grafiksel olarak her deney için işlenmiştir. Grafiklerde değerler zaman olarak dakika (dak), şekillendirme kuvveti ise Newton (N) olarak gösterilmektedir. Grafiklerde mavi renk ile belirtilen kuvvet Fz eksenindeki değerdir. Fx ve Fy eksenlerinde oluşan kuvvetler sırasıyla turuncu ve gri renkte belirtilmiştir. Şekil 4.4'te deney 1'in kuvvet grafiği verilmektedir.



Şekil 4.4 : Deney 1'e ait kuvvet grafiği.

Bu grafikte X ve Y eksenlerinde oluşan yoğun kuvvet dağılımları deney parametrelerinden olan açı artım miktarı doğrultusunda oluşmaktadır. Deney 1 için açı artım miktarı 10°'dir. Bu durumda açı artımları doğrudan 50°, sırasıyla 60°, 70°, 80° ve son olarak 90°'dir. 5 farklı açı artımı için grafik üzerinde kuvvetlerin yoğunlaştığı 5 bölge görülmektedir. Grafikte kuvvetin azaldığı bölgeler form takımının geçiş bölgeleridir. Şekillendirme, grafikte görüldüğü üzere 25 dakika sürmüştür.

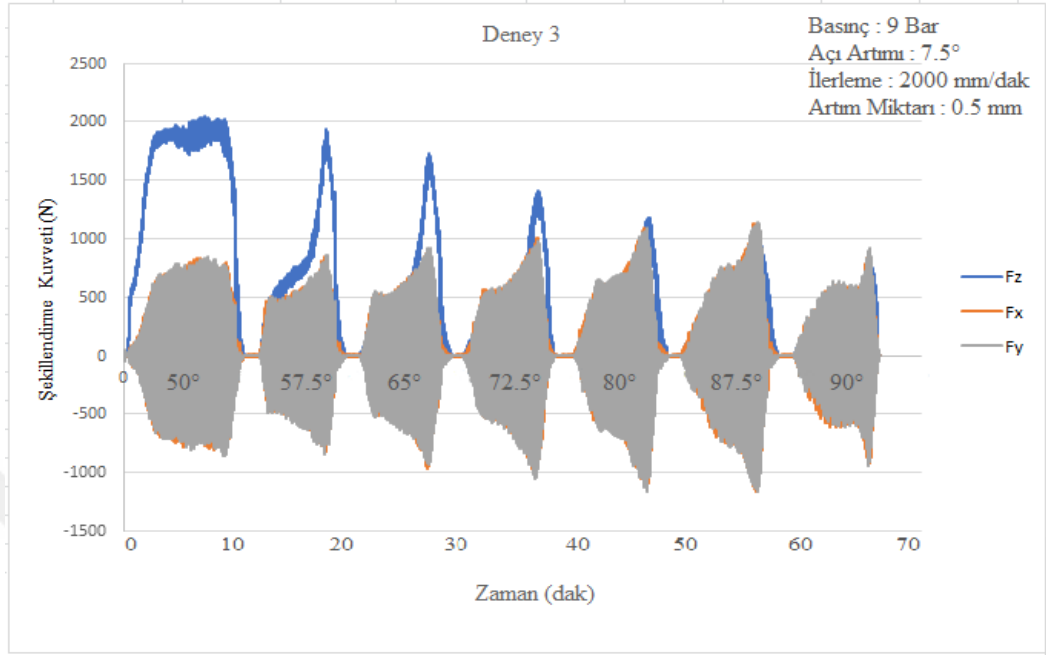
Grafik incelendiğinde düz sac direk olarak 50° 'ye şekillendirirken Z ekseninde kuvvetin ciddi bir şekilde arttığı görülmektedir. Bunun nedeni form takımının doğrudan düz saca temas etmesidir. Diğer açı artımları için deney parçasına, form takımının radyüs bölgeleri yoğunlukla temas ettiği için X ve Y eksenlerinde kuvvet değeri ilk açı artım değeri olan 50° 'ye göre daha fazladır ve açı arttıkça bu eksenlerdeki kuvvetlerin arttığı görülmektedir. Aynı nedenle Z eksenindeki uygulanan kuvvet değeri açı arttıkça azalmıştır. Deney parçaları eksenel simetrik geometriye sahip olduğu için F_x ve F_y değerleri birbirlerine çok yakındır. Deney 2'nin kuvvet grafiği Şekil 4.5'te verilmiştir.



Şekil 4.5 : Deney 2'ye ait kuvvet grafiği.

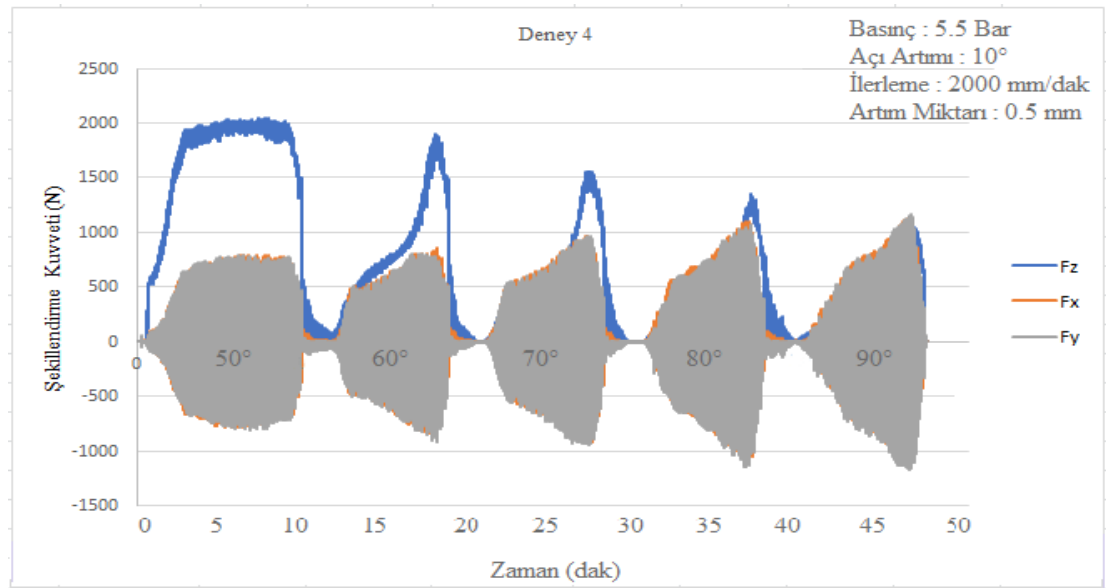
Deney 2'nin kuvvet grafiği incelendiğinde açı artımı 5° olduğundan 9 farklı kuvvet yoğunluğu oluştuğu oluşmuştur. İlk şekillendirme açısında kuvvet değeri 2000 N 'in üzerine çıktığı görülmektedir. Deney yaklaşık 35 dakika sürmüştür. Deney sürelerindeki değişiklik açı artımı, artım miktarı ve ilerleme hızı parametre değerlerine bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Birinci açının şekillendirilmesinin ardından, diğer açılarda Z ekseninde kuvvetin belli bir seviyeye kadar düşük olarak geldiği sonradan hızlı bir şekilde yükseldiği görülmektedir. Bunun nedeni şekillendirmenin sonuna yaklaştıkça takımın alt radyüs ve flanş bölümüne temas edip o bölgeleri gerdirmesidir. Bilinmeyen etkiler nedeniyle 90° şekillenirken X

eksenindeki kuvvet değerinin Y eksenindeki kuvvet değerine göre arttığı görülmektedir. Deney 3'ün kuvvet grafiği Şekil 4.6'da verilmiştir.



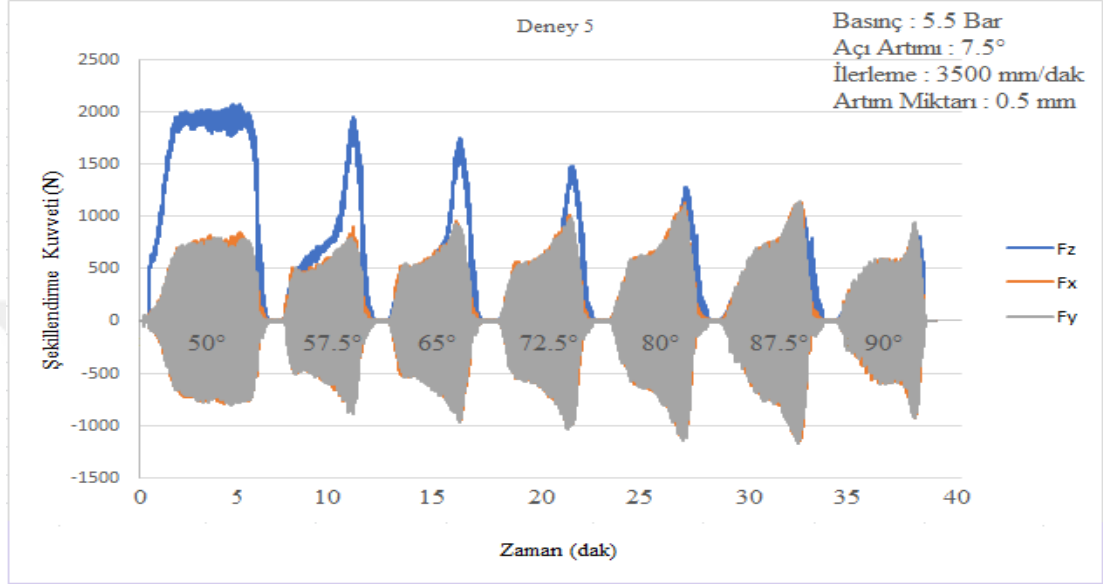
Şekil 4.6 : Deney 3'e ait kuvvet grafiği.

Deney 3'nün kuvvet grafiği incelendiğinde açı artımı 7,5° olduğundan 7 farklı kuvvet yoğunluğu oluştuğu görülmektedir. Bilinmeyen etkiler nedeniyle ilk şekillendirme açısının kuvvet dağılımlarında dalgalanmalar görülmektedir. Deneyin yaklaşık 65 dakika sürdüğü görülmektedir. Deney 4'ün kuvvet grafiği Şekil 4.7'de verilmiştir.



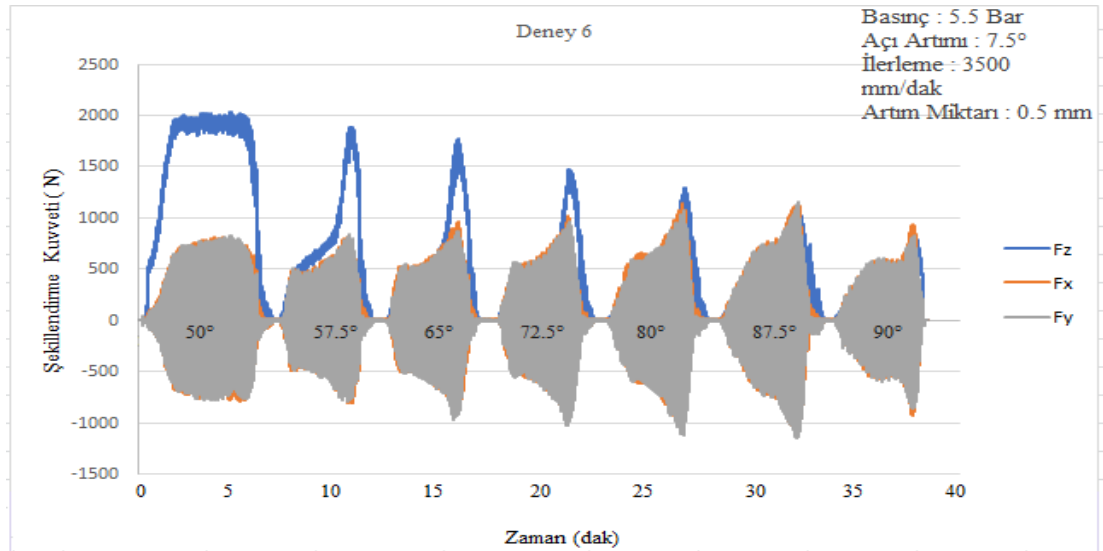
Şekil 4.7 : Deney 4'e ait kuvvet grafiği.

Deney 4'ün kuvvet grafiği incelendiğinde açı artımı 10° olduğundan 5 farklı kuvvet yoğunluğu oluştuğu görülmektedir. İlk şekillendirme açısında kuvvet değeri 2000 N'in üzerine çıktığı görülmektedir. Bu açıda Z ekseninde kuvvet düzgün bir dağılım göstermektedir. Deneyin yaklaşık 50 dakika sürdüğü görülmektedir. Deney 5'in kuvvet grafiği Şekil 4.8'de verilmiştir.



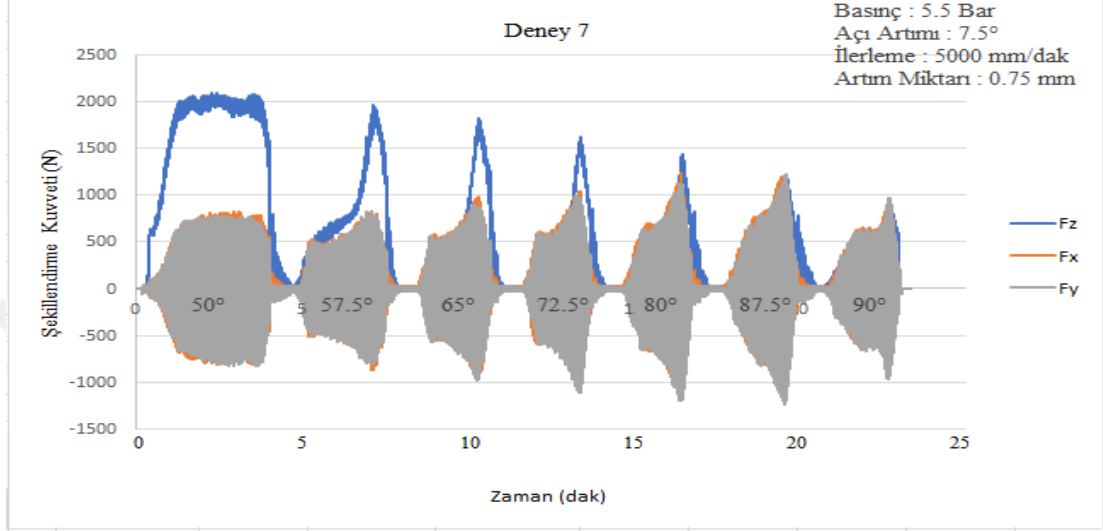
Şekil 4.8 : Deney 5'e ait kuvvet grafiği.

Deney 5'in kuvvet grafiği incelendiğinde açı artımı $7,5^\circ$ olduğundan 7 farklı kuvvet yoğunluğu oluşmuştur. İlk şekillendirme açısında kuvvet değeri 2000 N'in üzerine çıktığı görülmektedir. Deney yaklaşık 40 dakika sürmüştür. Deney 6'nın kuvvet grafiği Şekil 4.9'da verilmiştir.



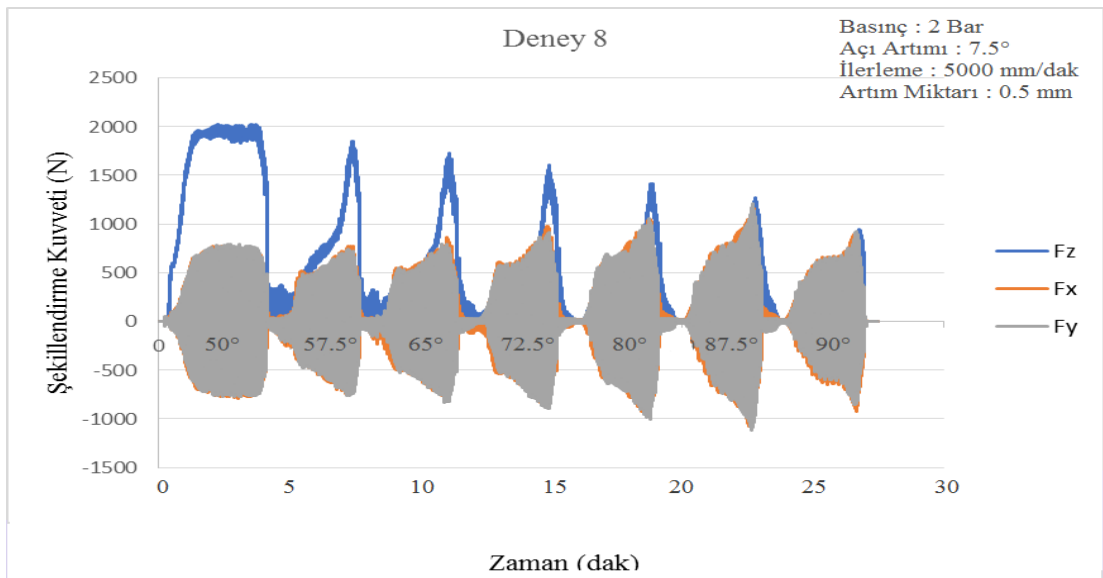
Şekil 4.9 : Deney 6'ya ait kuvvet grafiği.

Deney 6'in kuvvet grafiği incelendiğinde açı artımı $7,5^\circ$ olduğundan 7 farklı kuvvet yoğunluğu oluğuğu görülmektedir. İlk Şekillendirme açısında kuvvet değerı 2000 N'in üzerine ıktığı görülmektedir. Bilinmeyen etkiler nedeniyle son açı Şekillendirilirken X ekseninde Y eksenine göre arttığı görülmektedir. Deney yaklaşık 40 dakika sürmüştür. Deney 7'nin kuvvet grafiği Şekil 4.10'da verilmiştir.



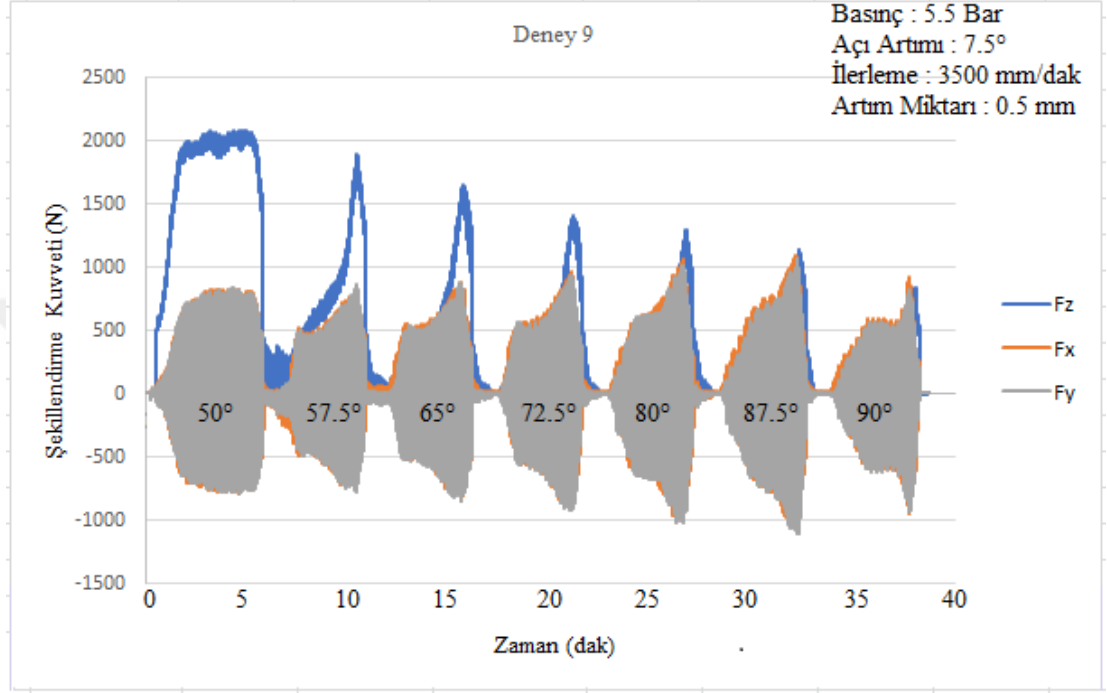
Şekil 4.10 : Deney 7'ye ait kuvvet grafiği.

Deney 7'in kuvvet grafiği incelendiğinde açı artımı $7,5^\circ$ olduğundan 7 farklı kuvvet yoğunluğu oluğuğu görülmektedir. İlk Şekillendirme açısında kuvvet değerı 2000 N'in üzerine ıktığı ve dalgalanmaların olduğu görülmektedir. Deney yaklaşık 25 dakika sürmüştür. Deney 8'in kuvvet grafiği Şekil 4.11'de verilmiştir.



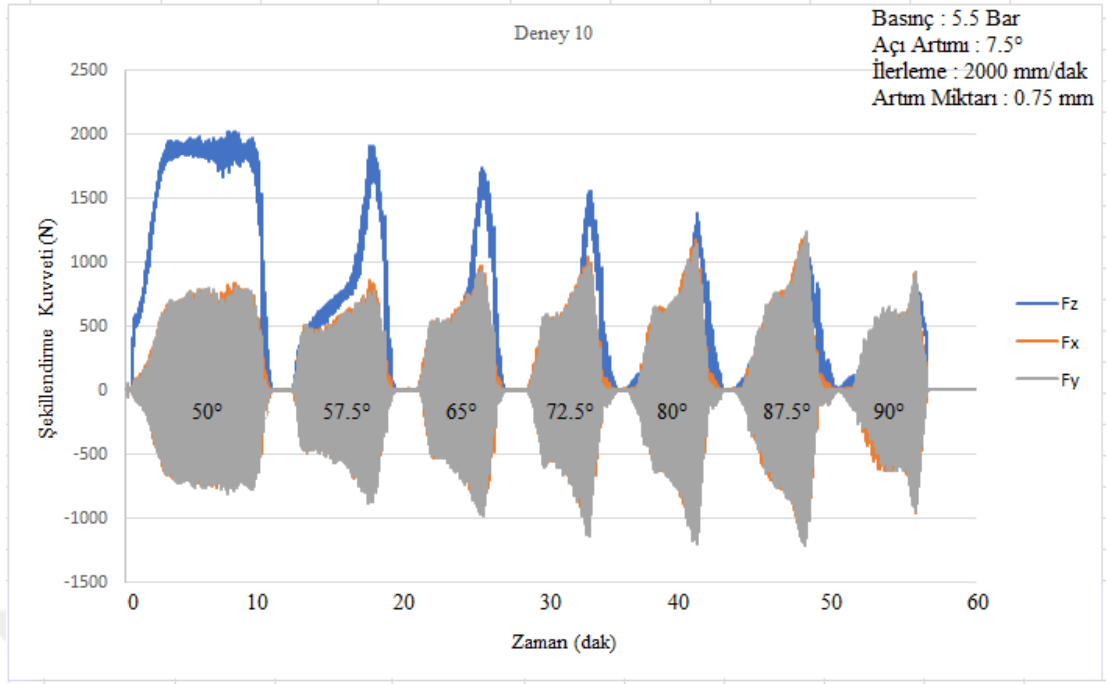
Şekil 4.11 : Deney 8'e ait kuvvet grafiği.

Deney 8'in kuvvet grafiği incelendiğinde açı artımı $7,5^\circ$ olduğundan 7 farklı kuvvet yoğunluğu oluğuğu görülmektedir. İlk Şekillendirme açısında kuvvet değeri 2500 N'a yaklağığı görülmektedir. Deney yaklağık 30 dakika sürmüştür. Son açı Şekillenirken X ekseninde Y eksenine göre daha fazla kuvvet uygulandığı görülmektedir. Deney 9'un kuvvet grafiği Şekil 4.12'de verilmiştir.



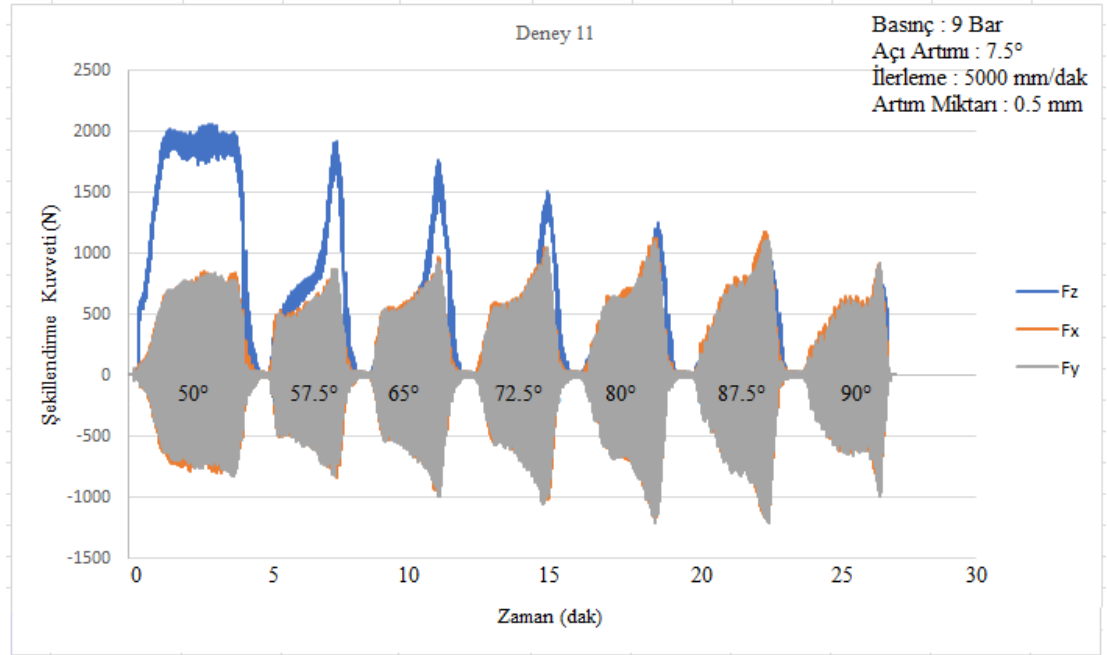
Şekil 4.12 : Deney 9'a ait kuvvet grafiği.

Deney 9'un kuvvet grafiği incelendiğinde açı artımı $7,5^\circ$ olduğundan 7 farklı kuvvet yoğunluğu oluğuğu görülmektedir. İlk Şekillendirme açısında kuvvet değeri 2000 N'ın üzerine ıktığı görülmektedir. Deneyin yaklağık 40 dakika sürdüğü görülmektedir. Deney 10'un kuvvet grafiği Şekil 4.13'te verilmiştir.



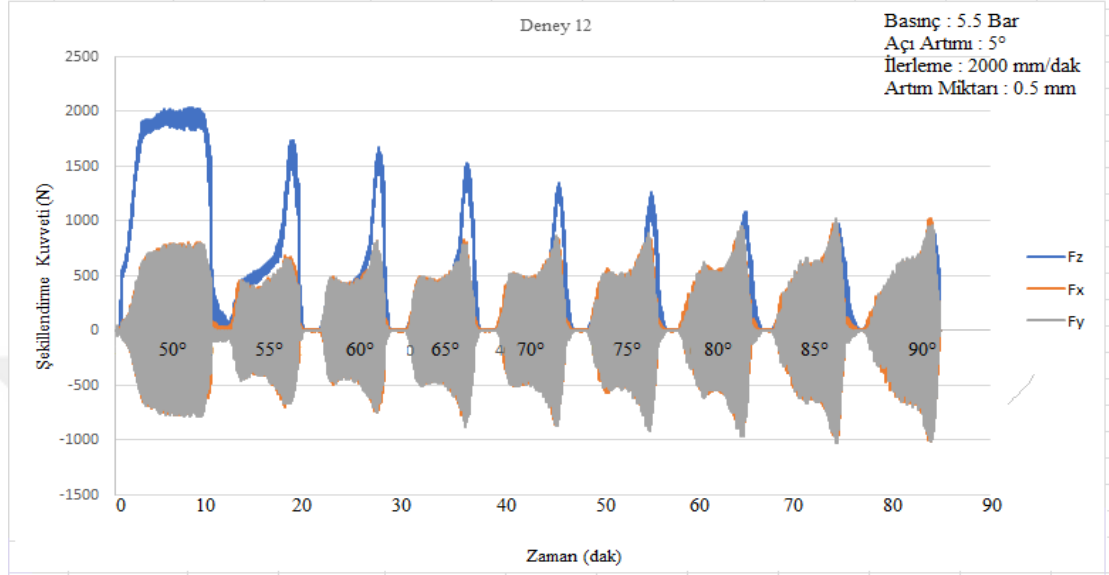
Şekil 4.13 : Deney 10'a ait kuvvet grafiği.

Deney 10'un kuvvet grafiği incelendiğinde açı artımı $7,5^\circ$ olduğundan 7 farklı kuvvet yoğunluğu oluştuğu görülmektedir. İlk şekillendirme aşısında kuvvet değeri 2000 N'in üzerine çıktığı ve dalgalanmaların oluştuğu görülmektedir. Deney yaklaşık 60 dakika sürmüştür. Deney 11'in kuvvet grafiği Şekil 4.14'te verilmiştir.



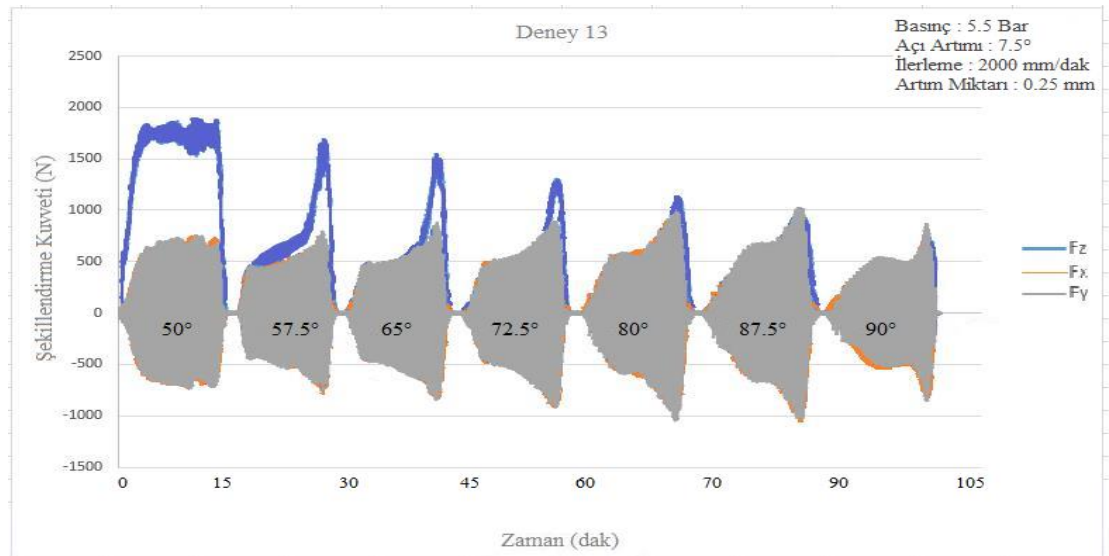
Şekil 4.14 : Deney 11'e ait kuvvet grafiği.

Deney 11'in kuvvet grafiği incelendiğinde açı artımı 7,5° olduğundan 7 farklı kuvvet yoğunluğu oluğuğu görülmektedir. İlk Şekillendirme açısında kuvvet değerı 2000 N'in üzerine belirli bölgelerde yoğunlaşarak ıktığı görülmektedir. Deney yaklaşık 30 dakika sürmüştür. Deney 12'nin kuvvet grafiği Şekil 4.15'te verilmiştir.



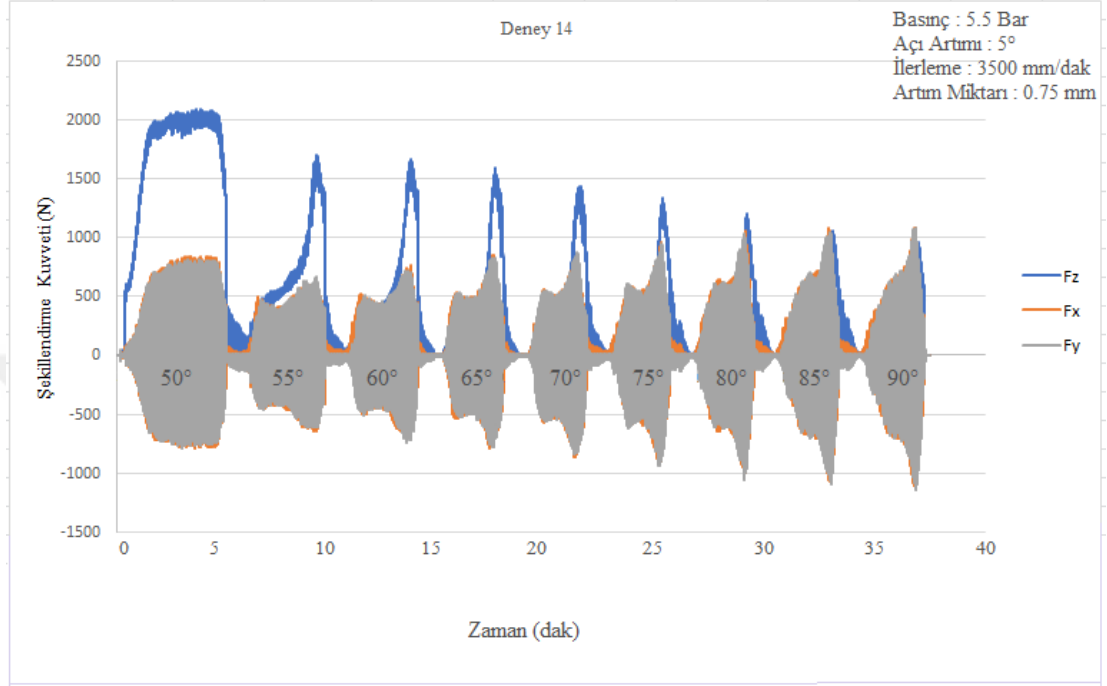
Şekil 4.15 : Deney 12'ye ait kuvvet grafiği.

Deney 12'in kuvvet grafiği incelendiğinde açı artımı 5° olduğundan 9 farklı kuvvet yoğunluğu oluğuğu görülmektedir. İlk Şekillendirme açısında kuvvet değerı 2000 N'in üzerine belirli bölgelerde yoğunlaşarak ıktığı görülmektedir. Deneyin yaklaşık 85 dakika srdğu görülmektedir. Deney 13'n kuvvet grafiği Şekil 4.16'da verilmiştir.



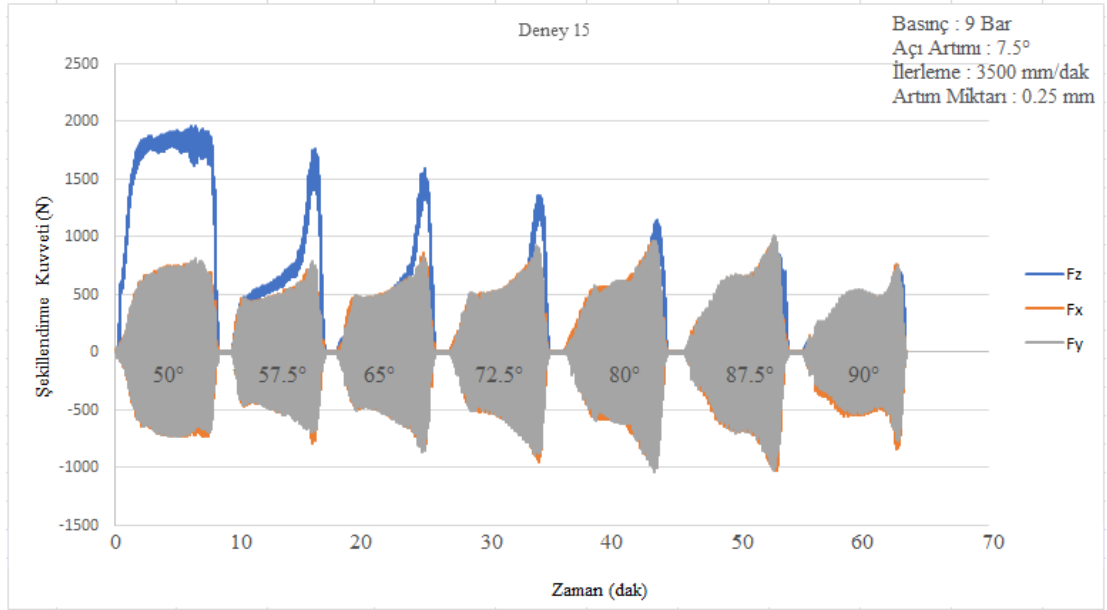
Şekil 4.16 : Deney 13'e ait kuvvet grafiği

Deney 13'ün kuvvet grafiği incelendiğinde açı artımı $7,5^\circ$ olduğundan 7 farklı kuvvet yoğunluğu oluştuğu görülmektedir. İlk şekillendirme açısında kuvvet değeri 2000 N'in altında kaldığı görülmektedir. Deneyin yaklaşık 105 dakika sürdüğü görülmektedir. Deney 14'ün kuvvet grafiği Şekil 4.17'de verilmiştir.



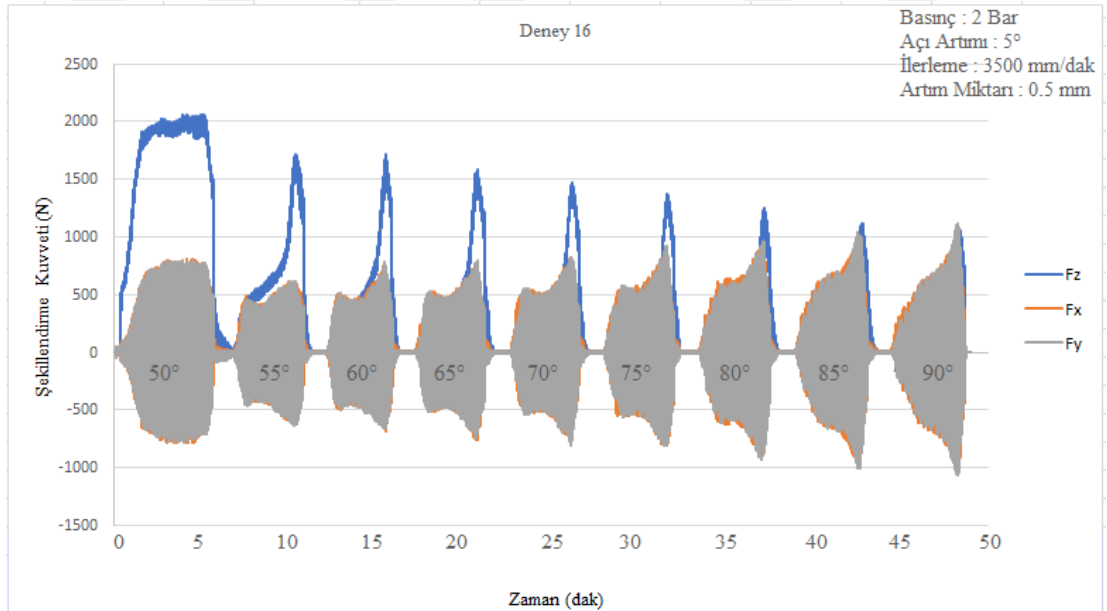
Şekil 4.17 : Deney 14'e ait kuvvet grafiği.

Deney 14'ün kuvvet grafiği incelendiğinde açı artımı 5° olduğundan 9 farklı kuvvet yoğunluğu oluştuğu görülmektedir. İlk şekillendirme açısında kuvvet değeri 2000 N'in üzerine belirli bölgelerde yoğunlaşarak çıktığı görülmektedir. Deney yaklaşık 45 dakika sürmüştür. Deney 15'in kuvvet grafiği Şekil 4.18'de verilmiştir.



Şekil 4.18 : Deney 15'e ait kuvvet grafiği.

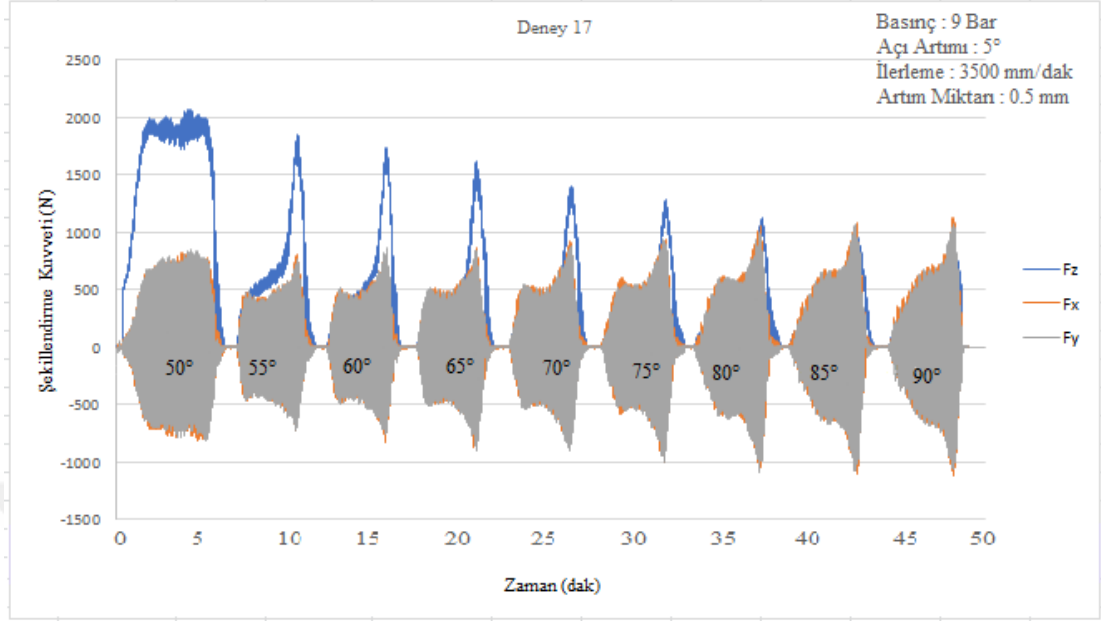
Deney 15'in kuvvet grafiği incelendiğinde açı artımı $7,5^\circ$ olduğundan 7 farklı kuvvet yoğunluğu oluştuğu görülmektedir. İlk şekillendirme açısında kuvvet değeri 2000 N'in altında kaldığı görülmektedir. Deney yaklaşık 65 dakika sürmüştür. Deney 16'nın kuvvet grafiği Şekil 4.19'da verilmiştir.



Şekil 4.19 : Deney 16'ya ait kuvvet grafiği.

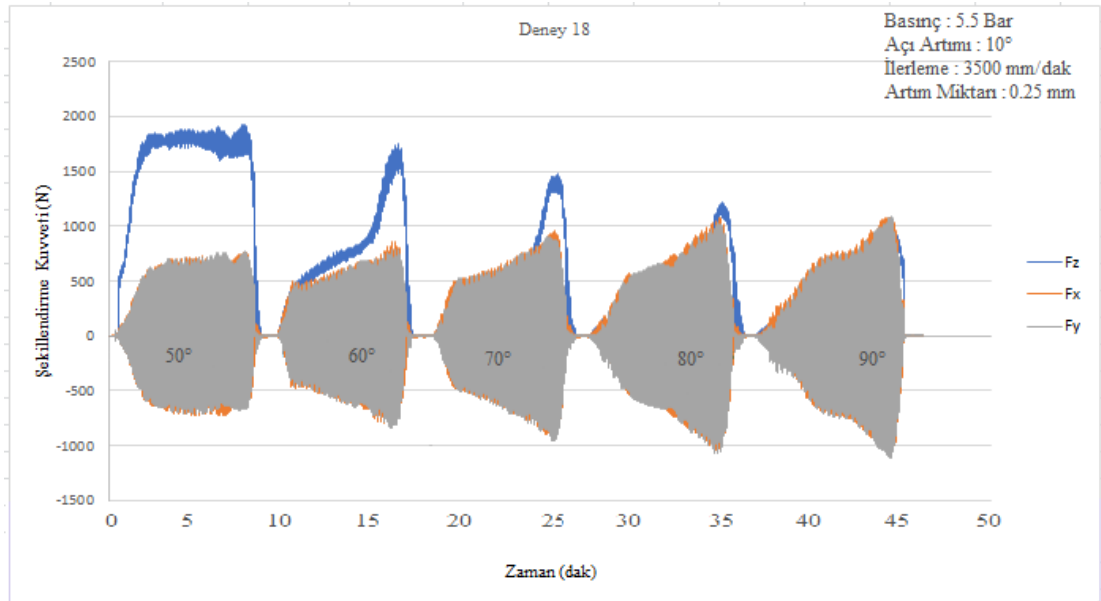
Deney 16'nın kuvvet grafiği incelendiğinde açı artımı 5° olduğundan 9 farklı kuvvet yoğunluğu oluştuğu görülmektedir. İlk şekillendirme açısında kuvvet değeri 2000

N'in üstüne çıktığı görülmektedir. Deney yaklaşık 50 dakika sürmüştür. Deney 17'nin kuvvet grafiği Şekil 4.20'de verilmiştir.



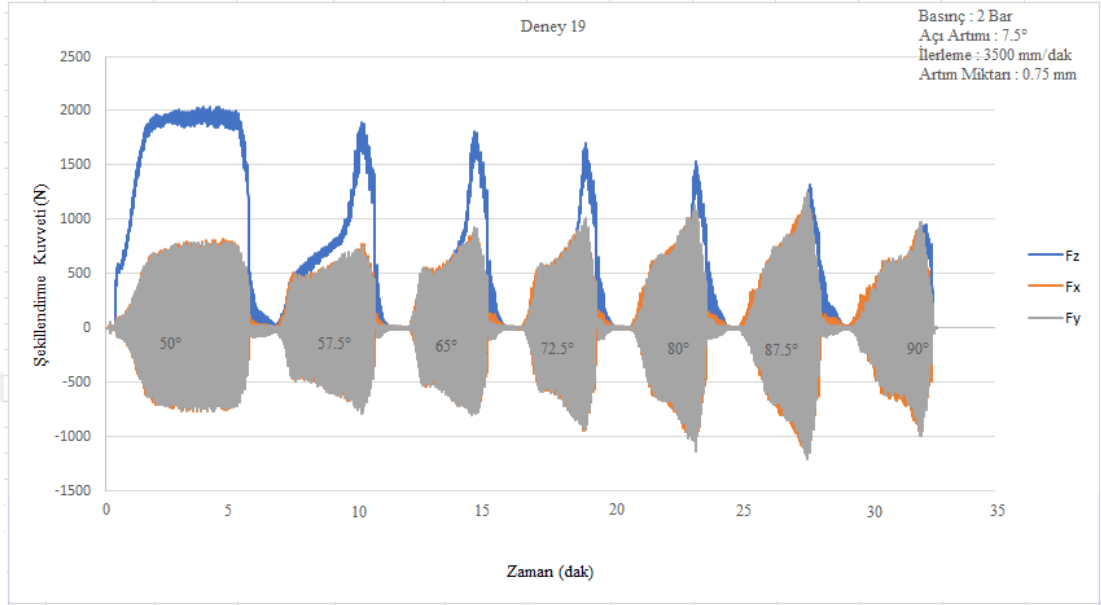
Şekil 4.20 : Deney 17'ye ait kuvvet grafiği.

Deney 17'nin kuvvet grafiği incelendiğinde açı artımı 5° olduğundan 9 farklı kuvvet yoğunluğu oluştuğu görülmektedir. İlk şekillendirme açısında kuvvet değeri 2000 N'in üstüne çıktığı görülmektedir. Deney yaklaşık 50 dakika sürmüştür. Deney 18'in kuvvet grafiği Şekil 4.21'de verilmiştir.



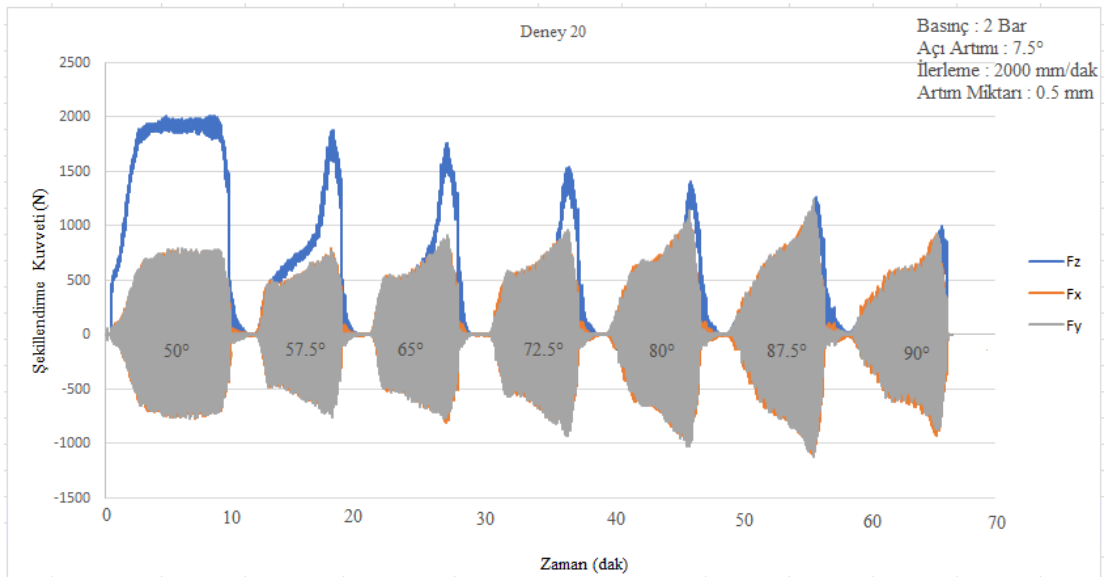
Şekil 4.21 : Deney 18'e ait kuvvet grafiği.

Deney 18'in kuvvet grafiği incelendiğinde açı artımı 10° olduğundan 5 farklı kuvvet yoğunluğu oluğuğu görülmektedir. İlk Şekillendirme açısında kuvvet değeri 2000 N'in altında kaldığı ve dalgalanma meydana geldiği görülmektedir. Deney yaklaşık 50 dakika sürmüştür. Deney 19'un kuvvet grafiği Şekil 4.22'de verilmiştir.



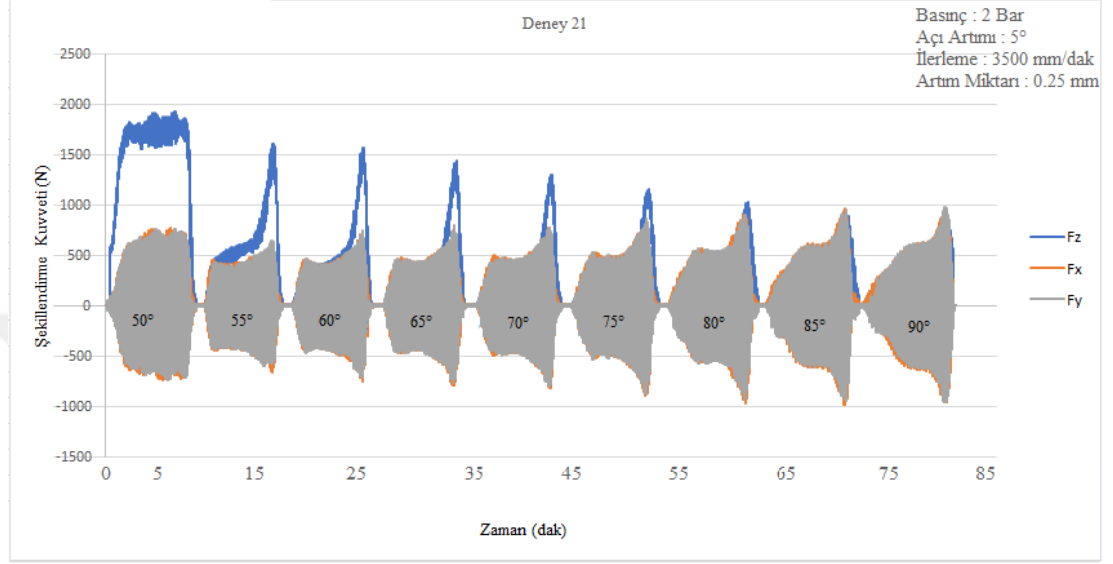
Şekil 4.22 : Deney 19'a ait kuvvet grafiği.

Deney 19'un kuvvet grafiği incelendiğinde açı artımı $7,5^{\circ}$ olduğundan 7 farklı kuvvet yoğunluğu oluğuğu görülmektedir. İlk Şekillendirme açısında kuvvet değeri 2000 N dolaylarında seyretmektedir. Deney yaklaşık 35 dakika sürmüştür. Deney 20'nin kuvvet grafiği Şekil 4.23'te verilmiştir.



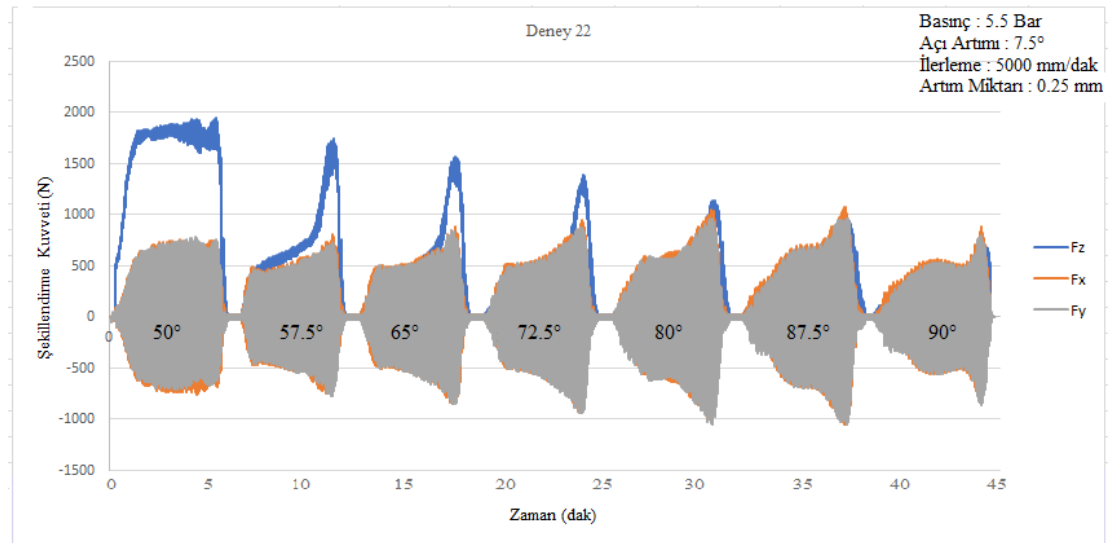
Şekil 4.23 : Deney 20'ye ait kuvvet grafiği.

Deney 20'nin kuvvet grafiği incelendiğinde açı artımı $7,5^\circ$ olduğundan 7 farklı kuvvet yoğunluğu oluğuğu görülmektedir. İlk Şekillendirme açısında kuvvet değerı 2000 N dolaylarında seyretmektedir ve Şekillendirmenin sonlarında kuvvet dalgalanması meydana geldiği görülmektedir. Deney yaklağık 70 dakika sürmüştür. Deney 21'in kuvvet grafiği Şekil 4.24'te verilmiştir.



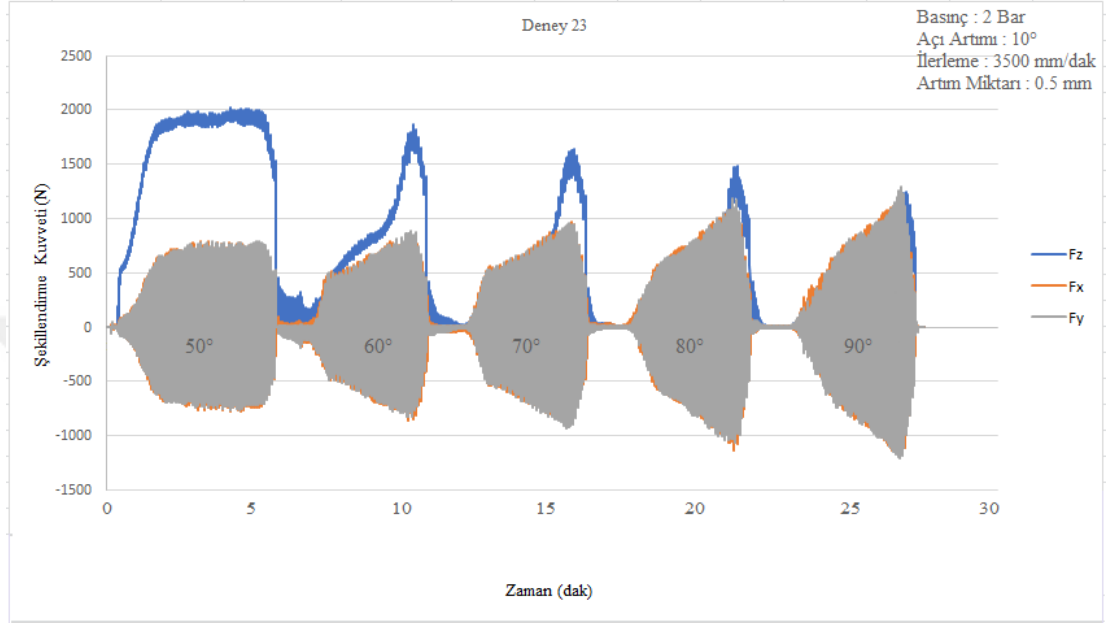
Şekil 4.24 : Deney 21'e ait kuvvet grafiği.

Deney 21'in kuvvet grafiği incelendiğinde açı artımı 5° olduğundan 9 farklı kuvvet yoğunluğu oluğuğu görülmektedir. İlk Şekillendirme açısında kuvvet değerı 2000 N altında kaldığı ve kuvvet dalgalanması meydana geldiği görülmektedir. Deney yaklağık 80 dakika sürmüştür. Deney 22'nin kuvvet grafiği Şekil 4.25'te verilmiştir.



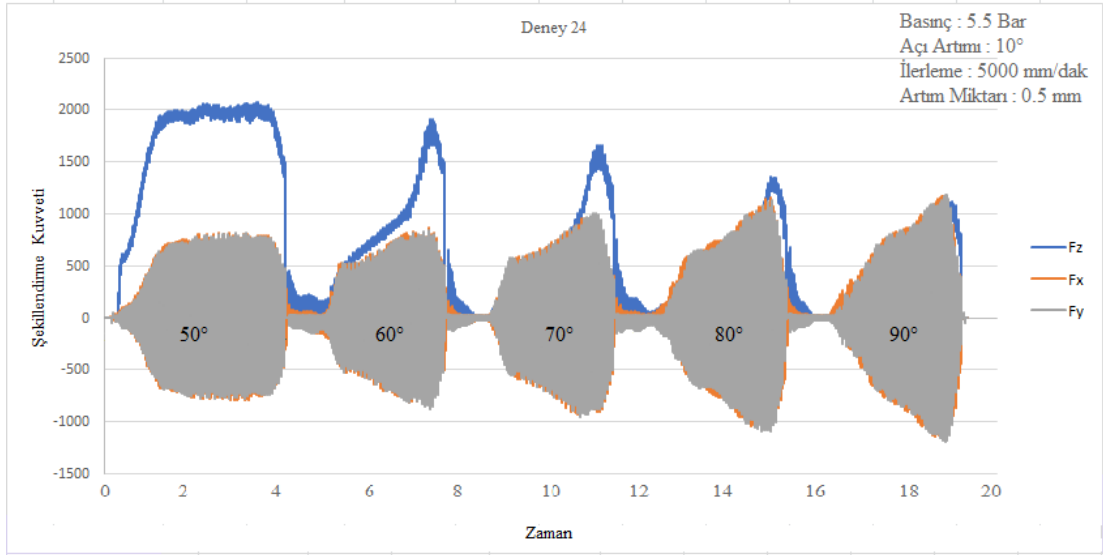
Şekil 4.25 : Deney 22'ye ait kuvvet grafiği.

Deney 22'nin kuvvet grafiği incelendiğinde açı artımı $7,5^\circ$ olduğundan 7 farklı kuvvet yoğunluğu oluğuğu görülmektedir. İlk Şekillendirme açısında kuvvet değerı 2000 N altında kaldığı ve kuvvet dalgalanması meydana geldiği görülmektedir. Deney yaklaşık 45 dakika sürmüştür. Deney 23'n kuvvet grafiği Şekil 4.26'da verilmiştir.



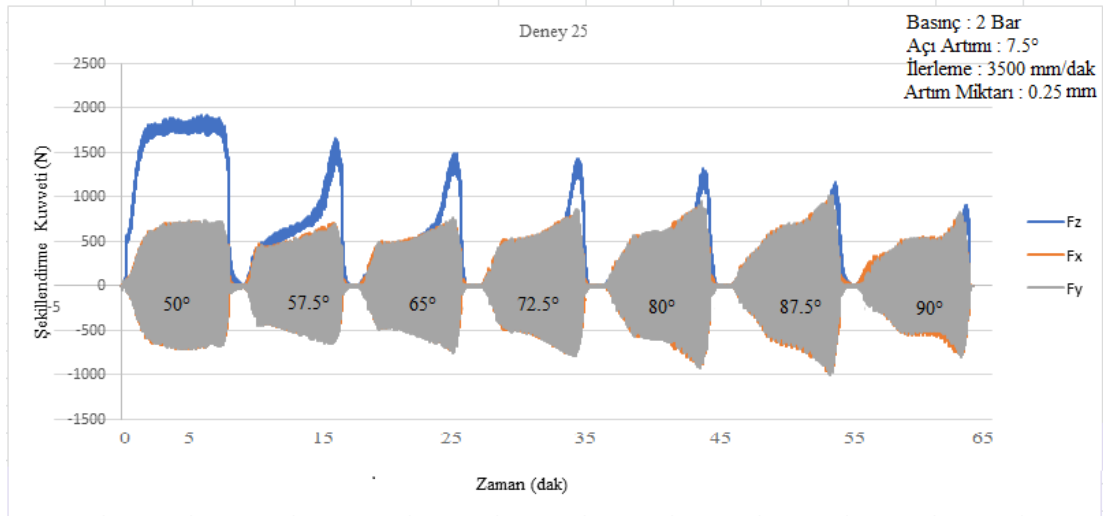
Şekil 4.26 : Deney 23'e ait kuvvet grafiği.

Deney 23'n kuvvet grafiği incelendiğinde açı artımı 10° olduğundan 5 farklı kuvvet yoğunluğu oluğuğu görülmektedir. İlk Şekillendirme açısında kuvvet değerı 2000 N dolaylarında seyretmektedir. Deney yaklaşık 30 dakika sürmüştür. Deney 24'n kuvvet grafiği Şekil 4.27'de verilmiştir.



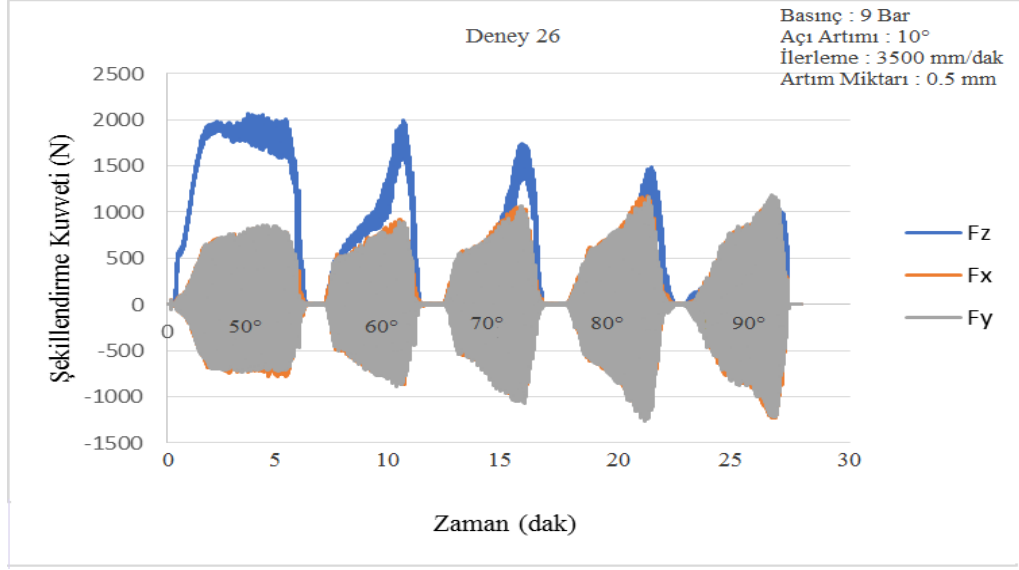
Şekil 4.27 : Deney 24'e ait kuvvet grafiği.

Deney 24'ün kuvvet grafiği incelendiğinde açı artımı 10° olduğundan 5 farklı kuvvet yoğunluğu oluştuğu görülmektedir. İlk şekillendirme açısında kuvvet değeri 2000 N üzerine çıktığı görülmektedir. Deney yaklaşık 20 dakika sürmüştür. Deney 25'in kuvvet grafiği Şekil 4.28'de verilmiştir.



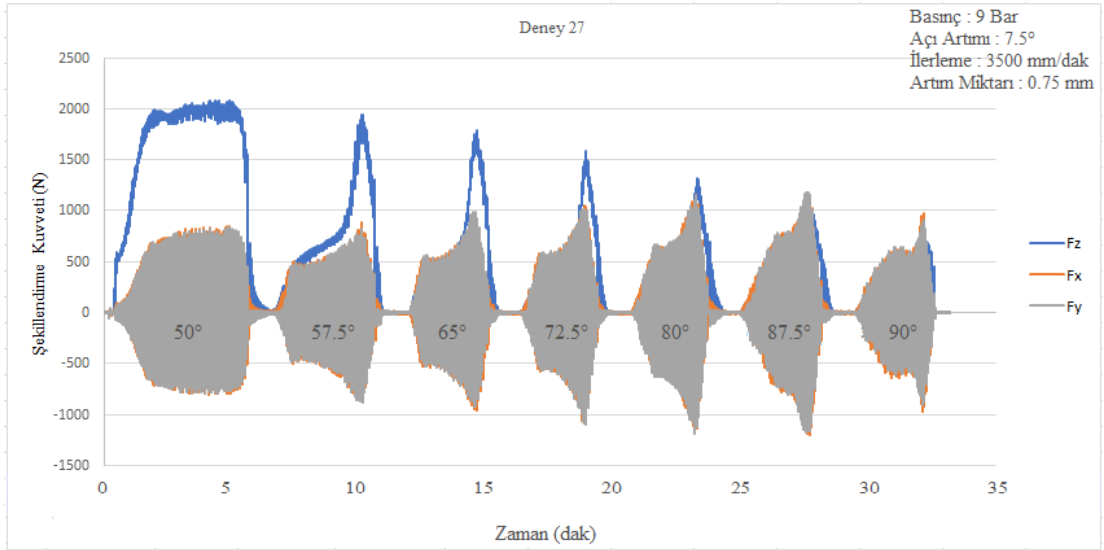
Şekil 4.28 : Deney 25'e ait kuvvet grafiği.

Deney 25'in kuvvet grafiği incelendiğinde açı artımı $7,5^\circ$ olduğundan 7 farklı kuvvet yoğunluğu oluştuğu görülmektedir. İlk şekillendirme açısında kuvvet değeri 2000 N altında kaldığı ve hafif dalgalanmalar görülmektedir. Deney yaklaşık 65 dakika sürmüştür. Deney 26'nın kuvvet grafiği Şekil 4.29'da verilmiştir.



Şekil 4.29 : Deney 26'ya ait kuvvet grafiği.

Deney 26'nın kuvvet grafiği incelendiğinde açı artımı 10° olduğundan 5 farklı kuvvet yoğunluğu oluştuğu görülmektedir. İlk şekillendirme açısında kuvvet değeri 2000 N dolaylarında seyretmektedir ve hafif dalgalanmalar görülmektedir. Deney yaklaşık 30 dakika sürmüştür. Deney 27'nin kuvvet grafiği Şekil 4.30'da verilmiştir.



Şekil 4.30 : Deney 27'ye ait kuvvet grafiği.

Deney 27'nin kuvvet grafiği incelendiğinde açı artımı $7,5^\circ$ olduğundan 7 farklı kuvvet yoğunluğu oluştuğu görülmektedir. İlk şekillendirme açısında kuvvet değeri 2000 N'un üzerine çıktığı görülmektedir. Deney yaklaşık 35 dakika sürmüştür. 90° şekillendirilirken X ve Y eksenlerindeki kuvvetin önceki açılara kıyasla düştüğü görülmektedir. Bunun nedeni $7,5^\circ$ açı artımı için 90° dereceden bir önceki açı

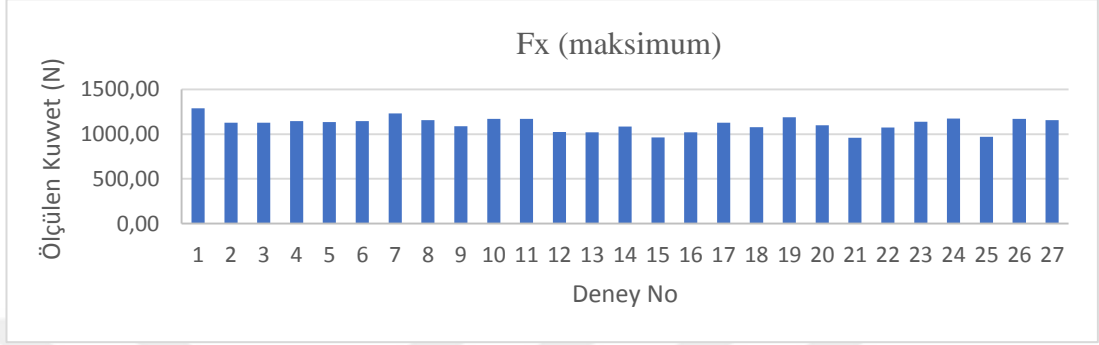
87,5°'dir. 90°'ye şekillendirirken açı artımı 2,5° olduğu için ihtiyaç duyulan kuvvet azalmıştır. Bu durum tüm 7,5° açı artımına sahip olan deneylerde görülmüştür. Kuvvet grafikleri incelendiğinde tüm deneylerde kuvvetin artış ve azalış yönlerinin aynı olduğu görülmektedir. X, Y ve Z eksenlerinde oluşan kuvvetlerin maksimum değerleri Tablo 4.5'te verilmiştir.

Tablo 4.5 : Şekillendirme kuvveti maksimum değerleri.

Deney No	Deney Parametreleri				Şekillendirme Kuvvetleri		
	Basınç (bar)	Açı Artımı (°)	İlerleme (mm/dak)	Artım Miktarı (mm)	Maksimum Fx (N)	Maksimum Fy (N)	Maksimum Fz (N)
1	5.5	10	3500	0.75	1288.87	1299.24	2065.56
2	5.5	5	5000	0.5	1127.72	1064.20	2066.22
3	9	7.5	2000	0.5	1128.37	1135.49	2049.22
4	5.5	10	2000	0.5	1143.32	1163.81	2049.88
5	5.5	7.5	3500	0.5	1132.59	1138.09	2069.16
6	5.5	7.5	3500	0.5	1144.29	1157.30	2034.52
7	5.5	7.5	5000	0.75	1232.01	1225.34	2088.44
8	2	7.5	5000	0.5	1155.34	1204.18	2025.36
9	5.5	7.5	3500	0.5	1086.13	1065.82	2076.35
10	5.5	7.5	2000	0.75	1171.26	1229.90	2016.87
11	9	7.5	5000	0.5	1170.28	1107.82	2055.43
12	5.5	5	2000	0.5	1024.40	1020.57	2034.84
13	5.5	7.5	2000	0.25	1018.23	1016.99	1888.75
14	5.5	5	3500	0.75	1082.56	1075.92	2090.40
15	9	7.5	3500	0.25	962.02	1005.27	1963.27
16	2	5	3500	0.5	1019.85	1112.70	2064.26
17	9	5	3500	0.5	1126.42	1069.40	2069.81
18	5.5	10	3500	0.25	1077.04	1086.01	1931.56
19	2	7.5	3500	0.75	1188.80	1251.38	2036.80
20	2	7.5	2000	0.5	1098.15	1242.59	2010.33
21	5.5	5	3500	0.25	959.10	972.72	1921.43
22	5.5	7.5	5000	0.25	1073.46	962.30	1941.70
23	2	10	3500	0.5	1136.49	1297.61	2019.81
24	5.5	10	5000	0.5	1172.88	1181.72	2068.83
25	2	7.5	3500	0.25	968.52	1015.36	1914.90
26	9	10	3500	0.5	1172.58	1181.39	2069.81
27	9	7.5	3500	0.75	1156.96	1182.69	2080.27
Fz. Opt.	2	10	2000	0.25	998.41	1121.81	1875.02

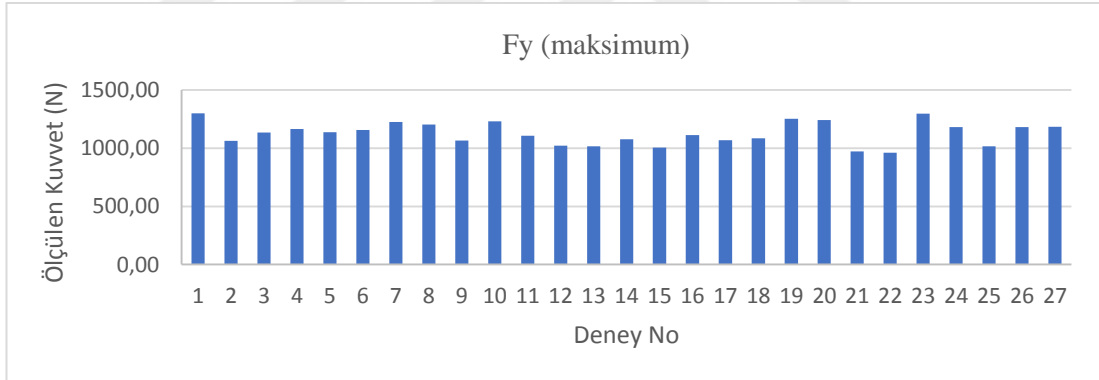
Tablo incelendiğinde Z ekseninde en büyük şekillendirme kuvveti, sıkma basıncının 5,5 bar, açı artımının 5°, ilerleme hızının 3500 mm/dak ve artım miktarının 0,75 mm olduğu 14. deneyde meydana gelmiştir. Oluşan şekillendirme kuvvetinin değeri

2090,40 N'dur. Z ekseninde oluşan en düşük şekillendirme kuvveti 1888,75 N olan 13. deneyde meydana gelmiştir. Bu deneyde sıkma basınç 5,5 bar, açı artımı 7,5°, ilerleme 2000 mm/dak ve artım miktarı 0,25 mm'dir. Şekillendirme kuvvetlerinin dağılım grafikleri oluşturulmuştur. X ekseninde oluşan kuvvet dağılımları Şekil 4.31'de verilmiştir.



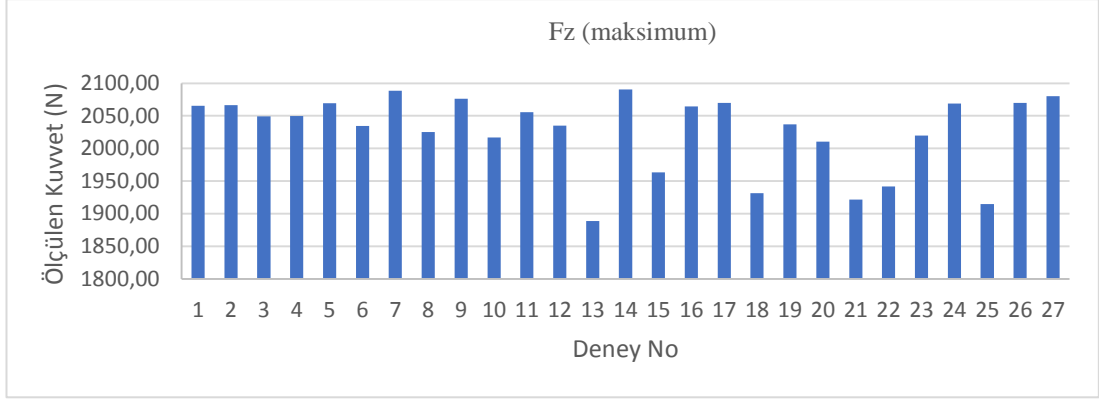
Şekil 4.31 : X ekseninde oluşan şekillendirme kuvvetleri dağılımları.

Şekil incelendiğinde Fx aralığı 950 N ile 1300 N olduğu görülmektedir. Y ekseninde oluşan kuvvet dağılımları Şekil 4.32'de verilmiştir.



Şekil 4.32 : Y ekseninde oluşan şekillendirme kuvvetleri dağılımları.

Şekil incelendiğinde Fy aralığının da 950 N ile 1300 N olduğu görülmektedir. Fx ile Fy değerlerinin çok yakın olmaları parçanın aksel simetrik olmasının sonucudur. Z ekseninde oluşan kuvvet dağılımları Şekil 4.33'te verilmiştir.



Şekil 4.33 : Z ekseninde oluşan şekillendirme kuvvetleri dağılımları.

Z eksenini için elde edilen değerler incelendiğinde kuvvet aralıklarının 1888,75 N ile 2090,40 N aralığında olduğu görülmektedir. Deney parametrelerinin şekillendirme kuvvetine etkisini incelemek için varyans analizi yapılmıştır. Analizde Z eksenine ait sonuçlar Tablo 4.6’da verilmiştir.

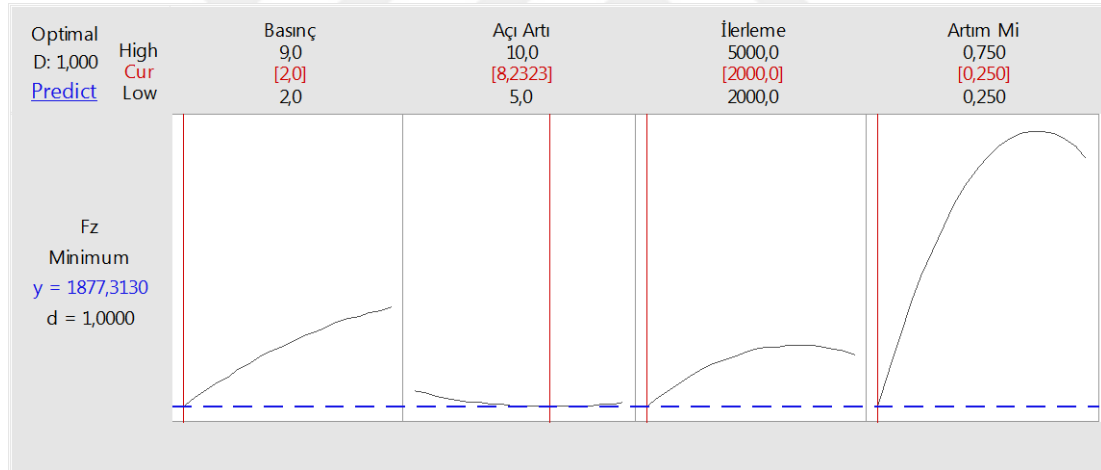
Tablo 4.6 : Şekillendirme kuvveti varyans analizi.

Kaynak	SD	Etki	KT	KO	F	P
Model	14	95.69%	86500.6	6178.6	19.02	0.000005
Doğrusal		69.51%				
Basınç	1	4.32%	3901	3901	12.01	0.004668
Açı Artımı	1	0.16%	143.6	143.6	0.44	0.518712
İlerleme	1	3.54%	3204.5	3204.5	9.87	0,008515
Artım Miktarı	1	61.49%	55589.7	55589.7	171.15	0
Kare		25.12%				
Basınç*Basınç	1	0.36%	255.2	255.2	0.79	0.392776
Açı Artımı*Açı Artımı	1	3.83%	119.1	119.1	0.37	0.556106
İlerleme*İlerleme	1	0.16%	1175.1	1175.1	3.62	0.081428
Artım Miktarı*Artım Miktarı	1	20.77%	18775.6	18775.6	57.81	0.000006
2’li Etkileşim		1.05%				
Basınç*Açı Artımı	1	0.55%	493.9	493.9	1.52	0.241118
Basınç*İlerleme	1	0.02%	19.5	19.5	0.06	0.81073
Basınç*Artım Miktarı	1	0.01%	6	6	0.02	0.894066
Açı Artımı*İlerleme	1	0.04%	38,6	38.6	0.12	0.736384
Açı Artımı*Artım Miktarı	1	0.34%	305.7	305.7	0.94	0.351084
İlerleme*Artım Miktarı	1	0.10%	86.8	86.8	0.27	0.614654
Hata	12	4.31%	3897.5	324.8		
Total	26	100.00%				

(SD= Serbestlik Derecesi, KT= Düzeltilmiş Kareler Toplamı, KO= Düzeltilmiş Kareler Ortalaması)

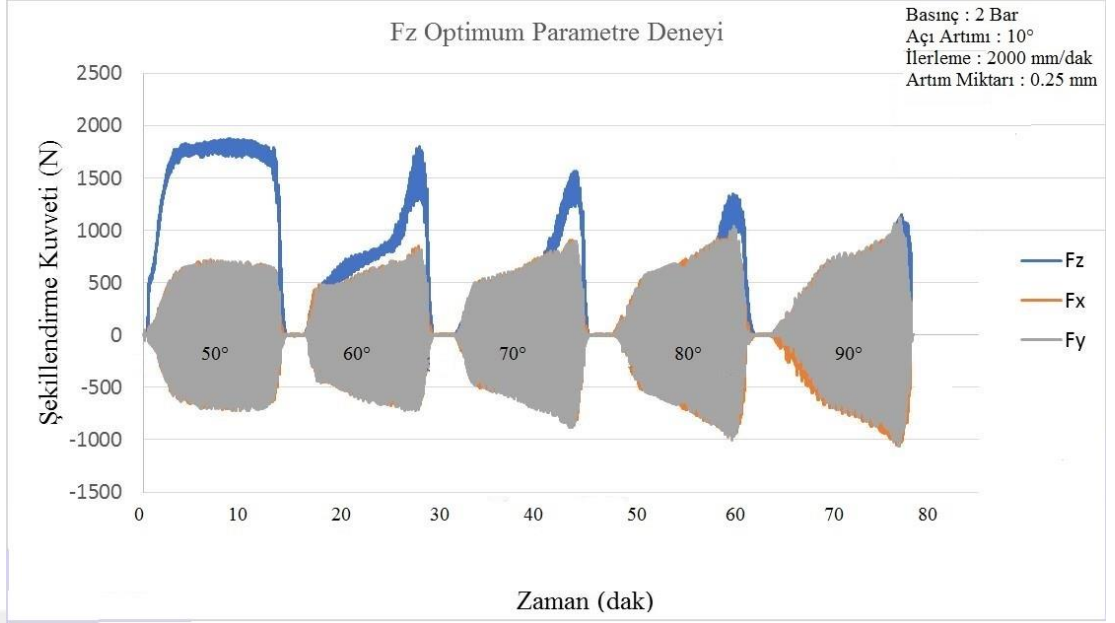
Analiz sonuçları incelendiğinde, parametrelerin şekillendirme kuvvetine doğrudan etki oranları %69,51'dir ($P < 0,01$). Bunlardan en fazla etkiye sahip olan parametre ise %61,49 ile artım miktarıdır. İkinci en fazla etkiye sahip parametre %4,32 ile sıkma basıncıdır ($P < 0,01$). İlerleme hızının etkisi %3,54 son olarak açı artımının etkisi ise %0,16'dır. Artım miktarının etkisi diğer parametrelere göre çok daha fazla olduğu görülmektedir. En az etkiye sahip olan parametre açı artımıdır. Bunun nedeni en yüksek gerilme kuvveti ilk şekillendirme esnasında oluştuğundan ve tüm deneyler ilk olarak 50° açığa şekillendirilmesidir. Sonraki açı artımlı şekillendirmelerde oluşan maksimum kuvvet, ilk şekillendirmeye göre daha düşük olmuştur. Parametrelerin ikili etkileşimleri şekillendirme kuvvetine etkileri yönünden önemsizdir. Analizin güven oranı %95,69'dur.

En düşük şekillendirme kuvvetini elde edebilmek adına optimum parametre seviyeleri belirlemek için cevap yüzey analizi gerçekleştirilmiştir. Analiz sonuçları Şekil 4.34'te gösterilmiştir.



Şekil 4.34 : Şekillendirme kuvveti için optimum parametrelerin belirlenmesi.

Cevap yüzey analizi basınç değerini 2 bar, açı artımını $8,23^\circ$, ilerlemeyi 2000 mm/dak ve artım miktarını 0,25 mm olarak alındığında şekillendirme kuvveti değerinin 1877 N olarak elde edileceğini göstermektedir. Deney yapıldığında elde edilen maksimum kuvvet değeri tahmin edilen değerin yaklaşık 2 N altında olup 1875,02 N'dur (Şekil 4.34 :). Optimum parametre seviyeleriyle yapılan deneyin kuvvet dağılım grafiği Şekil 4.35'te verilmiştir.



Şekil 4.35 : Optimum parametre seviyeleri deneyi kuvvet dağılım grafiği.

Varyans analizi sonucunda, açı artımının şekillendirme kuvvetine etkisinin %0,16 ile yok denecek kadar az olduğu görülmektedir. Bu nedenle optimum parametre seviyeleriyle doğrulama deneyi yapılırken açı artımı 10° olarak baz alınmıştır. Deney süresi yaklaşık 80 dk sürmüştür. Bunun nedeni optimum parametre seviyelerinden ilerleme hızı ve artım miktarı parametrelerinin en düşük seviyede olmasıdır. Deneysel esnasında elde edilen en düşük kuvvet değeri, parametre değerleri sıkma basıncı 5,5 bar, açı artımı $7,5^\circ$, ilerleme 2000 mm/dak ve artım miktarı 0,250 mm olan deney 13'te 1888,75 N elde edilmiştir. Optimum parametre değerleriyle yapılan deney sonucuyla karşılaştırıldığında ilerleme ve artım miktarlarının aynı olduğu, açı artımının etkisinin çok az olduğu bilindiğinden yalnızca sıkma basıncını azaltarak daha düşük kuvvet ile şekillendirme yapıldığı görülmüştür. Cevap yüzey analizinin vermiş olduğu parametre değerlerinin doğruluğu ispatlanmıştır.

Şekillendirme kuvveti tahmini için ikinci dereceden regresyon denklemleri oluşturulmuştur (4.3) :

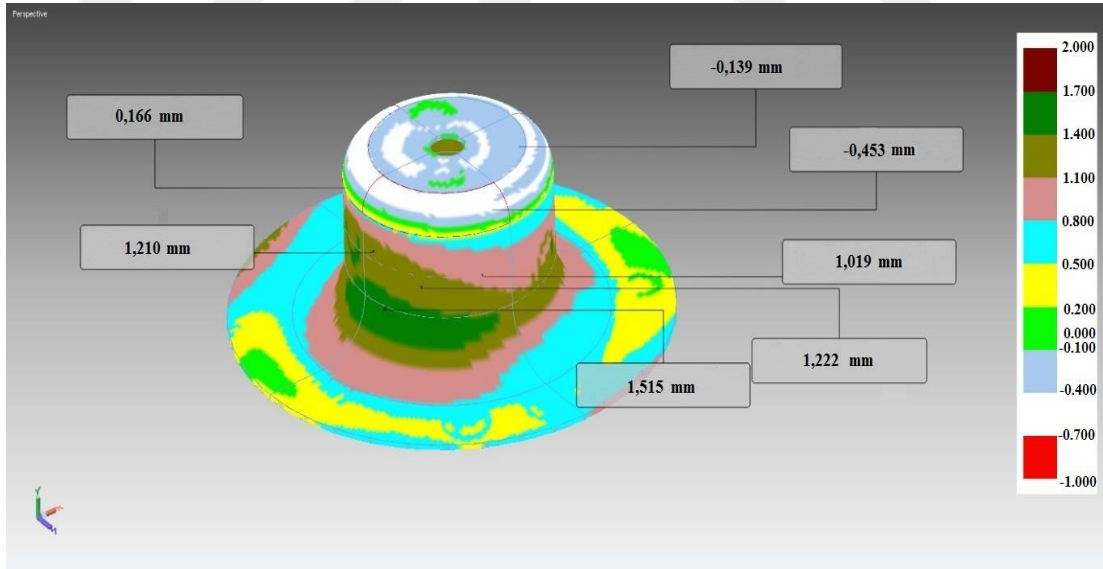
$$Fz = 1563 + 4,0 * P - 9,8 * A + 0,0594 * F + 1291 * Z - 0,565 * P * P + 0,76 * A * A - 0,000007 * F * F - 949 * Z * Z + 1,27 * P * A - 0,00042 * P * F - 1,4 * P * Z - 0,00083 * A * F - 14,0 * A * Z + 0,0124 * F * Z \quad (4.3)$$

Denklemden, Fz Z eksenindeki şekillendirme kuvvetini, P basıncı, A açı artımını, Z artım miktarını ve F ilerleme hızını belirtmektedir. etkileşimlerinin et kalınlığına etkisi denklemden görülmektedir.

4.4. Geometrik Doğruluk Analizi

Tarama işlemi ATOS marka 3D Optik tarayıcı ile gerçekleştirilmiştir. Nokta bulutu cihaza ait yazılım ile oluşturulup .stl dosyasına dönüştürülmüştür. Rapidform programı kullanılarak cad dosyası ile tarama dosyası karşılaştırılıp geometrik sapma miktarları tespit edilmiştir. Geometrik doğruluk analizi optimizasyon deney parçaları ve amortisör yay sacı parçası için gerçekleştirilmiştir.

Parametre seviyeleri sıkma basıncı 2,77 bar, açı artımı 10°, ilerleme hızı 2000 mm/dak ve artım miktarı 0,25 mm olan et kalınlığı optimizasyon deney parçasının geometrik doğruluk ölçümü Şekil 4.36'da verilmiştir.

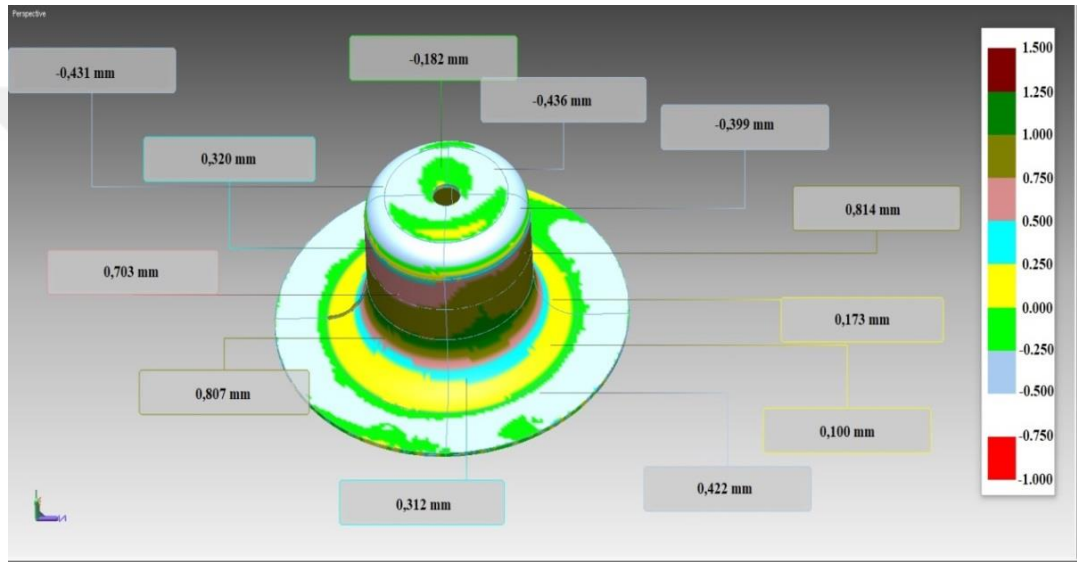


Şekil 4.36 : Et kalınlığı optimizasyon parçasının geometrik doğruluk analiz sonucu.

Ölçüm sonucu incelendiğinde, geometrik sapma miktarlarının sınırları -0,7 mm ile 1,7 mm'dir. Parçanın şekillendirilmemiş bölgesi olan üst flanş kısmında eksi yönde sapma olduğu görülmektedir. En fazla eksi yönde geometrik sapmanın görüldüğü bölüm üst radyüsün olduğu yerdir. Bu durumun nedeni bu bölgede form takımının sacı sürekli

aşağı yöne çekmesi olarak değerlendirilebilir. Gövde bölgesinde oluşan geometrik sapma 0,8 mm ile 1,4 mm aralığında değişmektedir. En fazla geometrik sapmanın koyu yeşil ile gösterilen alt radyüsün olduğu bölgelerde olduğu görülmektedir. Bu bölgelerdeki geometrik sapma miktarları 1,7 mm'ye kadar çıkabilmektedir. Flanş bölgesinde lokal olarak bir bölgede 0,8 mm ile 1,4 mm aralığında bilinmeyen etkiler nedeniyle geometrik sapma meydana geldiği görülmektedir.

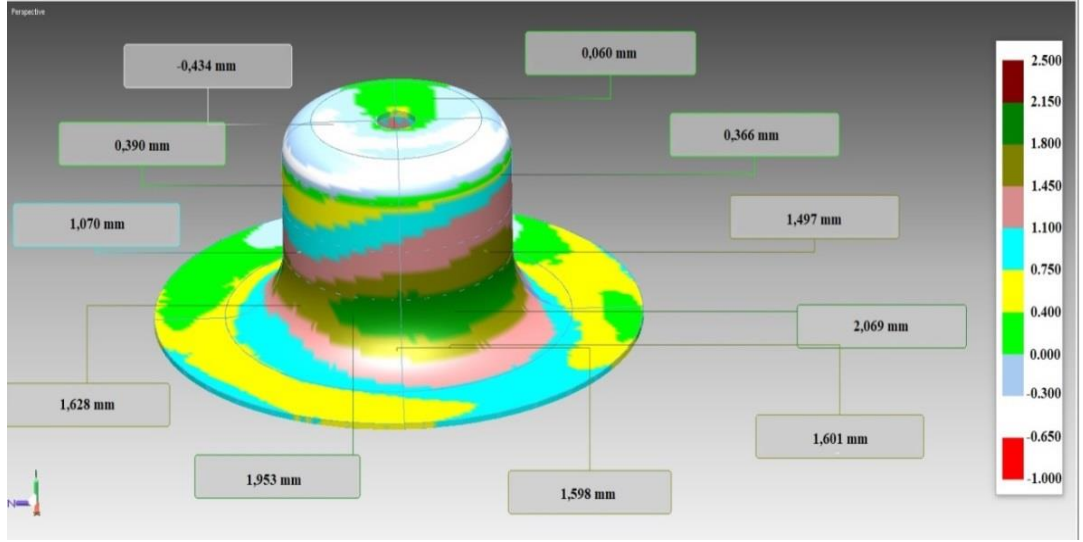
Parametre seviyeleri sıkma basıncı 9 bar, açı artımı 5°, ilerleme hızı 2000 mm/dak ve artım miktarı 0,25 mm olan yüzey pürüzlülüğü optimizasyon parçasının geometrik doğruluk analizi Şekil 4.37'de verilmiştir.



Şekil 4.37 : Yüzey pürüzlülüğü optimizasyon parçasının geometrik doğruluk analiz sonucu.

Ölçüm sonucu incelendiğinde, geometrik sapma miktarlarının sınırları -0,75 mm ile 1,25 mm'dir. Yüzey pürüzlülüğü optimizasyon parçasında olduğu gibi bu parçanın da şekillendirmemiş bölgesi olan üst flanş kısmında eksi yönde geometrik sapma olduğu görülmektedir. En fazla eksi yönde geometrik sapmanın görüldüğü bölüm üst radyüsün olduğu yerdir. Gövde bölgesinde oluşan geometrik sapma 0,5 mm ile 1 mm aralığında değişmektedir. En fazla geometrik sapmanın koyu yeşil ile gösterilen alt radyüsün olduğu bölgelerde olduğu görülmektedir. Bu bölgelerdeki geometrik sapma miktarları 1,25 mm'ye kadar çıkabilmektedir.

Parametre seviyeleri sıkma basıncı 2 bar, açı artımı 8,23°, ilerleme hızı 2000 mm/dak ve artım miktarı 0,25 mm olan şekillendirme kuvveti optimizasyon parçasının geometrik doğruluk analizi Şekil 4.38'de verilmiştir.



Şekil 4.38 : Şekillendirme kuvveti optimizasyon parçasının geometrik doğruluk analiz sonucu.

Ölçüm sonucu incelendiğinde, geometrik sapma miktarlarının sınırları -0,65 mm ile 2,15 mm'dir. Diğer parçalarda olduğu gibi bu parçanın da şekillendirilmemiş bölgesi olan üst flanş kısmında eksi yönde geometrik sapma olduğu görülmektedir. En fazla eksi yönde geometrik sapmanın görüldüğü bölüm üst radyüsün olduğu yerdir. Gövde bölgesinde oluşan geometrik sapma 0,4 mm ile 1,8 mm aralığında değişmektedir. En fazla geometrik sapmanın koyu yeşil ile gösterilen alt radyüsün olduğu bölgelerde olduğu görülmektedir. Bu bölgelerdeki geometrik sapma miktarları yaklaşık 2 mm'ye kadar çıkabilmektedir.

Tüm optimizasyon parçaları değerlendirildiğinde en fazla geometrik sapmanın şekillendirme kuvveti optimizasyon parçasında meydana geldiği söylenebilir. Sonuç olarak model ve takım yolunun, geometrik sapma oranına göre oluşturulması geometrik sapmayı azaltabileceği söylenebilir. Tüm parçalarda en fazla ve en az geometrik sapma oluşan bölgeler aynıdır.

4.5. Gri İlişkisel Analiz

Yüzey pürüzlülüğü, et kalınlığı ve şekillendirme kuvveti faktörlerinin, şekillendirmeye birbirleriyle olan etkisini araştırmak ve optimum parametre seviyelerini tüm sonuçları da dikkate alacak şekilde elde edebilmek için Gri ilişkisel analiz gerçekleştirilmiştir. Analiz bir deneyde bu üç faktör için en iyi değerleri elde edilebilecek parametre seviyeleri vermektedir. Gri ilişkisel analiz sonuçları Tablo 4.7'de verilmiştir.

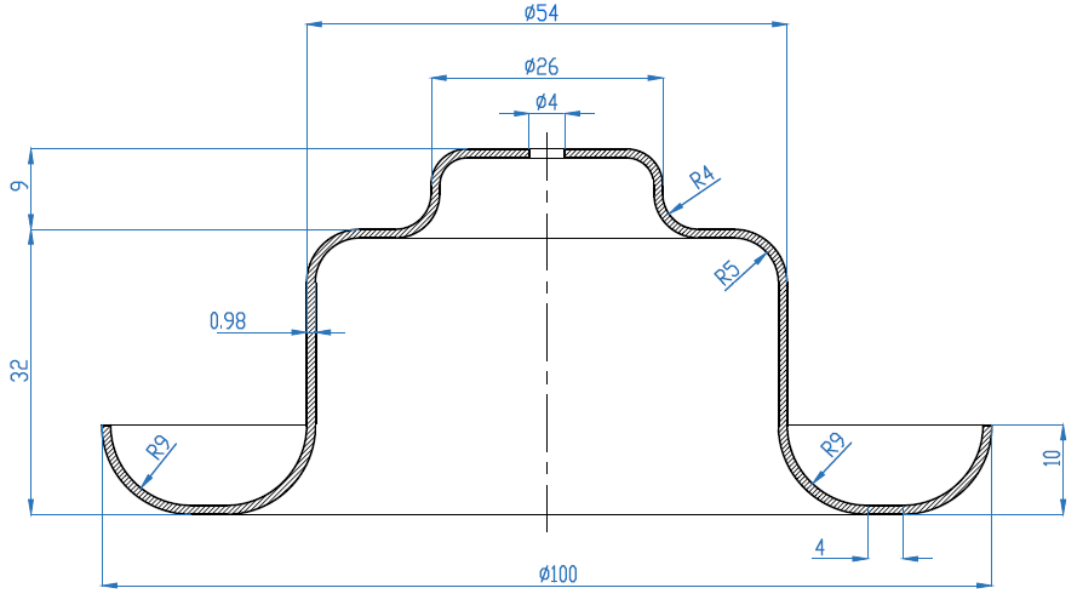
Tablo 4.7 : Gri ilişkisel analiz sonuçları.

Deneş No	Deneş Parametreleri				Deneş Sonuçları			Normalizasyon			Gri İlişki Katsayısı			Gri İlişki Derecesi	Sıra
	Basınç (bar)	Açı Artımı (°)	İlerleme Hızı (mm/dak)	Artım Miktarı (mm)	Maksimum Şekillendirme Kuvveti (Fz)	Ra	Et Kalınlığı	Maksimum Şekillendirme Kuvveti (Fz)	Ra	Et Kalınlığı	Maksimum Şekillendirme Kuvveti (Fz)	Ra	Et Kalınlığı		
1	5,5	10	3500	0,75	2065,56	0,649	0,28	0,123	0,000	0,455	0,363	0,333	0,478	0,392	25
2	5,5	5	5000	0,5	2066,21	0,579	0,3	0,120	0,244	0,636	0,362	0,398	0,579	0,446	12
3	9	7,5	2000	0,5	2049,22	0,488	0,24	0,204	0,559	0,091	0,386	0,531	0,355	0,424	17
4	5,5	10	2000	0,5	2049,87	0,566	0,32	0,201	0,289	0,818	0,385	0,413	0,733	0,510	7
5	5,5	7,5	3500	0,5	2069,15	0,552	0,3	0,105	0,336	0,636	0,359	0,430	0,579	0,456	11
6	5,5	7,5	3500	0,5	2034,51	0,593	0,29	0,277	0,196	0,545	0,409	0,384	0,524	0,439	15
7	5,5	7,5	5000	0,75	2088,44	0,505	0,28	0,010	0,500	0,455	0,336	0,500	0,478	0,438	16
8	2	7,5	5000	0,5	2025,36	0,597	0,3	0,323	0,181	0,636	0,425	0,379	0,579	0,461	10
9	5,5	7,5	3500	0,5	2076,34	0,609	0,29	0,070	0,140	0,545	0,350	0,368	0,524	0,414	19
10	5,5	7,5	2000	0,75	2016,86	0,429	0,25	0,365	0,762	0,182	0,440	0,678	0,379	0,499	8
11	9	7,5	5000	0,5	2055,43	0,585	0,26	0,173	0,224	0,273	0,377	0,392	0,407	0,392	23
12	5,5	5	2000	0,5	2034,84	0,503	0,26	0,276	0,508	0,273	0,408	0,504	0,407	0,440	13
13	5,5	7,5	2000	0,25	1888,74	0,387	0,29	1,000	0,909	0,545	1,000	0,846	0,524	0,790	2
14	5,5	5	3500	0,75	2090,40	0,518	0,26	0,000	0,456	0,273	0,333	0,479	0,407	0,407	21
15	9	7,5	3500	0,25	1963,26	0,456	0,24	0,630	0,670	0,091	0,575	0,602	0,355	0,511	6
16	2	5	3500	0,5	2064,25	0,599	0,23	0,130	0,176	0,000	0,365	0,378	0,333	0,359	27
17	9	5	3500	0,5	2069,81	0,498	0,25	0,102	0,523	0,182	0,358	0,512	0,379	0,416	18
18	5,5	10	3500	0,25	1931,56	0,428	0,34	0,788	0,767	1,000	0,702	0,682	1,000	0,795	1
19	2	7,5	3500	0,75	2036,80	0,586	0,25	0,266	0,221	0,182	0,405	0,391	0,379	0,392	24
20	2	7,5	2000	0,5	2010,33	0,551	0,29	0,397	0,342	0,545	0,453	0,432	0,524	0,470	9
21	5,5	5	3500	0,25	1921,43	0,361	0,25	0,838	1,000	0,182	0,755	1,000	0,379	0,712	3
22	5,5	7,5	5000	0,25	1941,69	0,419	0,3	0,737	0,799	0,636	0,656	0,713	0,579	0,649	5
23	2	10	3500	0,5	2019,80	0,617	0,29	0,350	0,111	0,545	0,435	0,360	0,524	0,440	14
24	5,5	10	5000	0,5	2068,83	0,619	0,29	0,107	0,104	0,545	0,359	0,358	0,524	0,414	20
25	2	7,5	3500	0,25	1914,89	0,435	0,31	0,870	0,741	0,727	0,794	0,659	0,647	0,700	4
26	9	10	3500	0,5	2069,81	0,647	0,27	0,102	0,008	0,364	0,358	0,335	0,440	0,378	26
27	9	7,5	3500	0,75	2080,27	0,501	0,23	0,050	0,513	0,000	0,345	0,506	0,333	0,395	22

Tabloda, sonuçlarla birlikte faktörlerin normalizasyon ve gri ilişkisel katsayı değerleri verilmiştir. Değerler 1'e yaklaştıkça iyilik seviyesi artmaktadır. Sıralama incelendiğinde üç faktör için en iyi sonucun sıkma basıncının 5,5 bar, açılmasının 10°, ilerleme hızının 3500 mm/dak, artım miktarının 0,250 mm olduğu 18. deneyde elde edilebileceği görülmektedir. Burada katsayı değerlerinin et kalınlığı için tam 1 ile ulaşılacak en iyi sonucu verdiğini, şekillendirme kuvvetinin 0,702 ve yüzey pürüzlülüğünün 0,682 olduğu görülmektedir. Deneylerin iyilik sıralaması sıra sütununda verilmiştir.

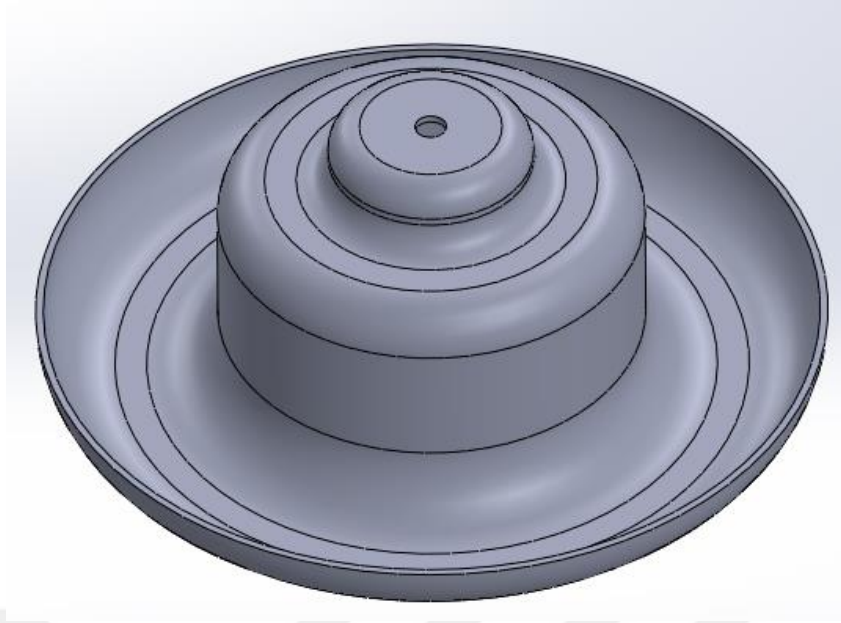
4.6. Amortisör Yay Sacı İmalatı

Tez kapsamında otomotiv sektörüne yönelik çalışma olarak amortisör yay sacı imalatı gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmalar arasında bu parçanın kullanım yeri açısından öncelikli kriteri et kalınlığının yüksek olmasıdır. Bu nedenle şekillendirme, yapılan çalışmalar sonucunda elde edilen et kalınlığı için optimum parametre seviyeleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Parça için oluşturulan tasarım Şekil 4.39'da verilmiştir.



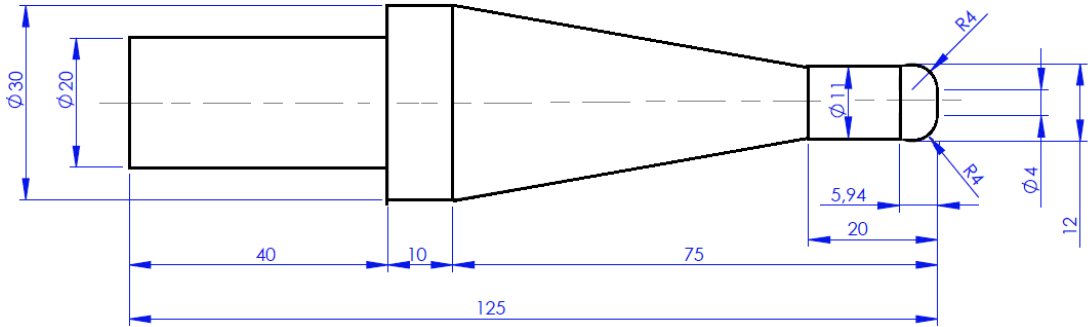
Şekil 4.39 : Amortisör yay sacının teknik resmi.

Teknik resim kesit görünümü olarak verilmiştir. Parçaya ait izometrik görünüm Şekil 4.40'da verilmiştir.



Şekil 4.40 : Amortisör yay sacının izometrik görünümü.

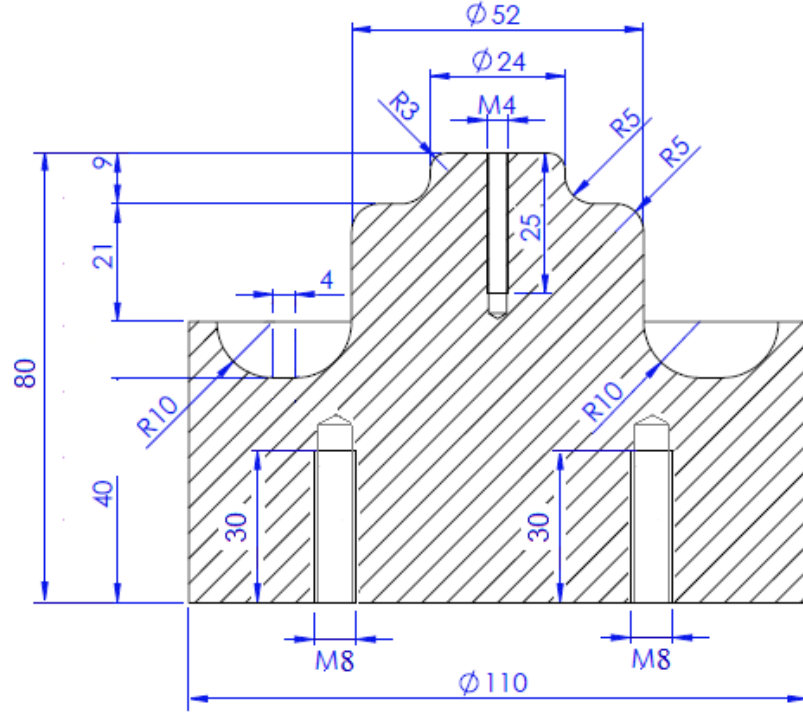
Tasarlanan geometrinin şekillendirilmesi dört kademedan oluşmaktadır. Gövde bölgesi 50° - $87,5^{\circ}$ arası şekillendirme deneylerin yapıldığı form takımı kullanılarak şekillendirilmiştir. Üstteki fatura, alttaki ters yön ve $87,5^{\circ}$ 'den 90° açığa şekillendirmek için daha küçük form takımı tasarlanmıştır. Bu form takımının ölçüleri Şekil 4.41'de verilmiştir.



Şekil 4.41 : Küçük form takımı teknik resmi.

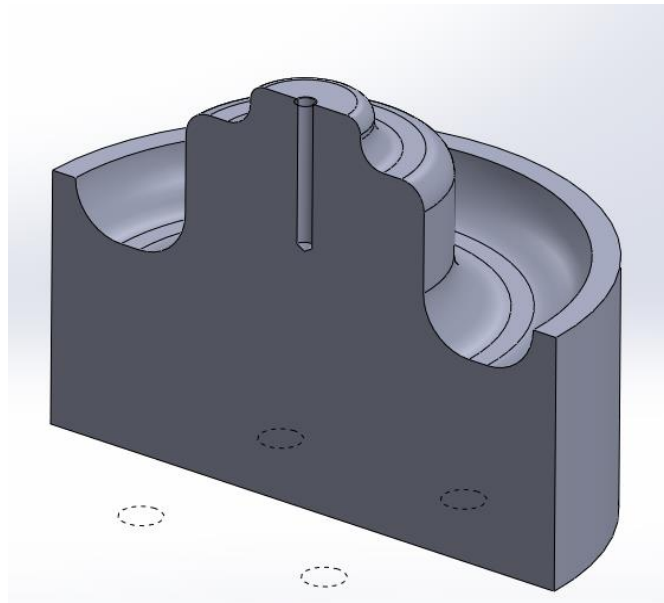
Şekillendirme için parametre seviyeleri et kalınlığı optimum parametre seviyeleri olan sıkma basıncı 2,78 bar, açı artımı 10° , ilerleme 2000 mm/dak, artım miktarı 0,250 mm kullanılmıştır. Bunun nedeni parçanın kullanım yerindeki temel ihtiyacın mukavemet olmasıdır. Bunu elde etmek için et kalınlığının yüksek olması gerekmektedir. Şekillendirme, çalışma kapsamında kullanılan kademeli kayar artımlı sac şekillendirme yöntemiyle gerçekleştirilmiştir. Tüm faturalar bu parametre

seviyeleri kullanılarak şekillendirilmiştir. Tasarımı yapılan parçanın model tasarımı gerçekleştirilmiş ve üretilmiştir. Modelin kesit alınmış teknik çizimi Şekil 4.42’de verilmiştir.



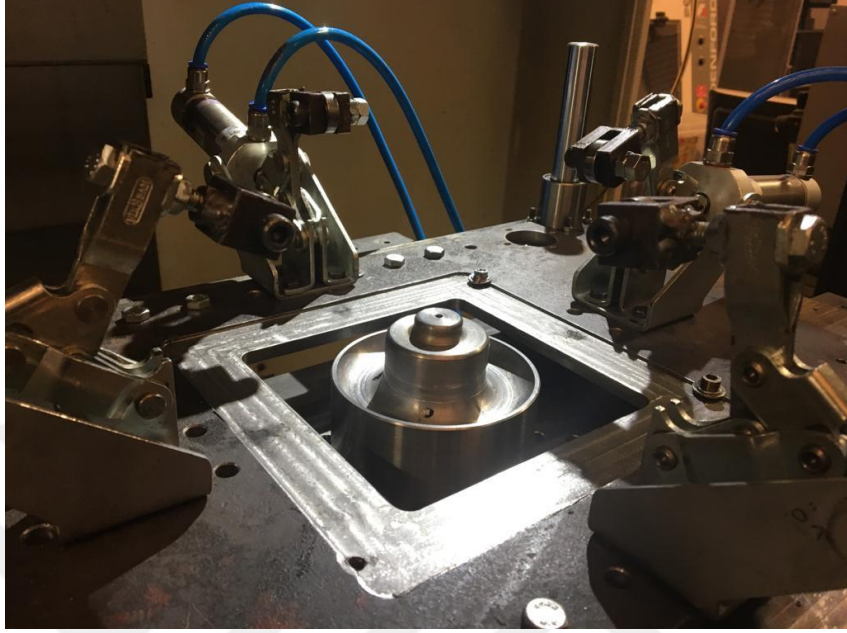
Şekil 4.42 : Amortisör yay sacı modelinin kesit alınmış teknik çizimi.

Modeli sisteme sabitlemek için altında 4 adet M8, üstte de sacı modele sabitlemek için M4 cıvata deliği bulunmaktadır. Modelin izometrik görünümü Şekil 4.43’te verilmiştir.



Şekil 4.43 : Amortisör yay sacı modelinin kesit alınmış izometrik görünümü.

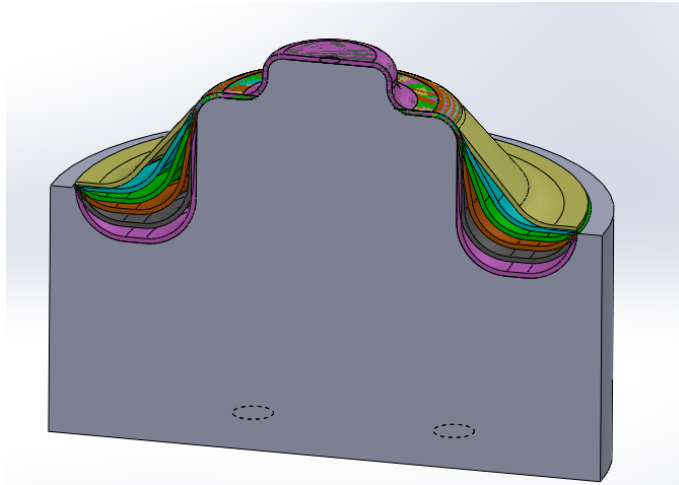
Modelin sisteme bağlanmış halde görseli Şekil 4.44'te verilmiştir. Burada sac tutucu hidrolik kriko yardımıyla modelin üst hizasına getirilerek deney parçası sisteme M3 cıvata ile bağlanıp ardından pnömatik klempler kapatılarak hidrolik kriko alınmıştır.



Şekil 4.44 : Modelin sisteme bağlanması.

Şekillendirme, çalışma kapsamında kullanılan helisel takım yoluyla gerçekleştirilmiştir.

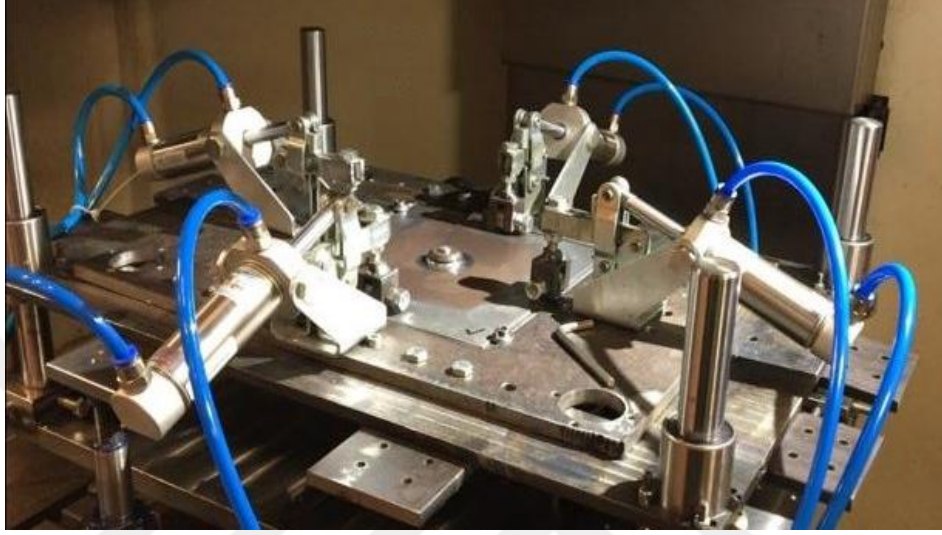
Her açı artımı esnasında modelin üzerine şekillendirme işlemi gerçekleşir. Ancak parça tam olarak sadece 90°'yi şekillendirirken modelin üzerine oturur. Her açı artımının model üzerindeki görüntüsü Şekil 4.45'te verilmiştir.



Şekil 4.45 : Amortisör yay sacı için her açı artımının model üzerinde kesit görünümü.

Burada en üstteki tasarım 50° 'yi, diğerleri sırasıyla $60^\circ, 70^\circ, 80^\circ, 87,5^\circ$ ve son olarak 90° 'yi göstermektedir.

İlk olarak üst fatura şekillendirilmiştir. Bu fatura Şekil 4.41 :'de verilen form takımı ile şekillendirilmiştir. Sadece bu faturanın şekillendirilmiş görseli Şekil 4.46'da verilmiştir.



Şekil 4.46 : Amortisör yay sacı ilk futuranın şekillendirilmesi.

İkinci adımda gövde bölgesi şekillendirilmiştir. Burada deneyler kapsamında kullanılan form takımı kullanılmıştır (Şekil 3.11). Şekillendirme sırasından bir görsel Şekil 4.47'de verilmiştir.



Şekil 4.47 : Amortisör yay sacı gövde bölgesinin şekillendirilmesi.

Parçada daha yüksek et kalınlığı sağlamak için gövde kısmında 90° şekillendirilmeden önce 80° 'nin ardından $87,5^\circ$ şekillendirmiştir.

Üçüncü adımda alt radyüs bölgesinde daha iyi et kalınlığı sağlayabilmek adına negatif yöndeki kademe dışardan içe doğru şekillendirilmiştir. Bu durum parçanın en çok incelen yeri olan alt radyüs bölgesinde yığma yaptığından et kalınlığındaki düşüşü bir nebze engellemektedir. Şekillendirme sırasından gösel Şekil 4.48’de verilmiştir.



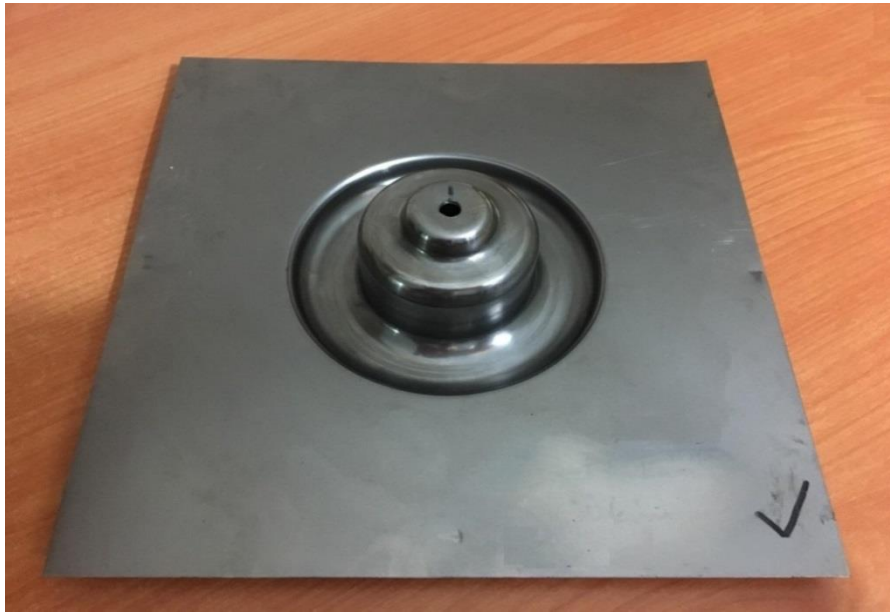
Şekil 4.48 : Amotrisör yay sacı negatif faturanın şekillendirilmesi.

Son olarak ince form takımı gövde kısmından başlayarak %87,5° olan açığı 90°’ye şekillendirmiştir. Bu takım yolu hiç kalkmadan gövde bölgesinin başlangıç yerinden negatif faturanın bitiş yerine kadar şekillendirme gerçekleştirmiştir. Şekillendirme sırasından görsel Şekil 4.49’da verilmiştir.



Şekil 4.49 : Amortisör yay sacı dördüncü adımın şekillendirilmesi.

Şekillendirme süreleri, ilk faturanın 10 dak 40 sn, gövde bölgesinin 58 dak 30 sn, negatif yöndeki şekillendirmenin 5 dak 45 sn ve son olarak gövdeden başlayıp negatif yönün sonuna kadar gerçekleşen şekillendirmenin süresi 19 dak'dır. Toplam şekillendirme süresi 1 saat 33 dk 55 sn'dir. Şekillendirilmesi tamamlanmış parçanın görseli Şekil 4.50'de verilmiştir.



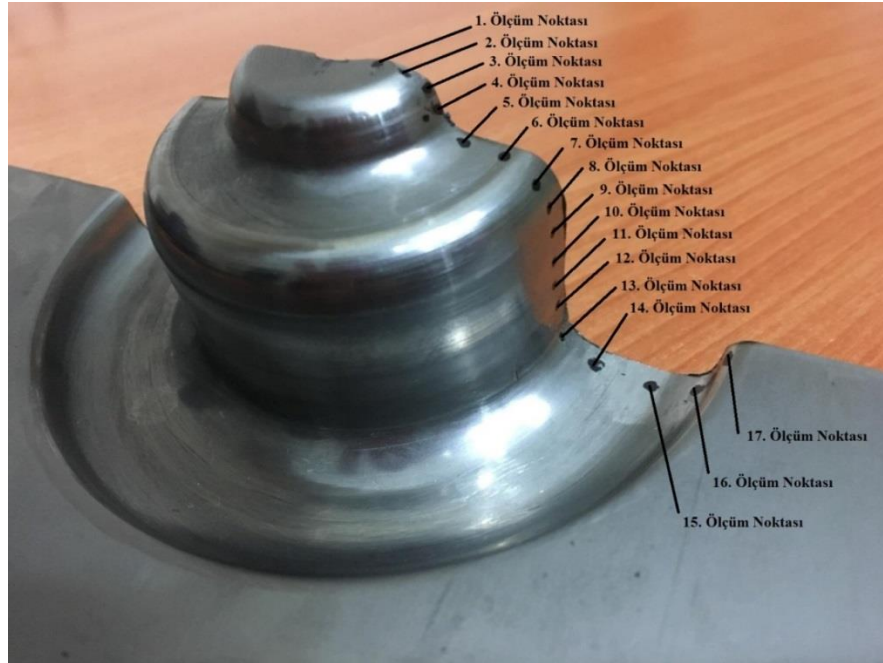
Şekil 4.50 : Amortisör yay sacı.

Parçanın kullanılan yeri şekillendiren bölgedir. Flanş bölgesi ise sacı, sac bağlama aparatına bağlamak için kullanılır. Parçanın, flanşı kesilmiş görüntüsü Şekil 4.51’de verilmiştir.



Şekil 4.51 : Flanş bölgesi kesilmiş amortisör yay sacı.

Parçanın et kalınlığını ölçmek için deney parçalarında olduğu gibi master oluşturulup 5'er mm aralıklarla ölçüm noktaları belirlenmiştir. Markalanmış parçanın görseli Şekil 4.52’de verilmiştir.



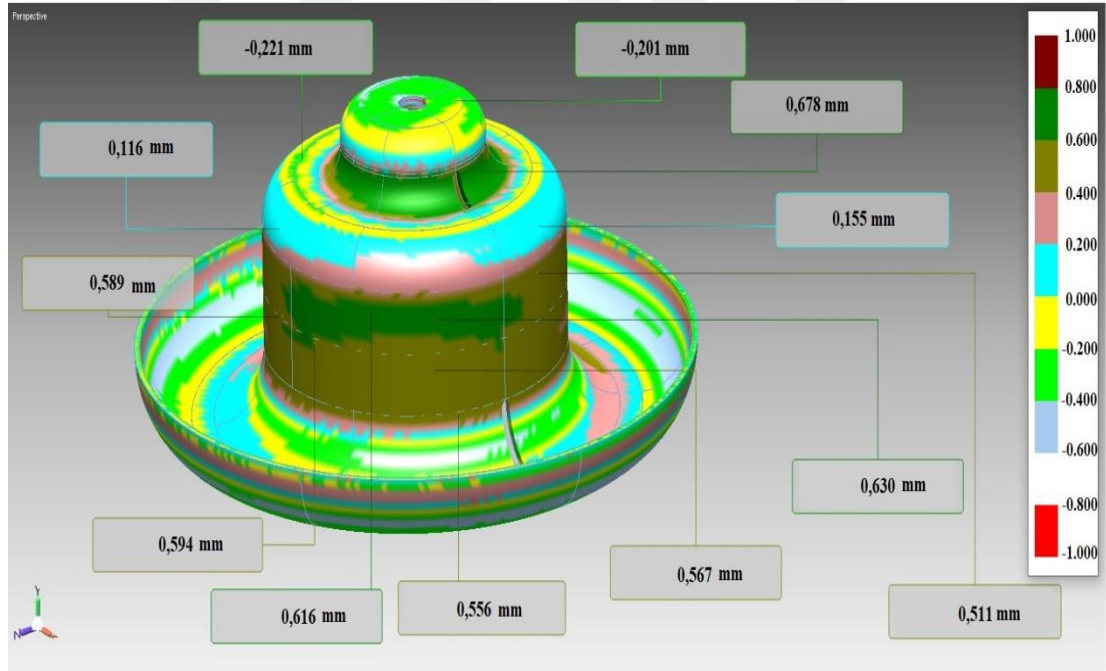
Şekil 4.52 : Et kalınlığı ölçümü için kesilip markalanan parça.

Parçanın et kalınlığı dağılımı Tablo 4.8’de verilmiştir. Tablo ölçüm noktalarını ve ölçüm değerlerini içermektedir.

Tablo 4.8 : Amortisör yay sacı et kalınlığı dağılımı.

Ölçüm Noktası	Ölçüm Değeri	Ölçüm Noktası	Ölçüm Değeri	Ölçüm Noktası	Ölçüm Değeri (mm)
1	0,95	7	0,74	13	0,12
2	0,92	8	0,76	14	0,24
3	0,9	9	0,69	15	0,4
4	0,67	10	0,58	16	0,39
5	0,55	11	0,46	17	0,86
6	0,93	12	0,27		

Sonuçlar incelendiğinde, incelleme miktarlarının radyüs bölgelerinde fazla olduğu görülmektedir. En fazla incelenen yer 13. ölçüm noktasıdır. Bu noktadaki ölçüm sonucu 0,12 mm’dir. 0,98 mm et kalınlığına sahip sacın 0,12 mm’ye kadar incelendiği görülmektedir. Parçanın geometrik doğruluk ölçüm sonucu Şekil 4.53’te verilmiştir.



Şekil 4.53 : Amortisör yay sacı parçasının geometrik doğruluk analiz sonucu.

Ölçüm sonucu incelendiğinde geometrik sapma aralığının oldukça -0,8 mm ile 0,8 mm aralığında oldukça az miktarda olduğu görülmektedir. Parçanın şekillendirilmeyen üst flanş bölgesinde eksi yönde geometrik sapma meydana gelmiştir. Radyüs bölgesine yaklaştıkça eksi yöndeki geometrik sapma miktarı

artmaktadır. İkinci faturanın üst flanş bölgesinde de aynı değerler aralığında eksi yönde geometrik sapma olduğu görülmektedir. Radyüs bölgesine yaklaştıkça artı yönde arttığı görülmektedir. Gövde bölümünde z ekseninde ilerleme doğrultusunda geometrik sapma miktarının 0.6 mm arttığı görülmektedir. En fazla geometrik sapma miktarı gövde bölümünde meydana gelmiştir. Alt radyüs bölgesine yaklaştıkça geometrik sapmanın bir miktar azaldığı görülmektedir.



BÖLÜM 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, 0,98 mm et kalınlığına sahip DC04 sacının kayar artımlı şekillendirme yöntemiyle, 90° duvar açısına sahip eksenel simetrik geometri olarak şekillendirilebilirliği araştırılmıştır.

Çalışma kapsamında kısa süre önce geliştirilmiş olan kayar artımlı şekillendirme yönteminde ilk kez kademeli kayar artımlı şekillendirme yöntemi denenmiştir. Yapılan çalışma neticesinde, diğer yöntemlerde şekillendirilmesi çok zor olan yüksek derinlikte 90° dik duvar açısına sahip parçalar başarıyla şekillendirilmiştir.

Çalışma, Şekil 3.15'te verilen tez planına uygun olarak Tablo 3.5'te verilen deney düzeneğine göre yapılmıştır. Çalışma malzemesi endüstride kullanılan ve çoğunlukla otomotiv sektöründe tercih edilen DC04 kalite sac olarak belirlenmiştir. Duvar açısının 90° olduğu parça üretmenin zorluğundan ve bazı sac şekillendirme yöntemlerinde imkansız olması nedeniyle çalışma için 90° eksenel simetrik geometri belirlenmiştir. Şekillendirmeye etkisi bilinen açı artımı, artım miktarı, ilerleme hızı ve çalışma kapsamında kullanılan kayar artımlı şekillendirme yönteminde şekillendirmeye etkisi olan sıkma basıncı deney parametresi olarak belirlenmiştir. Deneyler Box-Behnken deney düzeneğinde oluşturulmuştur. 27 farklı parametre değerleriyle yapılan deneylerden elde edilen sonuçlarla cevap yüzey analizi yapılarak optimum parametre seviyeleri belirlenmiş, bu seviyeler kullanılarak et kalınlığı, yüzey pürüzlülüğü ve şekillendirme kuvveti faktörleri için ayrı ayrı doğrulama deneyleri yapılmıştır. Bu deneylerinin sonuçlarına göre optimum parametre değerlerinin doğruluğu teyit edilmiştir. Varyans analizi yapılarak parametre seviyelerinin şekillendirmeye etkileri incelenmiştir. Gri ilişki analizi yapılarak et kalınlığını, yüzey pürüzlülüğünü ve şekillendirme kuvvetini birlikte optimize eden parametre değerleri elde edilmiştir. Ardından et kalınlığı, yüzey pürüzlülüğü ve şekillendirme kuvveti faktörleri için parametre seviyelerini girerek elde edilecek olan sonuca ulaşabileceğimiz regresyon denklemleri elde edilmiştir. Otomotiv endüstrisine yönelik çalışma olarak amortisör yay sacı diye adlandırılan parçanın

üretimi gerçekleştirilmiştir. Parçanın kullanım yerine göre en önemli kriteri mukavemet göstermesidir. Bu nedenle et kalınlığı için optimum parametre seviyeleri kullanılarak üretimi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen bu parça ve optimum parametre seviyeleriyle elde edilen parçalar 3D optik tarayıcı ile taranarak geometrik doğruluk analizleri yapılmıştır.

Yürütülen deney sonuçlarıyla yapılan istatistiksel analizler sonucu deney parametrelerinin, bağımlı değişkenler olan et kalınlığı, yüzey pürüzlülüğü ve şekillendirme kuvveti ölçümlerinde en iyi sonuçların elde edildiği parametre seviyelerinin farklı olduğu belirlenmiştir.

Şekillendirme deneylerinden elde edilen verilere göre parametrelerin etkilerinin araştırılması için yapılan varyans analizinde et kalınlığına en fazla doğrudan etki eden parametre açısı artımıdır. Basınç ve artım miktarının da çok önemli etkilere sahip olduğu görülmektedir. En az etkiye sahip olan parametre ise ilerleme hızıdır. Parametrelerin birbirleriyle etkileşimleri incelendiğinde ise kayda değer bir etkiye sahip oran olduğu söylenemez. En fazla etkinin açısı artımı*ilerleme hızının ve açısı artımı*artım miktarıdır ve eşit seviyelerdedir. Optimum parametre değeri elde edebilmek için yapılan cevap yüzey analizi incelendiğinde parametre seviyeleri sıkma basıncı 2,77 bar, açısı artımı 10°, ilerleme hızı 2000 mm/dak ve artım miktarı 0,25 mm'dir. Bu parametre seviyeleriyle yapılan deneyde, deneylerden elde edilen et kalınlığı değerinden daha iyi et kalınlığı değeri elde edilmiştir.

Şekillendirme deneylerinden elde edilen verilere göre parametrelerin etkilerinin araştırılması için yapılan varyans analizinde yüzey pürüzlülüğüne en fazla doğrudan etki eden parametre artım miktarıdır. Artım miktarı, açısı artımı ve ilerleme hızının sonuçlara etkisi çok önemli düzeyde olmuştur ($P < 0,05$). Ancak birbirleriyle kıyaslamak için etki oranları incelendiğinde artım miktarının diğer parametrelere göre etkisi daha fazladır. Basıncın etkisinin ise önemli olmadığı görülmüştür. Parametrelerin birbirleriyle etkileşimleri incelendiğinde ise kayda değer bir etkileşim olduğu söylenemez. Optimum parametre değeri elde edebilmek için yapılan cevap yüzey analizi incelendiğinde parametre seviyeleri sıkma basınç değerini 9 bar, açısı artımını 5°, ilerlemeyi 2000 mm/dak ve artım miktarını 0,250 mm'dir. Bu parametre seviyeleriyle yapılan deneyde, deneylerden elde edilen değerden daha iyi sonuca ulaşılmıştır.

Şekillendirme deneylerinden elde edilen verilere göre parametrelerin etkilerinin araştırılması için yapılan varyans analizinde şekillendirme kuvvetine %61,49 oranla en fazla doğrudan etki eden parametre artım miktarıdır. Diğer parametrelerin artım miktarına kıyasla ciddi bir etkileri bulunmamaktadır. Parametrelerin birbirleriyle etkileşimleri incelendiğinde ise tüm etkileşimleri önemsizdir. Optimum parametre değeri elde edebilmek için yapılan cevap yüzey analizi incelendiğinde parametre seviyeleri basınç değerini 2 bar, açılı artımı 10°, ilerleme 2000 mm/dak ve artım miktarını 0,25 mm olarak belirlenmiştir. Bu parametrelerle yapılan deneyde, deneylerden elde edilen değerden daha iyi sonuca ulaşılmıştır.

Gri ilişkisel analiz gerçekleştirilerek çalışma kapsamında incelenen bağımlı değişkeni (et kalınlığı, yüzey pürüzlülüğü ve şekillendirme kuvveti) birlikte optimize eden parametre değerleri elde edilmiştir. Analiz sonucuna göre en iyi sonucu 18 numaralı deney vermektedir. Bu deneyde bağımlı değişkenler arasından en iyi değer et kalınlığında, ikinci olarak şekillendirme kuvvetinde ve son olarak yüzey pürüzlülüğünde elde edilmiştir. Bu deneye ait parametreler, sıkma basıncı 5,5 bar, açılı artımı 10°, ilerleme hızı 3500 mm/dak ve artım miktarı 0,250 mm'dir. Deney 45 dakika 29 saniye sürmektedir. Anılan tablo incelendiğinde şekillendirme kuvveti için en iyi sonucun 13. deney, yüzey pürüzlülüğü için en iyi sonucunda 21. deney parametrelerinde sağlanabileceği söylenebilir. Kullanım yerine göre etkili bağımlı değişkene (et kalınlığı, yüzey pürüzlülüğü, şekillendirme kuvveti) uygun parametrelerin kullanımı daha uygun olacaktır.

Üretim için en önemli faktörlerden biri zamandır. Bu nedenle çalışma kapsamında deney süreleri de incelenmiştir. Deney parametrelerinden ilerleme hızı, açılı artımı ve artım miktarı şekillendirme süresine etki etmektedir. Bu üç parametre seviyeleri arttıkça deney süresi kısalmaktadır. Sıkma basıncının ise etkisi yoktur.

Amortisör yay sacı parçasının ve optimum parametre deneyi parçalarının 3D geometrik doğruluk analizleri yapılmıştır. Sonuçlar neticesinde parçaların üst tarafından aşağı doğru inildikçe sapmanın bir miktar arttığı görülmektedir. En çok sapmanın alt radyüsün olduğu bölgelerde meydana gelmiştir. Bununla birlikte çok büyük olmayan boyut değişimlerinin model ve takım yolunun sapma oranına göre oluşturulması geometrik sapmayı azaltabileceği söylenebilir.

Bu çalışmanın devamı olarak, deney geometrisinin maksimum şekillendirme boyu ile ilgili çalışmalar yapılabilir. Bu yöntemle negatif yönde şekillendirme stratejileri ve daha kalın malzemelerin şekillendirilebilirliği araştırılabilir.



KAYNAKLAR

- Alkas Yonan, S., Silva, M. B., Martins, P. A. F. ve Tekkaya, A. E. (2014). Plastic flow and failure in single point incremental forming of PVC sheets. *Express Polymer Letters*, 8(5), 301–311. doi:10.3144/expresspolymlett.2014.34
- Allwood, J. M., Braun, D. ve Music, O. (2010). The effect of partially cut-out blanks on geometric accuracy in incremental sheet forming. *Journal of Materials Processing Technology*, 210(11), 1501–1510. doi:10.1016/j.jmatprotec.2010.04.008
- Ambrogio, G., Filice, L., Gagliardi, F. ve Micari, F. (2005). Sheet thinning prediction in single point incremental forming. *Advanced Materials Research*, 6–8(September 2014), 479–486. doi:10.4028/www.scientific.net/amr.6-8.479
- Ambrogio, G., Gagliardi, F., Bruschi, S. ve Filice, L. (2013). On the high-speed Single Point Incremental Forming of titanium alloys. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 62(1), 243–246. doi:10.1016/j.cirp.2013.03.053
- Anonim. (1967). Apparatus and process for incremental dieless forming. United States Patent Office.
- Araújo, R., Teixeira, P., Montanari, L., Reis, A., Silva, M. B. ve Martins, P. A. F. (2014). Single point incremental forming of a facial implant. *Prosthetics and Orthotics International*, 38(5), 369–378. doi:10.1177/0309364613502071
- Asghari, S. A. A., Shamsi Sarband, A. ve Habibnia, M. (2017). Optimization of multiple quality characteristics in two-point incremental forming of aluminum 1050 by grey relational analysis. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 0(0), 1–15. doi:10.1177/0954406217693658
- Asmaz, K. (2007). Çelik saclarda mekanik özelliklerin şekillendirmeye etkisi. *IV. Demir-Çelik Kongresi* içinde (ss. 193–201). Karabük.
- Attanasio, A., Ceretti, E., Giardini, C. ve Mazzoni, L. (2008). Asymmetric two points incremental forming: Improving surface quality and geometric accuracy by tool path optimization. *Journal of Materials Processing Technology*, 197(1–3), 59–67. doi:10.1016/j.jmatprotec.2007.05.053
- Azevedo, N. G., Farias, J. S., Bastos, R. P., Teixeira, P., Davim, J. P. ve Alves de Sousa, R. J. (2015). Lubrication aspects during Single Point Incremental Forming for steel and aluminum materials. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 16(3), 589–595. doi:10.1007/s12541-015-0079-0
- Bagudanch, I., Centeno, G., Vallellano, C. ve Garcia-Romeu, M. L. (2017).

Revisiting formability and failure of polymeric sheets deformed by Single Point Incremental Forming. *Polymer Degradation and Stability*, 144, 366–377.
doi:10.1016/j.polymdegradstab.2017.08.021

- Baraoğlu, B., Music, O., Tamer, M. E., Sakin, A. ve Durgun, İ. (2012). Prototip parça imalatında artımlı sac şekillendirme işlemlerinin kullanımı : simülasyon, imalat ve karşılaştırma. 12. *Üretim Araştırmaları Sempozyumu*, (July 2016).
- Baş ve Boyacı, I. H. (2007). Modeling and optimization II: Comparison of estimation capabilities of response surface methodology with artificial neural networks in a biochemical reaction. *Journal of Food Engineering*, 78(3), 846–854.
doi:10.1016/j.jfoodeng.2005.11.025
- Baş, C. (2010). *Cevap yüzeyi tasarımı ve sinir ağları yaklaşımı*. (Doktora tezi). Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Demirkol, M. (2010). *Fundamentals of Modern Manufacturing*. İstanbul: İstanbul Teknik Üniversitesi, Makine Mühendisliği. https://web.itu.edu.tr/gulmezt/IMALUSULLERI/Groover_PSV_TUR.pdf adresinden erişildi.
- Duflou, J. R., Tunckol, Y. ve Aereens, R. (2007). Force Analysis for Single Point Incremental Forming. *Key Engineering Materials*, 344, 543–550.
doi:10.4028/www.scientific.net/kem.344.543
- Duflou, Vanhove, H., Verbert, J., Gu, J., Vasilakos, I. ve Eyckens, P. (2010). Twist revisited: Twist phenomena in single point incremental forming. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 59(1), 307–310. doi:10.1016/j.cirp.2010.03.018
- Durgun, I. (2017). Artımsal Şekillendirme Yöntemi İle Alüminyum Parçaların Şekillendirilmesi. *5th International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science, 2017*(September).
- Durgun ve Sakin, A. (2016). Automobile sheet metal part production with incremental sheet forming. *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, 22(1), 8–16. doi:10.5505/pajes.2015.37980
- Emmens, W. C., Sebastiani, G. ve van den Boogaard, A. H. (2010). The technology of Incremental Sheet Forming-A brief review of the history. *Journal of Materials Processing Technology*, 210(8), 981–997.
doi:10.1016/j.jmatprotec.2010.02.014
- Esener, E., Sönmez, E. ve Fırat, M. (2018). Metal Şekillendirme Proseslerinde Sac Açınım Geometrisinin Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Geliştirilmesi. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 6(1), 79–89.
doi:10.29109/http-gujsc-gazi-edu-tr.319383
- Gupta, P. ve Jeswiet, J. (2019). Manufacture of an aerospace component by single point incremental forming. *Procedia Manufacturing*, 29, 112–119.
doi:10.1016/j.promfg.2019.02.113
- Ham, M. ve Jeswiet, J. (2006). Single point incremental forming and the forming criteria for AA3003. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 55(1), 241–244. doi:10.1016/S0007-8506(07)60407-7
- Hussain, G. ve Gao, L. (2007). A novel method to test the thinning limits of sheet metals in negative incremental forming. *International Journal of Machine Tools*

- and Manufacture*, 47(3–4), 419–435. doi:10.1016/j.ijmachtools.2006.06.015
- Hussain, G., Gao, L. ve Hayat, N. (2011). Forming parameters and forming defects in incremental forming of an aluminum sheet: Correlation, empirical modeling, and optimization: Part A. *Materials and Manufacturing Processes*, 26(12), 1546–1553. doi:10.1080/10426914.2011.552017
- Jackson, K. (2008). *The Mechanics of Incremental Sheet Forming*. (Doctoral dissertation). Department of Engineering, University of Cambridge.
- Jeswiet, J., Micari, F., Hirt, G., Bramley, A., Duflou, J. ve Allwood, J. (2005). Asymmetric single point incremental forming of sheet metal. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 54(2), 88–114. doi:10.1016/s0007-8506(07)60021-3
- Julong, D. (1989). Introduction to grey system theory. *The Journal of Grey System 1*, 1, 1–24.
- Karamış, M. B. (2012). *İmalat Yöntemleri*. Kayseri: Erciyes Üniversitesi.
- Kim, T. J. ve Yang, D. Y. (2000). Improvement of formability for the incremental sheet metal forming process. *International Journal of Mechanical Sciences*, 42(7), 1271–1286. doi:10.1016/S0020-7403(99)00047-8
- Li, J., Hu, J., Pan, J. ve Geng, P. (2012). Thickness distribution and design of a multi-stage process for sheet metal incremental forming. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 62(9–12), 981–988. doi:10.1007/s00170-011-3852-y
- Li, Lu, S. ve Chen, P. (2017). Improvement of dimensional accuracy based on multistage single point incremental forming of a straight wall cylinder part. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 18(9), 1281–1286. doi:10.1007/s12541-017-0151-z
- Malhotra, R., Cao, J., Ren, F., Kiridena, V., Cedric Xia, Z. ve Reddy, N. V. (2011). Improvement of geometric accuracy in incremental forming by using a squeezing toolpath strategy with two forming tools. *Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME*, 133(6). doi:10.1115/1.4005179
- Martins, P. A. F., Bay, N., Skjoedt, M. ve Silva, M. B. (2008). Theory of single point incremental forming. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 57(1), 247–252. doi:10.1016/j.cirp.2008.03.047
- Mayers, R. H. ve Montgomery, D. C. (2016). *Response surface methodology: process and product optimization using designed experiments*. John Wiley and Sons.
- Meier, H., Smukala, V., Dewald, O. ve Zhang, J. (2007). Two Point Incremental Forming with Two Moving Forming Tools. *Key Engineering Materials*, 344, 599–605. doi:10.4028/www.scientific.net/kem.344.599
- Meral, G., Sarıkaya, M. ve Dilipak, H. (2011). Delme İşlemlerinde Kesme Parametrelerinin Taguchi Yöntemiyle Optimizasyonu. *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 27(4), 332–338.

- Minitab, I. (2019). *Getting Started with Minitab*. Minitab Inc.
- Mostafanezhad, H., Menghari, H. G., Esmaili, S. ve Shirkharkolae, E. M. (2018). Optimization of two-point incremental forming process of AA1050 through response surface methodology. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 127(October), 21–28. doi:10.1016/j.measurement.2018.04.042
- Mulay, A., Ben, B. S., Ismail, S., Kocanda, A. ve Jasiński, C. (2018). Performance evaluation of high-speed incremental sheet forming technology for AA5754 H22 aluminum and DC04 steel sheets. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 18(4), 1275–1287. doi:10.1016/j.acme.2018.03.004
- Önal, Ü., Seçgin, Ö. ve Özsert, İ. (2019). Kademeli Kayar Artımlı Şekillendirme Metodu İle Dik Kenarları Olan Parça Üretimi. *Imascon* içinde (ss. 900–908). Kocaeli.
- Panda, A., Sahoo, A. K. ve Rout, A. K. (2016). Multi-attribute decision making parametric optimization and modeling in hard turning using ceramic insert through grey relational analysis: A case study. *Decision Science Letters*, 5(4), 581–592. doi:10.5267/j.dsl.2016.3.001
- Park, J. J. ve Kim, Y. H. (2003). Fundamental studies on the incremental sheet metal forming technique. *Journal of Materials Processing Technology*, 140(1-3 SPEC.), 447–453. doi:10.1016/S0924-0136(03)00768-4
- Parlar, Z., Asa, T. ve Edis, K. (2017). Ev tipi bir fırının düşme testinin sonlu elemanlar yöntemi ile modellenmesi. *Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering*, 22(1), 197–197. doi:10.17482/uumfd.310961
- Rajesh, R. ve Ravi, V. (2015). Supplier selection in resilient supply chains: A grey relational analysis approach. *Journal of Cleaner Production*, 86, 343–359. doi:10.1016/j.jclepro.2014.08.054
- Reddy, N. V. ve Cao, J. (2008). Incremental Sheet Metal Forming: A Review. *Indo-US workshop on Smart Machine Tools*, 1–9.
- Safari, M. ve Joudaki, J. (2019). Fabrication of a Complicated Specimen with Two Point Incremental Forming Process. *Advanced Design and Manufacturing Technology*, Vol. 12.
- Sakin, A. ve Durgun, İ. (2011). Sayısal kontrollü sac şekillendirme yöntemi uygulamaları. 12. *Otomotiv ve Üretim Teknolojileri Sempozyumu*, 6(4), 55–59. doi:10.1515/mper-2015-0036
- Sakin, A. ve Durgun, İ. (2013). Sayısal Kontrollü Artımlı Şekillendirme Tekniği ile Plastik Parça Üretimi 1. *Mühendis ve Makina*, 55(650), 23–28.
- Savaşkan, M., Taptık, Y. ve Ürgen, M. (2004). Deney tasarımı yöntemi ile matkap uçlarında performans optimizasyonu. *itüdergisi/d*, (535), 117–128.
- Seçgin, Ö. (2005). *Dkp sac çeliğinin derin çekilmesinde matris yüzey açığı değişiminin araştırılması*. (Yüksek Lisans Tezi). Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- Seçgin, Ö. (2019a). DC01 sacının tek noktadan temaslı artımlı şekillendirilmesinde

- limit şekillendirme açısının belirlenmesi. *International Aluminum-Themed Engineering and Natural Sciences Conference* içinde (ss. 53–57). Konya.
- Seçgin, Ö. (2019b). *Development Of Incremental Forming Method For Automotive Sector Applications*. (Phd Thesis). Sakarya University of Applied Sciences. Graduate Education Institute. Sakarya.
- Seçgin, Ö. ve Özsert, İ. (2019a). Dkp37 Sheet's Rolling Incremental Forming (TPIF_RL) Process Optimization By Taguchi and Response Surface Method. *Düzce University, Journal of Science and Technology*, 7, 201-214 Düzce.
- Seçgin, Ö. ve Özsert, İ. (2019b). Experimental investigation of new blank holder approach for incremental forming method. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* (2019), 101, 357–365.
- Shankar, R., Jadhav, S., Goebel, R., Homberg, W. ve Kleiner, M. (2005). Incremental sheet metal forming of preformed sheets. *Proc. 8th Int. Conf. on Technology of Plasticity* içinde . Verona - Italy.: Proc. 8th Int. Conf. on Technology of Plasticity.
- Sierra, G., Peyre, P., Deschaux-Beaume, F., Stuart, D. ve Frasn, G. (2007). Steel to aluminium key-hole laser welding. *Materials Science and Engineering A*, 447(1–2), 197–208. doi:10.1016/j.msea.2006.10.106
- Silva, M. B. ve Martins, P. A. F. (2013). Two-point incremental forming with partial die: Theory and experimentation. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 22(4), 1018–1027. doi:10.1007/s11665-012-0400-3
- Silva, M. B., Skjoedt, M., Martins, P. A. F. ve Bay, N. (2008). Revisiting the fundamentals of single point incremental forming by means of membrane analysis. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 48(1), 73–83. doi:10.1016/j.ijmachtools.2007.07.004
- Skjoedt, M., Bay, N., Endelt, B. ve Ingarao, G. (2008). Multi stage strategies for single point incremental forming of a cup. *International Journal of Material Forming*, 1(SUPPL. 1), 1199–1202. doi:10.1007/s12289-008-0156-3
- Skjoedt, M., Hancock, M. H. ve Bay, N. (2007). Creating Helical Tool Paths for Single Point Incremental Forming. *Key Engineering Materials*, 344, 583–590. doi:10.4028/www.scientific.net/KEM.344.583
- Tayyar, N., Akcanlı, F., Genç, E. ve Erem, I. (2014). BIST'e Kayıtlı Bilişim ve Teknoloji Alanında Faaliyet Gösteren İşletmelerin Finansal Performanslarının Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP) ve Gri İlişkisel Analiz (GİA) Yöntemiyle Değerlendirilmesi, 19–40.
- Tisza, M. (2012). General overview of sheet incremental forming. *Manufacturing Engineering*, 55(1), 113–120. http://www.journalamme.org/papers_vol55_1/55114.pdf adresinden erişildi.
- Uzun, A., Eski, Ö. ve Çelik, E. (2017). Taguchi Tekniği Kullanılarak SAE 1021 / Dillidur 400 / Dillimax 500 Çeliklerinin Sürtünme Kaynağı için İşlem Parametrelerinin Optimizasyonu. *GU J Sci Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 5(2), 53–62.
- Verbert, J., Belkassen, B., Henrard, C., Habraken, A. M., Gu, J., Sol, H., ... Dufloy,

- J. R. (2008). Compressibility and relaxation models for fibrous reinforcements in LCM. *International Journal of Material Forming*, 1, 185–188. doi:10.1007/s12289-008-0
- Vijayakumar, M. D., Chandramohan, D. ve Gopalaramasubramaniyan, G. (2020). Experimental investigation on single point incremental forming of IS513Cr3 using response surface method. *Materials Today: Proceedings*, 21(xxxx), 902–907. doi:10.1016/j.matpr.2019.07.741
- Wang, Chen, S. F. ve Yuen, M. M. F. (2001). Fuzzy part family formation based on grey relational analysis. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 18(2), 128–132. doi:10.1007/s001700170083
- Wang, Daniel, W. J. T., Lu, H., Liu, S. ve Meehan, P. A. (2017). FEM Investigation of Ductile Fracture Prediction in Two-Point Incremental Sheet Metal Forming process. *Procedia Engineering*, 207, 836–841. doi:10.1016/j.proeng.2017.10.838
- Wang, Hu, H. H., Wu, J. H. ve Cao, J. (2014). Research on forming accuracy of two point incremental forming for aluminum 1060. *Advanced Materials Research*, 936, 1725–1729. doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.936.1725
- Zhang, Q., Xiao, F., Guo, H., Li, C., Gao, L., Guo, X., ... Bondarev, A. B. (2010). Warm negative incremental forming of magnesium alloy AZ31 Sheet: New lubricating method. *Journal of Materials Processing Technology*, 210(2), 323–329. doi:10.1016/j.jmatprotec.2009.09.018
- Zhang, Ren, H., Xu, R., Moser, N., Smith, J., Ndip-Agbor, E., ... Cao, J. (2015). A mixed double-sided incremental forming toolpath strategy for improved geometric accuracy. *Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME*, 137(5), 1–7. doi:10.1115/1.4031092

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Ümit Önal
Doğum Tarihi ve Yeri : 1993 / Giresun
E-posta : umitonal93@hotmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2015, Süleyman Demirel Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İmalat Mühendisliği
- **Yükseklisans** : -, Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, İmalat Mühendisliği,

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2015-2018 yılları arası sanayide Ürün Geliştirme Mühendisliği olarak çalıştı.
- 2019'dan beri sanayide Talaşlı İmalat Mühendisi olarak görev almaktadır.

YÜKSEK LİSANS TEZİNDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- Önal, Ü., Seçgin, Ö. ve Özsert, İ. (2019). Kademeli Kayar Artımlı Şekillendirme Metodu İle Dik Kenarları Olan Parça Üretimi. *Imascon* içinde (ss. 900–908). Kocaeli.