



T.C.

HİTİT ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

ARTIMLI SAC ŞEKİLLENDİRME YÖNTEMİYLE AISI 430

PASLANMAZ ÇELİK SACLARIN

ŞEKİLLENDİRİLEBİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI

Yüksek Lisans Tezi

Yunus Emre GÜLER

Çorum - 2024

**ARTIMLI SAC ŞEKİLLENDİRME YÖNTEMİYLE AISI 430 PASLANMAZ
ÇELİK SACLARIN ŞEKİLLENDİRİLEBİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI**

Yunus Emre GÜLER

**Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı**

Yüksek Lisans Tezi

TEZ DANIŐMANI

Doç. Dr. Özgür ÖZDİLLİ

Çorum 2024

Yunus Emre GÜLER tarafından hazırlanan “Artımlı Sac Şekillendirme Yöntemiyle AISI 430 Paslanmaz Çelik Sacların Şekillendirilebilirliğinin Araştırılması” adlı tez çalışması 27/09/2024 tarihinde aşağıdaki jüri üyeleri tarafından oy birliği ile Hitit Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Özgür ÖZDİLLİ

.....

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Merve T. TOZLU

.....

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Ali ÖZGEDİK

.....

Üye

Hitit Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulunun 11/10/2024 tarih ve 2024/1918 sayılı kararı ile Yunus Emre GÜLER'in Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalında Yüksek Lisans derecesi alması onanmıştır.

Prof. Dr. Osman ÇUBUK

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

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

Yunus Emre GÜLER

ARTIMLI SAC ŞEKİLLENDİRME YÖNTEMİYLE AISI 430 PASLANMAZ ÇELİK SAÇLARIN ŞEKİLLENDİRİLEBİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI

Yunus Emre GÜLER

ORCID: 0009-0003-7345-7642

HİTİT ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

Yüksek Lisans Tezi

2024

ÖZET

Bu tez çalışmasında, artımlı sac şekillendirme (ASS) yöntemi kullanılarak AISI 430 paslanmaz çelik saçların şekillendirilebilirliği deneysel olarak incelenmiştir. Çalışmanın amacı, farklı işlem parametrelerinin sac şekillendirme süreci üzerindeki etkilerini belirlemek ve optimum parametreleri tespit etmektir. Deneyler, CNC dik işleme makinesinde gerçekleştirilmiş olup, takım yolu stratejileri, ilerleme hızı, aşağı adım mesafesi, soğutma çeşitleri ve fikstür yapıları gibi değişken parametreler kullanılmıştır. Deneysel çalışmalarda, takım yolu stratejileri olarak Z Level, helisel ve concentric zigzag kullanılmıştır. İlerleme hızları 750, 1500 ve 3000 mm/dk olarak belirlenmiş, aşağı adım mesafeleri ise 0,5, 1 ve 1,5 mm olarak seçilmiştir. Fikstür yapıları tek nokta ve iki nokta (dişi destek kalıbı) olarak yapılandırılmıştır. Soğutma çeşitleri arasında kuru, yağlı ve hava soğutma yöntemleri yer almıştır. Takım dönüş hızları ise iş mili bošta, 100 dev/dk ve 200 dev/dk olarak belirlenmiştir. Bu parametreler değişken parametreler olarak belirlenirken, sabit parametreler olarak sac malzemesi AISI 430, Ø12 mm çapında ve R5 mm uç yarıçapına sahip yarı küresel takım geometrisi, 45° duvar açısına sahip kesik koni şekillendirme geometrisi, HSS takım malzemesi, saat dönüş yönünde ilerleme ve takım dönüş yönü ile 0,6 mm sac kalınlığı kullanılmıştır. Yağ malzemesi olarak SB 5016 tercih edilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda elde edilen verilerden faydalanarak ASS işleminde şekillendirilebilirliği sağlayabilecek optimum değerlere ulaşabilmek için Taguchi metodundan ve ANOVA testinden faydalanılmıştır. Bu çalışma, ASS işlemlerinde optimum işlem parametrelerinin belirlenmesinin önemini vurgulamakta ve elde edilen bulgular, sanayi uygulamaları için değerli bilgiler sunmaktadır.

Anahtar Kavramlar: Artımlı Sac Şekillendirme, Tek Nokta ASS, İki Nokta ASS, AISI 430, Geri yaylanma

Bilim Kod: 91438

STUDY ON THE FORMABILITY OF AISI 430 STAINLESS STEEL SHEET UTILIZING THE INCREMENTAL SHEET FORMING

Yunus Emre GÜLER

ORCID: 0009-0003-7345-7642

HITIT UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL

Master of Science Thesis

2024

ABSTRACT

In this thesis study, the formability of AISI 430 stainless steel sheets was experimentally investigated using the incremental sheet forming (ISF) method. The aim of the study is to determine the effects of different process parameters on the sheet forming process and to identify the optimal parameters. The experiments were conducted on a CNC vertical milling machine, utilizing variable parameters such as toolpath strategies, feed rate, step down distance, cooling methods, and fixture configurations. In the experimental studies, toolpath strategies including Z Level, helical, and concentric zigzag were employed. Feed rates were set at 750, 1500, and 3000 mm/min, while step down distances were selected as 0.5, 1, and 1.5 mm. Fixture configurations were structured as single point and two-point (female support die). Cooling methods included dry, oily, and air cooling techniques. Tool rotational speeds were determined as idle, 100 rpm, and 200 rpm. While these parameters were selected as variable parameters, the following were considered as constant parameters: AISI 430 sheet material, semi-spherical tool geometry with a diameter of $\varnothing 12$ mm and a cutting edge radius of R5 mm, truncated cone forming geometry with a 45° wall angle, HSS tool material, progression in the clockwise direction, tool rotation direction, and a sheet thickness of 0.6 mm. SB 5016 was chosen as the oil material. Utilizing the data obtained from the experiments, the Taguchi method and ANOVA test were employed to reach optimal values that ensure formability in ISF process. This study highlights the importance of determining optimal process parameters in ISF operations and the findings provide valuable insights for industrial applications.

Key Terms: Incremental Sheet Forming, Two point incremental sheet forming, SPIF, TPIF, AISI 430, aisi 430 springback

Science Code: 91438

TEŞEKKÜR

Çalışmamın başından sonuna her aşamasında bir mesai saati gözetmeksizin ilgilenen ve takibini yapan danışmanım Sayın Doç. Dr. Özgür ÖZDİLLİ'ye, çalışmamda desteklerini, tecrübelerini esirgemeyen Sayın Doç. Dr. Seyfi ŞEVİK ve Öğr. Gör. Ercan DEMİRER'e, Dr. Öğr. Üyesi Mert Şafak Tunalıoğlu'na, mikrometre, giyotin makas, profilometre vb. aletleri kullanmamıza imkan veren Hitit Üniversitesi'ne ve bugüne kadar aldığım tüm eğitimlerde pay sahibi bütün eğitmenlerimize şükranlarımı sunarım.

Çalışmamın deneysel çalışmaları sırasında bana 430 paslanmaz sacların lazer kesimi konusunda yardımcı olan SANCAKTAR GRUP LAZER firmasına, şekillendirme çalışmasında bana firmasını açan ve tüm makine parkurunu kullanmama imkan sağlayan CEZERİ MAKİNA ve personellerine, sac üzerine markalama yapma işlemleri için LAZER MARKET firmasına, üç boyutlu tarama konusunda yardımlarından ötürü Melih SANCAR'a ve burada ismini unuttuğum ama çalışmama destek olan tüm ticari ve şahsi kimliklere teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca beni bugünlere yetiştiren fedakar anneme, birçok konuda olduğu gibi çalışma konusunda yılmaz azmini örnek alarak takdir ettiğim babam Ahmet GÜLER'e, varlıklarıyla ve destekleriyle yanımda olan ablalarım, eniştelere ve yeğenlerime, Tekin ailesinin kıymetli üyelerine ve özellikle akademik çalışmam konusunda benim yoğun iş temposundan tez çalışmasını unuttuğum, ertelediğim, rotamı şaşırdığım dönemlerde bana yardım ve kılavuzluk eden değerli eşime canı gönülden teşekkür ediyorum ve çalışmamı onlara armağan ediyorum.

Yunus Emre GÜLER

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
TABLolar DİZİNİ.....	x
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xi
RESİMLER DİZİNİ.....	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiv
GİRİŞ.....	1

1. BÖLÜM İMALATTA DIŞ DÖNÜŞÜMLER

1.1. Plastik Şekil Verme (Pşv).....	2
1.2. Artimli Sac Şekillendirme (Ass)	4
1.3. Temel Ass Yöntemleri.....	5
1.3.1. Tek Nokta Ass yöntemi (Single point incremental forming-SPIF).....	6
1.3.2. İki Nokta Ass yöntemi (Two point incremental forming).....	6
1.3.2.1. Alt destek kalıbı kullanarak (TPIF-partial die) Ass.....	6
1.3.2.2. Alt kalıp kullanarak (TPIF-Full die) Ass.....	7
1.3.3. Karşı takım kullanarak sayısal kontrollü şekillendirme (Incremental forming with....8 counter tool-IFWCT)	
1.4. Şekillendirici Takım.....	9
1.5. Yağlayıcı.....	10
1.6. Ass Yönteminin Kullanım Alanları.....	10

1.7. ASŞ yönteminin avantaj ve dezavantajları.....	12
1.8. ASŞ yönteminde kullanılan makineler.....	13
1.9. Taguchi Metodu.....	14
1.10. Anova testi/Varyans analizi.....	15

2. BÖLÜM

LİTERATÜR TARAMASI

2.1. Önceki Çalışmalar.....	16
-----------------------------	----

3. BÖLÜM

DENEYSEL ÇALIŞMA

3.1. Deney Akış Şeması.....	29
3.2. Malzeme Karakterizasyonu.....	29
3.3. Kullanılan Makine ve Ekipmanlar.....	31
3.3.1. CNC plazma Kesim.....	31
3.3.2. CNC lazer Kesim.....	32
3.3.3. CNC dikey işleme.....	33
3.3.4. CNC tornalama.....	34
3.3.5. CNC markalama ve kazıma makinası.....	35
3.3.6. Üç boyutlu tarama makinesi ve optik ölçüm cihazı.....	36
3.3.7. Sıcaklık ölçme cihazı.....	37
3.3.8. Yüzey kalitesi ölçüm cihazı (Profilometre).....	37
3.4. Deney Düzeneği.....	38
3.4.1. Tutucu kalıplar tasarım aşaması.....	40
3.4.2. Tutucu kalıplar yapım aşaması.....	41
3.5. Kullanılan Takım Bilgisi.....	44
3.6. İşlenecek Geometri	44
3.7. Takım Yolu Stratejileri.....	45
3.8. Yağlayıcı Seçimi.....	47

3.9. Deneylerin Planlanması.....	47
3.10. Belirlenen Parametreler.....	48

4. BÖLÜM

SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

4.1. Takım Sıcaklığı.....	52
4.2. İş Parçası ve Yağ Sıcaklığı.....	54
4.3. CAD data - 3D Tarama Sonuçlarının Karşılaştırılması.....	56
4.4. Yüzey Pürüzlülüğünün (Ra) İncelenmesi.....	61
4.5. Et Kalınlığındaki Değişimlerin İncelenmesi.....	63
SONUÇ/SONUÇ VE ÖNERİLER.....	66
KAYNAKLAR.....	67
EKLER.....	73
EK-1.....	74
EK-2.....	83

TABLolar DİZİNİ

Tablo	Sayfa
Tablo 3.1. AISI 430 Paslanmaz çeliğın kimyasal bileşimi.....	30
Tablo 3.2. AISI 430 Paslanmaz çeliğın mekanik dayanımı.....	31
Tablo 3.3. Plazma kesim makinesinin teknik özellikleri.....	32
Tablo 3.4. Lazer kesim makinesi teknik özellikleri.....	33
Tablo 3.5. Winner VMC 750 CNC Dik işleme tezgahı teknik özellikleri.....	33
Tablo 3.6. Atos Comact Scan 2M tarama cihazı teknik özellikleri.....	36
Tablo 3.7. Yüzey kalitesi ölçüm cihazı (Profilometre) teknik özellikleri.....	38
Tablo 3.8. SB 5016 yağın kimyasal özellikleri.....	47
Tablo 3.9. Deneysel çalışmalar için belirlenmiş değişken parametreler.....	48
Tablo 3.10. Deneysel çalışmalar için belirlenmiş sabit parametreler.....	48
Tablo 3.11. Taguchi metoduna göre yapılacak olan deney kodları ve parametreler.....	50
Tablo 3.12. Deneyi yapılan malzemelerin kısaltma ve kodlama sistemi.....	50
Tablo 4.1. Takım sıcaklığına etki eden parametrelerin önem sırası.....	52
Tablo 4.2. Takım Sıcaklığı ANOVA testi sonucu.....	54
Tablo 4.3. İş parçasında oluşan sıcaklığa etki eden parametrelerin önem sıralaması.....	55
Tablo 4.5. İş parçası sıcaklığı ANOVA testi sonucu.....	56
Tablo 4.6. Tarama sonuçlarına göre geometrik doğruluğu etkileyen parametrelerin.....	59
önem sıralaması	
Tablo 4.7. Geometrik doğruluk için ANOVA testi sonucu.....	60
Tablo 4.8. Yüzey pürüzlülüğüne etki eden parametrelerin önem sıralaması.....	61
Tablo 4.9. Yüzey pürüzlülüğü için yapılan ANOVA testi sonucu.....	62
Tablo 4.10. Duvardaki et kalınlığına etki eden parametrelerin önem sıralaması.....	63
Tablo 4.11. Duvardaki et kalınlığı için yapılan ANOVA testi sonucu.....	64

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1.1. Üretim Yöntemleri.....	1
Şekil 1.2. Dış Dönüşüm İmalat Şekilleri.....	2
Şekil 1.3. Gerilme- Birim Uzama (σ - ϵ).....	4
Şekil 1.4. Tek nokta ASŞ yönteminin elemanları ve işlem sıralaması.....	5
Şekil 1.5. Tek nokta ASŞ yöntemi pot çemberli ve pot çembersiz.....	6
Şekil 1.6. Kısmi alt destek kalıbı kullanarak ASŞ.....	7
Şekil 1.7. Karşı takım kullanarak sayısal kontrollü şekillendirme.....	9
Şekil 1.8. Taguchi metodu akış şeması.....	15
Şekil 2.1. Lezsak tarafından patenti alınan ASŞ prosesi.....	16
Şekil 2.2. Berghahn tarafından patenti alınan ASŞ prosesi.....	17
Şekil 2.3. İlk doğru ASŞ olarak kabul edilen Mason'un ASŞ uygulaması.....	18
Şekil 2.4. Orijinal hali Iseki tarafından hazırlanan ve eksenel simetrik olmayan parçalar için tek noktadan ASŞ işlemi	19
Şekil 2.5. Orijinali Matsubara tarafından önerilen İki noktadan artımlı sac..... şekillendirme işlemi (TPIF)	20
Şekil 2.6. Matsubara tarafından patenti alınmış düzeneğin orijinal hali.....	20
Şekil 2.8. Matsubara ve Amino tarafından patenti alınan İki noktadan..... artımlı sac şekillendirme düzenekleri	21
Şekil 3.1. Deney akış şeması.....	29
Şekil 3.2. Kodlama sıralaması ve deneylerde yapılmış bir deney numunesinin kodu.....	49
Şekil 4.1. Taguchi analizi sonucunda elde edilen sinyal/gürültü oranı	53
Şekil 4.2. Takım Sıcaklığı ANOVA testi sonucuna göre hazırlanmış.....	54
Şekil 4.3. İş parçasında oluşan sıcaklıkların Taguchi analizi sonucunda sinyal/gürültü grafiği	56

Şekil	Sayfa
Şekil 4.4. ANOVA testi sonucuna göre hazırlanmış gerçek deney sonuçları ve56 tahmini sonuçların normal olasılık grafiği	
Şekil 4.5. Şekillendirme işlemi yapılmış 3 numaralı deney numunesinin optik.....58 tarama ölçüm raporu	
Şekil 4.6. Şekillendirme işlemi yapılmış 12 numaralı deney numunesinin optik.....58 tarama ölçüm raporu	
Şekil 4.7. Tarama sonuçlarına göre Taguchi analizi sonucunda elde edilen.....60 sinyal/gürültü oranı grafiği	
Şekil 4.8. Geometrik doğruluğun ANOVA testi sonucuna göre deneysel sonuç.....61 değerlerinin ve tahmini değerlerin normal olasılık grafiği	
Şekil 4.9. Yüzey pürüzlülüğü ölçüm sonuçlarına göre Taguchi analizi.....62 sonucunda elde edilen sinyal/gürültü oranı grafiği	
Şekil 4.10. Duvarda meydana gelen incelme sonrası et kalınlığı ölçümleriyle.....64 Taguchi analizi sonucunda elde edilen sinyal/gürültü oranı grafiği	

RESİMLER DİZİNİ

Resim	Sayfa
Resim 1.1. ASŞ ile üretilmiş endüstriyel ürünler.....	5
Resim 1.2. Tam kalıp olarak dişi kalıp kullanılmış ASŞ yöntemi.....	8
Resim 1.3. Farklı çaplarda tasarlanmış takım geometrileri.....	10
Resim 1.4. Tofaş araba fabrikasında prototip.....	10
üretimi yapılan bir otomobil parçası	
Resim 1.5. a. Nissan otomobil fabrikası karşı destekli takım yöntemi.....	11
ile ASŞ (Autotv, 2020) b.Amino tarafından Honda için yapılan S800 kaputu	
Resim 1.6. FIGUR isimli bir ASŞ makine tezgahı üreticisinin imal ettiği.....	11
çamaşır makinası kazan arkası	
Resim 1.7. a) Kadavranın kafa tasına göre 3D tasarımı yapıp ASŞ yöntemi ile.....	12
imal edilip yerleştirilmiş. b) Yerleştirme uygulaması. c) Uygulama ve imalat öncesi simüle edilmesi	
Resim 1.8. Titanyum takma diş plakası.....	12
Resim 1.9. ASŞ'de kullanılan tezgahlar.....	14
Resim 3.1. 430 Paslanmaz çeliğin karakterizasyonu belirlemek için kullanılan.....	30
endüstriyel spektrometre cihazı	
Resim 3.2. CNC Plazma Kesim Makinesi.....	32
Resim 3.3. Yosoon Marka Lazer Kesim Makinesi.....	32
Resim 3.4. Winner VMC 750 Model CNC dikey işleme tezgahı.....	34
Resim 3.5. Torna makinesinde işlenmiş Ø12 mm radius 5 mm küresel şekillendirici takım..	35
Resim 3.6. a) Lazer markalama makinesi düzeneği.....	35
b) 2 mm çapında daire markalama yapılmış deney numunesi	
Resim 3.7. Ölçüm ünitesi Atos Comact Scan 2M.....	36
Resim 3.8. Uni-T UT300A+ Infrared lazerli termometre ile yağ sıcaklık ölçümü.....	37
Resim 3.9. MITECH MR200 profilometre cihazı.....	38
Resim 3.10. a) Alt tutucu ve içerisine geçirilmiş kestamid destek kalıbı, b) Üst tutucu.....	39

Resim 3.11. Deney düzeneğinin montajlı görünümü.....	39
Resim 3.12. İşleme payı bırakılarak kesimleri yapılmış kalıp parçaları.....	40
Resim 3.13. Deney düzeneği montajının CAD görüntüsü	41
Resim 3.14. Siemens NX'te işleme programı yapılmış kestamid.....	42
malzemenin takım yolu görüntüsü	
Resim 3.15. a) Mengene sıkıştırılmış ham kestamid kütük.....	42
b) Siemens Nx programında CAM işlemi yapılmış ve işlenmiş kestamid alt destek kalıbı	
Resim 3.16. Alt tutucu fikstürün iç ölçülerinin kestamid kalıba göre işlenmesi.....	43
Resim 3.17. a) Alt tutucu fikstüre alt destek kalıbının geçirilmesi.....	43
b) Üst fikstürü üzerine kapatılması, c) İşleme sacının yerleştirilmesi ve kalıbın vidalarla sabitlenmesi	
Resim 3.18. a) Ø 12 mm çapında HSS malzeme.....	44
b) CNC tornada hassas işlenmiş Ø12 mm R5 uçlu küresel HSS takım	
Resim 3.19. SolidWorks'te çizilmiş kesik koninin geometrik ölçülendirilmesi.....	45
Resim 3.20. Spiral takım yolu stratejisi.....	46
Resim 3.21. Concentric Zig takım yolu stratejisi a) geçiş yumuşatması b) genel görünüm...46	
Resim 3.22. Z-level takım yolu stratejisi.....	47
Resim 4.1. Aşş işlemi yapılmış deney numuneleri.....	57

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

t	Sac kalınlığı (mm)
R	Araç yarıçapı (mm)
F	Uygulanan kuvvet (N)
D	Kalıp çapı (mm)
h	Parçanın yüksekliği (mm)
μ	Sürtünme katsayısı
σ	Gerilme (MPa)
ϵ	Birim uzama (deformasyon)
v	Hız (mm/dk)
P	Basınç (MPa)
d	İtici çapı (mm)
α	İtici açısı (derece)

Kısaltmalar

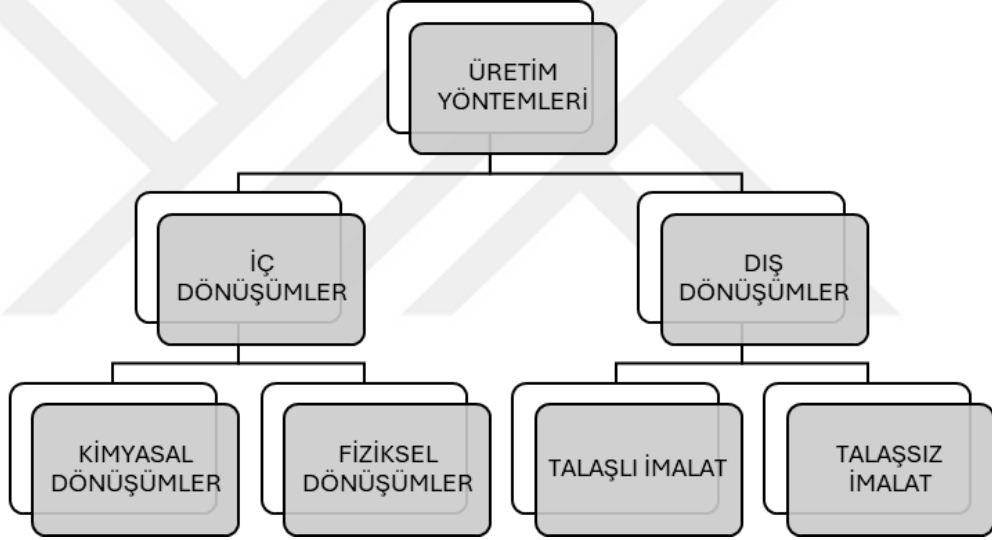
AISF	Artımlı Sac Şekillendirme (Incremental Sheet Forming)
SPIF	Tek Nokta Artımlı Şekillendirme (Single Point Incremental Forming)
TPIF	Çift Nokta Artımlı Şekillendirme (Two Point Incremental Forming)
CNC	Bilgisayarlı Sayısal Kontrol (Computer Numerical Control)
FEA	Sonlu Elemanlar Analizi (Finite Element Analysis)
CAD	Bilgisayar Destekli Tasarım (Computer-Aided Design)

CAM	Bilgisayar Destekli Üretim (Computer-Aided Manufacturing)
BHF	Blank Tutucu Kuvveti (Blank Holder Force)
RT	Referans Takımı (Reference Tooling)
DOE	Deney Tasarımı (Design of Experiments)
ANOVA	Varyans Analizi (Analysis of Variance)
L	Ortogonal Dizayn (Orthogonal Array)
S/N	Sinyal/Gürültü Oranı (Signal-to-Noise Ratio)
FA	Faktör Analizi (Factor Analysis)
OA	Ortogonal Dizayn (Orthogonal Array)
R	Tekrar Sayısı (Replication)
SS	Kareler Toplamı (Sum of Squares)
MS	Kareler Ortalaması (Mean Square)
DF	Serbestlik Derecesi (Degrees of Freedom)
F	F İstatistiği (F Statistic)
p	p-değeri (p-value)
SSB	Gruplar Arası Kareler Toplamı (Sum of Squares Between)
SSE	Hata Kareler Toplamı (Sum of Squares Error)
SSW	Gruplar İçindeki Kareler Toplamı (Sum of Squares Within)
S	Model tahminlerinin gerçek değerlerden ne kadar farklı olduğunu ölçen karekök ortalama kare hata (RMSE) değeri.
R-sq (R ²)	Modelin, bağımlı değişkendeki varyansı yüzdesini ne kadar açıkladığını gösteren R-kare değeri.
R-sq(adj)	Bağımsız değişken sayısını dikkate alarak düzeltilmiş R-kare değeri. Modelin, bağımlı değişkendeki düzeltilmiş varyans yüzdesini gösterir.



GİRİŞ

İmalatın temel amacı, çeşitli sektörlerde ihtiyaç duyulan ve ergonomik olarak tasarlanmış ürünlerin en az maliyet, en yüksek kalite ve en verimli yöntemle üretilip ihtiyaç duyulan alana tedarik edilmesidir. Üretimin temel mantığı ve yöntemi, hammaddenin istenilen ve tasarlanmış kimyasal veya fiziksel özelliklere şekil verilerek istenen ürüne dönüştürülmesidir. Üretim (imalat) yöntemleri temel olarak, maddenin kimyasal değişime uğradığı yöntemlerde iç dönüşüm, boyutsal ve tasarım olarak değiştirilmesi ile dönüştürülmesiyle de dış dönüşüm ana başlıkları altında açıklanabilir. İmalatta dış dönüşümler, literatürde genellikle şekil verme olarak adlandırılır. Şekil verme işlemleri, talaşlı ve talaşsız imalat yöntemleri olarak ikiye ayrılır. Eğer malzemenin ana kütlelerinden bir azalma, eksilme meydana geliyorsa bu talaşlı imalat yöntemi olarak adlandırılırken, malzemenin ana kütlelerinden bir azalma meydana gelmeden bir şekillendirme işlemi yapılıyorsa bu talaşsız imalat yöntemi olarak adlandırılmaktadır.



Şekil 1.1. Üretim Yöntemleri

1. BÖLÜM

İMALATTA DIŞ DÖNÜŞÜMLER

Bu çalışmanın konusunu da içerisinde barındıran imalat yöntemleri olan dış dönüşümler aşağıdaki şemada detaylı olarak incelenmiştir. Talaşsız imalat olarak değerlendirilen plastik şekil verme işleminin alt başlıklarının altına çalışmanın konusu olan hızlı prototipleme ve ek kalıp gerektirmeyen artımlı sac şekillendirme (ASS) işlemi de eklenmiştir.

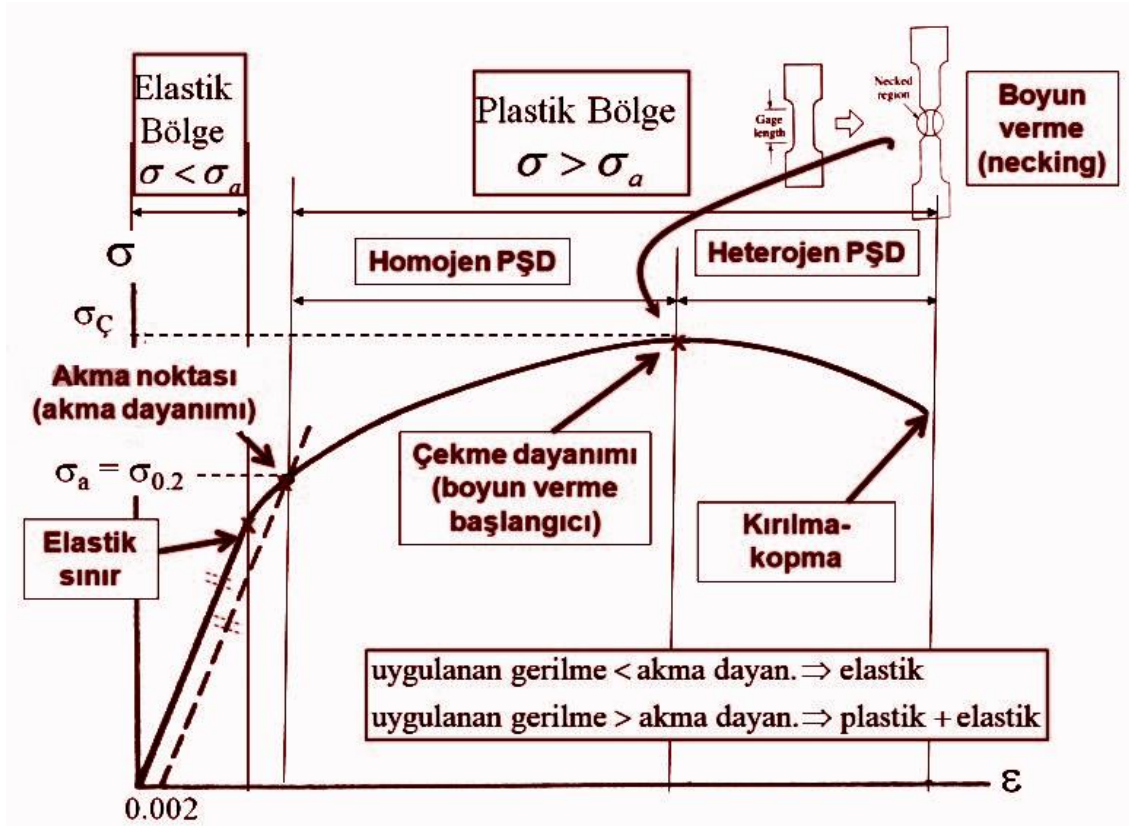
TALAŞLI İMALAT	TALAŞSIZ İMALAT
<i>Alışılmış İmalat Yöntemleri:</i> <ul style="list-style-type: none">- Tornalama- Frezeleme- Vargelleme- Delik Delme- Broşlama- Taşlama	Döküm: <ul style="list-style-type: none">- Kum Döküm- Kokil Döküm- Basınçlı Döküm- Savurma Döküm- Alçı Döküm- Hassas Döküm- Sürekli Döküm
<i>Alışılmamış İmalat Yöntemleri:</i> <ul style="list-style-type: none">- Mekanik Enerji Kullanılan- Kimyasal Enerji Kullanılan- Isıl Enerji Kullanılan- Elektro-Kimyasal Enerji Kullanılan	Plastik Şekil Verme: <ul style="list-style-type: none">- Haddeleme- Dövme- Ekstrüzyon- Derin Çekme- Tel Çekme- Sıvama- Artımlı Sac Şekillendirme Birleştirme: <ul style="list-style-type: none">- Kaynak- Lehimleme- Sinterleme- Presleme- Perçinleme- Vidalama- Yapıştırma

Şekil 1.2. Dış Dönüşüm İmalat Şekilleri

1.1. Plastik Şekil Verme (Pşv)

Metal malzemelerin katı haldeki akma dayanımlarından daha büyük gerilmelere maruz bırakılarak farklı şekillerde kalıplar kullanılarak şeklinin değiştirilmesi işlemine plastik şekillendirme (PŞV) adı verilmektedir. Plastik şekillendirme söz konusu olduğunda iş parçasının mekanik dayanım açısından nispeten zayıf, süneklik açısından ise oldukça esnek olması gerekir. PŞV proseslerinde kalıcı olan ve malzemenin akma dayanımının üzerinde oluşan plastik deformasyonun uygulanması çok önemlidir. Bu alanda malzemede pekleşme olarak da bilinen plastik deformasyon sertleşmesi gerçekleşir. Elastik bölgede atomlar arası bağlar sağlam kalır ancak uygulanan kuvvet veya stres yönünde gerilir. Sonuç olarak, yük kaldırıldığında nesne orijinal konumuna geri döner. Plastik bölgede bağlar kırılır ve atomlar

yüzey boyunca kayarak komşu atomlarla yeni bağlar oluşturarak kendilerini yeniden düzenlerler. Sonuç olarak kalıcı bir şekil değişikliği meydana gelir. Şekil değiştikçe, kayma mekanizmasının ana bileşeni olan dislokasyonların birikmesi nedeniyle pekleşmeye neden olması nedeniyle giderek zorlaşır. Şekil değişikliğinin bozulmadan kalmasını sağlamak için sürekli olarak ek baskı uygulamak çok önemlidir. Aslında deformasyon arttıkça malzemenin akma dayanımında artmaya devam eder. Ortalama akma dayanımı olarak bilinen tutarlı bir değerin genellikle PŞV süreçlerindeki kuvvet ve güç hesaplamalarında kullanılmasının nedeni budur. Çekme testinden elde edilen gerilim-gerinim eğrisi, metallerin PŞV proseslerindeki davranışlarını anlamak açısından oldukça değerlidir (Erdin, 2020). Akma grafiği aşağıdaki şekilde gösterilmiştir.



Şekil 1.3. Gerilme- Birim Uzama (σ - ϵ) (Coşkun, 2008).

Elastik bölge; E (E: Elastiklik Modülü [GPa])

Plastik bölge; n K (K: Dayanım Katsayısı [MPa], n: Pekleşme Üsteli [-])

Plastik şekil verme işleminin etkinliği açısından sıcaklık, şekillendirme hızı, pekleşme davranışı ve sürtünme gibi faktörler oldukça önemlidir. Bazı metal malzemelerde bu faktörler şekillendirilebilirliği artırır ancak bazı durumlarda imalat yöntemini zaman ve ekonomi açısından dezavantajlı konuma getirmektedir. Plastik şekil verme de kendi içerisinde hacimsel plastik şekil verme ve sac plastik şekil verme olarak ikiye ayrılır. Plastik şekil verme işleminin avantajları;

- Yüksek hassasiyet sağlamaktadır,
- Düşük toleranslarda ve hata oranlarında işleme gerçekleştirilebilir,
- Yüksek yüzey kalitesi,
- Daha mukavemetli ve sert ürünler elde edilir,
- Tane yönlenmesine bağlı olarak belirli yönde mekanik özellikler daha iyi olur,
- Eğer soğuk plastik şekil verme işlemi yapılıyor ise seri imalata uygundur.

Dezavantajları;

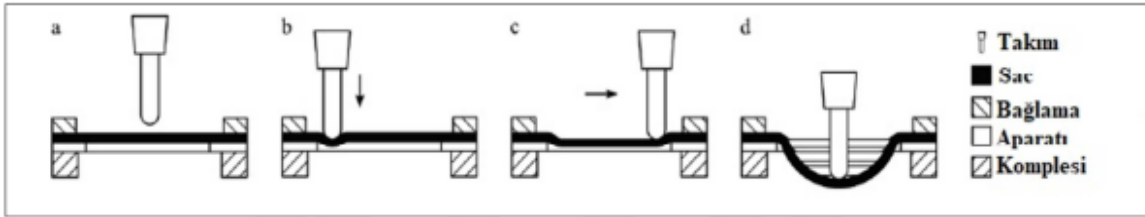
- Soğuk PŞV işlemi yapılıyorsa yüksek güce ihtiyaç duyulur,
- Soğuk PŞV de pekleşme nedeniyle işlenebilirlik düşük olur,
- PŞV öncesi yüzey temizlenmelidir,
- İşlem sonrası tavlama gerekebilir,
- Sıcak PŞV işlemlerinde ısıtmaya ihtiyaç duyulduğundan ısıtma ve enerji gereksinimleri yüksektir.

Plastik şekil verme işlemi, dezavantajlarının yanısıra gerek seri üretime uygunluk, gerekse zaman ve maliyet açısından avantajlı olduğu durumlardan dolayı endüstride çok yaygın kullanılmaktadır. Bu çalışmanın konusu olan artımlı sac şekillendirme (ASŞ) yöntemide malzemeye akma dayanımını aşan kuvvetler ve çeşitli parametrelerle işlem yaparak gerçekleştirildiğinden ve malzemedен herhangi bir talaş kaldırma işlemi olmadığından plastik şekil verme işlemi olarak gruplandırılır.

1.2. Artımlı Sac Şekillendirme (Asş)

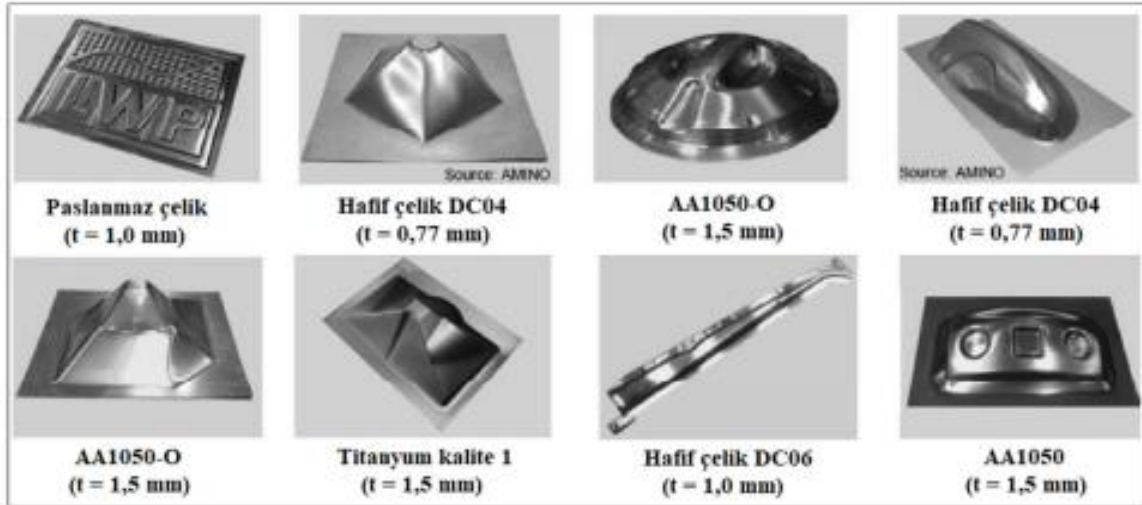
Bir imalatta üretim süresi önem taşıdığı kadar önemli olan bir diğer unsurda maliyettir. Çeşitli sektörlerde farklı kullanım alanları için sac metallere parçalar üretilir. Bu parçaların imalatı için bir dişi ve bir erkek kalıba ihtiyaç duyulur. Parça geometrisi, yüzey hassaslığı, şekil verme derinliği, geometrik toleranslara bağlı olarak bu kalıba çeşitli kalıp elemanları ve bir pot çemberi de ilave etmek gerekir. Bütün bunlar sağlandığında bu parçanın imalatı seri üretime uygun hale gelir zaman ve işçilik bakımından avantajlı bir üretim yöntemi olur. Ancak eğer bir prototip gereksinimi duyuluyorsa veya bahsedilen imalat adeti kalıp maliyetlerini kurtarmıyorsa daha uygun maliyette hızlı prototiplemeye uygun, geometrik rotasyonlara hızlı ve ucuz cevap verebilecek bir imalat yöntemi gerekir. Artımlı sac şekillendirme işlemi de bize bu imkanı sağlar. Artımlı sac şekillendirme işleminde sac plaka tutucular yardımıyla gerdirilerek işlem esnasında oynamaması sağlanır. Tutucular bir CNC dik işleme tezgahına, robot CNC tezgahlarına veya bu işlem için özel olarak yapılmış makinelere bağlanır. Tutturulmuş plaka, daha önceden CAD programında tasarımı yapılmış olan geometriye göre, yapılan CAM programıyla işlenir. Sanki malzeme üzerinden belirli devir ve hızda, belli bir aşığı adım ilerlemesiyle talaş kaldırıyor gibi takım yoluna göre takım saca baskı uygulayarak bölgesel bir plastik deformasyona uğraması sağlanır. İşlem tamamlanır ve sac parçaya yapılan

tasarım işlenmiş olur. İşlem esnasında sac parçayı kesmeyecek radius uçlu tam küre veya yarım küre takım kullanılır. Takım çapı ve takım geometrisi, işlenecek formun geometrik değerlerine göre belirlenir. Takım sürtünmesini azaltmak amacıyla küre takım ucuna bir bilya yerleştirilerek döner bilyalı sistemde uygulanabilir. Bu işlem yapılırken ısınmadan kaynaklı takım aşınmasını önlemek ve yapılan sıvama işleminde sürtünmeyi azaltıp şekillendirilebilirliği artırma amacıyla yağ kullanılması avantaj sağlar. Şekil 1.4.'te ASŞ yöntemlerinden tek nokta artımlı sac şekillendirme yöntemine dair kullanılan ekipmanlar ve işleme sıralaması gösterilmiştir.



Şekil 1.4. Tek nokta ASŞ yönteminin elemanları ve işlem sıralaması (Afanso, 2017).

Resim 1.1'de ASŞ yöntemiyle çeşitli malzeme ve farklı et kalınlıklarından farklı parametrelerle üretilmiş örnek parçalar verilmiştir.



Resim 1.1. ASŞ ile üretilmiş endüstriyel ürünler (Bambach, 2008).

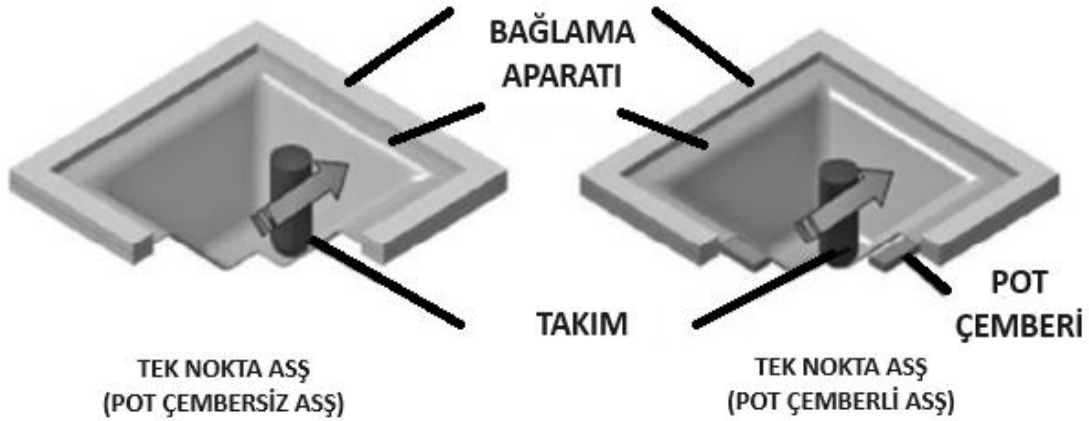
1.3. Temel ASŞ Yöntemleri

ASŞ yöntemi kalıpsız olarak sadece bağlama aparatları kullanılarak takımın hazırlanan üç boyutlu modele göre saca tek taraftan baskı yaparak (Tek Noktadan ASŞ) uygulanabilmesine karşın bu uygulamada sacın geri yaylanması vs. gibi durumların önüne geçmek amacıyla parçanın altına eklenecek ikinci bir kalıpla (iki nokta ASŞ), daha yüksek geometrik doğruluk ve daha düzgün yüzey hassasiyeti elde edilebilir. ASŞ kalıp kullanılıp kullanılmamasına, karşıdan hareketli ikinci bir takım olup olmamasına göre üçe ayrılır.

1.3.1. Tek nokta aş yöntemi (single point incremental forming-spif)

Saca temas eden nokta sayısı, artımlı sac şekillendirme sürecinde çeşitlilik unsurlarından birisidir. Yalnızca tek şekillendirici takım kullanıldığında temas sayısı bir noktadan olur, karşı takım veya destekleyici alt kalıp kullanıldığında ise temas noktası ikiye çıkmaktadır. Bu yöntemlerden ilki SPIF tek noktada kontak esasına dayanan, kalıp veya destek gerektirmeyen diğer yöntemlere göre daha ucuz bir yöntemdir. Tek nokta ile form verme işlemiyle sac sıvama (spinning) ve gerdirmeli form (stretch forming) verme tekniklerinin birleştirilmesine ilave olarak aksel simetrisi bulunmayan parçalara da şekillendirme işlemi yapılabilmektedir (Franzen, 2008).

Düz sac, detayları Şekil 1.5'te gösterilen metal karkas üzerine, tutucu plaka ile sabitlenir. CNC dik işleme merkezi ya da frezede, küre uçlu takım kullanılarak form verme işlemi yapılır. SPIF yönteminde, sac altında destek ya da kalıp kullanılmadığından en az maliyetli AŞŞ sürecidir (Durgun, 2015).



Şekil 1.5. Tek nokta AŞŞ yöntemi pot çemberli ve pot çembersiz (Bambach, 2008).

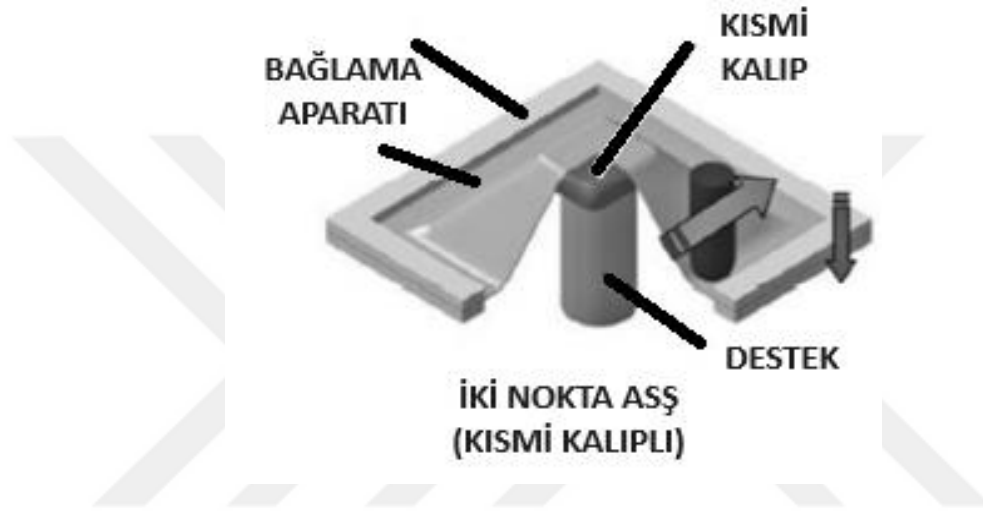
1.3.2. İki nokta aş yöntemi (two point incremental forming)

İki noktadan temas ile şekillendirmede (TPIF) sac, Z ekseni yönünde dikey olarak hareket edebilen bir tutucu plaka ile sabitlenir. Tek nokta ile şekillendirme yöntemine benzer şekilde, takım dış konturdan başlar, geometrinin üst yüzeyinden alt yüzeyine doğru hareket eder. İki noktadan şekillendirme prosesi, kısmi kalıp olarak adlandırılan alt destek kalıplı ve tam alt kalıplı olmak üzere ikiye ayrılır.

1.3.2.1. Alt Destek Kalıbı Kullanarak (TPIF-Partial Die) AŞŞ

Tek noktadan temas ile şekillendirme (SPIF - Single Point Incremental Forming) yönteminde, sacın çevresini taşıyan alt plakanın işlevini, sacın altında yer alan destek kalıbı üstlenir. Destek

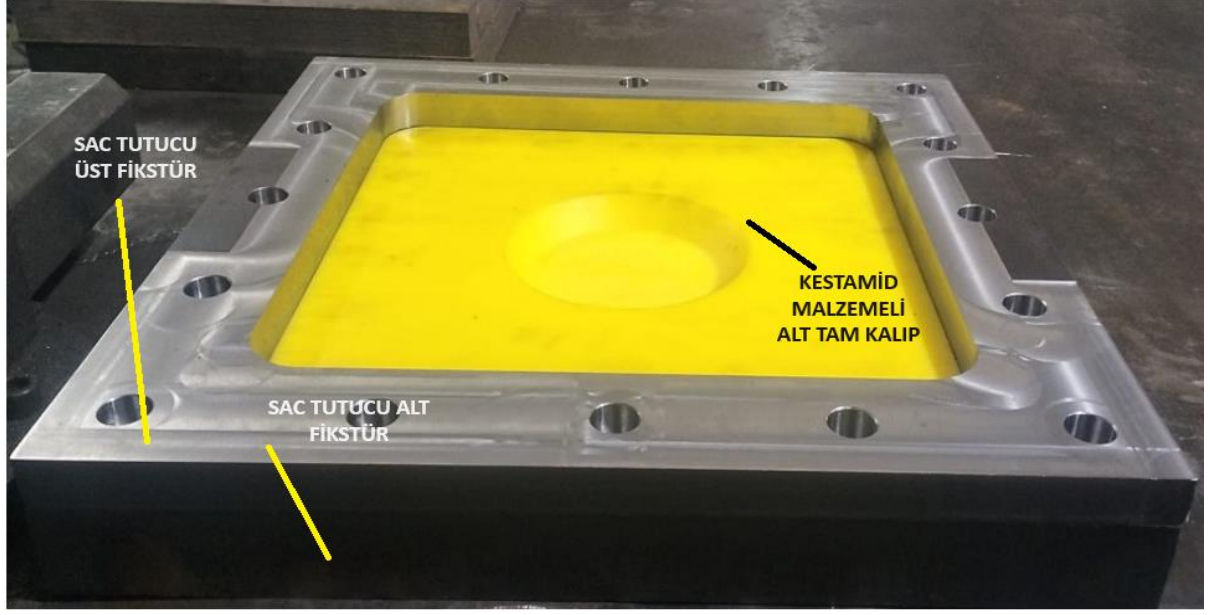
kalıbı, üretilecek parçanın geometrisine özgü olmadığında, farklı parçaların üretiminde de kullanılabilir. Bu kalıbın amacı, parçanın geometrisini desteklemek ve bu sayede SPIF yöntemine kıyasla daha hassas bir şekillendirme elde etmektir. Şekillendirme sürecinde, takım CAD verilerine göre belirlenmiş yolları izler ve sac, takım ile destek kalıbı arasında şekillendirilir. Sac tutucu plaka, her bir katmanın şekillendirilmesi tamamlandığında, -Z yönünde hareket ederek yeni katmanın şekillendirilmesine imkan tanır. Bu şekilde, katmanlar halinde şekillendirme yapılarak istenilen nihai parça geometrisi elde edilir. Destek kalıbının kullanımı, özellikle karmaşık ve hassas parça üretimlerinde önemli avantajlar sağlar (Bambach, 2008).



Şekil 1.6. Kısmi alt destek kalıbı kullanarak AŞŞ (Bambach, 2008).

1.3.2.2. Alt Kalıp Kullanarak (TPIF-Full Die) AŞŞ

Bu yöntemde, alt destek yerine parça şekline göre hazırlanmış bir kalıp kullanılır. Alt kalıp kullanıldığı için bu yöntem kalıpsız şekillendirme olarak adlandırılmasa da, prototip ve düşük adetli üretimler için avantajlıdır. Çünkü sadece tek taraflı bir kalıp gereklidir, bu da maliyet ve zaman tasarrufu sağlar. Şekillendirme sırasında sac, kalıp ve takım arasında kaldığı için, bu yöntem diğerlerine göre daha yüksek geometri doğruluğu sunar (Bambach, 2008).



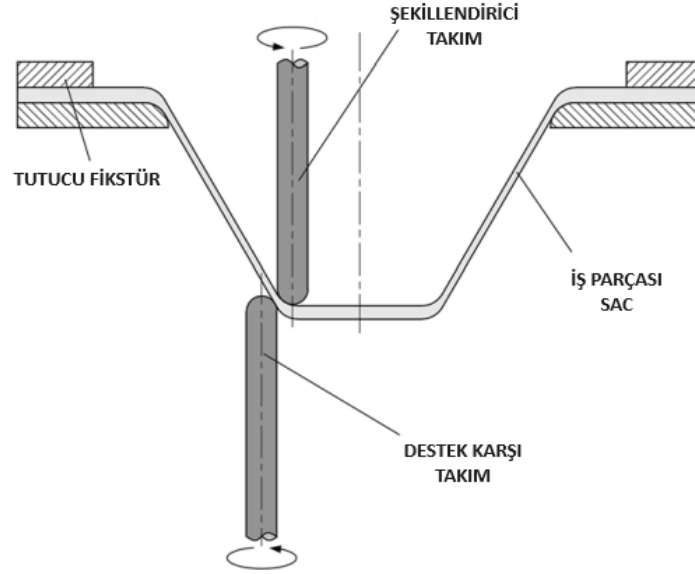
Resim 1.2. Tam kalıp olarak dişi kalıp kullanılmış ASŞ yöntemi

Bu yöntemde parçaya özel alt kalıp kullanımı, kalıp malzemesi ve üretimi dikkate alındığında, konvansiyonel yöntemlerdeki kadar olmasa da ekstra maliyetlere yol açar. İşçilik maliyetleri sabit kalırken, kalıp maliyeti seçilen malzemeye (çelik, alüminyum, plastik, ahşap veya köpük) göre değişiklik gösterir. Ayrıca, kalıplar sadece belirli parçaların üretiminde kullanılabildiği için, üretim esnekliği tek noktadan ASŞ ve parçalı kalıplı ASŞ gibi diğer yöntemlere göre daha düşüktür (Bambach, 2008). Bu çalışmada da Resim 1.2 'de gösterilen alt kalıp olarak maliyet ve dayanım açısından uygunluğundan ve kolay işlenebilirliği yönünden dolayı plastik kökenli bir malzeme olan kestimid dişi alt kalıp kullanılmıştır.

1.3.3. Karşı takım kullanarak sayısal kontrollü şekillendirme (Incremental forming with counter tool-IFWCT)

Bu yöntemde, tek nokta temas yöntemiyle şekillendirmeden farklı olarak, alt plaka yerine üstteki takım ile senkronize hareket eden bir karşı takım kullanılır (Şekil 1.7.). Bu süreçte karşı takım, alt destek kalıbı ya da alt kalıp işlevini yerine getirir. Karşı takım, her parça için alt kalıp veya destek gibi kullanılabildiğinden dolayı esnek kalıp (flexible support) olarak da adlandırılır. Şekillendirme işlemi, iki takımın koordineli hareketiyle gerçekleştirildiğinden, bu yöntem robotlar veya ikinci takımın hareketini simüle edebilen çok eksenli işleme merkezlerinin kullanımını gerektirir. Bu, şekillendirme sürecinin hassasiyetini ve verimliliğini artırır. Karşı takım kullanarak yapılan şekillendirme yönteminde, sac tutucu plaka Şekil 2'de gösterildiği gibi Z yönünde hareket edebilir veya sabit bir konumda kalabilir. Bu yöntemde, karşı takımın kullanımı, parçanın alt destek kalıbına ihtiyaç duymadan şekillendirilmesini sağlar. Bu, prototip ve düşük adetli üretimler için özellikle avantajlıdır çünkü her parçaya özel bir alt kalıp üretme gereksinimini ortadan kaldırır. Bununla birlikte, karşı takımın her bir parça

için uyarlanabilir olması, üretim sürecinde esneklik sağlar ve farklı parça geometrilerinin aynı temel ekipmanla şekillendirilmesine olanak tanır. Bunun yanı sıra, iki takımın senkronize hareketi, şekillendirme işlemi sırasında sacın her iki yüzeyinin de kontrol edilmesini sağlar. Bu durum, parçanın geometri doğruluğunu artırır ve daha yüksek kalite elde edilmesine katkıda bulunur. Sonuç olarak, bu yöntem, hem maliyet etkinliği hem de üretim hassasiyeti açısından geleneksel yöntemlere kıyasla önemli avantajlar sunar (Bambach, 2008).



Şekil 1.7. Karşı takım kullanarak sayısal kontrollü şekillendirme (Bambach, 2008).

1.4. Şekillendirici Takım

Artımlı sac şekillendirme işleminde yarım küre, radius uçlu düz takım, yuvarlanır bilyalı takım veya farklı geometrilerde yumuşak, keskin olmayan yüzeyli takımlar tercih edilmelidir. Takım çapını belirlerken takım çapı büyüdükçe karmaşık geometrili parçalarda şekillendirilebilirliğin azaldığı ancak imalat süresinin kısaldığı göz önüne alınmalıdır. Duvar açısı arttıkça takım çapı küçültülmeli ve aşağı adım değeri küçültülmelidir. Böylelikle daha düşük yüzey pürüzlülüğü ve daha yüksek geometrik tolerans elde edilebilir. Şekillendirici takım seçilirken sürtünme kaynaklı takım aşınması olacağından dolayı ısıl dayanımı yüksek, mekanik özellikleri yüksek, HSS, tungsten alaşımli takımlar karbür uçlu küre takımlar vb. gibi takımlar tercih edilmelidir. Şekillendirme esnasında kullanılacak yağlayıcı, sürtünmeyi ve sıcaklığı düşüreceğinden dolayı takım ömrünü uzatıp şekillendirilebilirliği artırır. ASŞ işleminde kullanılan takımlar Resim 1.3.'te verilmiştir.



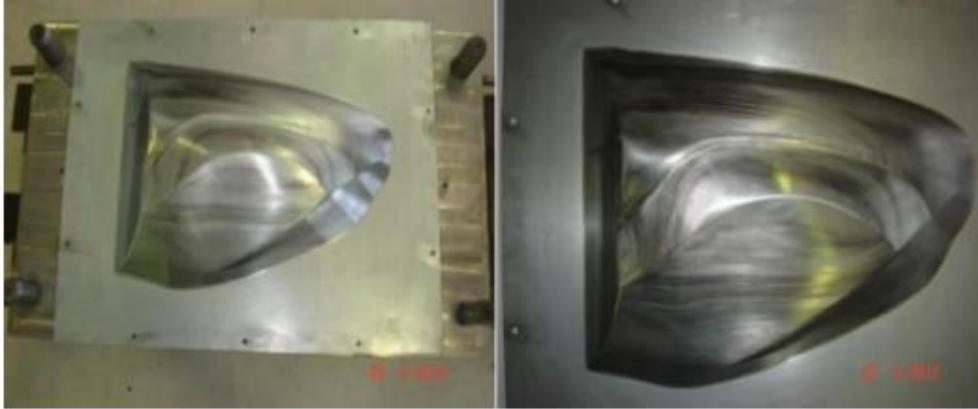
Resim 1.3. Farklı çaplarda tasarlanmış takım geometrileri (Hirt, 2004)

1.5. Yağlayıcı

Çoğu imalat yönteminde, talaşlı imalatta, derin çekme, sıvama işlemlerinde hem şekillendirilebilirliği kolaylaştırmak hem de takım ve malzeme arasındaki ısı dağılımını eşitlenmesini sağlayarak takım ömrünü ve malzeme yüzey kalitesini uzatmak amacıyla yağlayıcı maddeler kullanılmaktadır. Literatürde de ASŞ işlemlerinde yaygın olarak SAE-30, AS-40, Finerol B5746 gibi endüstriyel yağlar kullanılmıştır (Trzpiecinski, 2022). Yapılan çalışmalar sonucunda yağlamanın yüzey pürüzlülüğünü büyük ölçüde etkilediğini bulmuşlardır.

1.6. ASŞ Yönteminin Kullanım Alanları

1. Otomotiv Endüstrisi: Araba gövdeleri, kaportalar, şasi parçaları ve iç mekan detayları gibi birçok otomobil parçası artımlı sac şekillendirme yöntemiyle üretilebilir. Yeni bir model kalıbı yapılmadan önce prototip aşamasında hızlı şekilde örnek parça üretilebilir.

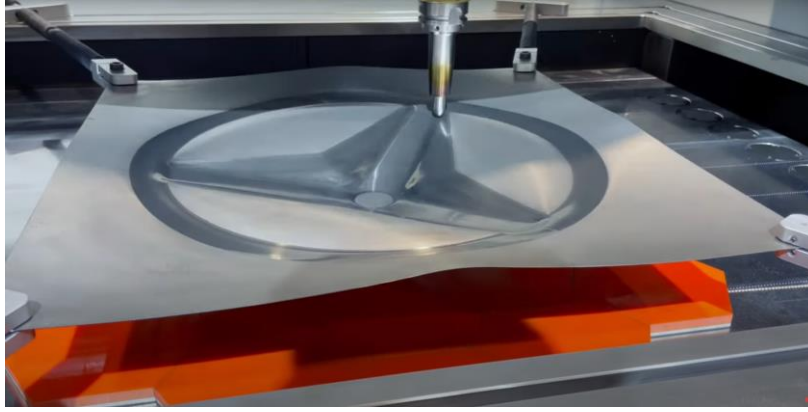


Resim 1.4. Tofaş araba fabrikasında prototip üretimi yapılan bir otomobil parçası (Durgun, 2012).



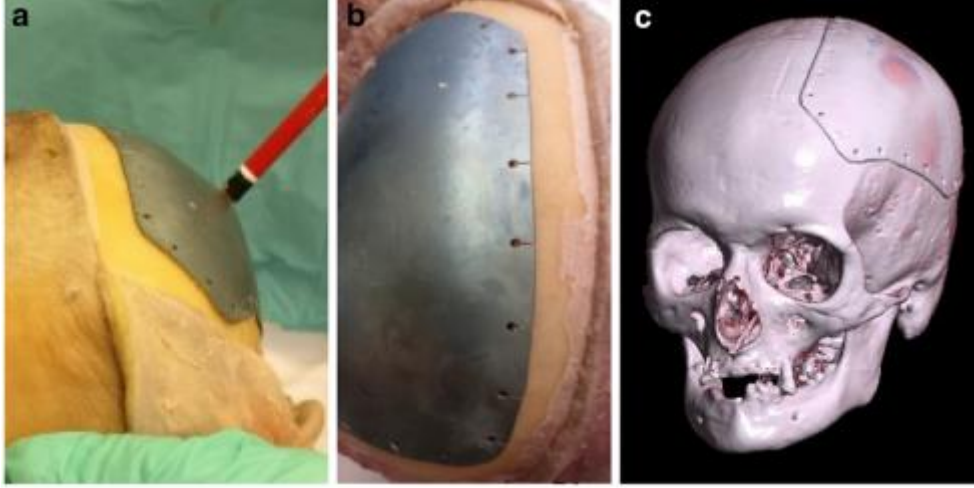
Resim 1.5. a. Nissan otomobil fabrikası karşı destekli takım yöntemi ile ASŞ (Autotv, 2020).
b. Amino tarafından Honda için yapılan S800 kaputu (Maki, 2006).

2. Beyaz Eşya Endüstrisi: Buzdolapları, çamaşır makineleri, bulaşık makineleri gibi beyaz eşyaların dış gövdeleri ve parçaları bu yöntemle şekillendirilir.



Resim 1.6. FIGUR isimli bir ASŞ makine tezgahı üreticisinin imal ettiği çamaşır makinası kazan arkası (Desktopmetal, 2023).

3. Elektronik Endüstrisi: Bilgisayar kasaları, televizyon panelleri, cep telefonu kasa ve parçaları gibi elektronik cihazların dış kaplamaları artımlı sac şekillendirme ile üretilebilir.
4. Gıda Endüstrisi: Endüstriyel mutfak ekipmanları, gıda işleme makineleri gibi birçok gıda endüstrisi ekipmanı artımlı sac şekillendirme yöntemiyle üretilebilir.
5. İnşaat Endüstrisi: Çatı kaplama malzemeleri, metal çatılar, cephe kaplamaları gibi inşaat malzemeleri bu yöntemle üretilebilir.
6. Mobilya Endüstrisi: Metal mobilya parçaları, ofis mobilyaları gibi birçok mobilya parçası artımlı sac şekillendirme yöntemiyle üretilir.
7. Havacılık ve Uzay Endüstrisi: Uçak gövdeleri, kanatları, uzay araçları gibi havacılık ve uzay endüstrisi parçaları da bu yöntemle üretilebilir.
8. Biyomedikal alanda şahsa ait özel tasarımlar ve hassas toleranslar gerektiğinde kullanılabilir. Literatürde buna örnek çalışmalar vardır.



Resim 1.7. a) Kadavranın kafa tasına göre 3D tasarımı yapıp ASŞ yöntemi ile imal edilip yerleştirilmiş. b) Yerleştirme uygulaması. c) Uygulama ve imalat öncesi simüle edilmesi (Leuven, 2017).



Resim 1.8. Titanyum takma diş plakası (Tanaka, 2005).

1.7. ASŞ Yönteminin Avantaj Ve Dezavantajları

Avantajları:

1. Düşük adetli üretimlerde, kalıp maliyetlerinin ortadan kalkması veya minimize edilmesi nedeniyle parça başı maliyetler azalır.
2. Konvansiyonel sac şekillendirme yöntemlerinde gerekli olan yüksek kapasiteli presler gibi cihazlara ihtiyaç duyulmaz; işlem, bir CNC dik işleme tezgahında kolayca uygulanabilir.
3. Deformasyon noktasal olarak gerçekleştirildiği için yüksek kuvvet ve güç gereksinimleri olmaz; bu da daha düşük maliyetli takımların kullanılmasına ve enerji tüketiminin azalmasına olanak tanır.
4. Kalıp gereksiniminin düşük olması, kalıp üretimi için gereken enerji ve malzemenin tasarruf sağlar. Kalıpların olmaması, geri dönüşüm sürecinde kullanılacak enerji ve atık oluşumunu azaltarak ASŞ'yi çevresel açıdan daha sürdürülebilir bir yöntem haline getirir.

5. ASŞ yöntemi, esnek üretim imkanı sunar. Üretilen parçalarda yapılacak revizyonlar, ek maliyet ve zaman kaybı olmadan gerçekleştirilebilir. Aynı tezgah üzerinde yalnızca takım yolunu değiştirerek farklı ürünler üretilebilir.
6. Konvansiyonel yöntemlerde tasarım sonrası gereken kalıp tasarımı, kalıp imalatı ve kalıp alıştırmaları gibi süreçler zaman alıcıdır. ASŞ’de, tasarımdan doğrudan takım yolu çıkarılarak hızlıca üretime geçilebilir.
7. ASŞ ile şekillendirmede, şekillendirme sınırları konvansiyonel yöntemlerle elde edilebilecek şekillendirme sınırlarına göre çok daha yüksektir.
8. Konvansiyonel imalat yöntemleri ile üretilemeyecek parçalar ve detaylar ASŞ ile üretilebilmektedir.

Dezavantajları:

1. Parça boyutlarının artması, geri yaylanma problemlerinin daha belirgin hale gelmesine neden olur. Bu da büyük parçalarda istenen ölçüsel toleransları elde etmeyi zorlaştırır.
2. Seri imalat yöntemlerine kıyasla ASŞ’nin imalat süresi uzundur. Bu nedenle mevcut koşullarda seri imalata uygun değildir.
3. Farklı şekillendirici takım ucu boyutları ve takım yolları, çeşitli geometrik toleranslara yol açar. Takım yolu ve takım boyutunu belirlemek için yapılan sayısal analizlerin simülasyon süreleri uzun olabilir.
4. Radyus ve büküm yerlerinde geometrik doğruluk azalır.
5. Parça boyutları, tezgahın limitlerine bağlıdır.
6. Dik duvarların imalatı, özel takım yolu tasarımları gerektirir (Durgun, 2012).

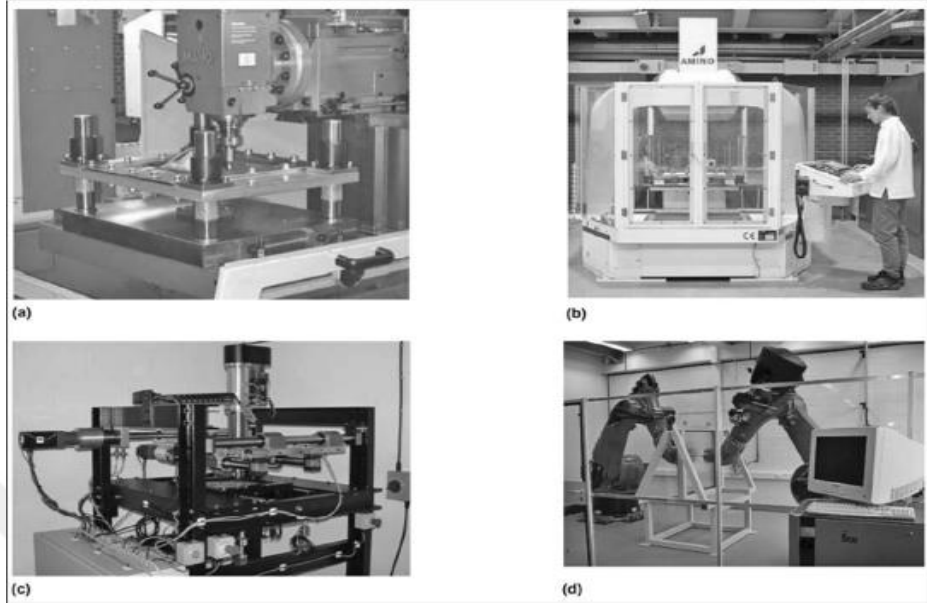
1.8. Asş Yönteminde Kullanılan Makineler

Belirlenen takım yolu boyunca şekillendirme yapan bir takım ile herhangi bir bilgisayar kontrollü tezgahta ASŞ yöntemleri kullanılabilir. Aşağıda en çok tercih edilen tezgah türleri sıralanmıştır:

1. Üç eksen CNC dik işleme merkezleri:
 - ASŞ yöntemlerinin kolay adapte edilebilmesi ve yaygın bulunması nedeniyle en çok tercih edilen tezgah türüdür.
2. Endüstriyel robotlar:
 - Esnekliği ve geniş çalışma alanı nedeniyle tercih edilir.
3. Altıayaklılar:
 - Karmaşık ve büyük boyutlu parçaların üretiminde kullanılır.
4. Özel tasarım tezgahlar:
 - Parçanın ebatları ve üretimin esnekliği söz konusu olduğunda geliştirilir.

Tezgah tipi seçiminde kullanılabilirlik, hız, çalışma hacmi, sağlamlık ve maliyet gibi kilit faktörler vardır. Bir çok firmada bulunması ve ASŞ yöntemlerinin kolay adapte edilebilmesinden dolayı en çok tercih edilen tezgahlar üç eksen CNC dik işleme tezgahlarıdır.

Ancak parçanın ebatları ve üretimin esnekliği söz konusu olunca sadece bu yöntemlere özel tezgahlarda geliştirilmektedir. Resim 1.9' da farklı tezgahlar görülmektedir.



Resim 1.9. ASŞ'de kullanılan tezgahlar

a) CNC dik işleme tezgahı, b) AMINO firmasına ait özel üretim makine, c) ASŞ yönteminin uygulanabilmesi için Cambridge Üniversitesi tarafından üretilmiş bir tezgah, d) İki robotlu, karşı takım destekli robot şekillendirme sistemi (Bambach, 2012).

1.9. Taguchi Metodu

Geleneksel deney tasarımlarında belirlenen tüm parametrelere, faktörlere, değişken ve sabitlere göre bir deney tasarımı oluşturulduğunda yapılması gereken deney sayısı tekrar sayısı da göz önüne alındığında çok yüksek sayılarda olacaktır. Bazı uygulamalarda bu hem gereksiz hem de zaman ve maliyet kaybına yol açmaktadır. Taguchi deneysel tasarımda ise birden fazla parametrenin göz önünde bulundurulması sağlamakla birlikte olması gerekenden daha az sayıda deney yaparak ve bu deneysel verilerin sonuçlarına göre yapılmayan deneylerin sonuçlarının tahmini metoduna dayanarak en optimum sonucun elde edilmesini sağlamaktadır.



Şekil 1.8. Taguchi metodu akış şeması (Pınarbaşı, 2021).

Deneyler yapıldıktan sonra Taguchi metodunda sinyal gürültü oranları analiz edilerek sonuçlar yorumlanır. Gerçek deney sonuçları ve yapılan tahmini sonuçlara göre optimum değerler saptanır. Bu çalışmada da Taguchi metodundan faydalanılmıştır. Belirlenen parametre ve değişkenlere göre çok yüksek sayıda deney yapmak gerekirken Taguchi metodu L18 ortogonal dizisine göre 18 deney yapılması gerektiği sonucuna varılmıştır. Bu bilgilere deneysel çalışma bölümünde detaylı bir şekilde yer verilmiştir (Pınarbaşı, 2021).

1.10. Anova Testi/Varyans Analizi

İngilizce çevirisi 'Analysis of Varyans' olan varyans analizinin ilk iki harflerlerinin birleşimi olan ANOVA testi olarak da adlandırılır. Grup ortalamaları ve bunlara bağlı olan verileri analiz etmek için kullanılan istatistiksel bir metottur. Sonuçlar doğrultusunda yapılan deneylerin hata oranı gibi veriler belirlenerek değerlendirilmesi ve sonuçların açıklanmasını mümkün kılar.

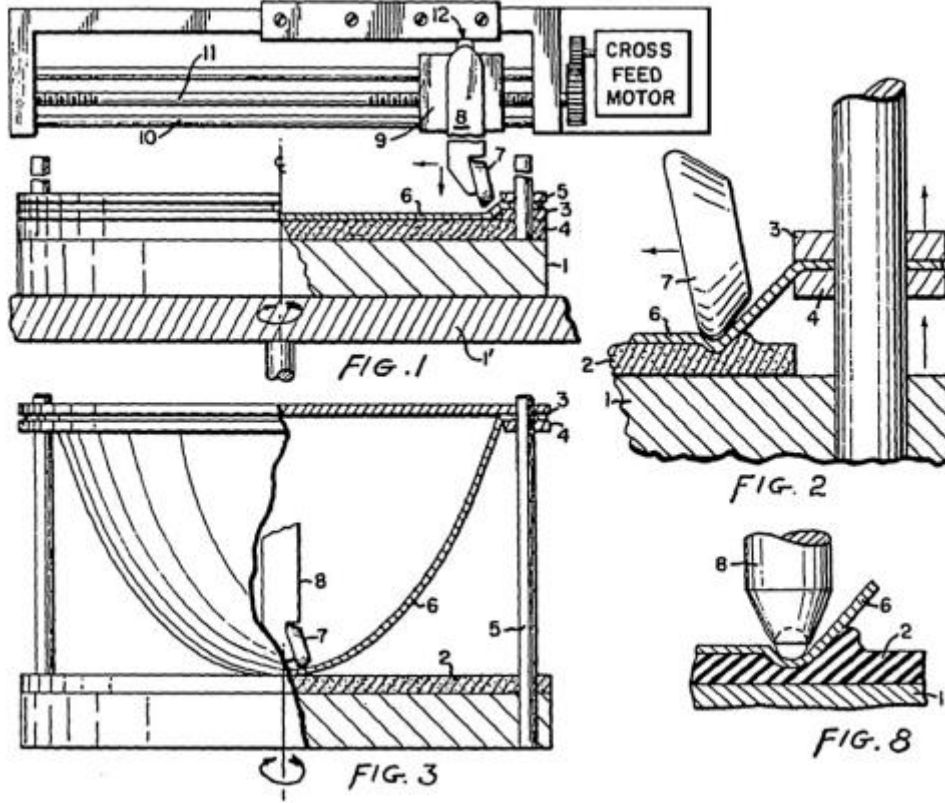
2. BÖLÜM

LİTERATÜR TARAMASI

Artımlı sac şekillendirme işlemlerin özelleştirilmesi ve detaylandırılması anlamında tarihsel olarak üç farklı döneme ayrılmıştır. Bunlar erken dönem yani 1989 yılına kadar olan çalışmaları içermektedir. İkinci dönem, 1993-2000 yılları arasında proseslerin çeşitlendirilmesi ile oluşmuştur ve 2000 yılından günümüze kadar olan geliştirme çalışmaları da üçüncü dönem ASŞ dönemini oluşturmaktadır.

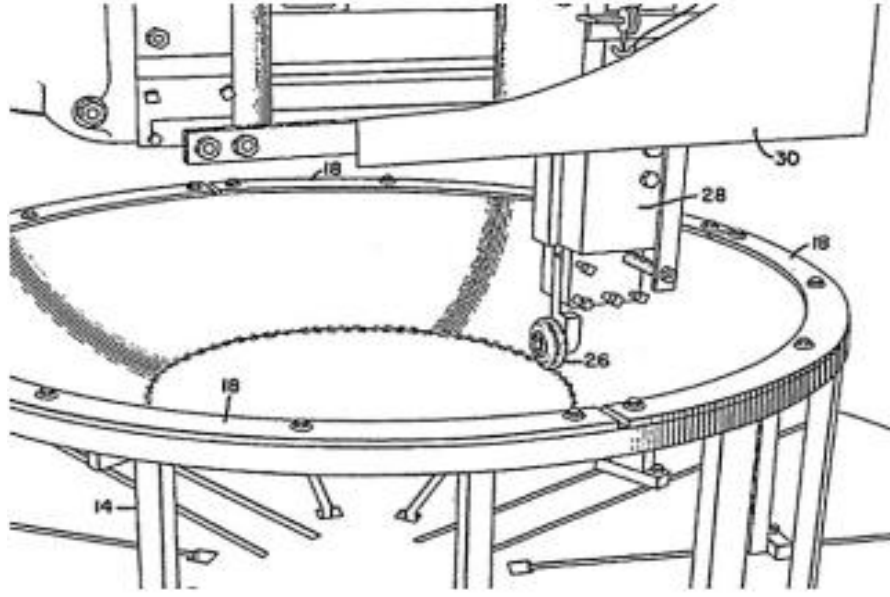
2.1. Önceki Çalışmalar

ASŞ işlemi ve sıvama arasında çok ince bir çizgi vardır. 20. Yüzyılda da ASŞ işlemi olarak kabul edilebilecek veya en azından ASŞ ye çok benzeyen sıvama çeşitleri hakkında birçok patent yayınlanmıştır. Aşağıda her ikisi de 1967 yılında yayınlanmış olan ve birisi Leszak'a, diğeri ise General Electric çalışanı Berghan'a verilen son iki patent görselleri verilmiştir (Emmens,2010).



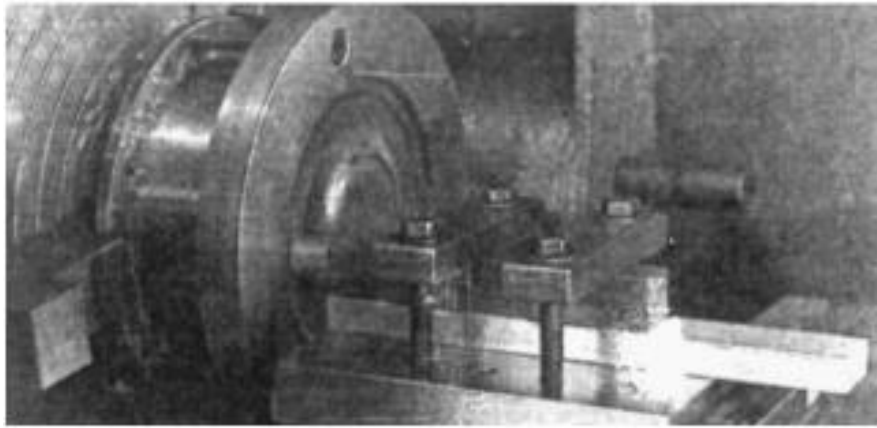
Şekil 2.1. Leszak tarafından patenti alınan ASŞ prosesi (Leszak, 1967)

Araştırmacılar tarihsel olarak ilk örneklerden birisi olarak Leszak'ın çalışmasını gösterebilirler de Leszac'ın çalışmasında kanala sıkıştırılan sac parçasının silindirik bir şekillendirici uç ile sac parçasının kanal arasına sıkıştırılarak şekillendirmesinden dolayı bunu sıvama işlemine daha yakın görmüşlerdir (Jeswiet, 2005).



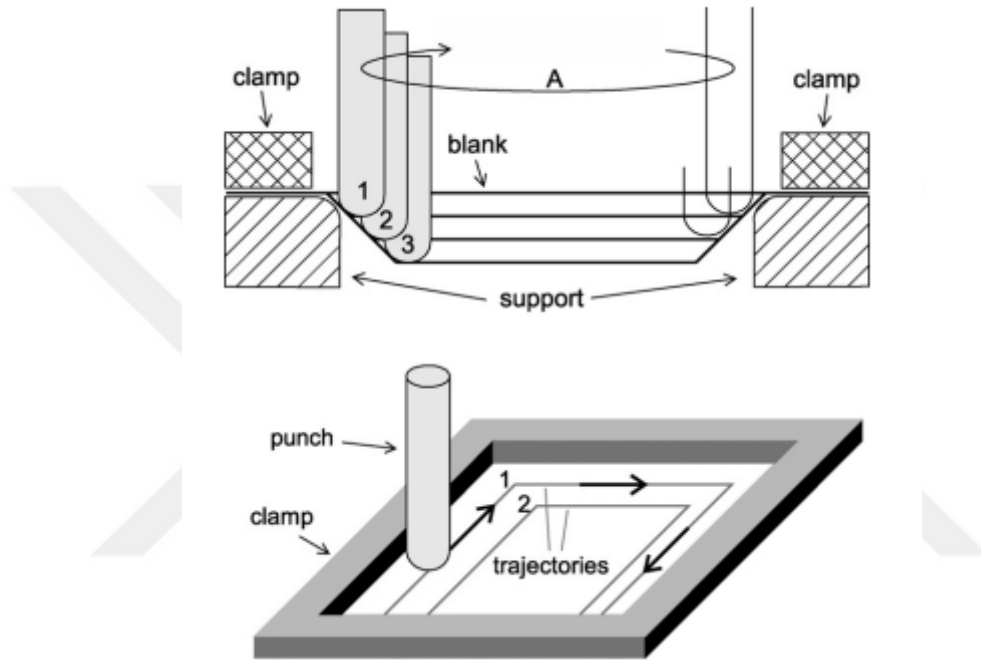
Şekil 2.2. Berghahn tarafından patenti alınan ASŞ prosesi (Berghahn, 1967).

Prosesin uygulanış şekli bakımından tutulmuş sac üzerinde baskı yapan silindir takım aynı zamanda x, y ve z ekseninde de hareket ederek sacın dışından başlayıp geometrinin içine doğru hareket ederek şekillendirme işlemini gerçekleştirmektedir. Bu sebeple çalışmacıların bazıları ilk erken dönem ASŞ çalışma örneği olarak Berghahn'ın patentini göstermektedir (Jeswiet, 2005). ASŞ işleminin bir diğer erken dönem temsilcisi ise 1978'de yaptığı çalışma ile Nottingham Üniversitesi'nden Mason'dur. Mason'un yaptığı çalışmada, tek bir küresel silindir kullanıldı. Küresel silindir şekillendirme işlemini yapabilmek için en az 3 eksende hareket edebilmesi gerekiyordu. (x, y ve z eksenleri) Mason'un işleminde dikkat çeken bir diğer husus ise basit şekillerin dışında bir parça imal edileceği zaman bir destek ihtiyacı söz konusu olmasıydı. Bu konuda bazı testler gerçekleştirilmiş ancak daha basit bir şekilde bir torna tezgahına sacı tutturarak döndürülmesi ve şekillendirilmesiyle gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2.3. İlk doğru ASŞ olarak kabul edilen Mason'un ASŞ uygulaması (Mason, 1978).

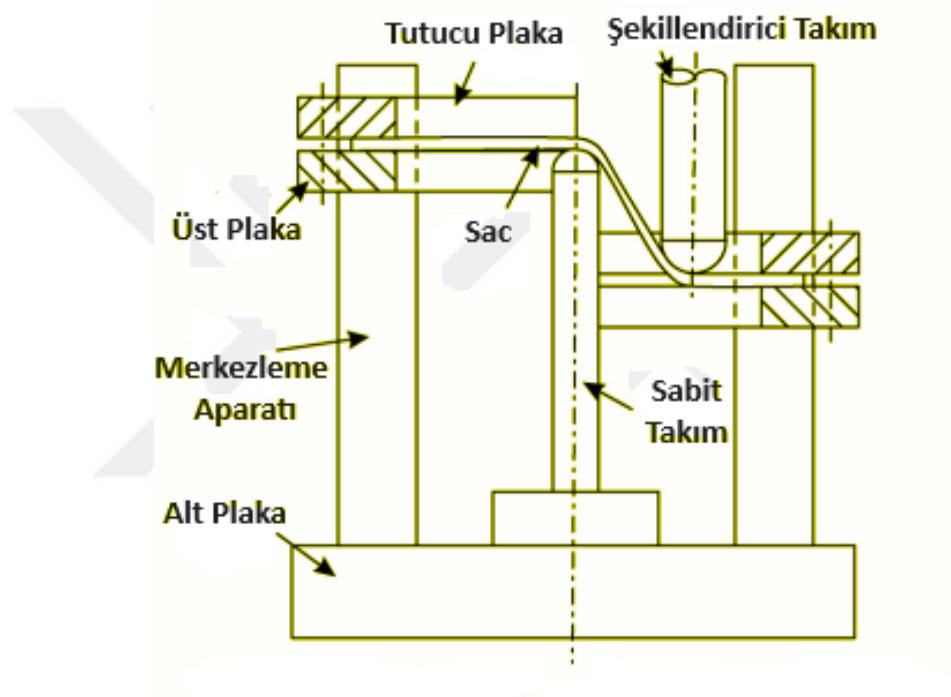
Mason'un yaptığı çalışmaların geliştirilmesi ile, daha iyi bir şekil doğruluğu elde etmek veya dik duvarlar oluşturabilmek için ayrıca bir destek malzemesinin kullanılmasına gerek duyulmayacağı ortaya çıkmıştır. Çalışmaları 1984 'te Kyoto şehrinde gerçekleşen bir kongrede Mason'un eski öğretmeni Appleton tarafından sunulmuştur (Appleton, 1984). Bu kongre sonrası ASŞ çalışmaları Japonya'da belli bir dönem geliştirilmiştir. 1989 yılında Iseki ve arkadaşları tarafından basit bir düzenele, Mason'un çalışmasından faydalanarak CNC freze makinesi mantığında bir çalışma gerçekleştirmiştir. Çalışmaları simetrik olmayan parçaların ilk üretimini göstermiştir. Iseki ve arkadaşlarının çalışmaları Şekil 2.4.' te gösterilmiştir.



Şekil 2.4. Orijinal hali Iseki tarafından hazırlanan ve aksel simetrik olmayan parçalar için tek noktadan ASŞ işlemi (Iseki, 1989).

O tarihlerde CNC freze makineleri çok pahalı olması bir yana, aynı zamanda rijitlik bakımından çok fazla güven vermiyordu bu yüzden hiç sac bağlanıp ASŞ denemesi yapılamadı sadece blok metallerin şekillendirilmesinde kullanıldı. 1992 yılında Iseki ve arkadaşları çeşitli şekillerin işlenmesine imkan sağlayan bilgisayar kontrollü bir düzenek hazırlayıp sundular (Iseki, 1991, 1992). Bu makale 1993 yılında ICTP'de İngilizce olarak sunulmuştur (Iseki, 1993). Bunun ardından Iseki ve arkadaşları şekillendirme kuvveti 50 kN olan ve sertliği düşük olan üç boyutlu bir CNC ASŞ makinesi geliştirdiler (Iseki ve ark., 1994, 1996). Geliştirilen bu makinede 0,7 mm kalınlığında çelik, paslanmaz çelik ve titanyum sacların artımlı şekillendirilmesini gösterdiler. Iseki ve Naganawa üç takımlı artımlı sac şekillendirme yöntemi önerdi (Iseki, 2002). Bunun devamında üç şekillendirici takımlı bir takım ünitesi hakkında Japon patenti aldılar. Kitazawa basit ekipmanlar üzerinde yapılan öncü çalışmalar üzerine çalıştı ve hem torna tezgahında hem de CNC freze tezgahında Mason'un çalışmasına benzeyen çalışmalar yaptı ve artımlı şekillendirmenin prensipte Berghahn'ın patentinde açıklananla aynı olduğunu

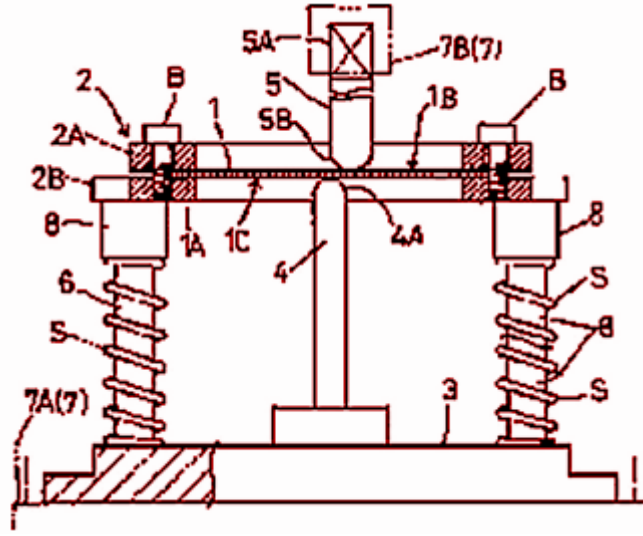
ifade etti (Kitazawa, 1993). 1994 yılında JJSTP (J. Japonya Plastisite Teknolojisi Derneği) akıllı artımlı sac şekillendirme hareketi üzerine özel bir sayı yayınladı ve Japonya'daki gelişmelerin durumunu sundu ve bu ASŞ ile ilgili bir kilometre taşı oluşturdu. Konuyla ilgili ikinci bir özel sayı 2001'de yayınlandı. Bu özel sayıdan birkaç makale de Çin'in Pekin şehrindeki ICTP de 1993'te sunuldu ancak bu batı dünyası tarafından büyük ölçüde fark edilmedi. İki noktadan artımlı sac şekillendirme ile ilgili ilk çalışma Matsubara tarafından 1994 yılında sunulmuştur. Düzenek şekil 2.5.'te gösterilmiştir (Matsubara, 1994). Matsubara'nın 1995'te patenti yayınlanan bu çalışmasının çalışma mantığı plaka tutucular vasıtasıyla sabitlenir ve yarı küresel uca sahip şekillendirici takım, sacın altında yer alan sabitlenmiş küresel ucun etrafında hareket ederek sacı presleyerek şekillendirmesidir.



Şekil 2.5. Orijinali Matsubara tarafından önerilen İki noktadan artımlı sac şekillendirme işlemi (TPIF) (Matsubara, 1994).

Matsubara'nın patenti üç maddeyi kapsamaktadır. Bunlar şu şekildedir;

- Patent hem yöntemi hem de aparatı kapsar,
- Merkezi destek basit bir çubuktur,
- Boşluğun dikey hareketi pasiftir.



Şekil 2.6. Matsubara tarafından patenti alınmış düzeneğin orijinal hali 1: Sac plaka, 2: Şekillendirici takım, 4: Destekleyici takım (Matsubara, 1994).

Alınan bu patentin Japonya dışında hakları olup olmadığı bilinmemekle beraber ABD veya Avrupa'da eşdeğeri bulunmamıştır. Matsubara'nın patenti, tüm ASŞ patentlerinin temeli olarak kabul edilebilir. 1997 yılında Matsushita, Matsubara patentinin isteğe bağlı bir açıyla monte edilebilen ve aktif kontrolle plakanın aşağı doğru hareket edebildiği bir uzantısını yayınlamıştır (Matsushita, 1997).

1996'da Hitachi'nin yayını da yine Matsubara'nın patentinin bir uzatısı olup farklı olarak alttaki destekleyici takım sabit olmayıp bağımsız olarak da hareket ettirilebilir. Patent çok çeşitli uygulamalar içermektedir, tek ve iki noktadan uygulamalar ile hem içe büküm hem dışa büküm parçalarda uygulanmasını kapsar (Hitachi, 1996).

Toyota tarafından 1996 yılında Matsubara patentinin daha karmaşık şekiller için tasarlanmış başka bir uzantısı hazırlanmıştır. Toyota'nın patentinde aynı NC freze makinesi sac plakanın bazı ara kesimlerini de yapabilmektedir (Toyota, 1996).

Hitachi 1997 de tek nokta artımlı sac şekillendirmede silindirin yanı sıra kesici takımlarda dahil olmak üzere çeşitli takımlar kullanmıştır (Hitachi, 1997).

Yine Toyota 1997'deki çalışmasında erkek destek kalıbının ilk kez kullanılmasını uygulamıştır. Bu sistemde Z ekseninde hareket yoktur, sabit kalır. Ancak takım boşlukta kalıp yüzeyine doğru hareket eder ve elastik şekil değişimini gerçekleştirir (Toyota, 1997).

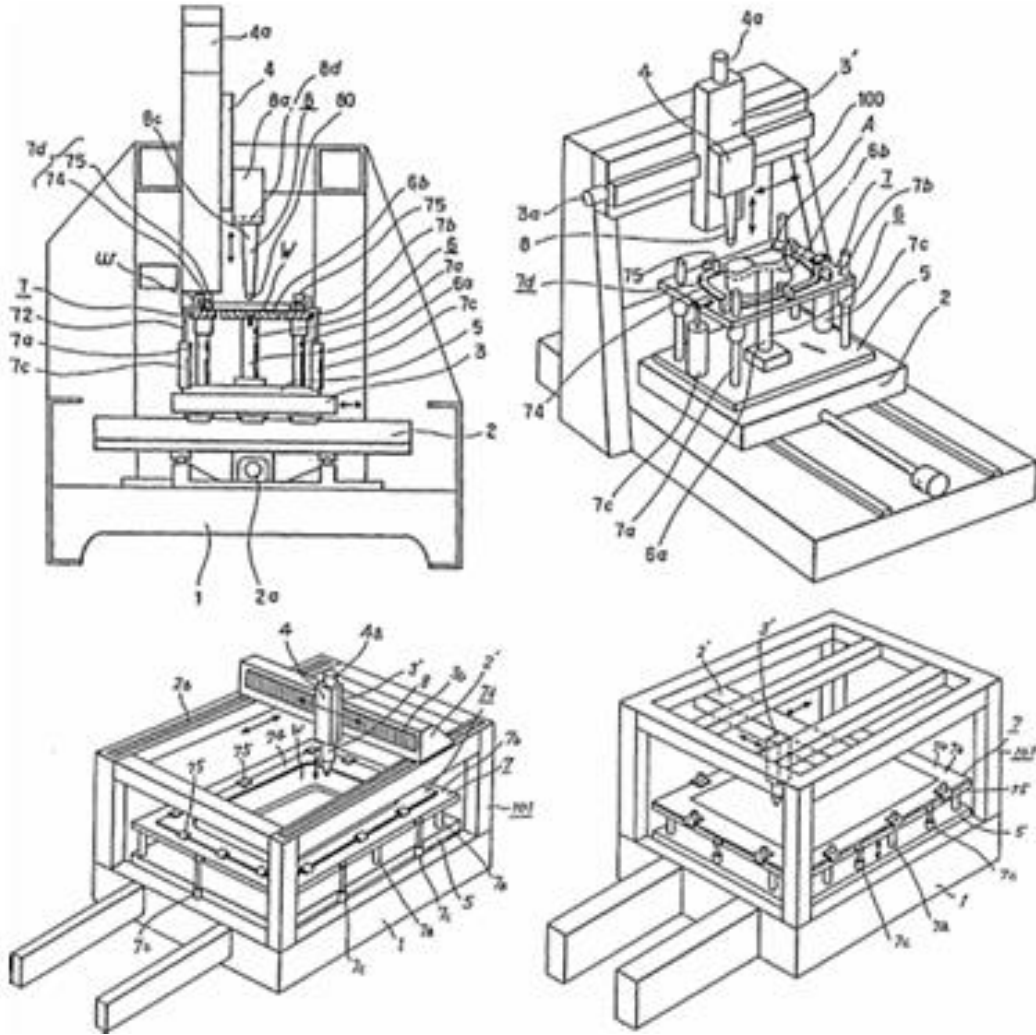
Şekillendirici takım olarak çok silindri bir takım kullanan Hitachi 1998'de çalışmasının patentini almıştır (Hitachi, 1998). Ardından Hitachi 1998 yılında ASŞ yi endüstriyel kullanım olarak asansör kabinlerinin kabartmalı iç panel saclarında kullanmıştır. Bu çalışmada hem tek hemde çift takım kullanılmıştır.

Toyota 1998'de karşı takım kullanarak malzemenin daha az incelmesini sağlamıştır, derin çekmede olduğu gibi pot çemberi vazifesi görmüştür (Toyota, 1998).

Honda 2000'de kesitte sac kalınlığının daha da incelmemesi için sıvama işlemine benzer bir ön şekillendirme işlemi uygulamıştır (Honda, 2000).

Japonya'daki ASŞ alanında yaşanan gelişmeler 1997 deki CIRP toplantısına kadar Avrupa tarafından göz ardı edilmiştir. Bu toplantıda bu yöntem ASŞ işleminin basitliğinden ve avantajlarından etkilenen bazı araştırmacıların dikkatini çekmiştir. Matsubara'nın patentine göre Matsubara, Amino ve arkadaşları 1999'da bir çalışma yayınladı. Temel olarak Matsubara'nın patenti şunları kapsar;

- Patent metodu değil aparatı kapsar,
- Merkezi alt destek, nihai ürünün alt şekline uyan düz bir üst kısma sahiptir,
- Tutucuların dikey hareketi en az iki hareket noktası sağlamalıdır.



Şekil 2.7. Matsubara ve Amino tarafından patenti alınan İki noktadan artımlı sac şekillendirme düzenekleri (Matsubara, 1999)

2003 yılında Luttgeharm patentinde tamamen iki noktadan artımlı sac şekillendirme yöntemi olarak kabul edilen işleme yönteminin patentini aldı. Bu yöntemde altta erkek bir kalıp bulunmaktaydı ve malzeme ortasından sabitlenmekteydi ve bu yönüyle Luttgeharm'ın çalışması sıvama yöntemini temelinde barındırmaktadır. Şekillendirici takım sayısal kontrol ile belirli takım yollarını izleyerek malzemeyi aşağı doğru sıvayarak işlemektedir. Bu işleme yönteminde destek kalıbı ile şekillendirici takım arasında sac kalınlığı kadar boşluk bırakılmaktadır (Luttgeharm, 2003).

2001 yılında Okada ve Hitachi Ltd. Yeni bir patent yayınladı ve bu patente göre iki noktadan artımlı sac şekillendirme işleminde geri yaylanma (springback) olayının olmaması için veya daha da aza indirgenmesi için düzenekte ek olarak yerel bir ısıtma cihazı bulunmaktadır. Bu düzenekte takım şekillendirme yaptıktan sonra ısıtıcı hava şekillendirme bölgesine sıcak hava üflüyordu (Okada, 2001).

Buna benzer bir şekilde 2006 yılında Klocke ve Whrmeister tarafından makinenin de ısıtıcılı olduğu bir düzenek patenti alınmıştır. Bu düzenekte lazer destekli ısıtma ile artımlı sac şekillendirmenin temelini oluşturmaktadır (Klocke, 2003).

Amino ve Matsubara'nın çalışmasında yine geri yaylanma etkilerini aza indirmek için çalışmalarında işlemi tek proseten değil, iki veya daha fazla şekillendirme prosesinden geçirmişlerdir. Bu çalışmada hem malzeme kalınlığının bölgesel olarak çok fazla azalıp zarar görmesinden hem de daha dik duvarlar oluşturmak amaçlanmıştır. Parça gerdirilir ve son işleme halini alana kadar şekillendirilir ve tekrar parata bağlanıp gerdirilir yeni bir proseten geçirilir (Amino, 2006).

ASŞ de ilk kez iki robotun karşılıklı kullanıldığı yöntem ise 2002 yılında Finlandiya'dan Tuominen tarafından patentlenmiştir ve iki robotun kullanımı dahil olmak üzere çeşitli konfigürasyonlar açıklanmaktadır (Tuomien, 2002).

Tek nokta artımlı sac şekillendirmeden iki noktada artımlı sac şekillendirmeye geçişte Avrupa'da süreç ilk olarak Strano tarafından 2003 yılında dile getirildi (Strano, 2003) ve Jadhav'ın 2004 yılında yayınladığı tezinde daha ayrıntılı olarak tartışıldı ve bu işleme kinematik artımlı sac şekillendirme adı verildi. Proses şekillendirilebilirliği arttırarak, başka herhangi bir destek olmadan karmaşık şekiller üretme imkanı sunar (Jadhav, 2003), (Emmens, 2010).

Ambrogio ve arkadaşları çalışmalarında TiAl6V4 malzeme kullandılar ve yüksek ilerleme hızlarını denediler. Onlar çalışmalarında CNC freze makinası değil Mazak Q-Turn 1000 CNC torna kullanarak 600 m/dk ilerleme hızıyla çalışmalar yürüttüler. Çalışmalar sonucunda yüksek ilerleme hızları ile titanyum malzemenin ASŞ ile işlenebileceği sonucuna varılmıştır (Ambrogio, 2010).

Vanhove ve arkadaşları AA 5182-O kalitede bir alüminyum alaşımı oluşturdular ve işlem sırasında hem kuvvetleri hem de sıcaklıkları kontrol ettiler, sonucunda ise yüksek ilerleme hızlarının sıcaklık artışına yol açtığını ve malzeme üzerinde sünek davranış göstermesine neden olduğunu saptamışlardır. Bu yolla da maksimum şekillendirme açısını 65°'ye çıkardılar (Vanhove, 2014).

Hamilton ve Jeswiet ilerleme hızını 9000 mm/dk çıkarmanın etkilerini ve takım çapının, şekillendirme açısının yüzey pürüzlülüğüne etkisini incelediler. Yüzeyde oluşan 'portakal kabuğu' etkisini derinlemesine incelediler. Malzemenin bu etki ortaya çıkmadan önce ki şekillendirme sınırlarını saptadılar (Hamilton, 2010).

Bastos ve arkadaşları tek nokta artımlı sac şekillendirme yöntemini alüminyum, AA1050-H111 ve üç sınıf çift fazlı çelik, DP600, DP780 ve DP1000 malzemeler kullanarak uyguladılar. Çalışmalarında alüminyum için SAE 30, çift fazlı çelikler için ise Finarol B5746 tercih etmişlerdir. 16 mm şekillendirici takım çapı ve 1 mm et kalınlığında malzeme kullanılan çalışmada 1500, 2500, 3500 ve 12000 mm/dk olmak üzere dört farklı ilerleme hızı kullanılmıştır. Bu çalışmada yüksek ilerleme hızının yüzey pürüzlülüğünde ve şekillendirilebilirlik üzerinde çelikler için artışa sebep olduğunu, alüminyum alaşımlarda ise çok az etkisi olduğunu gözlemlemişlerdir. Deney sonucunda yapılan ölçümlerde 1050 alüminyum için en iyi yüzey kalitesinin SAE 30 ile yapılan işlemde olduğu sonucuna varılmıştır. En kötü yüzey ise Finarol B5746 ile yapılan testlerde gözlemlenmiştir. DP 780 malzeme de ise Finarol B5746 en iyi yüzey kalitesini sağlayan yağlayıcı olarak gözlemlenmiştir. Buna göre DP 780 gibi daha sert malzemeler için daha düşük viskozite değerlerine sahip yağlayıcılarla daha iyi sonuçlar elde edilmektedir, kullanılacak malzemenin sertliği ne kadar yüksekse kullanılacak yağın viskozitesi o kadar düşük olmalıdır. Geri esneme konusunda yağlayıcıların herhangi bir etkisi olmadığı sonucuna varılmıştır (Bastos, 2015).

Tek nokta ASS'de takımın malzemesi, çapı ve geometrik şeklinin ve takımın kaplamalı olup olmadığını da şekillendirilebilirlik ve yüzey pürüzlülüğü üzerine etkisi vardır (Behera, 2017). Bunun etkilerini incelemek adına Ham, 2013'te asetal bir takımla şekillendirmenin, bir karbür aletle işlenmesini kıyaslamıştır ve asetal bir takımla şekillendirmenin karbür aletle işlemeye göre daha yüksek yüzey pürüzlülüğü ile sonuçlandığını gözlemlemiştir. Ham ve arkadaşları bu çalışmasında 1,6 mm kalınlığında AA-3003-O alüminyum malzemesini daha önceki çalışmalarda kullanıldığı ve şekillendirilebilirliği yüksek olduğu bilindiği için kullanmışlardır. İşlemlerinde Esprit isimli CAM yazılımı kullanarak spiral yani helisel bir takım yolu oluşturup 600 d/dk, 0,13mm aşağı adım ve 9000 mm/dk ilerleme hızı kullanılmıştır. Kullanılan geometri ise 76mm x 76mm ebatlarında olup 25 mm derinliğe işlenmiştir. Çalışmada kullanılan takımlar ise 12,5 mm çapındadır. Asetal takımın ucundaki reçinenin sahip olduğu düşük aşınma ve sürtünme özelliği sayesinde ek yağlama gerektirmemesi sebebiyle seçilmiştir. Yüzeyde portakal kabuğu etkisinin olmaması için daha ince bir mikro yapıya sahip malzeme kullanılması gerektiği saptanmıştır (Ham, 2013).

Ziran ve arkadaşları takım geometrisine odaklanarak takım şeklinin tek nokta ASS işleminde ki etkilerini gözlemlemişlerdir. Ayrıca takım şeklinin geometrik doğruluğu üzerinde ki etkisini incelemişlerdir. Bu sebeple bir düz uç seti ve bir yarım küre uç olmak üzere farklı yarıçaplara sahip iki takım seti kullanılmıştır. Deneylerinde işlenebilirliği yüksek olan 1 mm kalınlığında AA-3003-O alüminyum alaşımını kullanmışlardır ve devir 0 dev/dk, 2250 mm/dk ilerleme hızı, 0,2 mm aşağı adım parametreleri ve 4,6,10 mm çaplarında takımlar kullanılmıştır. Düz uçlu takımda kullanılan radius ölçüleri 1-3 mm arasında kullanılmıştır. Sonuç olarak radius uçlu düz takımlarla işlenmiş geometrilerde tabanda ki düzlemde yarım küre takım ile şekillendirilmiş saca göre bombelenme görülmemiş ve şekil ana tasarıma daha yakın ölçülerde işlenmiştir. Takım yarıçapındaki artışın geometriye göre değişmekle beraber şekillendirilebilirliğe faydalı olduğu sonucuna varmışlardır (Ziran, 2009).

Duflou ve arkadaşları ASS'de kuvvet etkisini, takım çapının etkisini, aşağı adım ölçüsünün ve duvar açısının etkisini incelemeyi hedefleyerek bir çalışma yürütmüşlerdir. Bu kapsamda 1,2 mm Al-3003-O ya ek olarak 0,85 mm, 1,5mm, 2 mm kalınlığında Al3103-O kalitede tavlanmış sac kullanmışlardır. İşleme geometrisi olarak 180 mm başlangıç çapında kesik koni seçmişlerdir ve 40 mm derinliğe işlemişlerdir. 2000mm/dk ilerleme hızı uygulanırken, aşağı adım 0,5 mm , duvar açısı 50°, 10 mm çapında takım kullanılmıştır. Deneyler sonucunda aşağı adım ölçüsü arttıkça uygulanan kuvvetin büyüklüğünün de arttığı görülmüştür yani dikey adım kuvvetle doğru orantılıdır. Aynı şekilde takım çapı arttıkça da uygulanması gereken kuvvet büyüklüğü artış göstermiştir. Duvar açısının etkisi ise, aynı diğerleri gibi açı değeri arttıkça uygulanan kuvvet değeri de artış göstermiştir ve uygulanabilir maksimum duvar açısının 60° olduğu sonucuna varmışlardır. Sac kalınlığının kuvvete etkisinde de durum şu şekildedir, 2 mm sacda 1460 N kuvvet değeri okunurken, 0,85 mm kalınlığındaki sac işlenirken Fmaks değeri 380 N olarak okunmuştur. Yani sac kalınlaştıkça uygulanması gereken kuvvetin de artması gerektiği saptanmıştır. Deneyde ayrıca 4 farklı tipte yağlayıcı kullanılmış ve tek bir kalınlıktaki saca uygulanmıştır. Yağlayıcılar arasında işleme kalitesi açısından bir fark gözlemlenmemişken, kuru olarak yapılmış işlemde önemli oranda aşınma gözlemlenmiştir sac çok daha hızlı deforme olmuştur (Duflou, 2007).

Obikawa'nın çalışmasında 1 mm'nin altında piramitler için ve değişik geometriler için özel bir düzenek hazırlanmıştır 20000 d/dk kullanılıp 0,5 mm yarıçapında takım kullanılmıştır. 1,2 mm Al-2 malzeme ve 45° derece duvar açısında 10 mm x 10 mm ölçülerinde kare piramid geometri kullanılmıştır. Yağlayıcı ve soğutucu olarak yalnızca su kullanmışlardır ve sonuç olarak keskin kenarlar ve zor geometriler daha doğru geometrik ölçülerde kullanılabilmesi için daha küçük takımlar kullanmanın gerektiği sonucuna varılmıştır. En çok tercih edilen takım 8-15 mm arasında değişir (Obikawa, 2009).

Aerans ve arkadaşları da aksenal kuvvetin etkisini incelediler. Deneylerinde 1,2 mm kalınlığında AA3003 malzeme kullanıp, 10 mm takım çapı, 50° duvar açısı, 0,5 mm aşağı adım yüksekliği ve 2000 mm/dk ilerleme hızı kullanmışlardır. Sürtünmeyi düşürmek için yağlayıcı

kullanmışlardır. Deney sonucunda çap, sac kalınlığı ve aşağı adım büyüdükçe aksenal kuvvetin de oranla büyüdüğünü gözlemlenmiştir. Aynı incelemeleri AA3003 T=0,85mm ve 1,5 mm, Al-Mg alaşımı AA5754 1 mm ve 1,5mm, bir derin çekme çeliği olan DC01 malzemesinde 0,5 mm ve 1,15 mm, AISI 304 paslanmaz çelik 0,4 mm ve 0,8 mm, yay çeliği (65Cr2) 0,5mm kalınlıklarında farklı malzemeler üzerinde de yapmışlardır. Sonuç diğer malzemelerde de parametreler arttıkça aksenal yükün de arttığını göstermiştir (Aerens, 2009).

A. Petek'te yaptığı çalışmasında tek nokta artımlı sac şekillendirmede deneysel ekipmanı anlatmaktadır ve ayrıca duvar açısını, takım dönüşünü, dikey adım boyutunu ve yağlamanın şekillendirme kuvvetinin büyüklüğü üzerindeki etkisini incelemiştir. Deneyinde 1 mm kalınlığında DC05 sac kullanıp, duvar açısı 40°, 50°, 55°, 60°, 65°, 70° ve 71° geometriye sahip sıvama derinliği 42 mm olan bir geometriyi ele almıştır. 65° derece duvar açısında 60 mm derinliğe ulaşabilmiştir. Deneyde 40 dev/dk devir, 1700 mm/dk ilerleme hızı, saat yönünde by steps takım yolu kullanmıştır. Sonuç olarak duvar açısının artmasıyla kuvvet ve deformasyonların da artacağı, şekillendirme takımının dönüşünün kuvvet ve deformasyon üzerinde herhangi bir etkisi olmadığı ancak yüzey kalitesi üzerinde çok büyük etkisi olduğunu ortaya koymuştur. Takım çapının artmasının ise daha büyük kuvvetlere ve deformasyonlara yol açacağını gözlemlenmiştir. Aşağı adımın artması kuvvet artışını meydana getirir, yağlama kuvvet açısından bir önem arz etmezken yüzey kalitesini önemli ölçüde etkiler (Petek, 2009).

Jan Brüninghaus, 2016'da arkadaşlarıyla kinematik ASS üzerine çalışmalarda bulundu. Çalışmalarında şekillendirici takım karşısında beş eksenle hareket edebilecek bir karşı destek takım düzeneği hazırladılar. Karşılıklı iki robot çalışmaktaydı ve deneysel çalışmalarında AW-5754 ve DC01 olmak üzere iki farklı malzeme, ABB 6620 ve ABB 7600 olmak üzere iki farklı endüstriyel robot kullandılar. Fakat deneylerinde kullanılan yarım küre uçlu takımın merkezini robota tam olarak tanımlayamadılar. Sonuç olarak deneyin sonlarında sacda yırtılma meydana geldiği için devam etmeyerek durdurup hesaplama ile maksimum duvar açısını saptadılar. AW-5754 için 69°, DC01 için ise 74° açı elde edilerek kayma açısı ve kuvvet artırılarak açısında artırılabilceği yorumunda bulunarak aletin amaca yönelik çalıştığını gözlemlenildi (Brüninghaus,2016).

Jeswiet ve arkadaşları 2005 yılında alüminyum 0,93 kalınlığında 5182-O, 1,21 mm 3003-O, 1,02mm 5754-O ve son olarak 1,5 mm kalınlığında 1011 sıcak haddelenmiş karbon çeliği malzemeleri üzerinde tek noktadan ASS ile maksimum çekme açısını saptayarak malzemeleri şekillendirmeyi amaçladılar. Z-level takım yolunu kullanarak bir otomobil farı yapımı üzerinde çalıştılar. Ayrıca deneylerinde beş farklı şekil (koni, kubbe, hiperbol, piramit, beş loblu bir çiçek şekli) ve 12,7 mm, 25 mm çaplarında, sertliği 65 HRC olmak üzere iki farklı takım çeliği şekillendirici takım kullandılar. Milin hızı sürtünmeyi ve yüzey deformasyonunu azaltması için makinenin ilerleme hızına uyacak şekilde ayarlandı. 42 mm/dk ile 2400 mm/dk ilerleme hızları arasında çalışmışlardır. Ancak ilerlemenin maksimum çekme açısı üzerinde bir etkisinin olmadığını ilerleme hızının sadece takımda sürtünme sonucu meydana gelen aşınmaya sebep

olduğu sonucuna varmışlardır ve maksimum kayma açısının malzeme tipine, sac kalınlığına, takım yarı çapına aşağı adım, sacın yerel sıcaklığına bağlı olduğunu gözlemlemişlerdir.. Deney sonuçlarına göre şekillendirme limit diyagramlarını oluşturmuşlardır (Jeswiet, 2005).

Szekeres ve arkadaşları çalışmalarında AA 3003 alüminyum kullanarak 75° duvar açısına sahip koni ve piramid geometriler arasındaki işleme etkilerini karşılaştırmışlardır. Çalışmada 12,7 mm çapında yarım küresel karbür uç kullanılmıştır ve takıma gelen yük hesabı da yapılmıştır. Deney sonucunda konide yırtılma öncesi kuvvet izlenebilirken, piramit geometrisine sahip şekilde kenardaki ayrıt malzemeye ek bir takviye sağladığı için yırtılma öncesi yük gözlemlenememiştir (Szekeres, 2007).

Centeno ve arkadaşları, 0,8 mm kalınlığında ki AISI 304 paslanmaz çelik üzerinde yaptığı çalışmalarda 0,2 mm ve 0,5 mm aşağı adım ölçüsünde 6,10,20 mm çaplarında yarım küresel takım kullanarak çalışma yürüttüler. Çalışmalarında hem alttan Ø100 mm ölçülerinde alt destek kalıplı ve desteksiz olmak üzere iki farklı fikstür yapısında, farklı adım aralıklarında deviri boşta ve 1000 dev/dk'da çalıştırdılar. Sonuç olarak başlangıç sac kalınlığının takım çapına oranını veren formül ile takım çapının küçültülmesine bağlı olarak şekillendirilebilirliğin arttırabileceğini ifade ettiler (Centeno, 2014).

Ham ve Jeswiet çalışmalarında, ASS'de şekillendirilebilirliği etkileyen malzeme tipi, malzeme kalınlığı, şekillendirme takımı çapı, aşağı adım ölçüsü, parça geometrisi olmak üzere beş ana faktörü değerlendirmiştir. Bunun sonucunda maksimum şekillendirme açısı gözlemlenmiştir. Deneysel çalışmalarda, AA 5734, AA 6451, AA 5182 malzeme, Ø4,7 mm, Ø6,35mm, Ø9,5 mm çaplarında şekillendirme takımlarıyla , kubbe, koni, piramid olmak üzere üç farklı geometride işlenmiştir. İşleme sırasında 0,05'ten, 1,5 mm'ye kadar aşağı adım ölçüleri kullanılmıştır. İşleme sonrası çıkan sonuçlar ShapeGrabber isimli 3D tarama yazılımıyla taranıp, CAD programında çizilen geometri ile karşılaştırılmıştır. CAD dosyaları ile tarama dosyalarını karşılaştırabilmek amacıyla her ikisinin ölçülerini eşleyecek IMInspect yazılımı kullanarak her iki dosyanın ölçüleri de mm cinsinden görüntülenmiştir. Çalışma sonucunda geometrilerde ortalama 0,13 mm sapma saptanmıştır. Daha karmaşık parçalar için daha fazla analize ihtiyaç duyulduğu ortaya çıkmıştır. ASS işleminin çizimlerle ne kadar örtüştüğünün anlaşılması sağlanmıştır. Takım yolları iyileştirilerek daha iyi bir sonuç elde edilebileceği gözlemlenmiştir (Ham, 2008).

Afonso, Aveiro Üniversitesi'nde ASS yöntemi ile yarım tünel ve tünel tipi parçaların şekillendirilebilirliğini, parametreleri ilk olarak basit şekiller üzerinde deneyerek, süreci hızlandırmayı ve şekillendirilebilir boyutu arttırmayı hedefledi. Deneyinde 2 mm kalınlığında 1050-H111 alüminyum levha kullanarak frustum geometriye sahip düz bir tünel işlendi. 0,5 mm aşağı adım ve 1500 mm/dk ile 10 mm'lik küresel uçlu bir şekillendirici takım kullanıldı. Sonuçlar, doğruluk ve maksimum şekillendirme açısı açısından değerlendirildi. Ölçülen tünel geometrileri CMM cihazıyla ölçülerek sonuç CAD'de çizimi yapılan geometriyle mukayese edildi. Deney düzeneğinde, tünelin yüzey kısmındaki düzlüğü koruma amaçlı yarık kesik

destek kullanıldı. Sonuç olarak ASS işleminin tünel tipi geometrilerde uygulanabileceği, ± 5 mm hassasiyetle 68° lik bir duvar açısı elde edilebileceği sonucuna varılmıştır (Afonso, 2017).

Manco ve Ambrogio ASS parametrelerinin malzemeyi şekillendirirken meydana gelen incelmeye etkilerini araştırmışlardır. Sinüs yasasından sac kalınlığının tahmini kabaca tayin edilebilir ancak sinüs yasasında işlem sacın ilk andaki kalınlığı hesaba katıldığı için tam olarak sonuç vermez. Bu nedenle incelmeyi tahmin etmek için güvenilir bir model elde etmek amacıyla DOE tarafından tasarlanan deneysel veriler üzerinde ANOVA analizi yapılmıştır. Bu kapsamda deneylerinde 1 ve 2 mm kalınlıklarında 6082-T6 malzeme sac kullanmışlardır. 43° ve 50° duvar açılarındaki geometrileri $\varnothing 12$ mm ve $\varnothing 18$ mm çaplarında ki küresel takımlarla 0,3 mm ve 1 mm aşağı adım ölçülerinde işlemişlerdir. Deney sonucunda et kalınlığının değişiminin duvar açısına bağlı olduğunu fakat takım çapı ve aşağı adım ölçüsünün çok etkili olmadığını gözlemlemişlerdir (Manco, 2010).

Joseph ve arkadaşları çalışmalarında uçak ve otomobil sanayinde sıkça kullanılan şekillendirilebilirliği ve korozyon direnci yüksek bir alaşım olan 1 mm kalınlığındaki AA-5052 malzemesini kullanmışlardır. 180 mm x 180 mm ebatlarında tutucu plakaya sabitlenen saca başlangıç ölçüsü $\varnothing 175$ mm olan, 65° lik duvar açısına ve 72 mm derinliğe sahip konik bir şekil işlenmiştir. Deneyler sırasında $\varnothing 10$ mm'lik yarı küresel takım kullanılmıştır. Takım çapı ve adım derinliği azaldıkça şekillendirilebilirliğin arttığı görülmüştür. Deney oda sıcaklığı, 200° ve 300° sıcaklıklarında saclarda denenmiştir. Deney sonuçlarında tavlamanın sünekliği arttırdığı görülmüştür. Bunun sebebi de tavlama işlemi sırasında tane incelmelerinden kaynaklanmaktadır (Joseph, 2018).

Baranoğlu ve arkadaşları, Tofaş Otomobil fabrikasında kullanılan "Staffa Frena Mano" parçasının ASS işlemini deneyimlemişlerdir. Deneylerde $\varnothing 5$ mm ve $\varnothing 15$ mm çaplarında küresel takım kullanmışlardır. $\varnothing 15$ mm takımında denenmiştir ancak yan duvar oluşturulurken sacda yırtılma meydana geldiği için devam edilmemiştir. Çalışmada duvar frezeleme takım yolu kullanılmıştır ve kullanılan takım yolunun sayısal tabanlı bir yazılım optimizasyonu ile daha iyi bir hale getirilerek daha iyi sonuçlar elde edilebileceği gözlemlenmiştir (Baranoğlu, 2012).

Tamer ve arkadaşları, FEP04 çelik malzeme, $\varnothing 5$ mm, $\varnothing 10$ mm ve $\varnothing 15$ mm çaplarında takımlar kullanarak kesik koni ve kesik piramid geometrilerinde parçalar işlemişlerdir. Yaptıkları bu deneysel çalışmaları aynı takım yolu ile sayısal analiz programlarıyla simüle etmişlerdir. Doğruluğunu anlayabilmek için iki çalışma kıyaslanmıştır. Sayısal analizlerini hem açık adım için hem de kapalı adım için yapmışlardır. Et kalınlığıyla ilgili değişimleri analiz etmek için kapalı adım, geometrik tolerans analizi için açık adım analiz yönteminin daha doğru olacağını belirtmişlerdir (Tamer, 2013).

Moeyadfar ve arkadaşları bronz alaşımdan yapılmış bilye ucu şeklinde bir şekillendirici takım ürettir. Deneylerinde 316 paslanmaz çelik kullanmışlardır ve farklı ilerleme hızlarına göre yüzey etkilerini ve sıcaklık değişimlerini gözlemlemişlerdir. Deneyi uygulamak için dairesel bir

kalıp tasarlanmıştır. Geometri olarak piramit kullanılmıştır. Deneye 1500 dev/dk ile başlandı ancak sonrasında meydana gelen aşınmalardan kaynaklı olarak 1000 dev/ dk' ya düşürüldü. Farklı ilerleme hızlarında sac esneme miktarını bulmak için 200, 300, 500 ve 800 mm/dk olmak üzere dört farklı ilerleme hızı kullanıldı. Deneyde geometri içbükey bir yapıya sahip olduğu için yağlama geometri içerisine yağ havuzu oluşturulmasıyla sağlandı. Deneyler sırasında 30 dakika aralıklarla sıcaklık ölçülmüştür ve maksimum yağ sıcaklığı 45° olarak ölçülmüştür. Geometride en fazla incelme küp geometrisinin kenarlarında meydana gelmiştir. Sonuç olarak 500 mm/dk ilerleme hızı ve 1000 dev/dk devir değerleri optimum değerler olarak belirlenmiştir (Moayedfar, 2013).

Durgun, çalışmasında 1 mm kalınlığındaki AA 6016 alüminyum alaşımı malzeme kullanmıştır. Başlangıç çapı 172 mm olan kesik konik yapıda bir geometri 15 mm' lik yarı küresel bir şekillendirme takımıyla oluşturulmuştur. İşlem sonucunda deney numuneleri ATOS tarama cihazıyla üç boyutlu olarak taranmış ve en fazla deformasyon geometrinin başlangıç çapı kısmında olduğu görülmüştür. Parçada oluşan geri yaylanmayı durdurabilmek amacıyla takım çapı, ilerleme vb. değerleri optimize edilerek daha dar toleranslarda üretilmesi mümkün olduğu ancak bunun üretim süresini arttıracığı sonucuna varılmıştır (İ., Durgun, 2017).

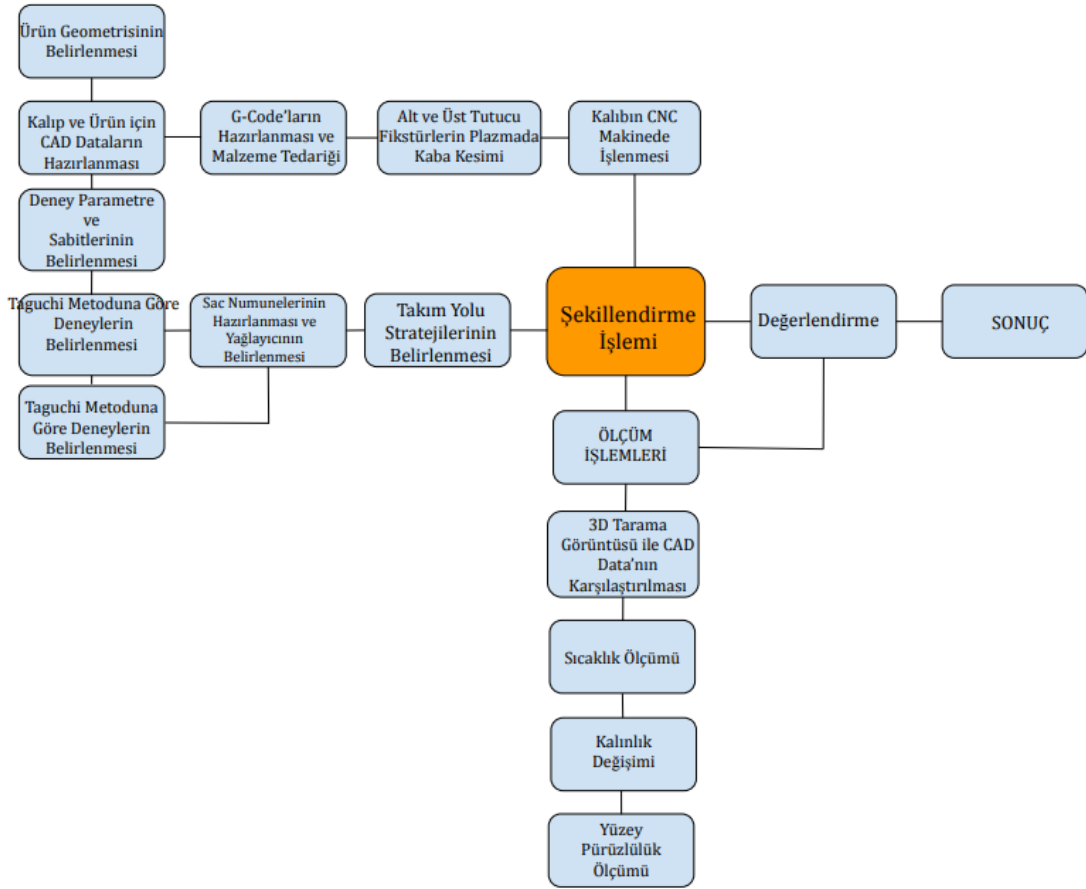
Literatür taranmış ancak bu zamana kadar alt destek kalıbı olarak kestamid (cast polyamid) kullanan, destekli fikstür yapısı ve desteksiz fikstür yapısı ile işlenmiş geometrilerin boyutsal karşılaştırılması yapılan ve otomobil, ev eşyaları, beyaz eşya vb. endüstride çok yaygın bir şekilde kullanılan bir malzeme olan 430 paslanmaz çelik kullanarak, onun artımlı sac şekillendirmesi hakkında bir çalışmayla karşılaşmamıştır.

3. BÖLÜM

DENEYSSEL ÇALIŞMA

3.1. Deney Akış Şeması

Deneylerin hepsi bir CNC atölyesinde gerçekleştirilmiş olup, ölçümler, kesim prosesleri için ve diğer prosesler için çeşitli firmalardan destek alınmıştır. Çalışma Şekil 3.1.'de gösterildiği şekilde ilerlemiş ve deney sonuçlarına, çalışmanın değerlendirme bölümünde yer verilmiştir.



Şekil 3.1. Deney akış şeması

3.2. Malzeme Karakterizasyonu

Deneylerde son yıllarda kullanımı artan ve giderek artmakta olan 0,6 mm kalınlığında 430 paslanmaz çelik (1.4016) malzeme kullanılmıştır. 430 kalite paslanmaz saclar ferritik paslanmazlar grubuna girmektedir. EN standartlarına göre X6Cr17, UNS normuna göre S43000 olarak da bilinen 430 paslanmaz malzemeler hareketli ve çarpışmaya maruz kalan parçalarda kullanılması tavsiye edilmemektedir. Dekoratif amaçlı yapılarda, endüstriyel yıkama makinelerinde, parlak yüzey istenen sektörlerde, ev araç gereçlerinde, mutfak eşyalarında ve otomotiv sektöründe sıkça kullanılmaktadır. Buzdolabı parçaları ve bulaşık

makinaları başta olmak üzere beyaz eşya endüstrisinde de kullanılmaktadır. ASŞ yapılan 430 kalite paslanmaz numunelerin birisi malzeme kompozisyonunun incelenmesi için yüzeyinde 10 mm çapında bir bölge aşındırılmış ve HITACHI PMI-MASTER Smart model spektrometre ile malzeme içeriğine bakılmıştır. 430 kalite paslanmaz çeliğin kimyasal bileşimi aşağıdaki tabloda verilmiştir.

Tablo 3.1. AISI 430 Paslanmaz çeliğin kimyasal bileşimi

STANDART	KİMYASAL BİLEŞİM %						
	C	Mn	P	S	Si	CR	Ni
ASTM							
S43000430	0.11	0.75	0,04	0,03	0.8	16.0-18.0	0,75



Resim 3.1. 430 Paslanmaz çeliğin karakterizasyonu belirlemek için kullanılan endüstriyel spektrometre cihazı

AISI 430 paslanmaz çelik malzemeler AISI 304 veya AISI 316 paslanmazlara göre korozyona karşı çok yüksek bir dayanıma sahip değildir. Fakat sıvama ve derin çekme sacı olan DKP'ye

kıyasla daha uzun korozyon dayanımı vardır. Her ne kadar korozyon dayanımı düşük de olsa maliyet açısından diğer paslanmaz malzemelerle arasında yüksek farklılıklar olması sebebiyle endüstride tercih sebebidir. Mekanik dayanım olarak ortalama değerlere sahiptir. Endüstride işlenebilirliği ve polisaj ile parlatmaya uygunluğu ile bilinirler. AISI 430 paslanmaz çeliklerin oda sıcaklığındaki mekanik özellikleri aşağıdaki tabloda gösterilmiştir.

Tablo 3.2. AISI 430 Paslanmaz çeliğin mekanik dayanımı (WhnStainless, 2021).

Oda Sıcaklığındaki Mekanik Dayanımı		
Kalite	430 (1.4016) X6Cr17	
Kopma Mukavemeti	Ksi	65
	MPa	450
Akma Mukavemeti	Ksi	30
	MPa	205
Uzama	22%	
Sertlik	HB	183
	HV	89

3.3. Kullanılan Makine ve Ekipmanlar

3.3.1. CNC plazma kesim

Makine sanayiinde oldukça geniş bir kullanım alanı olan CNC plazma kesim işlemi, çeşitli kalınlıkta, alaşımlı çelik, paslanmaz çelik, alüminyum vb. bir çok farklı malzemeyi, malzemesine göre kullanılan sıkıştırılmış gaz ve bu gaza verilen elektrik arkıyla iyonize ederek belirli parametrelerle ana gövdeden keserek ayırır. Hızlı işlem sonucu, tasarımda rotasyona açık olması ve maliyet olarak uygunluğu açısından tercih sebebidir. Tasarımı yapılan 2D çizimler .dxf veya .dwg formatlarıyla CNC kontrol ünitesine aktarılarak istenilen tasarım makinede imal edilmektedir. Plazma kesim makineleri genellikle ağır ve kalın plakalarda kullanılır ve daha yeni teknoloji olan lazer kesim makinelerine göre daha düşük tolerans değerlerine sahiptir. Bu sebeple plazmadan alınan ürünler eğer hassas toleranslara sahip ise ek bir procesten geçmelidirler.

Tablo 3.3. Plazma kesim makinesinin teknik özellikleri

AJAN PLAZMA KESİM MAKİNESİ ÖZELLİKLERİ	
TABLA ÖLÇÜLERİ	4000X2000 mm
GÜÇ	130 Amper



Resim 3.2. CNC Plazma Kesim Makinesi

3.3.2. CNC lazer kesim

Plazma makinelerine göre daha hassas ve hassasiyette süreklilik gereken seri üretim işlerde lazer kesim makineleri kullanılır. Boşta ve kesim yaparken ki hızları plazmaya oranla kat kat daha yüksek olduğu için hassasiyet ve seri imalat gereken ürünlerde yaygın şekilde kullanılır. Bu çalışmada da şekillendirilecek saclar 410 mm x 410 mm çaplarında 16 adet montaj deliği olacak şekilde Suzhou YOSOOON marka lazerde kesimi yapıldı.



Resim 3.3. Yosoon Marka Lazer Kesim Makinesi (Yosoon, 2024).

Tablo 3.4. Lazer kesim makinesi teknik özellikleri

YOSOON LAZER KESİM MAKİNASI TEKNİK ÖZELLİKLERİ	
Kesim Tablası Ölçüsü	1500 mm x 6000 mm
Güç	3 kW
Kullanılan Gaz	Hava - Oksijen - Azot
Kullanılan Rezonatör	MAX Photonics
Kullanılan Kesim Kafası	Raytools
Kullanılan Nozzle:	Single 1,2 mm
Kesim ölçüsü aralığı	0,3 mm - 20 mm
Kesim hassasiyeti	±0,02 mm

3.3.3. CNC dikey işleme

CNC dikey işleme makineleri yani freze makineleri, yıllardır kullanılan universal (manuel) frezelerden farklı ve avantajlı olarak ilerlemeleri manuel olarak değil otomatik olarak yapabilmeyi sağlamaktadırlar. Bu otomatik hareket ise manuel olarak hazırlanmış G kodlarıyla yapılabildiği gibi daha önceden CAD programları ile tasarımı yapılmış parçanın, bilgisayar ortamında CAM yazılımlarıyla programlanması ve G kodlarının post proses olarak alınıp makineye tanıtılması ile de hassas şekilde yapılabilmektedir. Eksenlerin birbirinden bağımsız olması ve üç eksenli makinelerde x ve y hareket ederken z ekseninin de aynı anda hareket edebilmesi makineye daha karmaşık yüzeyleri işleme imkanı sağlar. Bu makinelerde kullanılan takımlara ve kesici uçlara ve yapılan programa göre çok hassas imalatlar, karmaşık geometriye sahip parçalar, yüzdelik ve hatta bindelik hassasiyet ile işlenebilir ve yüksek yüzey kalitesi elde edilebilir. Bu çalışmada da Winner marka bir üç eksenli CNC dikey işleme tezgahı kalıp imalatı aşamasında kullanılmıştır. Makineye dair teknik özellikler ve makine resmi aşağıda verilmiştir.



Resim 3.4. Winner VMC 750 Model CNC dikey işleme tezgahı

Tablo 3.5. Winner VMC 750 CNC Dik işleme tezgahı teknik özellikleri

WINNER VMC 750 CNC FREZE TEZGAH TEKNİK BİLGİLERİ	
Tabla Ölçüleri	800 mm x 460 mm
Tabla Yükleme Ağırlığı	500 kg
X Hareketi	750 mm
Y Hareketi	460 mm
Z Hareketi	540 mm
İlerleme Hızı	10000 mm/dk
Spindle Çalışma Hızı	10000 dev/dk
Spindle Motor Gücü	7,5 kW
Şarjör Kapasitesi	24 T
Ağırlık	4300 kg
Kontrol Ünitesi	MITSUBISHI M80

3.3.4. CNC tornalama

CNC tornalar, parçanın rotasyonel hareket yaparken, kesici takımların sabit olduğu ancak parçaya yaklaşarak parça üzerinden talaş kaldırması prensibiyle çalışan makinelerdir. İşlenecek geometrinin CAD programıyla çiziminin ardından CAM yazılımı ile programlanması yapılarak işleme adımına geçilir ve yüzdelik hassasiyetlerle işlemler yapılabilir. Bu çalışmada hava çeliği malzeme kullanılan Ø12 mm şekillendirici takım, CNC torna makinesinde yarı küresel formda takım ucunda 5 mm radius olacak şekilde işlenmiştir. Takım ortasında 1 mm düz bir kısım kalmıştır.



Resim 3.5. Torna makinesinde işlenmiş $\varnothing 12$ mm radius 5 mm küresel şekillendirici takım

3.3.5. CNC markalama ve kazıma makinası

Çalışmada deney numunelerinin üzerlerine 2 mm çapında daire geometrileri yüzeye markalanmıştır. Burada amaç şekillendirme sonrası farklı parametreler uygulanmış numunelerdeki daire çaplarının değişimine göre uzama değerlendirmelerinin yapılmasıdır. Çalışmada LMSCAN marka PROScan10 modeli lazer markalama cihazı kullanılmıştır. Markalama işlemi dairelerin 2 mm çapında AutoCAD programında çizilip, .dxf formatında LMCAD programına yüklenmesi ve bu yazılımda yakma parametrelerinin ve markalama süresinin ayarlanması ile yapılmıştır.



a)

b)

Resim 3.6. a) Lazer markalama makinesi düzeneği, b) 2 mm çapında daire markalama yapılmış deney numunesi

3.3.6. Üç boyutlu tarama makinesi ve optik ölçüm cihazı

Deneylerin sonrasında geometrik doğruluğun tespiti için bir tersine mühendislik prosesi ve endüstriyel bir tarama cihazı olan Ölçüm ünitesi Atos Comact Scan 2M marka tarama cihazı kullanılmıştır. Tarama cihazının fotoğrafı Resim 3.7.'de ve teknik özellikleri Tablo 3.6.'da verilmiştir. Ayrıca deneyler için belirlenmiş kesik koni geometrisinin alt, üst çap ölçümü ve ovallik kontrolü bu çalışma özelinde hazırlanmış ve python programlama dili üzerinden kodlama işlemleri yapılarak sonuç ekranına yansıtılarak ölçümleri yapılmıştır.



Resim 3.7. Ölçüm ünitesi Atos Comact Scan 2M

Tablo 3.6. Atos Comact Scan 2M tarama cihazı teknik özellikleri (Cadem, 2024).

Ölçüm Ünitesi Atos Comact Scan 2M-Teknik Özellikleri		
Sensör	Kamera	Bilgisayar
Güç kaynağı: AC 110/230 Volt, 50-60 Hz	Çözünürlük: 8 veya 12 megapiksel	Kalıcı Yeri: İş İstasyonu
Yaklaşık ağırlık. 4 kg	Bağlantı: Gigabit Ethernet	Mobil: Dizüstü Bilgisayar (Thunderbolt 3 aracılığıyla)
Mesafe ayarı: Lazer pointers	Tarama hızı: yakl. 1 saniye	İşletim sistemi: Windows 10
Çalışma sıcaklığı: 5 ° C - 40 ° C (yoğuşmasız)		
Kablo uzunluğu: 10 m		

3.3.7. Sıcaklık ölçme cihazı

Çalışmada değişken parametrelerin sıcaklığa etkisi ve bu sıcaklık değişiminde şekillendirilebilirlik, takım ve sac yüzeyine etkileri üzerinde yorumlama yapabilmek için deney boyunca 5 dakika aralıklarla sıcaklık ölçümü yapılmış ve kayıt altına alınmıştır. Deneyde uzak mesafeden ölçüm yapabilen Uni-T UT300A+ Infrared lazerli termometre kullanılmıştır. Ölçümler hava ve kuru işlemeli deneylerde takım ve sac üzerinden alınmıştır, yağlı işlemlerde ise takım ve yağ sıcaklığı üzerinden alınmıştır.



Resim 3.8. Uni-T UT300A+ Infrared lazerli termometre ile yağ sıcaklık ölçümü

3.3.8. Yüzey kalitesi ölçüm cihazı (Profilometre)

İmalatta yüzey kalitesi büyük önem taşımaktadır. Yüzey kalitesi bir sonraki proses için de sıradaki hammadde olacağı için şekillendirme sırasında yüzeyin minimum pürüzlülük seviyesinde olması istenir. Bu çalışmada da ASŞ işlemi sonrası yüzey pürüzlülüğü MITECH MR200 profilometre ile ölçülmüş ve not edilmiştir. Kullanılan ölçüm cihazının teknik özellikleri aşağıda verilmiştir.



Resim 3.9. MITECH MR200 profilometre cihazı

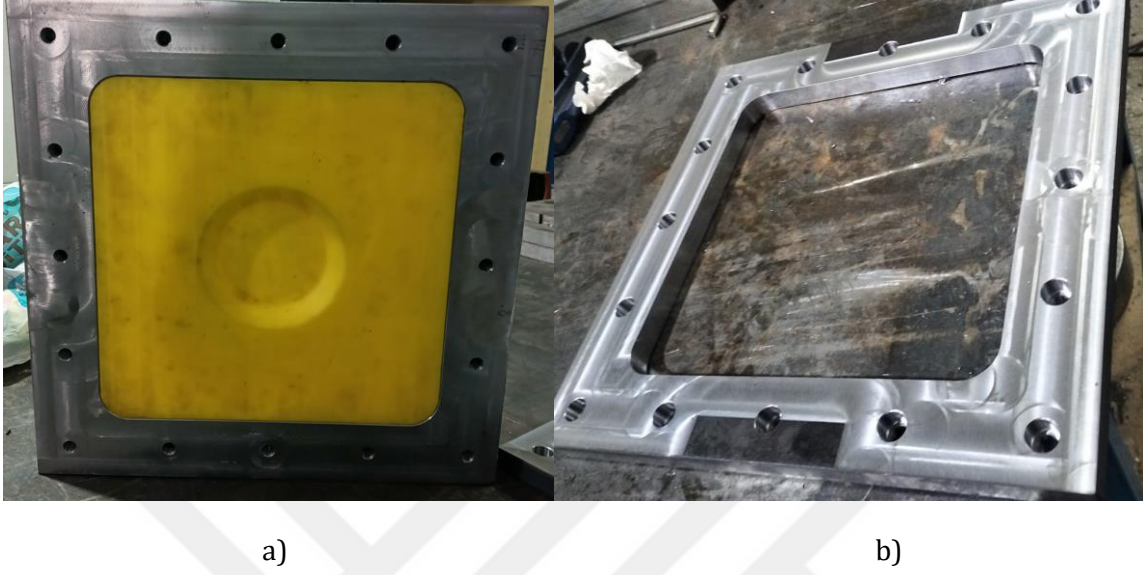
Tablo 3.7. Yüzey kalitesi ölçüm cihazı (Profilometre) teknik özellikleri (Onalkon, 2019)

Ölçülen parametreler	Ra, Rq, Rz, Rt, Rp, Rv, RS, RSm, Rz(JIS), Ry(JIS), RSk, R3z, Rmax, R _{Pc} , R _{mr}
Profiller	Birincil profil (P), Pürüzlülük profili (R), tp eğrisi (materyal rasyosu Mr)
Profil kayıt büyütmesi	Vv: 200x-20000x, Vh: 20x50x200
Standartlar	ISO/DIN/JIS/ANSI
Birim	µm/µinch
Ekran çözünürlüğü	0.001µm/0.04µinch
Ölçüm aralığı	Ra, Rq: 0.01-18 µm, Rz, Ry, Rp, Rt, R3z: 0.02-160 µm, Sm, S: 2-4000 µm, Tp: 1-100 % (% Ry)
Cut off uzunlukları	0.25mm (Ra: 0.02-0.32 µm), 0.8 mm (Ra: 0.32-2.50 µm), 2.5 mm (Ra: 2.5-15.00 µm)
Değerlendirme boyu	1-5 Cut Off
Toplam hareket boyu	(1-5 Cut Off)
Dijital Filtreler	RC, PC-RC, GAUSSIAN, D-P
Minimum ölçülebilir delik içi çapı ve derinliği	Çap: 6mm, Derinlik: 15mm, Hareket hızı: 1.0mm/s
Dedektör prob	Doğal Elmas yapımından radyüs: 5µm elmas
Çalışma sıcaklığı	5-45°C

3.4. Deney Düzenegi

Bu çalışmada, deney ASŞ yönteminin, fikstür yapısı farkı, ilerleme, devir, takım yolu ve aşığı adım farkıyla, yağ kullanımlı, hava kullanımlı ve kuru işleme yolunun ölçü, yüzey pürüzlülüğü, geometrik doğruluk ve sıcaklık üzerine etkileri incelenmiştir. Deneylerin yapımında öncelikle tutucu kalıplar yapılmış ve şekillendirilecek AISI 430 paslanmaz saclar kesilmiştir. Çalışmada parametre ve değişkenlerin çok olması ve her bir işleme prosesinin çok uzun sürmesi nedeniyle maliyet ve zaman açısından tüm deneylerin yapılması mümkün değildir. Bu nedenle Taguchi metodu kullanılmıştır ve parametreler ile karşılaştırılacak sonuçlara göre Taguchi ile yapılması gereken deney sayısını 36 adet olarak belirlenmiştir. Deney için ST-37 malzemenen

yapılmış alt ve üst tutucu olmak üzere bir tutucu kalıp ve mukavemetli bir polimer çeşidi olan kestamid malzemedan alt destek dişi kalıbı tasarlanmış ve CNC dik işleme tezgahında istenen ölçülere işlenmiştir. Detaylı bilgi bir sonraki başlıkta verilmiştir.



Resim 3.10. a) Alt tutucu ve içerisine geçirilmiş kestamid destek kalıbı, b) Üst tutucu

Deney sırasında 18 deney numunesi kestamid alt destekli fikstür yapısıyla şekillendirilmiştir, 18 deney yapısı da desteksiz olarak tek nokta artımlı sac şekillendirme işlemi ile şekillendirilmiştir. Fikstür yapısı çalışmada bir değişken olmakla beraber değişken ve sabit parametrelere ileriki başlıklarda yer verilmiştir. Deney sırasında alt ve üst tutucu kalıp arasında delikleri $\text{Ø}10,5$ mm olarak lazer makinesinde delinmiş olan 0,6 mm sac yerleştirilmiş ve 16 adet M12 vida ile dört kenar ve köşelerden sıkılarak sabitlenmiştir. Sonrasında mengeneyle sabitlenmiş kalıp üzerinden sıfırlama işlemi yapıp deneye hazır hale getirilmiştir. Deney düzeneğinin montajlı hali Resim 3.11.'de verilmiştir.



Resim 3.11. Deney düzeneğinin montajlı görünümü

3.4.1. Tutucu kalıplar tasarım aşaması

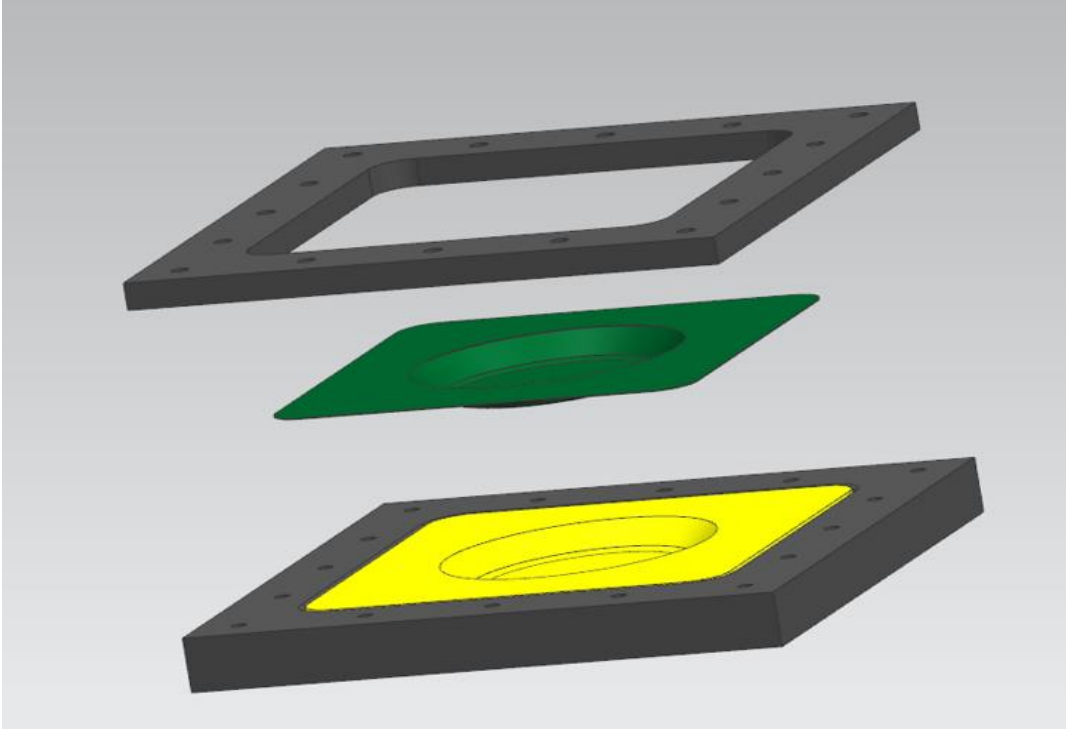
Alt ve üst tutucu kalıplar SolidWorks yazılımında üç boyutlu olarak çizilmiştir. Sonrasında bir CAM yazılımı olan Siemens NX programında CAM işlemi yapılarak Winner marka dik işleme tezgahında SolidWorks programında çizilen ölçülerde işlenmiştir. Tutucu kalıplardan üstte olanı için 20 mm kalınlığında ST-37 malzeme kullanılmış altta ki için ise 40 mm kalınlığında ST-37 kalite malzeme kullanılmıştır. Alt destek kalıbı olarak da alt tutucu kalıba sıkı geçme olarak monte edilecek ölçülerde işlenmiş 40 mm kalınlığında kestamid malzeme kalıp işlenmiştir. Literatürde alt destek kalıbı olarak polimer kullanılmış bir çalışmaya rastlanmamıştır, bu bakımdan çalışmanın kestamid malzeme yüzeyine sıvanarak gerçekleşecek bir ASŞ işleminin nasıl sonuç vereceği araştırma konusu olmuştur. Teknik resimleri EK-2 'de verilmiştir. Deneyde kullanılan alt destek kalıbının ölçüleri dış ölçüleri ise alt tutucu kalıbın içerisine sıkı geçme olarak çakılmak üzere 300 mm x 300 mm olarak işlenmiş ve alt tutucu plaka çakılmıştır. Tasarımı yapılan malzemeler öncelikle istenilen kalınlıklarda kesilmesi için ve kaba deliklerinin açılması için plazma makinesine .dxf formatına dönüştürülerek siparişi oluşturulmuştur. Plazmada 7.5 mm iç ölçülerden işleme payı bırakılarak kesilen parçalar sonrasında CNC dik işleme tezgahında Siemens NX programında CAM'i yapılarak Resim 3.19.'da verilen ölçülere hassas işlenmesi gerçekleştirilmiştir.

3.4.2. Tutucu kalıplar yapım aşaması

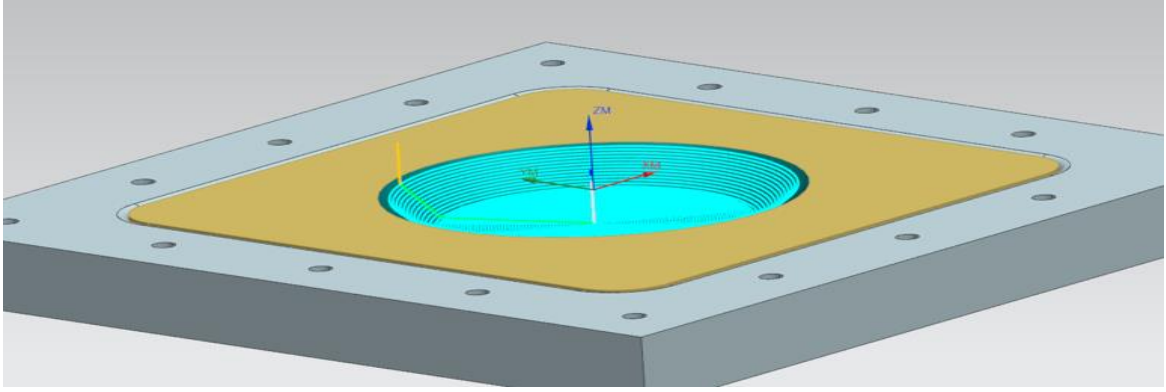


Resim 3.12. İşleme payı bırakılarak kesimleri yapılmış kalıp parçaları

Kullanılacak kestimid kalıp ise 40 mm x 300 mm ölçülerindeki kestimid kütükten 305 mm boyuna kesilmiştir. Sonrasında istenilen ölçülere göre CNC dik işlemede dış ölçülendirme işlemi yapılmış ve belirlenen geometride orta kısmı, başlangıç çapı 187 mm olan, 45° duvar açısı ve 20 mm derinliğe sahip bir kesik koni geometrisi olarak işlenmiştir. Kestamid malzeme işlenmiş geometride küçük çap ve tabanın birleşme ayrıntısına da deneyler sırasında \varnothing 12 mm küre şekillendirici takım kullanılacağı için 8 mm radius verilmiştir.

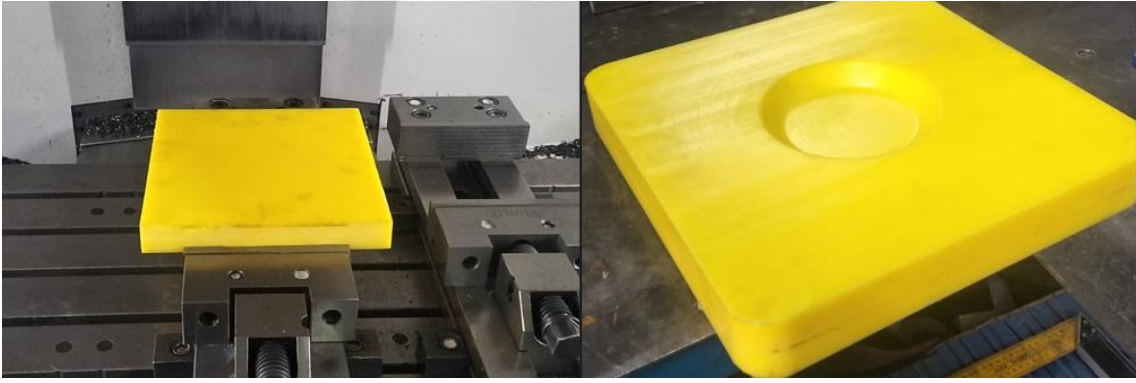


Resim 3.13. Deney düzeneği montajının ve şekillendirilmesi beklenen 0,6 mm 430 kalite paslanmaz sacın (yeşil) CAD yazılımında patlatılmış görünümü, kestimid kalıp (sarı), alt ve üst tutucu kalıplar (siyah)



Resim 3.14. Siemens NX'te işleme programı yapılmış kestamid malzemenin takım yolu görüntüsü

Öncelikle, tasarımı yapılan kalıpta kestamid alt destek, ST-37 çelik alt tutucu fikstüre sıkı geçme olacak şekilde çizimi yapılmıştır ve Siemens NX yazılımında işleme programı (CAM) yapılmış ve makineye post process olarak yüklenmiştir. Resim 3.14.'de CAM'i yapılan kalıbın takım yolları görünmektedir.



a)

b)

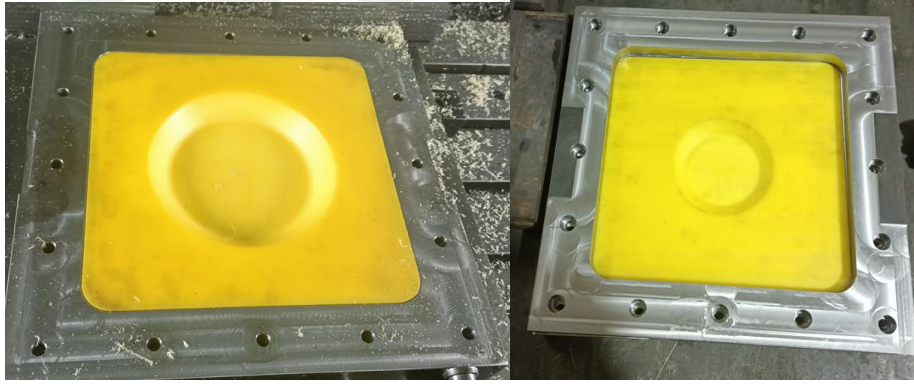
Resim 3.15. a) Mengene sıkıştırılmış ham kestamid kütük b) Siemens Nx programında CAM işlemi yapılmış ve işlenmiş kestamid alt destek kalıbı

Bir sonraki adımda ise plazmada kaba ölçüleriyle kesilmiş ST-37 kalite çelik kalıp parçaları yine CAM yazılımında programlanarak makinede istenilen ölçüde işlemesi yapılmıştır. Alt tutucu fikstüre 16 adet $\varnothing 10,5$ mm boyutunda montaj deliği delinmiş ve her birine M12 kılavuz çekme işlemi yapılmıştır. Üst tutucu fikstüre ise bu montaj deliklerine vidaların rahat girebileceği aynı sayıda ve merkezlerde $\varnothing 13$ mm delikler ve bu deliklere civata kafalarının oturup gömüleceği $\varnothing 22$ mm ölçüsünde 15 mm derinliğinde fatura açılmıştır. 420 mm x 420 mm ebatlarındaki alt tutucu kalıbın iç ölçüleri ise kestamid kalıbın ASŞ işlemi sırasında oynamaması için kestamid kalıbın sıkı geçme olarak girebileceği şekilde 300 mm x 300 mm ebatlarında işlenmiştir. İşleme sonrasında kestamid kalıp, alt tutucu kalıba sıkı sıkıya çakılmıştır.



Resim 3.16. Alt tutucu fikstürün iç ölçülerinin kestamid kalıba göre işlenmesi

Hassas ölçülerde işlenen kalıp fikstürlerinin arasına Aşş prosesi uygulanacak olan sac yerleştirilmiş ve deneye hazır hale getirilerek tezgaha bağlanmıştır. Resim 3.17'de gösterilmektedir.



a)

b)



c)

Resim 3.17. a) Alt tutucu fikstüre alt destek kalıbının geçirilmesi, b) Üst fikstürünüzzerine kapatılması, c) İşleme sacının yerleştirilmesi ve kalıbın vidalarla sabitlenmesi

3.5. Kullanılan Takım Bilgisi

ASŞ uygulamalarında şekillendirme işleminin yapılacağı sacın malzemesi, kalınlığı, soğutma sıvısı veya yağlayıcının kullanılıp kullanılmayacağı, şekillendirme geometrisine bağlı olarak şekillendirici takımın malzeme ve geometrisinin seçimi yapılır. ASŞ uygulamaları için literatürde HSS, karbür, bronz alaşımli şekillendirici takımlara rastlanmıştır. Hava çeliği olarak bilinen HSS malzeme takımlar, yüksek sertliğe, yüksek dayanıma sahip olduğu için bu çalışmada 430 paslanmaz çeliği şekillendirirken minimum oranda aşınacak takım olduğu önceki çalışmalardan elde edilen bilgiler doğrultusunda kullanılmıştır. Şekillendirici takımın geometri seçimi konusunda ise çalışmalardan elde edilen verilere göre düz duvarlarda büyük çaptaki takımın geometri doğruluğu ve proses süresinin daha iyi olduğu yorumu yapılmaktadır. Ancak geometri çok fazla büyüdüğünde bununda bir dezavantaja dönüşeceği için optimum ölçünün $\varnothing 8$ mm ile $\varnothing 20$ mm arasında olması gerektiği belirtilmiştir (Callebaut, 2011). Bu nedenle, çalışmada $\varnothing 12$ mm ve 5 mm uç radius ölçüsüne sahip küresel bir uç kullanımı tercih edilmiştir ve deneylerde küresel takım malzemesi ve ölçüleri sabit tutulmuştur. Tasarım aşaması SolidWorks yazılımında yapılmış, $\varnothing 12$ çapında HSS malzeme CNC torna makinesinde $\pm 0,01$ ölçü ve salgi hassasiyetinde işlenmiştir. Resim 3.18'de işleme öncesi ve işlem sonrası görüntüsü verilmiştir.



a)

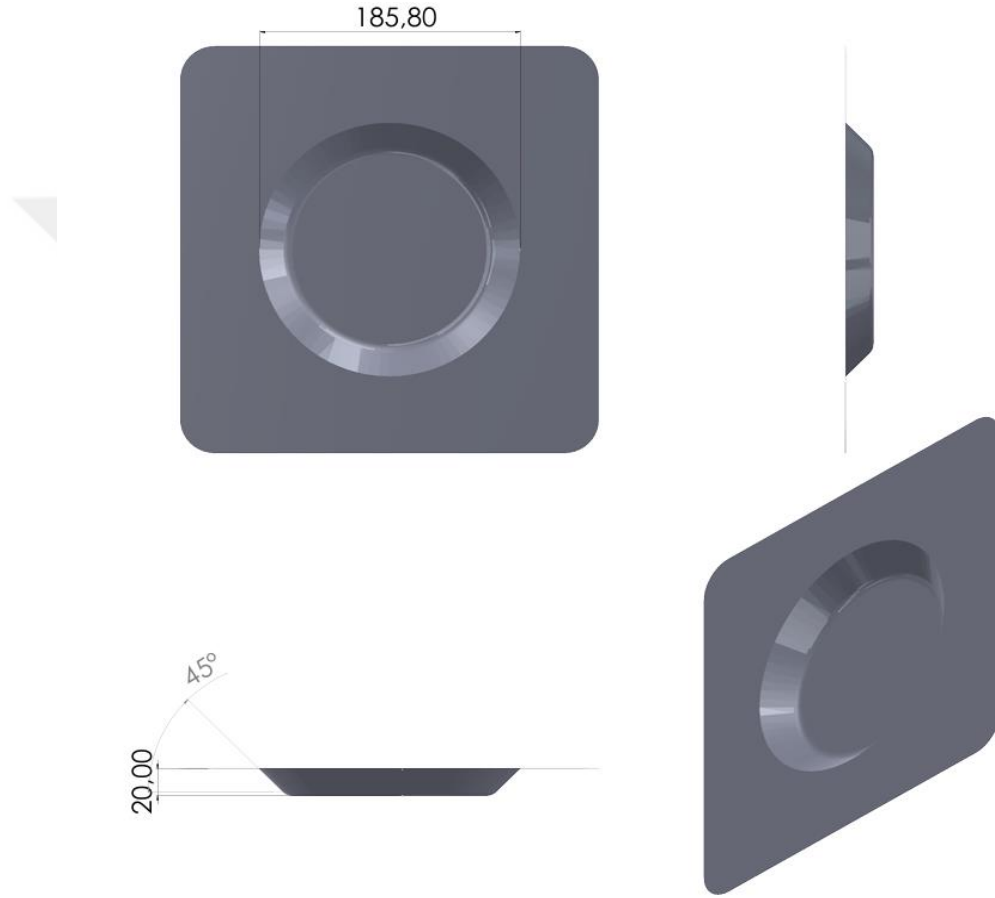
b)

Resim 3.18. a) $\varnothing 12$ mm çapında HSS malzeme, b) CNC tornada hassas işlenmiş $\varnothing 12$ mm R5 uçlu küresel HSS takım

3.6. İşlenecek Geometri

Çalışmada farklı parametrelerin 430 paslanmaz sacın şekillendirilebilirliğini, yüzey kalitesini, geometrik doğruluğunu, takımın aşınmasını incelenirken geometri sabit tutulmuştur. Daha önceki çalışmalarda kesik koni geometrisi sık sık kullanılmıştır ancak literatürde 430 kalite paslanmaz sacın şekillendirilmesine rastlanılmamıştır. Bu çalışmada da kullanılan kesik koni

geometrisi ilk etapta başlangıç çapı 187 mm, 45° duvar açısına sahip ve 32,5 mm derinlikte olarak belirlendi. Ancak sac ile kestamid kalıp arasında sac kalınlığı kadar boşluk bırakıldığından bu ölçü 185,5 mm başlangıç çapı ve 32,5 mm derinlik olarak uygulanmıştır. İlk denemeler bu şekilde yapıldı fakat tek nokta ASŞ deneyinde sacın geometri dışında ki bölgelerinde yoğun bir marullanma meydana geldi ve geri yaylanma durumu çok fazla gözlemlendi. Bu durumun tek nokta ve iki nokta ASŞ arasında kıyaslama yaparken sonuçları olumsuz etkileyeceği düşünüldüğünden geometrinin başlangıç çapı 185,5 mm ve derinliği 20 mm olarak belirlenirken duvar açısı 45°'de sabit tutuldu.

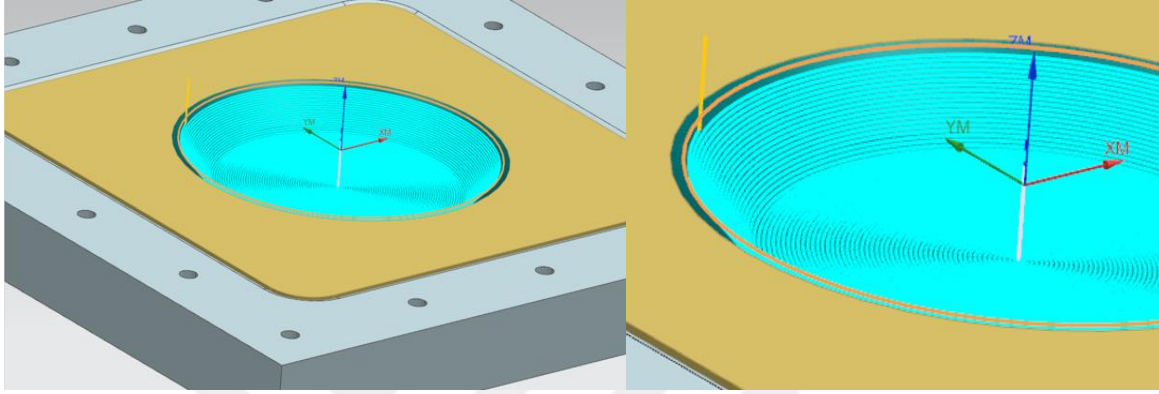


Resim 3.19. SolidWorks'te çizilmiş kesik koninin geometrik ölçülendirilmesi

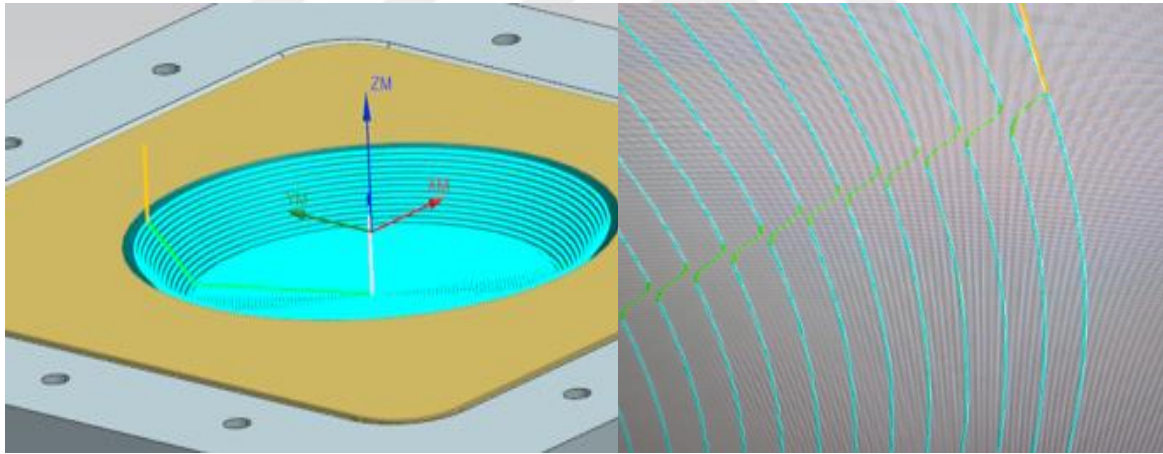
3.7. Takım Yolu Stratejileri

Çalışmada farklı takım yolu stratejilerinin diğer parametreler üzerindeki etkisinin mukayese edilebilmesi için imalatta kullanılan ve belirlenen ASŞ geometrisine de uygun olabilecek üç farklı takım yolu stratejisi belirlenmiştir. Tercih edilen takım yollarından Z-level'da, takım x ve y ekseninde iki boyutta hareketini yapar ve CAM yazılımında belirlenmiş bir noktada belirlenen aşağı adım ölçüsünde z ekseninde bir kademe aşağı iner ve bir önceki iki boyutlu takım yolu döngüsüne devam eder, takım her kademe indiğinde aynı döngüyü takip ederek prosesi sürdürür. Concentric Zig takım yolu prensipte Z-level stratejisiyle aynıdır ancak aşağı

adım (Δz) değeri için takım bir kademe inerken geçişler daha yumuşak ve yay şeklinde gerçekleşir, bu geçiş ile temas yüzeyinde deformasyonun ve incelmenin daha az olması beklendiğinden karşılaştırma amaçlı kullanılmıştır. Kullanılan bir diğer takım yolu stratejisi ise Helisel takım yoludur. Bu stratejide takım x ve y ekseninde hareket ederken aynı zamanda sürekli olarak z ekseninde de ilerleme kaydederek tam bir turu tamamladığında varması gereken aşağı adım (Δz) değerine varmış olur. Aşağı adım geçişlerinin helisel takım yolunda belli olması neredeyse imkansızdır.



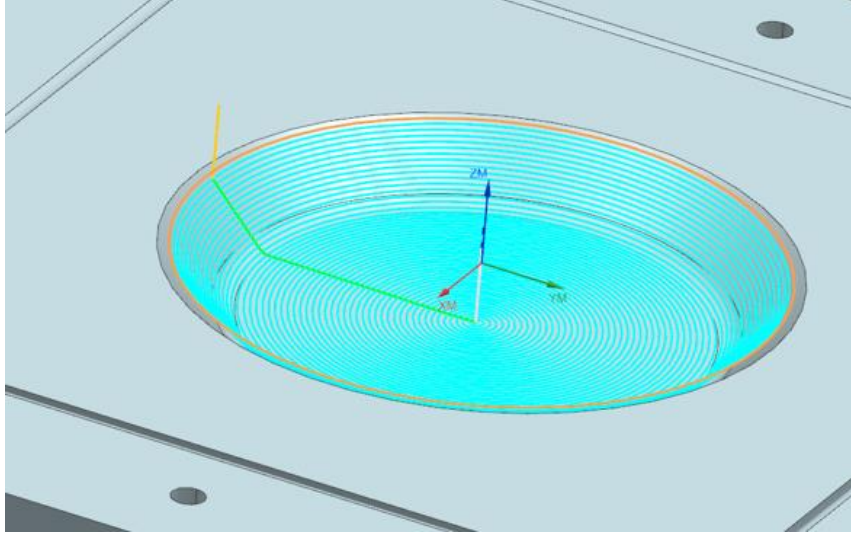
Resim 3.20. Spiral takım yolu stratejisi



a)

b)

Resim 3.21. Concentric Zig takım yolu stratejisi a) Genel görünüm, b) Geçiş yumuşatması



Resim 3.22. Z-level takım yolu stratejisi

3.8. Yağlayıcı Seçimi

Literatürdeki çalışmalardan varılan sonuçlara göre malzeme sertliği arttıkça kullanılan yağlayıcının viskozitesinin düşük olması gerekir. Bu çalışmada da Speedcut Fluid SB5016 yağ kullanılmıştır. Geometri kesik koni kullanıldığı ve geometri içbükey olduğu için her numune için 250 ml yağ kullanıldı ve oluşan yağ havuzunda şekillendirme işlemi gerçekleştirildi. Kullanılan yağın kimyasal özellikleri Tablo 3.8.'de verilmiştir.

Tablo 3.8. SB 5016 yağın kimyasal özellikleri

SB 5016 YAĞ ÖZELLİKLERİ		
Renk	-	Amber
Emülsiyon Görünümü	-	Yarı saydam
Yoğunluk, 15°C, g/ml	ASTM D 4052	1,0251
pH, %5 emülsiyon	ASTM D 1287	9,00-9,90
Pas Testi, % 4 Emülsiyon	DIN 51360/2	0/0
Refraktometre faktörü	-	1,5
Sert Su Çalışma Aralığı, °dH	-	5-50

3.9. Deneylerin Planlanması

Literatürde rastlanılmamış olan 430 kalite paslanmaz çeliğin tek noktadan ve iki noktadan ASŞ işlemi uygulanması doğrultusunda literatürde incelenmiş parametreler ile birlikte değerlendirilebilmesi için ilerleme hızı, fikstür yapısı, takım geometrisi, işleme geometrisi, duvar açısı, soğutucu çeşidi ve uygulaması, iş mili hızı, aşağı adım ölçüsü gibi belirli parametre,

faktör, sabit ve değişkenler belirlenmiştir. Belirlenen parametreler sonucunda $2^1 \times 3^6$ şeklinde L18 ortogonal dizilimi ile Taguchi metodundan faydalanılmıştır. Buna göre Taguchiye girilen değerler ve parametreler değerlendirilmiş ve Taguchi metodundan belirlenen 18 deney iki tekrarlı olarak yapılarak çalışma toplam 36 adet deney ile tamamlanmıştır. Deneyler sonucunda, deney sonuçlarının ölçümü amaçlı, kesit kalınlığı ölçülmüş, geometrik doğruluk kontrolü için 3D tarama cihazında deney numuneleri taranmış ve CAD data ile karşılaştırılması yapıp maksimum fark değerleri not edilmiştir. Deney sırasında sıcaklığın takıma, şekillendirilebilirliğe, yüzey pürüzlülüğüne etkisini görebilmek amacıyla beşer dakikada bir sıcaklık kontrolü kızılötesi termometre ile yapılmış ve not edilmiştir.

3.10. Belirlenen Deney Parametreler

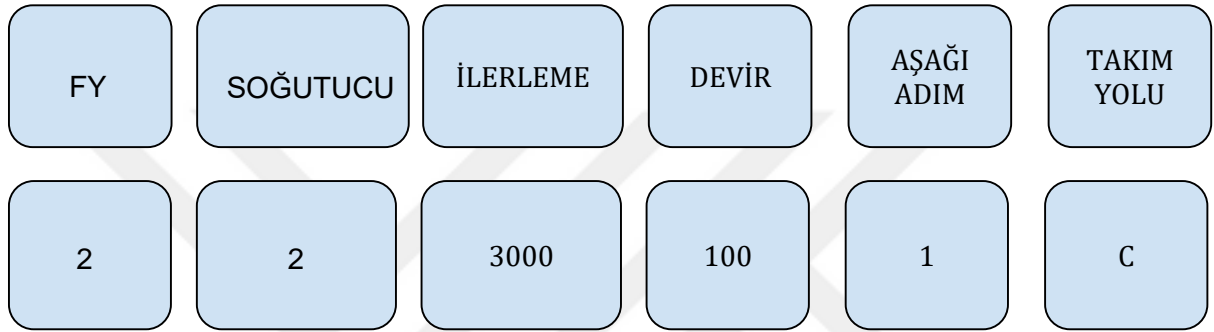
Tablo 3.9. Deneysel çalışmalar için belirlenmiş değişken parametreler

DEĞİŞKEN PARAMETRELER			
	1	2	3
İLERLEME	750	1500	3000
AŞAĞI ADIM	0,5	1	1,5
TAKIM YOLU	Z LEVEL	HELİSEL	CONCENTRIC ZİG
FİKSTÜR YAPISI	TEK NOKTA	İKİ NOKTA (DEĞİŞKEN FİKST.)	-
SOĞUTMA ÇEŞİDİ	KURU	YAĞLI	HAVA
DEVİR	BOŞTA	100	200

Tablo 3.10. Deneysel çalışmalar için belirlenmiş sabit parametreler

SABİT PARAMETRELER	
SAC MALZEMESİ	AISI 430
TAKIM GEOMETRİSİ	Ø12 MM R5 MM
ŞEKİLLENDİRME GEOMETRİSİ	KESİK KONİ
TAKIM TİPİ	YARI KÜRESEL
TAKIM MALZEMESİ	HSS
İLERLEME YÖNÜ	SAAT DÖNÜŞ YÖNÜ
TAKIM DÖNÜŞ YÖNÜ	SAAT DÖNÜŞ YÖNÜ
YAĞ MALZEMESİ	SB 5016
SAC KALINLIĞI	0,6 MM

Deney sayısı belirlenen parametreler ve parametrelerin kendi içerisinde ki faktör sayılarıyla birlikte tekrar sayısının da hesaplanması ile 972 adet deney yapılması gerekmektedir. Ancak bu ne zaman ne de maliyet açısından mantıklı ve uygun değildir. Taguchi metodu, çok daha az sayıda deney yaparak daha doğru sonuçlar verdiği için $2^1 3^6$ faktörleri kullanılarak L18 ortogonal dizilimine göre Taguchi metodundan faydalanılmıştır. Taguchi'ye girilen veriler sonucunda 18 deney yapılmıştır. Tekrar sayısı iki olduğu için toplamda 36 deney yapılmıştır. Deney parametrelerinin yapım listesi Tablo 3.11'de verilmiştir. Yapılmayan deneyler Taguchi tahmin metodu ile yapılmış gibi kabul görerek tahmin grafikleri oluşturulmuş ve sonuçlar kısmında tartışılmıştır. Deney aşamasında numunelerin karışmaması için her malzeme oluşturulan kodlama sistemine göre isimlendirilmiştir.



Şekil 3.2. Kodlama sıralaması ve deneylerde yapılmış bir deney numunesinin kodu

Yapılan deney tablosu kodlarına göre aşağıda verilmiştir.

Tablo 3.11. Taguchi metoduna göre yapılacak olan deney kodları ve parametreler

DENEY NO	FY	COOLING	FEED	DEV(dev/dk)	STEP(mm)	PATH
1	1	1	750	100	0,5	Z
2	1	1	1500	200	1	H
3	1	1	3000	0	1,5	c
4	1	2	750	100	1	H
5	1	2	1500	200	1,5	c
6	1	2	3000	0	0,5	Z
7	1	3	750	200	0,5	c
8	1	3	1500	0	1	Z
9	1	3	3000	100	1,5	H
10	2	1	750	0	1,5	H
11	2	1	1500	100	0,5	c
12	2	1	3000	200	1	Z
13	2	2	750	200	1,5	Z
14	2	2	1500	0	0,5	H
15	2	2	3000	100	1	c
16	2	3	750	0	1	c
17	2	3	1500	100	1,5	Z
18	2	3	3000	200	0,5	H

Tablo 3.12. Deneyi yapılan malzemelerin kısaltma ve kodlama sistemi

	FY(FİKSTÜR YAPISI)	SOĞUTMA(COOLING)	PATH(TAKIM YOLU STRATEJİK)
1	Tek Nokta (Desteksiz)	KURU	
2	İki Nokta (Kalıp Destekli)	YAĞ	
3		HAVA	
Z			Z-LEVEL
H			HELİCAL
C			CONCENTRIC ZIG

Deney sonuçlarının değerlendirme kısmında fikstür yapısı 1(desteksiz) ve 2(destekli), kullanılan soğutucu çeşidi 1(kuru), 2(yağlı), 3 (hava), kullanılan takım yolu stratejileri ise isimlerinin baş harfleri olarak kısaltılmış ve numaralandırılmıştır. Sonuç değerlendirme kısmında kullanılan grafik başlıklarında Tablo 3.12.'de bulunan isimlere göre yer verilmiştir.



4. BÖLÜM

SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

Deneyle tamamlanan çalışmada, takım sıcaklığı ($T_{tool}^{\circ C}$), parça veya yağlayıcı sıcaklığı ($T_{workpiece}^{\circ C}$), üç boyutlu taramadan alınan ölçüm raporlarına göre CAD data ile gerçek numunenin duvarları arasındaki en fazla uzaklık ölçüsü (Difmodel) ve yüzey pürüzlülüğü (Ra) ölçümlerine göre kayıt altına alıp not edilmiş ve istatistiksel sonuçlarına göre karşılaştırılması yapılmıştır. Çalışmanın bu bölümünde her sonuç değerlendirilecek ve sonuca etki eden parametrelerin önem sırası verilecektir.

4.1. Takım Sıcaklığı

Kuru, yağ ile, hava soğutma olarak şekillendirme işlemi yapılan deneylerde takım sıcaklığı beşer dakika ara ile ölçülmüştür ve kayıt altına alınmıştır. Altı farklı parametrenin takım sıcaklığına etkisinin önem sırası aşağıdaki gibidir. Sonuçlar istatistik yazılımında Taguchi analizi sonucuna göre elde edilmiştir. Sonuçlardan görülebileceği üzere takım sıcaklığı üzerinde en çok etkisi bulunan parametre kullanılan soğutma yöntemidir. Soğutma yönteminden sonra en çok iş milinin dönüş hızı ve sırasıyla ilerleme, takım yolu stratejisi ve aşağı adım etkilemiştir. Kullanılan fikstür yapısının ise takım sıcaklığı üzerinde çok bir etkisi olduğu görülmemiştir. Sonuçlar S/N grafiğinde gösterilmiştir ve parametrelerin etkileri kendi içerisinde değerlendirilmiştir. Takım sıcaklığına etki eden parametreler için hazırlanan S/N grafiğinde ki sonuçlara göre iki farklı fikstür yapısında da etki değeri aynı oranda olduğu için çok etkilemediği sonucuna varılmıştır. En çok etkisi bulunan soğutma yönteminde ise üç farklı parametre kullanılmıştır ve en iyi sonuç hava ile yapılan soğutma işleminde elde edilebilmiştir. Yağlı soğutmada ise takım sıcaklığının en yüksek seviyelere çıktığı görülmüştür bunun nedeni ise yağın sirkülasyonunun olmaması ve takımın geometri içerisinde biriken bir yağ havuzunda hareket etmesiyle takım sıcaklığını yağa iletmiştir. İş milinin 200 mm/dk olduğu deneylerde optimum değer elde edilebildiği görülürken devrin 100 dev/dk olduğu deneyde takım sıcaklığının arttığı görülmüştür. En düşük sıcaklık takımın helisel olarak şekillendirme yaptığı helisel takım yolu stratejisinde elde edilmiştir. Optimum ilerlemenin 750 mm/dk olarak kullanıldığı deneylerde ulaşılabileceği görülmüştür. Yüksek ilerleme değerlerinin takım sıcaklığını olumsuz etkilediği görülmüştür (Moayedfar, 2013). Takım sıcaklığı üzerinde ki etkisi incelendiğinde optimum aşağı adım değeri 1,5 mm iken 0,5 mm aşağı adımın kullanıldığı deneylerde takım sıcaklığının daha düşük olduğu görülmüştür ancak değerler arasında çok fazla fark olmadığından pek bir etkisi bulunmamaktadır.

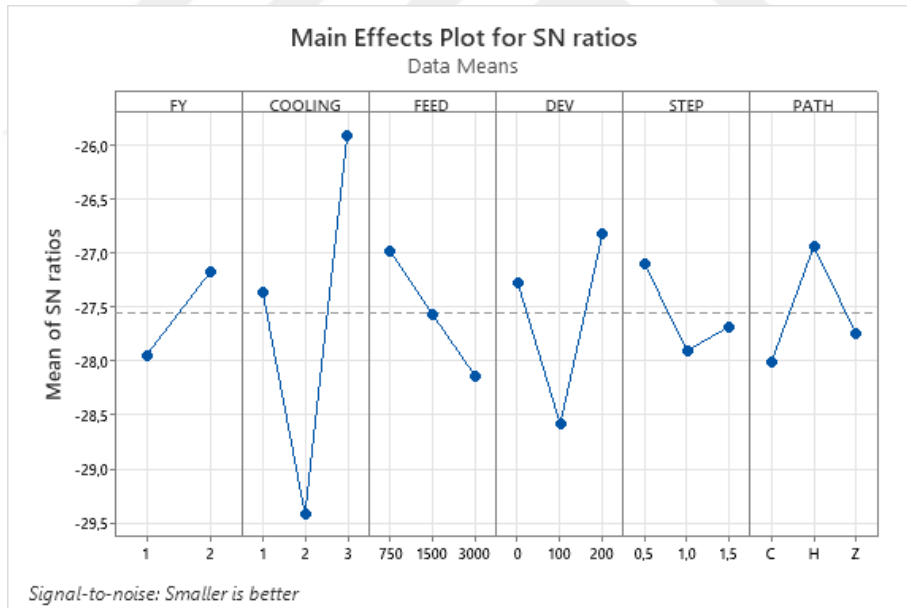
Tablo 4.1 Takım sıcaklığına etki eden parametrelerin önem sırası

Response Table for Signal to Noise Ratios

Smaller is better

Level	FY	COOLING	FEED	DEV	STEP	PATH
1	-27,94	-27,36	-26,98	-27,28	-27,10	-28,00
2	-27,18	-29,42	-27,57	-28,58	-27,90	-26,94
3		-25,91	-28,14	-26,82	-27,68	-27,74
Delta	0,77	3,51	1,16	1,76	0,80	1,07
Rank	6	1	3	2	5	4

Elde edilen tablo ve grafiğe göre takım sıcaklığını en çok etkileyen parametrenin cooling (yağlama türü) olduğu görülmektedir. En küçük sıcaklık en iyidir temeline dayandırılarak hazırlanan tabloda 1. ve 2. yani kuru ve hava ile yapılan cooling(soğutma/yağlama) yöntemi en yakın sonucu verirken yağ ile yapılan şekillendirme işlemi takım sıcaklığının daha fazla artmasına sebep olduğu görülmektedir. İş milinin 200 dev/dk ile döndüğü parametrede sıcaklık en düşük seviyelerde görülmüştür. En yüksek sıcaklık değerleri iş milinin 100 dev/dk döndüğü deneyde görülmüştür.



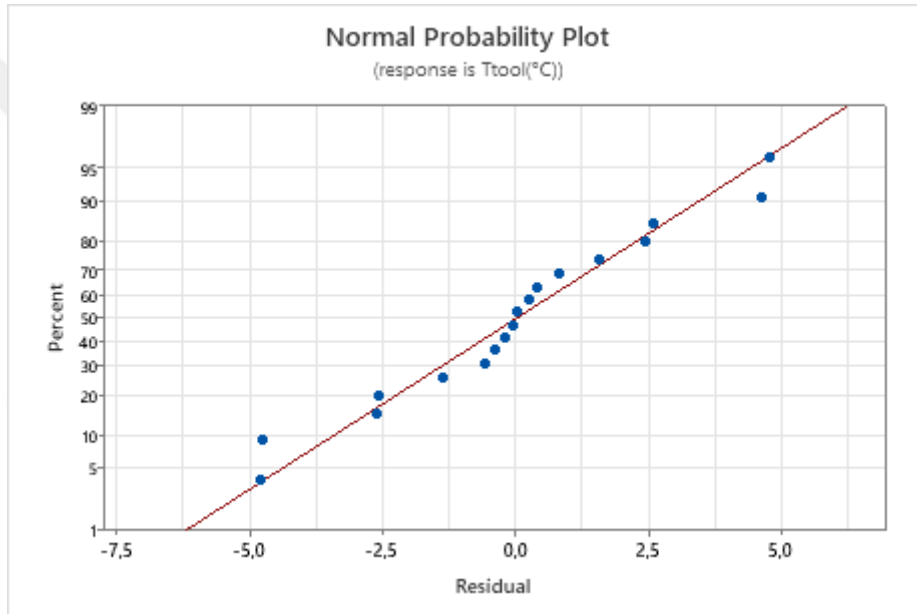
Şekil 4.1. Taguchi analizi sonucunda elde edilen sinyal/gürültü oranı

Yapılan anova testi sonucuna göre deney modelinde kullanılan faktörlerle değişkenin değişimi %81,51 oranla açıklanabilir olduğu görülmektedir (Tablo 4.2).

Tablo 4.2. Takım Sıcaklığı ANOVA testi sonucu

Analysis of Variance

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
FY	1	15,44	2,35%	15,44	15,44	0,76	0,416
COOLING	2	335,14	51,11%	335,14	167,57	8,29	0,019
FEED	2	36,11	5,51%	36,11	18,06	0,89	0,457
DEV	2	84,09	12,82%	84,09	42,05	2,08	0,206
STEP	2	23,97	3,66%	23,97	11,98	0,59	0,582
PATH	2	39,73	6,06%	39,73	19,86	0,98	0,427
Error	6	121,25	18,49%	121,25	20,21		
Total	17	655,73	100,00%				



Şekil 4.2. Takım Sıcaklığı ANOVA testi sonucuna göre hazırlanmış gerçek deney ve tahmini değerlerin normal olasılık grafiği

Takım sıcaklığı için regresyon denklemi aşağıdaki gibidir.

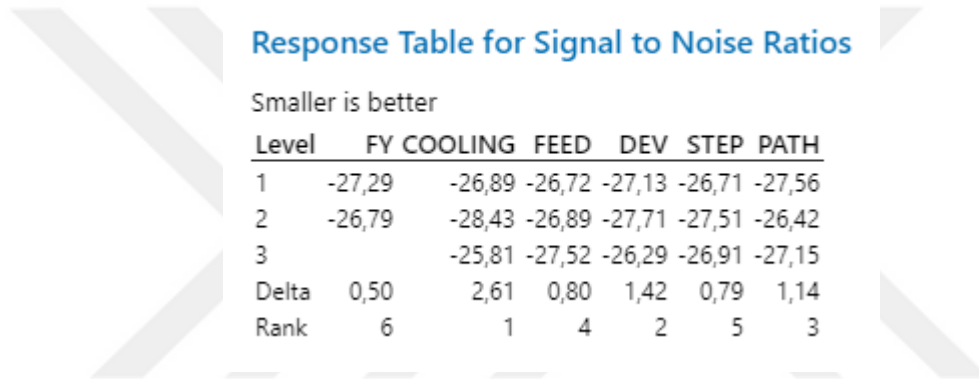
$$\begin{aligned} T_{\text{tool}}(^{\circ}\text{C}) = & 24,55 + 0,93 \text{ FY}_1 - 0,93 \text{ FY}_2 - 0,95 \text{ COOLING}_1 + 5,69 \text{ COOLING}_2 \\ & - 4,75 \text{ COOLING}_3 - 1,76 \text{ FEED}_{750} + 0,05 \text{ FEED}_{1500} + 1,71 \text{ FEED}_{3000} \\ & - 0,76 \text{ DEV}_0 + 2,94 \text{ DEV}_{100} - 2,18 \text{ DEV}_{200} - 1,58 \text{ STEP}_{0,5} \\ & + 1,14 \text{ STEP}_{1,0} + 0,44 \text{ STEP}_{1,5} + 1,56 \text{ PATH}_C - 2,00 \text{ PATH}_H + 0,44 \text{ PATH}_Z \end{aligned}$$

4.2. İş Parçası ve Yağ Sıcaklığı

Takım sıcaklığı ölçülürken aynı zamanda eş zamanlı olarak, soğutma sistemi olarak yağ kullanılan işlemlerde oluşan yağ havuzunun sıcaklığı, hava ile soğutma ve kuru olarak yapılan işlemlerde ise doğrudan sac üzerinde şekillendirme bölgesinden alınan sıcaklıklar kayıt edilmiş ve ölçülen değerler doğrultusunda taguchi analizi ve anova testi yapılmıştır.

Deney sırasında yapılan sıcaklık ölçümleri sonucunda deney parçasının sıcaklığını etkileyen en önemli parametrenin soğutma yöntemi olduğu görülmüştür. Devamında sırasıyla etkili parametreler, devir, takım yolu stratejisi ilerleme hızı ve aşağı adım olduğu görülürken en az etkisi bulunan parametrenin ise fiktür yapısı olduğu gözlemlenmiştir.

Tablo 4.3. İş parçasında oluşan sıcaklığa etki eden parametrelerin önem sıralaması

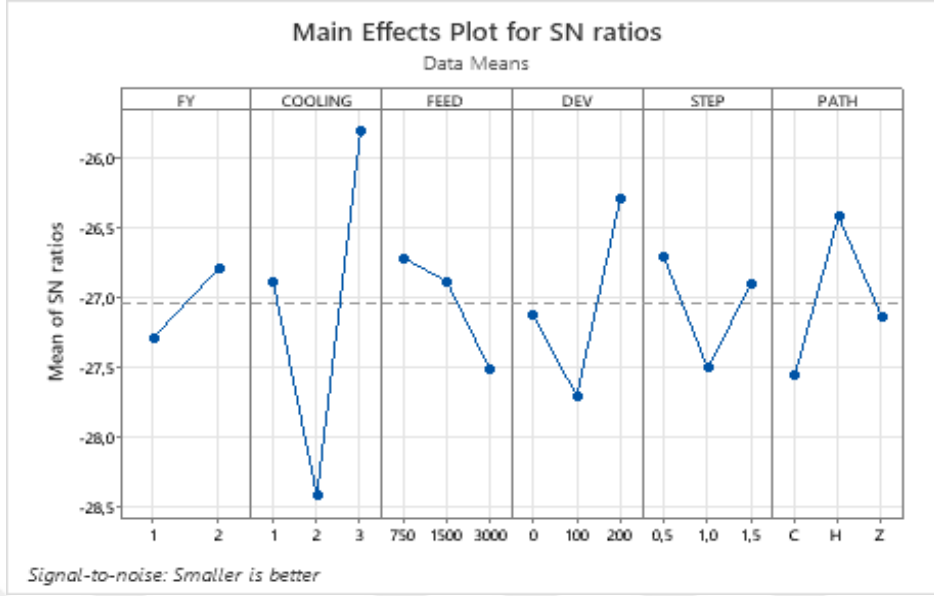


Response Table for Signal to Noise Ratios

Smaller is better

Level	FY COOLING	FEED	DEV	STEP	PATH	
1	-27,29	-26,89	-26,72	-27,13	-26,71	-27,56
2	-26,79	-28,43	-26,89	-27,71	-27,51	-26,42
3		-25,81	-27,52	-26,29	-26,91	-27,15
Delta	0,50	2,61	0,80	1,42	0,79	1,14
Rank	6	1	4	2	5	3

Elde edilen sıcaklık değerlerine göre oluşturulmuş S/N grafiğine göre yağlı yapılan işlemlerde sıcaklığın en yüksek değerlere ulaştığı, hava ile soğutmada ise en düşük sıcaklık değerlerinin elde edildiği gözlemlenmiştir anca optimum değerlere kuru olarak yapılan deneylerde ulaşıldığı görülmektedir. Takım sıcaklığını en olumlu etkileyen devirin kafanın boşta olduğu deneylerde gözlemlendiği gibi iş milinin boşta olması parça sıcaklığını da olumlu yönde etkilemiştir. Helisel takım yolunun kullanıldığı deneylerde en düşük iş parçası sıcaklıkları elde edilmiştir ancak optimum değerlere z-level takım yolu stratejisinin kullanıldığı deneylerde ulaşılmıştır. İlerleme hızı arttıkça iş parçasının sıcaklığının arttığı gözlemlenmiştir. Optimum değerlere 1500 mm/dk ile şekillendirme işleminin yapıldığı deneylerde ulaşılmıştır. 0,5 mm aşağı adımın uygulandığı deneylerde sıcaklığın en düşük, 1 mm aşağı adımın uygulandığı deneylerde en yüksek değerleri kaydedilirken optimum değerler iş parçası sıcaklığı için 1,5 mm aşağı adım uygulanan deneylerde elde edilmiştir. Temas nokta sayısının parça sıcaklığı üzerinde belirgin bir etkisi olmamasına ve değerler birbirine yakın olmasına rağmen iki noktadan temaslı ASS deneylerinde iş parçasının daha fazla ısındığı görülmüştür.



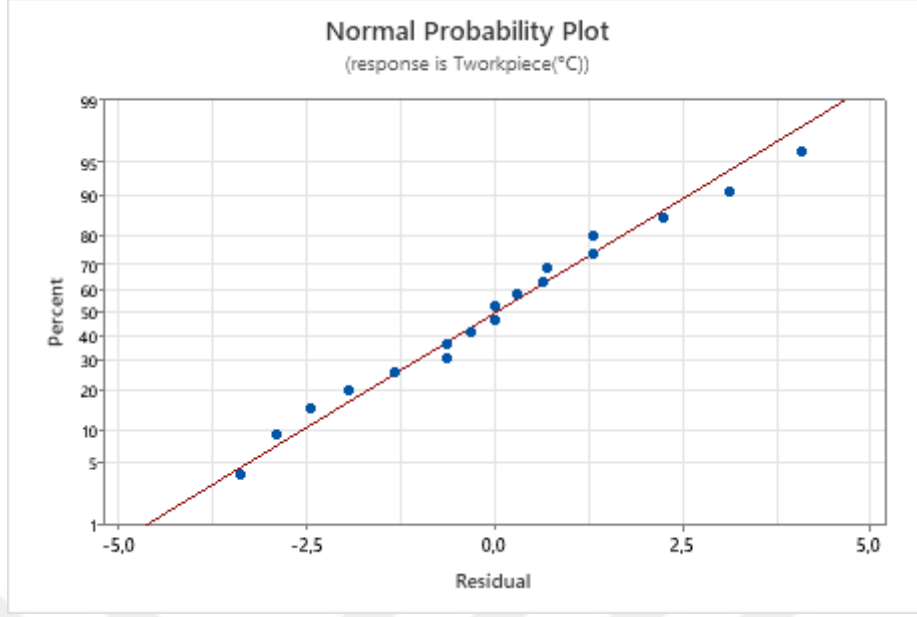
Şekil 4.3. İş parçasında oluşan sıcaklıkların Taguchi analizi sonucunda elde edilen sinyal/gürültü grafiği

Anova testi sonucuna göre deney modelindeki parametre ve faktörlerle %80,90 oranında ifade edebildiği ortaya konulmuştur.

Tablo 4.5. İş parçası sıcaklığı ANOVA testi sonucu

Analysis of Variance

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
FY	1	4,109	1,16%	4,109	4,109	0,36	0,569
COOLING	2	163,993	46,22%	163,993	81,996	7,26	0,025
FEED	2	20,195	5,69%	20,195	10,097	0,89	0,457
DEV	2	42,674	12,03%	42,674	21,337	1,89	0,231
STEP	2	19,909	5,61%	19,909	9,955	0,88	0,462
PATH	2	36,172	10,19%	36,172	18,086	1,60	0,277
Error	6	67,775	19,10%	67,775	11,296		
Total	17	354,826	100,00%				



Şekil 4.4. ANOVA testi sonucuna göre hazırlanmış gerçek deney sonuçları ve tahmini sonuçların normal olasılık grafiği

İş parçası ve yağ sıcaklığı için regresyon denklemi aşağıda verilmiştir.

$$\begin{aligned} \text{Tworkpiece}(^{\circ}\text{C}) = & 22,881 + 0,478 \text{ FY}_1 - 0,478 \text{ FY}_2 - 0,68 \text{ COOLING}_1 + 3,99 \text{ COOLING}_2 \\ & - 3,31 \text{ COOLING}_3 - 1,01 \text{ FEED}_{750} - 0,45 \text{ FEED}_{1500} + 1,46 \text{ FEED}_{3000} \\ & + 0,41 \text{ DEV}_0 + 1,65 \text{ DEV}_{100} - 2,06 \text{ DEV}_{200} - 1,07 \text{ STEP}_{0,5} \\ & + 1,43 \text{ STEP}_{1,0} - 0,36 \text{ STEP}_{1,5} + 1,67 \text{ PATH}_C - 1,80 \text{ PATH}_H \\ & + 0,13 \text{ PATH}_Z \end{aligned}$$

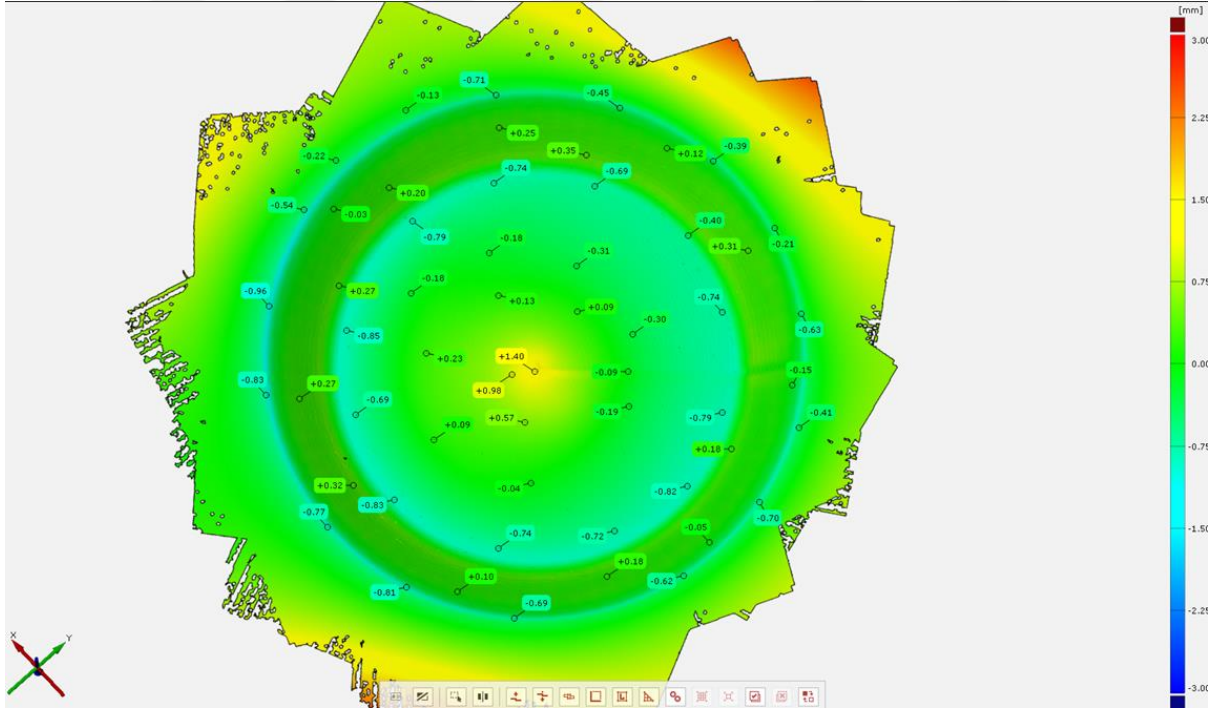
4.3. CAD data- 3D Tarama Sonuçlarının Karşılaştırılması

Deneyel çalışmalar tamamlandıktan sonra, tersine mühendislik işlemi olan üç boyutlu tarama cihazı tarafından şekillendirme parçaları tarandı. Tarama verileri .STL formatında kaydedildi ve tasarımı yapılan CAD data ile geometrik doğruluk karşılaştırılması amacıyla yüzey yüzeye getirilerek %1'lik bir hassasiyet oranıyla karşılaştırılması yapıldı. Karşılaştırma sonuçları optik tarama cihazında tarama işleminin ardından ölçüm raporları olarak alındı. Raporlarda örtüştürülen yüzeyler arasındaki ± 3 mm fark renk skalasında gösterilmiştir. CAD datadan

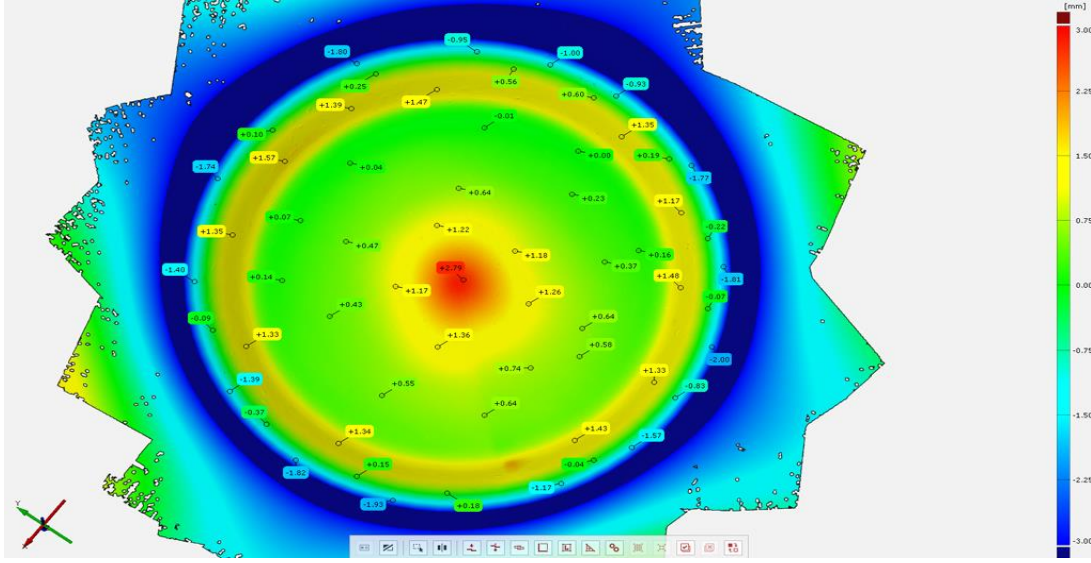
yukarıda kalan kısımlar kırmızı renkte, aşağıda kalan kısımlar ise mavi renkte verilmiştir. Bu raporlara göre aynı noktadan en fazla yüzey farklılıkları not edildi ve bu farklılıklar Minitab programına girildi. Girilen değerlere göre Taguchi analizi ve anova testi yapıldı. Taraması yapılan ve CAD data ile karşılaştırılması yapılan deney numunelerinden bazıları Şekil 4.5 ve 4.6.'da gösterilmiştir.



Resim 4.1. ASŞ işlemi yapılmış deney numuneleri



Şekil 4.5. Şekillendirme işlemi yapılmış 3 numaralı deney numunesinin optik tarama ölçüm raporu



Şekil 4.6. Şekillendirme işlemi yapılmış 12 numaralı deney numunesinin optik tarama ölçüm raporu

Tarama sonucunda ölçüm raporu üzerinden şekillendirme üzerinde takım, fiyestür yapısının etkisini en iyi görüntüleyebilecek yer olduğundan her numune için duvardaki en fazla ölçü farklılığı not edildi. Kaydedilen veriler üzerine yapılan analizler sonucunda geometrik doğruluğu etkileyen parametrelerin önem sıralaması ve buna göre Taguchi analizi ve ANOVA testleri aşağıda gösterilmiştir. S/N grafiğine bağlı olarak oluşturulan en fazla etkisi bulunan parametreler sırasıyla fiyestür yapısı, takım yolu stratejisi, soğutma yöntemi, aşağı adım ölçüsü, ilerleme hızı ve iş milinin dönüş hızıdır.

Tablo 4.6. Tarama sonuçlarına göre geometrik doğruluğu etkileyen parametrelerin önem sıralaması

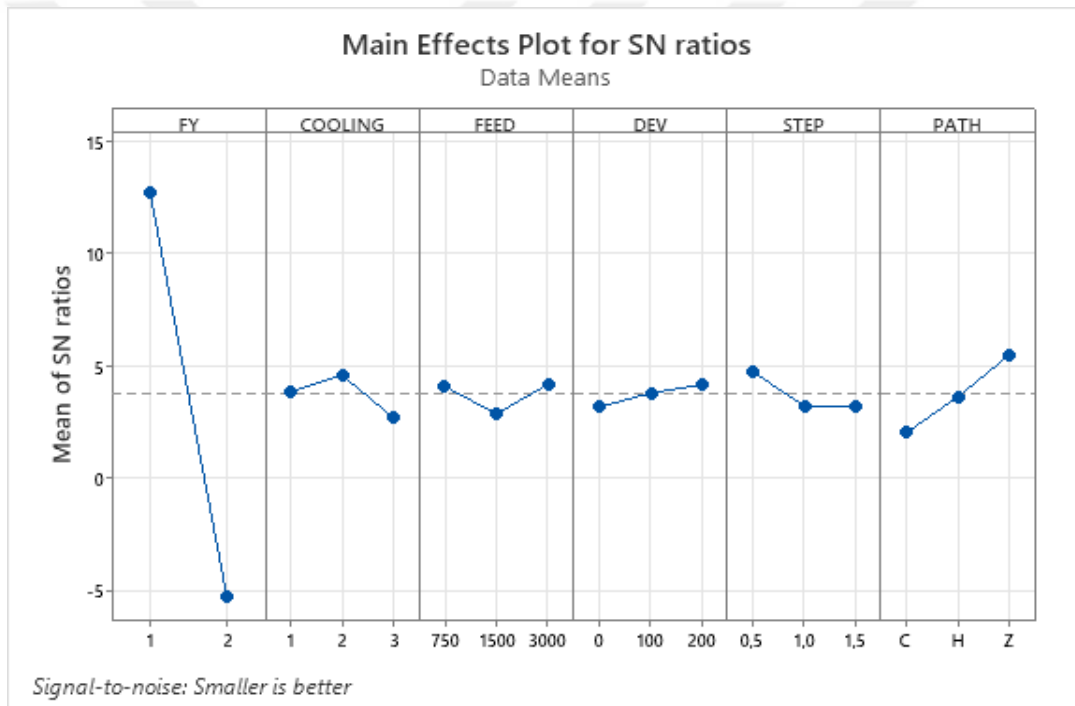
Response Table for Signal to Noise Ratios

Smaller is better

Level	FY COOLING FEED	DEV	STEP	PATH
1	12,716	3,846	4,097	3,185 4,737 2,044
2	-5,280	4,601	2,872	3,797 3,229 3,628
3		2,709	4,186	4,173 3,190 5,483
Delta	17,996	1,892	1,313	0,988 1,547 3,440
Rank	1	3	5	6 4 2

Oluşturulan S/N grafiğinde şekillendirilebilirlik ve geometrik doğruluk üzerinde en fazla etkisi olan parametre fiyestür yapılarından alt destekli yani iki noktadan temaslı ASŞ deneylerinin

sonucuna göre geometrik doğruluk ve şekillendirilebilirlik üzerinde CAD dataya en yakın değerleri elde etmekte ve geometrik doğruluğa ulaşmakta etkili bir yöntem olduğu görülmektedir. Yağ ile yapılan soğutma yönteminde optimum değerler elde edilirken beklenildiği üzere helisel takım yolu kullanılarak yapılan deneylerin de optimum değerlerde seyrettiği görülmüştür. 100 dev/ dk iş mili hızının kullanıldığı çalışmada değerler optimum olduğu görülmüş, iş mili hızı arttıkça veya azaldıkça değerler optimal hızlardan az da olsa uzaklaşmıştır. İş mili hızları arasında ki farklar arttırılarak etkisi daha detaylı incelenebilir. Aşağı adımın geometrik doğruluğa etkisi beklenildiği gibi en küçük aşağı adımda en iyi sonucu vererek olmuştur. İlerleme hızının geometrik doğruluk üzerinde çok fazla bir etkisi olmazken, 3000 mm/dk' da deneyler için optimum bir değer elde edildiği görülür ancak ilerleme hızının en yavaş olduğu parametrede geometrik fark minimum olarak ölçülmüştür.



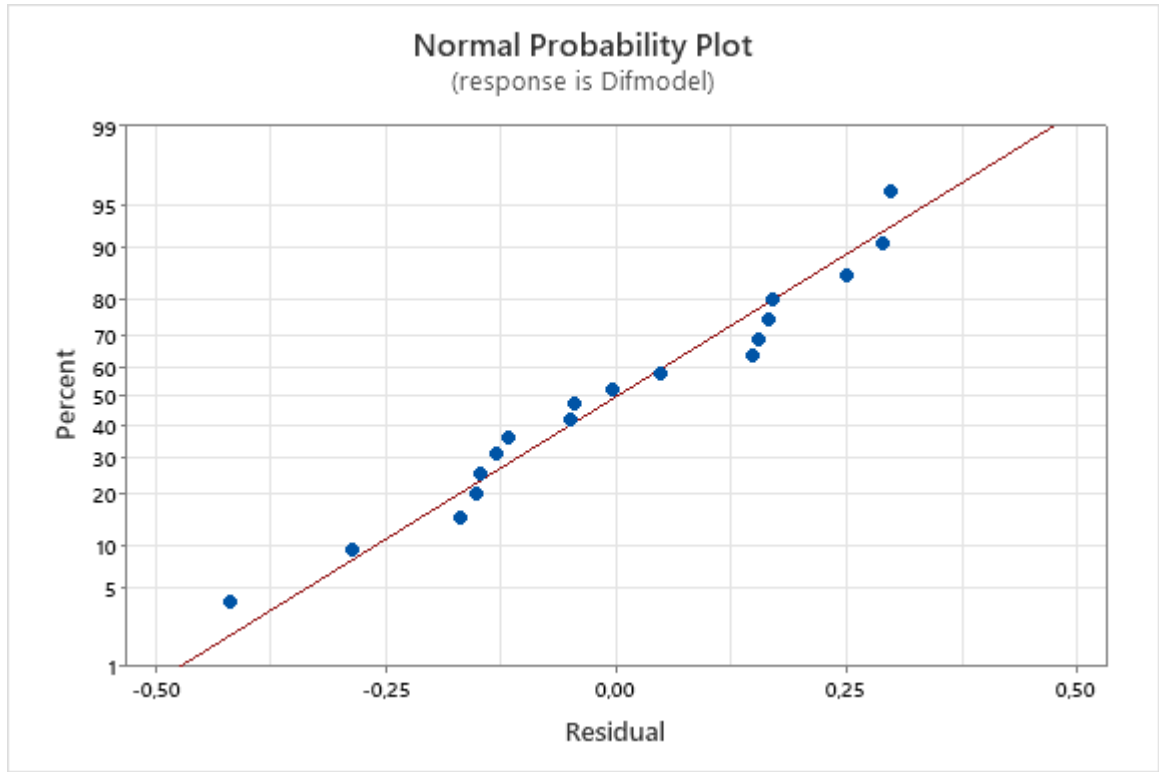
Şekil 4.7. Tarama sonuçlarına göre Taguchi analizi sonucunda elde edilen sinyal/gürültü oranı grafiği

Elde edilen verilere dayanarak yapılan anova testi sonucuna göre deneyde belirlenen parametre ve faktörler ile %95'lik oranla açıklanabilir olduğu görülmüştür.

Tablo 4.7. Geometrik doğruluk için ANOVA testi sonucu

Analysis of Variance

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
FY	1	12,1853	87,36%	12,1853	12,1853	103,32	0,000
COOLING	2	0,3894	2,79%	0,3894	0,1947	1,65	0,268
FEED	2	0,0721	0,52%	0,0721	0,0360	0,31	0,747
DEV	2	0,2370	1,70%	0,2370	0,1185	1,00	0,420
STEP	2	0,0927	0,66%	0,0927	0,0464	0,39	0,691
PATH	2	0,2634	1,89%	0,2634	0,1317	1,12	0,387
Error	6	0,7076	5,07%	0,7076	0,1179		
Total	17	13,9476	100,00%				



Şekil 4.8. Geometrik doğruluğun ANOVA testi sonucuna göre deneysel sonuç değerlerinin ve tahmini değerlerin normal olasılık grafiği

Cad data ve deneysel sonuçların tarama ölçülerinin karşılaştırılması işleminin regresyon denklemi aşağıdadır.

$$\begin{aligned} \text{Difmodel} = & 1,0650 - 0,8228 \text{ FY}_1 + 0,8228 \text{ FY}_2 - 0,190 \text{ COOLING}_1 \\ & + 0,022 \text{ COOLING}_2 + 0,168 \text{ COOLING}_3 - 0,078 \text{ FEED}_750 - \\ & 0,077 \text{ FEED}_1500 + 0,002 \text{ FEED}_3000 + 0,115 \text{ DEV}_0 - 0,157 \text{ DEV}_100 \\ & + 0,042 \text{ DEV}_200 - 0,035 \text{ STEP}_0,5 + 0,100 \text{ STEP}_1,0 \\ & - 0,065 \text{ STEP}_1,5 + 0,165 \text{ PATH}_C - 0,043 \text{ PATH}_H - 0,122 \text{ PATH}_Z \end{aligned}$$

4.4. Yüzey Pürüzlülüğünün (Ra) İncelenmesi

Artımlı sac şekillendirme işleminde yüzey pürüzlülüğüne etki eden birçok parametre bulunmaktadır. Çalışmada şekillendirme işlemi tamamlanan her deney parçasından kesit alınarak yüzey kalitesi önce profilometre ile ölçülmüş sonrasında da Mahr markalı form ölçme cihazıyla kesit alınmadan doğrudan parka üzerinde ölçüm yapılmıştır ve kaydedilmiştir. Bu iki sonuç karşılaştırılarak yüzey pürüzlülüğüne etki eden parametrelerin önem sıralaması Taguchi metodu ile hazırlanmıştır. Yapılan deneyler sonucu elde edilen verilere göre yüzey kalitesine etki eden en önemli parametreler sırasıyla fikstür yapısı, devir, takım yolu stratejisi, soğutma yöntemi, ilerleme hızı ve aşağı adım ölçüsü olmuştur.

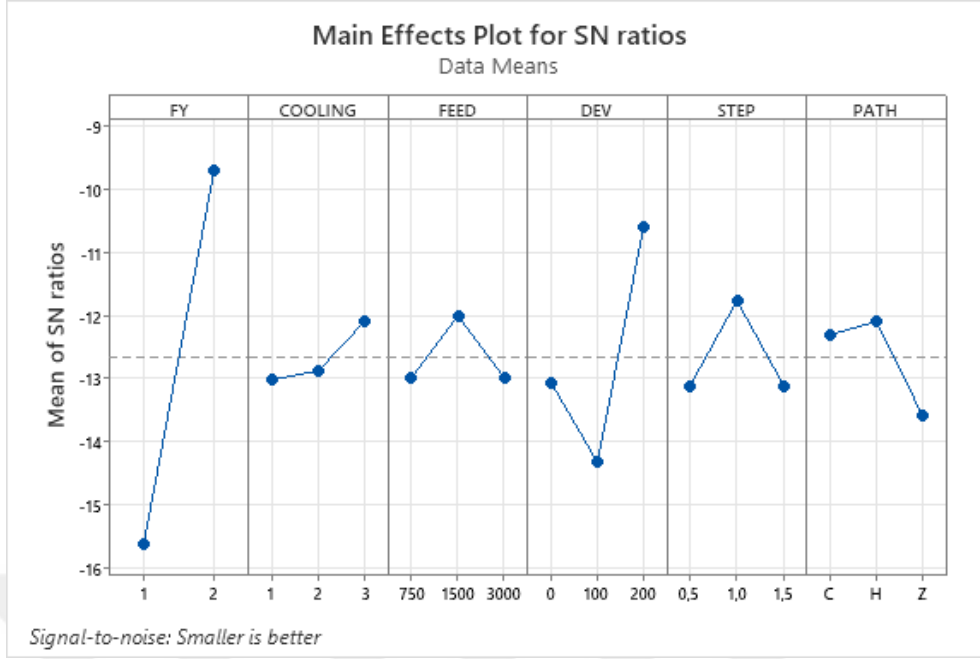
Tablo 4.8. Yüzey pürüzlülüğüne etki eden parametrelerin önem sıralaması

Response Table for Signal to Noise Ratios

Smaller is better

Level	FY COOLING	FEED	DEV	STEP	PATH	
1	-15,611	-13,018	-12,990	-13,062	-13,111	-12,303
2	-9,714	-12,876	-12,008	-14,325	-11,765	-12,098
3		-12,094	-12,990	-10,601	-13,112	-13,587
Delta	5,896	0,924	0,982	3,724	1,347	1,490
Rank	1	6	5	2	4	3

Yüzey pürüzlülüğü ölçüm sonuçlarına göre elde edilen S/N grafiğinden anlaşıldığı üzere fikstür yapısının destekli olduğu deneylerde yüzey pürüzlülüğünün çok daha iyi sonuç verdiği görülmektedir. Devir değerinin 100 dev/dk olduğu çalışmalarda pürüzlülük değerleri için daha iyi sonuçlar elde edildiği görülmüştür. Z level takım yolunun kullanıldığı çalışmalarda yüzey pürüzlülüğü daha az olmasına rağmen helisel takım yolu optimum değerleri vermektedir. Beklenenin aksine kuru olarak şekillendirme işleminin yapıldığı ASS işlemlerinde daha düşük pürüzlülük gösteren yüzey elde edildiği görülmektedir. İlerleme hızının düşük olduğu deneylerde daha iyi yüzeyler elde edilmiştir ancak optimum değere 3000 mm/dk hızda ulaşıldığı görülmüştür. Aşağı adımın yüzey pürüzlülüğü üzerinde pek fazla bir etkisi olmadığı görülmüştür.



Şekil 4.9. Yüzey pürüzlülüğü ölçüm sonuçlarına göre Taguchi analizi sonucunda elde edilen sinyal/gürültü oranı grafiği

Yapılan ANOVA testi sonucunda Tablo 4.9.'da görüldüğü gibi %16,79'luk değerinde bir hata sonucu görüntülenmektedir. ANOVA testlerinde R² değeri %80 ve üzeri olduğunda varyansın %80'inin model üzerinden açıklanabildiğini gösterir. Bu nedenle elden edilen sonuca göre deney modeli bu faktörler için açıklayıcı ve güvenilir sonuçlar vermiştir.

Tablo 4.9. Yüzey pürüzlülüğü için yapılan ANOVA testi sonucu

Analysis of Variance

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
FY	1	40,6689	57,88%	40,6689	40,6689	20,68	0,004
COOLING	2	0,2942	0,42%	0,2942	0,1471	0,07	0,929
FEED	2	2,3483	3,34%	2,3483	1,1741	0,60	0,580
DEV	2	11,0701	15,76%	11,0701	5,5351	2,81	0,137
STEP	2	2,9313	4,17%	2,9313	1,4656	0,75	0,514
PATH	2	1,1508	1,64%	1,1508	0,5754	0,29	0,756
Error	6	11,8002	16,79%	11,8002	1,9667		
Total	17	70,2639	100,00%				

Yüzey pürüzlülüğündeki değişimi ifade eden regresyon denklemi aşağıda verilmiştir.

$$Ra = 4,706 + 1,503 \text{ FY}_1 - 1,503 \text{ FY}_2 + 0,172 \text{ COOLING}_1 - 0,135 \text{ COOLING}_2 - 0,037 \text{ COOLING}_3 + 0,438 \text{ FEED}_{750} - 0,447 \text{ FEED}_{1500} + 0,009 \text{ FEED}_{3000} + 0,233 \text{ DEV}_0 + 0,823 \text{ DEV}_{100} - 1,055 \text{ DEV}_{200} + 0,368 \text{ STEP}_{0,5} - 0,562 \text{ STEP}_{1,0} + 0,193 \text{ STEP}_{1,5} - 0,123 \text{ PATH}_C - 0,229 \text{ PATH}_H + 0,352 \text{ PATH}_Z$$

4.5. Et Kalınlığındaki Değişimlerin İncelenmesi (Twall)

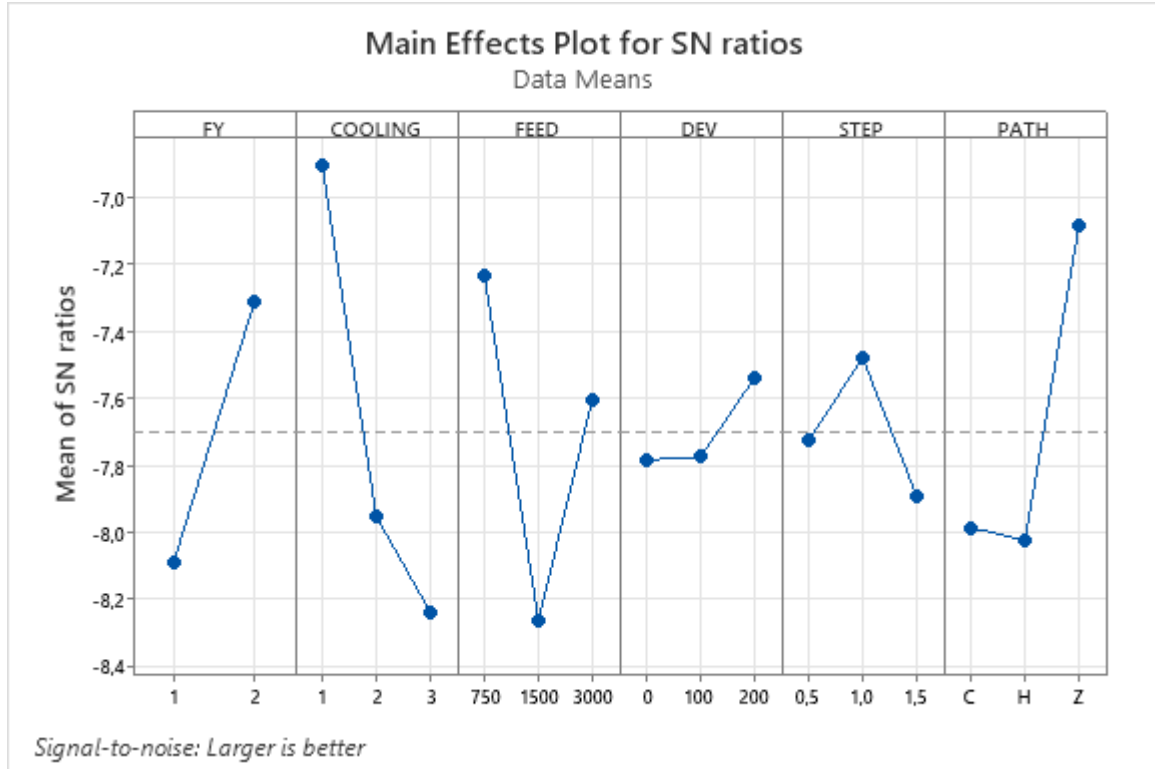
Yapılan işlem sac şekillendirme işlemi olduğu ve malzemenin deformasyonu ile plastik şekil değişimi gerçekleştirildiği için sac malzemenin et kalınlığında yerel değişimler beklenmektedir. Bu değişimler, istenen oranda olmak zorundadır, aksi halde beklenenden fazla gerçekleşen bir incelleme iş parçasını kullanılamaz hale getirecektir. Bu nedenle et kalınlığındaki incelleme istenilen oranda tutulmalıdır. Bu çalışmada da farklı parametrelerin sac kalınlığındaki etkisinin incelenmesi yapılmıştır. İncelleme en çok duvarda meydana geldiği için her numunenin duvarda bulunan et kalınlığı ölçülmüş ve sonuçlar değerlendirilmiştir. Ancak ölçüm sonrasında elde edilen veriler sonucunda R^2 değeri düşük gözlemlenmiştir. Bu nedenle ölçüme ek olarak Taguchi metodundan faydalanılarak yazılıma tahminde bulundurulmuştur. Ölçüm sonuçlarından alınan veriler ve tahmini değerlerin ortalaması alınarak yeniden grafik oluşturulmuştur. Sonuçlara göre et kalınlığına etki eden parametrelerin önem sıralaması Tablo 4.10.'da verilmiştir. Duvar kalınlığına etki eden parametrelerin en önemlisi soğutma yöntemi olarak gözlemlenmiştir. Bunu takiben önem sırasına göre parametreler, ilerleme hızı, takım yolu stratejisi, fikstür yapısı, aşağı adım ölçüsü ve devir sayısı olmuştur.

Tablo 4.10. Duvardaki et kalınlığına etki eden parametrelerin önem sıralaması

Response Table for Signal to Noise Ratios

Larger is better

Level	FY COOLING	FEED	DEV	STEP	PATH	
1	-8,106	-6,951	-7,276	-7,835	-7,753	-7,991
2	-7,327	-7,955	-8,257	-7,759	-7,492	-8,058
3		-8,244	-7,617	-7,556	-7,905	-7,101
Delta	0,779	1,292	0,981	0,279	0,413	0,956
Rank	4	1	2	6	5	3



Şekil 4.10. Duvarda meydana gelen incelme sonrası et kalınlığı ölçümleriyle Taguchi analizi sonucunda elde edilen sinyal/gürültü oranı grafiği

Elde edilen S/N grafiğine göre et kalınlığına etki eden en önemli parametre olan soğutma yönteminde, kuru olarak şekillendirmenin yapıldığı deneylerde duvar kalınlığı farkının en düşük seviyede olduğu, fakat hava ile yapılanda yüksek ölçüde incelmelere rastlandığı görülmüştür. İlerleme hızının etkisini grafikten gözlemlenebildiğine göre düşük ilerleme hızında yani 750 mm/dk ilerleme ile duvar kalınlığında ki incelme azalmış, 1500 mm/dk hızda ilerlemenin kullanıldığı deneylerde incelme maksimum değere çıkmıştır. En yüksek ilerleme hızında ise optimum değere yaklaştığı gözlemlenmiştir. Z level takım yolunun kullanıldığı deneylerde duvar kalınlığında ki kalınlık diğerlerine nazaran daha kalın olmakla beraber diğer iki takım yolunun duvar kalınlığına etkisi aynı seviyelerde kalmıştır. Destek kalıbı olmaksızın yapılan deneylerde numuneler belirlenen geometride istenen ölçüye ulaşamadığı için ve geri yaylanma etkisinin yüksek olduğu için et kalınlığı bu numunelerde daha yüksek değerlerde görülmüştür. 1,5 mm aşağı adımın kullanıldığı deneylerde duvardaki kalınlık değişimi en fazla olmakla beraber 0,5 mm aşağı adım optimum değer olarak kullanılabilir fakat 1 mm aşağı adımın kullanıldığı deneylerde et kalınlığındaki değişim diğerlerine göre daha azdır. Üç farklı devir sayısında da yapılan deneylerde et kalınlığı 0,41 mm - 0,425 mm arasında ölçüldüğünden devir sayısının et kalınlığında çok fazla bir etkisi olmadığı görülmüştür.

Yapılan anova testi sonucunda %88,22 oranında bağımlı değişkenin değişiminin açıklanabildiği sonucuna varılmıştır (Tablo 4.11).

Tablo 4.11. Duvardaki et kalınlığı için yapılan ANOVA testi sonucu

Analysis of Variance

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
FY	1	0,006050	13,77%	0,006050	0,006050	7,01	0,038
COOLING	2	0,014933	34,00%	0,014933	0,007467	8,66	0,017
FEED	2	0,008233	18,74%	0,008233	0,004117	4,77	0,057
DEV	2	0,000400	0,91%	0,000400	0,000200	0,23	0,800
STEP	2	0,001033	2,35%	0,001033	0,000517	0,60	0,579
PATH	2	0,008100	18,44%	0,008100	0,004050	4,70	0,059
Error	6	0,005175	11,78%	0,005175	0,000863		
Total	17	0,043925	100,00%				

Et kalınlığında meydana gelen değişimi ifade eden regresyon denlemi aşağıda verilmiştir.

$$\begin{aligned} T_{wall_ort} = & 0,41500 - 0,01833 \text{ FY}_1 + 0,01833 \text{ FY}_2 + 0,04000 \text{ COOLING}_1 - \\ & 0,01333 \text{ COOLING}_2 - 0,02667 \text{ COOLING}_3 + 0,02333 \text{ FEED}_750 - \\ & 0,02833 \text{ FEED}_1500 + 0,00500 \text{ FEED}_3000 - 0,00333 \text{ DEV}_0 \\ & - 0,00333 \text{ DEV}_100 + 0,00667 \text{ DEV}_200 - 0,00167 \text{ STEP}_0,5 \\ & + 0,01000 \text{ STEP}_1,0 - 0,00833 \text{ STEP}_1,5 - 0,01500 \text{ PATH}_C - \\ & 0,01500 \text{ PATH}_H + 0,03000 \text{ PATH}_Z \end{aligned}$$

SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, AISI 430 paslanmaz çelik sac malzemesi kullanılarak artımlı sac şekillendirme (ASS) yöntemiyle gerçekleştirilen deneyler sonucunda, ilerleme hızı, aşağı adım, takım yolu, fikstür yapısı, soğutma çeşidi ve devir gibi değişken parametrelerin etkileri incelenmiş ve önemli bulgular elde edilmiştir. Deneyler sırasında, 750 mm/dk, 1500 mm/dk ve 3000 mm/dk olarak belirlenen ilerleme hızları arasında en iyi sonuçlar 1500 mm/dk hızında elde edilmiştir. Bu hızda, malzemenin deformasyonu minimize edilmiş ve yüzey kalitesi en üst düzeyde sağlanmıştır. Daha yüksek ilerleme hızlarında ise malzemede deformasyon ve yüzey kalitesinde bozulmalar gözlemlenmiştir. Önceki çalışmalara dayanarak parametre değerleri arttığında aksel yükün arttığı bu nedenle sonucu olumsuz etkilediği düşünülmektedir. Aşağı adım olarak belirlenen 0,5 mm, 1 mm ve 1,5 mm değerleri arasında, 1 mm aşağı adım en iyi yüzey kalitesini sağlamıştır. Daha büyük adımlar, malzemeyi sündürme ve kuvvet artışına neden olduğundan deformasyonu artırarak yüzey kalitesini düşürmüştür. Takım yolu stratejileri arasında Z Level, Helisel ve Concentric Zig yolları kullanılmış olup, z-level takım yolu şekillendirme sırasında daha olumlu sonuçlar elde edilmesini sağlamıştır. Fikstür yapısı olarak tek nokta ve iki nokta (dişi destek kalıbı) yapıları incelenmiş, iki nokta fikstürü malzemeyi daha iyi destekleyerek geometri ve yüzeyde daha az deformasyon meydana getirmiştir. Soğutma yöntemleri arasında kuru, yağlı ve hava soğutma çeşitleri kullanılmış olup, yağlı soğutma yönteminde yağ sirkülasyonu sağlanamadığından, işlem esnasında bir yağ havuzu oluştu ve yağın sıcaklığı geometri tamamlanana kadar geçen sürede giderek arttığı için kötü sonuç verirken, en verimli sonuçlar hava ile soğutma yönteminde talaşlar bölgeden uzaklaştırıldığından bu yöntemle elde edilmiştir. Devir sayıları açısından ise boşta, 100 dev/dk ve 200 dev/dk değerleri incelenmiş, 200 dev/dk en iyi yüzey kalitesini sağlamış, 100 dev/dk hızında ise düşük devir nedeniyle yüzeyden kopan metal parçaları yüzeyde birikerek yüzeyi çizdiği ve yüzey kalitesinde bozulmalar meydana geldiği gözlemlenmiştir. Deney sonuçları Taguchi metodu ve Anova testi sonucu tarafından ele alındığında takım sıcaklığını ve iş parçası sıcaklığını en çok etkileyen parametrenin soğutma tekniği olduğu ve takım sıcaklığında %81,51, iş parçası sıcaklığında ise %80,90'lık R² değeri verdiği görülmüştür. Bu da deney modelinin sonuçları takım sıcaklığı için %81,51, iş parçası sıcaklığı içinse %80,90 oranında açıkladığını ifade etmektedir. Deney sonrası geometrideki değişimde en çok etkisi olan parametre ise fikstür yapısı olmuştur ve %94,93'lük bir R² değeri elde edilerek bu deney modelinin geometrideki değişimi %94,93 oranında açıklayabildiği ifade edilmiştir. Yüzey pürüzlülüğünde de yine en etkili parametre fikstür yapısı olup %83,21, konik geometrinin yan duvarlarının kalınlık değişimini en fazla etkileyen parametrenin ise soğutma yöntemi olduğu ve modelin %88,22'lik bir oranla sonucu açıklayabildiği ifade edilmiştir. Elde edilen bu sonuçlar doğrultusunda, gelecek çalışmalar için çeşitli öneriler sunulmuştur. İlk olarak, 1500 mm/dk ilerleme hızının optimal sonuçlar verdiği göz önüne alınarak, bu hızın farklı malzeme türleri ve kalınlıkları için optimizasyonu yapılmalıdır. Aşağı adım değerlerinin etkisi incelenmiş olup, 1 mm aşağı adımın en iyi yüzey kalitesini sağladığı belirlenmiştir. Bu nedenle,

diğer malzemeler için de bu parametrelerin optimizasyon çalışmaları yapılmalıdır. Z-level takım yolunun sağladığı avantajlar dikkate alınarak, farklı şekillendirme geometrileri ve malzemeler için uygun takım yolu stratejileri araştırılmalıdır. İki nokta fikstür yapısının etkinliği göz önünde bulundurularak, farklı fikstür yapılarının malzeme üzerindeki etkileri detaylı olarak incelenmelidir. Yağlı soğutma yönteminin etkinliği dikkate alınarak, öncelikle yağ sirkülasyonu sağlanmalı ve soğutma sistemlerinin daha verimli hale getirilmesi için farklı yağ türleri ve soğutma teknikleri araştırılmalıdır. Ayrıca, çevre dostu soğutma yöntemlerinin geliştirilmesi üzerinde durulmalıdır. Son olarak, 200 dev/dk devir sayısının en iyi sonuçları verdiği belirlenmiştir. Farklı malzemeler ve kalınlıklar için bu parametrenin optimizasyonu yapılmalıdır. Bu bulgular, ASŞ yönteminin parametre optimizasyonu ve farklı parametrelerin malzeme üzerindeki etkilerini anlamada önemli katkılar sağlamaktadır. Taguchi ve ANOVA dışında, sonlu elemanlar analizi (FEA) gibi daha ileri analiz yöntemleri kullanılarak, deney sonuçlarının daha derinlemesine incelenmesi ve optimize edilmesi sağlanabilir. ASŞ yönteminin sanayide yaygın olarak kullanılabilmesi için, seri üretim koşullarında yapılacak deneylerle süreç parametrelerinin optimize edilmesi gerekmektedir. Bu tür çalışmalar, yöntemin sanayiye entegrasyonunu hızlandırabilir. Sonuç olarak, bu çalışma, AISI 430 paslanmaz çelik sacların artımlı sac şekillendirme yöntemi ile yüksek verimlilik ve kalite ile işlenebileceğini ortaya koymuştur. Elde edilen bulgular, hem sanayi uygulamaları için değerli bilgiler sunmakta hem de ASŞ yönteminin çeşitli alanlarda kullanım potansiyelini artırmaktadır. Gelecekte yapılacak çalışmalar, bu bulguları daha da genişletebilir ve yöntemin uygulama alanlarını artırabilir.

KAYNAKLAR

Çiftçi (2019). Üç Boyutlu Yazıcı Teknolojilerinin Hızlı Prototip Uygulamaları için Farklı Materyaller Aracılığıyla Yüzey Pürüzlülüğüne Etkilerinin İncelenmesi, Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, 7 1627-1643

İ., Coşkun, M.F. Işık (2008). "Elektroerozyon yöntemi ile tornalama" Politeknik Dergisi, c. 11, s. 4, ss. 285-291, 2008.

Afonso, D., Sousa, R.A. ve Torcato, R. (2017). Integration of design rules and process modelling within SPIF technology-a review on the industrial dissemination of single point incremental forming. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 94, 4387-4399.

Bambach, M. (2008). Process Strategies and Modelling Approaches for Asymmetric, Incremental Sheet Forming, Umform-technische Schriften, 1-19.

Franzen V, Kwiatkowski L, Neves J, Martins PAF, Tekkaya AE. (2008). "On the Capability of Single Point Incremental Forming for Manufacturing Polymer Sheet Parts". ICTP2008, 9th International Conference on Theory of Plasticity, Gyeongju, Korea, 7-11 September 2008.

İ., Durgun, A., Sakin (2015). "Artımlı Sac Şekillendirme Tekniği İle Otomobil Sac Parça Üretimi" Pamukkale Univ Muh Bilim Derg, 22(1), 8-16.

Hussain, G., Khan, HR., Gao, L., Hayat, N. (2013). Guidelines for toolsize selection for single-point incremental forming of an aerospace alloy. Mater Manuf Process 28(3): 324-329

İ.Durgun (2012). Prototip Parça İmalatında Artımlı Sac Şekillendirme İşlemlerinin Kullanımı: Simülasyon, İmalat ve Karşılaştırma, 12. Üretim Araştırmaları Sempozyumu - ÜAS 2012 <http://uas2012.gediz.edu.tr> Gediz Üniversitesi - Endüstri Mühendisliği Bölümü & Üretim Araştırmaları Derneği 27 - 29 Eylül 2012, İzmir. DOI: 10.5505/pajes.2016.37980

Tanaka, S., Nakamura, T., Hayakawa, K., Nakamura, H., ve Motomura, K. (2005). Incremental sheet metal forming process for pure titanium denture plate, ICTP.

Hirt, G., Ames, J., Bambach, M., Kopp, R. (2004). Forming strategies and process modelling for CNC incremental sheet forming. Annals of the CIRP, vol 53, 203-206.

Trzepiećński (2022). Recent Developments and Future Challenges in Incremental Sheet Forming of Aluminium and Aluminium Alloy Sheets, <https://doi.org/10.3390/met12010124>

Emmens, W. C., Sebastiani, G., & 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

Jeswiet, J., Micari, F., Hirt, G., Bramley, A., Duflou, J., Allwood, J., (2005). Asymmetric single point incremental forming of sheet metal. Ann. CIRP 54/2, 623-649.

Mason, B., (1978). Sheet metal forming for small batches. Bachelor Thesis, Univ. of Nottingham, May 1978.

Iseki, H., Kato, K., Sakamoto, S., (1989). Flexible and incremental sheet metal forming using a spherical roller. In: Proc. 40th JJCTP, pp. 41–44 (in Japanese).

Iseki, H., Kato, K., Sakamoto, S., (1991). Flexible and incremental sheet metal bulging using a path-controlled spherical roller (a trial manufacture of the bulging machine). In: Proc. 1991, JSCTP, pp. 515–518 (in Japanese).

Iseki, H., Kato, K., Sakamoto, S., (1993). Forming limit of flexible and incremental sheet metal bulging with a spherical roller. In: Proceedings 4th ICTP, Beijing, China, September 5–9, 1993, pp. 1635–1640.

Iseki, H., Shioura, T., Kato, Satou, K., (1994). Practical development of flexible and incremental sheet metal bulging machine. In: Proc. 1994, JSCTP, pp. 573–576 (in Japanese).

Kitazawa, K., (1993). Incremental sheet metal stretch-expanding with CNC machine tools. In: Proceedings 4th ICTP, Beijing, China, September 5–9, 1993, pp. 1899–1904.

Matsubara, S. (1994). Incremental backward bulge forming of a sheet metal with a hemispherical head tool: a study of a numerical control forming system II. J. JSTP 35 (1994-11), 1311–1316 (in Japanese).

T., Yoshida, S., Matsubara (1997). Method and device for forming sheet; (Matsushita Electric Ltd.); filed 30-06-1995, issued 14-01-1997.

A., Shima, T., Yoshikawa, K., Nakamura, Y., Suda, S., Suzuki (1996). Formation of successively expanding metallic plate and apparatus therefor; filed 18-07-1996, issued 31-03-1997.

F., Matsuda, T., Nagata, K., Yamamoto, A., Murata, F., Nonioyama, K., Ueno (1996). Incremental forming method ; (Toyota Motor Corp., Taiho Seiki Co. Ltd., Toyota CRDL Inc.); filed 01-11-1996, issued 26-05-1998

K., Waratani, T., Yoshikawa, K., Nakamura, A., Shima, H., Endo, Y., Tajima, S., Suzuki, T., Misdeki (1997). Method for continuously and successively bulging metal sheet and device therefor; (Hitachi Ltd.); filed 25-04-1997, issued 10-11-1998.

F., Matsuda, T. Nagata, K. Yamamoto, A. Murata, F. Nonioyama, K. Ueno (1997). Male die forming method of metal sheet; (Toyota Motor Corp., Toyota CRDL Inc, Taiho Seiki Co. Ltd.); filed 22-05-1997, issued 02-12-1998.

I., Ochiai, K. Momoiyama, T. Onawa, S. Suzuki, T. Miseki (1998). JP 11-285741; Formation of metallic plate and forming tool; filed 03 04-1998, issued 19-10-1999.

A., Murata, F. Matsuda (1998). Incremental pressing and forming device; (Toyota CRDL Inc., Toyota Motor Corp.); filed 16-11-1998, issued 06-06-2000.

Honda (2000). ISF with a pre-shaping process to reduce the level of sheet thinning. The pre-shaping seems like stretch forming, but the (automatically translated) text reads: “[the workpiece] is preformed in the way of spinning”, so it remains obscure.

S., Matsubara, H., Amino, S., Aoyama, Y., Lu (1999). Apparatus for dieless forming plate materials; filed 29-01-1999, issued 12-01-2000.

- C., A., Luttgehard (2003). US6, 532, 786B1 ; Numerically controlled forming method; filed April 19, 2001, issued March 18, 2003.
- N., Okada, W. Kawamura (2001). Incremental forming method and apparatus for the same; filed 17-04-2001, issued 24-10-2001.
- Klocke, F., Wehrmeister T. (2003). Laser-assisted metal spinning of advanced materials. In: Proc. Second Intern. WLT-Conference on Lasers in Manufacturing, München, pp. 195–200, http://publica.fraunhofer.de/dokumente/B_85964.html.
- H., Amino, S. Matsubara, G. Ro (2006). Method and apparatus for forming thin sheet; filed 07-06-2005, issued 21-12-2006.
- Tuomien (2002). Priority 7 October 2002; filed 3 October 2003, issued 15 April 2004.
- Strano, M. (2003). Incremental forming processes: current and potential applications. In: SME Technical Paper MF03-114.
- Jadhav, S., (2004); Basic Investigations of the Incremental Sheet metal Forming Process on a CNC Milling Machine. Doctorate Thesis University of Dortmund, 17 December 2004.
- Maki, T., (2006). Dieless forming. In: Intern. Seminar on Novel Sheet Metal Forming Technologies, Jyväskylä, Finland, February 15–16, 2006
- Emmens (2010). The Technology of Incremental Sheet Forming —A Brief Review Of The History
- G., Ambrogio, F., Gagliardi, S., Bruschi, L., Filice (2013). On the high-speed Single Point Incremental Forming of titanium alloys, *Cirp Ann-Manuf Techn*, 62 (2013) 243-246.
- H., Vanhove, A., Mohammadi, Y.S., Guo, J.R., Duflou (2014). High-Speed Single Point Incremental Forming of an Automotive Aluminium Alloy, in: *Key Engineering Materials*, 622 (2014) 433-439.
- K., Hamilton, J., Jeswiet (2010). Single point incremental forming at high feed rates and rotational speeds: Surface and structural consequences, *Cirp Ann-Manuf Techn*, 59 (2010) 311-314.
- R., N., P., Bastos, R., J., A., de Sousa, J.A.F. Ferreira, Enhancing time efficiency on single point incremental forming processes, *Int J Mater Form*, 9 (2015) 653-662
- Behera, Sousa, RA, Ingarao, G. (2017). Single point incremental forming: An assessment of the progress and technology trends from 2005 to 2015. *Journal of Manufacturing Processes*, 27. pp. 37-62. ISSN 1526-6125
- M., Ham, B., M., Powers, J., Loisel (2013). Surface Topography from Single Point Incremental Forming using an Acetal Tool, *Key Engineering Materials*, 549 (2013) 84-91.
- Ziran (2009). The performance of flat end and hemispherical end tools in single-point incremental forming, DOI 10.1007/s00170-009-2179-4, 16 January 2009 /Accepted: 17 June 2009/Published online: 5 July 2009 #Springer-Verlag London Limited 2009
- J., Duflou, Y., Tunçkol, Alex, Szekeres, P., Vanherck (2007). Experimental study on force measurements for single point incremental forming Department of Mechanical Engineering, Katholieke Universiteit

Leuven, Celestijnenlaan 300 B, B-3001 Leuven, Belgium Received 24 October 2005; received in revised form 29 December 2006; accepted 11 January 2007

Obikawa (2009). Dieless incremental micro-forming of miniature shell objects of aluminum foils, Received 5 October 2008 Received in revised form 30 June 2009 Accepted 3 July 2009 Available online 8 July 2009

R., Aereens, P., Eyckens, A., Van, Bael, J., R., Duflou (2009). Force prediction for single point incremental forming deduced from experimental and FEM observations Received: 21 January 2009 /Accepted: 4 June 2009

A., Petek, K., Kuzman, J., Kopač (2009). Deformations and forces analysis of single point incremental sheet metal forming, Archives of Materials Science and Engineering 35/2 (2009) 107-116.

J., Brüninghaus, Y., Volfson, J., Bickendorf, S., Brell-Cokcan (2016). Design of a Novel End-Effector for Kinematic Support in Incremental Sheet Forming, Key Engineering Materials, 716 (2016) 395-401

J., Jeswiet, D., Young (2005). Forming limit diagrams for single-point incremental forming of aluminum sheet, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 219 (2005) 359-364.

A., Szekeres, M., Ham, J., Jeswiet (2007). Force measurement in pyramid shaped parts with a spindle mounted force sensor, Key Engineering Materials, 344 (2007), pp. 551-558.

G. Centeno, I. Bagudanch, A.J. Martínez-Donaire, M.L. Garcia-Romeu, C. Vallengano (2014). Critical analysis of necking and fracture limit strains and forming forces in single-point incremental forming, Mater Design, 63, pp. 20-29

Ham, M. ve Jeswiet, J. (2008). Dimensional Accuracy of Single Point Incremental Forming, International Journal of Material Forming, 1, 1171-1174.

Afonso, D., Sousa, R.A. ve Torcato, R. (2017). Incremental forming of tunnel type parts. Procedia Engineering, 183, 137-142.

Manco, G.L. ve Ambrogio, G. (2010). Influence of Thickness on Formability in 6082 T6, International Journal of Material Forming, 1, 983-986.

J., Raja, A., Arulmanikandan, G., Sathishkumar, S., Sivaganesan (2018). Formability and thickness distribution analysis on aluminium alloy 5052 using single point incremental forming, Special Issue, May 2018, 306-315

B., Baranoğlu, O., Music, M., E., Tamer, A., Sakin, İ., Durgun (2012). The use of incremental sheet metal forming process in prototype manufacturing: simulation, manufacturing and comparison, Gediz Üniversitesi - Endüstri Mühendisliği Bölümü & Üretim Araştırmaları Derneği 27 - 29 Eylül 2012, İzmir

Tamer, M.E., Music, O., Özdemir, İ., Baranoğlu, B., Sakin, A. ve Durgun, İ. (2013). Artımlı Sac Şekillendirme Yönteminin Sayısal Analizinde Açık Adım ve Kapalı Adım Sonlu Eleman Yöntemi Çözümlerinin Karşılaştırmalı Analizi, XVIII. Ulusal Mekanik Kongresi, 589-598.

Moayed, Farm. Leman, Z., Mirabi, H. ve Baharudin (2013). The Effect of Forming Parameters on the Sheet Stretch in Incremental Sheet Forming (ISF) process on CNC Lathe Machine, *Advanced Materials Research*, 634-638, 2894-2898.

Durgun, İ. (2017). Artımsal Şekillendirme Yöntemi ile Alüminyum Parçaların Şekillendirilmesi, 5th International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science.

B., Callebaut, J., Duflou, J., Verbert (2011). Asymmetric incremental sheet forming system, US Patent US20090158805, 2011.

M., Skjodt, M., H., Hancock, N., Bay (2007). Creating helical tool paths for single point incremental forming, *Key Eng Mat*, 344 583-590.

S., Amini, A., H., Gollo, H., Paktinat (2016). An investigation of conventional and ultrasonic-assisted incremental forming of annealed AA1050 sheet, *Int J Adv Manuf Technol*, 1-10.

O. Anghinelli, G. Ambrogio, R. Di Lorenzo, G. Ingarao (2011). Environmental Costs of Single Point Incremental Forming, *Steel Research Int*, 525-530.

URL

Erdin, M., E., (2020). Hitit Üniversitesi Ders notları, <https://web.hitit.edu.tr/dosyalar/materyaller/eminerdin@hititedutr300420180Z7L9U0W.pdf>

Totik (2015). https://abs.cu.edu.tr/Dokumanlar/2016/%C4%B0SG120/236364470_makine-ve-techizat-unite-6-www.isgbolumu.com_.pdf

Humbarahane (2020). <https://www.humbarahane.com/donati-akma-dayanimi-siniri/>

AutoTv (2020). https://www.youtube.com/watch?v=2iIH8P00I00&ab_channel=AutoMotoTV

Desktop Metal (2023). <https://www.youtube.com/watch?v=o7W7Fm5CTpA>

Onalkon (2019). <https://onalkon.com/urunDetay/mr200-yuzey-puruzluluk-olcum-cihazı>

Yosoon (2024). <http://en.yosoon.cn/product/97.html>

Cadem (2024). <https://www.cademmetrology.com.tr/atos-compact-scan/>

Pınarbaşı (2021). <https://www.muhendisbeyinler.net/taguchi-metodu-nedir/>

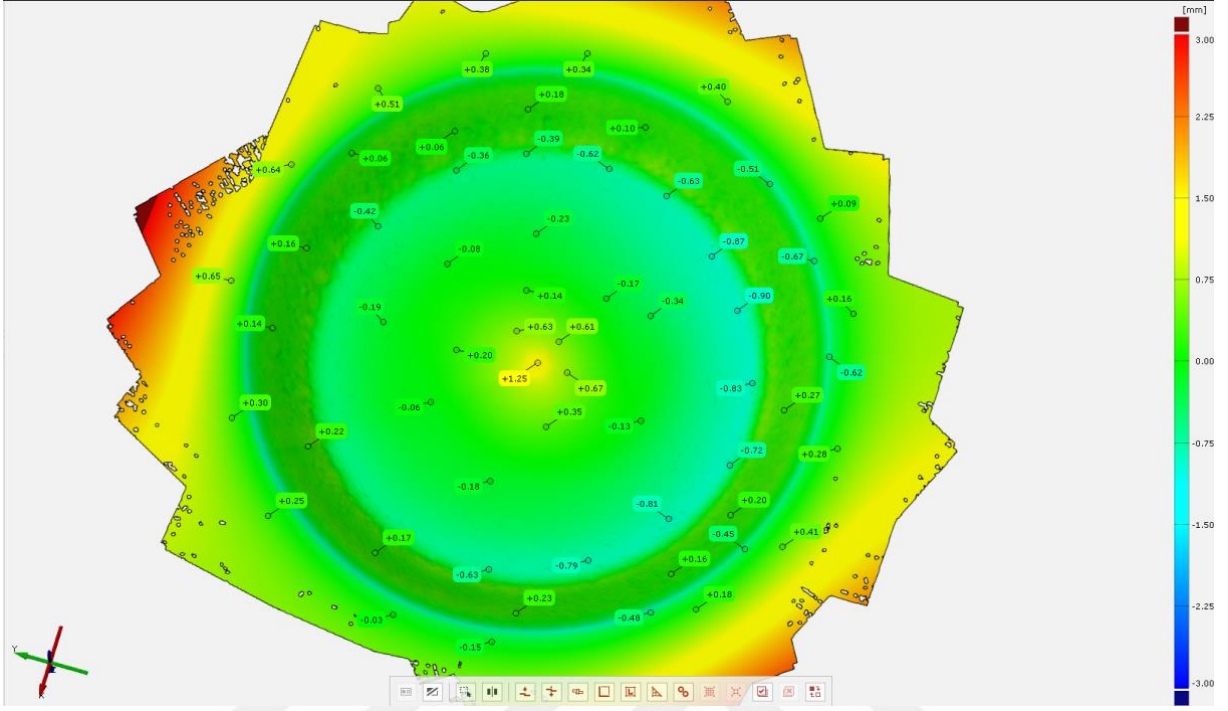
Whnstainless (2021). <https://www.whnstainless.com/>

EKLER

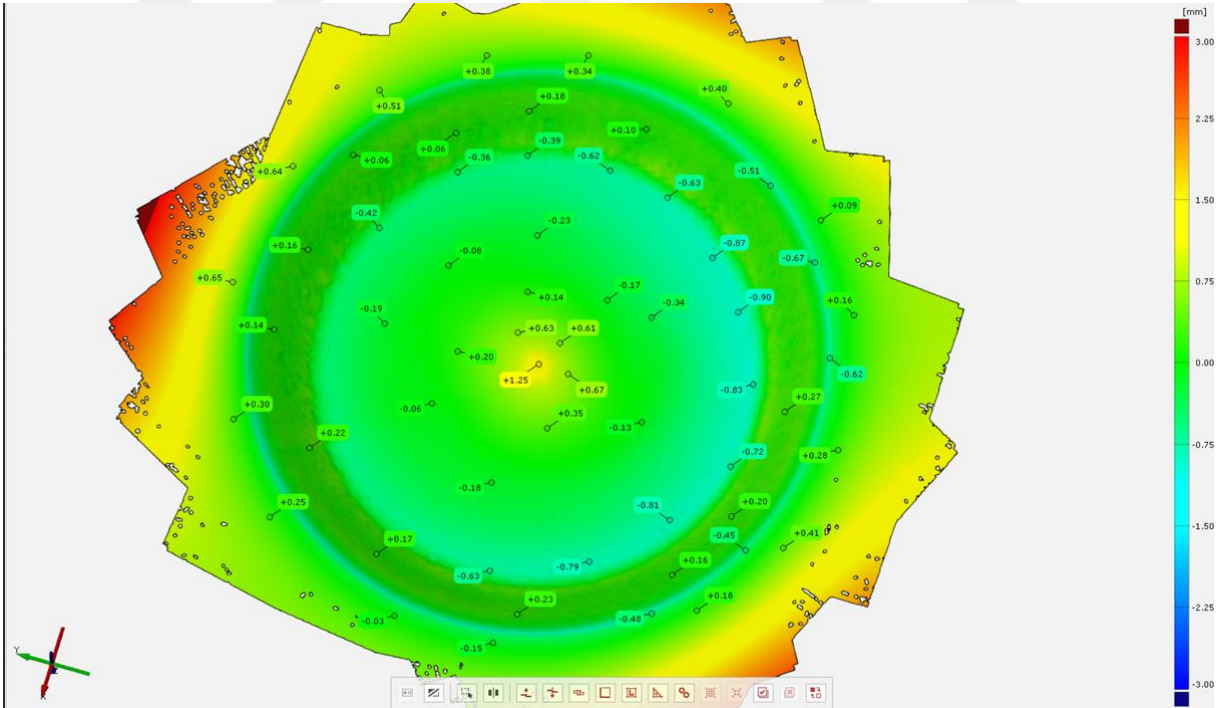


EK-1

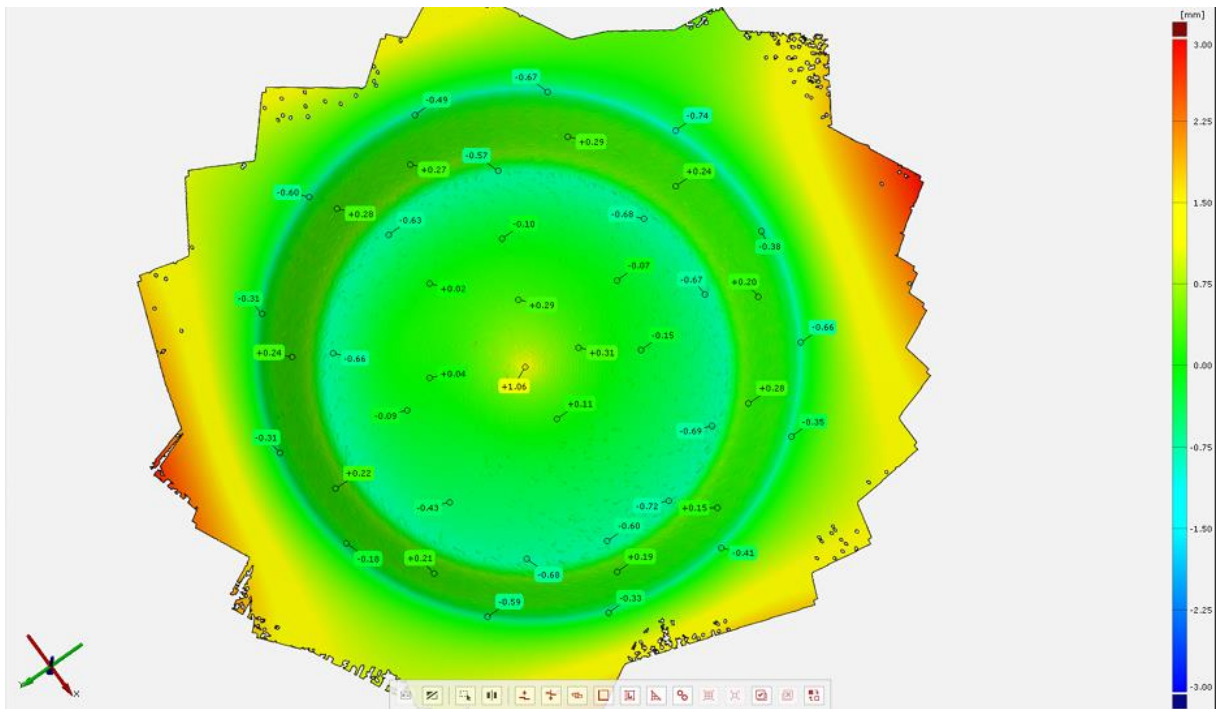
3 boyutlu tarama sonrası alınan karşılaştırmalı ölçüm raporu



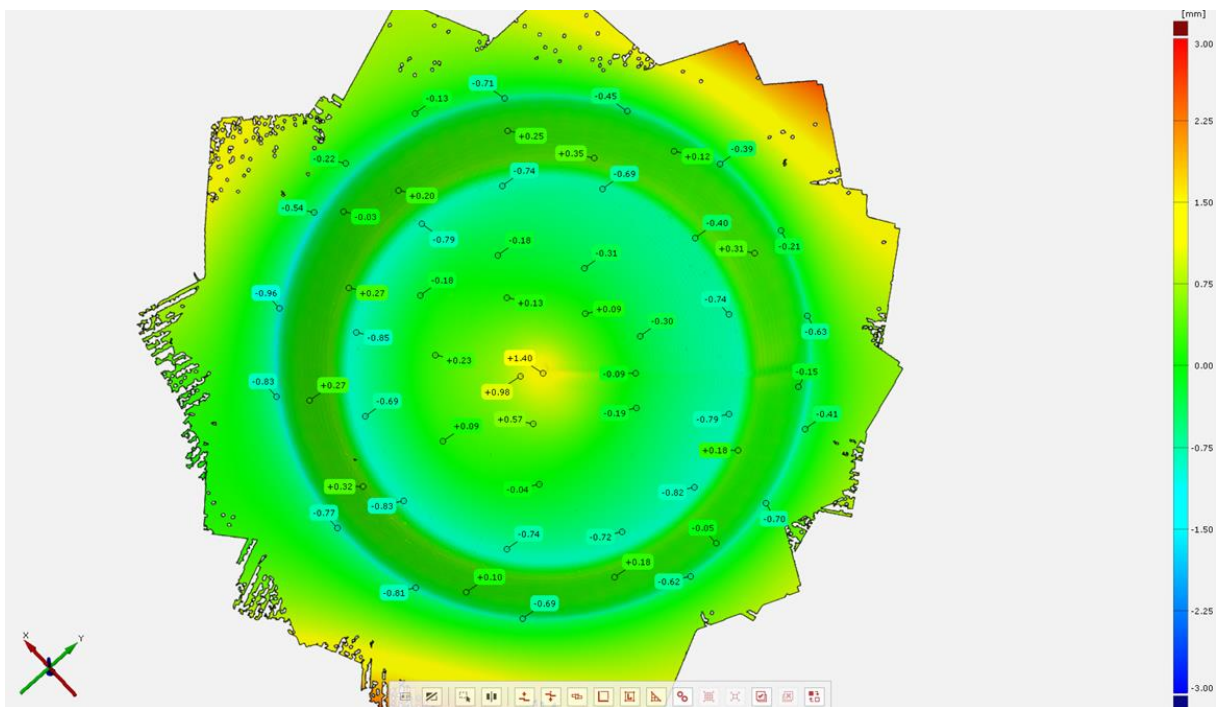
EK-1(devamı) 1 numara



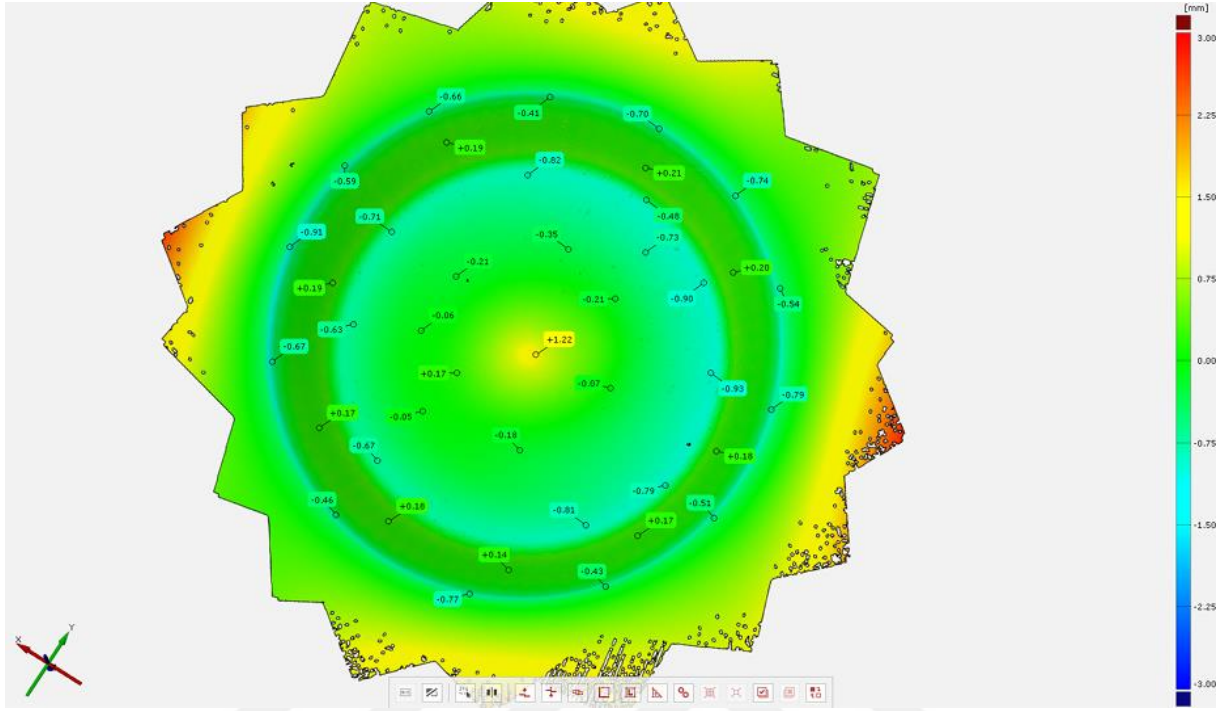
EK-1(devami) 2 numara



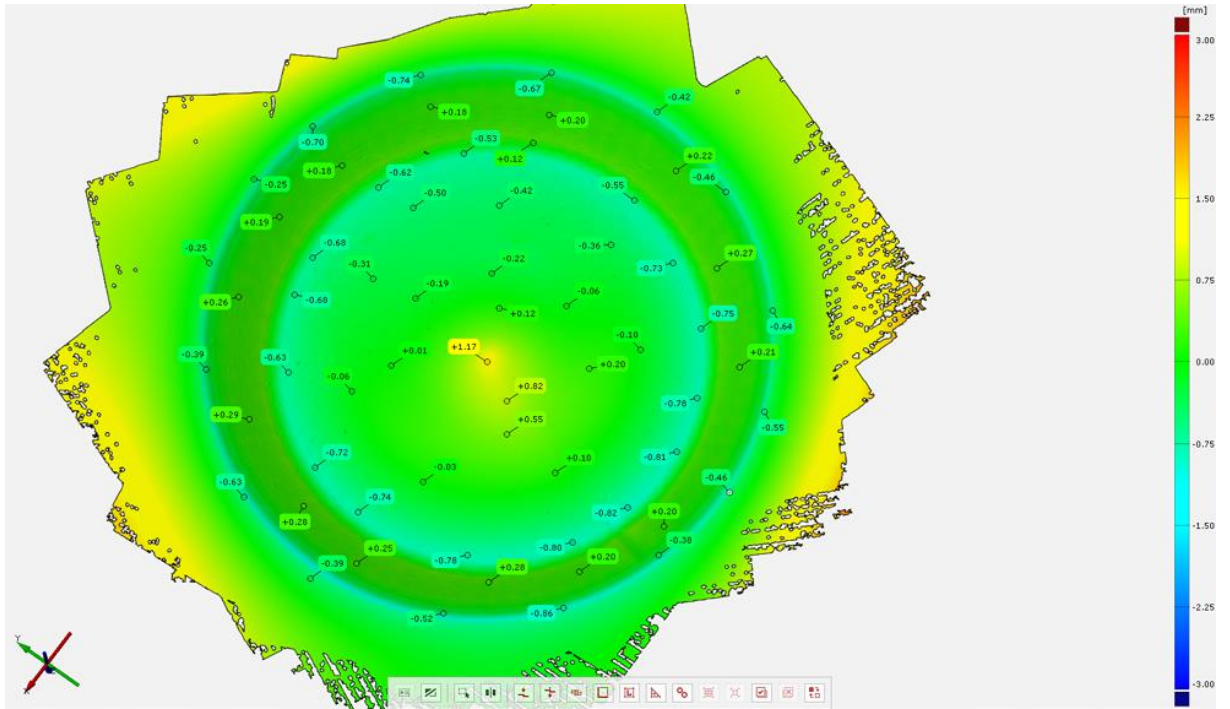
EK-1(devami) 3 numara



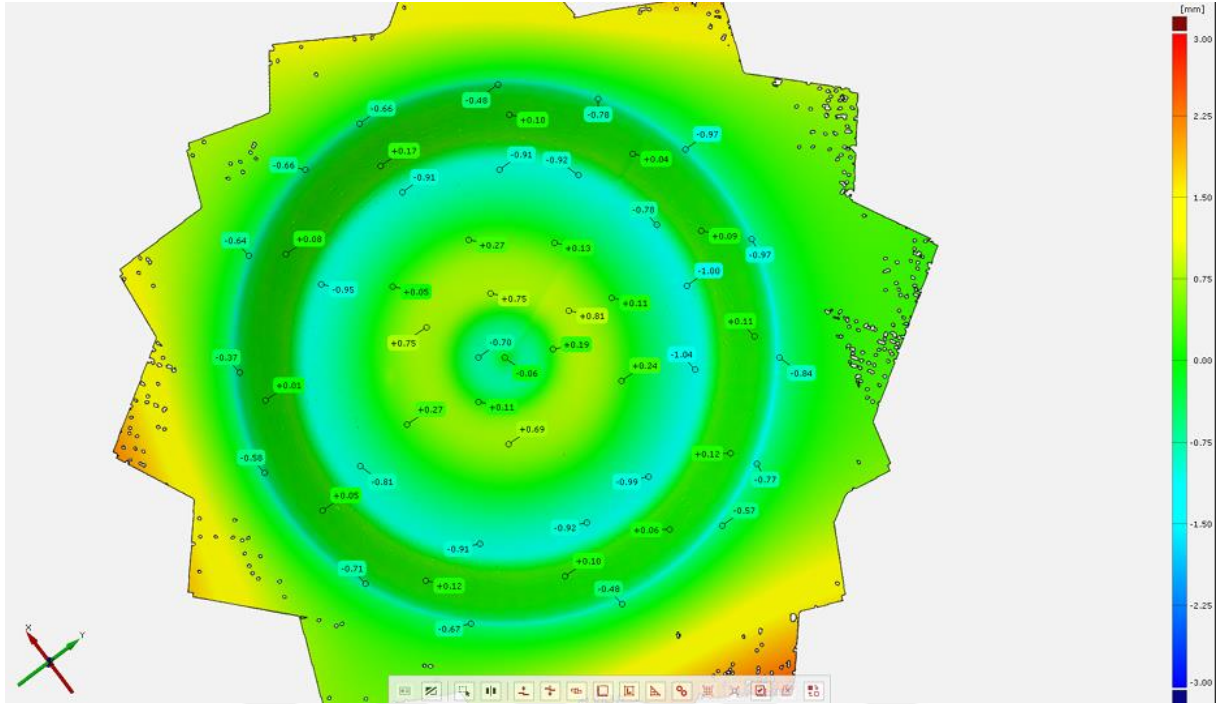
EK-1(devami) 4 numara



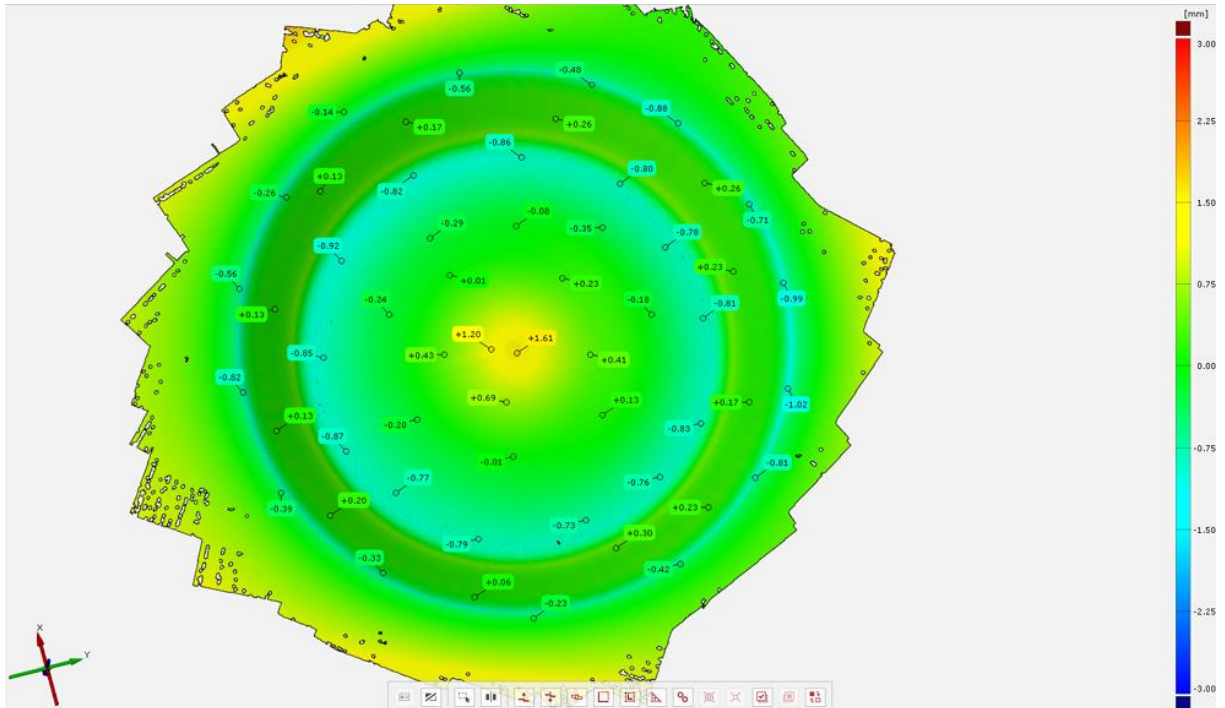
EK-1(devami) 5 numara



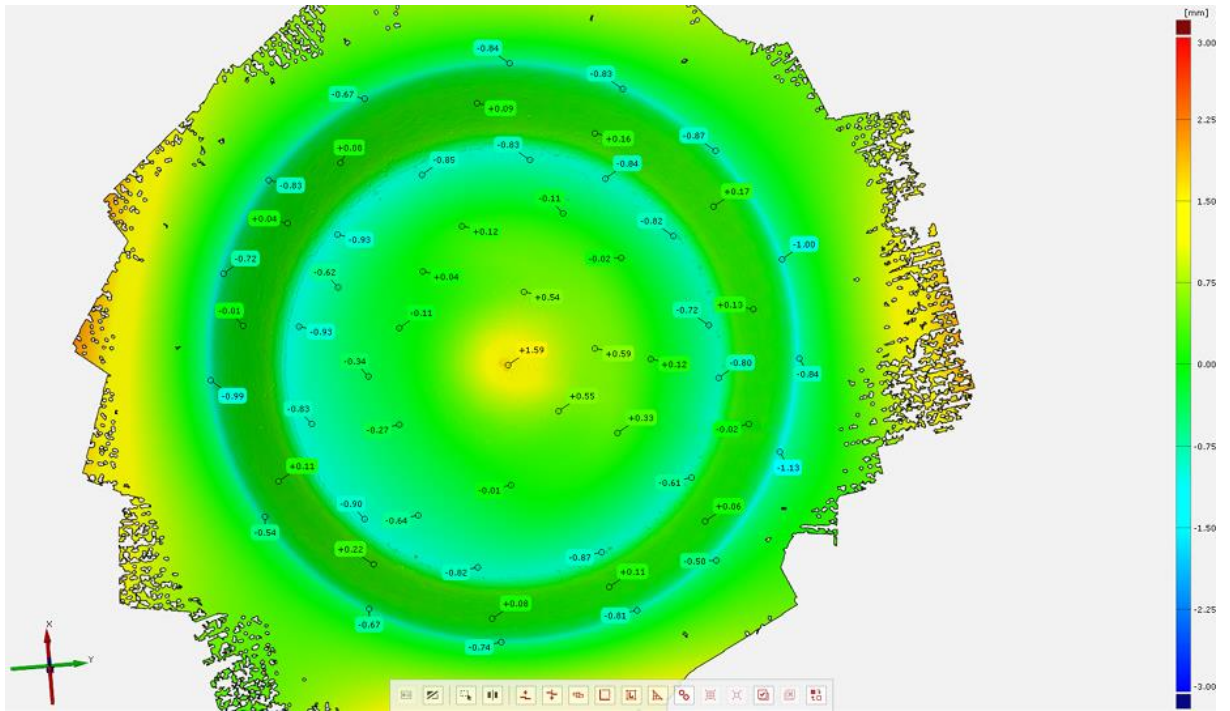
EK-1(devami) 6 numara



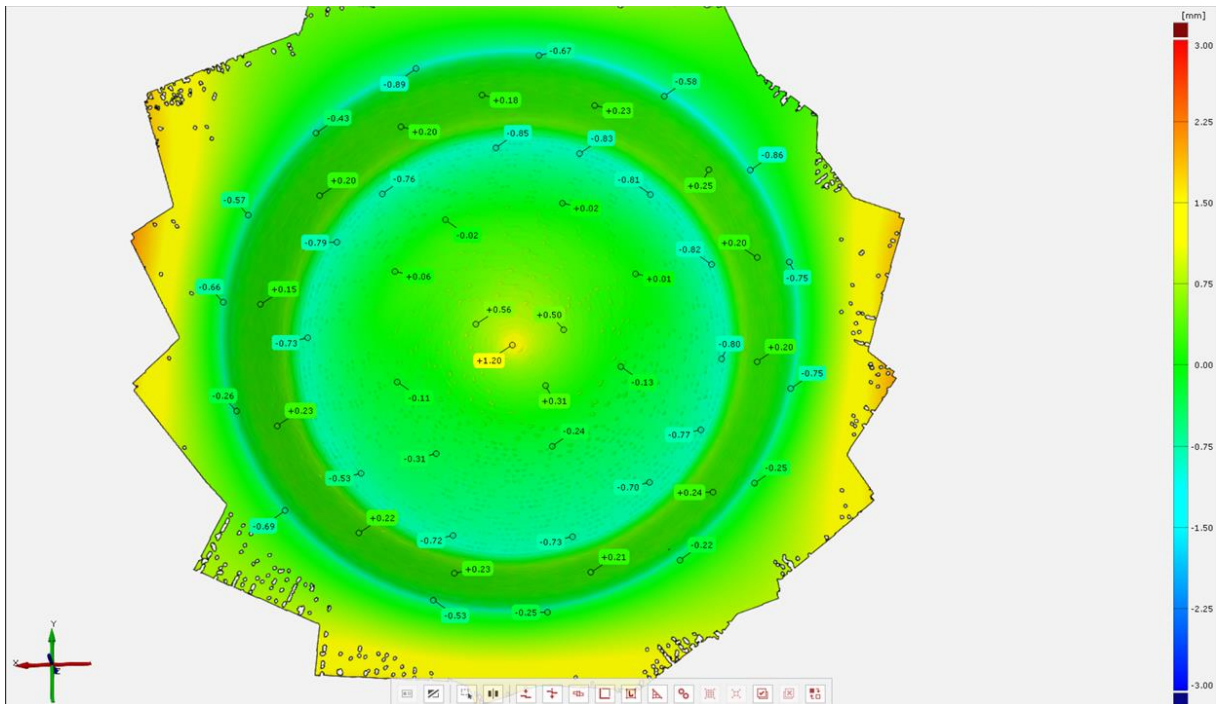
EK-1(devami) 7 numara



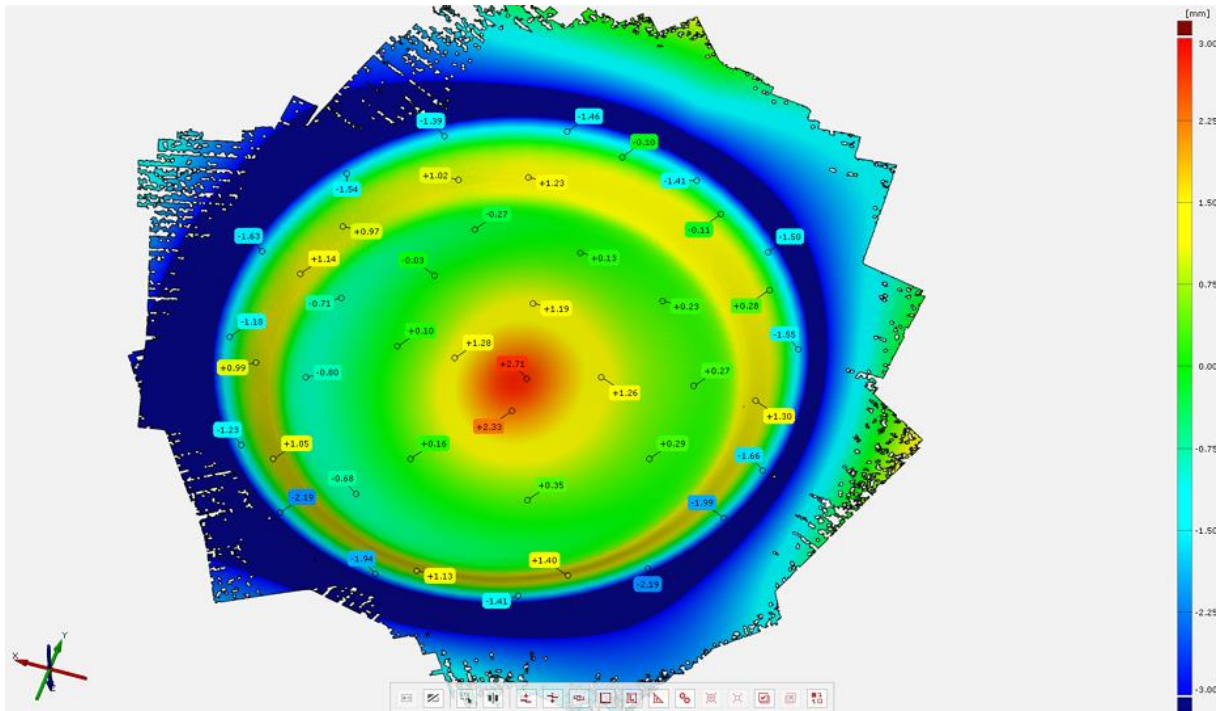
EK-1(devami) 8 numara



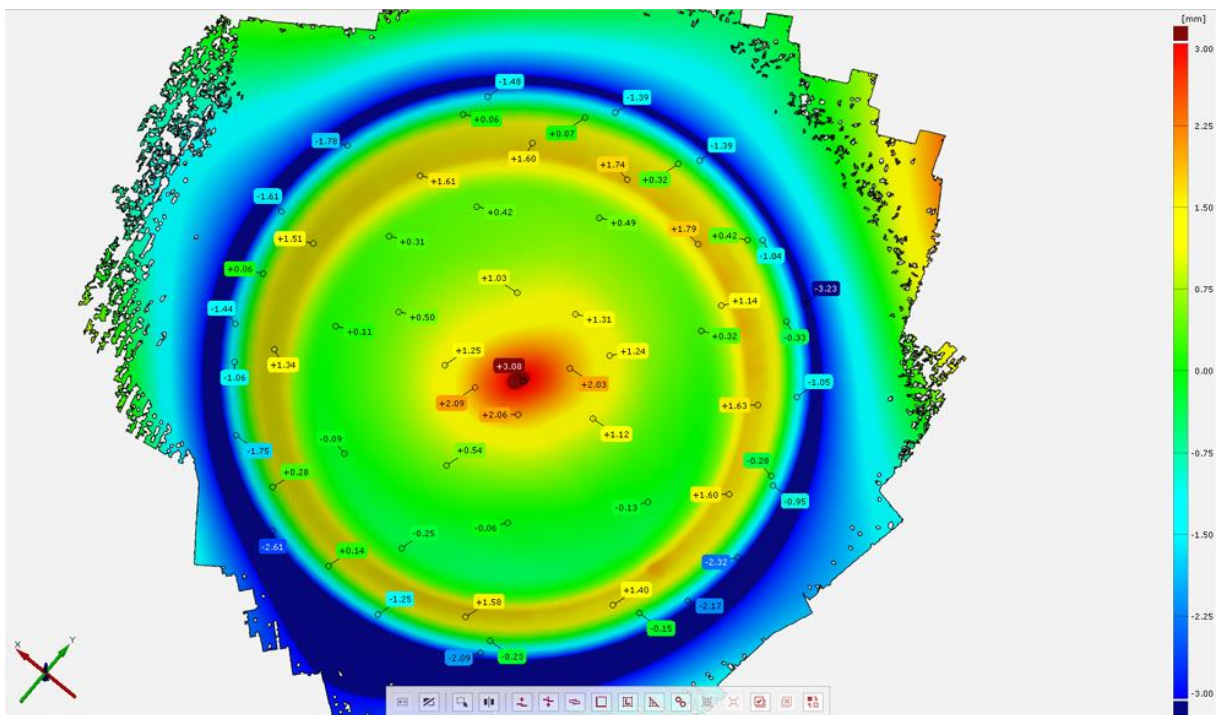
EK-1(devami) 9 numara



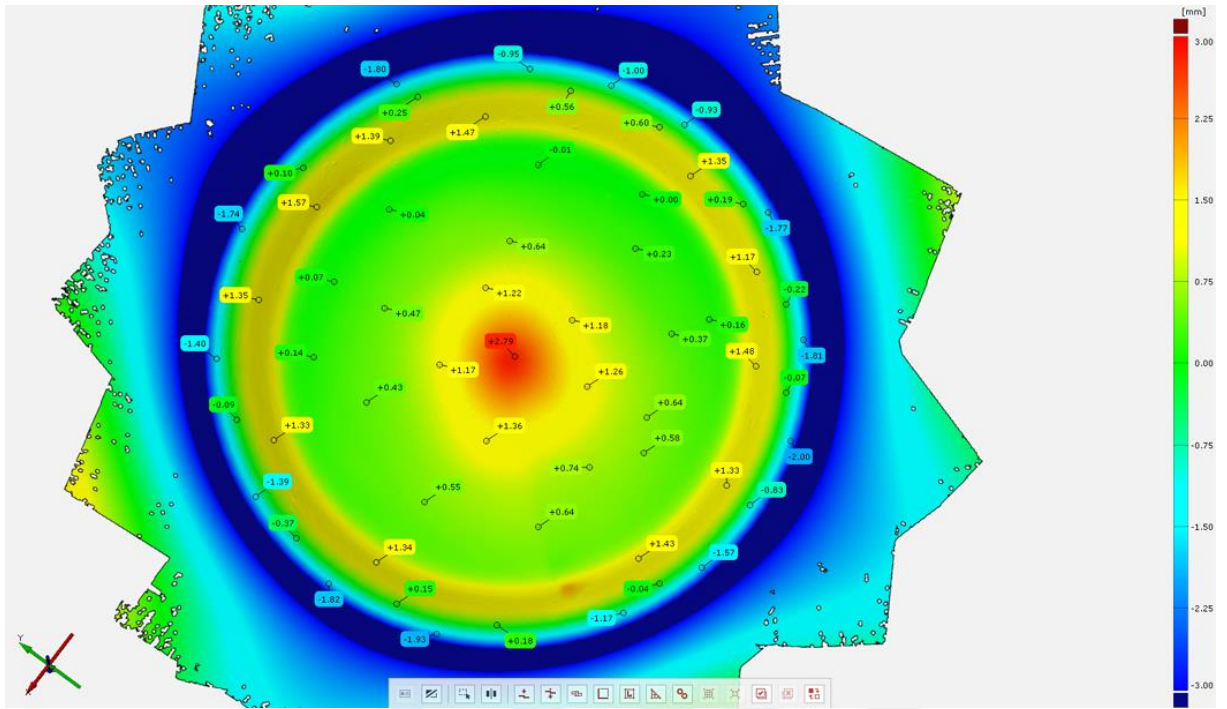
EK-1(devami) 10 numara



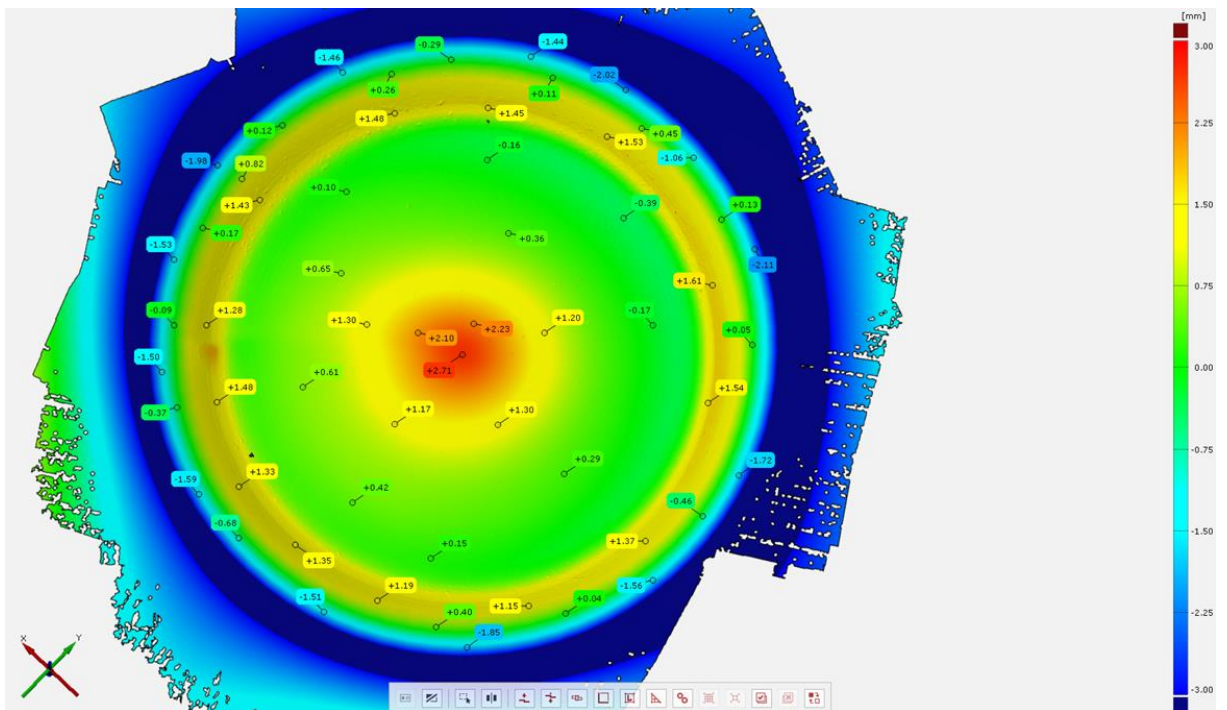
EK-1(devami) 11 numara



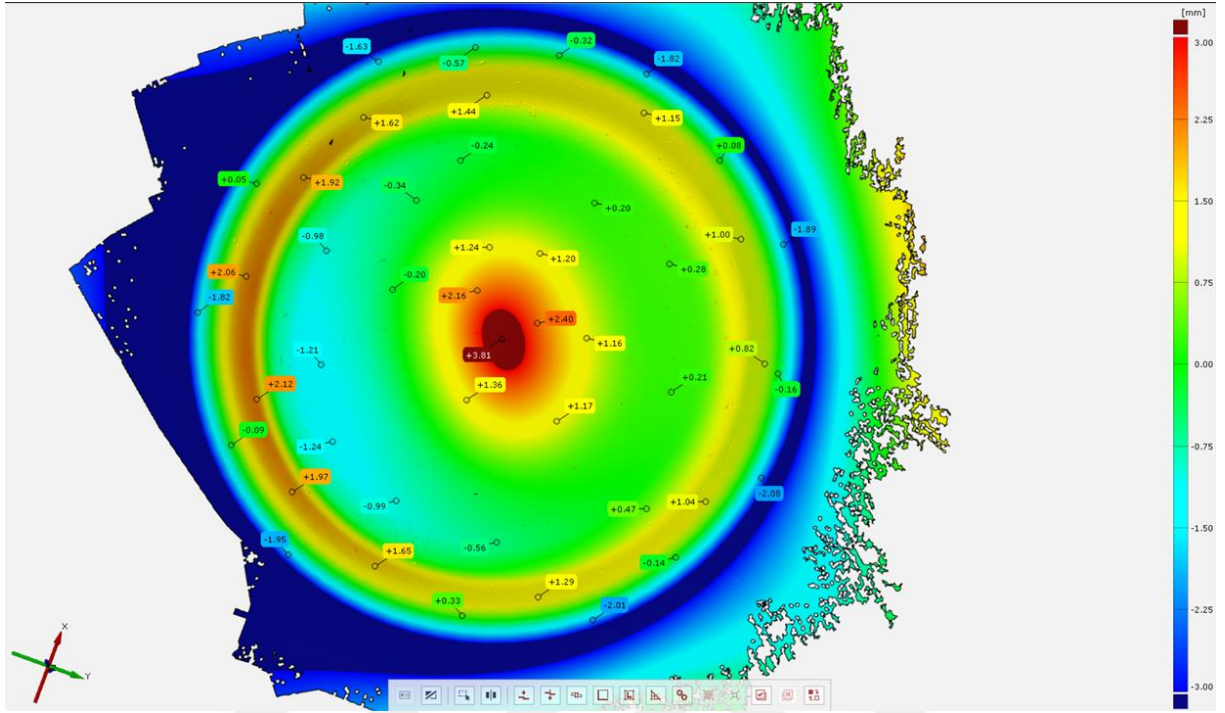
EK-1(devamı) 12 numara



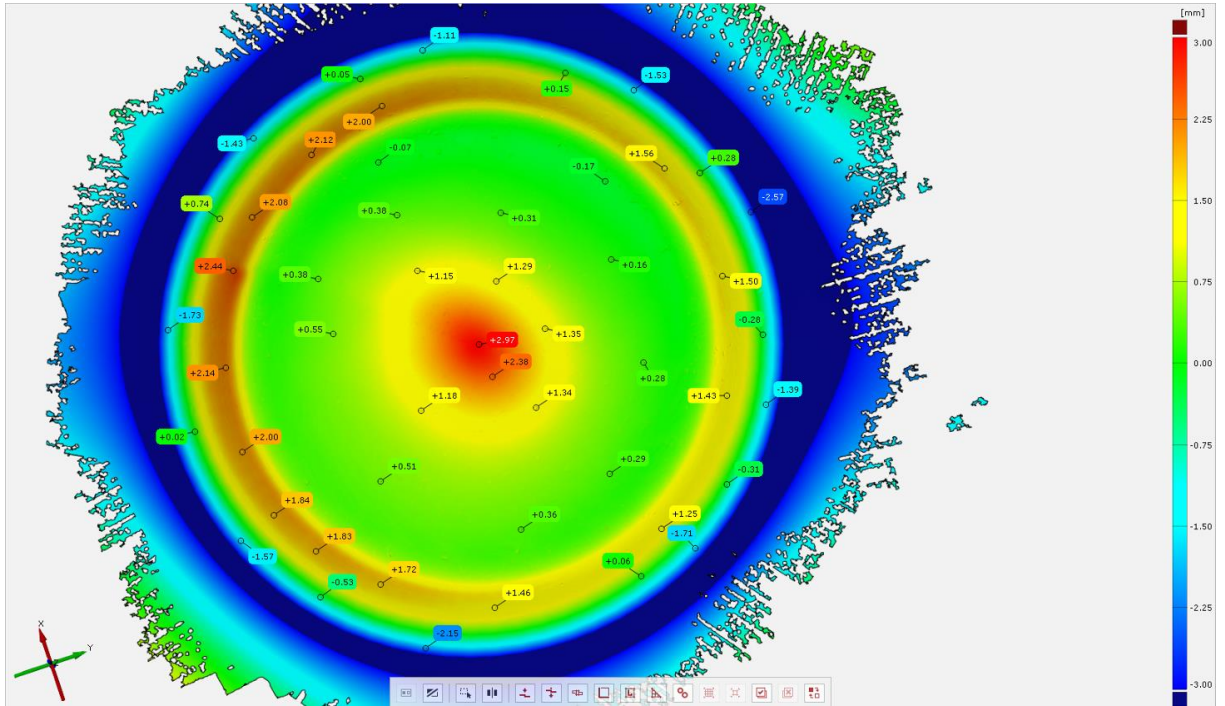
EK-1(devamı) 13 numara



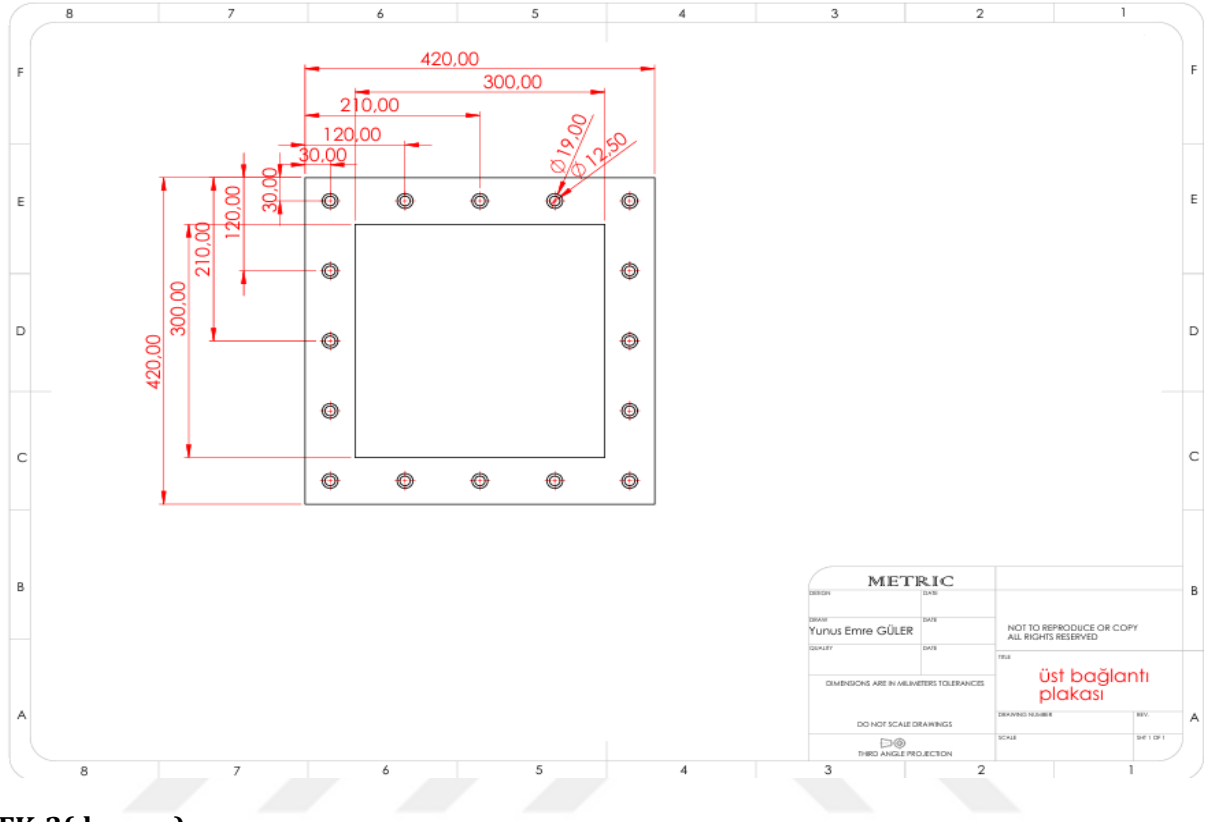
EK-1(devami) 14 numara



EK-1(devami) 15 numara



EK-2



EK-2(devamı)

