

T.C.
SAKARYA UYGULAMALI BİLİMLER ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**ARTIMLI SAC METAL ŞEKİLLENDİRME PROSESİ
İÇİN YUVARLANAN UÇLU TAKIM TASARIMI VE
İMALATI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ömer ÇERLEK

Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Mehmet ÇALIŞKAN

Mayıs 2019

T.C.
SAKARYA UYGULAMALI BİLİMLER ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

ARTIMLI SAC METAL ŞEKİLLENDİRME PROSESİ
İÇİN YUVARLANAN UÇLU TAKIM TASARIMI VE
İMALATI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ömer ÇERLEK

Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ

Bu tez 15/05/2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği ile kabul edilmiştir.



Jüri Başkanı

Doç. Dr. Mehmet ÇALIŞKAN



Üye

Prof. Dr. İbrahim ÖZSERT



Üye

Dr. Öğr. Üyesi, Sedat İRTEK

BEYAN

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

Ömer ÇERLEK

15.05.2019

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitiminin boyunca değerli bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım, her konuda bilgi ve desteğini almaktan çekinmediğim, araştırmanın planlanmasından yazılmasına kadar tüm aşamalarında yardımlarını esirgemeyen, teşvik eden, aynı titizlikte beni yönlendiren değerli danışman hocam Doç. Dr. Mehmet ÇALIŞKAN'a teşekkürlerimi sunarım.

Laboratuvar olanakları konusunda anlayış ve yardımlarını esirgemeyen Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölüm Başkanı Doç.Dr. Ahmet KOLİP'e teşekkür ederim.

Tez çalışması kapsamında yönlendirme, teorik ve pratik bilgiler anlamında yaptığı yardım ve paylaşımlar dolayısıyla değerli arkadaşım Arş.Gör. Fatih ÖZEN'e teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	i
İÇİNDEKİLER ...	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	iv
ŞEKİLLER LİSTESİ	vi
TABLolar LİSTESİ.....	ix
ÖZET	x
SUMMARY	xi
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ.....	1
BÖLÜM 2.	
LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	3
2.1. ASŞ İlk Uygulamaları	3
2.2. ASŞ'nin Nümerik Analizleri	13
2.3. Artımlı Sac Şekillendirme Metodunun Matematiksel Temeli.....	15
BÖLÜM 3.	
MATERYAL VE YÖNTEM	19
3.1. Materyal.....	19
3.1.1.Tasarım.....	19
3.1.1. Sac Malzeme Özellikleri	25
3.2. Yöntem.....	27
3.2.1. Kullanılan Araç ve Gereçler	27
3.2.2. Deneysel Çalışmaların Uygulanma Metodu	27
3.2.3. Bilgisayar Destekli Modelleme ve Analiz.....	33

3.2.3.1. Takım ve Sacın Modellenmesi	33
3.2.3.2. Malzemenin Tanımlanması	37
3.2.3.3. Adımların ve Ağ Yağısının Tanımlanması.....	40
3.2.3.4. Analiz Sonuçlarının Elde Edilmesi	44
BÖLÜM 4.	
ARAŞTIRMA BULGULARI.....	47
4.1. Kalınlık Profilleri	47
4.2. Pürüzlülük Değerleri	56
BÖLÜM 5.	
TARTIŞMA VE SONUÇLAR.....	59
KAYNAKLAR	61
ÖZGEÇMİŞ	63

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

AAŞ	: Asimetrik artımlı sac metal şekillendirme
AL1050	: Soğuk şekillendirme işlemlerinde kullanılan alüminyum alaşımı
ASŞ	: Artımlı sac metal şekillendirme
AR-GE	: Araştırma ve geliştirme
CAD	: Bilgisayar destekli tasarım
CNC	: Bilgisayar destekli kontrol
EN 10204	: Metal ürünler deney ve muayene standardı
HRC	: Rockwell sertlik değeri
İNAŞ	: İki nokta artımlı sac metal şekillendirme
TNAŞ	: Tek nokta artımlı sac metal şekillendirme
M	: Metrik
MJF	: Çoklu jet birleştirme
mm	: Milimetre
β	: Alaşım tipi
t_0	: Başlangıç kalınlığı
t_1	: Anlık kalınlık
α	: Germe açısı
A_0	: İlk kesit alanı
A	: Anlık germe açısındaki kesit alanı
σ_{ij}	: Akma gerilmesi
x_j	: Konum
C	: Akma kriteri
$\bar{\sigma}$: Ortalama gerilme
$\bar{\epsilon}$: Ortalama gerinim
σ'_{ij}	: Sanal koordinatlarda gerilme

u_i	: Kartezyen koordinatlarda hız bileşeni
u_j	: Kartezyen koordinatlarda hız bileşeni
x_j	: Kartezyen koordinatlarda konum bileşeni
δ	: Değişim
dV	: Değişimsel değişim
dS	: Kesit değişimi
σ_m	: Ortalama gerilme
ε_v	: Birim zamandaki değişimsel gerinim
F_i	: Kuvveti
ε_v	: Değişimsel gerinim
$^{\circ}$: Derece
rad	: Radyan
s	: Saniye
RP	: Referans noktası
μm	: Mikrometre

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1 Leszak'ın Patentindeki Şekillendirme Örnekleri	3
Şekil 2.2 Berghahn Patentindeki Şekillendirme Düzenegi	4
Şekil 2.3 Mason Patenti: Sacın Tornada Şekillendirilmesi	5
Şekil 2.4 Sieger'in İki Rulo ile İki Nokta Sac Şekillendirme Düzenegi	6
Şekil 2.5. Tuominen'in İki Robot Kol ile Yaptığı İki Nokta Şekillendirme Düzenegi	8
Şekil 2.6. Meier'in İki Robot Kol ile Yaptığı İki Nokta Şekillendirme Düzenegi	9
Şekil 2.7. Kwiatkowski'nin İki Robot Kol ile Yaptığı İki Nokta Asimetrik Şekillendirme Düzenegi	9
Şekil 2.8. Sac Kalınlığının Sinüs Yasasına Göre İki ve Üç Boyutlu Ölçüm Gösterimi	13
Şekil 2.9. Sacın Üçgen Mesh(Ağ) Yapısı ile Modellenmesi	15
Şekil 3.1. Şekillendirici Bilye Uç, Kafes ve Yataklama Bilyeleri	19
Şekil 3.2. Şekillendirici Bilye Uç, Kafes ve Yataklama Bilyelerinin Gerçek Montaj Görünümü	20
Şekil 3.3. Yağ Haznesi İçin Setskur	20
Şekil 3.4. Tutucu Kapak	21
Şekil 3.5. Tutucu Kapağın Gerçek İmalat Görünümü	21
Şekil 3.6. Sap-Gövde	22
Şekil 3.7. Sap-Gövde Parçası İmalat Görünümü	22
Şekil 3.8. Yuvarlanan Uçlu Takım Montaj Modeli	23
Şekil 3.9. Yuvarlanan Uçlu Takım Montaj Modelinin İmalat Görünümü	24
Şekil 3.10. Yuvarlanan Takım Germe Açısı	24
Şekil 3.11. Yuvarlanan Uçlu Takım Montaj Modelinin Kesit Görünüşü	25
Şekil 3.12. Sac Teknik Resmi	26
Şekil 3.13. Deneysel Çalışmada Kullanılan AL1050 Sacın Gerilme-Gerinim Grafiği	26

Şekil 3.14. Sacın Tutturulup Tezgaha Sabitlendiği Tutucu	28
Şekil 3.15. Yuvarlanan Uçlu Takım ile Tek Nokta Şekillendirme Çalışması	29
Şekil 3.16. Yekpare Takım ile Tek Nokta Şekillendirme Çalışması	30
Şekil 3.17. Yuvarlanan Uçla ve Yekpare Takımla Yapılan Deneysel Çalışmalar	31
Şekil 3.18. İç ve Dış Yüzey Pürüzlülük Ölçümü	32
Şekil 3.19. Dijital Komparatör Düzeneği ile Kalınlık Ölçümü.....	32
Şekil 3.20. Takım ve Sacın Modellenmesi.....	33
Şekil 3.21. Sacın Üç Boyutlu Modeli.....	34
Şekil 3.22. Yekpare Takım Üç Boyutlu Modeli	34
Şekil 3.23. Yuvarlanan Takımmı Temsil Eden Şekillendirici Bilye.....	35
Şekil 3.24 Farklı Büyüklüklerde Ağ Yapılarına Göre Kalınlık Profilleri	36
Şekil 3.25. Sacın Ağ Yapılarının Tanımlanması (Mesh)	36
Şekil 3.26. Takımların Ağ Yapılarının Tanımlanması.....	37
Şekil 3.27. Alüminyum Sacın Çekme Değerlerinin Yazılımda Kalibrasyonu.....	38
Şekil 3.28. Sac Malzemesinin Mekanik Özelliklerin Tanımlanması.....	38
Şekil 3.29. Takım ile Sac Arasındaki Temas Özelliği ve Sürtünme Tanımlanması ..	39
Şekil 3.30. Temas Yüzeyleri ve Tipinin Tanımlanması.....	39
Şekil 3.31. Sac Kesiti ve Kalınlığının Belirlenmesi.....	40
Şekil 3.32. Hareket Adımlarının Oluşturulması.....	40
Şekil 3.33. Hareket Adımları Girişleri	41
Şekil 3.34. Analiz Sonucunda Görüntülenmek İstenen Parametrelerin Seçimi.....	42
Şekil 3.35. Sınır Şartlarının Tanımlanması	42
Şekil 3.36 Sabitleme Sınırları	43
Şekil 3.37 Artımlı Şekillendirme İçin CAM Programında Takım Yollarının Oluşturulması	43
Şekil 3.38 Yekpare Takım ile Şekillendirme Simülasyonu	44
Şekil 3.39. Yuvarlanan Uçlu Takım ile Şekillendirme Simülasyonu	45
Şekil 3.40. Analiz Sonucunda Kalınlık Profili Çıkarılışı.....	45
Şekil 4.1. Yuvarlanan Uçlu ve Yekpare Takım Kalınlık Profilleri: 0,25 mm Artım Adımı, 30 Derece Germe Açısı	47
Şekil 4.2 Yuvarlanan Uçlu ve Yekpare Takım Kalınlık Profilleri: 0,25 mm Artım Adımı, 35 Derece Germe Açısı	48

Şekil 4.3. Yuvarlanan Uçlu ve Yekpare Takım Kalınlık Profilleri: 0,25 mm Artım Adımı, 40 Derece Germe Açısı	49
Şekil 4.4. Yuvarlanan Uçlu ve Yekpare Takım Kalınlık Profilleri: 0,5 mm Artım Adımı, 30 Derece Germe Açısı	50
Şekil 4.5. Yuvarlanan Uçlu ve Yekpare Takım Kalınlık Profilleri: 0,5 mm Artım Adımı, 35 Derece Germe Açısı	51
Şekil 4.6. Yuvarlanan Uçlu ve Yekpare Takım Kalınlık Profilleri: 0,5 mm Artım Adımı, 40 Derece Germe Açısı	52
Şekil 4.7. Yuvarlanan Uçlu ve Yekpare Takım Kalınlık Profilleri: 0,75 mm Artım Adımı, 30 Derece Germe Açısı	53
Şekil 4.8. Yuvarlanan Uçlu ve Yekpare Takım Kalınlık Profilleri: 0,75 mm Artım Adımı, 35 Derece Germe Açısı	54
Şekil 4.9. Yuvarlanan Uçlu ve Yekpare Takım Kalınlık Profilleri: 0,75 mm Artım Adımı, 40 Derece Germe Açısı	55
Şekil 4.10. İç Yüzey Ortalama Pürüzlülük Ölçüm Değerleri.....	56
Şekil 4.11. İç Yüzey Maksimum Pürüzlülük Ölçüm Değerleri	57
Şekil 4.12. Dış Yüzey Ortalama Pürüzlülük Ölçüm Değerleri	57
Şekil 4.13. Dış Yüzey Maksimum Pürüzlülük Ölçüm Değerleri.....	58

TABLULAR LİSTESİ

Tablo 1.1. Analiz Parametreleri	33
---------------------------------------	----



ARTIMLI SAC METAL ŞEKİLLENDİRME PROSESİ İÇİN YUVARLANAN UÇLU TAKIM TASARIMI VE İMALATI

ÖZET

İmalat süreçlerinde özellikle prototip üretimi için daha ekonomik ve hızlı üretim sağlamak istenir. Bu işlemin ekonomik ve hızlı olmasının sebebi kalıp kullanılmaması veya yalnızca bazı durumlarda destek amaçlı kısmi kalıpların kullanımının gerekmesidir. Geleneksel bazı diğer imal usulleri kullanılması durumunda sürecin uzaması ve maliyetlerin artması söz konusu olabilmektedir.

Artımlı sac şekillendirme(ASŞ) prosesi; özünde geleneksel frezeleme işlemine benzer mantıkla yapılmaktadır. Freze tezgahına bağlı küresel uçlu takım; saca temas edip bu noktalarda plastik deformasyon yaparak şekillendirme sağlanmış olur. Takım; CNC freze tezgahına bağlanıp, önceden yapılan bilgisayar destekli tasarım ve oluşturulan takım yollarından elde edilen kodlara göre, istenilen hızda 3 eksenli hareket ettirilir.

Bu çalışmada ise daha yaygın kullanılan yekpare küresel uçlu takım yerine; takım gövdesi içerisine küresel olarak yataklanmış bilyenin yuvarlanırken saca temas ederek şekillendirme yapacağı, yuvarlanan uçlu ASŞ takımı tasarlanıp imal edilerek sac şekillendirebilirliği incelenmiştir. Bu takım ile yapılan deneyler sonucunda ise daha iyi yüzey kalitesi elde edilebildiği ortaya konmuştur.

Anahtar kelimeler: Artımlı sac metal şekillendirme, imalat, takım, yüzey kalitesi

DESIGN AND MANUFACTURE OF ROLLING ENDED TOOL FOR INCREMENTAL SHEET METAL FORMING PROCESS

SUMMARY

In manufacturing stages, it is wanted that providing more economical and faster production especially for prototype production. The reason of quickness and economy of this process is; its no need to mold usage and only occasionally need to particular mold usage for support purpose. Usage of some other conventional manufacturing processes may cause cost increase and extension of process.

Incremental sheet metal forming (ISMF) process is; fundamentally executed similar to conventional milling processes. A spherical-ended machine tool that hanged on milling machine; provides forming by deforming at these points plastically by contacting the sheet . The tool; by attaching to the bench, is manipulated at the intended speed triaxially, with the help of computer aided design and the codes which are obtained from tool path.

In this study, instead of a more commonly used solid machine tool; a rolling-ended ISMF tool that cause forming by contacting to sheet while rolling of a ball which is beared spherically inside tool body, has been designed and manufactured and its mouldability has been reviewed. In result of the experiments conducted, it is presented that more surface quality could be obtained with this tool shape.

Keywords: Incremental sheet metal forming, manufacture, machine tool, surface quality

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Sac şekillendirme işleminde en çok düşünülmesi gereken hususlar; kalıp gereksinimi ve maliyetleridir. Özellikle otomotiv sektöründe sık kullanılan sac şekillendirme prosesleri çerçevesinde çok yüksek miktarlarda yapılacak olan seri üretimlerde kalıp üretim maliyeti göz ardı edilebilir. Ancak prototipleme gibi işlerde veya az miktarlarda üretimler için kalıp imalatı hem oldukça süre almaktadır hem de maliyeti ciddi noktalara ulaşabilmektedir. Bunun yanısıra geleneksel tek nokta artımlı sac şekillendirme işlemlerinde kullanılan yekpare şekillendirici; takımın germe açısına da bağlı olarak, sacın yırtılmasına, nispeten pürüzlü yüzey oluşumuna ve yüksek şekillendirme kuvvetine sebep olabilmektedir.

Artımlı sac şekillendirme prosesi temelde tek nokta ve iki nokta artımlı şekillendirme olarak ikiye ayrılmaktadır. Tek nokta şekillendirme prosesi; sacın üst veya ön tarafından şekillendirici uç saca temas ederek alt veya arka tarafta herhangi bir destek veya kalıp olmadan şekil verme esasına dayanan bir yöntemdir. İki nokta şekillendirmede ise bir taraftan şekillendirici takım hareket ederken diğer tarafta ise kalıp veya sabit destek ucu şekillendirmeye katkı sağlamaktadır. Buradan anlaşılacağı üzere aslında bu prosesin de bir türünde kısmi veya tam kalıp söz konusudur. Ancak bu tez kapsamında kalıpsız tek nokta artımlı sac metal şekillendirme prosesi üzerine çalışmalar yapılmıştır.

Bu çalışmada geleneksel tek nokta artımlı sac metal şekillendirme metodunda kullanılan takım yerine yeni bir takım tasarımı yapılmıştır. Geleneksel takım; yekpare ve tezgâha bağlı olarak üç eksenle hareket etmekte ve hareket ettiği yönde saca baskı yaparak şekil vermektedir. Yeni geliştirilen tasarımda ise takım; ucunda küresel yatağa bilyalı olarak yataklanmış olan şekillendirici bilya ve bunların tezgâha bağlı olarak çalışabilmesini sağlayacak sap ve kapak parçalarından oluşmaktadır.

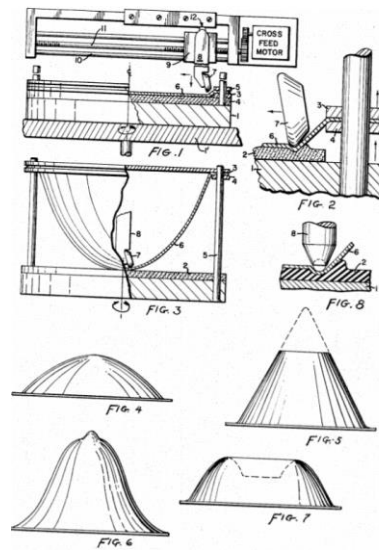
Kapak parçası vida dişi ile sap parçasına monte edilmiştir. Sap parçasının içerisinde şekillendirici bilyenin üzerine doğru akarak işlem sırasında yağlama sağlamak üzere yağ haznesi tasarlanmıştır. Bu tip bir tasarım ile şekillendirici uç, oldukça düşük sürtünme değeri sayesinde kayıplar optimum seviyede olacağı düşünülmüştür.

Otomotiv sektöründe daha yaygın kullanım alanı olmakla birlikte imalat sektöründe bu metodun kullanılmasının yapılan yeni tasarım ve çalışmalar neticesinde daha geniş fayda sağlayabilmesi önem arz etmektedir. Bunlara bağılı olarak bu çalışmada geliştirilen bu takım tasarımı sayesinde; kalıpsız şekillendirmenin dezavantajlarını azaltarak, daha düşük şekillendirme kuvveti ile daha yüzey kalitesi yüksek ve şekillendirme sonucu daha homojen kalınlığa sahip ürünler elde edilmesi amaçlanmıştır.

BÖLÜM 2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

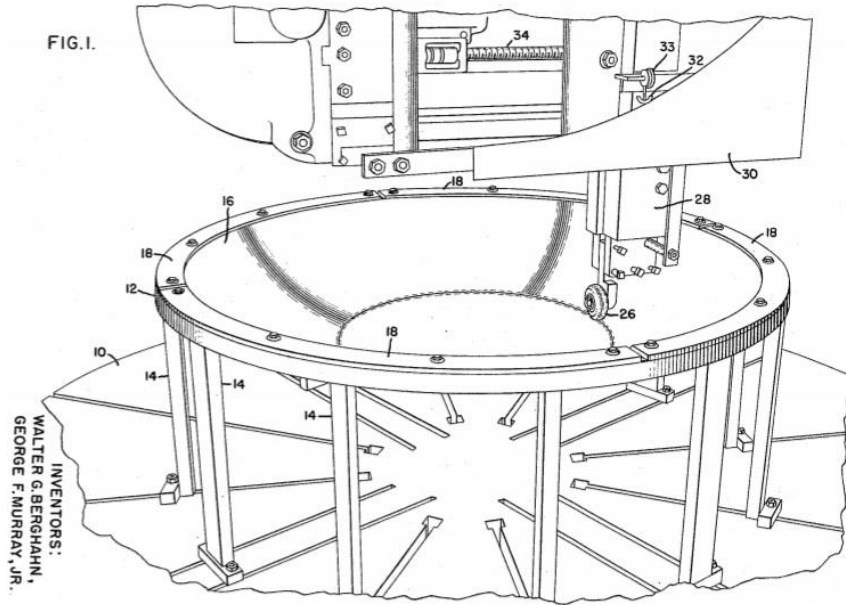
2.1. Artımlı Sac Şekillendirme İlk Uygulamaları

Günümüzdekinin temellerini atan ilk artımlı sac metal şekillendirme çalışmalarının 1967 yılında Leszak ve Berghahn patenti ile alınarak ortaya konduğu söylenebilir. Bazı üretimler için kalıp maliyetinin ve üretim süresinin çok olmasından yola çıkarak Leszak ; Şekil 2.1’de görüldüğü gibi döner tabla üzerine yerleştirilen saca; konik diske benzer uçlu takım bir de yuvarlak uçlu takım ile temas ederek şekillendirme yapmıştır. Bu tip bir parabolik sac şekillendirme ürününün diğer pres yöntemleri ile üretileceği düşünülürse birden fazla(6-8 adet) kalıp gerekecektir. Bu yöntemde ise hem mandrel hem kalıp gerekmeden şekillendirme tek aşamada gerçekleştirilir. Özellikle prototip ve model üretimlerinin ve birçok parçanın çabuk ve ekonomik şekilde üretileceği Leszak’ın patentinde öne sürülmüştür. (van den Boogaard, Emmens, & Sebastiani, 2010)



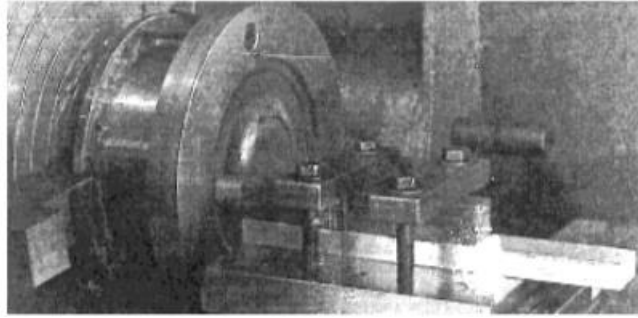
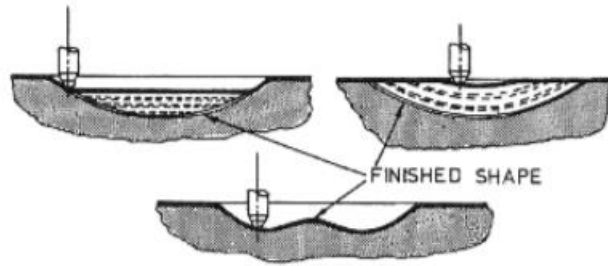
Şekil 2.1 Leszak’ın Patentindeki Şekillendirme Örnekleri(Leszak, 1967)

Berghahn ise patentinde(1967) dönel yüzeylerin şekillendirilmesinde; kalıp veya hadde gereksinimi olmadan saca şekil verebilmenin yolunu aramıştır. Kendinden önceki çalışmalarda dönel yüzeylere kalıpsız veya desteksiz olarak şekil verilmeye çalışıldığı durumlarda sacın dönel yüzeyinin alt ve üst bölgelerinde bükülmeler ve geri esnemeler tespit edildiğini ifade etmiştir. Dolayısıyla bu tip metotların; çanak anten gibi yüksek hassasiyetli imalatlarda kullanılamayacağını anlamış ve kendisi bir metot geliştirmeye yönelmiştir. Bu patentin ilk amacı kalıpsız olarak dönel yüzeylere şekil verebilmektir. Diğer bir amaç ise: dönel yüzeyin şekillendirilmemiş kısmını soğuk şekillendirirken genel biçimi korumaktır. Bunun dışında; dönel yüzeyin sıvama yöntemiyle oluşturulması ile geri esnemeyi azaltıp daha ince sac ile aynı mukavemetin sağlanıp daha hafif imalatlar yapılabilmesi amaçlamıştır. Şekil 2.2’de görüldüğü üzere sac plaka; sıkıştırma elemanı ile bağlanarak sacın dış yüzeyinden ortasına ve aşağıya doğru iç spiral bir yol izleyerek(bir model(kalıp) veya programlanmış kafa sayesinde) rulo şeklinde takım ile hareket sağlanarak şekillendirme yapılmıştır. Çalışan takımın içerde malzeme birikmemesi için, bir eğrilik yarıçapı orantısıyla uçtan uca hareketi sağlanmıştır. Sacın hem sıkıştırma ile tutturulması hem de aşağı hareket ile şekillendirmeye maruz bırakılması da sacın iki yüzeyinin de gerilmeye maruz kalarak geri esnemenin azalmasına etki etmektedir. (van den Boogaard vd., 2010)



Şekil 2.2 Berghahn Patentindeki Şekillendirme Düzeneği(Berghahn, 1967)

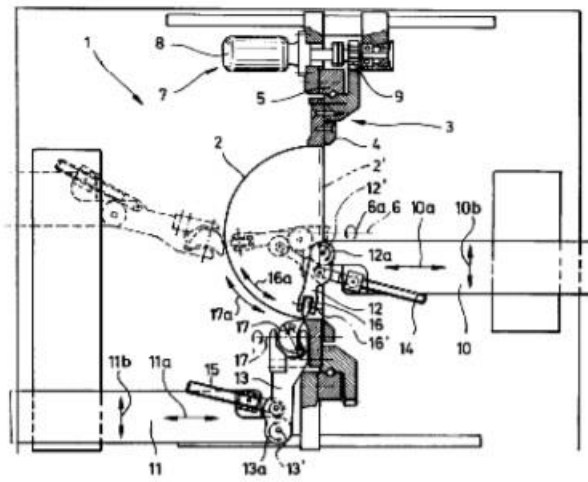
Berghahn'ın patenti ASS'nin bir örneği gibi görülse de hem Leszak hem Berghahn patentleri birer sıvama metodu olarak sunuldu. 1978 yılında Mason'un yaptığı çalışma ise ASS'nin başlangıcı olarak kabul edilebilir. Şekil 2.3'de görülen düzenekte Mason; küresel bir uç ile sac üzerinde x,y ve z eksenlerinde ileri geri veya bir taraftan diğer tarafa ilerlerken her pasoda derinliği artırmak suretiyle şekillendirme yapmıştır. Bu işlemi döner sacı tornaya tutturarak yapmıştır. İlk çalışmalarında destek elemanı kullanmış ve çok aşamalı olarak üretimi yapmış olsa da zamanla işlemi tek aşamada ve desteksiz şekilde yapabilmıştır.



Şekil 2.3 Mason Patenti: Sacın Tornada Şekillendirilmesi(van den Boogaard vd., 2010)

Japon Iseki ise Mason'un çalışmasından esinlenerek 1989 yılında ilk kez simetrik olmayan parçaları ASS metodu ile üretmiştir. İlk aşamada manuel olarak 2 eksenli hareket ile şekillendirme yaparken ilerleyen aşamalarda 3 eksenli CNC freze tezgahının takım yollarını kullanarak çalışmalar yapmış ve 2003 yılında çalışma arkadaşlarıyla geliştirdiği 3 takımlı artımlı sac şekillendirme makinesi ile Japonya'da patent almıştır. Ayrıca Iseki saca su jeti ile su püskürterek artımlı şekillendirme prosesini uygulamıştır. Şu ana kadar bahsedilen proseslerin hepsi Tek Nokta Artımlı Şekillendirme(TNAŞ) olarak literatürde geçmektedir. Bu işlemde sac çevresinden tutturulmuş ve hareketsizdir(dönme durumu hariç). Bir takım dışardan içeri aşama aşama derine inerek şekillendirme sağlanmaktadır. TNAŞ'de kısmi veya tam kalıp

yoktur. Sacın arka(alt) yüzeyi desteksiz olarak deformasyona maruz kaldığı için sacda farklı gerilme ve gerinim desenleri oluşmaktadır. Bu sebeple bu prosese kesme kuvveti ile sıvama teorisi uygulanabilir. Diğer bir metot ise ilk kez 1994 yılında Matsubara tarafından ortaya konan İki Nokta Artımlı Şekillendirme(İNAŞ) prosesidir. Bu yöntemde sacın alt tarafından küresel uçlu çubuğa benzer bir parça saca temas etmektedir. Üst taraftan ise hareketli küresel uçlu takım baskı yaparak şekil vermektedir. Sacın dış kenarları vidalı tutucu ile sabitlenmiştir. Üst taraftaki hareketli ucun hareketine eş şekilde tutucu takım da hareket ederek alt taraftaki sabit uç ile hareket anında destek sağlanmış olur. İNAŞ'de statik destekler olduğu için bu metota tam anlamıyla kalıpsız şekillendirme denemez. Matsubara'nın aldığı bu patent sonradan pek çok başka icada da ilham kaynağı olmuştur. 2000'li yılların başından itibaren bu konudaki çalışmalar Uzak Doğu'dan batıya doğru evrilmeye başlamıştır. Şekil 2.4'teki düzenekte, 1992 yılında Sieger tarafından Titanyum β alaşımı gibi şekillendirilmesi zor malzemeler için iki rulonun beraber çalıştığı bir artımlı şekillendirme prosesi icadı geliştirildi.(van den Boogaard vd., 2010)



Şekil 2.4 Sieger'in İki Rulo ile İki Nokta Sac Şekillendirme Düzeneği(van den Boogaard vd., 2010)

2001 yılında Luttgarm sıvamanın bir çeşidi olarak ortaya koyduğu sac metal şekillendirme metodu ile patentini aldı. Bu metot aslında tam pozitif kalıplı İNAŞ olarak da tanımlanabilir. Hareketli takımın, pozitif bir kalıp üzerinde hareketsiz duran sacı kalıbın üzerine ezerek şekillendirmesiyle üretim yapılıyordu.

2001'de Okada; Hitachi firmasındaki iş arkadaşlarıyla beraber; asansörlerin kabartmalı duvar panellerinde kullanılacak yeni bir patent aldı. Esasında bu yeni metot artımlı şekillendirme ve artımlı derin çekme imal usullerinin birleşimiyle oluşan bir yöntem gibiydi. Yine 2003'te Okada ve iş arkadaşları İNAŞ'ye ek olarak geri esnemeyi azaltmak üzere bölgesel bir ısıtma aparatı ile şekillendirme yapılan yeni bir patent geliştirdi. (van den Boogaard vd., 2010)

Matsubara'nın temellerini attığı kalıpsız şekillendirme prensipleriyle Amino; 1996 yılında Japon Bilim ve Teknoloji Kurumu'nun desteğiyle ilk prototip kalıpsız ASŞ makinesini geliştirdi. Aynı zamanda AMINO isimli firmayı kurdu. Aynı zamanda Amino; 1998 yılında kalıpsız şekillendirme için bilgisayar destekli imalat yazılımını geliştirdi. 2002'den itibaren AMINO global endüstriye özelleştirilmiş ekipmanlar sunmaya başladı. AMINO günümüze kadar AR-GE amaçlı binlerce parça üretti. Onlarca makineyi devreye soktu. (Amino, Mizoguchi, Terauchi, & Maki, 2014)

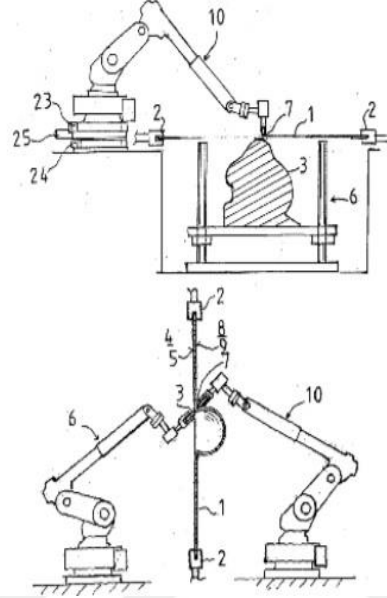
Amino, gerdirmeli sıvama tekniği ile ASŞ'yi birleştirdiği metodu ile 2004 yılında patentini aldı.

Okada'nın son patentine benzer olmakla birlikte; Klocke ve Wehrmeister 2006 yılında sıvama metoduna laser ısıtıcı ekleyerek daha iyi bir şekillendirebilirlik elde etmek üzere çalıştılar. Bu işlemde mandrele tutturulmuş iş parçası yan taraftan ısı veren lazere maruz kalırken diğer yan taraftan ise rulo şeklinde form takımı saca basarak şekil vermekteydi. (Klocke & Brummer, 2014)

2008 yılında ise Park; şekillendirilebilirliğinin 150 derece civarında ciddi derecede yükseldiği alüminyum alaşımına sıcak hava üfleyiciler aracılığıyla sabit 150 derece sıcaklık sağlayarak bu ortamda alüminyuma şekil vererek artımlı şekillendirme yöntemi ile yumurta geometrisine benzer parçalar üretmiştir. (Ji & Park, 2010)

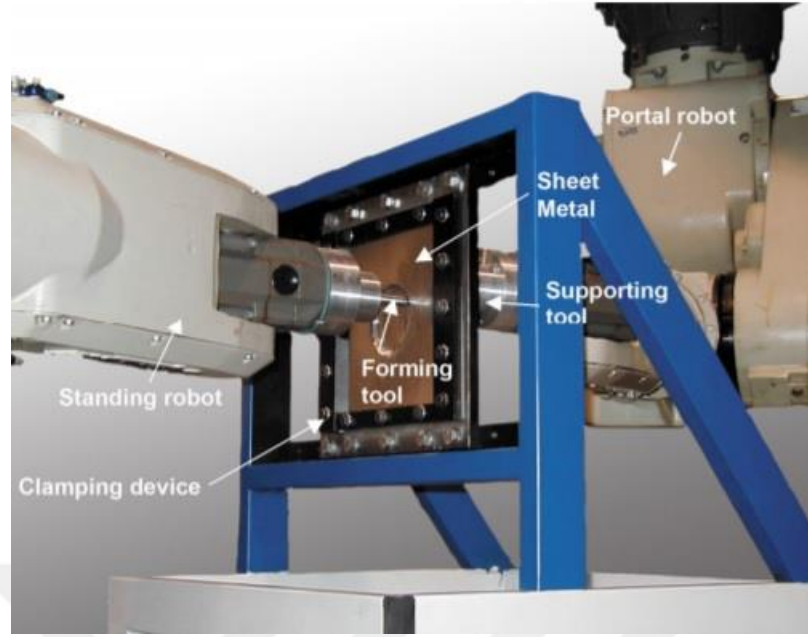
2005 yılında Tuominen ise diğer çalışmalardan farklı olarak endüstriyel bir robot ile artımlı sac şekillendirme prosesini denemiştir. Şekil 2.5'teki gibi, tutucu ile 0.75 mm ve 1 mm kalınlıkta sacı tutturup robot bir kol ile tutturduğu şekillendirici takım

aracılığıyla artımlı sac şekillendirme yapmıştır. Bu tekniğin dezavantajının; bir robot kolun sanayi tipi torna-freze tezgahları kadar sağlam olmamasını belirtmekle birlikte saca çok farklı açılardan temas edebilmesini ise önemli bir avantaj olarak ortaya koymuştur. Ayrıca bu metotun büyük parçalarda daha uygun olacağını belirtmiştir. (Lamminen, Tuominen, & Kivivuori, 2005)



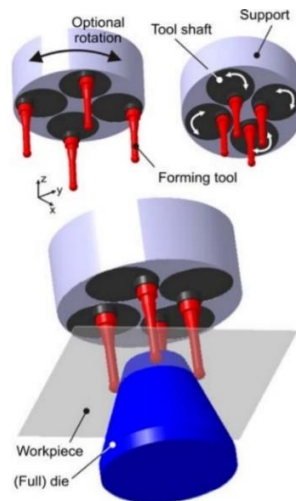
Şekil 2.5. Tuominen'in İki Robot Kol ile Yaptığı İki Nokta Şekillendirme Düzenegi(Lamminen vd., 2005)

2007 yılında Ruhr Üniversitesinden Meier; sabit tutucuya dikey olarak tutturulmuş saca iki taraftan birer robot kolun senkronize temasıyla artımlı şekillendirme yapmış ve küçük kuvvetler ile yüksek deformasyon yakalayabilmiştir. Şekil 2.6'da görülen çalışmada robot kolların birinde aynı zamanda destek sağlayan hareketli parça da kısmi destek elemanı vazifesi görmektedir. İki nokta artımlı şekillendirme prosesinin bir türevi olduğu söylenebilir. (Meier, Smukala, Dewald, & Zhang, 2007)



Şekil 2.6. Meier'in İki Robot Kol ile Yaptığı İki Nokta Şekillendirme Düzeneği(Meier vd., 2007)

2010 yılında Kwiatkowski asimetrik artımlı sac metal şekillendirme prosesi bağlamında çok sayıda takım kullanarak şekillendirme denemiştir. Şekil 2.7'de çoklu takım ile şekillendirme sembolik olarak gösterilmektedir. Proses süresinin 4 adet birbirine paralel takım kullandığında dörtte biri kadar azaldığını ancak bu metotun yalnız dönele simetriye sahip parçalarda kullanılabileceğini ortaya koymuştur. (Kwiatkowski, Urban, Sebastiani, & Tekkaya, 2010)



Şekil 2.7. Kwiatkowski'nin Kullandığı Çok Takımlı İki Nokta Artımlı Şekillendirme Düzeneği (Kwiatkowski vd., 2010)

Çeşitli otomobil firmaları bu prosesle ilgilenselerde ilk patent 2002 yılında Honda tarafından alındı. Honda S800 modelinin kaput parçasının üretimi için dişi kalıplı artımlı sac şekillendirme patentini almış oldu.

2004 yılında ise BMW bazı özel parçaların bu proses ile üretimi için patent aldı. Daimler-Chrysler 2006 yılında iskelet kalıp üzerinde iki nokta artımlı şekillendirme metodu ile yapacağı üretim için patent aldı.

Bunların dışında artımlı dövme olarak da tabir edilen formalden farklı olarak, şekillendirici ucun sabit değil de titreşen bir hareket yaptığı teknik üzerinde de 2001 yılında Saotome ve Okamoto çalışmalar yürütmüştür. 2002 ve 2003 yıllarında Fraunhofer Enstitüsü tarafından bu konuda patentler alınmıştır. Fraunhofer Enstitüsü'nün yaptığı çalışmada robot kola bağlı titreşen takım kullanılmıştır ki zaten bu metotun daha ziyade robot kol ile uygulanabilirliğinin mümkün olduğu söylenebilir.(van den Boogaard vd., 2010)

Herhangi bir zımba veya rulo vb. takımın kullanılmadığı ancak şekillendirmek için bir kalıbın gerektiği; yüksek basınçlı su jeti kullanımı ile artımlı şekillendirme çalışmaları da oldu. Ancak bu metot daha ziyade teneke şekillendirmede bazı özel işlerde kullanılması dışında genel anlamda ASS camiasında fazla ilgi görmedi.

2014 yılında ise B. Lu ve arkadaşları yaptıkları çalışmada geleneksel küresel uçlu takım ile küresel yataklı bilye ile şekillendirme yapan dikey takım ve küresel yataklı bilye ile şekil veren eğik takımın tek nokta artımlı sac şekillendirme(TNAŞ) işleminde kullanılmasının yüzey kalitesi, şekillendirme kuvvetinin azalması, şekillendirebilirlik ve uçtan uca kalınlıktaki kaymaya etkisini incelemiştir. Sonuç olarak küresel yataklı bilye ucun daha iyi yüzey kalitesi ortaya koyduğu, daha düşük şekillendirme kuvveti gerektirdiği ve daha yüksek şekillendirebilirlik sunduğunu ortaya koymuşlardır.(Lu vd., 2014)

2005 yılında Fratini ve arkadaşları yaptıkları çalışmada sürtünmeyi azaltmak üzeri sacın üzerini yağ filmi ile kapladıkları deney düzeneğinde; bu malzemelerin

pekleştirme katsayısı, gerinim değerleri, mukavemet katsayısı, anizotropi endeksi, maksimum çekme dayanımı gibi mekanik özelliklerin bu prosesteki şekillendirme kabiliyetine etkisini incelemiştir.(Fratini, Ambrogio, Di Lorenzo, Filice, & Micari, 2004)

2005 yılında Jeswiet artımlı sac şekillendirme prosesini derinlemesine anlattığı bir inceleme yayınladı. Jeswiet çalışmasında artımlı sac şekillendirme ile ilgili bir dizi prensipler ortaya koymuştur. Bunlara göre, artım adımının büyüklüğüne bağlı olarak; sac inceldikçe şekillendirilebilirliğin azaldığını, küçük takım boyutunun şekillendirmeyi artırdığını, artım adımı arttıkça şekillendirme kabiliyetinin azaldığını, büyük artım adımlarının yüksek pürüzlülüğe sebep olduğunu, ayrıca artım adımı büyüdükçe sacda portakal yüzeyi etkisi denen pürüzlülük durumunun oluştuğunu ortaya koymuştur. Germe açısının etkisine bağlı olarak ise ; açılı arttıkça incelmenin neticesinde yırtılmaların olacağını, açılıya bağlı olarak deforme olmuş sac kalınlığının değiştiğini, germe açısının tek pasoda şekillendirilebilecek bir limiti olduğunu belirtmiştir. Plastisite ile ilgili ise; şekillendirme tek yönlü ise burulma oluşabileceğini, plastik gerinimin; takımın büyümesiyle artacağını, plastik gerinimin her artışının basma gerilmesiyle ilişkili olduğunu söylemiştir. Geri esneme ile ilgili ise; şekillendirme takımının her yer değiştirmesinde yerel bir geri esnemenin sürekli olarak oluştuğunu, kuvvetin sacdan çekildiğinde ve sacın tutucudan söküldüğünde genel bir geri esnemenin oluştuğunu, plakaya kırpma yapılırsa bunun sonucunda da genel bir geri esneme oluşacağını ortaya koymuştur. Kuvvetlerle ilgili ; en uç kuvvetlerin kopmanın olduğu maksimum germe açılarında meydana geldiğini, dikey adım büyüklüğünün artışının kuvvetleri artırdığını, takım çapı arttıkça şekillendirme kuvvetlerinin arttığını, ancak dikey adım büyüklüğünün artışının kuvvetlere etkisinin; germe açısı veya takım çapına göre oldukça düşük olduğunu belirtmiştir. (Jeswiet, 2009)

Attanasio, takım yolunu optimize etmek üzere; tam kalıplı iki nokta artımlı şekillendirme(İNAŞ) prosesi üzerinde çalışmıştır. İNAŞ'nin sacı iki taraftan da deformasyona maruz bırakarak geri esnemeyi azaltması ile boyutsal hassasiyeti yüksek parçalar elde edilebileceği bilinmektedir. Attanasio; bu çalışmasında; parça

geometrisine bağılı olmakla birlikte, adım derinliğinin değişkenlik gösterdiği bir takım yolu kullanılarak ve kısmen de olsa maksimum adım derinliği ile fisto yüksekliği değerlerinin doğru şekilde ayarlanmasıyla; yüzey kalitesi, geometrik doğruluk ve nihai parçanın kalınlığı gibi parametrelerin daha iyi hale geldiğini göstermiştir. (Attanasio, Ceretti, & Giardini, 2006)

Elastik sınır dışında (elastik sınırı aşmış) yüklenmiş ve boşaltılmış elemanlarda veya soğuk şekillendirilmiş parçaların içinde bir takım gerilmeler kalmaktadır. Bu gerilmelere artık gerilmeler denir. İçinde artık gerilme bulunan elemanların yorulma dayanımı düşmektedir. Wang, 1992 yılında yaptığı çalışmada; şerit testere plakaları üzerinde küresel rulo ile sac üzerinde plastik deformasyon yapılması durumunda rulonun aynı yoldan sabit yükte tekrarlı olarak geçtikçe sacdaki boylamasına artık gerilmelerin azaldığını gözlemlemiştir. Böylece bu plakalardan imal edilen testerelelerin yorumla dayanımının artmasıyla birlikte kesme kuvvetlerinin de arttığını belirtmiştir. (Wang & Mote, 2009)

Simetrik artımlı şekillendirmenin; özünde sıvama metodundan türemiş olduğu söylenebilir. Sıvama metodunda; dönen, dairesel kesitli kalıp üzerine sac manuel olarak sıvandığı için ancak dairesel simetriye sahip parçalar üretilebilmektedir. Bu metodu geliştirebilmek adına, prosese bilgisayar kontrolünün eklenebilmesiyle daha karmaşık, asimetric geometride parçaların üretilebilmesi ve daha yüksek hassasiyetlere ulaşılması mümkün hale gelmiştir. Kısacası sıvama metodunun yeni bir türevi olarak söyleyebileceğimiz simetrik artımlı şekillendirme prosesinin bilgisayar ile nümerik kontrol desteği sağlanması; asimetric artımlı sac şekillendirme işlemini ortaya çıkarmıştır denebilir.

Asimetric artımlı sac şekillendirme(AASS) farklı şekillerde tarif edilebilse de kısaca şöyle tanımlanabilir; dayanıklı, küçük boyutlu bir takım kullanarak ve büyük veya özel üretilmiş kalıpların kullanılmadığı, takımın sac ile sürekli temas halinde olduğu ve CNC sayesinde üç boyutlu asimetric şekillerin oluşturulabildiğı sac metal şekillendirme prosesidir. (Jeswiet, 2009)

2.2. Artımlı Sac Şekillendirme'nin Nümerik Analizleri

Artımlı sac metal şekillendirme işleminin bilgisayar destekli olarak modellenip simülasyonlarının yapılması da deneysel çalışmaların karşılaştırılıp doğrulanması için önemli bir husustur.

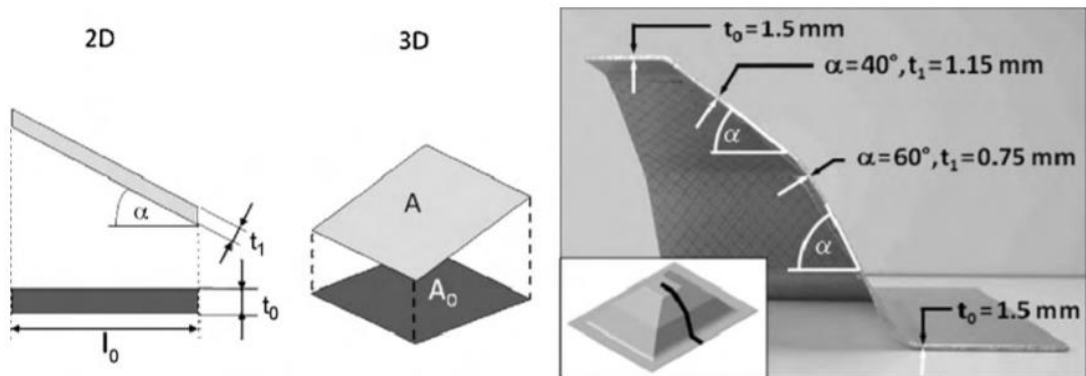
Sacın artımlı şekillendirilmesi sırasındaki incelmeler temel olarak sinüs yasası esasına göre gerçekleşir. t_0 başlangıç kalınlığı olmak üzere, t_1 anlık olarak bir germe açısındaki kalınlığı arasındaki bağıntı aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$t_1 = t_0 \sin(90^\circ - \alpha) = t_0 \cos(\alpha) \quad (2.1)$$

Sinüs yasasının üç boyutlu modellere uyarlanmasında ise aşağıdaki bağıntı kullanılabilir.

$$t_1 = t_0(A_0/A) \quad (2.2)$$

Burada A_0 ilk kesit alanını, A ise anlık germe açısındaki kesit alanını ifade etmektedir.

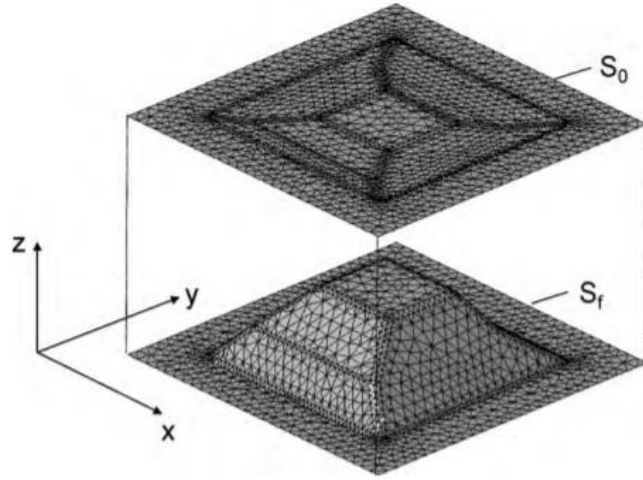


Şekil 2.8. Sac Kalınlığının Sinüs Yasasına Göre İki ve Üç Boyutlu Ölçüm Gösterimi (Junk, Hirt, & Chouvalova, 2003)

Junk'un artımlı sac şekillendirmede sac kalınlığının değişim ve sinüs yasası ile ilgili yaptığı çalışma Şekil 2.8'de görölmektedir. Her ne kadar matematiksel olarak bu proseste sacın kalınlığının değişimi sinüs yasasına göre düşünölsede deneysel çalışmalarda bunun matematiksel hesaplamalardan farklı çıktığı görölmektedir. Bambach 2010 yılında yaptığı çalışmada artımlı sac şekillendirme prosesinde sac kalınlığının iki boyutlu ve üç boyutlu matematiksel temelini ortaya koyarken deneysel çalışmalarda ortaya çıkan farklılıkların sebebine de değinmiştir. Bunun başlıca sebebi uçtan uca kalınlık boyunca oluşan kaymalardır. Sacın sünekliğine bağlı olarak, etkiyen kuvvete ve oluşturulmak istenen geometriye göre farklı miktarlarda sac kalınlıkları meydana gelebilmektedir. (Bambach, 2010)

Jeswiet ve Young ise 2004 yılında yaptıkları çalışmada; artımlı şekillendirme prosesinde işlenen parçanın kalınlık değişiminin sinüs yasası ile ifade edilebilmesi hususunu incelemişlerdir. Özellikle yüksek germe açılarında, eğik sac duvarlarında sac boyun vermesi de denebilecek incelmeler olduğunu ve dolayısıyla özellikle yüksek açılı sac şekillendirmelerde kalınlığı sadece sinüs yasası ile ifade edemeyeceğimizi belirtmişlerdir. Aynı çalışmada çift paso ile aynı takım yolu izlenerek yapılan çalışmada ise incelmenin azaldığı ve kalınlığın nispeten sinüs yasasına daha yakın değerlerde oluştuğunu ortaya koymuşlardır.(Young & Jeswiet, 2004)

Sacın eğik duvarlarındaki bu incelme; düzlemsel gerinim deformasyonu sebebiyle olduğu söylenebilir. Bunun da matematiksel olarak modellenmesi için doğrusal üçgenlerin yansıması esasına göre Şekil 2.9'da gösterildiği gibi sac, üçgensel ağ elemanlarına bölünmektedir.



Şekil 2.9. Sacın Üçgen Mesh(Ağ) Yapısı ile Modellenmesi(Bambach, 2010)

Üçgensel ağ yapısı dışında modelin geometrisine de bağlı olarak veya problemi basitleştirebilmek ya da daha hassas analizler yapmak için farklı ağ yapıları da tanımlanabilmektedir. Örneğin; dörtgen biçiminde dört veya sekiz düğüm noktası olan ağ, 10 düğümlü tetrahedral, 20 düğümlü hegzahedral vb. ağ yapıları da problem durumu ve istenen çözüm hassasiyetine göre belirlenebilir. Tabii ki eleman sayısı ve düğüm noktası sayısı arttıkça çözüm süreleri ciddi seviyelere çıkabilmektedir. Bunların dışında yine problemin asıl etkin kısmına özel kısmi ağ tanımlamaları yapılarak diğer çok önemsenmeyecek kısımları basit ve seyrek ağ ile ördürüp asıl veri alınmak istenen bölgeye sık ağ yapısı atanabilir.

2.3. Artımlı Sac Şekillendirme Metodunun Matematiksel Temeli

Sac metal şekillendirme işlemindeki genel dinamik, elastoplastik deformasyon problemleri Kobayashi tarafından aşağıdaki denklemleri ile açıklanmıştır.

Artımlı sac şekillendirme metodunda meydana gelen deformasyonlar temel olarak aşağıda gösterilen bağıntı ve kriterlere göre oluşmaktadır.

Denge Denklemi:

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} = 0 \quad (2.3)$$

Burada σ_{ij} = akma gerilmesini, x_j = konumu ifade etmektedir.

Akma kriteri:

$$f(\sigma_{ij}) = C: \bar{\sigma} = \sqrt{\frac{3}{2}} \{\sigma_{ij}' \sigma_{ij}'\}^{1/2} = \bar{\sigma}(\bar{\varepsilon}, \bar{\varepsilon}) \quad (2.4)$$

Burada C = Akma kriterini, $\bar{\sigma}$ = ortalama gerilmeyi $\bar{\varepsilon}$ =ortalama gerinimi σ_{ij}' : sanal koordinatlardaki gerilmeyi ifade etmektedir.

Temel denklemler:

$$\dot{\varepsilon}_{ij} = \frac{3}{2} \frac{\dot{\bar{\varepsilon}}}{\bar{\sigma}} \sigma'_{ij} \quad \text{olmak üzere} \quad \dot{\bar{\varepsilon}} = \sqrt{\frac{2}{3}} \{\varepsilon_{ij}' \varepsilon_{ij}'\}^{1/2} \quad (2.5)$$

Burada $\dot{\varepsilon}_{ij}$ = Birim zamandaki gerinimi, $\dot{\bar{\varepsilon}}$ = Birim zamandaki ortalama gerinim, σ'_{ij} = Sanal koordinatlarda gerilmeyi, ε_{ij}' = Sanal koordinatlardaki gerinimi temsil etmektedir.

Uyumluluk şartları:

$$\dot{\varepsilon}_{ij} = \frac{1}{2} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \quad (2.6)$$

Burada u_i, u_j = Kartezyen koordinatlarda hız bileşenlerini, x_j, x_i = Kartezyen koordinatlarda konum bileşenlerini ifade etmektedir.

Yarı statik plastik deformasyon ile ilgili bilinmeyenler; altı gerilme bileşeni ve üç hız bileşenidir. Yukarıdaki genel denklemler ve sınır şartları, bilinmeyenleri elde etmek üzere kullanılan hız ve çekmeye bağlı olarak kurulmuştur. Tüm genel denklemleri sağlayan, kapalı form çözümünü elde etmek zor olduğu için çeşitli yaklaşımlar yapılmıştır. Bunlardan, sonlu elemanlar metodu; çözümü elde etmek üzere

değişimsel prensip kullanan yaklaşımlardan biridir. Elastoplastik problemin değişimsel biçimi aşağıda verildiği gibidir:

$$\int \bar{\sigma} \delta \dot{\epsilon} dV + \int_V \sigma_m \delta \epsilon_v dV + \int_V \delta \sigma_m \epsilon_v dV - \int_{S_F} F_i \delta u_i dS \quad (2.7)$$

Denklem 2.7'de δ : değişimi, dV : değişimsel değişimi, dS : kesit değişimini, σ_m = ortalama gerilmeyi, ϵ_v =birim zamandaki değişimsel gerinimi, F_i : Kuvveti, ϵ_v = değişimsel gerinimi temsil etmektedir.

Öncelikle hız bölgesi için yukarıdaki temel denklemi sağlayan çözüm elde edildikten sonra ilgili gerilmeler akma kuralı ve bilinen ortalama gerilme dağılımı kullanılarak hesaplanabilir. Sac metal şekillendirme işlemi aslında yarı statik bir problem gibi görülse de nümerik simülasyon yazılımları bunu aşağıdaki denklemlerle tanımlanacağı şekilde dinamik bir problem olarak kabul etmektedir.

$$[M]\{\ddot{x}\} = \{F_{i\zeta}\} - \{F_{d\zeta}\} \quad (2.8)$$

Burada $[M]\{\ddot{x}\}$ sistemin atalet kuvveti, $[M]$ =kütleyi, $\{F_{i\zeta}\}$ ve $\{F_{d\zeta}\}$ ise sistemin iç ve dış kuvvetlerini temsil etmektedir.

Noktaların ivmelerini, $\{\ddot{x}\}$ 'i hesaplamakta yer değişimlerine bağlı olarak kullanılan merkezi fark formülü aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\{\ddot{x}\} = \frac{1}{\Delta t^2} [\{x_{t-\Delta t}\} - 2\{x_t\} + \{x_{t+\Delta t}\}] \quad (2.9)$$

Burada $x_{t+\Delta t} = t + \Delta t$ zamanındaki hareketi, Δt = zaman adımını ifade etmektedir. Zamana göre noktasal yer değiştirmeler, $t + \Delta t$, yukarıdaki ivme denkleminin temel denklemde yerine konmasıyla hesaplanabilir. Böylece aşağıdaki denklem elde edilir :

$$[\bar{M}]\{x_{t+\Delta t}\} = [\bar{F}_t] \quad (2.10)$$

Çözümü kararlı hale getirmek için zaman adımı Δt , kritik zaman adımından küçük olmalıdır. Burada $[\bar{F}_t] = t$ zaman adımında ortalama kuvveti temsil eder. Kritik zaman adımı sonlu elemanlar yazılımlarında aşağıdaki gibi verilmektedir:

$$\Delta t_c = \frac{\Delta x}{c} \quad \text{iken} \quad c = \sqrt{\frac{E}{\rho(1-\nu^2)}} \quad (2.11)$$

Kritik zaman adımı(Δt_c); Eleman kenar uzunluğu olan Δx 'in ve dalga hızı (c)'nin bir fonksiyonudur. Elastik dalga hızı ise malzemenin sırasıyla; Young Modülü(E), yoğunluğu(ρ) ve Poisson oranı(ν)'nın bir fonksiyonudur.

Takım ve sac arasındaki temas yek yönlü, yüzeyden yüzeye temas algoritması kullanılarak tanımlanır. Bu algoritma teğetsel sürtünme davranışının penaltı metoduna dayanır. Temas halindeki ana yüzey katılığı aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$Temas\ katılığı = \alpha k A / l \quad (2.12)$$

Yukarıdaki denklemdeki α ; penaltı ölçek faktörü, k;kitle modülü, A; parça alanı ve l; elemanın karakteristik uzunluğudur. (Kobayashi, Oh, & Altan, 1989)

Nümerik analiz yazılımlarında artımlı sac metal şekillendirme prosesinin simüle edilmesinin arka planında bu matematiksel temel yatmaktadır.

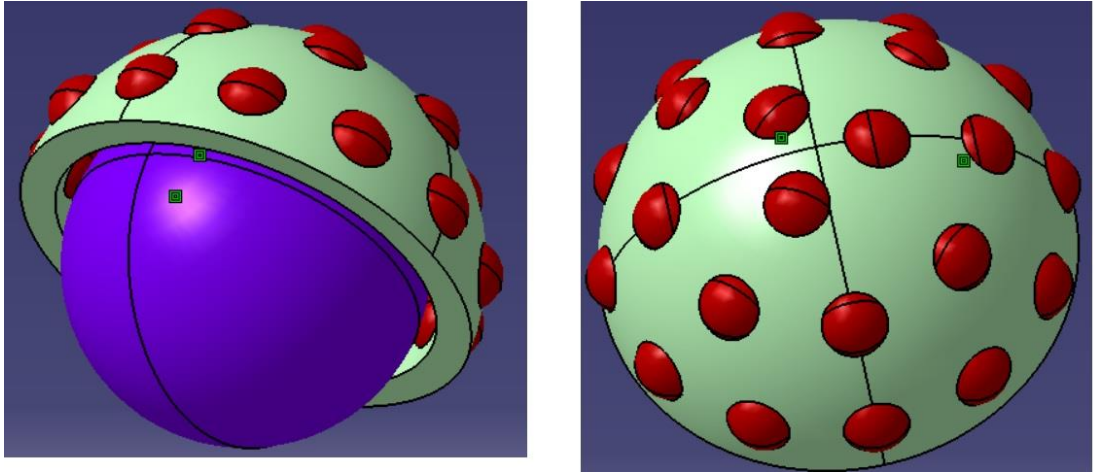
BÖLÜM 3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Materyal

Araştırmada, AL1050 haddelenmiş 0.8 mm kalınlıkta 30 mm x 30 mm genişlikte sac malzeme, şekillendirilmek üzere kullanılmıştır. Sacı şekil vermek üzere kullanılan takımın sap, kapak, setskur ve bilye parçaları 1,2379 takım çeliğinden 60 HRC sertlik değerinde üretilmiştir. Yataklamada kullanılan kafes parçası üç boyutlu yazıcıda MJF(Multi Jet Fusion) tekniğiyle poliamid malzemedan üretilmiştir.

3.1.1. Tasarım

Geliştirilen yeni tasarımın üç boyutlu modeli bilgisayar ortamında CATIA V5R20 yazılımında oluşturulmuştur. Tasarım; kapak, sap, setskur, küçük bilye, büyük bilye ve kafes adı verilen parçalardan meydana gelmektedir.



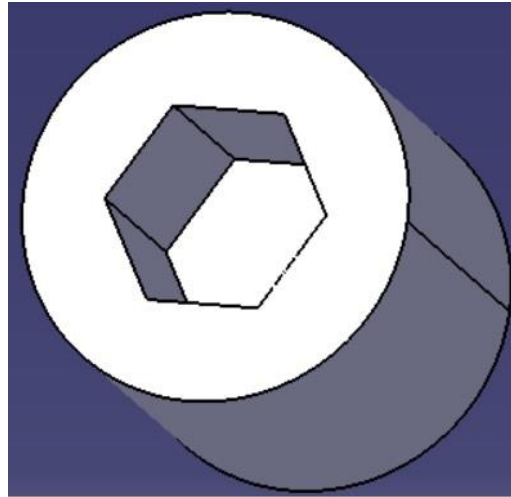
Şekil. 3.1. Şekillendirici Bilye Uç, Kafes ve Yataklama Bilyeleri

Şekillendirmeye sebep olacak olan şekillendirici bilye 10 milimetre çapında ve 1,2379 takım çeliği malzemesinden üretilmiştir. Bilyenin mümkün olduğunca sürtünmesiz hareket edebilmesi için 2 mm çaplı 23 adet yataklama bilyesi, içi boş, 1 mm cidarlı yarım küresel kafes ile takım gövdesine Şekil 3.1'deki haliyle yataklanmıştır.



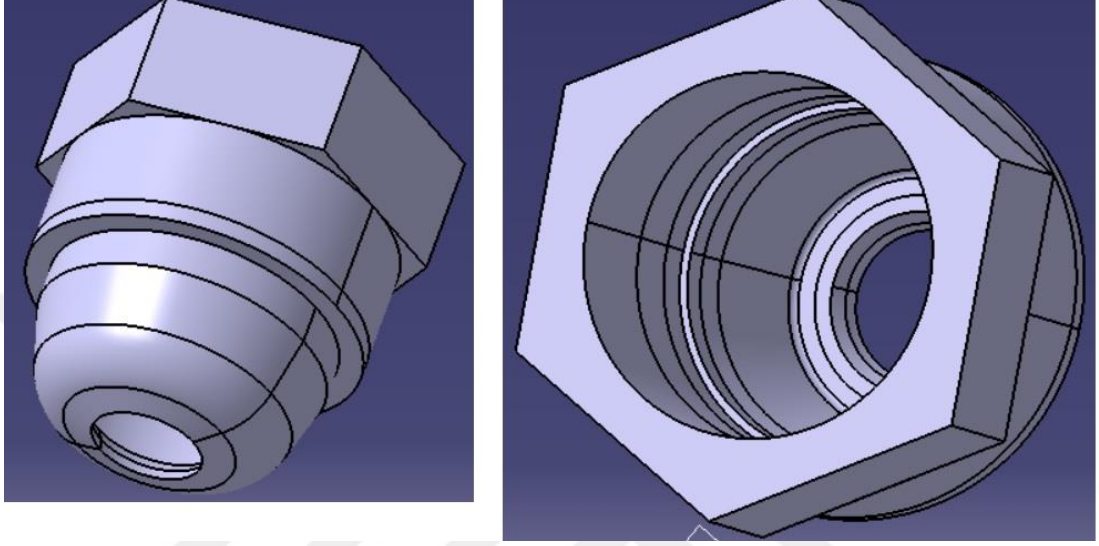
Şekil. 3.2. Şekillendirici Bilye Uç, Kafes ve Yataklama Bilyelerinin Gerçek Montaj Görünümü

Şekil 3.2'de görülmekte olan 2 mm çapındaki küçük bilyeler de takım çeliğinden üretilmiştir. Kafes parçası ise Multi Jet Fusion(MJF) metodu ile, yüksek hassasiyetle üç boyutlu yazıcı kullanılarak "Poliamid" malzemeden imal edilmiştir.



Şekil. 3.3. Yağ Haznesi İçin Setskur

Sap-gövde parçasının iç kısmındaki yağ haznesine üst taraftan sıkılarak kapak vazifesi görmektedir. Alyan başlı, metrik 10 mm standardında ve 10 mm derinlikteki dış diş sayesinde sap parçasına bağlanmaktadır. Şekil 3.3'te setskurun üç boyutlu modeli görülmektedir.



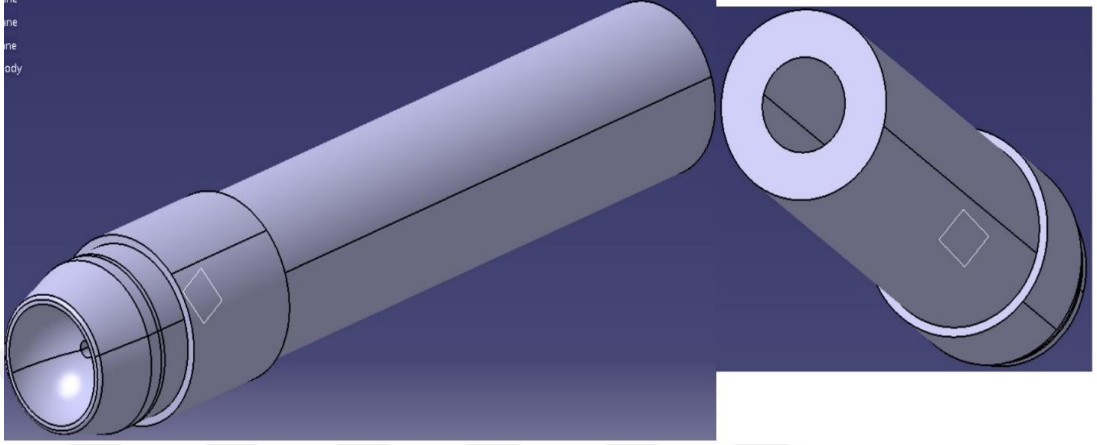
Şekil. 3.4. Tutucu Kapak

İç taraftan sap-gövde parçasına yataklanmış bilyenin dış taraftan da yataklanması ve yerinde kalmasını sağlamak üzere tutucu kapak parçası tasarlanmıştır. Şekil 3.4'te görülen kapak parçası iç kısmında 17 mm derinlikte M22 ölçüde iç diş açılmıştır. Bu dişler aracılığıyla sap-gövde parçasına bağlanmaktadır.



Şekil. 3.5. Tutucu Kapağın Gerçek İmalat Görünümü

Kapak parçasının üst kısmına; 28 mm genişlikte ve 10 mm kalınlıkta anahtar ağızı açılmıştır. Bu sayede parçanın sap-gövde ile sıkı sıkıya bağlanabilmesi sağlanabilmektedir. Şekil 3.5'te kapak parçasının imal edilmiş hali görülmektedir.



Şekil. 3.6. Sap-Gövde

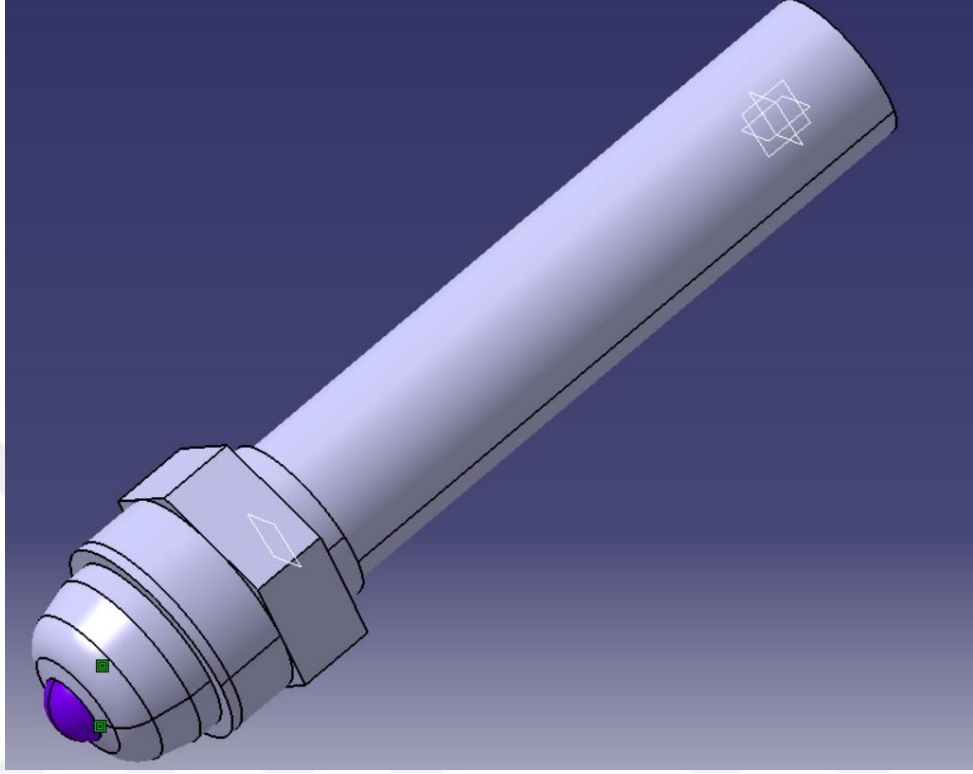
Şekillendirici bilyenin iç taraftan yataklanmasına vesile olmakla birlikte, işlem sırasında bilyelerin yağlanarak sürtünmenin artmasını engellemek üzere, iç kısmında 10 mm çap, 107 mm derinlikte ve matkap uç açısıyla 2 mm delik üzerinden bilye yatağına ulaşan yağ haznesi Şekil 3.6'da görülmektedir..



Şekil. 3.7. Sap-Gövde Parçası İmalat Görünümü

1,2379 takım çeliğinden imal edilmiştir. Alt-dış kısmındaki kademeli yüzeye M22 ölçüde ve 15 mm derinlikte dış diş açılmıştır. Yağ haznesinin üst kısmına ise setskurun sıkılabilmesi için M10 x 10 mm ölçüde iç diş açılmıştır. Şekil 3.7'de imal

edilmiş modeli görülmekte olan sap parçasının CNC Freze tezgahına bağlanacağı üst sap kısmı 20 milimetre dış çapa sahiptir.



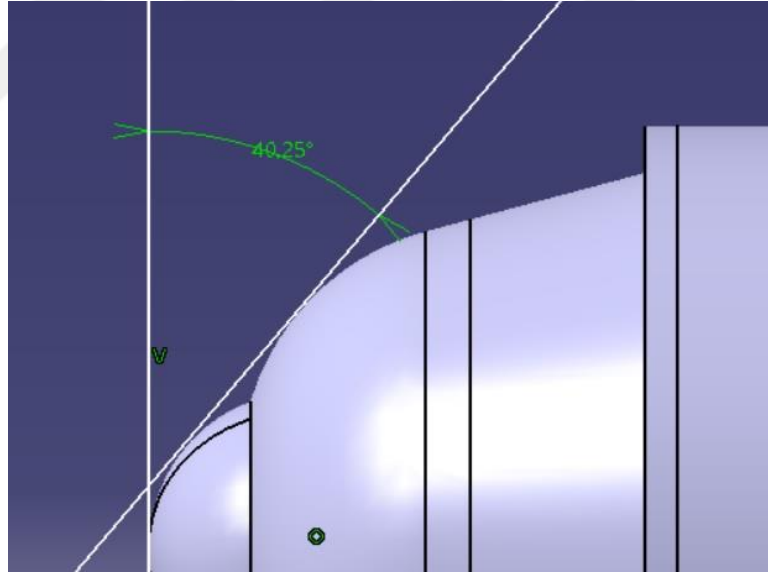
Şekil. 3.8. Yuvarlanan Uçlu Takım Montaj Modeli

Şekil 3.8’de yeni oluşturulan; yuvarlanan uçlu artımlı sac metal şekillendirme takımının montajlanmış CAD modeli görülmektedir. Şekillendirici bilyenin kapak parçasından aşağı doğru 3,5 milimetre dairesel kesiti uzanmaktadır. Literatür araştırmalarında görüldüğü üzere tek nokta artımlı sac şekillendirme prosesi kapsamında artım(batma) derinliğinin artmasının yüzey kalitesini azalttığı ve şekillendirme kabiliyetinin azaldığı bilinmektedir.(Jeswiet, 2009) Buna bağlı olarak genellikle artımlı sac metal şekillendirme prosesinde artım(batma) derinliği; 0,5 milimetre civarlarında ve germe açısı da 40-65° aralığında uygulanmaktadır. Bu sebeple net 40 derece germe açısına sahip olan yapılan yeni tasarım modelinin şekillendirici ucunun; tek nokta artımlı şekillendirme prosesinde kullanılmak üzere yeterli batma derinliğine sahip olduğu söylenebilir.



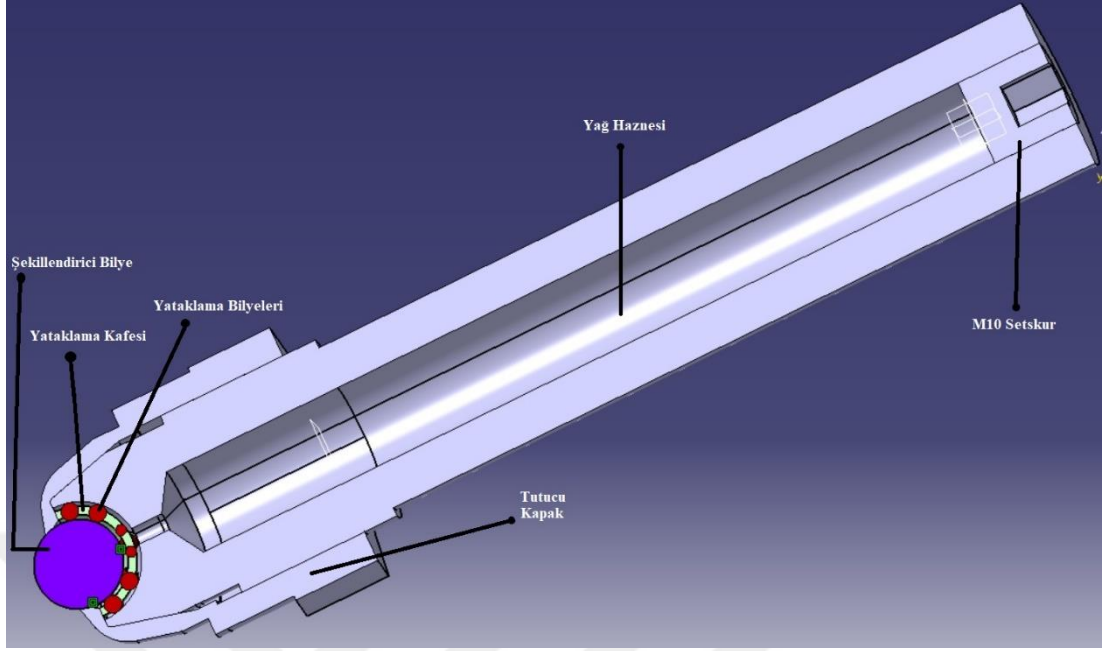
Şekil. 3.9. Yuvarlanan Uçlu Takım Montaj Modelinin İmalat Görünümü

İmal edilen parçaların montajlanmış hali ve yataklama bölgesi Şekil 3.9’da gösterilmektedir. Hem küresel yataklamayı sağlayabilmek hem de kayda değer bir germe açısına ulaşabilmek adına takımın geometrisi 40,25 dereceye kadar germe açılarında şekillendirme yapabilecek geometride tasarlanmıştır.



Şekil 3.10. Yuvarlanan Takım Germe Açısı

Şekil 3.10’da montaj modelinin tam kesit görüntüsü verilmiştir. Burada görüleceği üzere model temel olarak 6 farklı parçadan oluşmaktadır. Sağ üst tarafta sap-gövde parçasının iç kısmındaki yağ haznesine kapaklık görevi yapan imbus setskur bulunmaktadır. Sap-gövde parçası matkap ucu konikliğinden 2 mm çaplı deliğe ulaşmakta olup bu sayede haznesinden yataklama bölgesine yağ ulaştırmaktadır.



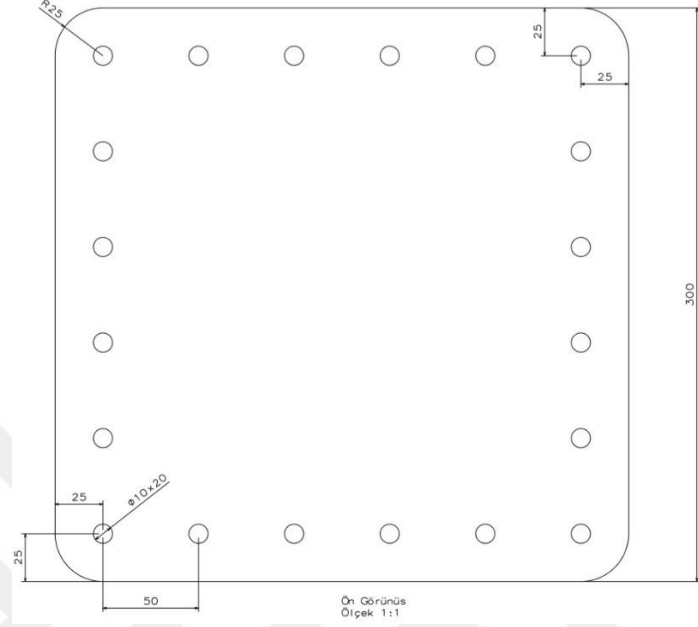
Şekil. 3.11. Yuvarlanan Uçlu Takım Montaj Modelinin Kesit Görünüşü

Yataklama bölgesinde; Şekil 3.11’de görüleceği üzere içerden; sap-gövde parçası, dışardan ise kapak parçası bilezik vazifesi görmektedir. Sürtünmenin minimumda tutulması için şekillendirici bilyelerin kafes parçası üzerindeki dairesel yuvalara oturtulmuş olan 2 mm çaplı küçük bilyeler ile teması sağlanmıştır. Kapak parçası; bilye merkezinden 1,5 milimetre aşağıya kadar uzanmakta olup bilyeye temas ettiği yüzeyde bilyenin çapıyla aynı ölçüdeki kavis ile tasarlanmış ve böylece mümkün olduğunda az sürtünme ile şekillendirici bilyenin yataktan çıkmasını engellemektedir.

3.1.2. Sac Malzeme Özellikleri

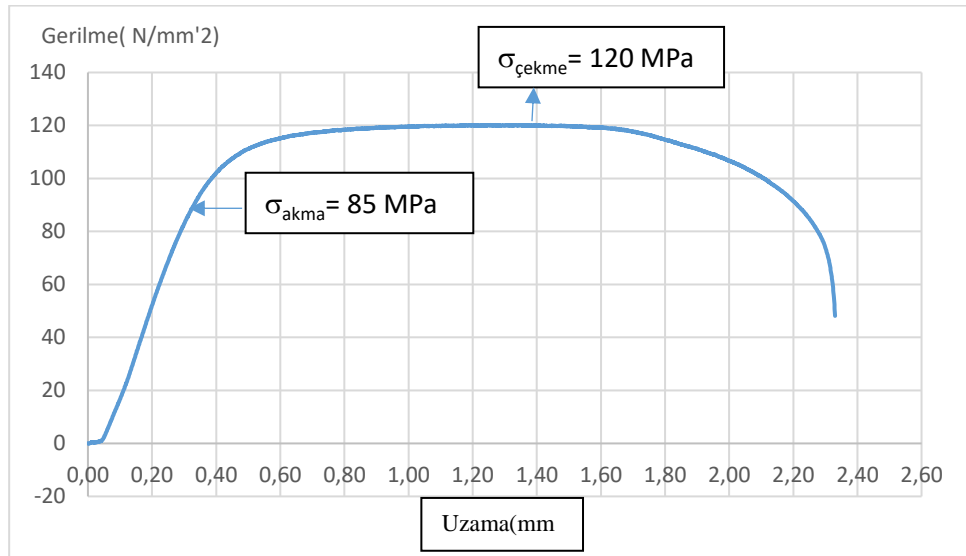
Çalışmada 0,8 mm kalınlıkta EN 10204 standardında üretilmiş AL1050 alaşımı alüminyum sac kullanılmıştır. Artımlı sac şekillendirme işleminde soğuk haddelenmiş, soğuk şekillendirme kabiliyeti yüksek malzemeler kullanılmaktadır. AL1050 sac ise yüksek soğuk şekillendirilebilirliği sebebiyle bu proses çerçevesinde spesifik konularda kullanılan bir malzemedir. Malzeme 2 metreye 1 metre olarak dikdörtgen kalıplar halinde satılmaktadır. Bu boyutlarda standart 1 kalıp sac satın

alınıp kullanılacak olan tutucu kalıp boyutlarına uygun olarak Şekil 3.12’de görüleceği ölçüler ile lazer kesim ile kestirilmiştir.



Şekil. 3.12. Sac Teknik Resmi

Şekil 3.13’te şekillendirilen sacın yapılan çekme deneyi sonucunda elde edilen gerilme-gerinim grafiği gösterilmektedir. Bu veriler aynı zamanda bilgisayar destekli nümerik çalışmalarda plastisite değerlerine girdi olarak kullanılmaktadır.



Şekil 3.13. Deneysel Çalışmada Kullanılan AL1050 Sacın Gerilme-Gerinim Grafiği

Artımlı sac metal şekillendirme deneysel çalışmalarında kullanılacak olan alüminyum saclar kestirilirken fazlalık sacdan da çekme deneyi yaparak mekanik özelliklerin öğrenilmesi için çekme numuneleri kestirilmiştir. Bu numuneler çekme cihazına bağlanıp dakikada bir milimetre hız ile çekme uygulanarak Şekil 3.13'deki grafik ve karşılık gelen sayısal değerler elde edilmiştir. Deney üç farklı sefer tekrarlanmış olup sonuçlarda çıkan değerlerin hepsi birbirine yakın olduğu için bunlardan bir tanesi; doğru kabul edilerek nümerik analiz için yazılıma girdi olarak kullanılmak üzere seçilmiştir.

3.2. Yöntem

3.2.1. Kullanılan Araç ve Gereçler

Çalışmada kullanılan başlıca ekipmanlar, HAAS 3 eksenli CNC freze tezgahı, MOTUL yağlayıcı, CATIA V5R20 üç boyutlu modelleme yazılımı, ASUS GL502VS dizüstü bilgisayar, SIMULIA ABAQUS 6.14-1 analiz yazılımı, Mahr yüzey pürüzlülüğü ölçme cihazı ve Mitutoyo dijital komparatör cihazlarıdır.

3.2.2. Deneysel Çalışmaların Uygulanma Metodu

Artımlı sac metal şekillendirme prosesinde kullanılmak üzere yeni bir tasarım ile oluşturulan takım parçaları öncelikle CNC torna ile üretim yapan bir imalatçıda imal ettirilmiş ve daha sonra ısıl işleme gönderilmiştir. Isıl işlem sonrası temin edilen takım parçaları birbirine montajlanarak deneye hazır hale getirilmiştir.

Deneyde kullanılacak sac olarak şekillendirilebilirliği yüksek olan A11050 alüminyum sac 0.8 mm kalınlıkta ve 2 metreye 1 metre boyutlarda satın alınarak Şekil 3.7'deki teknik resimde görüldüğü ölçülerde, lazer kesim tezgahında kestirilerek deneye hazır hale getirilmiştir.

Tutucu olarak ise şekil 3.14'teki, daha önceden bu konuda yapılmış bir çalışma için üretilen iki adet metal plaka kullanılmıştır. Bağlama elemanı olarak freze tablasına

M12x14x160 ölçülerde 2 adet ayaklı saplama ve bu ölçülere uygun iki adet düz pabuç kullanılmıştır. Pabuçların yataya paralel durabilmesi için metal plakalar ile alttan destek sağlanmıştır.



Şekil 3.14. Sacın Tutturulup Tezgaha Sabitlendiği Tutucu

Deneyler 9 farklı metot ve 2 farklı takımla uygulanmak üzere toplam 18 adet gerçekleştirilmiştir. Bu metotlar ; 30,35 ve 40 derece germe açılarında; 0,25mm, 0,50 mm ve 0,75 mm artım adım büyüklüklerinde olmak üzere hem yuvarlanan takım hem de yekpare takım ile gerçekleştirilmiştir.



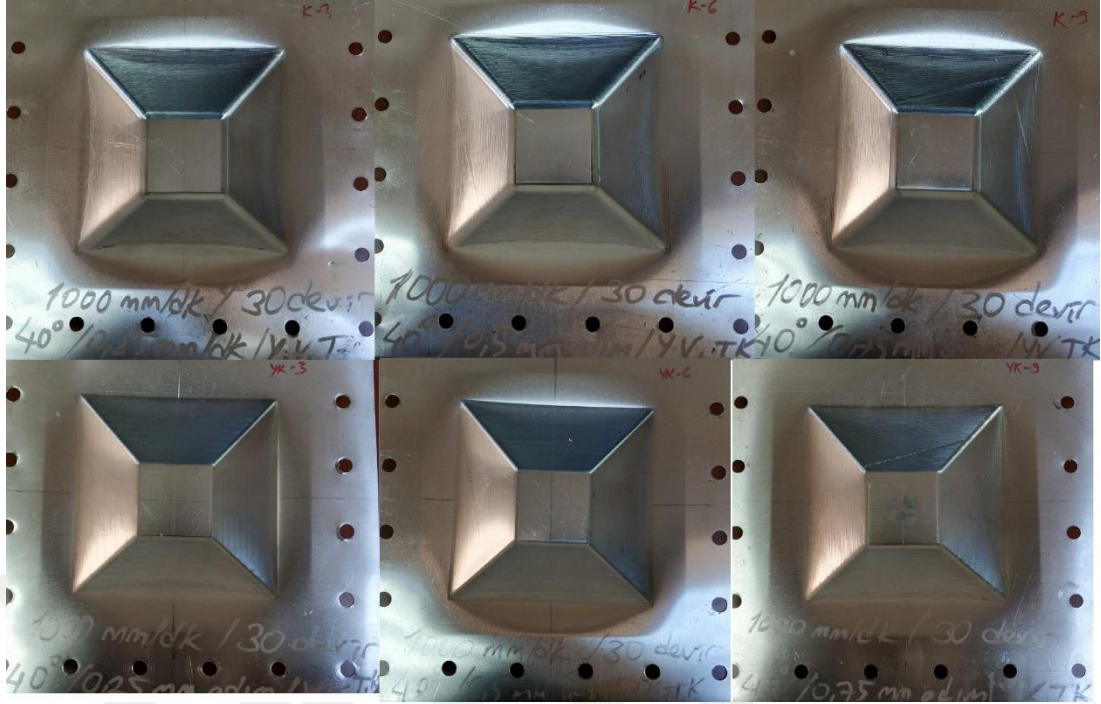
Şekil 3.15. Yuvarlanan Uçlu Takım ile Tek Nokta Şekillendirme Çalışması

İmal edilen takım iç bölgesindeki yağ haznesine yağlayıcı akışkan doldurulduktan sonra takım tezgâha bağlanmıştır. Tezgâha yüklenen takım yolu programı seçilip tezgah sacın tam orta noktasına göre sıfırlandıktan sonra seçili program çalıştırılmıştır. Yağlayıcı akışkan aynı zamanda Şekil 3.15'te görüldüğü gibi sacın üzerinde takımın ilerleyeceği güzergaha da bir miktar sürülerek yağ filmi oluşturulmuş olup, sürtünmenin düşük tutulması sağlanmıştır. İç haznedeki yağ özellikle yataklamadaki küçük bilyelerin yağlanmasında önemli etkiye sahiptir. Şekillendirme sonucu sac tutucudan çıkarılıp aseton ile temizlenerek diğer şekillendirmeye geçilmiştir. Bu şekilde 3 farklı açı ve 3 farklı adım olmak üzere aynı takımla 9 farklı işlem tamamlanmıştır.



Şekil 3.16. Yekpare Takım ile Tek Nokta Şekillendirme Çalışması

Şekil 3.16’te görülen yekpare artımlı şekillendirme takımı da diğer takım ile aynı malzemeden(1,2379 Takım Çeliği, 60 HRC Sertlik), aynı çap ve boyda; genel anlamda benzer geometride tasarlanıp imal ettirilmiştir. Burada takım üzerinde bir hazne olmadığı için sadece sac üzerine takımın ilerleyeceği güzergaha yağ filmi kaplanmıştır. Yuvarlanan uçlu takım ile yapılan aynı çalışmalar karşılaştırma yapılacak olan yekpare takım ile de, aynı parametreler dahilinde gerçekleştirilmiştir. İşlem sonunda saclar sökülüp temizlenmiştir.



Şekil 3.17. Yuvarlanan Uçla ve Yekpare Takımla Yapılan Deneysel Çalışmalar

Yuvarlanan uçlu takım ve yekpare takım ile sırasıyla; 0,25, 0,5 ve 0,75 milimetre artım adımı büyüklüklerinde ve 40 derece germe açısıyla yapılan şekillendirmeler, Şekil 3.17’de örnek olarak gösterilmiştir. Üst sıradaki çalışmalar yuvarlanan uçlu takım ile alt sıradakiler ise yekpare takım ile yapılan çalışmaların görüntüleridir.

Tüm deneylerde takım; 1000 mm/dk ilerleme hızı ve sembolik olarak 30 devir/dk devir tanımlanarak toplam derinlik 40 milimetre olacak şekilde deneyler tamamlanmıştır. Bu deneyler sonucunda sacların yüzey pürüzlülükleri; Şekil 3.18’deki Mahr pürüzlülük ölçüm cihazı kullanılarak, iç ve dış şekillendirilen yüzeylerden üçer ölçüm alınarak hem ortalama hem de maksimum yüzey pürüzlülük değerleri olarak elde edilmiştir.



Şekil 3.18. İç ve Dış Yüzey Pürüzlülük Ölçümü

Bunun dışında; dijital komparatörün destek kollarına bağlanması ile Şekil 3.18’te görülen ölçüm düzeneği hazırlanmıştır. Sacın en orta noktasından başlamak üzere beşer milimetre aralıklarla, şekillendirmenin bittiği flanş noktasına kadar markalama yapılmıştır. En ortadaki sıfır noktasından başlamak üzere her bir marka noktasında komparatör düzeneği ile ölçümler yapılmış olup sac bu noktalarda çeşitli yönlerde hareket ettirilerek her marka noktasındaki ölçülen en düşük kalınlık değeri kaydedilmiştir.



Şekil 3.19. Dijital Komparatör Düzeneği ile Kalınlık Ölçümü

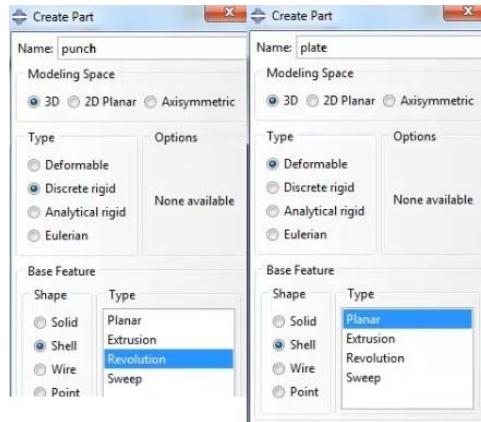
3.2.3. Bilgisayar Destekli Modelleme ve Analiz

Tablo 1.1. Analiz Parametreleri

Analiz Parametreleri	Değerler
Yazılım	SIMULIA ABAQUS 6.14-1
Eleman Türü	Kabul Eleman - 0,8 milimetre kalınlık
Eleman Sayısı	1600
Eleman Entegrasyonu	Tam
Sürtünme Tipi	Coulomb:0,02-0,1(Yuvarlanan-Yekpare)
Malzeme	AL1050 Alüminyum Sac 200 x 200 mm
Malzeme Modeli	Elastoplastik İzotropik Malzeme Modeli
Zaman Entegrasyonu	Açık(Explicit)
Donanım Özellikleri	Asus GL502-VS Intel i7-7700HQ İşlemcili Bilgisayar 16 GB Ram

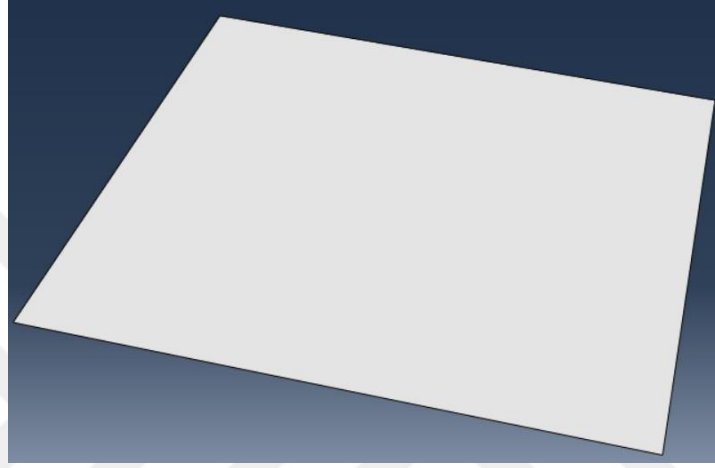
3.2.3.1. Takım ve Sacın Modellenmesi

Takım veya zımba olarak adlandırabileceğimiz şekillendirici uç modellenirken; modeli ve dolayısıyla analizleri basitleştirmek, çözüm süresini azaltmak amacıyla rijit cisim ve temel özellik olarak da kabuk yapıda(shell) tanımlanarak parça oluşturulmuştur. Şekil 3.20’de verildiği gibi aynı şekilde sac parça da modellenirken kabuk model kullanılmıştır. Ancak burada sacın deformasyonu asıl görülmek istenen husus olduğu için sac, biçim değiştirebilir olarak tanımlanmıştır.



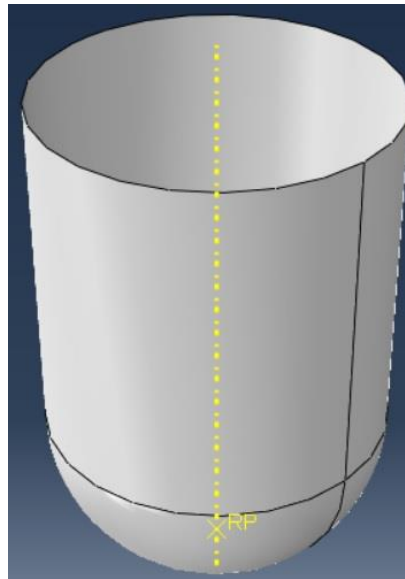
Şekil 3.20. Takım ve Sacın Modellenmesi

Deneysel çalışmadaki sac ve takım ABAQUS bilgisayar destekli mühendislik yazılımında üç boyutlu modellenirken; sac, deneysel çalışmadaki tutucunun iç kısmında kalan 200 mm x 200 mm x 0,8 mm lsnde Şekil 3.21'deki Őekliyle modellenmiştir.



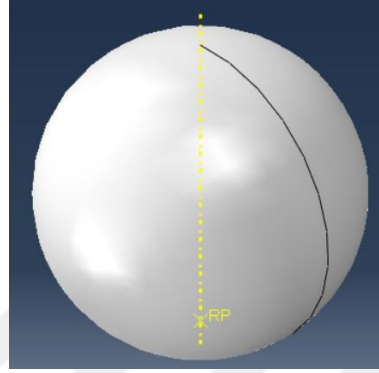
Şekil 3.21. Sacın  Boyutlu Modeli

Yekpare takım ise; uc noktası yarım küre başlı olmak üzere, 10 mm u çaplı olarak 15 mm toplam boyda modellenmiş olup Şekil 3.22'te gösterilmektedir.



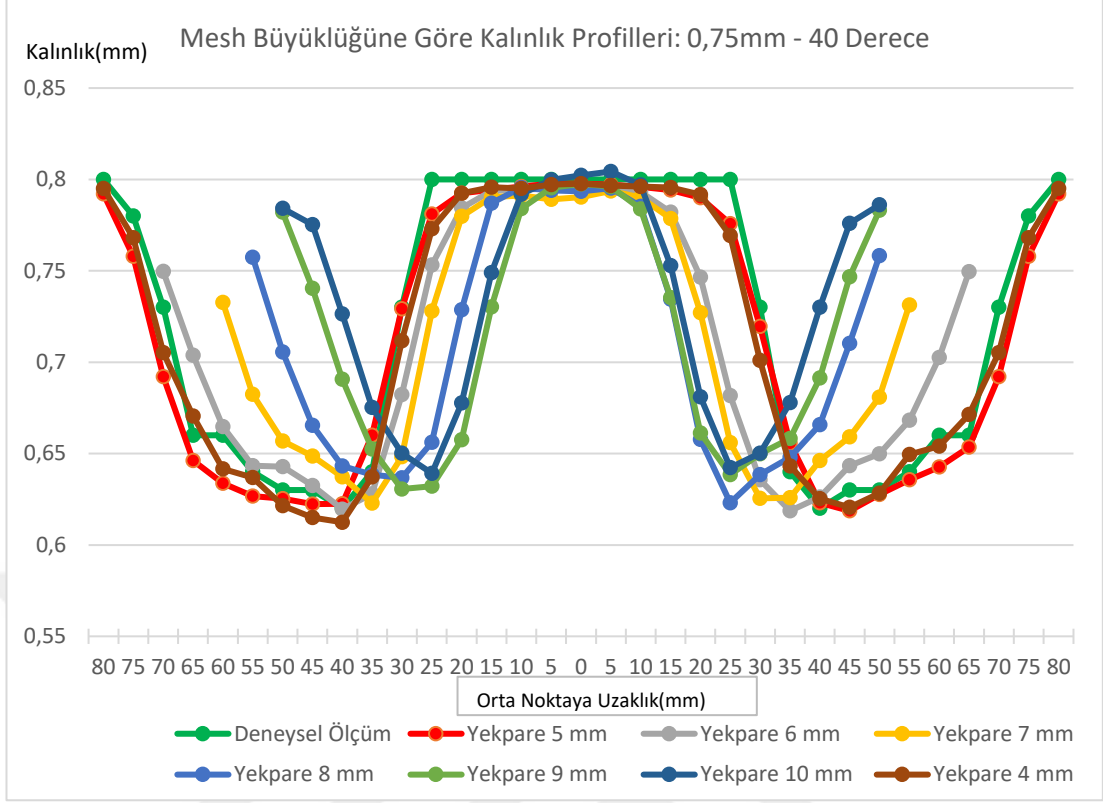
Şekil 3.22. Yekpare Takım  Boyutlu Modeli

Bilgisayar destekli analizde çözümün kolaylaştırılması için bazı kabul veya ihmaller yapılmaktadır. Bu çalışmada da; yuvarlanan takım, 10 mm çapta küre olarak Şekil 3.23'te görüldüğü gibi modellenmiştir ve takım rijit olarak tanımlanmıştır. Dolayısıyla diğer aksamın yazılım ortamına getirilip tek tek modellenmesine gerek kalmamış olup, model daha basit ve çözülebilir bir şekle kavuşmuştur.



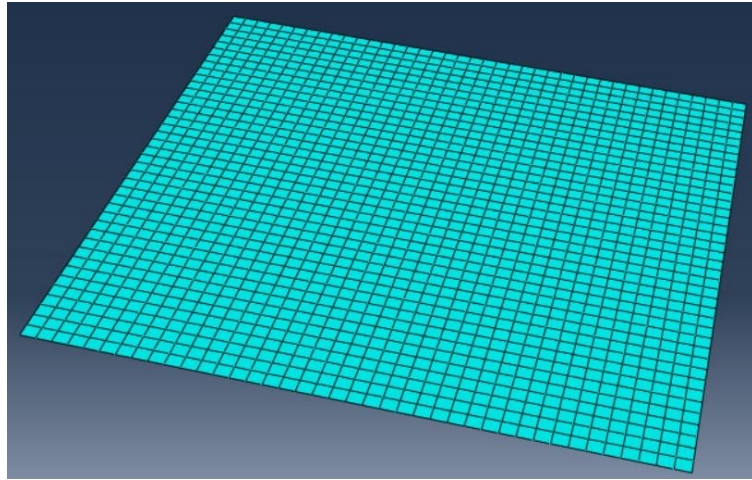
Şekil 3.23. Yuvarlanan Takımı Temsil Eden Şekillendirici Bilye

Sac modelinin mesh(ağ) yapısı farklı büyüklüklerde denenmiş olup hem deneysel çalışmalara oldukça yakın sonuç verdiği görüldüğünden hem de daha ileri seviye ağ yapılarının çözüm süresini ciddi seviyelere çıkarmasını göz önüne alarak makul bir ağ yapısı birim büyüklüğü belirlemek gerekmektedir. Şekil 3.24'te 4 milimetreden 10 milimetreye kadar birer milimetre farklı ağ yapısı büyüklükleri ve deneysel çalışma sonucu ölçülen gerçek değerlere göre sacın kalınlık profilleri görülmektedir. Buna bakıldığında 5 milimetre ağ yapısı birim büyüklüğü gerçeğe maksimum %3 fark ile oldukça yakın analiz sonuçları vermekte olduğu görülmektedir. 4 milimetre ağ yapısı ile analiz yapıldığında 5 milimetre ile olanla hemen hemen %1'lik bir fark gözükmemektedir. Ancak 4 milimetrelik analiz ile çözüm süresi 5 milimetreye göre 2,25 kat fazla sürmekte olup ciddi bir doğruluk farkı görülmemiştir. Bu sebeple optimum ağ yapısı birim büyüklüğü 5 milimetre kabul edilmiştir. Tüm bilgisayar destekli nümerik analizlerde bu büyüklük saclara tanımlanmış ve analizler yapılmıştır.



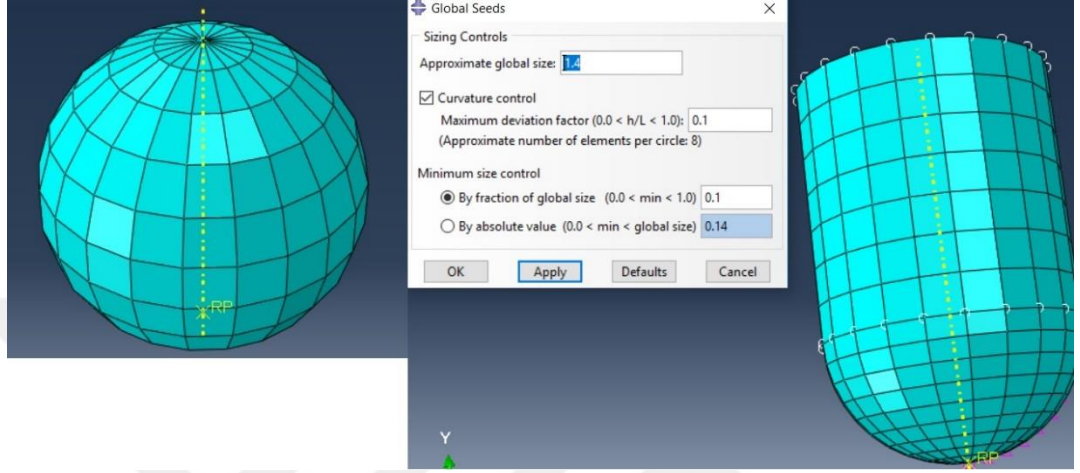
Şekil 3.24. Farklı Büyüklüklerde Ağ Yapılarına Göre Kalınlık Profilleri

Ağ yapısı tipi olarak kabuk(shell) modellerde ve düzgün geometrilerde genellikle kullanılan dörtgen ağ yapısı atanmıştır. Şekil 3.25'e bakıldığında bu yapının her köşe noktasında, düğüm denilen noktalar yazılım tarafından tanımlanarak her bir düğüm noktasında, tanımlanan etkiye göre hesaplar yapıp diğer düğümlerdeki hesaplarla beraber tüm parçada meydana gelen durumlar birleştirilerek analiz edilir.



Şekil 3.25. Sacın Ağ Yapılarının Tanımlanması (Mesh)

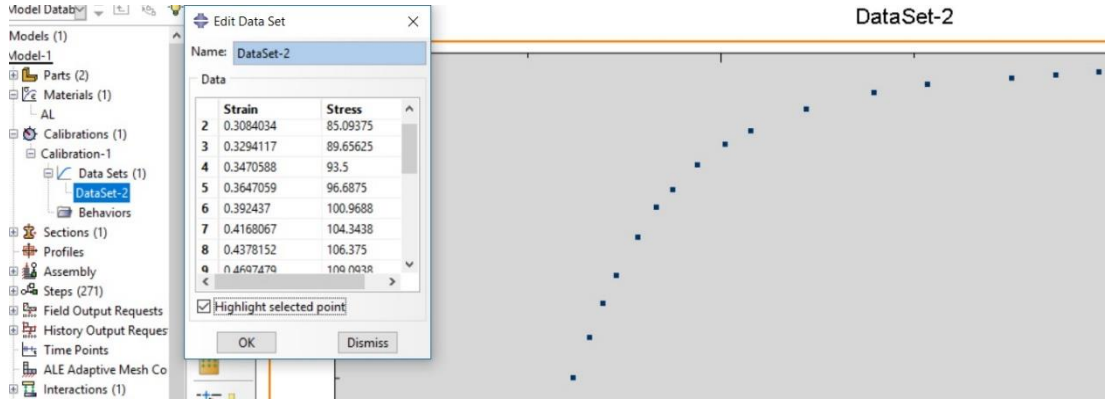
Takım modelinde ise eğrisel bir geometri olduğu ve deneysel ölçüme uygun sonuç alındığı için programın tanımladığı 1,4 milimetre ortalama büyüklük değiştirilmeden Şekil 3.26'daki haliyle uygulanmıştır. Her bir analizde; deneysel çalışmada olduğu gibi takıma, dakikada 30 devir açısal hız (3,14 rad/s) tanımlanmıştır.



Şekil 3.26. Takımların Ağ Yapılarının Tanımlanması

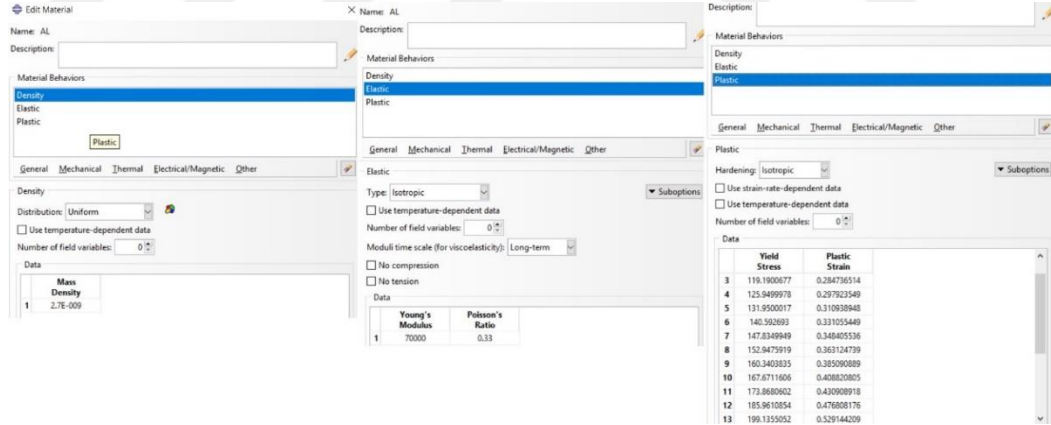
3.2.3.2. Malzemenin Tanımlanması

Çekme deneyi ile elde edilen değerler doğrudan bilgisayar yazılımında kullanılmamaktadır. Çekme deneyinden elde edilen veriler; Mühendislik Gerilmesi-Gerinimi değerleri olarak kabul edilmektedir. Bunların bir yazılımsal kalibrasyon ile dönüştürüldüğü değerlere ise Gerçek Gerilme-Gerinim denmektedir. Bilgisayar destekli modellemede, çekme deneyinden elde edilen veriler kalibrasyon arayüzü ile gerçek değerlere dönüştürülerek plastisite özelliklerine veri olarak girilir. Zaten mühendislik gerilmesi ve gerçek gerilme vb. gibi değer farklılaşması akma noktasından itibaren oluşmaktadır.



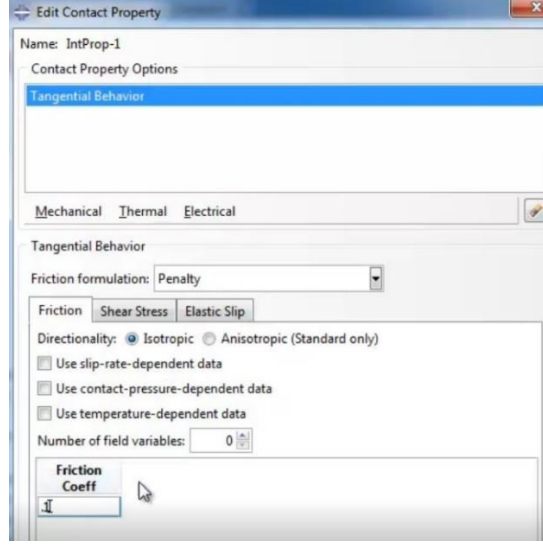
Şekil 3.27. Alüminyum Sacın Çekme Değerlerinin Yazılımda Kalibrasyonu

Şekil 3.27’de çekme deneyinden elde edilen gerilme-gerinim değerlerinin yazılımdaki kalibrasyon arayüzü ile analizde kullanılacak gerçek değerlere dönüştürülmesi görülmektedir. Bu dönüşümle elde edilen gerçek değerler. Malzeme özellikleri altındaki plastik özellikler kısmına kaydedilir. Bunun dışında alüminyum sacın yoğunluğu ve Young Modülü değerleri de aynı pencereden girilerek malzeme tanımlanmış olur.



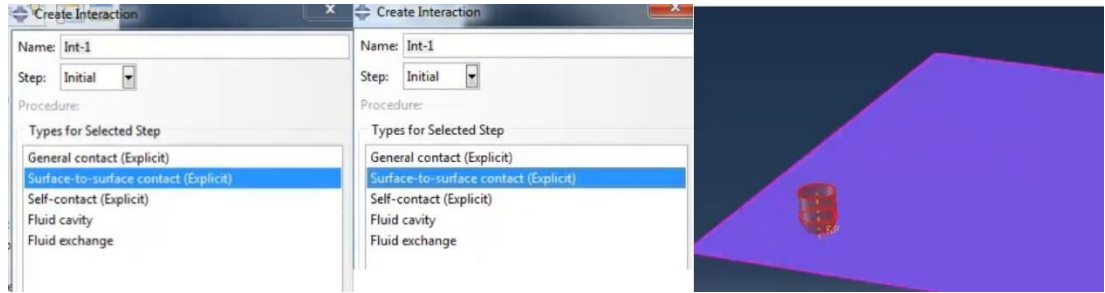
Şekil 3.28. Sac Malzemesinin Mekanik Özelliklerin Tanımlanması

A11050 alüminyum sacın soğuk şekillendirme işlemlerinde Coulomb sürtünmesi değeri 0,08-0,12 değerleri aralığında kabul edilmektedir.(Karalı, 2007) Bu çalışmada da yekpare takım için Coulomb sürtünmesi ortalama değer alınarak 0.1 olarak Şekil 3.28’de olduğu gibi temas özelliğinde tanımlanmıştır.



Şekil 3.29. Takım ile Sac Arasındaki Temas Özelliği ve Sürtünme Tanımlanması

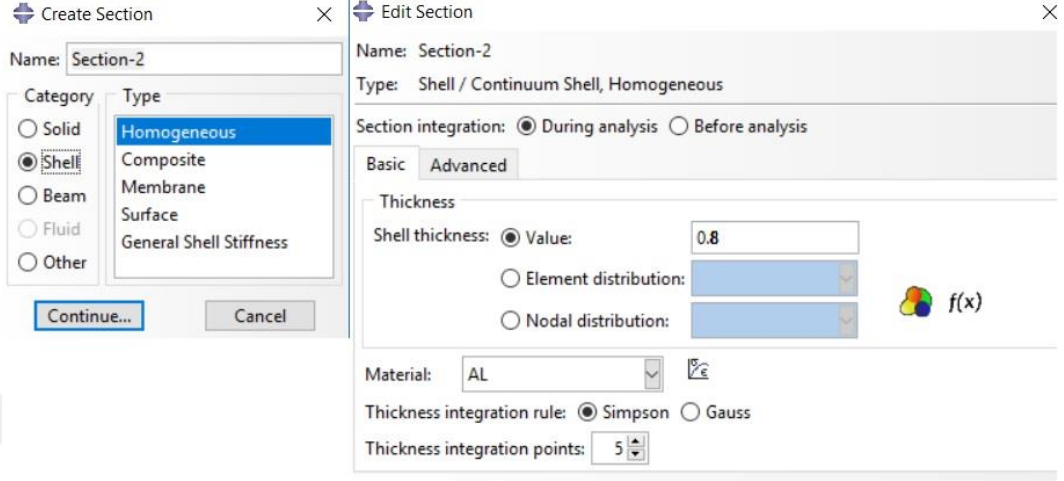
Takım ile sac arasında teğetsel bir temas olduğu düşünülerek temas özelliği; teğetsel davranış olarak belirlenmiştir. Yuvarlanan takım için ise temas tipi aynı şekilde teğetsel davranış olarak tanımlanmış olup, yuvarlanma ve yağlamanın etkisiyle sürtünmenin oldukça düşük bir değerde oluşması beklendiği için Coulomb sürtünmesi 0,02 değerinde kabul edilerek Şekil 3.29'daki pencereden temas özelliklerine girilmiştir.



Şekil 3.30. Temas Yüzeyleri ve Tipinin Tanımlanması

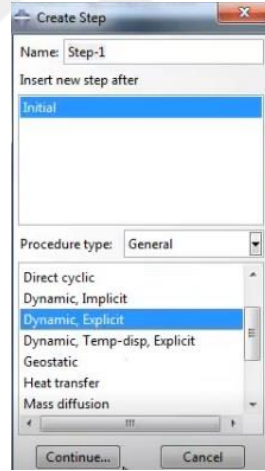
Sacın ve takımın dış yüzeyleri seçilerek yüzeysel temas etkileşimi Şekil 3.30'da görüldüğü üzere seçilmiştir. Sacın malzeme davranışı elastoplastik, izotropik olarak tanımlanmıştır. Elastoplastiklik malzemenin yer yer elastik, akma noktası aşıldığında ise kalıcı şekil değiştirebildiğini ifade etmektedir. Zaten bu mekanik özellik malzemenin gerilme-gerinim değerleri ile malzeme tanımlarken belirlenmiş idi. İzotropi ise malzemenin her noktasının aynı mekanik özelliklere sahip olduğunu

ifade eder. Aynı şekilde sac kesiti tanımlanırken homojen seçeneğinin seçilmesi de bu özellik ile denk düşmektedir. Kesitin tanımlanması Şekil 3.31’de gösterilmiştir.



Şekil 3.31. Sac Kesiti ve Kalınlığının Belirlenmesi

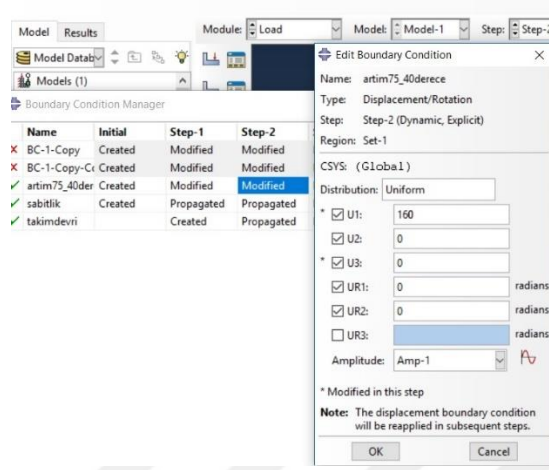
3.2.3.3. Adımların ve Ağ Yağısının Tanımlanması



Şekil 3.32. Hareket Adımlarının Oluşturulması

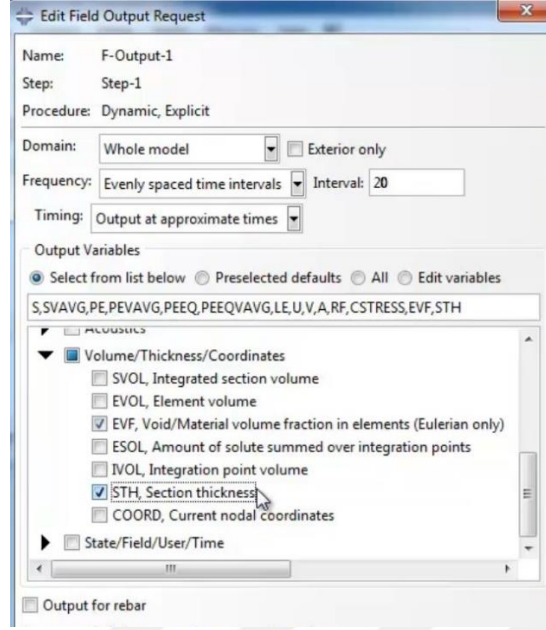
Şekillendirmenin oluşması için bir hareket tanımlanması gerekmektedir. Bunun sağlanabilmesi için Şekil 3.32’de görüldüğü üzere adımlar oluşturulur. Bu esnada prosesin matematiksel temelinden bahsedilen bölümde belirtildiği üzere bu tip bir hareket ve kalıcı şekil değişiminin gözleneceği problemlerde adımın dinamik ve açık(explicit) olarak seçilip tanımlanması gerekmektedir. Bu çalışmada tüm saclar 40

mm derinliğe kadar şekillendirilmiş olacağı için adımlar da tanımlanırken son adımın bu derinliğe ulaşacağı şekilde artımlar kademeli olarak girilmiştir.



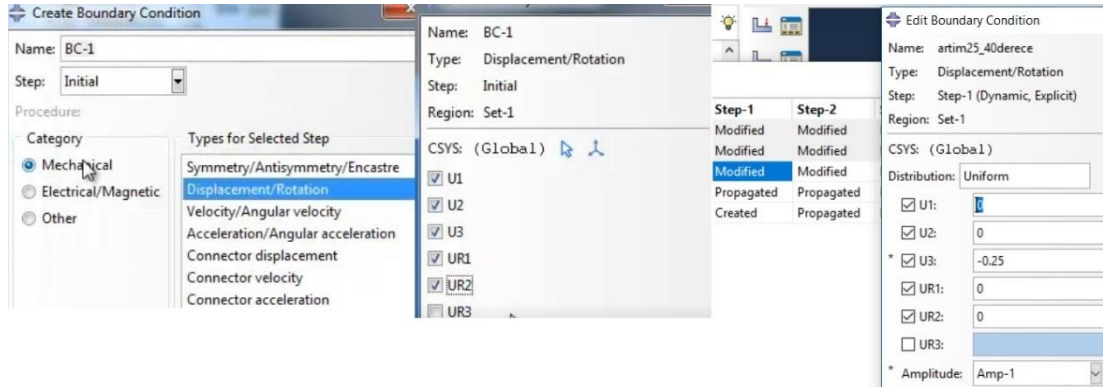
Şekil 3.33. Hareket Adımları Girişleri

Oluşturulacak olan geometri literatürde kesik piramit (frustum pyramid) olarak geçen geometridir. Kare şeklinde bir profilin içe ve aşağı yönlü artım yaparak istenen biçim oluşturulur. Bu biçimi oluşturmak üzere sacın şekillenmiş hali üç boyutlu modellenmiş ve bu model bilgisayar destekli imalat yazılımına aktarılarak burada istenen geometriyi oluşturmayı sağlayacak olan takım yolları çıkarılmıştır. Takım yolu oluştururken, artım derinliği üç farklı kademede olmak üzere sırasıyla; 0,25, 0,5, 0,75 milimetre derinlik artımı ve 1000 mm/dk ilerleme hızı tanımlanmıştır. Çıkarılan bu takım yolları deneysel çalışmada kullanılmakla birlikte aynı zamanda bilgisayar ortamındaki simülasyonun oluşturulması için gerekli hareket adımlarında, hareket koordinatları olarak kullanılmıştır. Her bir pas; dört adet doğrusal takım hareketi ve bir adet batma olmak üzere beşer adımdan oluşmaktadır. Bu sebeple, örneğin; 0,5 milimetre artım derinliğinde toplam 40 milimetre derinliğe inilecek çalışma için $5 \times 40 / 0,5 = 400$ adet hareket adımı tanımlanması gerekmiştir. Bu hareket adımları da mutlak koordinata göre değil, birbiri üzerine eklemeli veya artımlı şekilde Şekil 3.33’de gösterildiği gibi bilgisayara girilmektedir.



Şekil 3.34. Analiz Sonucunda Görüntülenmek İstene Parametrelerin Seçimi

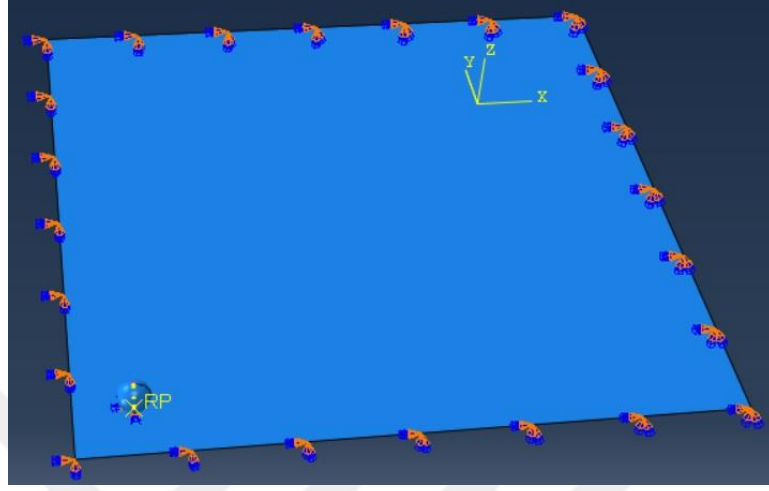
Analiz sonucunda görülmek istenen veriler ve adımın zaman aralıklarına bölünmesi için çıktı penceresinden giriş ve seçimler Şekil 3.34'te görülen pencereden yapılmıştır.



Şekil 3.35. Sınır Şartlarının Tanımlanması

Bilgisayar ortamında analizler yapılırken yapılmak istenen işin girdileri ve kısıtları ayrı ayrı tanımlanır. Bu çalışmada takımın düzlemsel hareketi bir sınır şartıdır ve x,y ve z eksenlerinde doğrusal hareket serbestliği Şekil 3.35'teki pencerelerden bu aşamada belirtilmiştir. Bunun dışında sacın tutucu ile kenarlarından tutulmasını

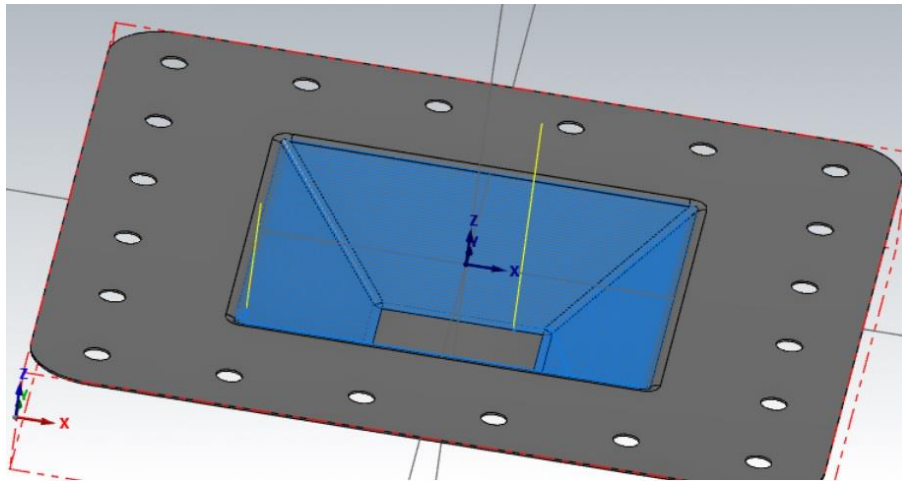
temsil eden sabitlik sınır şartı ayrıca tanımlanmış ve sınır olarak 4 kenar birden seçilmiştir.



Şekil 3.36 Sabitleme Sınırları

Şekil 3.36’de görülen RP parametresi; referans noktası anlamına gelmektedir. Tanımlanan hareket adımları, takımın ucunu ifade eden bu noktanın hareketini temsil etmektedir.

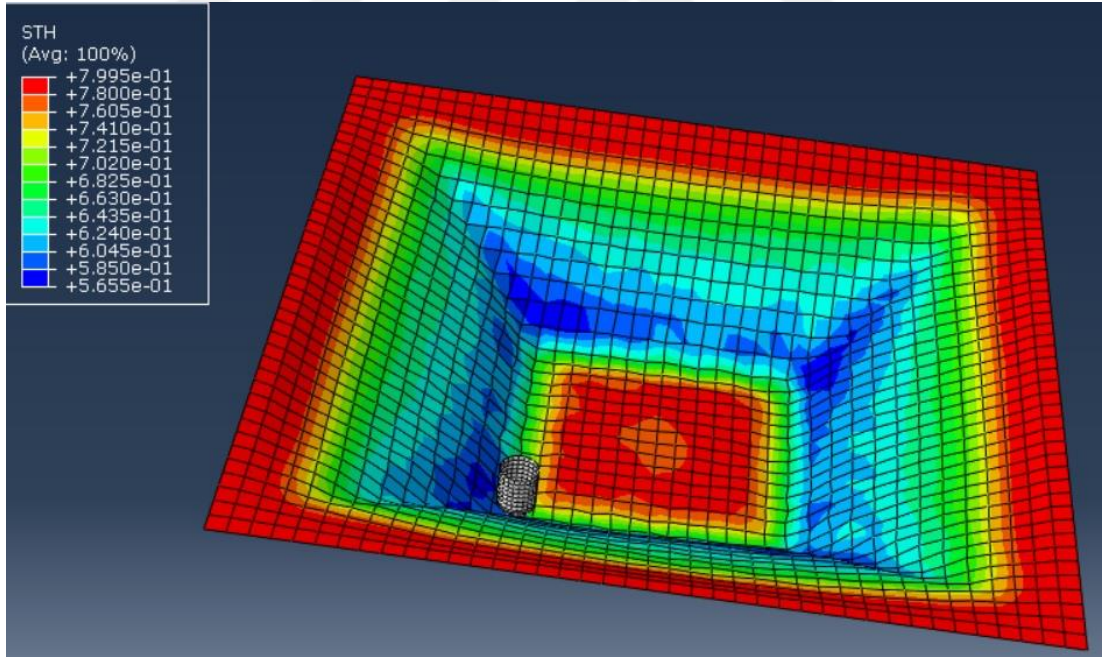
Takımın deneysel çalışmada 30 devir/dakika hızla dönmesi de üçüncü bir sınır şartı olarak yazılıma tanıtılmıştır. Bunun için dik eksen etrafında takıma 3,14 rad/s dönme şartı atanmıştır.



Şekil 3.37 Artımlı Şekillendirme İçin CAM Programında Takım Yollarının Oluşturulması

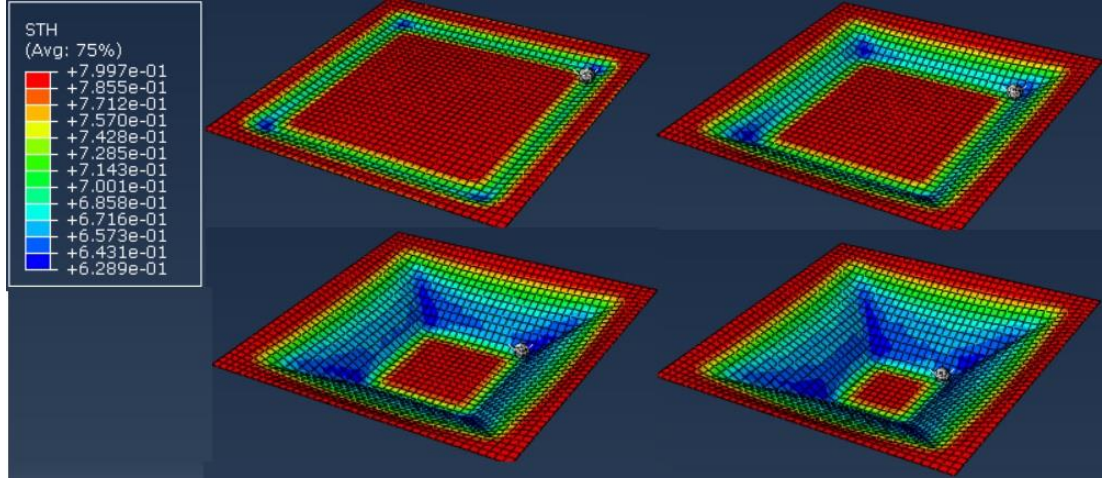
Tek nokta artımlı şekillendirme prosesi kapsamında işlenecek sac metal; 30, 35, 40 derece germe açıları olmak üzere her bir açı için, CATIA üç boyutlu modelleme programında modellendikten sonra, dosya bilgisayar destekli imalat programına aktarılmıştır. Burada takımın yapması istenen artım adımları ve düzlemsel hareket, üç farklı adım ve üç farklı açı için olmak üzere, 9 ayrı takım yolu Şekil 3.37’de görüldüğü gibi oluşturulmuştur. Köşe ve dönme kenarı noktalarına da takım yarıçapı kadar, yani 5 mm kavis tanımlanmıştır. Takımın her bir çalışmada 40 milimetre derinliğe kadar inerek işin tamamlanması hedeflenmiştir. Çıkarılan bu takım yolları bir disket aracılığıyla üç eksenli CNC freze tezgahına yüklenmiştir. Aynı zamanda bu takım yollarının koordinatları ABAQUS yazılımında hareket adımlarını tanımlarken girdi olarak kullanılmıştır.

3.2.3.4. Analiz Sonuçlarının Elde Edilmesi



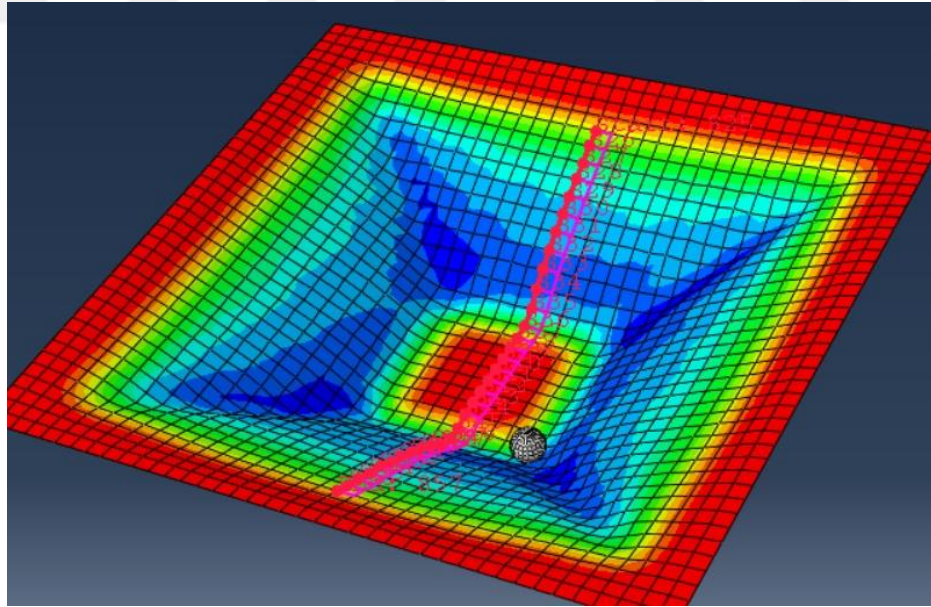
Şekil 3.38 Yekpare Takım ile Şekillendirme Simülasyonu

Yekpare takım ile ABAQUS yazılımında 0,75 milimetre artım adımı büyüklüğü ve 40 derece germe açısında yapılan şekillendirmenin simülasyonu sonucunda kalınlık değişimleri Şekil 3.38’da görülmektedir.



Şekil 3.39. Yuvarlanan Uçlu Takım ile Şekillendirme Simülasyonu

Yuvarlanan uçlu artımlı sac şekillendirme takımıyla ABAQUS yazılımında yapılan 0,75 milimetre artım adım büyüklüğü ve 35 derece germe açısında şekillendirme simülasyonu süresince, aşama aşama sacın şekillendirme süreci ve kalınlık değerleri Şekil 3.39’da görülmektedir. Özellikle eğik yüzeylerin tabana yakın yüzeylerinde en yüksek incelmelerin meydana geldiği anlaşılmaktadır.



Şekil 3.40. Analiz Sonucunda Kalınlık Profili Çıkarılışı

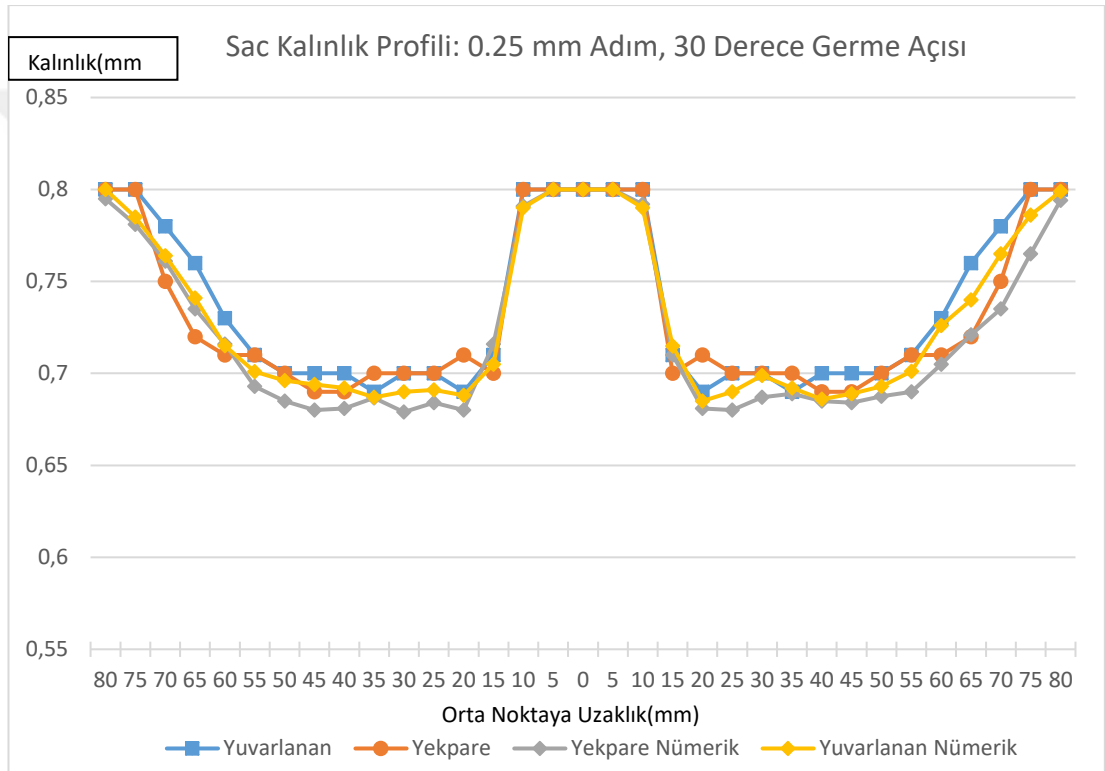
Analiz tamamlandıktan sonra tam kesit hizasından kalınlığın azalmamış olduğu noktaya kadar, orta noktaya göre -80 ve +80 milimetre noktaları arasında profiller her farklı deney için ayrı ayrı çıkarılmıştır. Şekil 3.40’ta analiz sonucundan kalınlık

profilinin çıkarımı gösterilmektedir. Buradan alınan veriler karşılaştırma grafiklerini oluşturmak üzere Microsoft Office Excel yazılımına aktarılarak orada bulgular grafiğe dökülmüştür.



BÖLÜM 4. ARAŞTIRMA BULGULARI

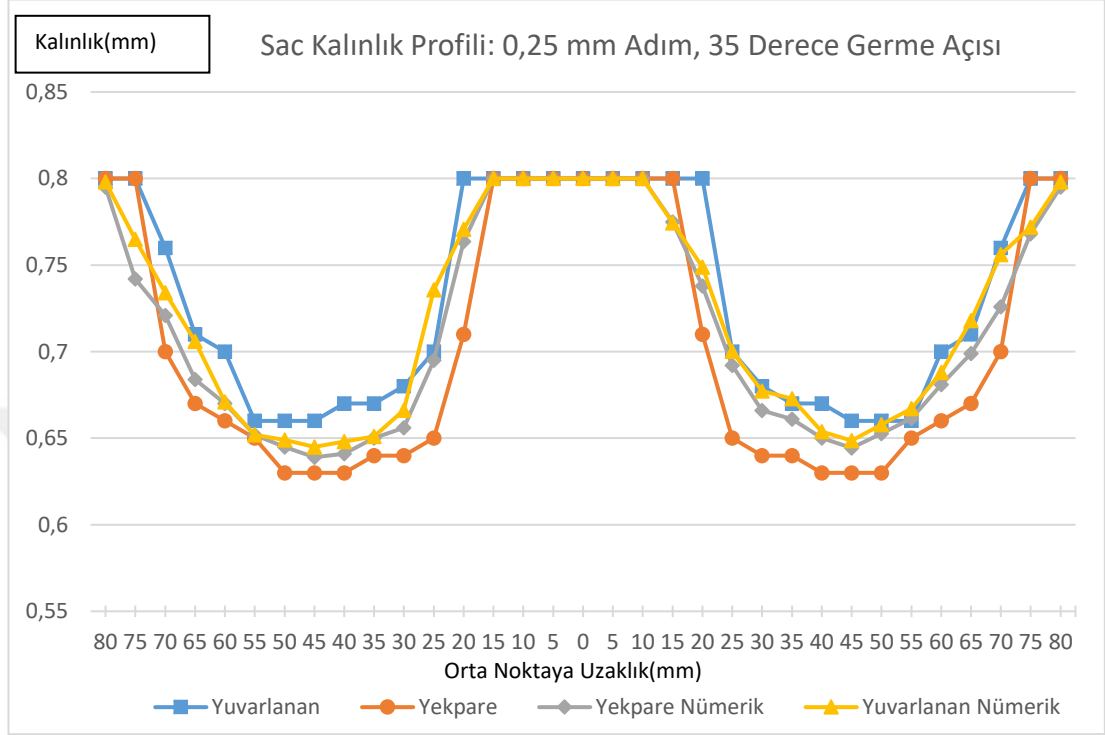
4.1. Kalınlık Profilleri



Şekil 4.1. Yuvarlanan Uçlu ve Yekpare Takım Kalınlık Profilleri: 0,25 mm Artım Adımı, 30 Derece Germe Açısı

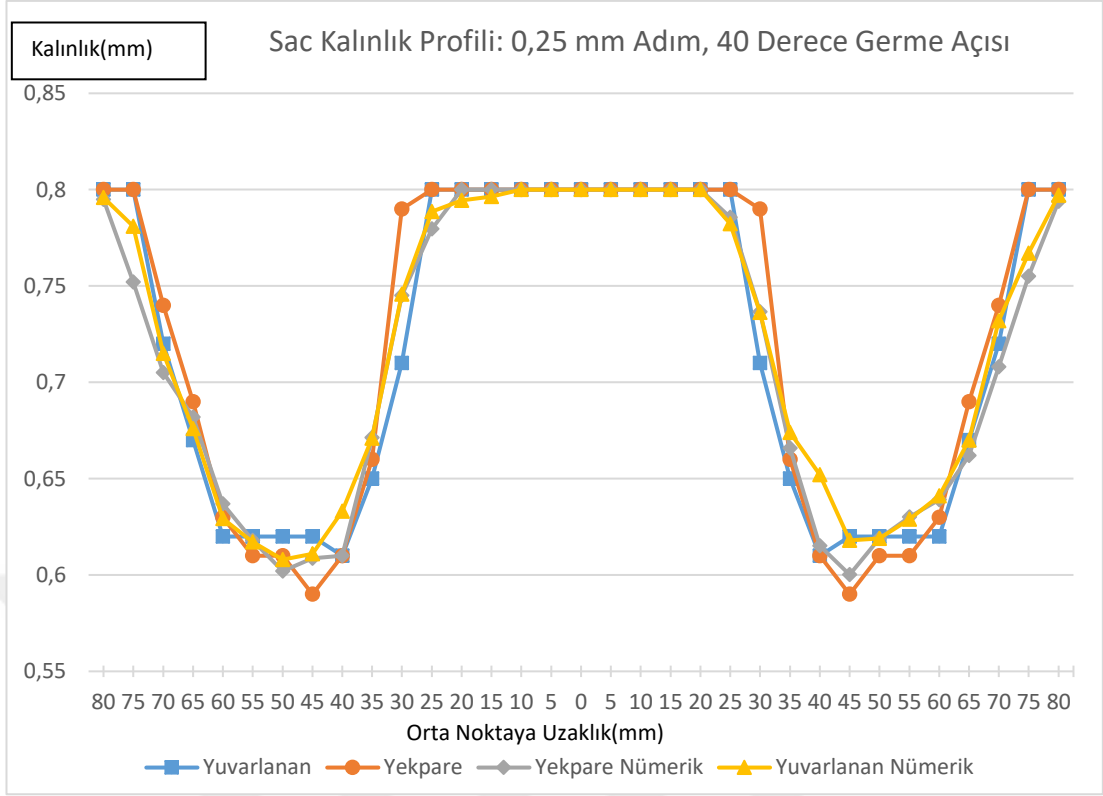
Şekil 4.1'deki artım adımı 0,25 milimetre ve germe açısı 30 derece olmak üzere yapılan deneysel çalışma ve bilgisayar simülasyonu sonucu elde edilen kalınlık profillerine bakıldığında; yuvarlanan takım ile şekillendirmede maksimum %2'lik kalınlık farklılığı görülmektedir. Yekpare takım ile şekillendirmede ise maksimum %3,5 fark olduğu anlaşılmaktadır. Ölçüm noktalarının çoğunda; yuvarlanan uçlu takımın şekillendirdiği saclarda, yekpare takıma göre %0,5-3 aralığında daha yüksek

kalınlık değerleri oluşmuştur. Bu işlemde yuvarlanan uçlu takımın daha iyi bir boydan boya kalınlık dağılımı sağladığı anlaşılmaktadır.



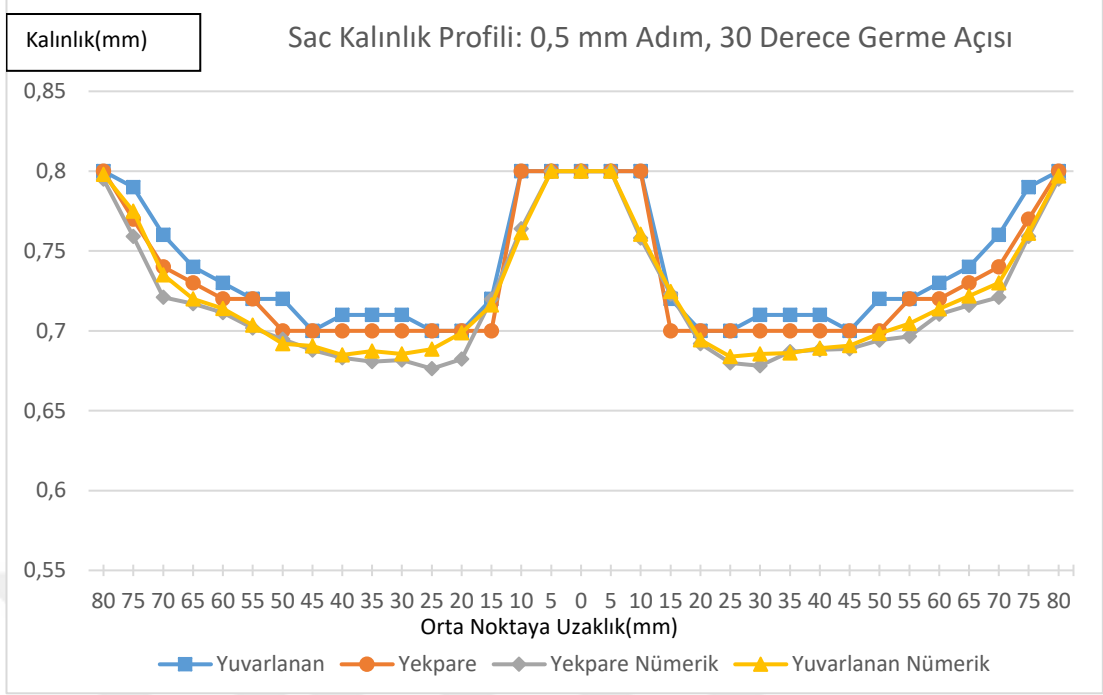
şekil 4.2 Yuvarlanan Uçlu ve Yekpare Takım Kalınlık Profilleri: 0,25 mm Artım Adımı, 35 Derece Germe Açışı

şekil 4.2'deki artım adımı 0,25 milimetre ve germe açışı 35 derece olmak üzere yapılan deneysel ęalıřma ve bilgisayar simülasyonu sonucu elde edilen kalınlık profillerine bakıldığında; yuvarlanan takım ile şekillendirmede maksimum %5,1'lik kalınlık farklılığı görülmektedir. Yekpare takım ile şekillendirmede ise maksimum %5,3 fark oluştuğu anlaşılmaktadır. Ölçüm noktalarının çoğunda; yuvarlanan uçlu takımın şekillendirdiği saclarda, yekpare takıma göre %1-4 aralığında daha yüksek kalınlık değerleri oluşmuştur. Bu işlemde yuvarlanan uçlu takımın oldukęa daha iyi bir boydan boya kalınlık dağılımı sağladığı görülmektedir.



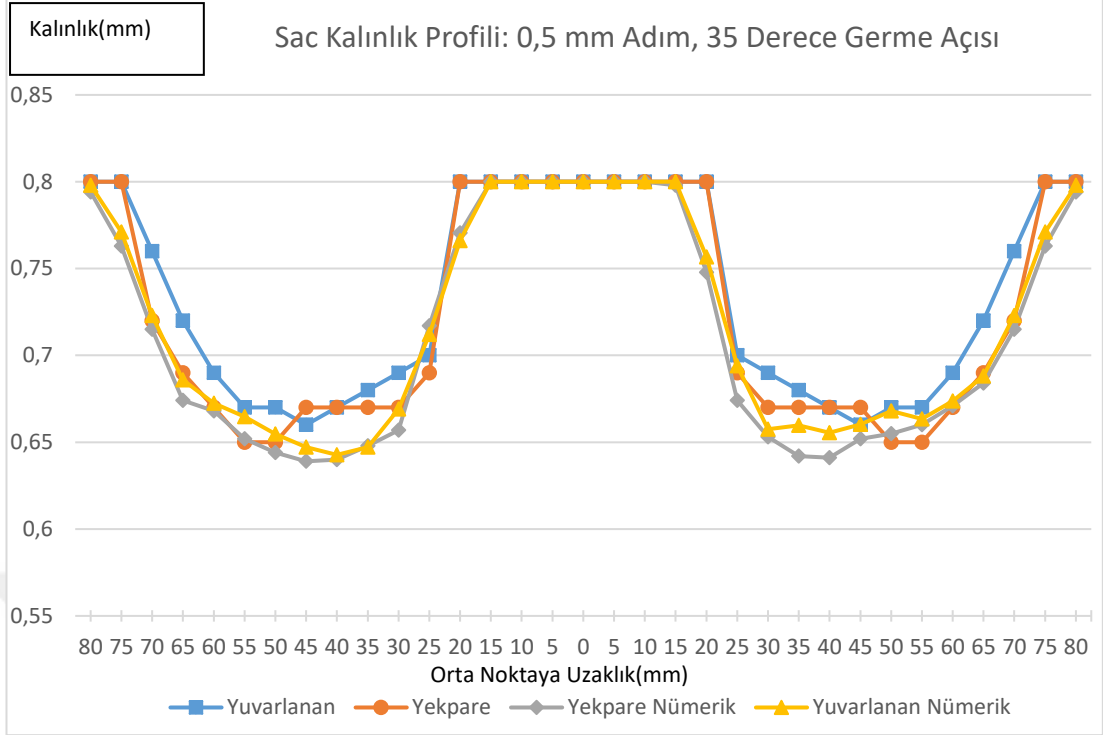
Şekil 4.3. Yuvarlanan Uçlu ve Yekpare Takım Kalınlık Profilleri: 0,25 mm Artım Adımı, 40 Derece Germe Açısı

Şekil 4.3'teki artım adımı 0,25 milimetre ve germe açısı 40 derece olmak üzere yapılan deneysel çalışma ve bilgisayar simülasyonu sonucu elde edilen kalınlık profillerine bakıldığında; yuvarlanan takım ile şekillendirmede maksimum %3,7'lik kalınlık farklılığı görülmektedir. Yekpare takım ile şekillendirmede ise maksimum %4,8 fark olduğu anlaşılmaktadır. Ölçüm noktalarının çoğunda; yekpare takımın şekillendirdiği saclarda, yuvarlanan uçlu takıma göre %0,5-1 aralığında daha yüksek kalınlık değerleri oluşmuştur. Bu işlemden yekpare takımın az da olsa daha iyi bir boydan boya kalınlık dağılımı sağladığı görülmektedir.



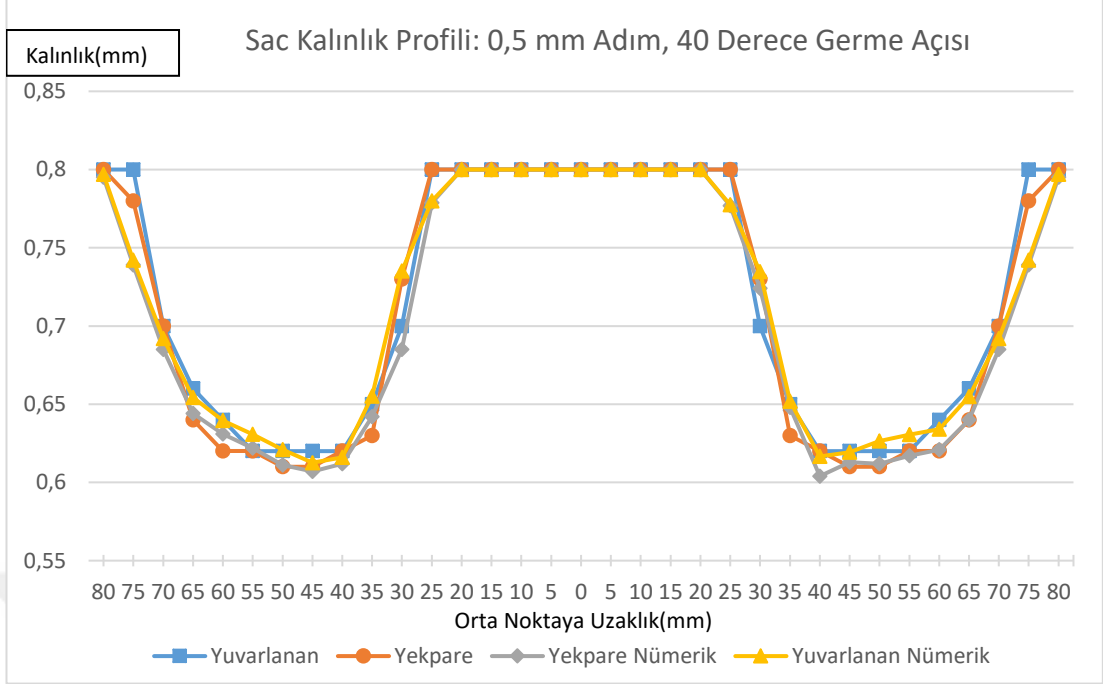
Şekil 4.4. Yuvarlanan Uçlu ve Yekpare Takım Kalınlık Profilleri: 0,5 mm Artım Adımı, 30 Derece Germe Açısı

Şekil 4.4'teki artım adımı 0,5 milimetre ve germe açısı 30 derece olmak üzere yapılan deneysel çalışma ve bilgisayar simülasyonu sonucu elde edilen kalınlık profillerine bakıldığında; yuvarlanan takım ile şekillendirmede maksimum %3'lük kalınlık farklılığı görülmektedir. Yekpare takım ile şekillendirmede ise maksimum %2,3 fark olduğu anlaşılmaktadır. Ölçüm noktalarının çoğunda; yuvarlanan uçlu takımın şekillendirdiği saclarda, yekpare takıma göre %0,5-2 aralığında daha yüksek kalınlık değerleri oluşmuştur. Bu işlemde yuvarlanan uçlu takımın önemli ölçüde daha iyi bir boydan boya kalınlık dağılımı sağladığı görülmektedir.



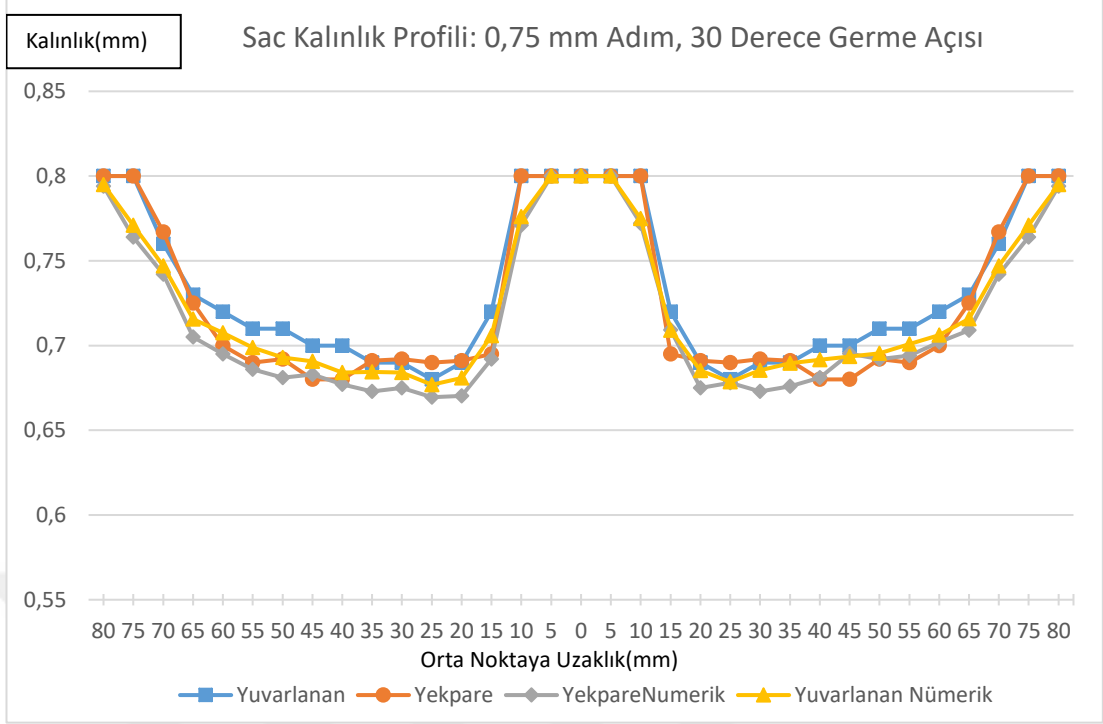
Şekil 4.5. Yuvarlanan Uçlu ve Yekpare Takım Kalınlık Profilleri: 0,5 mm Artım Adımı, 35 Derece Germe Açısı

Şekil 4.5'teki artım adımı 0,5 milimetre ve germe açısı 30 derece olmak üzere yapılan deneysel çalışma ve bilgisayar simülasyonu sonucu elde edilen kalınlık profillerine bakıldığında; yuvarlanan takım ile şekillendirmede maksimum %3,7'lik kalınlık farklılığı görülmektedir. Yekpare takım ile şekillendirmede ise maksimum %5,2 fark olduğu anlaşılmaktadır. Ölçüm noktalarının çoğunda; yuvarlanan uçlu takımın şekillendirdiği saclarda, yekpare takıma göre %0,5-3,5 aralığında daha yüksek kalınlık değerleri oluşmuştur. Bu işlemde yuvarlanan uçlu takımın oldukça daha iyi bir boydan boyda kalınlık dağılımı sağladığı görülmektedir.



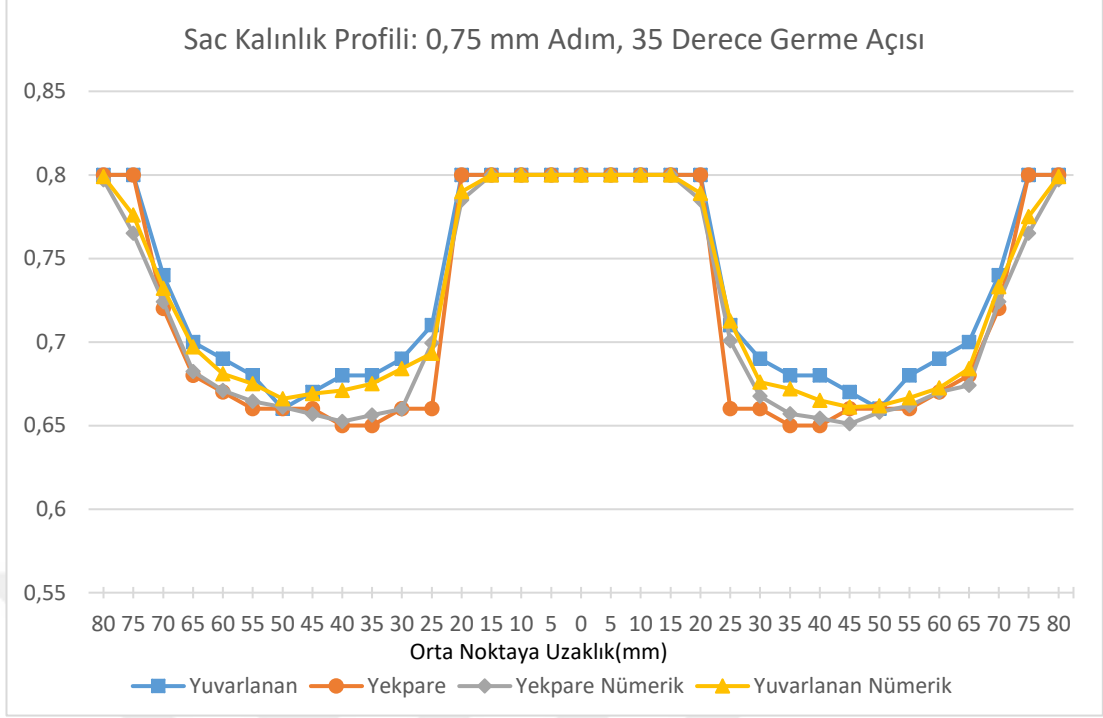
Şekil 4.6. Yuvarlanan Uçlu ve Yekpare Takım Kalınlık Profilleri: 0,5 mm Artım Adımı, 40 Derece Germe Açısı

Şekil 4.6'daki artım adımı 0,5 milimetre ve germe açısı 30 derece olmak üzere yapılan deneysel çalışma ve bilgisayar simülasyonu sonucu elde edilen kalınlık profillerine bakıldığında; yuvarlanan takım ile şekillendirmede maksimum %5,8'lik kalınlık farklılığı görülmektedir. Yekpare takım ile şekillendirmede ise maksimum %3,8 fark olduğu anlaşılmaktadır. Ölçüm noktalarının çoğunda; yuvarlanan uçlu takımın şekillendirdiği saclarda, yekpare takıma göre ortalama %0,5 civarında daha yüksek kalınlık değerleri oluşmuştur. Bu işlemde yuvarlanan uçlu takımın nispeten daha iyi bir boydan boya kalınlık dağılımı sağladığı görülmektedir.



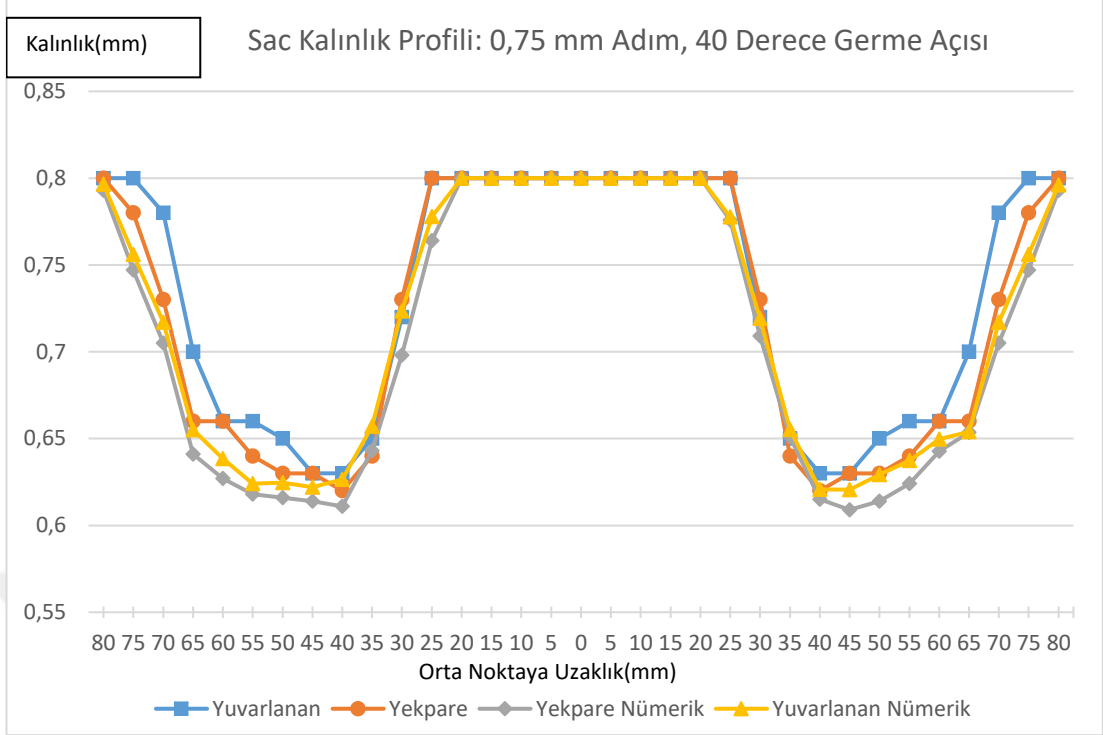
Şekil 4.7. Yuvarlanan Uçlu ve Yekpare Takım Kalınlık Profilleri: 0,75 mm Artım Adımı, 30 Derece Germe Açısı

Artım adımı 0,75 milimetre ve germe açısı 30 derece olmak üzere yapılan deneysel çalışma ve bilgisayar simülasyonu sonucu elde edilen kalınlık profillerine bakıldığında; yuvarlanan takım ile şekillendirme ile yekpare arasında maksimum %3,5'lük farklılık görülmektedir. Yekpare takım ile şekillendirmede ise maksimum %3 fark olduğu anlaşılmaktadır. Şekil 4.1'deki verilere göre ölçüm noktalarının çoğunda; yuvarlanan uçlu takımın şekillendirdiği saclarda, yekpare takıma göre %1,5-2 aralığında daha yüksek kalınlık değerleri oluşmuştur. Buna göre yuvarlanan uçlu takımın daha iyi bir boydan boya kalınlık dağılımı sağladığı anlaşılmaktadır.



Şekil 4.8. Yuvarlanan Uçlu ve Yekpare Takım Kalınlık Profilleri: 0,75 mm Artım Adımı, 35 Derece Germe Açısı

Artım adımı 0,75 milimetre ve germe açısı 35 derece olmak üzere yapılan deneysel çalışma ve bilgisayar simülasyonu sonucu elde edilen kalınlık profillerine bakıldığında; yuvarlanan takım ile şekillendirmede maksimum %2,5'luk kalınlık farklılığı görülmektedir. Yekpare takım ile şekillendirmede ise maksimum %3 fark olduğu anlaşılmaktadır. Şekil 4.1'deki verilere göre ölçüm noktalarının çoğunda; yuvarlanan uçlu takımın şekillendirdiği saclarda, yekpare takıma göre %2-2,5 aralığında daha yüksek kalınlık değerleri oluşmuştur. Bu işlemde de yuvarlanan uçlu takımın öneli ölçüde daha iyi bir boydan boya kalınlık dağılımı sağladığı anlaşılmaktadır.

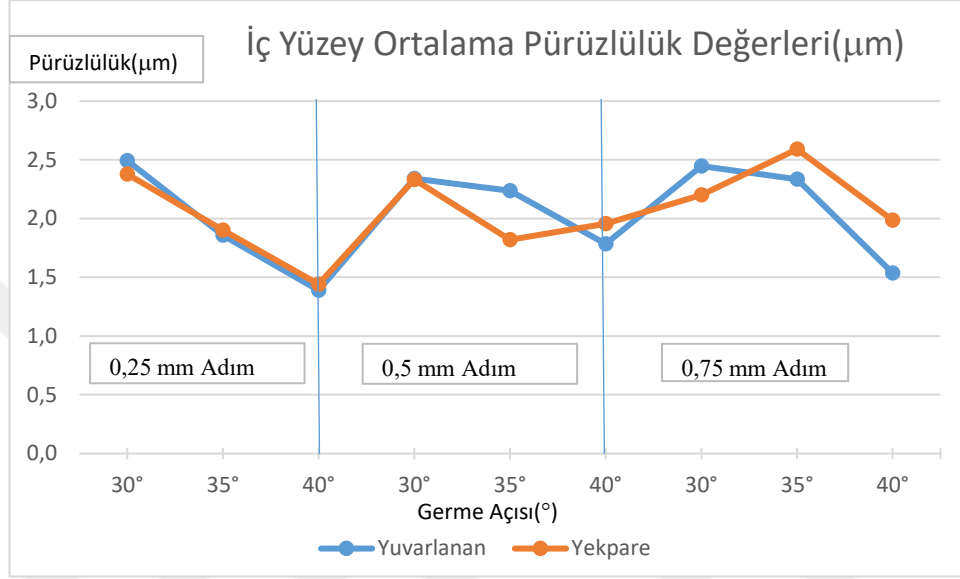


Şekil 4.9. Yuvarlanan Uçlu ve Yekpare Takım Kalınlık Profilleri: 0,75 mm Artım Adımı, 40 Derece Germe Açısı

Artım adımı 0,75 milimetre ve germe açısı 40 derece olmak üzere yapılan deneysel çalışma ve bilgisayar simülasyonu sonucu elde edilen kalınlık profillerine bakıldığında; yuvarlanan takım ile şekillendirmede maksimum %6'lık kalınlık farklılığı görülmektedir. Yekpare takım ile şekillendirmede ise maksimum %3,4 fark olduğu anlaşılmaktadır. Şekil 4.1'deki verilere göre ölçüm noktalarının çoğunda; yuvarlanan uçlu takımın şekillendirdiği saclarda, yekpare takıma göre %1-2 aralığında daha yüksek kalınlık değerleri oluşmuştur. Bu işlemde de göre yuvarlanan uçlu takımın daha iyi bir boydan boya kalınlık dağılımı sağladığı anlaşılmaktadır.

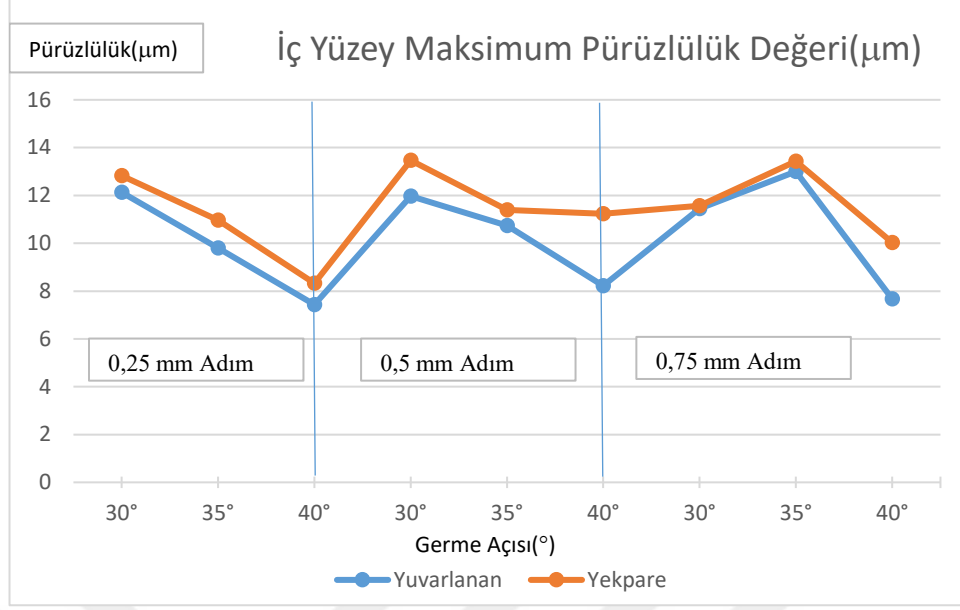
4.2. Pürüzlülük Değerleri

Deneysel çalışma ile elde edilen sacların eğik yüzeylerinin iç ve dış kısımlarında pürüzlülük ölçüm cihazıyla yapılan ölçümlere göre aşağıdaki grafikler oluşturulmuştur.



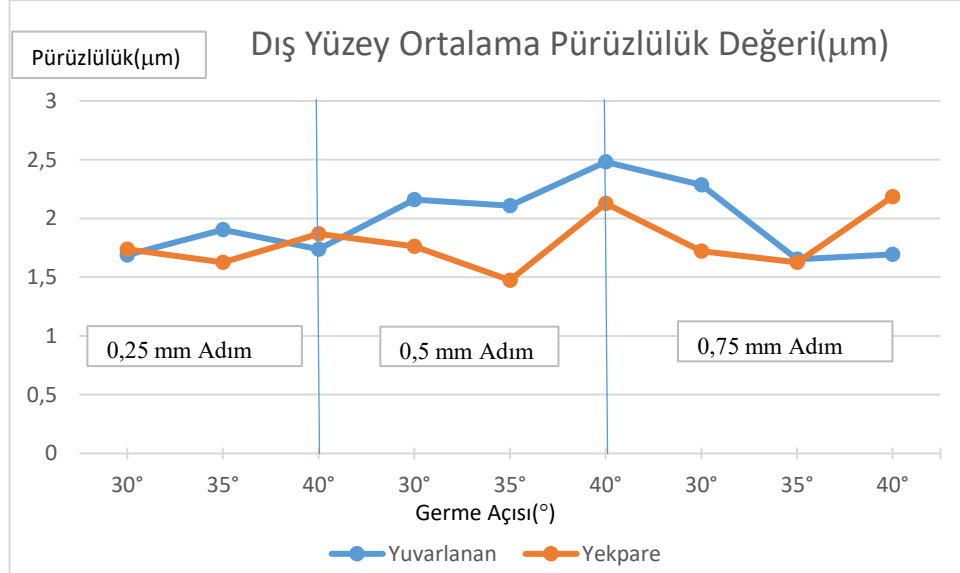
Şekil 4.10. İç Yüzey Ortalama Pürüzlülük Ölçüm Değerleri

İç yüzey için ölçülen ortalama pürüzlülük değerleri Şekil 4.10'da verilmiştir. Çıkan değerlere bakıldığında germe açısı arttıkça yuvarlanan uçla yapılan şekillendirmelerin daha düşük yüzey pürüzlülüğü dolayısıyla daha iyi yüzey kalitesi sağladığı anlaşılmaktadır. Aynı zamanda artım adımı yükseldikçe yuvarlanan takımın yine daha iyi yüzey kalitesi oluşturduğu söylenebilir.



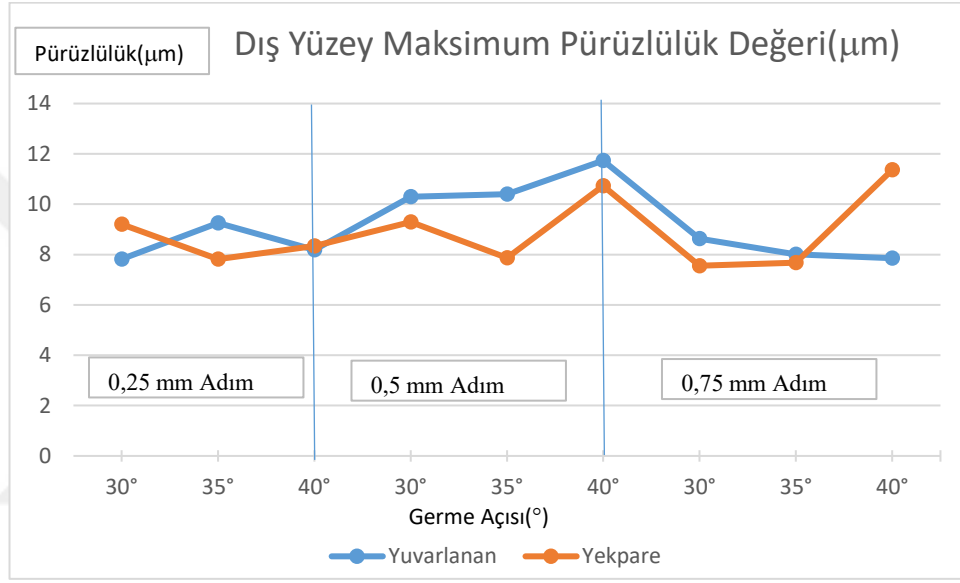
Şekil 4.11. İç Yüzey Maksimum Pürüzlülük Ölçüm Değerleri

Şekil 4.11'deki grafikten iç yüzeyde yapılan maksimum pürüzlülük ölçümlerine bakıldığında tüm proseslerde yuvarlanan uçlu takımın daha düşük maksimum pürüzlülük(R_z) değerleri oluşturduğu, dolayısıyla daha iyi yüzey kalitesi meydana getirdiği ortaya çıkmaktadır.



Şekil 4.12. Dış Yüzey Ortalama Pürüzlülük Ölçüm Değerleri

Dış yüzey ortalama ölçüm değerleri Şekil 4.12'deki grafikten incelendiği zaman yalnızca 40 derece germe açısında yuvarlanan takımın daha iyi yüzey sunduğu görülebilmektedir. İç yüzey incelemelerinde de olduğu gibi buradan da germe açısının artışıyla yuvarlanan takımın daha iyi yüzey işleme sağladığı neticesine ulaşılabilir. Düşük açılarda ise yekpare takımın daha iyi yüzey işleme kabiliyeti olduğu söylenebilir.



Şekil 4.13. Dış Yüzey Maksimum Pürüzlülük Ölçüm Değerleri

Şekil 4.13'teki dış yüzey maksimum ölçüm değerleri göz önüne alınacak olursa; burada da özellikle 0,75 mm artım adımında ve 40 derece germe açısında açık şekilde yuvarlanan uçlu takımın daha düşük pürüzlülük oluşturduğu görülmekle birlikte çoğu çalışmada dış yüzey pürüzlülüğü açısından yekpare takımın daha iyi şekillendirme sağladığı fark edilmektedir.

BÖLÜM 5. TARTIŞMA VE SONUÇLAR

Yapılan deneysel çalışmaların ve bilgisayar destekli analizlerin bulguları karşılaştırıldığında kalınlık profillerinin %2-3 gibi ortalama bir fark gözükmele birlikte, ölçüm ve kalibrasyon hataları veya nümerik analizde yapılan kabuller hesaba katıldığında sonuçların tutarlı olduğu ve çalışmaların doğru şekilde gerçekleştirildiği anlaşılmaktadır. Kalınlık profilleri grafiklerine bakıldığında hemen hemen tüm şekillendirmelerde bu tez çalışması kapsamında tasarlanıp imal edilen yuvarlanan uçlu artımlı sac şekillendirme takımının daha yüksek kalınlık dağılımı sağladığı görülmüştür. Bu duruma bakarak, yuvarlanan uçlu takımın şekillendirebilirlik açısından daha iyi ve homojen sonuç verdiğini düşünülebilir.

Yüzey kalitesinin önemli göstergelerinden olan yüzey pürüzlülük verileri analiz edildiğinde; özellikle iç yüzey maksimum pürüzlülük değerlerine bakılarak yuvarlanan uçlu takımın daha kaliteli yüzey sunduğu görülmektedir. Ortalama pürüzlülük parametresi dikkate alındığında da germe açısı arttıkça yuvarlanan uçlu takımın daha yüksek kalite sağladığı söylenebilir. Ancak bu noktada yekpare takımın genel anlamda daha iyi ortalama pürüzlülük sağladığı görülmüş olup, ileriki çalışmalarda bu hususun sebepleri araştırılıp tasarımda veya deney düzeneğinde geliştirmeler sağlanarak bu yönden de yuvarlanan uçlu takımın yüzey işleme performansının artırılacağı tahmin edilmektedir.

Dış yüzey ölçümlerine bakıldığında ise yekpare takımın genel olarak daha iyi yüzeyler ortaya koyduğu anlaşılmaktadır. Ancak artım adımı ve germe açısı arttıkça yuvarlanan uçlu takımın nispeten iyi dış yüzeyler sunduğu savunulabilir. Bu parameter ile ilgili de ileriki çalışmalarda sebepler araştırılacak olup gerekli tasarımsal veya teknik eklemeler-geliştirmeler sağlanması planlanmaktadır.

Yuvarlanan uçlu takımın en önemli dezavantajının maksimum 40 derece germe açısında saclar şekillendirebilmesidir. Buna rağmen özellikle 40 derecede daha iyi yüzey kalitesi sağladığı açık olarak görülmektedir. Bu sebeple bu takımın tasarımında geliştirilmesi planlanan en önemli nokta germe açısının artırılabilmesi olmakla birlikte bunu sağlamak üzere yeni tasarımsal geliştirmeler yapılarak şekillendirme kabiliyeti ve kullanılabilirliğinin artırılacağı tahmin edilmektedir.



KAYNAKLAR

- Amino, M., Mizoguchi, M., Terauchi, Y., & Maki, T. (2014). Current status of “Dieless” Amino’s incremental forming. *Procedia Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.09.128>
- Attanasio, A., Ceretti, E., & Giardini, C. (2006). Optimization of tool path in two points incremental forming. *Journal of Materials Processing Technology*, 177(1–3), 409–412. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.04.047>
- Bambach, M. (2010). A geometrical model of the kinematics of incremental sheet forming for the prediction of membrane strains and sheet thickness. *Journal of Materials Processing Technology*, 210(12), 1562–1573. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2010.05.003>
- Berghahn, W. G. (1967). Method of dielessly forming surfaces of revolution. *US Patent Office* 3,316,745.
- Fratini, L., Ambrogio, G., Di Lorenzo, R., Filice, L., & Micari, F. (2004). Influence of mechanical properties of the sheet material on formability in single point incremental forming. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 53(1), 207–210. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)60680-5](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60680-5)
- Jeswiet, J. (2009). Asymmetric Incremental Sheet Forming. *Advanced Materials Research*, 6–8, 35–58. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.6-8.35>
- Ji, Y. H., & Park, J. J. (2010). Incremental forming of free surface with magnesium alloy AZ31 sheet at warm temperatures. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 18(June), s165–s169. [https://doi.org/10.1016/s1003-6326\(10\)60195-1](https://doi.org/10.1016/s1003-6326(10)60195-1)
- Junk, S., Hirt, G., & Chouvalova, I. (2003). Forming Strategies and Tools in Incremental Sheet Forming. *International Conference on Sheet Metal*.
- Karalı, M., Üniversitesi, M., Fakültesi, T. E., Eğitimi, M., & Özet, D. (2007). TEKNOLOJİK ARAŞTIRMALAR Makale Derin Sac Çekme İşleminde Kalıp Boşluğunun Cidar Kalınlık Değişimine Etkilerinin Sonlu Elemanlar Analizi. *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*.
- Klocke, F., & Brummer, C. M. (2014). Laser-assisted metal spinning of challenging materials. *Procedia Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.10.338>
- Kobayashi S, Oh, S. I., & Altan, T. (1989). Metal forming and the finite-element method. Oxford University Press
- Kwiatkowski, L., Urban, M., Sebastiani, G., & Tekkaya, A. E. (2010). Tooling concepts to speed up incremental sheet forming. *Production Engineering*, 4(1), 57–64. <https://doi.org/10.1007/s11740-009-0206-9>
- Lamminen, L., Tuominen, T., & Kivivuori, S. (2005). Incremental sheet forming with an industrial robot. *Materials Forum*.
- Leszak, E. (1967). Apparatus and process for incremental dieless forming. *US Patent Office* 3,342,051.

- Lu, B., Fang, Y., Xu, D. K., Chen, J., Ou, H., Moser, N. H., & Cao, J. (2014). Mechanism investigation of friction-related effects in single point incremental forming using a developed oblique roller-ball tool. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 85, 14–29. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2014.04.007>
- Meier, H., Smukala, V., Dewald, O., & Zhang, J. (2007). Two Point Incremental Forming with Two Moving Forming Tools. *Key Engineering Materials*, 344, 599–605. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.344.599>
- van den Boogaard, A. H., Emmens, W. C., & Sebastiani, G. (2010). *The technology of Incremental Sheet Forming—A brief review of the history*. *Journal of Materials Processing Technology*. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2010.02.014>
- Wang, J., & Mote, C. D. (1994). Analysis of Roller-Induced Residual Stresses in Bandsaw Plates. *Journal of Sound and Vibration*, 175(5), 647-659.
- Young, D., & Jeswiet, J. (2004). Wall thickness variations in single-point incremental forming. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 218(11), 1453–1459. <https://doi.org/10.1243/0954405042418400>

ÖZGEÇMİŞ

Ömer ÇERLEK, 03.10.1991'de Sakarya'da doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini Sakarya'da tamamladı. 2009 yılında Sakarya Anadolu Lisesi'nden mezun oldu. 2009 yılında başladığı Yıldız Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü'nü 2014 yılında bitirdi. 2014-2015 yıllarında askerlik hizmetini Yedek Subay olarak bir yıl süreyle yapmıştır. 2016 yılında Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde yüksek lisans eğitimine başladı. 2016 yılı sonlarında Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü'nde araştırma görevlisi olarak çalışmaya başladı. Halen Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde araştırma görevlisi olarak görev yapmaktadır.