

**T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**PLASTİK ENJEKSİYON KALIPLAMA YÖNTEMİ İLE SAC METALLERİN
ŞEKİLLENDİRİLEBİLİRLİĞİNİN İNCELENMESİ**

MURAT ŞEN

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
İMAL USULLERİ PROGRAMI**

**DANIŞMAN
DOÇ. DR. MİHRİGÜL EKŞİ ALTAN**

İSTANBUL, 2017

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**PLASTİK ENJEKSİYON KALIPLAMA YÖNTEMİ İLE SAC METALLERİN
ŞEKİLLENDİRİLEBİLİRLİĞİNİN İNCELENMESİ**

Murat ŞEN tarafından hazırlanan tez çalışması 14.06.2017 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Doç. Dr. Mihriğül EKŞİ ALTAN
Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Mihriğül EKŞİ ALTAN
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Ayşegül AKDOĞAN EKER
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Mustafa KURT
Marmara Üniversitesi

ÖNSÖZ

Tez çalışmamda yardımlarını ve desteğini esirgemeyen danışmanım Sayın Doç. Dr. Mihriğöl EKŞİ ALTAN'a teşekkür ederim. Ayrıca tez süresince bilgi ve tecrübelerinden faydalandığım Sayın Prof. Dr. Mustafa KURT' a teşekkür ederim.

Yüksek lisans çalışmalarım sırasında, sabrıyla bana yardımcı olup sıkıntıları aşmamda her zaman yanımda olan ve desteğini hiçbir zaman esirgemeyen sevgili nişanlım Ayşenur ARI' ya şükranlarımı sunarım.

Son olarak yetişmemde sonsuz emeği geçen sevgili anne ve babama teşekkür ederim.

Haziran, 2017

Murat ŞEN

İÇİNDEKİLER

Sayfa

SİMGE LİSTESİ.....	vi
KISALTMA LİSTESİ.....	vii
ŞEKİL LİSTESİ.....	viii
ÇİZELGE LİSTESİ	ix
ÖZET	x
ABSTRACT.....	xii
BÖLÜM 1	
GİRİŞ	1
1.1 Literatür Özeti	1
1.2 Tezin Amacı	6
1.3 Hipotez	7
BÖLÜM 2	
2.1 Geleneksel Derin Çekme Yöntemi	9
2.2 Sıvı Basıncı İle Şekillendirme Yöntemi	11
2.2.1 Tüp Malzemelerin Sıvı Basıncı İle Şekillendirilmesi	11
2.2.2 Sac Malzemelerin Sıvı Basıncı İle Şekillendirilmesi.....	12
2.2.2.1 Hidromekanik Derin Çekme Yöntemi.....	13
2.2.2.2 Diyafram Destekli Hidrolik Şekillendirme Yöntemi.....	13
2.2.2.3 Hidrolik Gerdirmeye Yöntemi	14
2.2.2.4 Birleştirilmiş Esnetme ve Derin Çekme	15
2.2.2.5 Çift kalıplı hidrolik şekillendirme.....	15
2.3 Plastik Enjeksiyon Yöntemi	16
2.4 Plastik Enjeksiyonla Sac Metal Şekillendirme Yöntemi	17

BÖLÜM 3

MALZEME VE METOT	19
3.1 Malzeme	19
3.2 Metot	22
3.2.1 Şekillendirme Prosesi.....	22
3.2.2 İncelme Oranlarının Belirlenmesi	25
3.2.3 Şekillendirme Sonrası Sertlik Ölçümü.....	26

BÖLÜM 4

DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA	28
4.1 Şekillendirme Değerlendirmeleri.....	28
4.1.1 İncelme Değerlendirmeleri.....	31
4.1.1.1 Taguchi Metodu	33
4.1.1.2 Regresyon Analizi	35
4.1.1.3 Cevap Yüzey Metodu	36
4.1.2 Ön Isıtmanın Şekillendirilebilirliğe Etkisi	37
4.2 Sertlik Değişimleri	38

BÖLÜM 5

SONUÇ VE ÖNERİLER	40
KAYNAKLAR.....	44
ÖZGEÇMİŞ.....	47

SİMGE LİSTESİ

ABS	Akrilonitril bütadien stiren
Al	Alüminyum
Cu	Bakır
Fe	Demir
HCl	Hidroklorik asit
HF	Hidroflorik asit
HNO ₃	Nitrik asit
HR _B	Rockwell sertlik değeri
Mg	Magnezyum
PP	Polipropilen
PPH	Polipropilen homopolimer
PS	Polistiren
Si	Silisyum
S/N	Sinyal-gürültü oranı
Ti	Titanyum
TiO ₂	Titanyum dioksit
TPE	Termoplastik elastomer
Zn	Çinko

KISALTMA LİSTESİ

ANOVA	Varyans Analizi
PEŞ	Plastik Enjeksiyonla Şekillendirme
SBŞ	Sıvı Basıncı ile Şekillendirme

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2.1 Baskı plakalı çekme işlemi.....	10
Şekil 2.2 Baskı plakasız çekme işlemi	10
Şekil 2.3 Çevirme çekme yöntemi	11
Şekil 2.4 Tüp malzemeleri sıvı basıncı ile şekillendirme işlemi	12
Şekil 2.5 Hidromekanik derin çekme işlemi	13
Şekil 2.6 Diyafram destekli hidrolik şekillendirme işlemi	14
Şekil 2.7 Hidrolik gerdirme yöntemi	14
Şekil 2.8 Birleştirilmiş Esnetme ve Derin Çekme	15
Şekil 2.9 Çift kalıplı hidrolik şekillendirme.....	16
Şekil 2.10 Plastik enjeksiyon yöntemi	17
Şekil 2.11 Plastik enjeksiyon kalıplama yöntemi ile sac şekillendirme	17
Şekil 2.12 Plastik enjeksiyon kalıplama ile şekillendirme aşamaları	18
Şekil 3.1 Deneysel çalışma plakaları	21
Şekil 3.2 Kalıbın katı modeli	22
Şekil 3.3 Kalıp detayları	23
Şekil 3.4 Kalıbın boyutları (mm)	23
Şekil 3.5 Deneysel çalışmada kullanılan plastik enjeksiyon makinesi	24
Şekil 3.6 Parça üzerindeki A-A ve B-B kesitleri	25
Şekil 3.7 Rockwell sertlik ölçme yöntemi	27
Şekil 4.1 Proses sonu parça radyüs formları	29
Şekil 4.2 Parça üzerindeki kalınlık değişimleri	30
Şekil 4.3 Parça formunda yırtılma	30
Şekil 4.4 Yüksek enjeksiyon hızı sebebiyle meydana gelen çapak oluşumu	31
Şekil 4.5 1,5 mm kalınlığına sahip alüminyum plakaların A-A ve B-B kesitleri boyunca meydana gelen % incelme değişimleri.....	32
Şekil 4.6 Kalınlık değişimlerinin dağılımı	32
Şekil 4.7 (%) İncelme oranları için ortalama S/N grafiği (Daha büyük daha iyi).....	34
Şekil 4.8 1,5 mm kalınlığında alüminyum saclar için şekillendirme sonrası deneysel ve tahminsel kalınlık değerleri.....	36
Şekil 4.9 Enjeksiyon basıncı – Ergiyik polimer sıcaklığı – Sac metal kalınlık yüzey grafiği	37
Şekil 4.10 “8” nolu parça üzerindeki sertlik değerlerinin değişimi	39

ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 3.1 Al-1050.O kimyasal analiz sonuçları (%Hacim)	20
Çizelge 3.2 Al-1050.O mekanik özellikleri	20
Çizelge 3.3 Polistiren yoğunluk ve ergime sıcaklığı	21
Çizelge 3.4 Kontrol faktörleri ve seviyeleri.....	24
Çizelge 3.5 L ₉ ortogonal matrisi.....	25
Çizelge 3.6 Rockwell sertliğinde malzeme cinsine göre kullanılan uç ve uygulama kuvveti	27
Çizelge 4.1 Proses parametrelerine bağlı olarak parça radyüslerinin değişimi	28
Çizelge 4.2 Çalışmada kullanılan L9 ortogonal dizisi, faktörler, incelme (%) ölçüm sonuçları ve S/N oranları	31
Çizelge 4.3 (S/N) ortalamaları için yanıt tablosu	33
Çizelge 4.4 (%) incelme oranları için varyans analizi.....	35
Çizelge 4.5 Regresyon analizine ait katsayılar	35
Çizelge 4.6 Ortalama sertlik değerleri	38

**PLASTİK ENJEKSİYON KALIPLAMA YÖNTEMİ İLE SAC METALLERİN
ŞEKİLLENDİRİLEBİLİRLİĞİNİN İNCELENMESİ**

Murat ŞEN

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı İmal Usulleri Programı

Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Mihrişen ALTAN

Günümüzde otomotiv, havacılık ve uzay endüstrisinde karmaşık geometriye sahip ve dar toleranslı parçaların kullanımı giderek artmıştır. Bunun yanı sıra enerji tüketimi imalat aşamasında proses seçimini etkileyen en önemli parametrelerden biri olmuştur. Bu çalışmada, endüstrinin talebini karşılayabilmek ve imalat sürecini en az enerji tüketimiyle gerçekleştirebilmek amacıyla sac metal şekillendirme alanında oldukça sık kullanılan sıvı basıncı ile şekillendirme yöntemi incelenmiştir. Geleneksel sıvı basıncı ile şekillendirme yönteminde (hidroforming) kullanılan yağ yerine plastik enjeksiyon makinesi yardımıyla ergitilen polimer malzeme kullanılmıştır. Hidroforming ve plastik enjeksiyon proseslerini bünyesinde barındıran bu yeni yöntemde şekillendirme işlemi plastik enjeksiyon makinesinde ergitilen polimer malzemenin yüksek basınç kazandırılarak kalıba gönderilmesi ve kalıp üzerinde bulunan alüminyum 1050.O plakaların polimer malzeme tarafından şekillendirilmesine dayanmaktadır. İstenilen formda ve tolerans aralığında maksimum şekillendirilebilirliğin sağlanabilmesi için enjeksiyon basıncı, ergiyik polimer sıcaklığı ve enjeksiyon hızı gibi proses parametreleri dikkate alınarak deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Taguchi metodu ile optimum proses parametreleri belirlenmiştir. ANOVA metodu ile de parametrelerin, şekillendirilen sacın inceliği üzerine etkinlikleri irdelenmiştir. Şekillendirme üzerinde enjeksiyon basıncı ve ergiyik polimer sıcaklığının sırasıyla en etkili parametreler olduğu görülmüştür. Şekillendirme sonrası malzemenin sertlik değerlerinde proses

parametrelerine bağlı olarak değişimler gözlemlenmiştir. Ayrıca şekillendirme öncesi malzemeye uygulanan ön ısıtma işleminin uygulanması ile yöntemin uygulanabilirliğinin ve performansının arttığı sonucuna ulaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Plastik enjeksiyon kalıplama, sac metal şekillendirme, incelme oranı, Taguchi metodu

ABSTRACT

INVESTIGATING OF FORMABILITY OF SHEET METALS BY PLASTIC INJECTION MOLDING METHOD

Murat ŞEN

Department of Mechanical Engineering

MSc. Thesis

Adviser: Assoc.Prof.Dr. Mihrigül EKŞİ ALTAN

In recent years, the usage of parts which have complex geometry and low tolerance have been gradually increased in aviation, aerospace and automotive industries. Moreover, energy consumption has become one of the most important parameter in effecting of process selection during the manufacturing. In this study, hydroforming process which has widely used in sheet metal forming was investigated to compensate the demands of industry and enable to product with minimum energy consumption. In that process, a polymer material that melted by using a injection machine was used instead of oil that was performed in conventional hydroforming process. In this new method of incorporating hydroforming and plastic injection processes, the forming process is based on the injection of the molten polymer material in the plastic injection molding machine by high pressure and the shaping of the aluminum 1050.O plates on the mold by the polymer material. Experimental studies were conducted taking account of the injection pressure, temperature of polymer and injection velocity to provide maximum formability in demanded form and range of tolerance. Also, Taguchi method was used to determine optimum process parameters. The ANOVA method was used to examine the effectiveness of the parameters on thinning of shaped sheet metal. Injection pressure and temperature of polymer were found to be the most effective parameters, respectively. Variations were observed in the hardness of the

material after shaping depending on the process parameters. Furthermore, it has been observed that the applicability and performance of method has increased with the application of the pre-heating process on parts before forming.

Keywords: Polymer injection forming, sheet metal forming, thinning ratio, Taguchi method

GİRİŞ

Günümüze kadar gelen süreçte sac metal parça imalatının büyük bölümünü geleneksel derin çekme yöntemi oluşturmaktadır. Sac metal şekillendirme alanında derin çekme yönteminin uzun süre kullanılması nedeniyle, teknolojinin ilerlemesiyle beraber günümüz ihtiyaçlarını en iyi şekilde karşılayabilmek adına yeni bir yöntem arayışına gidilerek sıvı basıncıyla sac metal şekillendirme yöntemi geliştirilmiştir. Sıvı basıncı ile şekillendirme (SBŞ) yönteminin kullanılmasıyla, hassas ve düşük geri esnemelere sahip sac metal parçaların şekillendirilebilmesi mümkün hale gelmiştir. Ancak yöntemde şekillendirme esnasında oldukça yüksek basınçlara gereksinim duyulması ve işlem süresinin uzun olması sac metal malzemelerin şekillendirilmesinde yeni bir yöntem ihtiyacını doğurmuştur. Bunun neticesinde sac metal şekillendirme alanında derin çekme ve sıvı basıncıyla şekillendirme yönteminin yanısıra, plastik enjeksiyon kalıplama yöntemi kullanılmaya başlanmıştır. Plastik enjeksiyon kalıplama, plastikler için geleneksel bir yöntem olmasına karşın, kalıptaki bazı modifikasyonlar ile sac metallerin şekillendirilmesi için de kullanılacağı görülmüştür.

1.1 Literatür Özeti

Sac metal malzemelerin şekillendirilmesinde çok sayıda yöntem geliştirilmiş ve kullanılmıştır. Bu yöntemlerin kullanılması ile sac metal şekillendirme işleminde etkili olan, basınç, sıcaklık, kalıp geometrisi, şekillendirme kuvveti, sac malzeme türü ve kalınlığı gibi proses parametrelerinin şekillendirme üzerine etkilerini belirleyebilmek adına birçok deneysel çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalardan bazıları kısaca irdelenmiştir.

Literatürde, derin çekme yöntemi esas alınarak gerçekleştirilen, farklı proses parametrelerinin şekillendirme üzerine etkilerini görebilmek amacıyla yapılan birçok çalışma mevcuttur. Bu konuda Padmanabhan ve diğerleri, proses parametrelerinin sac metalin deformasyon davranışı ve kalınlık değişimleri üzerine etkilerine ait bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarında değişken olarak kalıp radyüsü, baskı kuvveti ve sürtünme katsayısını dikkate almışlardır. Optimum proses parametrelerini belirlemek için Taguchi tekniği ve ANOVA' dan yararlanmışlardır. Deneysel çalışmalara ek olarak sonlu elemanlar analizini kullanmışlardır. Çalışma sonucunda şekillendirilebilirlik üzerinde en etkili proses parametrelerini sırasıyla; kalıp radyüsü (89,2%), sürtünme katsayısı (6,3%) ve baskı kuvveti (4,3%) şeklinde bulmuşlardır [1].

Raju ve diğerleri, AA 6061 sac malzemesini kullanarak derin çekme işlemi sonrası parçalarda meydana gelen kalınlık değişimlerini araştırmışlardır. Kalıp yarıçapı, zimba yarıçapı ve baskı kuvveti gibi proses parametrelerinin farklı seviyelerine ait optimum sonuçları görebilmek amacıyla Taguchi metodunu kullanmışlardır. Derin çekme işlemi üzerindeki en etkili proses parametrelerinin kalıp radyüsü (66,49%) ve baskı kuvveti (29,16%) olduğunu görmüşlerdir [2].

Sac metal şekillendirme alanında derin çekme yöntemine alternatif olarak gelişen bir yöntem olan sıvı basıncıyla sac metal şekillendirme işlemi hakkında literatürde çok sayıda çalışma yer almaktadır. Bu çalışmaların büyük bölümünü farklı proses parametrelerinin şekillendirilebilirlik üzerine etkilerinin incelenmesi oluşturmaktadır. Buna yönelik olarak, Koç ve diğerleri, sıcak hidroforming prosesi ile sac malzemelerin şekillendirilebilirliğini farklı proses parametreleri kullanarak incelemişlerdir. Çalışmalarında 1.0 mm kalınlığında 5000 serisi alüminyum (AA5754-0) malzemesini kullanmışlardır. Sıcaklık, basınç ve pot kuvvetini dikkate alarak, bu parametrelerin proses sonu parça formuna, incelmesine ve boşluk doldurma oranına etkilerini cevap yüzey metodunu kullanarak değerlendirmişlerdir. Çalışma neticesinde şekillendirilebilirlik üzerinde en etkili proses parametresinin sıcaklık olduğu sonucuna ulaşmışlardır [3].

Yaşar ve diğerleri, AA 5754 sacının farklı sıcaklıklarda sıvı basıncıyla şekillendirilmesi ile elde edilen sonuçları, şişme yüksekliği, kalınlık değişimi ve sonlu elemanlar analizleri

açısından değerlendirmişlerdir. Çalışmalarını oda koşullarında, 150 °C ve 250 °C' de gerçekleştirmişlerdir. Elde edilen veriler neticesinde AA 5754 malzemesinin oda sıcaklığında şekillendirilebilirliğinin sınırlı olduğu görülmüştür. Yeniden kristalleşme sıcaklığının üstündeki sıcaklık değerlerinde, daha yüksek bir şişme derinliği ve daha homojen kalınlık dağılımı elde edilmesine dayanılarak daha iyi bir şekillendirmenin gerçekleştirildiği sonucuna ulaşılmıştır [4].

Li ve diğerleri, tüp hidroforming yöntemiyle şekillendirilmiş parçalarda maksimum ve homojen bir şekillendirilebilirliği elde edebilmek amacıyla farklı proses parametrelerini kullanarak sonlu elemanlar metoduna dayalı bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Proses sonu en yüksek şişme yüksekliği ve en düşük incelme oranına ulaşabilmek için Taguchi deneysel tasarım metodundan faydalanmışlardır. Şekillendirilebilirlik üzerinde en etkili proses parametrelerini sırasıyla sıvı basıncı ve sürtünme katsayısı olarak bulmuşlardır. Parçalarda meydana gelen şişme yüksekliği ve incelme oranı değerlerinin tahmini için regresyon analizi kullanılarak birinci dereceden tahminsel denklemler geliştirilmiştir [5].

Derin çekme ve sıvı basıncıyla sac metal şekillendirme yöntemlerinin uzun süre kullanımının ardından, kendilerine alternatif olarak geliştirilen ve daha iyi sonuçlar veren plastik enjeksiyonla sac metal şekillendirme yöntemi üzerine literatürde birçok çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmalar genel olarak sonlu elemanlarla analiz, fiziksel modelleme ve makro kompozit parça imalatı konularını içermektedir. Konu hakkındaki çalışmaların son yıllarda gerçekleştirilmiş olması yöntemin yeni ve geliştirilmeye açık olduğunun bir göstergesidir. Çalışmaların özünü sac metal parçaların istenilen tolerans aralığında, homojen ve maksimum şekillendirilebilmeleri oluşturmaktadır.

Bu konuda, Michaeli ve Measing, alüminyum ve paslanmaz çelik malzemelerinin plastik enjeksiyon kalıplama yöntemini kullanarak farklı proses parametrelerinin şekillendirmeye olan etkisini incelemişlerdir. Parametre olarak polimerin ergime sıcaklığını, kalıp sıcaklığını, sıkıştırma basıncını ve enjeksiyon hızını dikkate almışlardır. Çalışma sonucunda şekillendirilebilirlik üzerinde en etkili parametrelerin enjeksiyon basıncı ve kalıp sıcaklığının olduğu görülmüştür [6].

Lucchetta ve Baesso metal ve polimerden oluşan makro-kompozit parçaların imalatını tek operasyonla plastik enjeksiyon kalıplama işlemini kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarında farklı enjeksiyon parametrelerinin şekillendirilebilirlik üzerine etkilerini deneysel olarak incelemişlerdir. Enjeksiyon parametreleri olarak enjeksiyon hızını, ergimiş polimer sıcaklığını ve kapama kuvvetini esas almışlardır. Ayrıca polimere ait viskozite ve kalıp sıcaklığı da değerlendirilmeye alınmıştır. Deneysel çalışmalarda malzeme olarak 0.5 mm, 1000 serisi alüminyum (Al1050-O) plakalar kullanmışlardır. Şekillendirme sonrası koordinat ölçme makinesini kullanarak sac parçaların kalınlık dağılımlarını ölçmüşlerdir. Sonuç olarak şekillendirilebilirlik üzerine en etkili parametrelerin, sırasıyla polimerin ergime sıcaklığı ve makinenin kapama kuvveti olduğu sonucuna ulaşmışlardır [7].

Chen ve diğerleri, yeni bir yaklaşım olan metal-polimer makro-kompozit parçaların plastik enjeksiyon kalıplama yöntemiyle imalatında, farklı enjeksiyon basınçları altında ki (0-30MPa) şekillendirilebilirliklerini incelemişlerdir. Çalışmalarında 1.0 mm kalınlığında, 50 mm çapında saf alüminyum dairesel plakalar kullanmışlardır. Şekillendirilen parçaların farklı bölgelerindeki gerinim ve kalınlık dağılımlarını sonlu elemanlar yöntemiyle ve deneysel çalışmalarla değerlendirmişlerdir [8].

Altan ve diğerleri, plastik enjeksiyon yöntemini kullanarak titreşim sönümleme amacıyla metal-polimer makro kompozit yapıların imalatını gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarında matris malzemesi olarak 1000 serisi alüminyum plakalar (Al-1100) ve takviye malzemesi olarak üç farklı polimer malzeme (PP, TPE ve TiO₂ ilaveli PP) kullanmışlardır. Kompozit yapıların eğilme dayanımlarını ölçmek için üç noktadan bükme testi uygulamışlardır. Sonlu elemanlar yöntemine dayalı ANSYS yazılımını da kullanarak bükme sonuçlarını karşılaştırmışlardır. Çalışma sonucunda TPE kullanılarak oluşturulan makro kompozit yapının en yüksek sönümleme oranına sahip olduğu görülmüştür [9].

Tekkaya ve arkadaşları, plastik enjeksiyon kalıplama yöntemi ile farklı enjeksiyon hızları, enjeksiyon oranları ve sıcaklıklarını dikkate alarak makro kompozit bir yapı imal etmişlerdir. Sac metal malzemesi olarak AA-5754 ve polimer malzeme olarak PPH-3060 ile PPH-11012 malzemelerini kullanmışlardır. Proses süresince basınç dağılımını ve

buna karşılık sac metalde meydana gelen form değişimini kayıt altına alarak sonuçları değerlendirmişlerdir. Uniform basınç dağılımı ve şekillendirilebilirliğin elde edebilmesi için yüksek enjeksiyon basınçlarına, sıcaklıklarına ve hızlarına gereksinim duyulduğu sonucuna ulaşılmıştır [10].

Plastik enjeksiyonla sac metal malzemelerin şekillendirilmesi ve makro-kompozit parçaların elde edilmesinin yeni bir yöntem olmasından dolayı deneysel çalışmalar öncesi gerçekleştirilen sonlu eleman analizlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Sonlu elemanlarla analiz yöntemlerinin kullanılması tasarımcıya bitmiş bir sac metal ürün için proses parametrelerinin etkilerinin gözlemlenmesinde çok fazla yardımcı olmaktadır. Sonlu elemanlar kullanılarak gerçekleştirilen çalışmalar ile deneysel çalışmaların birbiriyle tutarlı olabilmesi ve optimum proses parametrelerine ulaşabilmek için çeşitli fiziksel modeller oluşturulmaktadır. Fiziksel modeller oluşturularak yapılan simülasyon çalışmaları neticesinde proses parametrelerinin sonuca etkilerinin analizlerle, deneysel çalışmalar sonucu elde edilen gerçek değerlerin oldukça yakın sonuçlar verdiği görülmüştür. Bu da imalat süresinin kısaltmasını ve maliyetin düşmesini sağlamaktadır [11]. Bu konuda P.F. Bariani ve diğerleri, ANSYS mekanik ve ANSYS CFX sonlu elemanlar yazılımlarını kullanarak metal-polimer kompozit parçalara yönelik fiziksel model oluşturmuşlardır. Böylece proses esnasında metal ve polimer malzemeleri arasındaki termal ve mekanik etkileşim görülerek, prosesi optimum koşullarda kontrol edebilmek ve en doğru tasarımı gerçekleştirebilmek mümkün hale gelmiştir. Çalışmalarını sonlu elemanlar analizlerine ek olarak farklı proses parametrelerinin şekillendirilebilirliğe etkisini deneysel olarak inceleyerek optimum modele ulaşmayı amaçlamışlardır [12].

Behrens ve arkadaşları, benzer olarak plastik enjeksiyonla şekillendirme yöntemine dayalı bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada sac metal parçanın malzeme davranışı, sıcaklığa bağlı elasto-plastik malzeme modeli kullanılarak sonlu elemanlar metoduyla oluşturulmuştur. Çalışmalarında sonlu elemanlar yazılımı olarak LS-DYNA paket programını kullanmışlardır. Nümerik çalışmalara ek olarak deneysel çalışmalar da gerçekleştirilmiştir. Nümerik olarak elde edilen sonuçların deneysel çalışmalarla elde edilen sonuçlara yakın değerler verdiği görülmüştür [13].

Plastik enjeksiyonla şekillendirme yönteminin geleneksel derin çekme yöntemine karşı üstün yanlarının bulunmasından dolayı sac metal parçaların imalatında tercih edilebilecek bir yöntemdir. Bu üstünlüklerin başında plastik enjeksiyonla şekillendirme yönteminin enerji gereksiniminin daha düşük olması gelmektedir. Bu konuda Landgrebe ve diğerleri, plastik enjeksiyonla sac metal şekillendirme yönteminin enerji verimliliği üzerine bir çalışma yapmışlardır. Çalışmaları neticesinde plastik enjeksiyonla sac metal şekillendirme yönteminin operasyon sayısını düşürmesinden ve sadece tek taraflı kalıp elemanına ihtiyaç duymasından dolayı geleneksel yöntemle göre 20% daha az enerji gereksinimine ihtiyaç duyduğu sonucuna ulaşmışlardır [14].

1.2 Tezin Amacı

Otomotiv ve havacılık endüstrisinde dar toleranslı, karmaşık geometrili ve estetik görünüme sahip parçalara olan talep her geçen gün artmaktadır. Sac metal parçaların geleneksel derin çekme yöntemiyle imalatı talep edilen dar toleransları ve yüksek yüzey hassasiyetlerini karşılayamamaktadır. Ayrıca geleneksel derin çekme yönteminin enerji ve zaman gereksinimi, işçiliğin ve kalıp maliyetinin yüksek olması ve operasyon sayısının birden çok olması açısından bir hayli yüksektir. Bu gibi nedenlerle yerini plastik enjeksiyonla şekillendirme yöntemine bırakmaktadır. Ancak plastik enjeksiyon kalıplama yöntemi ile sac metal şekillendirme yeni bir yöntem olmasından dolayı geleneksel derin çekme yöntemine göre işlem bilgisi açısından daha kısıtlıdır. Proses parametrelerinin şekillendirme üzerine etkileri tam olarak bilinmemektedir. Konu hakkında literatürde birçok çalışma bulunmasına rağmen farklı proses parametrelerinin şekillendirme ve parçalarda meydana gelen kalınlık ve sertlik değişimlerini ne yönde etkilediğine dair bir çalışma bulunmamaktadır. Bu amaçla enjeksiyon basıncı, ergiyik sıcaklığı ve enjeksiyon hızı gibi proses parametreleri dikkate alınarak çeşitli deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Yapılan bu çalışmada plastik enjeksiyonla şekillendirme yöntemi hakkında literatüre yeni bilgiler kazandırılması ve hem sanayi hem de bundan sonraki diğer çalışmalara referans olması amaçlanmıştır.

1.3 Hipotez

Sıvı basıncı ile şekillendirme ve plastik enjeksiyon şekillendirme yöntemlerinin bir arada yer aldığı plastik enjeksiyonla sac metal şekillendirme yönteminde farklı proses parametrelerinin kullanılmasıyla şekillendirme kabiliyetinin arttırılması amaçlanmıştır. Proses parametreleri olarak enjeksiyon basıncı, ergiyik sıcaklığı ve enjeksiyon hızı dikkate alınmıştır. Şekillendirme sonrası parçaların enine ve boyuna kalınlık değişimleri ölçülerek Taguchi ve ANOVA metotları ile optimum proses parametreleri elde edilmiştir. Ek olarak şekillendirme öncesi sac plakalara ön ısıtma işlemi uygulanarak sacların şekillendirilebilirliğinin iyileştirilmesi sağlanmıştır. Deneysel çalışmalarda malzeme olarak ilgili alanlarda en çok kullanılan alüminyum tercih edilerek sektörün daha fazla yararlanabileceği bir çalışma gerçekleştirilmiştir.

BÖLÜM 2

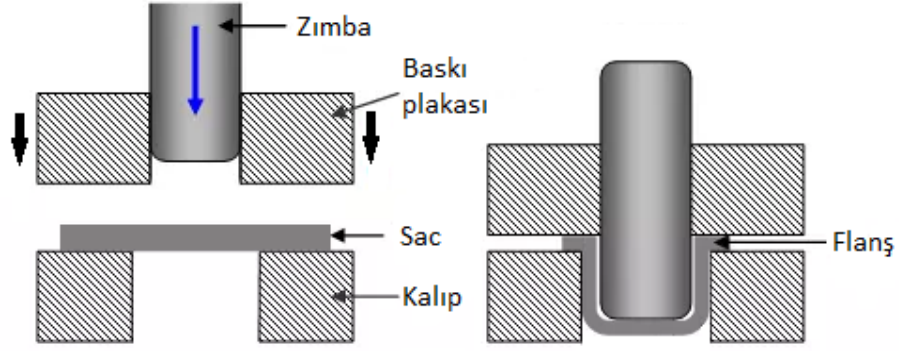
Sac metal malzemeler, otomotiv, havacılık, savunma sanayi başta olmak üzere birçok sektörde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Sac malzemelere duyulan bu ilgi, sac metal şekillendirme yöntemlerinin günümüze dek gelişimine ve şekillendirme alanında yeni yöntemler kullanılmasına aracı olmuştur. Günümüzde sac metal şekillendirme alanında elde edilmek istenilen ürünlerin büyük çoğunluğu sac metal kalıplama yöntemi ile üretilmektedir. Ancak sac metal bir parçanın şekillendirilmesinde kullanılan adım sayısı ve buna bağlı olarak tasarımı ve imalatı yapılan kalıp sayısı maliyeti önemli oranda arttırmaktadır. Maliyet göz önüne alındığında sac metal kalıplama yöntemi ile şekillendirmenin derin çekme, bükme, kesme ve delme gibi birçok işlem adımlarını içermesi, sac metal şekillendirme alanında yeni yöntem arayışlarına gidilmesine neden olmuştur. Bunun neticesinde çok sayıda operasyon gerektiren karmaşık şekilli sac metal parçaların tek operasyonda ve klasik derin çekme yöntemine göre 1,5 kata kadar daha yüksek çekme oranlarında şekillendirilmesine olanak sağlayan sıvı basıncı ile şekillendirme yöntemi geliştirilmiştir . Sıvı basıncı ile şekillendirme yöntemi, klasik kalıplama yöntemlerine alternatif olarak tercih edilmektedir. Sac malzemelerin şekillendirilmesinde sıvı basıncı ile şekillendirme teknolojisinde yer alan hidromekanik şekillendirme yöntemi kullanılmaktadır. Hidromekanik şekillendirme yönteminde geleneksel şekillendirme yönteminde olduğu gibi kalıp, zımba ve baskı plakası yer almaktadır. İşlemden kalıp yada zımbanın yerini akışkan basıncı almaktadır. Proses esnasında sac malzemenin bir tarafı akışkan sıvıya, kauçuk zara yada diyaframa temas etmektedir. Yöntemin geleneksel sac metal kalıplama yöntemine göre diğer avantajları daha hassas yüzeylere ve daha düşük geri esnemelere sahip sac metal parçaların

şekillendirilebilmesinin mümkün olmasıdır. Ancak yöntemin en önemli olumsuz yanı şekillendirme esnasında oldukça yüksek basınçlara gereksinim duyulması ve işlem süresinin daha uzun olmasıdır [15-18]. Yönteme özgü bu gibi dezavantajlar sac metal malzemelerin şekillendirilmesinde yeni bir yöntem ihtiyacını doğurmuştur. Bu ihtiyaçtan yola çıkarak sıvı basıncı ile şekillendirme yönteminin olumlu yanlarının yer aldığı, olumsuz yanlarının ise giderildiği plastik enjeksiyonla sac metal şekillendirme yöntemi geliştirilmiştir. Bu yeni yöntem sıvı basıncı ile şekillendirme ve plastik enjeksiyon proseslerinin her ikisini de bünyesinde barındırmaktadır. Böylece dar toleranslara sahip, karmaşık geometrili sac metal parçaların tek operasyonda, daha düşük basınç gereksinimi duyularak ve daha kısa işlem süresinde imalatı mümkün hale gelmiştir.

2.1 Geleneksel Derin Çekme Yöntemi

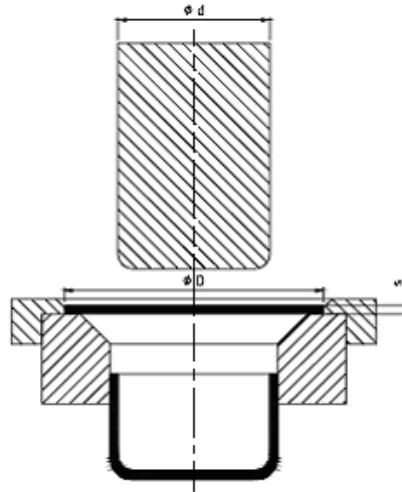
Silindirik yada düz sac levhaların elde edilmek istenilen parça formuna uygun kalıplar aracılığıyla, mekanik yada hidrolik preslerin altında belirli bir derinlik kazandırılmak suretiyle şekillendirilmesi işlemine “çekme” adı verilmektedir. Parçanın derinliği çapına göre daha büyük olduğunda, işlem “derin çekme” adını alır. Çekme işlemi imal edilecek parçanın şekline, boyutlarına ve kullanılan malzeme türüne göre farklı metotlar kullanılarak gerçekleştirilir. Çekme işlemlerini; baskı plakalı, baskı plakasız ve çevirme çekme olarak sınıflandırabiliriz [19-20].

Sac malzeme kalınlığının az olduğu veya çekme derinliğinin büyük olduğu durumlarda baskı plakalı çekme işlemi uygulanmaktadır (Şekil 2.1). Sac malzemeye baskı plakası tarafından uygulanan kuvvet ile şekillendirme sırasında oluşabilecek kırışıklıkların önüne geçilmesi amaçlanmaktadır.



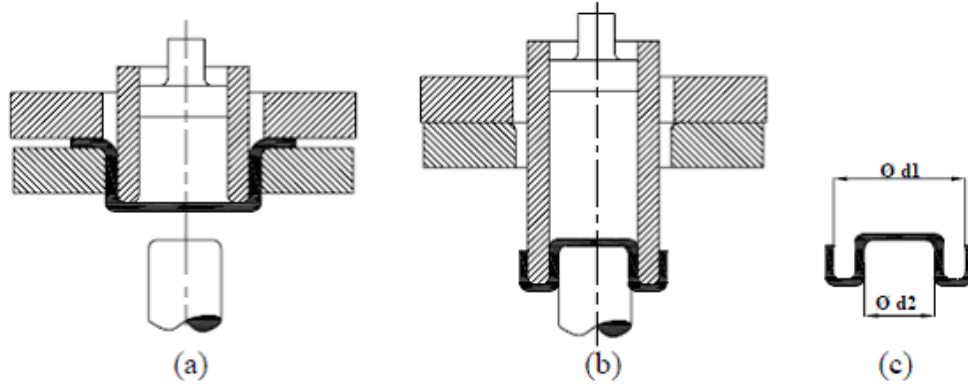
Şekil 2.1 Baskı plakalı çekme işlemi

Sac kalınlığının 4 mm' den büyük olduğu ve çekme derinliğinin az olduğu durumlarda ise baskı plakasız çekme işlemi uygulanır (Şekil 2.2). Çekme işlemi derin olmadığından şekillendirme sonrası malzemede kırışıklık görülmemektedir.



Şekil 2.2 Baskı plakasız çekme işlemi

Çevirme çekme yöntemiyle şekillendirmede, iki adet çekme zımbası bulunmaktadır. Kalıbın alt tarafında bulunan sabit zimba parçaya çapını vermektedir. Üst konumda yer alan zimba ilk çekme işlemini yaptıktan sonra ilk zımbanın aşağıya inmesiyle alt zimba devreye girerek parçayı ikinci kez çeker. Bu yöntem ile küresel ve konik parçaların imalatı mümkün olmaktadır (Şekil 2.3).



Şekil 2.3 Çevirme çekme yöntemi

2.2 Sıvı Basıncı İle Şekillendirme Yöntemi

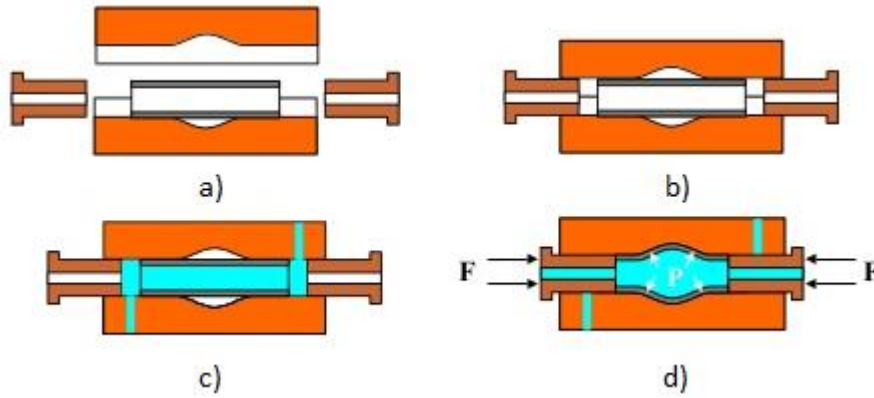
Sıvı basıncı ile şekillendirme işlemi, metalik malzemelerin istenilen formda elde edilmesinde şekillendirme elemanı olarak basınçlı akışkanın kullanıldığı bir imalat yöntemidir. Proseste kalıp yada zımbanın yerini yüksek basınçlı akışkan almaktadır. Uzay, havacılık ve otomotiv sanayi başta olmak üzere sac metal parçaların kullanıldığı bütün sanayi kollarında sıvı basıncı ile şekillendirme yöntemi ile karşılaşılabilmektedir. Sıvı basıncı ile şekillendirme yöntemi sacların ve tüp malzemelerin şekillendirilmesi olarak iki sınıfa ayrılmıştır.

- Tüp malzemelerin sıvı basıncı ile şekillendirilmesi
- Sac malzemelerin sıvı basıncı ile şekillendirilmesi
- Hidromekanik derin çekme
- Diyafram destekli hidrolik şekillendirme
- Hidrolik gerdirme yöntemi
- Birleştirilmiş esnetme ve derin çekme
- Çift kalıplı hidrolik şekillendirme

2.2.1 Tüp Malzemelerin Sıvı Basıncı İle Şekillendirilmesi

Tüp hidroforming yöntemi, iki ucu açık boru malzemenin iç yüzeyine uygulanan akışkan basıncıyla malzemenin şeklinin değiştirilmesine dayanır. Şekillendirme elemanı olarak zımba yerine yüksek basınç kazandırılmış akışkan sıvı kullanılmaktadır. Malzemeye

uygulanen iç basıncın etkisiyle boru duvarları genişterek kalıbın şeklini almaktadır. Bu genişleme aksenal yönde sıfırdır. Başlangıçta tüp daireselliğini korumakla beraber çapında büyüme meydana gelmektedir. Malzemenin tam şeklini alması için ise bir miktar daha basınç altında bekletilmektedir [21-22]. Şekil 2.4' de tüp malzemenin sıvı basıncı ile şekillendirme adımları gösterilmiştir.



Şekil 2.4 Tüp malzemeleri sıvı basıncı ile şekillendirme işlemi
a) Kalıp açık pozisyonda, b) Kalıbın kapanması, c) Akışkanın gönderilmesi,
d) Basınç arttırımı ile şekillendirme işlemi

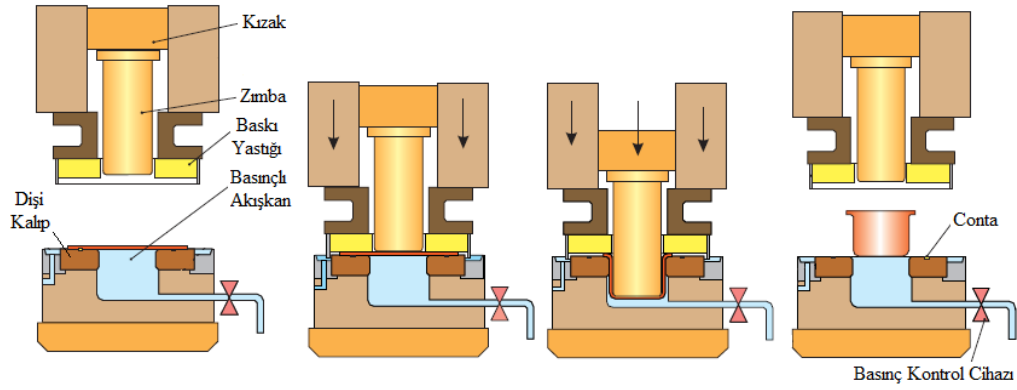
Tüp malzemelerin sıvı basıncı ile şekillendirilmesi yöntemi, karmaşık geometriye sahip parçaların üretiminde oldukça başarılı bir şekilde uygulanmaktadır. Özellikle otomotiv sektöründe kullanılan egzoz, yakıt tankı ve şase gibi karmaşık geometriye sahip parçalar tüp malzemelerin sıvı basıncı ile şekillendirmesi işleminin kullanılması ile beraber kolaylıkla imal edilebilmektedir [23].

2.2.2 Sac Malzemelerin Sıvı Basıncı İle Şekillendirilmesi

Sac malzemelerin sıvı basıncıyla şekillendirilmesi işleminde geleneksel derin çekme yönteminde kullanılan kalıp yada zımbanın yerini yüksek basınçlı akışkan almaktadır. Bu yöntemin kullanılmasıyla, sac malzemenin tüm yüzeyinde daha homojen bir uzamanın gerçekleşmesi sağlanmaktadır. Şekillendirme sonrası parçalarda meydana gelen geri esneme miktarları oldukça düşük ve proses süresi geleneksel sac metal kalıplama yöntemine göre daha kısadır [15]. Sıvı basıncı ile sac malzemelerin şekillendirilmesinde farklı yöntemler kullanılmaktadır. Bu yöntemler hidromekanik derin çekme, diyafram destekli hidrolik şekillendirme, hidrolik esneterek şekillendirme, birleştirilmiş esnetme ve derin çekme ve çift kalıplı hidrolik şekillendirme olarak isimlendirilmektedir.

2.2.2.1 Hidromekanik Derin Çekme Yöntemi

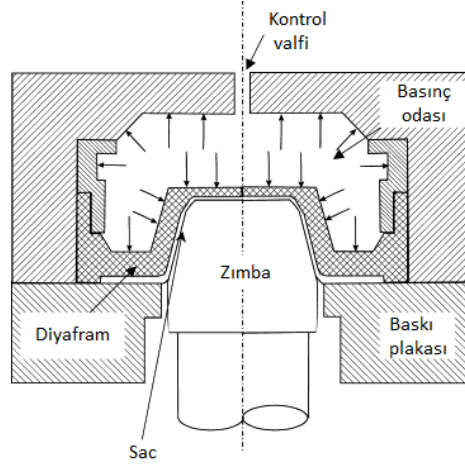
Hidromekanik derin çekme işlemi, sıvı basıncıyla şekillendirme ve geleneksel derin çekme yöntemlerinin her ikisinin de özelliklerini barındıran bir sac metal şekillendirme yöntemidir. Yöntemde şekillendirme zımbası yüksek basınçlı akışkan ile doldurulan sıvı odasına doğru hareket eder. Zımbanın sıvı odasına girmesiyle beraber akışkanın basıncı artmaya başlar. O esnada sac malzeme hareket etmekte olan çekme zımbasına doğru preslenmektedir. Sıvı odasında bulunan akışkan basıncının etkisiyle de sac malzeme zımbayı sarmaya zorlanarak malzemenin istenilen şekli alması sağlanır [15][24]. Şekil 2.5' de sac metal malzemenin hidromekanik derin çekme yöntemi ile şekillendirme adımları gösterilmiştir.



Şekil 2.5 Hidromekanik derin çekme işlemi

2.2.2.2 Diyafram Destekli Hidrolik Şekillendirme Yöntemi

Diyafram destekli hidrolik şekillendirme yönteminde, sıvı ile çevrelenmiş bir hazne diyafram ile kapatılmıştır. Diyafram yüzeyi baskı plakası ve kalıp görevini görmektedir. Şekillendirme zımbası sıvı ile çevrelenmiş basınçlı alana girerek şekillendirme işlemini gerçekleştirmektedir [25] (Şekil 2.6).

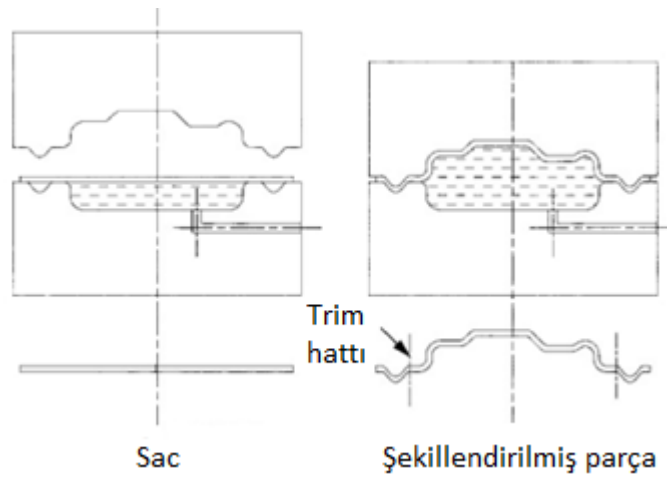


Şekil 2.6 Diyafram destekli hidrolik şekillendirme işlemi

Yöntem ile az sayıdaki parçanın düşük maliyetle üretilmesi mümkündür. Ayrıca geleneksel derin çekme prosesine göre daha iyi yüzey kalitesi elde edilmektedir.

2.2.2.3 Hidrolik Gerdirme Yöntemi

Hidrolik gerdirme yönteminde, sac malzeme kalıp yarımının üzerine konulduktan sonra baskı plakası tarafından sıkıştırılmakta ve süzdürme kanalları ile sıkıca kilitlemektedir. Alt veya üst kalıbın kalıp boşluğu dışında veya süzdürme kanalı girişi boyunca sızdırmazlığın sağlanmasının ardından sıvı odasındaki basınç arttırılarak şekillendirme işlemi tamamlanmaktadır. Proses sonu elde edilen çekme derinliği, kullanılan malzemenin şekillendirilebilirlik kabiliyetine göre değişmektedir [15]. Şekil 2.7’de yöneme ait çekme işleminin görüntüsü verilmiştir.

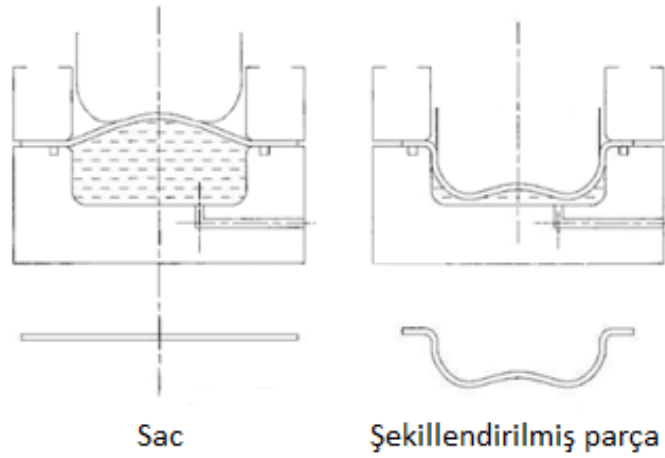


Şekil 2.7 Hidrolik gerdirme yöntemi

2.2.2.4 Birleştirilmiş Esnetme ve Derin Çekme

Hidrolik gerdirme ve hidromekanik derin çekme yöntemlerinin bileşiminden meydana gelen bir şekillendirme işlemidir. Bu yöntemde sac malzeme ilk olarak bir ön akışkan basıncına tabi tutularak bir miktar şişirilmektedir. Şişirme işlemi sonrası, malzeme aşağı yönlü hareket eden zımba tarafından şekillendirilerek son şeklini almaktadır [26] (Şekil 2.8).

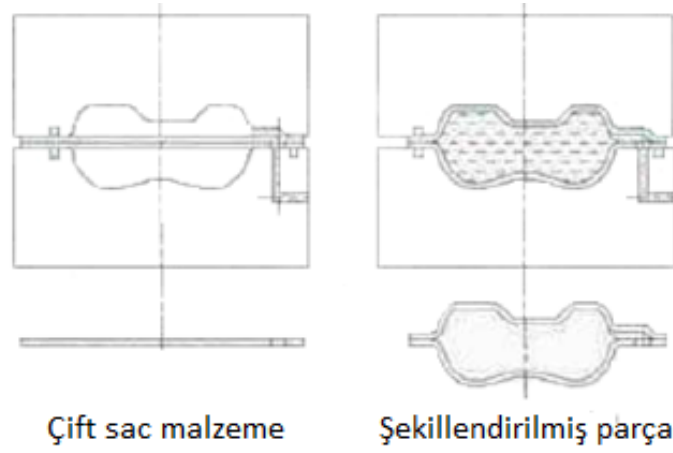
Yöntem ile daha rijit ve daha yüksek darbe dayanımı gerektiren kaporta gibi düz otomotiv parçalarının imalatı gerçekleştirilmektedir.



Şekil 2.8 Birleştirilmiş Esnetme ve Derin Çekme

2.2.2.5 Çift kalıplı hidrolik şekillendirme

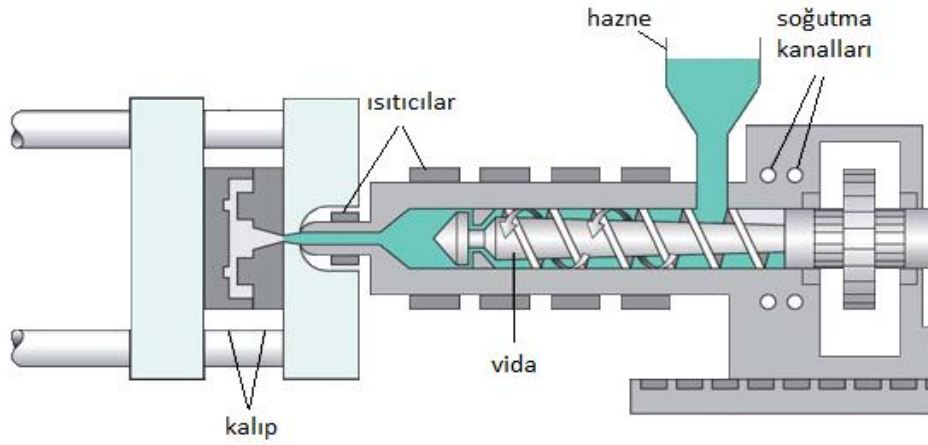
Çift kalıplı hidrolik şekillendirme yönteminde çevrelerinden kaynak işlemi uygulanarak birleştirilmiş iki sac metal malzeme alt ve üst kalıp arasına yerleştirilmektedir. Birleştirilmiş olan iki sac malzemenin arasına yüksek basınçlı akışkan gönderilerek, malzemenin alt ve üst kalıp cidarlarına genişlemesi sağlanır ve şekillendirme işlemi tamamlanır [15] (Şekil 2.9).



Şekil 2.9 Çift kalıplı hidrolik şekillendirme

2.3 Plastik Enjeksiyon Yöntemi

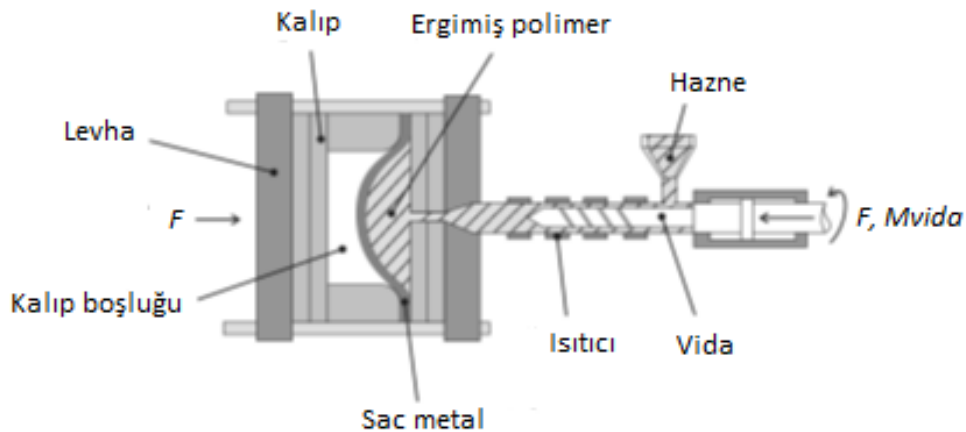
Plastik enjeksiyon, sıcaklık yardımı ile eritilmiş plastik hammaddenin bir kalıp içine enjekte edilerek şekillendirilmesi ve soğutularak kalıptan çıkarılmasını içeren bir imalat yöntemidir. İşlem kapama, enjeksiyon, ütüleme, soğutma ve kalıbın açılarak iticiler yardımıyla bitmiş parçanın alınması aşamalarından oluşur. Şekillendirme işlemini gerçekleştiren temsili bir enjeksiyon makinesi Şekil 2.10' da gösterilmiştir. Bir enjeksiyon makinesi kapama ünitesi, enjeksiyon ünitesi ve kalıp olmak üzere üç ana parçadan meydana gelmektedir. Mengene diye tabir edilen kapama ünitesi, enjeksiyon ve soğutma esnasında kalıba basınç uygulayarak açılmasını önleyen bölümdür. Enjeksiyon aşamasında, granül halde bulunan plastik malzeme hazneye dökülerek, vida yardımıyla rezistanslı ısıtıcılar ile ısıtılan silindir içerisine alınır. Sıcaklık ve basınç altında ergiyen plastik malzeme vidanın hareketiyle silindirin sonuna kadar iletilir. Ergimiş plastik malzeme, makinenin ucunda yer alan bir meme aracılığıyla kalıp içerisine gönderilir. Enjeksiyon işleminin tamamlanmasının ardından parçanın istenilen ölçülerde olması amacıyla ütüleme işlemi uygulanır. Ütüleme işlemi sonrası kalıp içerisinde sertleşen bitmiş ürün kalıbın açılması ile beraber iticiler vasıtasıyla dışarı alınır ve şekillendirme işlemi tamamlanmış olur. Proses esnasında parça ve kalıbın soğutulması için de su kanalları kullanılmaktadır [27].



Şekil 2.10 Plastik enjeksiyon yöntemi

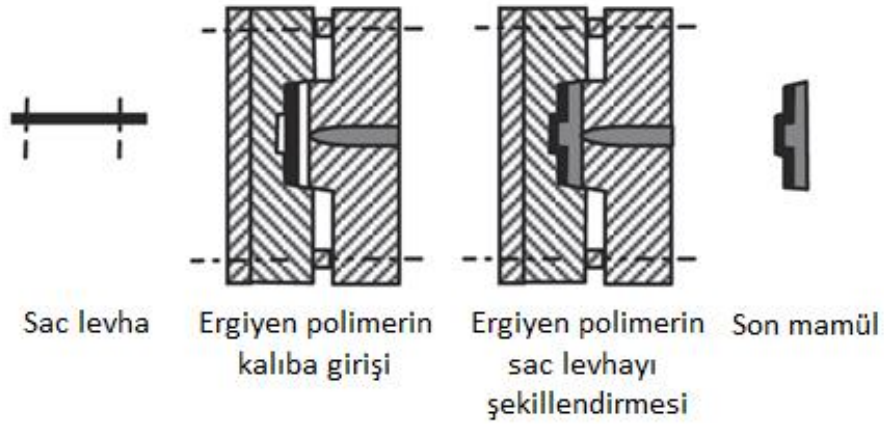
2.4 Plastik Enjeksiyonla Sac Metal Şekillendirme Yöntemi

Plastik enjeksiyonla sac metal şekillendirme yöntemi günümüzde kullanımı giderek artmakta olan yeni bir uygulamadır. Bu metot, otomotiv, havacılık ve uzay endüstrisinde hafif, hassas, estetik ve fonksiyonel parçaların imalatında geleneksel derin çekme ve sıvı basıncı ile şekillendirme metoduna alternatif olarak tercih edilmektedir. Plastik enjeksiyonla şekillendirme yöntemi sıvı basıncı ile şekillendirme ve plastik enjeksiyon proseslerinin her ikisini de bünyesinde barındırmaktadır. Proses ekipmanları hazne, ısıtıcı, vida bölümlerini içeren ve ergitilen polimere yüksek basınç kazandıran plastik enjeksiyon makinesinden ve sac metalin istenilen formda şekillendirilmesini sağlayan tek taraflı kalıptan oluşmaktadır. Yöntemde yüksek basınçlı akışkan olarak sıvı basıncıyla şekillendirme işleminde kullanılan yağ yerine plastik enjeksiyon makinesinde ergitilen polimer malzeme kullanılmaktadır (Şekil 2.11).



Şekil 2.11 Plastik enjeksiyon kalıplama yöntemi ile sac şekillendirme

Geleneksel derin çekme prosesinde birkaç adımda gerçekleşen bir parçanın imalatı plastik enjeksiyon kalıplama yöntemiyle tek operasyonda gerçekleştirilebilmektedir. Şekil 2.12’ de plastik enjeksiyonla sac metal şekillendirme yönteminin aşamaları gösterilmiştir.



Şekil 2.12 Plastik enjeksiyon kalıplama ile şekillendirme aşamaları

Plastik enjeksiyon kalıplama ile şekillendirme yönteminde enjeksiyon makinesinde ergitilen polimer malzeme, vida yardımıyla yüksek basınç kazanarak kalıba gönderilir. Tek taraflı kalıp üzerinde bulunan sac plaka ergiyen yüksek basınçlı polimer tarafından kalıp boşluğunun şeklini almaya zorlanır. Şekillendirme işleminin tamamlanmasının ardından sac parça ile katılaştıran polimer malzeme birbirinden ayrılarak istenilen hassas ve dar toleransa sahip parçalar imal edilmiş olur [28].

Çalışmada kullanılan plastik enjeksiyonla sac metal şekillendirme yöntemi ile daha düşük maliyetli ve daha rijit olan karmaşık geometrili sac metal parçaların hassas bir şekilde imalatı mümkün hale gelmiştir.

MALZEME VE METOT

3.1 Malzeme

Otomotiv, havacılık ve uzay endüstrisinde hafif ve şekillendirilebilme kabiliyeti yüksek malzemeler oldukça sık kullanılmaktadır. Bu malzemeler arasında bulunan alüminyum uzay ve havacılık sanayii için vazgeçilmez bir yere sahiptir. Alüminyumun aranan ve tercih edilen bir malzeme olmasının nedenlerini şu şekilde sıralayabiliriz;

Alüminyumun yoğunluğu ($2,71 \text{ g/cm}^3$), çeliğin ise ($7,83 \text{ g/cm}^3$) olduğundan hafifliğin arandığı otomotiv, uzay ve havacılıkta alüminyum ve alaşımları sıklıkla kullanılmaktadır.

Kübik yüzey merkezli kafes yapısına sahip olan alüminyumun sıcak ve soğuk şekillendirilebilme kabiliyetinin oldukça iyi olması sebebiyle karmaşık ve dar toleranslı parçaların imalatı kolaylıkla mümkün hale gelmektedir.

Korozif ortamlarda alüminyumun yüzeyi ince bir oksit tabakası ile kaplanarak, malzemenin korozyona karşı dayanımını arttırmaktadır. Adı geçen sanayii kollarına ait parçaların sürekli korozif bir ortama maruz kalmaları nedeniyle alüminyumun yüksek korozyon dayanımına sahip olması kendisini tercih edilen bir malzeme türü haline gelmesine sebep olmuştur.

Alüminyum otomotiv endüstrisinde taşıt gövde panellerinin imalatında uzun zamandır kullanılmaktadır. Orta sınıf bir sedan otomobilin kaputunun imalatında alüminyumun kullanılmasıyla %40-60 arası ortalama 11 kg lık ağırlık kazanımı gerçekleşmektedir. Bu ağırlık kazanımı, araçların belirli bir ağırlık sınıfında kalarak ABS ve hava yastığı gibi yeni donanımları bulundurabilmesine olanak sağlamıştır.

Endüstriye en fazla katkının sağlanabilmesi ve bu sanayi kollarında oldukça sık kullanılan alüminyumun plastik enjeksiyon kalıplama yöntemiyle şekillendirilmesi neticesinde nasıl bir davranış sergileyeceği hakkında elde edilen yeni bilgileri literatüre kazandırabilmek amacıyla deneysel çalışmalarımızda 1000 serisi Al-1050.O malzemesi tercih edilmiştir. Malzemeye ait kimyasal analiz sonuçları Çizelge 3.1’ de verilmiştir.

Çizelge 3.1 Al-1050.O kimyasal analiz sonuçları (%Hacim)

Al	Cu	Fe	Mg	Mn	Si	Ti	Zn
99.5	0.05	0.4	0.05	0.05	0.25	0.03	0.07

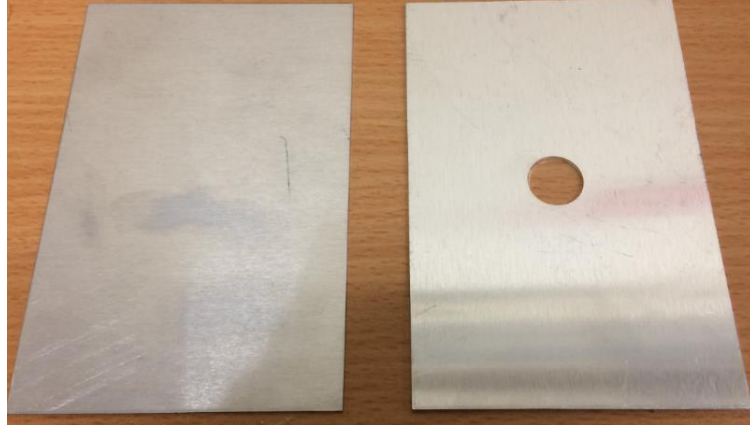
Kimyasal analiz sonuçlarına bakıldığında, malzemenin %99.5 saflığında olduğu görülmektedir. Bileşenin geri kalan yüzdelik kısmını ise farklı metaller oluşturmaktadır.

Malzemenin şekillendirilebilirliği üzerinde etkili olan alüminyuma ait mekanik özellikler Çizelge 3.2’ de verilmiştir. Malzemenin kalıcı şekil değiştirebilmesi için akma sınırına ulaşması gerekmektedir. Akma mukavemetinin yüksek olması o malzemenin şekillendirilmesinin zor olduğunu göstermektedir. Çizelge 3.2 incelendiğinde Al-1050.O malzemesinin akma mukavemetinin düşük olması sebebiyle kolay şekillendirilebilir olduğu görülmektedir.

Çizelge 3.2 Al-1050.O mekanik özellikleri

Akma Mukavemeti (MPa) min-max	Çekme Mukavemeti (MPa) min-max	Uzama (%50)	Sertlik (Brinell)
20-35	65-80	38	20-21

Deneysel çalışmalar 1.5 mm kalınlığındaki delikli ve deliksiz sac plakalar kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.1). Delikli plakalar polimer malzemenin yolluk girişinin olduğu taraftaki kalıp yarısı üzerine yerleştirilmektedir. Deliksiz plakalar ise kalıp boşluğunun yer aldığı dişi kalıp üzerine oturtulmaktadır. Plakaların boyutları 76 mm x 116 mm’ dir.



Şekil 3.1 Deneysel çalışma plakaları

Deneysel çalışmalarda şekillendirme işlemini gerçekleştiren polimer malzemesi olarak polistiren tercih edilmiş ve çalışmada kullanılan polistirene ait özellikler Çizelge 3.3' te verilmiştir. Polistiren, monomer haldeki stirenden polimerizasyon ile üretilen bir termoplastiktir. Plastik endüstrisinde PS olarak bilinmektedir. Oda sıcaklığında katı halde bulunmaktadır, fakat enjeksiyon prosesi esnasında yüksek sıcaklıklarda ergiyik hale gelmektedir. Yoğunluğu ise 1,03-1,06 g/ml aralığında değişmektedir.

Polimer malzemesi olarak polistirenin tercih edilmesinde birçok parametre etkilidir. Bunların başında polistirenin düşük ergime noktasına sahip olması gelmektedir. Malzemenin ergime sıcaklığı 210-250 °C aralığındadır. Polistirenin amorf bir yapıya sahip olmasından ötürü, işlem esnasında kendini çekmesi kısmi kristalin olan polimerlere göre daha düşüktür. Bu da sac metalin şekillendirilmesini daha etkili kılmaktadır. Ayrıca polistiren enjeksiyon yönteminde çok yaygın olarak kullanılan, kolaylıkla ulaşılabilen ve çok pahalı olmayan bir plastik türüdür [29].

Çizelge 3.3 Polistiren yoğunluk ve ergime sıcaklığı

Kimyasal formül	Yoğunluk (g/ml)	Ergime sıcaklığı (°C)
$(C_8H_8)_n$	1,03-1,06	210-250

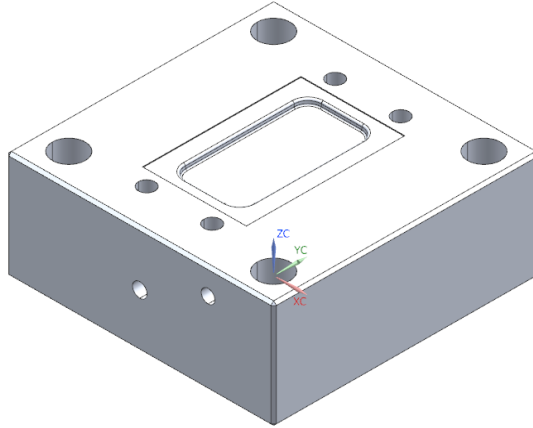
3.2 Metot

Plastik enjeksiyonla sac metal şekillendirme yöntemi kullanılarak farklı proses parametrelerinin şekillendirilebilirlik üzerine etkilerini görebilmek amacıyla yapılan bu çalışmada şu işlem adımları takip edilmiştir;

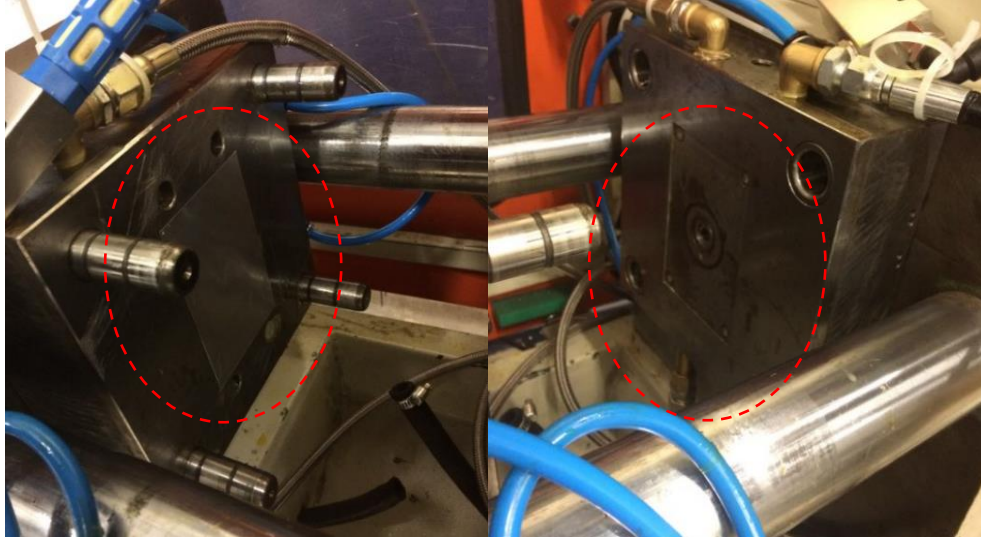
- Sac metal plakaların şekillendirilmesi
- Şekillendirilen plakaların incelme oranlarının belirlenmesi
- Şekillendirme sonrası malzeme sertlik değişimlerinin incelenmesi

3.2.1 Şekillendirme Prosesi

Plastik enjeksiyonla sac metal şekillendirme işleminde tek taraflı kalıp kullanılması, kalıp maliyeti, işçiliği ve bakımı açısından üreticiye avantaj sunmaktadır. Geleneksel derin çekme yönteminde alt ve üst kalıp gereksiniminin olması tercihi plastik enjeksiyonla şekillendirme yöntemine kaydırmaktadır. Deneysel çalışmalarda kullanılan kalıp ve boyutları Şekil 3.2-3.4’ de verilmiştir. Parçanın hassas bir şekilde imal edilebilmesi için kalıp boşluğunun oldukça iyi işlenmesi ve yüzeyinin çok iyi parlatılması gerekmektedir.



Şekil 3.2 Kalıbın katı modeli

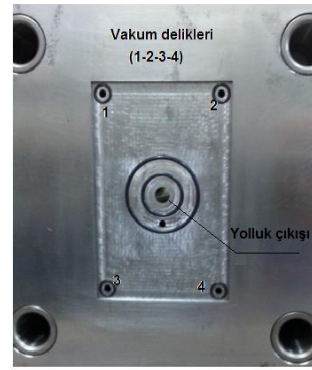


a)

b)

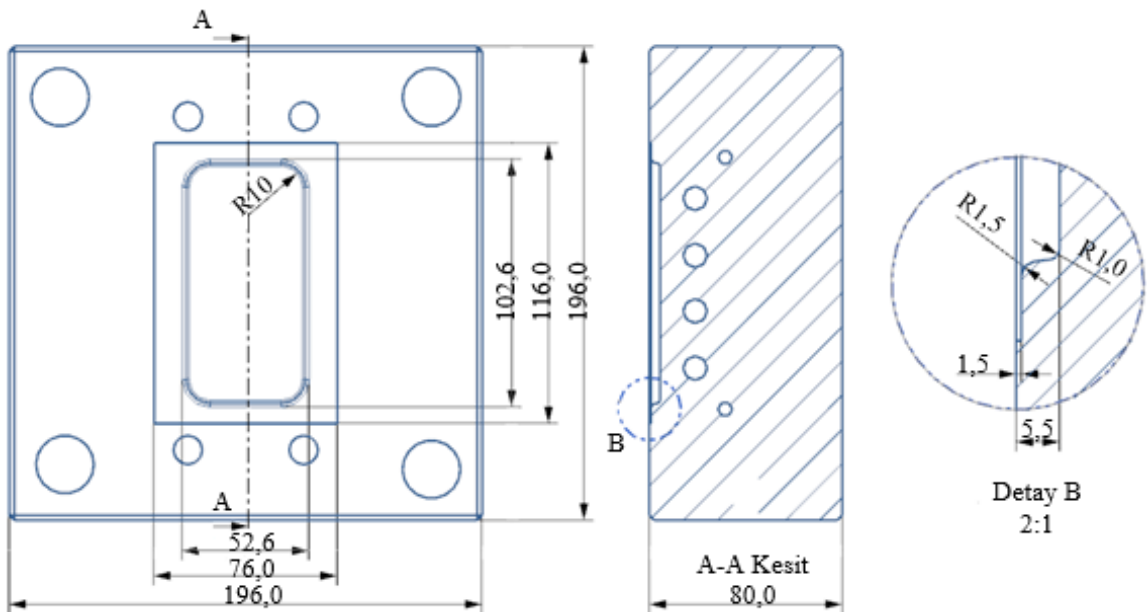


Detay a



Detay b

Şekil 3.3 Kalıp detayları
a) Dişi kalıp b) sabit kalıp



Şekil 3.4 Kalıbın boyutları (mm)

Çalışmada enjeksiyon makinesinde ergitilen polimer, vidanın dönme hareketiyle yüksek basınç kazanarak kalıba iletilir. Dişi kalıp üzerinde yer alan sac metal plaka ergiyen yüksek basınçlı polimer malzeme tarafından şekil değiştirmeye zorlanır. Plakanın kalıp boşluğunun şeklini alması ile şekillendirme işlemi sona erer. İşlemden Şekil 3.5 'de yer alan 40 tonluk plastik enjeksiyon makinesi kullanılmıştır.



Şekil 3.5 Deneysel çalışmada kullanılan plastik enjeksiyon makinesi

Plastik enjeksiyonla sac metal şekillendirme yöntemine ait daha önceki literatür çalışmaları incelendiğinde ergiyik polimer malzemesinin kalıba giriş sıcaklığının, enjeksiyon basıncının ve proses hızının şekillendirilebilirliği, kalınlık ve malzeme iç yapı değişimlerini oldukça etkilediği görülmektedir [3]. Deneysel çalışmalarda bu nedenle kontrol faktörleri olarak; enjeksiyon basıncı, ergiyik polimer sıcaklığı ve enjeksiyon hızı tercih edilmiştir. Bu faktörlere ait seviyeler Çizelge 3.4' te gösterilmiştir. Deneysel tasarım olarak Taguchi metodu kullanılarak daha az sayıda deney sonucunda optimum proses parametrelerinin belirlenmesi sağlanmıştır. Çalışmada L_9 ortogonal matrisi esas alınarak deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir (Çizelge 3.5).

Çizelge 3.4 Kontrol faktörleri ve seviyeleri

Kontrol Faktörleri	Sembol	Seviyeler			Birim
		Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3	
Enjeksiyon Basıncı	A	40	60	80	Mpa
Ergiyik Sıcaklığı	B	200	220	240	°C
Enjeksiyon Hızı	C	30	32	34	(%)

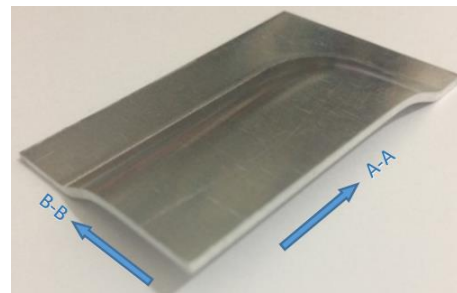
Çizelge 3.4' te görüldüğü gibi her kontrol faktörüne ait üçer seviye bulunmaktadır. Enjeksiyon basıncı olarak 40, 60 ve 80 MPa, ergiyik sıcaklığı olarak 200, 220 ve 240 °C ve enjeksiyon hızı olarak 30, 32 ve 34 (%) değerleri deneysel çalışmalarda kullanılmıştır.

Çizelge 3.5 L₉ ortogonal matrisi

Deney No	Semboller			Kontrol Faktörleri		
	A	B	C	Basınç [Mpa]	Sıcaklık [°C]	Hız [%]
1	1	1	1	40	200	30
2	1	2	2	40	220	32
3	1	3	3	40	240	34
4	2	1	2	60	200	32
5	2	2	3	60	220	34
6	2	3	1	60	240	30
7	3	1	3	80	200	34
8	3	2	1	80	220	30
9	3	3	2	80	240	32

3.2.2 İncelme Oranlarının Belirlenmesi

Şekillendirme sonrası imal edilen parçaların kalınlık değerleri frezeleme yöntemiyle dört eşit parçaya bölünerek parçanın iki kesiti boyunca ölçülmüştür: profil A, uzun kesit (A-A) ve profil B, kısa kesit (B-B), (Şekil 3.6). Ölçme işlemleri optik mikroskop kullanılarak % 0,01 hassasiyetinde gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.6 Parça üzerindeki A-A ve B-B kesitleri

Alüminyum sac metal malzemesinin şekillendirilmesi sonucunda parçanın formunda yırtılma veya tolerans sınırları içerisinde aşırı incelme olmaması kaydıyla sac kalınlığına bağlı olarak maksimum şekillendirmeyi elde etmek amacıyla proses sonu meydana gelen incelme miktarının en fazla olması istenmektedir. 1,5 mm sac kalınlığındaki plakalar ile gerçekleştirilen deneyler ve ölçümler neticesinde parça formunda herhangi bir yırtılma ya da aşırı incelme durumuyla karşılaşılmasından dolayı deneysel tasarımda yer alan sinyal/gürültü (S/N) oranının hesaplanmasında “Daha büyük daha iyi” ifadesini temsil eden 1 nolu denklem esas alınmıştır. “1” nolu denklemde n deney sayısını, y_i de elde edilen i. veriyi ifade etmektedir [30].

$$S/N = -10 \cdot \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 1/y_i^2 \right) \quad 3.1$$

3.2.3 Şekillendirme Sonrası Sertlik Ölçümü

Farklı proses parametrelerinin şekillendirilmiş parçaların sertlikleri üzerine etkilerini görebilmek amacıyla sertlik ölçme işlemleri gerçekleştirilmiştir. İşlemde rockwell sertlik ölçme yöntemi kullanılmıştır. Yöntem koni ya da küre biçiminde bir ucun belli bir yük ile numunelere uygulanması ve bunun neticesinde numunelerin üzerinde meydana gelen izin derinliğinden yararlanılarak sertlik değerlerinin ölçülmesine dayanmaktadır (Şekil 3.8).

Sertlik ölçümleri için ilk olarak numunelerin yüzeyleri kir, pas ve yağ gibi yabancı maddelerden arındırılmıştır. Temizleme işleminde sülfürik asit, , nitrik asit vb. kimyasal maddeler kullanılmıştır.



Şekil 3.7 Rockwell sertlik ölçme yöntemi

Sertlik ölçümünde kullanılacak olan batıcı ucun seçimi ve uygulanacak basıncın değeri malzemenin cinsine göre tablolardan yararlanılarak tespit edilmiştir. Çalışmada kullanılacak olan batıcı ucun cinsi ve basıncın değeri Çizelge 3.6’ da verilmiştir.

Çizelge 3.6 Rockwell sertliğinde malzeme cinsine göre kullanılan uç ve uygulama kuvveti

Sembolü	Sertlik Ölçme Ucu	Ön Yükleme Kuvveti P_0 , Kg	Toplam Yük P , Kg
HR _B	1/16 Bilya	10	100

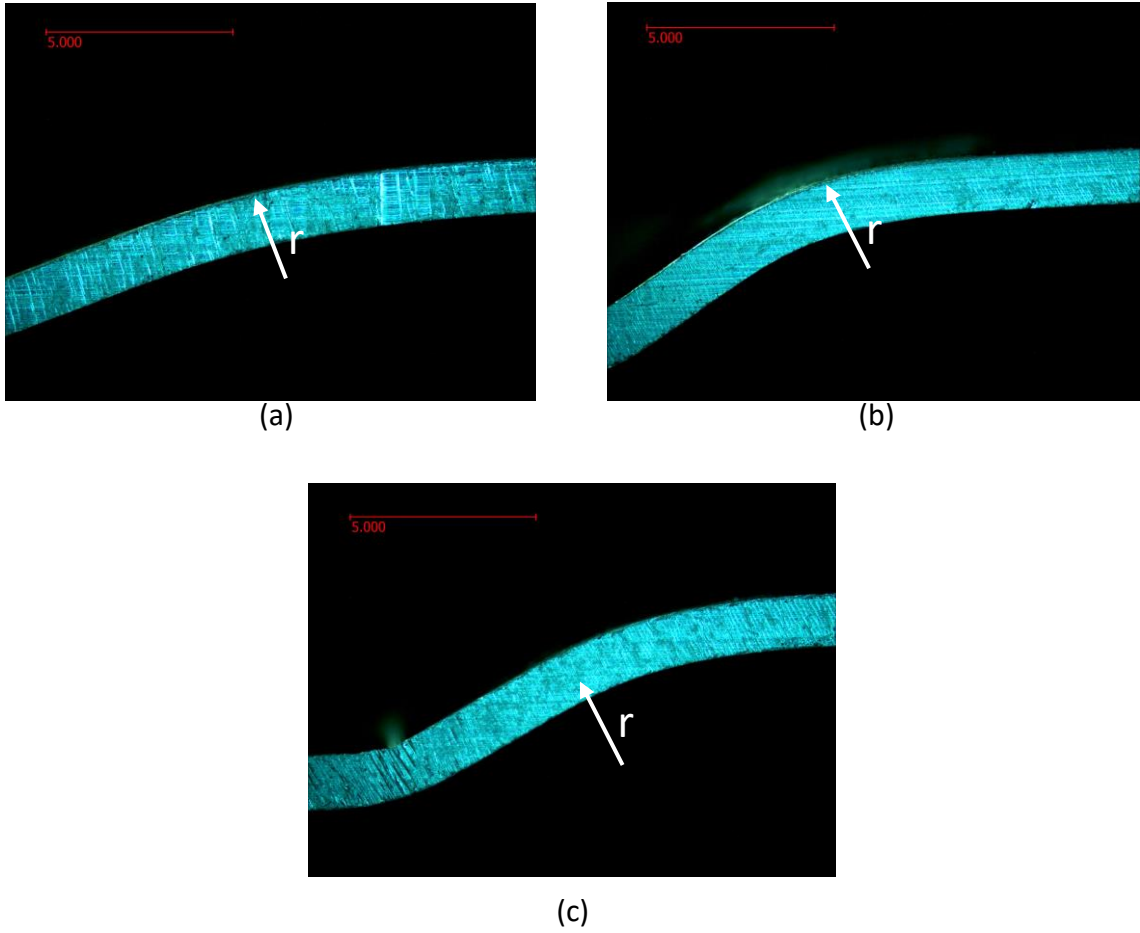
Batıcı uç ve basıncın seçiminin ardından malzemeye ilk olarak 10 kg’ lık ön yük uygulanmıştır. Ön yükün uygulanması ile baskı ucu malzeme üzerine oturur ve onu yerinde tutar. Daha sonra numuneye 90 kg’ lık ana yük tatbik edilmiştir. Belirli bir süre beklenildikten sonra ana yükün kaldırılması ile ekrandan okunan değer malzemenin sertlik değerini vermiştir. Ölçüm sonucunun güvenilir ve doğru olması amacıyla numunelerin enine ve boyuna olmak üzere çok sayıda noktasından sertlik ölçme işlemi tekrar edilmiştir.

DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA**4.1 Şekillendirme Değerlendirmeleri**

Farklı proses parametreleri kullanılarak gerçekleştirilen deneysel çalışmalar neticesinde dengeli basınç dağılımı ve şekillendirilebilirliğin elde edilebilmesi için yüksek basınç, sıcaklık ve enjeksiyon hızına ihtiyaç duyulmaktadır [10]. Enjeksiyon basıncı ve ergiyik sıcaklığının artmasıyla şekillendirilebilirliğin arttığı ve basıncın şekillendirme üzerinde etkili proses parametresi olduğu sonucuna ulaşılmıştır [3]. L_9 ortogonal matrisi esas alınarak gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda proses parametrelerinin şekillendirme üzerine etkilerini görebilmek amacıyla şekillendirilmiş parçaların köşe yarıçapları (radyüs) değerleri ölçülerek Çizelge 4.1’ de verilmiştir. Ölçümler neticesinde artan parametre değerlerine bağlı olarak radyüs değerlerinin küçüldüğü ve parça formlarının daha net olarak elde edildiği görülmüştür (Şekil 4.1).

Çizelge 4.1 Proses parametrelerine bağlı olarak parça radyüslerinin değişimi

Deney No	Semboller			Kontrol Faktörleri			Parça radyüs değerleri [mm]
	A	B	C	Basınç [Mpa]	Sıcaklık [°C]	Hız [%]	
1	1	1	1	40	200	30	31,25
2	1	2	2	40	220	32	23,75
3	1	3	3	40	240	34	15,00
4	2	1	2	60	200	32	22,50
5	2	2	3	60	220	34	13,75
6	2	3	1	60	240	30	16,87
7	3	1	3	80	200	34	12,50
8	3	2	1	80	220	30	11,25
9	3	3	2	80	240	32	11,25



Şekil 4.1 Proses sonu parça radyüs formları (a) 1 no'lu deney (b) 5 no'lu deney (c) 9 no'lu deney

Şekil 4.1' de 1,5 ve 9 nolu deneyler sonucunda elde edilen parça formlarına ait radyüs görüntüleri yer almaktadır. Artan basınç, sıcaklık ve hız değerlerine karşılık, parça radyüslerinin daha keskin olarak oluştuğu, bir diğer deyişle daha yüksek oranda şekillendirilmenin meydana geldiği görülmüştür.

Şekillendirme sonrası parçalarda meydana gelen kalınlık değişimleri incelendiğinde, plaka kalınlığının parçaların flanj bölgelerinde diğer bölgelere oranla daha fazla azaldığı görülmüştür (Şekil 4.2). Ancak çalışmada kullanılan 1,5 mm kalınlığındaki plakaların şekillendirilmeleri neticesinde parça formlarında aşırı incelme ya da yırtılma gibi herhangi bir olumsuz durumla karşılaşılmamıştır. Daha ince sac kalınlığına sahip malzemelerin kullanıldığı literatür çalışmaları incelendiğinde ise, aynı proses şartlarında gerçekleştirilen şekillendirme işlemlerinde, proses sonu parça formlarında aşırı incelme ve yırtılma gibi istenmeyen problemlerle karşı karşıya kalınmıştır (Şekil 4.3). Buradan

sac malzeme kalınlığının proses parametrelerinin seçiminde önemli bir etken olduğu ve maksimum şekillendirilebilirliğin elde edilebilmesi için kullanılacak parametrelerin sac kalınlığına bağılı olarak hassas bir şekilde seçiminin, şekillendirme sonrası meydana gelebilecek problemlerin en aza indirilmesinde önemli bir yere sahip olduğu çalışmalar neticesinde görülmüştür [31].



Şekil 4.2 Parça üzerindeki kalınlık değişimleri



Şekil 4.3 Parça formunda yırtılma

Şekil 4.2 incelendiğinde, şekillendirme sonrası plaka kalınlığında meydana gelen en yüksek incelme miktarı A bölgesinde yer almaktadır. Parametre değerlerinin artmasına bağılı olarak ise Şekil 4.3' te gösterilen 0,5 mm kalınlığındaki şekillendirilmiş alüminyum sacın flanj bölgelerinde yırtılma görülmektedir.

Deneysel çalışmalar sonucunda, enjeksiyon hızının artmasına bağılı olarak şekillendirme miktarının arttığı gözlemlenmiştir. Ancak yüksek enjeksiyon hızlarına çıkıldığında proses esnasında çapak oluşumu meydana gelmektedir (Şekil 4.4). İşlemden önce çapak oluşumunun

istenilmemesi sebebiyle enjeksiyon hızının belirli bir noktadan sonra arttırılması uygun görülmemektedir.



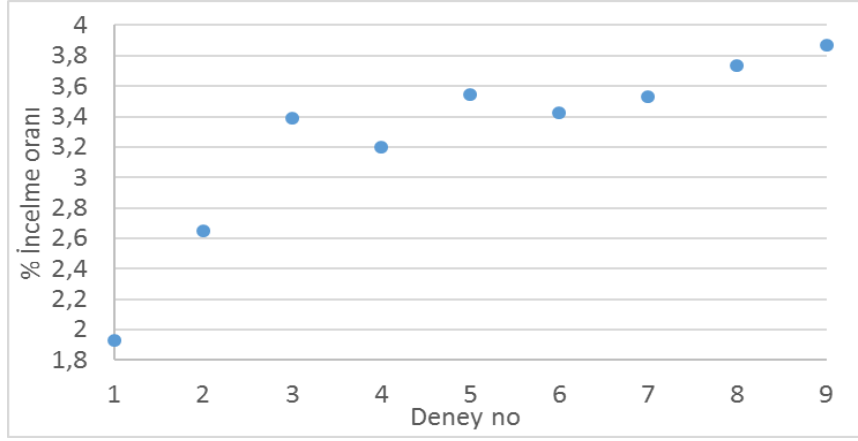
Şekil 4.4 Yüksek enjeksiyon hızı sebebiyle meydana gelen çapak oluşumu

4.1.1 İncelme Değerlendirmeleri

“En büyük en iyidir” yaklaşımına göre hesaplanmış S/N oranlarına ait değerler Çizelge 4.2’ de sunulmuştur. Deneysel sonuçlar neticesince ölçülen incelme değerlerinin yorumlanması ile S/N oranlarına bağlı olarak optimum proses parametreleri elde edilmiştir. Ölçüm sonuçlarının ortalamaları alınarak % incelme değişimleri hesaplanmıştır (Şekil 4.5).

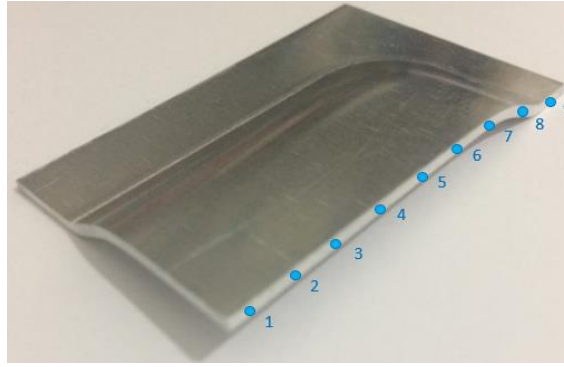
Çizelge 4.2 Çalışmada kullanılan L9 ortogonal dizisi, faktörler, incelme (%) ölçüm sonuçları ve S/N oranları

Deney No	Semboller			Kontrol Faktörleri			Son Kalınlık Ortalaması [mm]	% İncelme	S/N
	A	B	C	Basınç [Mpa]	Sıcaklık [°C]	Hız [%]			
1	1	1	1	40	200	30	1,4710	1,933	5,7246
2	1	2	2	40	220	32	1,4603	2,647	8,4551
3	1	3	3	40	240	34	1,4492	3,387	10,5963
4	2	1	2	60	200	32	1,4520	3,200	10,1030
5	2	2	3	60	220	34	1,4468	3,547	10,9972
6	2	3	1	60	240	30	1,4486	3,427	10,6983
7	3	1	3	80	200	34	1,4470	3,533	10,9629
8	3	2	1	80	220	30	1,4440	3,733	11,4412
9	3	3	2	80	240	32	1,4420	3,867	11,7475

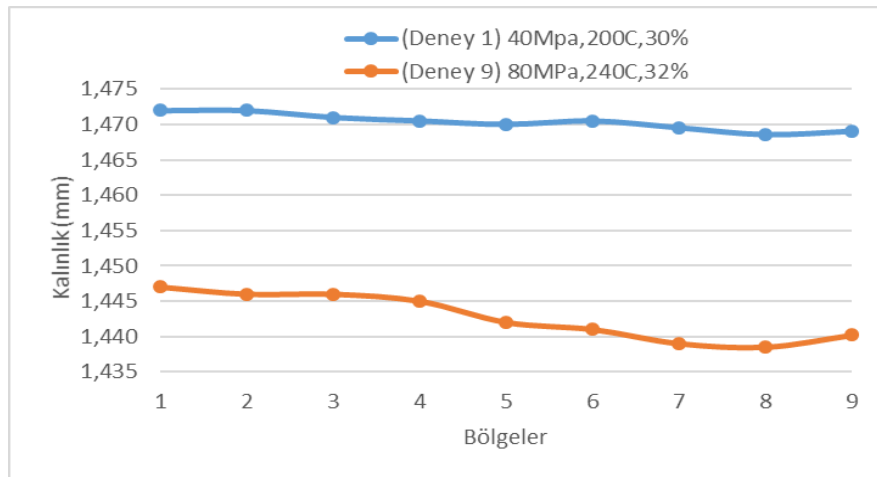


Şekil 4.5 1,5 mm kalınlığına sahip alüminyum plakaların A-A ve B-B kesitleri boyunca meydana gelen % incelme değişimleri

Şekillendirme sonrası parçaların kesitleri boyunca farklı bölgelerinde meydana gelen kalınlık değişimlerini görebilmek amacıyla en düşük incelme oranı ve en yüksek incelme oranını veren 1 ve 9 nolu deneylere ait ölçüm sonuçları incelenmiştir (Şekil 4.6).



(a)



(b)

Şekil 4.6 Kalınlık Değişimleri (a) Ölçüm alınan bölgeler (b) 1 ve 9 nolu deneyler için kalınlık değişimlerinin dağılımı

Şekil 4.6 incelendiğinde şekillendirilmiş parçaların farklı bölgelerinden ölçülen kalınlık değerlerinin birbirine yakın olmakla beraber radyüs bölgelerine gidildikçe incelmanın arttığı görülmektedir [3].

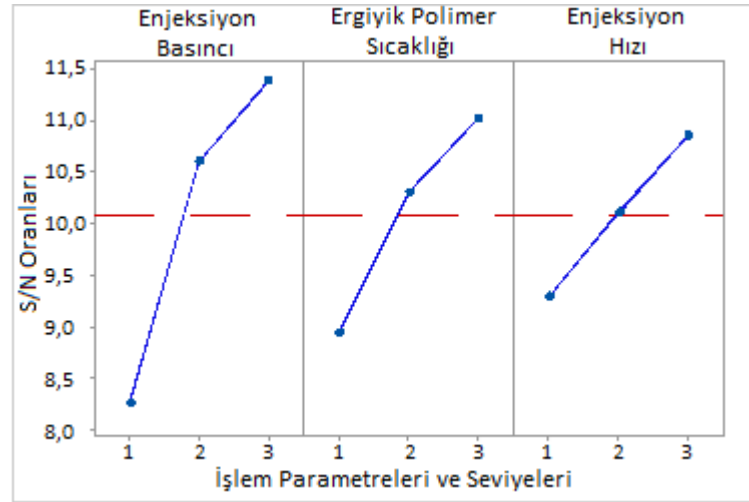
4.1.1.1 Taguchi Metodu

Al-1050.O malzemesinin farklı proses parametreleri kullanılarak plastik enjeksiyonuyla şekillendirilmesi sonucu ölçülen incelmanın sonuçları Minitab 17 programı kullanılarak analiz edilmiştir. Kontrol faktörlerinin incelmanın üzerindeki etkilerini belirleyebilmek amacıyla S/N yanıt tablosu oluşturulmuştur (Çizelge 4.3). Her faktörün farklı seviyelerinden elde edilen maksimum ve minimum ortalama gürültü oranları arasındaki farkların daha fazla ya da daha az olması faktörlerin incelmanın üzerindeki etkinliği hakkında bilgi vermektedir. Farkların işaretine bakılmaksızın seviyeleri arasında büyük farka sahip olan kontrol faktörünün sonuç üzerinde daha etkili olduğu göz önüne alındığında Çizelge 4.3' e göre incelmanın üzerinde en etkili parametrelerin sırasıyla enjeksiyon basıncı (A), ergiyik sıcaklığı (B) ve enjeksiyon hızı (C) olduğu görülmektedir.

Çizelge 4.3 (S/N) ortalamaları için yanıt tablosu

Semboller	Kontrol Faktörleri	S/N Ortalamaları			
		Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3	Max. – Min.
A	Enj. Basıncı (MPa)	8,25867	10,5995	11,3838	3,12513
B	Erg. Sıcaklığı (°C)	8,93017	10,2978	11,014	2,08383
C	Enj. Hızı (%)	9,28803	10,1018	10,8521	1,56407

$\sum (S/N) / 9 = S/N$ ortalamalarının ortalaması 10,0806 olarak bulunmuştur. Elde edilen S/N ortalamaları grafik olarak Şekil 4.7' de verilmiştir.



Şekil 4.7 (%) İncelme oranları için ortalama S/N grafiği (Daha büyük daha iyi)

Şekil 4.7’ de kontrol faktörleri ve seviyelerine ait S/N oranları görülmektedir. Şekillendirme sonrasında 1,5 mm lik alüminyum plakalar için parçada meydana gelen incelme miktarının maksimum olmasının istenmesinden dolayı en büyük en iyidir kalite karakteristiğine göre yapılan optimizasyona göre, incelme miktarının en büyük olduğu seviyeler enjeksiyon basıncında 80 Mpa, ergiyik polimer sıcaklığında 240 °C ve enjeksiyon hızında 34 % olmuştur. Buna göre maksimum incelmeyi sağlayan şekillendirme parametreleri “A3-B3-C3” olarak belirlenmiştir. Yapılan deneysel çalışmada incelme değerlerinin optimal sonuçları elde edilmiştir. İncelme için optimum sonuca mevcut deneylerden ulaşılammıştır. Bu nedenle ilave bir doğrulama deneyine ihtiyaç duyulmuştur.

Plastik enjeksiyon kalıplama yöntemi ile şekillendirilmiş parçaların kalınlık değişimlerini etkileyen kontrol faktörlerinin sonuç üzerindeki % katkı oranlarını belirleyebilmek amacıyla Varyans Analizi (ANOVA) kullanılmıştır. Her bir kontrol faktörünün incelme üzerindeki % katkı oranları Minitab 17 programından faydalanılarak %95 güvenilirlik seviyesinde hesaplanmıştır. Çizelge 4.4’ de her kontrol faktörüne ait % katkı oranları verilmiştir. Buna göre incelme üzerinde en etkili parametrelerin sırasıyla; Enjeksiyon Basıncı: A (59,84%), Ergiyik Sıcaklığı: B (23,46%) ve Enjeksiyon Hızı: C (10,75%) olduğu gözlemlenmiştir.

Çizelge 4.4 (%) İncelme oranları için varyans analizi

Notasyonlar	Serbestlik Dereceleri	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F Oranı	P Değeri	Katkı Oranı (%)
A	2	0,000395	0,000198	10,38	0,088	59,84
B	2	0,000155	0,000078	4,07	0,197	23,46
C	2	0,000071	0,000035	1,86	0,349	10,75
Hata (e)	2	0,000038	0,000019	-	-	5,75
Toplam	8	0,000660	-	-	-	100

ANOVA sonuçları incelendiğinde Taguchi metoduyla elde edilen sonuçlarla paralellik gösterdiği görülmektedir. Her iki analizde de incelme üzerinde en fazla etkiye sahip parametre olarak enjeksiyon basıncı ve en az etkiye sahip parametre olarak ise enjeksiyon hızı bulunmuştur [6].

4.1.1.2 Regresyon Analizi

Al-1050.O malzemesinin plastik enjeksiyon yöntemiyle şekillendirilmesi sonucu parçalarda meydana gelen incelme miktarlarının tahmini için regresyon analizi ve cevap-yüzey metodu kullanılarak birinci ve ikinci dereceden tahminsel denklemler geliştirilmiştir. Lineer regresyon analizi ile elde edilen tahminsel denklemin korelasyon katsayısı $R^2 = 0,907$ olarak hesaplanmıştır (Denklem 2). Denklemin oluşturulmasında kullanılan katsayılar Çizelge 4.5’ te gösterilmiştir. Korelasyon katsayısının yüksek olması elde edilen denklemin % 90,7 doğruluğunda ve oldukça güvenilir olduğunun bir göstergesidir. Bu denklemin kullanılmasıyla 1,5 mm kalınlığındaki plakalar için mevcut deneylerden ulaşılamayan optimum A3-B3-C3 (80MPa-240°C-34%) seviyelerine ait tahminsel kalınlık değeri 1,4350 mm olarak hesaplanmıştır. Aynı parametrelerle gerçekleştirilen doğrulama deneyi sonucundaki kalınlık değeri ise 1,4395 mm olarak ölçülmüştür (Şekil 4.8).

$$\text{Kalınlık(mm)} = 1,5853 - 0,000396.A - 0,000252.B - 0,001717.C \quad 4.1$$

Çizelge 4.5 Regresyon analizine ait katsayılar

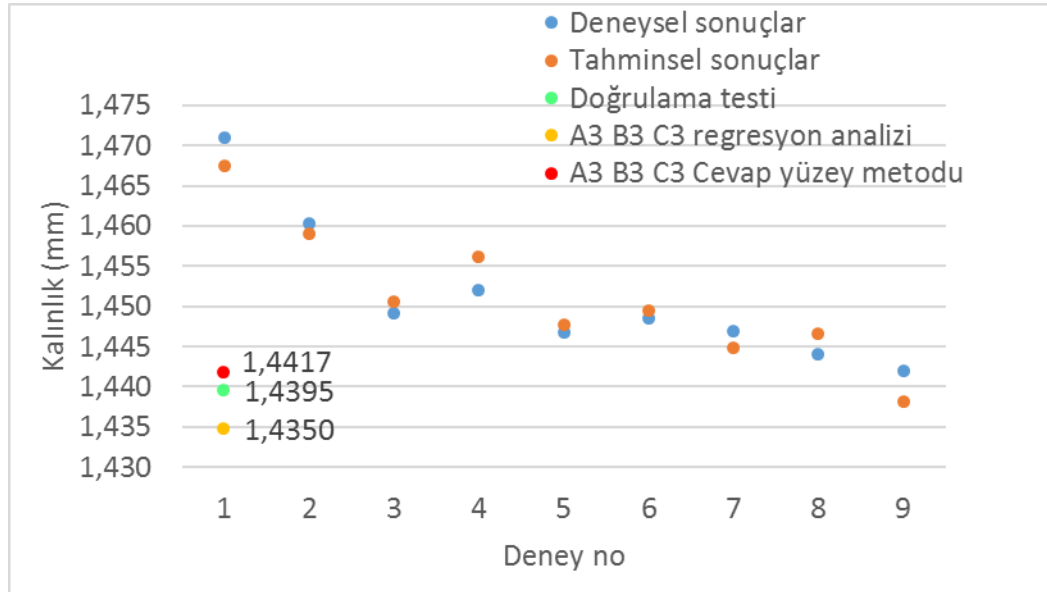
Notasyonlar	Katsayılar	SE Katsayılar	T-Değeri	P-Değeri
Sabit	1,5853	0,0280	56,56	0,000
A	-0,000396	0,000071	-5,55	0,003
B	-0,000252	0,000071	-3,53	0,017
C	-0,001717	0,000713	-2,41	0,061

4.1.1.3 Cevap Yüzey Metodu

Sac metallerin şekillendirme sonrası kalınlık değerlerinin tahmini cevap yüzey metodu kullanılmıştır. Cevap yüzey metodu ile elde edilen ikinci dereceden tahminsel denklem kullanılarak Taguchi deneysel tasarımında yer alan belirli parametre değerlerine bağlı kalmaksızın kontrol faktörlerine ait istenilen ara değerler denklemde yerine yazılarak gerçeğe en yakın kalınlık değerleri tahmin edilebilmektedir (Denklem 3). Bu denklemde kontrol faktörlerinin birbirleriyle etkileşimleri de dikkate alınmaktadır.

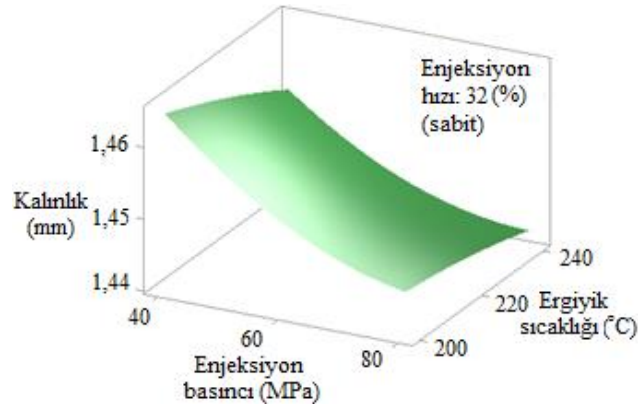
Denklemin kullanılması ile 1,5 mm kalınlığındaki plakalar için mevcut deneylerden ulaşılamayan optimum A3-B3-C3 (80MPa-240°C-34%) seviyelerine ait tahminsel kalınlık değeri 1,4417 mm olarak hesaplanmıştır (Şekil 4.8).

$$\text{Kalınlık(mm)} = 1,8 - 0,004899.A + 0,000211.B - 0,01181.C + 0,000008.A^2 - 0,000001.B^2 + 0,000079.C^2 + 0,000003.A.B + 0,000089.A.C \quad 4.2$$



Şekil 4.8 1,5 mm kalınlığında alüminyum saclar için şekillendirme sonrası deneysel ve tahminsel kalınlık değerleri

Değişen enjeksiyon basıncı ve ergiyik polimer sıcaklığının kalınlık üzerindeki etkilerine ait cevap yüzey metoduyla oluşturulan yüzey grafiği Şekil 4.9' da gösterilmiştir.



Şekil 4.9 Enjeksiyon basıncı – Ergiyik polimer sıcaklığı – Sac metal kalınlık yüzey grafiği

Grafik incelendiğinde Taguchi ve ANOVA da olduğu gibi enjeksiyon basıncının incelve üzerinde diğer parametrelere kıyasla daha etkili olduğu anlaşılmaktadır.

4.1.2 Ön Isıtmanın Şekillendirilebilirliğe Etkisi

Şekillendirme öncesi malzemeye uygulanan ön ısıtma işleminin parçalar üzerindeki etkisini incelemek ve daha iyi sonuçlar elde edebilmek amacıyla optimum incelve sonuçlarına ulaştığımız 3-3-3 (80 MPa, 240 °C, 34 %) ve en az incelmenin görüldüğü 1-1-1 (40 MPa, 200 °C, 30 %) seviyeleri dikkate alınarak ek deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Şartlandırıcı yardımıyla kalıp ısıtılarak sac plakaların yüzey sıcaklıklarının 60 °C' ye ulaşması sağlanmıştır. Ön ısıtma işlemi sonrası yapılan şekillendirme neticesinde 3-3-3 seviyeleri için ölçülen ortalama kalınlık değeri 1,4287 mm, 1-1-1 seviyeleri için ölçülen ortalama kalınlık değeri ise 1,4390 mm olmuştur. Elde edilen sonuçlardan ön ısıtma işleminin şekillendirilebilirliği önemli oranda arttırdığı görülmektedir. Şöyle ki, L9 ortogonal dizisindeki birinci deneye tekabül eden 1-1-1 deney kombinasyonu, ısıtma işlemi olmadığı durumda, sac metalde en küçük (minimum) incelem oranını vermiştir. Oysa ki, bu şart için plakaya ön ısıtma uygulandığında, yüksek şekillendirilebilirlik oranına çok daha düşük basınç ve sıcaklık değerlerinde ulaşılmıştır. Dolayısıyla, plastik enjeksiyon yöntemi ile sac metalin şekillendirilmesinde ön ısıtma uygulanması ile çok daha düşük enjeksiyon basıncı değerleri uygulanarak istenilen incelve oranları elde edilmiştir. Bu da, literatürde belirtilenin aksine plastik enjeksiyonda sac şekillendirme için yüksek basınç gereksinimini ortadan kaldırmaktadır.

4.2 Sertlik Değişimleri

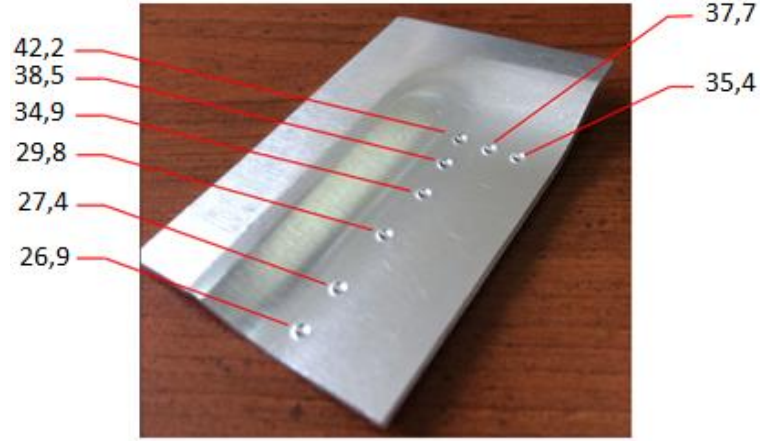
Proses parametrelerinin sertlik üzerine etkilerini görebilmek amacıyla gerçekleştirilen Rockwell sertlik deneyi ile saf ve şekillendirilmiş alüminyum plakaların sertlik değerleri ölçülmüştür. Yapılan ölçümler sonucunda farklı proses parametreleri kullanılarak şekillendirilmiş parçaların, proses parametrelerinin artmasına bağlı olarak sertlik değerlerinde bir yükselişin olduğu görülmüştür. Bu yükselişin temel nedeni, proses parametrelerinin artması ile toplam deformasyon miktarının artmasıdır. Deformasyon miktarının artması neticesinde toplam dislokasyon sayısı artmaktadır. Dislokasyon yoğunluğundaki bu artış ile beraber mikroyapıda depolanan enerji miktarı artmakta ve sertlik değerleri yükselmektedir [32-33]. Şekil 4.6' da saf ve şekillendirilmiş numunelerin HR_B cinsinden enine ve boyuna ortalama sertlik değerleri verilmiştir.

Çizelge 4.6 Ortalama sertlik değerleri

Deney No	Semboller			Kontrol Faktörleri			Enine Sertlik Değerleri [HR _B]	Boyuna Sertlik Değerleri [HR _B]
	A	B	C	Basınç [Mpa]	Sıcaklık [°C]	Hız [%]		
Saf	-	-	-	-	-	-	Ort. 22,8	
1	1	1	1	40	200	30	31,9	28,2
2	1	2	2	40	220	32	32,6	28,5
3	1	3	3	40	240	34	33,2	29,1
4	2	1	2	60	200	32	33,8	29,1
5	2	2	3	60	220	34	34,5	31,0
6	2	3	1	60	240	30	35,0	31,2
7	3	1	3	80	200	34	36,8	32,9
8	3	2	1	80	220	30	37,0	33,3
9	3	3	2	80	240	32	37,2	34,1

Çizelge 4.6 incelendiğinde, şekillendirilmiş malzemelerin enine ve boyuna ortalama sertlik değerlerinin birbirinden farklı olduğu görülmektedir. Bu farklılığın temel nedeni enjeksiyondaki basınç dağılımıdır. Ergiyik polimerin kalıp içerisinde izlemiş olduğu yol, parçaların farklı doğrultularında farklı sertlik değerlerinin meydana gelmesine neden olmuştur. Ayrıca şekillendirilmiş parçalar üzerindeki sertlik değişimlerine bakıldığında, köşe radyüs bölgesine eşit uzaklıkta yapılan ölçümlerde sertlik değerlerinin giderek arttığı görülmüştür. Buna göre proses sonu sertlik değerlerinin en yüksek olduğu bölgelerin parçaların köşe radyüs bölgeleri olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Bu bölgelerde

meydana gelen sertlik artışlarının nedeni olarak, köşe bölgelerinde malzeme akışının zorlanması, malzemenin yığılması ve pekleşmenin daha fazla olması düşünülebilir. Şekil 4.10' da örnek bir numune üzerinden alınan sertlik ölçüm değerleri verilmiştir.



Şekil 4.10 “8” nolu parça üzerindeki sertlik değerlerinin değişimi

Şekil 4.10 incelendiğinde çok sayıda noktadan alınan sertlik değerlerinin köşe radyüslerine doğru artmakta olduğu görülmektedir.

SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, sac metal şekillendirme alanında alışılmışın dışında bir uygulama olan plastik enjeksiyon kalıplama yöntemi ile sac metallerin şekillendirmesi işlemine etki eden parametreler deneysel olarak araştırılmıştır. Proses parametreleri olarak enjeksiyon basıncı, ergiyik sıcaklığı ve enjeksiyon hızı dikkate alınmıştır. Deneysel çalışmalarda proses parametrelerinin, otomotiv ve havacılık sektöründe oldukça sık kullanılan Al-1050.O sac malzemesinin şekillendirilebilirliğine etkileri incelenmiştir. Çalışma neticesinde elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

Plastik enjeksiyonla sac metal şekillendirme işleminde; enjeksiyon basıncı, ergiyik sıcaklığı ve enjeksiyon hızı en önemli parametrelerden başlıca olanlarıdır. Al-1050.O malzemesinin şekillendirilmesinde, ergiyik sıcaklığı, enjeksiyon basıncı ve hızı gibi kontrol faktörlerinin optimal seviyelerini belirlemek amacıyla yapılan bu çalışmada, uniform basınç dağılımı ve maksimum şekillendirilebilirliğin elde edilebilmesi için yüksek ergiyik sıcaklığı, yüksek enjeksiyon basıncı ve hızına gereksinim duyulmaktadır. Dikkate alınan her üç proses parametresinin değerlerinin artmasıyla şekillendirilebilirlik artmıştır.

Kontrol faktörlerinin farklı seviyelerinde incelme oranları %1,933 - %3,867 aralığında bulunmuştur. İncelme üzerinde en etkili parametreler sırasıyla; Enjeksiyon Basıncı: A (59,84%), Ergiyik Sıcaklığı: B (23,46%) ve Enjeksiyon Hızı: C (10,75%) olduğu gözlemlenmiştir. Proses sonu şekillendirilmiş parçalardaki kalınlık değişimleri

incelendiğinde, parçaların flanaj bölgelerinde diğer bölgelere oranla daha fazla incelmenin meydana geldiği görülmüştür.

Daha az deneysel çalışma ile optimum proses parametrelerine ulaşmak için yapılan Taguchi deneysel tasarımında; tüm kontrol faktörlerinin üçüncü seviyeleri (A=80 MPa, B= 240°C, C=34 %) en yüksek şekillendirilebilirliği sağlayan optimum seviyeler olarak belirlenmiştir. Taguchi deneysel tasarımında yer almayan optimum proses şartlarının parçaların şekillendirilebilirliği üzerine etkisini görebilmek amacıyla doğrulama deneyi yapılmıştır. Yapılan doğrulama deneyi sonuçlarının, regresyon analizi ve cevap-yüzey metodu kullanılarak elde edilen birinci ve ikinci dereceden tahminsel denklemler ile hesaplanan değerlere yakın sonuçlar verdiği görülmüştür. Geliştirilen tahminsel denklemin korelasyon katsayısı $R^2 = 0,907$ olarak hesaplanmıştır. Korelasyon katsayısının oldukça yüksek olması elde edilen denklemin güvenilir olduğunun bir göstergesidir.

Plastik enjeksiyon kalıplama yöntemi ile sac metallerin şekillendirilmesinde ön ısıtma işleminin şekillendirilebilirlik üzerinde oldukça etkili olduğu görülmüştür. Düşük enjeksiyon basıncı değerlerinde dahi ön ısıtma uygulanmış sac metallerin istenilen performansta şekillendirilebildiği tespit edilmiştir.

Yapılan rockwell sertlik ölçümleri sonucunda farklı proses parametreleri kullanılarak şekillendirilmiş parçaların sertlik değerleri arasında, proses parametrelerinin artmasına bağlı olarak sertlik değerlerinde bir yükseliş olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Şekillendirme öncesi plakanın 22 HR_B olan sertlik değeri, şekillendirme sonrası 34 HR_B değerine kadar çıkmıştır. Ayrıca ölçüm sonuçları incelendiğinde enine ve boyuna olmak üzere çok sayıda noktadan alınan sertlik değerlerinin köşe radyüslerine doğru artmakta olduğu görülmektedir.

Çalışmalar neticesinde sac metal malzemelerin şekillendirilmesi alanında plastik enjeksiyon kalıplama yönteminin istenilen boyut, tolerans, yüzey hassasiyeti vb. sonuçları büyük oranda karşıladığı görülmüştür. Çalışmada kullanılan tek taraflı kalıbın işçilik ve hammadde ihtiyacını düşürdüğü, yöntemin istenilen parçaların tek adımda imalatına olanak sağladığı ve bu olumlu özelliklerin yanında son derece homojen, dar

toleranslara sahip, karmaşık geometrili sac metal parçaların imal edilebileceği görülmüştür. Sonuç olarak plastik enjeksiyonla sac metal şekillendirme yönteminin sağlamış olduğu avantajlar sayesinde, sac metal malzemelerin şekillendirilmesinde geçmişten günümüze dek kullanılan derin çekme ve sıvı basıncıyla şekillendirme proseslerinin yerini doldurabileceği anlaşılmıştır.

Plastik enjeksiyon kalıplama ile sac metal şekillendirme işlem parametrelerinin deneysel olarak incelendiği bu çalışmada, bu konu hakkında daha sonra yapılacak çalışmalara kolaylık ve yol göstermesi açısından şu öneriler sunulmuştur.

Şekillendirme sonrası kalınlık değişimleri incelendiğinde, parçaların flanj bölgelerinde diğer bölgelere oranla daha fazla incelmenin olduğu görülmektedir. Bu nedenle parametre seçimlerinde parçaların özellikle bu bölgelerinde meydana gelen aşırı incelme ya da yırtılma durumları göz önüne alınmalıdır.

Enjeksiyon hızının artırılması ile parçaların şekillendirilebilirliğinin arttığı deneysel çalışmalar sonucunda görülmüştür. Ancak yüksek enjeksiyon hızlarına çıkıldığında şekillendirme sonrası çapak oluşumu meydana gelmektedir. Bu nedenle enjeksiyon hızının takibi son derece önemlidir ve belirli bir noktadan sonra enjeksiyon hızının artırılması uygun görülmemektedir.

Deneysel çalışmalar sonucunda ön ısıtma işleminin şekillendirilebilirliği önemli oranda arttırdığı görülmektedir. Maksimum şekillendirilebilirliğin elde edildiği 3-3-3 seviyeleri için ölçülen ortalama kalınlık değeri 1,4395 mm iken ön ısıtma işlemi uygulanarak en düşük parametre seviyeleri (1-1-1) ile gerçekleştirilen şekillendirme işlemi sonrası ölçülen ortalama kalınlık değeri ise 1,4390 mm olmuştur. Bu sonuçlardan, ön ısıtma işlemine tabi tutulmuş sac plakaların düşük enjeksiyon basınçlarında dahi yüksek basınç altında şekillendirilmiş parçalar ile aynı miktarda şekillendirilebildiği görülmektedir. Böylece şekillendirme işlemlerinde enerji tasarrufu açısından imal edilecek parça sayısı dikkate alınarak ön ısıtma işleminin uygulanması düşünülebilir.

Gelecek çalışmalar için, farklı polimer malzemeler kullanılarak sac metalin şekillendirmeye olan etkileri deneysel olarak araştırılabilir. Çalışmada dikkate alınan

proses parametrelerinin dışında, kalıp geometrisinin şekillendirilebilirlik üzerine etkisi ve endüstriyel uygulamalar dikkate alınarak paslanmaz elik gibi farklı metalik malzemelerin şekilledirilebilirliği incelenebilir.

KAYNAKLAR

-
- [1] Padmanabhan, R., Oliveria, M.C., Alves, J.L. ve Menezes, L.F.,(2007). "Influence of Process Parameters on the Deep Drawing of Stainless Steel", *Finite Elements in Analysis and Design*, 43:1062-1067.
 - [2] Raju, S., Ganesan, G. ve Karthikeyan, R., (2010). "Influence of Variables in Deep Drawing of AA 6061 sheet", *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 20:1856-1862.
 - [3] Koç, M., Ağçayazı, A. ve Carsley, J., (2011). "An Experimental Study on Robustness and Process Capability of the Warm Hydroforming Process", *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 133, 021008-1.
 - [4] Yaşar, M., Kadı, İ. ve Evlen, H., (2011). "AA 5754 Sacının Farklı Sıcaklıklarda Hidrolik Akışkanla Şekillendirilmesi", 6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11), May 2011, Elazığ, Turkey.
 - [5] Li, B., Nye, T.J. ve Metzger, R., (2006). "Multi-objective Optimization of Forming Parameters for Tube Hydroforming Process Based on the Taguchi Method", *International Journal Advanced Manufacturing Technologies*, 28:23-30.
 - [6] Michaeli. W. ve Maesing. R., (2010). "Injection Moulding and Metal Forming in One Process Step", 25th International Plastics Technology Colloquium of the Institute of Plastics Processing (IKV), March 2010, RWTH Aachen University, Germany.
 - [7] Lucchetta, G. ve Baesso, R., (2006). "Polymer Injection Forming (PIF) of Thin-Walled Sheet Metal Parts–Preliminary Experimental Results", 10th Esaform Conference on Material Forming, April 2006, Zaragoza-Spain, 907:1046-1051.
 - [8] Chen, M., Zhang, X., Lei, Q. ve Fu, J., (2002). "Finite Element Analysis of Forming of Sheet Metal Blank in Manufacturing Metal/Polymer Macro-Composite Components via Injection Moulding", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 42:375–383.
 - [9] Altan, M., Bayraktar, M. ve Yavuz, B., (2016). "Manufacturing Polymer/Metal Macro Composite Structure for Vibration Damping", *International Journal of Advanced Manufacturing Technologies*, 86:2119-2126.
 - [10] Tekkaya, A.E., Hussain, M.M. ve Witulski, J., (2012). "The Non-Hydrostatic Responce of Polymer Melts as a Pressure Medium in Sheet Metal Forming", *German Academic Society for Production Engineering (WGP)*, 6:385-394.

- [11] Karaağaç, İ., (2011). Sıvı Basıncıyla Sac Metal Şekillendirme (Hydroforming) İşlem Parametrelerinin Deneysel Olarak Araştırılması, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [12] Bariani, P.F., Bruschi, S., Ghiotti, A. ve Lucchetta, G., (2007). "An Approach to Modelling the Forming Process of Sheet Metal-Polymer Composites", *Annals of the CIRP*, 56(1).
- [13] Behrens, B.A., Bouguecha, A. ve Götze T., (2010). "Consideration of Fundamental Influence Parameters for the Simulation of Sheet-Metal Forming Processes by Means of Plastic Melt Pressure", *Mat.-wiss. u.Werkstofftech*, 41(10).
- [14] Landgrebe, D., Krausel, V., Rautenstrauch, A., Albert, A. ve Werteim, R., (2016). "Energy-Efficiency in a Hybrid Process of Sheet Metal Forming and Polymer Injection Moulding", *Procedia CIRP*, 40:109-114.
- [15] Singh, H., (2008). *Fundamentals of Hydroforming*, First Edition, Society of Manufacturing Engineers, United States of America.
- [16] Zhang, S.H. ve Danckert, J., (1998). "Development of Hydro-Mechanical Deep Drawing", *Journal of Materials Processing Technology*, 83:14-25.
- [17] Hu, J., Marciniak, Z. ve Duncan, J., (2002). *Mechanics of Sheet Metal Forming*, Second Edition, Butterworth-Heinemann.
- [18] Moralar, A., (2015). "İnce Sac Levhaların Yüksek Basınç Altında (Hydroforming) Şekillendirilmesi", *Electronic Journal of Vocational Colleges*, 4:78-85.
- [19] Gürün, H., (2008). Derin Çekme Kalıplarındaki Parametrelerin Deneysel Olarak İncelenmesi ve Bulanık Mantık ile Tahmini, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [20] Güneş, A.T., (2002). *Pres İşleri Tekniği*, Cilt 2, Makine Mühendisleri Odası, Ankara.
- [21] Abrantes, J.P., Ponce-Szabo, A. ve Batalha, G.F., (2005). "Experimental and Numerical Simulation of Tube Hydroforming (thf)", *Journal of Materials Processing Technology*, 164:1140–1147.
- [22] Koçar, O., (2006). Alüminyum 1050 Tüplerin Şekillendirilmesinin Teoriksel ve Deneysel Olarak İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Zonguldak.
- [23] Yuan, S.J., Han, C. ve Wang, X.S., (2006). "Hydroforming of Automotive Structural Components with Rectangular-Sections", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 46:1201–1206.
- [24] Altan, T., (1998). *Metal Forming Handbook*/Schuler, Springer, Verlag Berlin Heidelberg, 185-193.
- [25] Parsa, M.H. ve Darbandi, P., (2008). "Experimental and Numerical Analyses of Sheet Hydroforming Process for Production of an Automobile Body Part", *Journal of Materials Processing Technology*, 198:381-390.

- [26] Koç, M., (2008). "Hydroforming for Advanced Manufacturing", Woodhead Publishing Limited and CRC Press LLC, Cambridge.
- [27] Nam, P.S. ve James, R.R., (1985). Injection Molding Method, World Patent WO 04/548773.
- [28] Van Der Aa, H., Verdier, A. ve De Wolf, H., (2003). Method and Device for Producing a Composite Product and Composite Product Produced Therewith, World Patent WO 03/057446 A1.
- [29] From Wikipedia, the free encyclopedia, <https://en.wikipedia.org/wiki/Polystyrene>.
- [30] Yang, W.H. ve Tarng, Y.S., (1998). "Design Optimization of Cutting Parameters for Turning Operations Based on the Taguchi Method", Journal of Materials Processing Technology, 84:122-129.
- [31] Yavuz, B., (2015). Plastik Enjeksiyon Yöntemi ile Polimer/Metal Makro Kompozitlerin İmalatı ve İşlem Parametrelerinin Etkilerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [32] Nafsin, N. ve Rashed, H.M.M.A., (2013). "Effects of Copper and Magnesium on Microstructure and Hardness of Al-Cu-Mg Alloys", International Journal of Engineering and Advanced Technology, ISSN:2249-8958, Volume-2, Issue-5.
- [33] Adeosun, S.O., Ayoola, W.A., Bodude, M. ve Sanni, S.O., (2011). "Strength and Hardness of Directionally-Rolled AA1230 Aluminum Alloy", Journal of Emerging Trends in Engineering and Applied Sciences, 3:440-444.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı :Murat ŞEN
Doğum Tarihi ve Yeri :07.08.1991, İstanbul
Yabancı Dili :İngilizce
E-posta :muratsen1@outlook.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Lisans	Makine Müh.	Yıldız Teknik Üniversitesi	2014
Lise	Matematik	Dr. Kemal Naci Ekşi A.L.	2009

İŞ TECRÜBESİ

Yıl	Firma/Kurum	Görevi
2016 - ...	Marmara Üniversitesi	Araştırma Görevlisi
2014 - 2016	Yıldız Kalıp A.Ş	Arge Mühendisi

YAYINLARI

Makale

- [1] Yıldırım, E., Çebi, H., Şen, M. ve Yılmaz, E., (2017). “Robot Kontrollü İndüksiyon Sertleştirme Parametrelerinin Sac Metal Kalıp Yüzey Sertliğine Etkilerinin Taguchi Metodu ile İncelenmesi”, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 23:15-23.
- [2] Şen, M., Yıldırım, E., Çebi, H. ve Özdemir, C., (2015). “Çift Fazlı Çeliklerden Üretilen Otomotiv Sac Parçalarının Dizaynında Geri Esnemeyi Optimize Edebilmek için Sac Kalınlığına Bağlı Olarak Büküm Radyüslerinin Belirlenmesi”, Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi, 12:75-95.