

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**ILIK HİDROMEKANİK DERİN ÇEKME PROSESİNİN SONLU ELEMANLAR
ANALİZİ VE PARAMETRİK OPTİMİZASYONU**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mak. Müh. Doğan ACAR

**ARALIK 2014
TRABZON**

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**ILIK HİDROMEKANİK DERİN ÇEKME PROSESİNİN SONLU ELEMANLAR
ANALİZİ VE PARAMETRİK OPTİMİZASYONU**

Mak. Müh. Doğan ACAR

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
“MAKİNA YÜKSEK MÜHENDİSİ”
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 04.12.2014
Tezin Savunma Tarihi : 25.12.2014**

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Ömer Necati CORA

Trabzon 2014

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Makina Mühendisliği Anabilim Dalında

Doğan ACAR tarafından hazırlanan

**ILIK HİDROMEKANİK DERİN ÇEKME PROSESİNİN SONLU ELEMANLAR
ANALİZİ VE PARAMETRİK OPTİMİZASYONU**

**başlıklı bu çalışma, enstitü yönetim kurulunun 09/12/2014 gün ve 1580 sayılı
kararıyla oluşturulan jüri tarafından yapılan sınavda**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

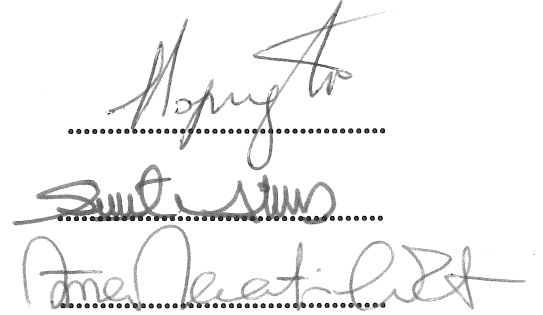
olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan: Prof. Dr. Hasan SOFUOĞLU

Üye : Doç. Dr. Şevket ATEŞ

Üye : Yrd. Doç. Dr. Ömer Necati CORA


.....
.....
.....

Prof. Dr. Sadettin KORKMAZ

Enstitü Müdürü

ÖNSÖZ

Otomotiv endüstrisinde, taşıtlarda ağırlığı azaltmak amacıyla düşük karbonlu çelik malzemeler yerine alüminyum ve magnezyum gibi hafif malzemeleri kullanmak için çalışmalar artarak devam etmektedir. Alüminyum malzemelerin çeliklerin yerini almasıyla ağırlıktaki azalma % 40-60'a ulaşmaktadır. Ağırlığın % 10 hafiflemesiyle yakıt tüketimi % 6-8 azalmakta ve buna bağlı olarak CO₂ emisyonlarının önemli derecede düşmektedir. Ancak, alüminyum ve diğer hafif metallerin oda sıcaklığındaki sınırlı şekillendirilebilirlikleri ve maliyetlerinin yüksek olması, hafif metallerin istenilen karmaşık ve fonksiyonel şekillere dönüştürülmesi için yeni imalat yöntemlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu amaçla 2000'li yıllardan bu yana gelişmiş ülkelerde yeni bir yöntem olan ve geleneksel kalıplama ve kaynaklı birleştirmeye kıyasla birçok avantajlar sunan ılık hidroşekillendirme metodunun kullanımı ön plana çıkmıştır.

Yüksek lisans çalışmalarımı gerçekleştirmem için olağanüstü imkânlar yaratan, tüm bilgi ve tecrübe birikimini benimle paylaşan ve akademik hayata olan vizyonumu oluşturan Sayın Hocam Yrd. Doç. Dr. Ömer Necati CORA'ya teşekkürlerimi sunarım. Çalışmalarım sırasında karşılaştığım sorunlarda desteğini önemli ölçüde hissettiğim ve çalışmalarımı tamamlamada büyük emeğe sahip olan Sayın Hocam Doç. Dr. Hasan GEDİKLİ'ye çok teşekkür ederim. Yüksek lisansa başlamamı teşvik eden ve destek olan Sayın Hocam Prof. Dr. Hasan SOFUOĞLU'na çok teşekkür ederim. Çalışmalarım esnasında her türlü imkânlarını ve tecrübelerini benimle çekinmeden paylaşan Sayın Hocam Arş. Gör. Mevlüt TÜRKÖZ ve Sayın Hocam Prof. Dr. Hüseyin Selçuk HALKACI ile başında bulunduğu Hidroşekillendirme ekibine teşekkürü bir borç bilirim. Bu çalışmayı da içeren 112M913 numaralı proje kapsamında aldığım burs desteğinden dolayı TÜBİTAK'a teşekkürü bir borç bilirim. HyperWorks yazılımının tedarikinden dolayı ST Mühendislik ve teknik desteklerinden dolayı Netform Mühendislik ve Bias Mühendislik'e çok teşekkür ederim.

Çalışmalarım boyunca bana verdikleri destekten dolayı sevgili aileme, değerli arkadaşım Arş. Gör. Hasan Onur TAN'a ve çok kıymetli varlığım Rabia ÇAPKIN'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Doğan ACAR
Trabzon 2014

TEZ BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Ilık Hidromekanik Derin Çekme Prosesinin Sonlu Elemanlar Analizi ve Parametrik Optimizasyonu” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Yrd. Doç. Dr. Ömer Necati CORA’ın sorumluluğumda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma süresince bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 04/12/2014

Doğın ACAR

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET.....	VIII
SUMMARY	IX
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	X
TABLolar DİZİNİ.....	XIV
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1 Giriş.....	1
1.2. Genel Literatür Taraması.....	4
1.2.1. Ilık Şekillendirme	4
1.2.2. Hidroşekillendirme ve Uygulama Alanları.....	7
1.2.2.1. Hidroşekillendirme Çeşitleri.....	9
1.2.2.1.1. Yüksek Basıncılı Sac (Dişi Kalıpla) Hidroşekillendirme	9
1.2.2.1.2. Hidromekanik Derin Çekme (HDÇ).....	10
1.2.2.1.3. Ilık Hidromekanik Derin Çekme (IHDC).....	12
1.2.2.1.4 Diğer Hidroşekillendirme Çeşitleri.....	15
1.2.3. Ilık Hidroşekillendirmede Prosesinde Etkin Parametreleri	17
1.2.3.1. Sıcaklık Parametresi	18
1.2.3.2. Baskı Plakası Kuvveti (BPK) ve Hidrolik Basınç (P) Parametreleri.....	20
1.3. AA 5754-O Alüminyum Alaşımı	21
1.4. Sac Şekillendirmede Kullanılan Sonlu Eleman Analizi Ticari Yazılımları	23
1.5. LS-DYNA.....	23

1.6.	Çalışmanın Amacı ve Özgünlüğü.....	24
2.	DENEYSEL VE SAYISAL ÇALIŞMALAR	26
2.1.	DeneySEL Çalışmalar	26
2.1.1.	Deney Düzenegi.....	26
2.1.2.	Malzemenin Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi	28
2.1.2.1.	Çekme Testi Deneyi ve Sonuçları	28
2.1.2.2.	Hidrolik Şişirme Testi Deneyi Sonuçları.....	31
2.1.3.	Sonlu Eleman Modelinin Doğrulanmasında Kullanılan Hidromekanik Derin Çekme Deneyi	32
2.2.	Sayısal Analizler.....	33
2.2.1.	Hidromekanik Derin Çekme Prosesi için Sayısal Modelin Hazırlanması.....	33
2.2.1.1.	Ağ Yapısı ve Oluşturulan Model.....	33
2.2.1.2.	Başlangıç ve Sınır Koşulları	36
2.2.1.3.	Malzeme Modelleri.....	37
2.2.1.3.1.	Johnson-Cook Malzeme Modeli.....	38
2.2.1.3.2.	MAT 106 Elastik-Viskoplastik-Termal Malzeme Modeli	40
2.2.1.3.3.	Malzeme Modelinin Doğrulanması	41
2.2.1.4.	Temas (Kontakt) Algoritması ve Sürtünme Katsayıları	44
2.2.2.	Sürtünme Katsayılarının Sac Kalınlığına Etkisinin Belirlenmesi	44
2.2.3.	Optimum Eleman Sayısının Belirlenmesi	46
2.2.4.	Sonlu Eleman Modelinin Doğrulanması	47
2.2.5.	Isıl Mekanik Analizin Oluşturulması	48
2.2.5.1.	Sac Üzerindeki Sıcaklık Dağılımının Sonlu Elemanlar Analizi ile Modellenmesi ve Doğrulanması	50
2.2.6.	Farklı Sac Şekillendirme Yöntemlerinin Karşılaştırılması.....	55
2.2.7.	Optimizasyon Çalışmaları	56
2.2.7.1.	Sıcaklık Optimizasyonu.....	57
2.2.7.2.	Yükleme Profillerinin Optimizasyonu.....	62

3.	SONUÇLAR.....	64
4.	ÖNERİLER.....	74
5.	KAYNAKLAR.....	75

ÖZGEÇMİŞ

Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

ILIK HİDROMEKANİK DERİN ÇEKME PROSESİNİN SONLU ELEMANLAR
ANALİZİ VE PARAMETRİK OPTİMİZASYONU

Doğan ACAR

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makina Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Yrd. Doç. Dr. Ömer Necati CORA
2014, 75 sayfa

Bu çalışmada özellikle otomotiv sanayiindeki hafifletme çabalarına paralel olarak kullanımının yaygınlaşması beklenen alüminyum alaşımlarının şekillendirilmesinde gelecek vadeden yöntemlerden biri olan ılık hidromekanik derin çekme prosesinin kapsamlı bir sonlu eleman modeli oluşturulmuştur. Farklı eleman sayıları ve formülasyonları, temasta bulunan bileşenler için farklı sürtünme katsayıları, çözücü algoritmaları ve malzeme modelleri sistematik bir şekilde denenerek sonlu eleman modeli için en uygun tercihler ve değerler belirlenmiştir.

Çalışmanın ikinci kısmında ise, oluşturulan sonlu eleman modeli ile ılık hidromekanik derin çekme işlemindeki takım sıcaklık dağılımı ve yükleme profillerinin (sıvı basıncı ve baskı plakası kuvveti) en iyi şekillendirilebilirliği veren değerleri parametrik olarak belirlenmeye çalışılmıştır.

Bu çalışmalar neticesinde, malzeme davranışını en iyi elastik viskoplastik termal malzeme modelinin yansıttığı görülmüştür. Coulomb sürtünme katsayıları sac-kalıp, sac-baskı plakası ve sac-zımba sürtünme yüzeyleri için sırasıyla 0.05, 0.05, 0.25 olarak tespit edilmiştir. En iyi şekillendirmenin sağlanabilmesi için kalıp ve zımbaya ait sıcaklık değerleri sırasıyla 300 ve 25 °C olarak belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Ilık hidromekanik derin çekme, sonlu elemanlar analizi, malzeme modelleri, sayısal doğrulama, ısıl mekanik analiz, parametrik optimizasyon

Master Thesis

SUMMARY

FINITE ELEMENT ANALYSIS AND PARAMETRIC OPTIMIZATION OF WARM
HYDRMECHANICAL DEEP DRAWING PROCESS

Doğan ACAR

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural Sciences
Mechanical Engineering Graduate Program
Supervisor: Asst. Prof. Dr. Ömer Necati CORA
2014, 75 Pages

A comprehensive finite element modeling was established for warm hydromechanical deep drawing process which is a promising technique in forming of aluminum alloys that are expected to be increasingly exploited in automotive industry along with lightweighting efforts. Different number of elements and formulations, coefficients of friction for contacting surfaces, solution algorithms, and material models were systematically tested and optimum choices and values were determined.

In the second part of the study, tool temperature distribution and optimum loading profiles (hydraulic pressure, blank holder force) were obtained parametrically to achieve highest formability in warm hydromechanical deep drawing process by means of established finite element model.

As a result, elastic-viscoplastic thermal material model was found to be reflecting the material behavior better. Coulomb friction coefficient for contacting surfaces such as blank-die, blank-blank holder and blank-punch were determined as 0.05, 0.05 and 0.25 respectively. Optimal temperature values for die and punch were determined as 300 and 25 °C, respectively for the highest formability.

Key Words: warm hydromechanical deep drawing, finite element analysis, material models, numerical validation, coupled thermo-mechanical analysis, parametric optimization

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1.	Amerika Birleşik Devletleri'ndeki ulaştırma için kullanılan petrol miktarı ve yerli üretim karşılaştırması	3
Şekil 2.	2010-2012 yılları arasında rafinerici lisansı sahiplerinin ham petrol temin miktarları (ton).....	3
Şekil 3.	Batı Avrupa'da binek otomobili başına ortalama alüminyum kullanımı	4
Şekil 4.	İzotermal ısıtma (kalıp ve zımba sıcaklıkları aynı) şartlarında 3 farklı alüminyum alaşımının farklı sıcaklıklar altında şekillendirilmesi sonucu elde edilen kap derinliğinin değişimi	6
Şekil 5.	Derin çekme ve HMD proseslerinin SÇO'ları arasındaki sıcaklığa bağlı ilişki	7
Şekil 6.	a) Yüksek sac (dişi kalıpla) hidroşekillendirme b) Hidromekanik derin çekme	8
Şekil 7.	Sac hidroşekillendirme prosesine ait endüstriyel örnekler: a) 2007 GM Pontiac Solstice GXP'ye ait çeşitli hidroşekillendirilmiş parçalar, b) tek adımda hidroşekillendirilmiş iki parçadan oluşan yakıt tankı	9
Şekil 8.	Hidroşekillendirme teknolojisinin sınıflandırması	10
Şekil 9.	Dişi kalıpla hidroşekillendirme, a) Tek sac b) çift sac	10
Şekil 10.	Zımba ile hidroşekillendirme (hidromekanik derin çekme) prosesinin şematik gösterimi	11
Şekil 11.	Hidromekanik derin çekme: a) tek etkili, b) çift etkili	11
Şekil 12.	Yüksek sıcaklıklarda gerçekleştirilen hidromekanik derin çekme işleminin proses prensipleri	12
Şekil 13.	Sac şekillendirme proseslerinin avantajlarına göre karşılaştırılması.....	11
Şekil 14.	a) Kauçuk diyafram ile hidroşekillendirme, b) Yeniden derin çekme ile hidroşekillendirme	16
Şekil 15.	Akışlı derin çekme yöntemi hidroşekillendirme.....	16
Şekil 16.	Çeşitli hidromekanik derin çekme proseslerinin şematik gösterimi: a) Hidrolik baskı plakası kuvveti ile şekillendirme, b) Yüksek iç basınç etkisiyle şekillendirme	17

Şekil 17.	Ilık hidroşekillendirme prosesindeki kontrol değişkenleri	19
Şekil 18.	Ilık hidroşekillendirmenin potansiyel yararları ve klasik derin çekme ile karşılaştırması: a) Oda sıcaklığında klasik derin çekme ve hidroşekillendirme, b) Seçmeli ısıtma ve soğutma ile ılık hidroşekillendirme	20
Şekil 19.	Tez kapsamında sonlu elemanlar modelinin hazırlanmasında, çözülmesinde ve sonuçların incelenmesinde kullanılan programlar	24
Şekil 20.	Hidroşekillendirme deney düzeneği ve oluşturan üniteler	27
Şekil 21.	Hidroşekillendirme modelinde: a) Deney düzeneğinin ölçüleri,	28
Şekil 22.	AA 5754-O sac malzemesi için 25 mm/dk çene hızında ve farklı sıcaklıklardaki mühendislik gerilmesi-birim şekil değiştirme grafikleri	29
Şekil 23.	AA 5754-O sac malzemesi için 100 mm/dk çene hızında ve farklı sıcaklıklardaki mühendislik gerilmesi-birim şekil değiştirme grafikleri	30
Şekil 24.	AA 5754-O sac malzemesi için 250 mm/dk çene hızında ve farklı sıcaklıklardaki mühendislik gerilmesi-birim şekil değiştirme grafikleri	30
Şekil 25.	Hidrolik şişirme deneyi: a) Sacın başlangıçtaki hali (sol), Sacın şişirme ile şekillendirildiği herhangi bir an (sağ), b) Oda sıcaklığında hidrolik şişirme (sol), 255 °C'deki hidrolik şişirme (sağ).....	31
Şekil 26.	Hidrolik şişirme deneyinden elde edilen akma eğrileri	32
Şekil 27.	Hidromekanik derin çekme işlemi sonucunda elde edilen ve üzerinden kalınlık ölçümü yapılan silindirik kap	33
Şekil 28.	Eleman tiplerine bazı örnekler: a) Kabuk (Shell) eleman tipleri, b) Katı (Solid) eleman tipleri	34
Şekil 29.	Ağ örme örnekleri: a) 2 boyutlu ağ örme, b) 3 boyutlu ağ örme	34
Şekil 30.	Hypermesh kullanılarak oluşturulan ağ yapıları: a) Sac (iş parçası) b) Zimba.....	36
Şekil 31.	Takımlar için sınır ve başlangıç koşulları: a) Kalıp, b) Zimba c) Baskı plakası.....	36
Şekil 32.	Sac (iş parçası) modeli için başlangıç ve sınır koşulları.....	37
Şekil 33.	ASTM E8-04 (Metalik Malzemelerin Çekme Testi için Test Metotları) standardı kullanılarak oluşturulan çekme testi numunesine ait sonlu eleman ağı	41
Şekil 34.	300 °C sıcaklıkta yapılan çekme deneyi sonlu eleman analizinde numune üzerinde von Mises gerilmesi dağılımı ve boyun verme bölgesinin detayı ...	42

Şekil 35.	Çekme testi sonlu eleman analizi sonucunda boyun verme bölgesinde meydana gelen yırtılma	42
Şekil 36.	25 °C sıcaklıktaki çekme testi benzetimi ile şişirme deneyi sonucu elde edilen gerilme-birim şekil değişimi eğrilerinin karşılaştırılması.....	43
Şekil 37.	300 °C sıcaklıktaki çekme testi benzetimi ile şişirme deneyi sonucu elde edilen gerilme-birim şekil değişimi eğrilerinin karşılaştırılması.....	43
Şekil 38.	Temas etkileşimi olan yüzeylerde sürtünme katsayısının artırılması ile sacdaki kalınlık değişim	45
Şekil 39.	Sac ile zımba arasındaki sürtünme katsayısının artırılması sonucu sac için elde edilen kalınlık değişimi (Sac-kalıp-baskı plakası arasında $\mu=0.05$ iken).....	46
Şekil 40.	Sac için kullanılan eleman sayısının sonuçlara etkisi.....	47
Şekil 41.	DeneySEL hidromekanik derin çekme ve sonlu eleman analizi sonucunda elde edilen kalınlıkların karşılaştırılması	48
Şekil 42.	Ilık hidromekanik derin çekme prosesinin genel görünümü ve sıcaklık başlangıç ve sınır koşulları	49
Şekil 43.	Prosesler, başlangıç sıcaklık ve sınır koşulları a) IŞ prosesi, b) IHDC prosesi	50
Şekil 44.	A) IŞ analizi sıcaklık dağılımları a) 15. s sonunda ısıl dengede b) %50 zımba ilerlemesinde, c) %100 zımba ilerlemesinde (proses sonu) B) IHDC analizi sıcaklık dağılımları d) 15. s sonunda ısıl dengede, e) %50 zımba ilerlemesinde, f) %100 zımba ilerlemesinde (proses sonu).....	52
Şekil 45.	IŞ prosesinde şekillendirme öncesinde ısıl denge halinde sac merkezinden kenarına doğru sıcaklık değişimi	53
Şekil 46.	IŞ prosesi sonunda sac üzerinde eğrisel mesafe boyunca sıcaklık gradyanı	53
Şekil 47.	IHDC prosesinde şekillendirme öncesinde ısıl denge halinde sac merkezinden kenara doğru sıcaklık değişimi	54
Şekil 48.	IHDC prosesi sonunda eğrisel mesafe boyunca sıcaklık gradyanı.....	55
Şekil 49.	Farklı sac şekillendirme yöntemlerinin karşılaştırılması.....	56
Şekil 50.	Kalıp ve zımba için değişken sıcaklık parametrelerinin LS-OPT ara yüzünde tanımlanması.....	58
Şekil 51.	Kalıp ve zımba için yapılan sıcaklık optimizasyonu sonuçları	60
Şekil 52.	Kalıp ve zımba için yapılan sıcaklık optimizasyonu sınır değerleri (müsaade edilebilir incelleme: açık renkli bölge).....	60
Şekil 53.	Farklı sıcaklıklarda gerçekleştirilen ılık hidromekanik derin çekme işlemi ve yüzde kalınlık dağılımı a) 260 °C kalıp ve 25 °C zımba sıcaklığında (başarılı	

şekillendirme), b) 140 °C kalıp ve 25 °C zımba sıcaklığında (yetersiz şekillendirme ve hasar)..... 61

Şekil 54. Deneysel verilerin sigmoidal tipteki eğrilere uyumlanması ve korelasyon oranları..... 63

TABLolar DİZİNİ

Sayfa No

Tablo 1.	Geleneksel malzemeler yerine hafif malzemelerin kullanılmasına bağlı kütfe azalması ve maliyet değişimi.....	2
Tablo 2.	Farklı proseslerin malzemenin sınır çekme oranına etkilerinin karşılaştırılması	14
Tablo 3.	AA 5754-O alüminyum alaşımının kimyasal yapısı (% ağırlık).....	22
Tablo 4.	AA 5754-O'nun temel mekanik özellikleri	22
Tablo 5.	Kalınlığı 1 mm olan AA 5754-O sac malzemesine ait mekanik özellikler ve haddeleme doğrultusuna (HD) bağlı değişimleri.....	22
Tablo 6.	Kalınlığı 1 mm olan AA 5754-O sac malzemesine ait deneysel olarak elde edilen anizotropi değerleri	22
Tablo 7.	Aę örülen parçaların eleman sayıları.....	35
Tablo 8.	Johnson-Cook malzeme modeli için hesaplanan katsayıları	40
Tablo 9.	Temas yüzey çiftleri ve aralarında tanımlanan sürtünme katsayıları	44
Tablo 10.	AA 5754-O ve AISI 4140 için analizlerde kullanılan ısıl özellikler	49
Tablo 11.	LS-OPT için optimizasyon ayarları.....	57
Tablo 12.	Optimizasyon için seçilen örnekleme noktaları ve değerleri.....	58
Tablo 13.	Gompertz 3 parametere sigmoidal tipi eğrisi için belirlenen katsayılar	63

1. GENEL BİLGİLER

1.1 Giriş

Tüm dünyada fosil yakıtların tüketimi, petrol fiyatları ve CO₂ emisyonları 1973 yılındaki büyük petrol krizinden bu yana sürekli olarak artmaktadır [1]. Şekil 1'den ve Carpenter'ın yaptığı istatistiksel çalışmadan Amerika Birleşik Devletleri'nin, dünya toplam petrol imalatının %25'ini tek başına gerçekleştirdiği; bu miktarın yaklaşık %70'ini de ulaşım sektöründe kullandığı görülmektedir [2]. Enerji Piyasası Denetleme Kurulu tarafından hazırlanan rapora [3] göre 2010-2012 yılları arasında ülkemizde ham petrolün temin edilmesinde yerli kaynakların kullanımında azalma olurken, ihtiyacın karşılanmasında ithalata yönelme gerçekleşmiş ve toplam ham petrol tüketimi % 12 civarında artış göstermiştir (Şekil 2). Bu artış Geçtiğimiz son 10-20 yılda artan rekabet koşulları ve çevresel düzenlemeler (hava kirliliği ve küresel ısınma karşıtı yasal düzenlemeler) otomotiv firmalarını, daha hafif, daha az yakıt tüketen, daha az karbondioksit emisyonu ortaya çıkaran ve mukavemet/ağırlık oranı daha yüksek araçlar üretmeye sevk etmiştir. Bu amaç doğrultusunda üreticiler, maliyet durumunu da göz önünde bulundurarak hem hafif ağırlıklı malzemeler, alaşımlar veya kompozitler kullanmak ve/veya bu malzemeleri daha hafif ve fonksiyonel yapılar haline getirmek zorundadırlar [4].

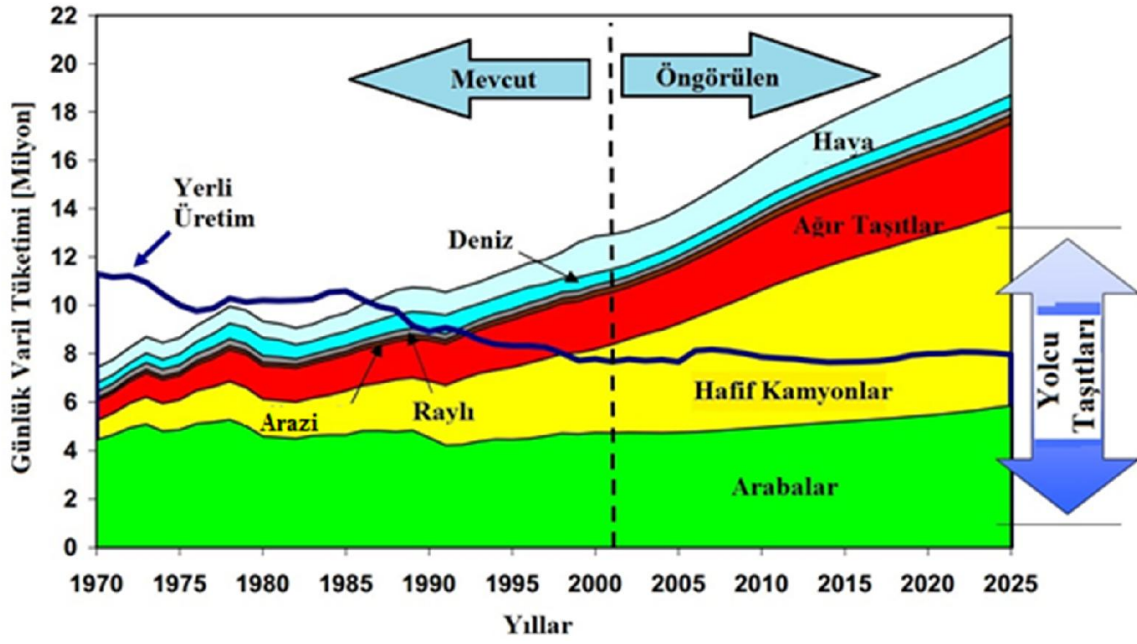
Motorlu taşıtların gövdelerinde düşük karbonlu çelik (DKÇ) gibi otomotiv sektöründe yaygın olarak kullanılan birçok malzemenin yerine alüminyum, magnezyum, ileri yüksek mukavemetli çelikler (İYMÇ) ve kompozitlerin kullanılması için çalışmalar yapılmaktadır. Schultz [5] yaptığı çalışmada taşıt gövde ağırlığının %10 azalmasının yakıt tüketim verimliliğinin % 6-8 civarında artacağını belirtmiştir. DKÇ yerine alüminyum kullanılmasıyla % 40-60 oranında hafifleme sağlanabilirken bu değer magnezyum kullanılmasıyla % 60-75'e kadar çıkabilmektedir (Tablo 1). Hirsch'e [6] göre Batı Avrupa binek otomobillerinde alüminyum kullanımı son on yılda ikiye katlandı (Şekil 3). Ancak hafif alaşımlarla üretilen bir parçanın maliyetinin, bu alaşımların hem ham madde hem de imalat maliyetlerinin yüksek olması nedeniyle artması öngörülmektedir. Örneğin bu artış alüminyum alaşımları için %30-100 arasında değişirken magnezyum alaşımları için % 50-150'ye kadar çıkabilmektedir. Öte yandan, bir otomobilin tüm ömrü boyunca sebep olduğu

enerji tüketiminin % 80'i, trafikteki kullanımı süresince gerçekleştiğinden hafif parçaların kullanımı halen daha uzun vadede ön plana çıkan ve maliyet etkili bir çözüm olarak görülmektedir [7].

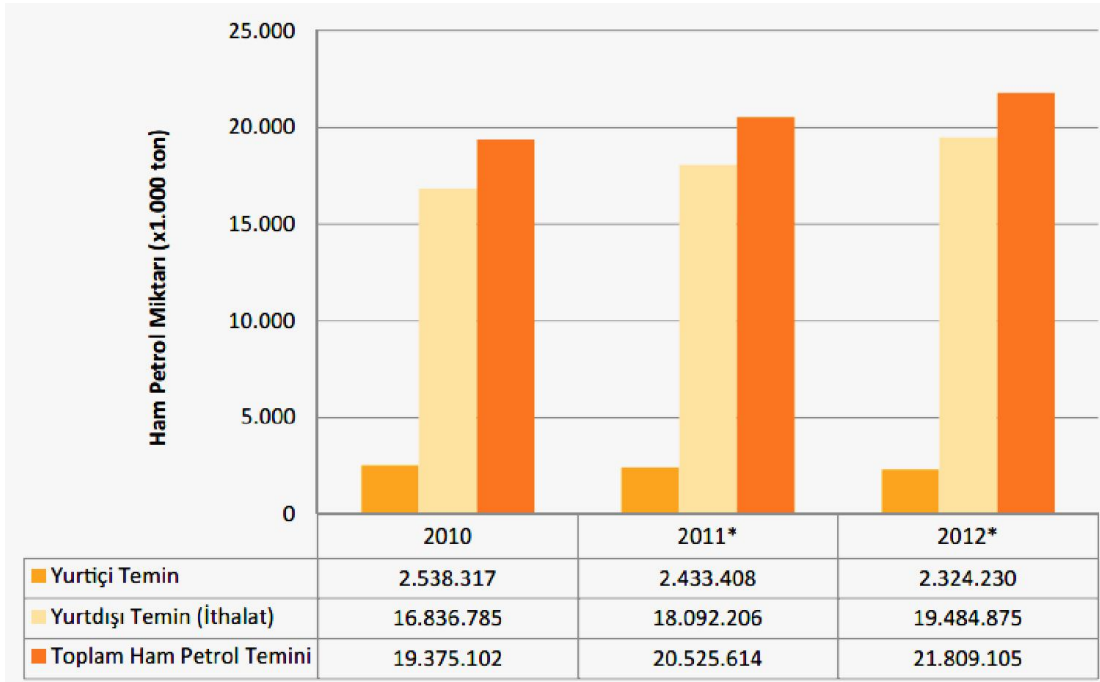
Tablo 1. Geleneksel malzemeler yerine hafif malzemelerin kullanılmasına bağlı kütle azalması ve maliyet değişimi [8]

Geleneksel Olarak Kullanılan Malzeme	Alternatif Hafif Malzeme	Kütle Azalma Miktarı (%)	Bağlı Maliyet (parça başına [\$])*
DKÇ	Yüksek Mukavemetli Çelik	10	1
Çelik, Dökme Demir	Alüminyum	40-60	1.3-2
Çelik, Dökme Demir	Magnezyum	60-75	1.5-2.5
Alüminyum	Magnezyum	25-35	1-1.5
Çelik	Cam FRP Kompozitler	25-35	1-1.5
Çelik	Grafit FRP Kompozitler	50-60	2-10+
Çelik/ Dökme Demir	Al Matrisli Kompozitler	50-65	1.5-3+
Alaşımlı Çelik	Titanyum	40-55	1.5-10+
Karbon Çeliği	Paslanmaz Çelik	20-45	1.2-1.7

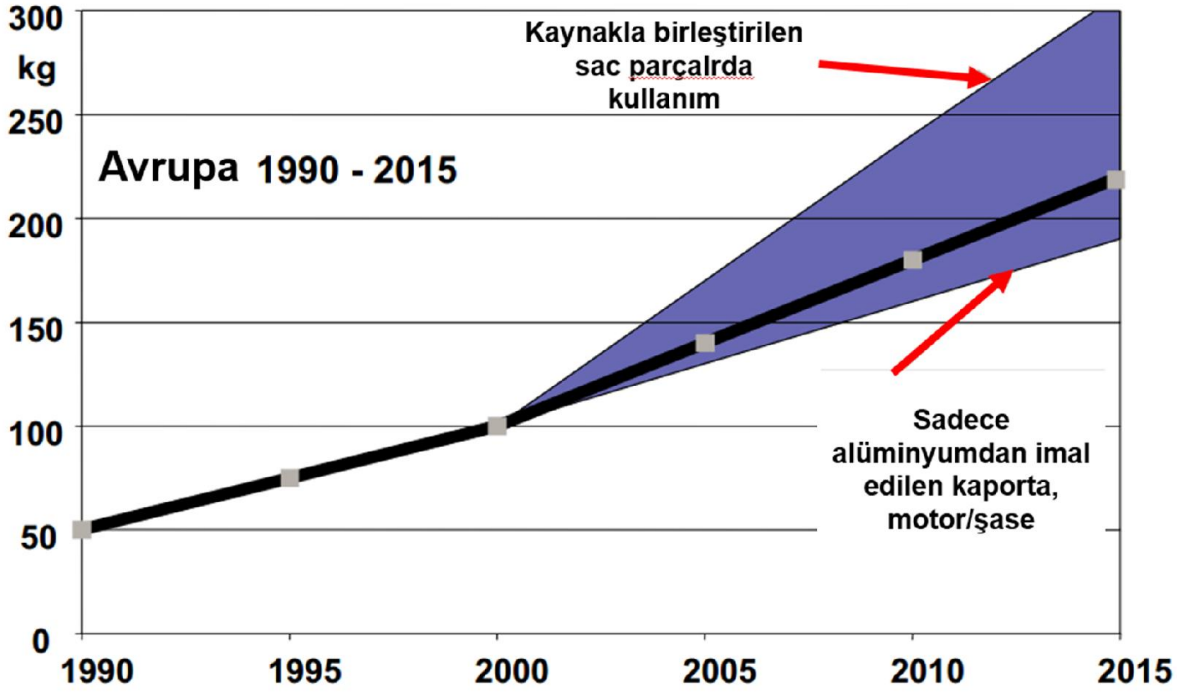
*Hem hammadde hem de imalatı içerir.



Şekil 1. Amerika Birleşik Devletleri'ndeki ulaştırma için kullanılan petrol miktarı ve yerli üretim karşılaştırması [9]



Şekil 2. 2010-2012 yılları arasında rafinerici lisansı sahiplerinin ham petrol temin miktarları (ton) [3]



Şekil 3. Batı Avrupa’da binek otomobili başına ortalama alüminyum kullanımı [6]

1.2. Genel Literatür Taraması

1.2.1. Ilık Şekillendirme

Malzemelerin şekillendirilebilirliğini arttırmak amacıyla kullanılan önemli yöntemlerden biri olan ılık şekillendirme (İŞ) prosesiyle ilgili çalışmalar 1960 yılından bu yana devam etmektedir [4]. Hatta daha eskiye gidildiğinde Finch ve ark. 1946 yılında dikdörtgen ve dairesel kapların derin çekilmesinde İŞ etkisini araştırmışlar ve yüksek sıcaklıklarda %30 daha fazla kap derinliği elde etmişlerdir. [10, 11]. İŞ’in malzemelerin şekillendirilebilirliğinde önemli bir etken olduğu belirten başka bir çalışma da 1978 yılında Shehata ve ark. tarafından gerçekleştirilmiştir [12]. Yapılan bir dizi çalışmada yüksek sıcaklıklarda şekillendirilen 5XXX serisi alüminyum alaşımlarının derin çekilebilirliğindeki artışı ortaya koymuştur [13-15].

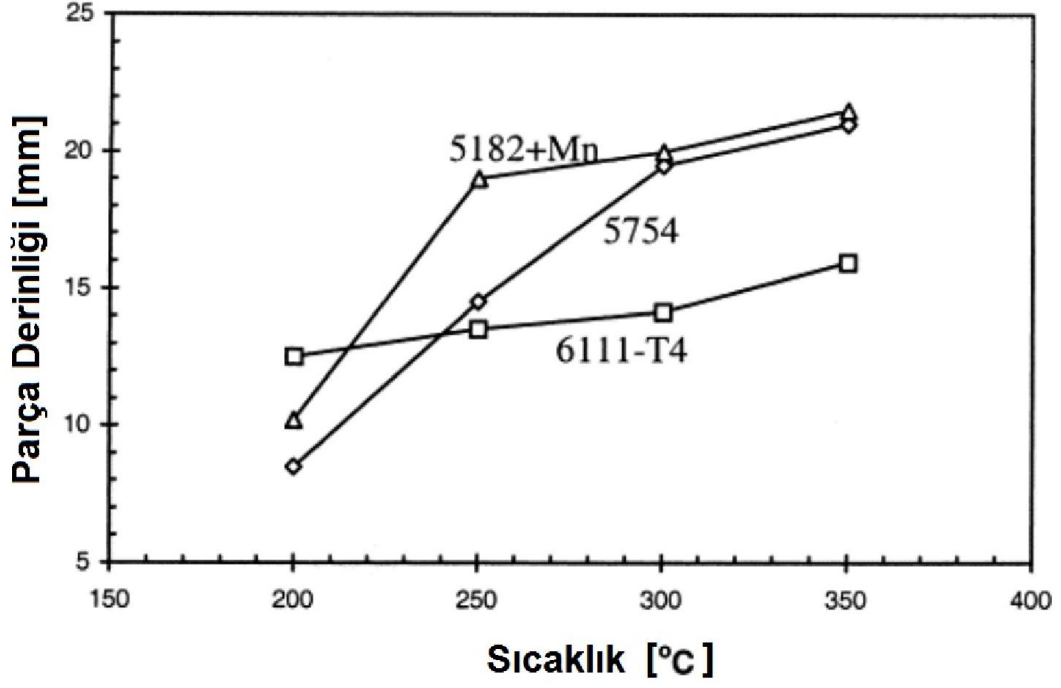
Alüminyum ve magnezyum gibi alaşımlar özellikle binek ve diğer hafif ticari araçların üretiminde hafifletme açısından yüksek potansiyel taşımaktadırlar. Bununla birlikte alüminyum alaşımlarının, içerisindeki yüksek alaşım yüzdeleri ve magnezyum alaşımlarının, hegzagonal kristal yapısından dolayı alüminyum ve magnezyum

alaşımalarının oda sıcaklığındaki şekillendirilebilirlikleri sınırlıdır [16, 17]. Bundan dolayı yeniden kristalleşme sıcaklığının (Al alaşımları için 230-330 °C – Mg alaşımları için 175-325 °C) altındaki sıcaklıklarda gerçekleştirilen şekillendirme prosesleri, oda sıcaklığında şekillendirilebilirliği sınırlı olan bu alaşımların şekillendirilmelerinde büyük önem arz etmektedir [16, 18]. Yeniden kristalleşme sıcaklığının altında ama oda sıcaklığının üzerinde gerçekleştirilen bu işleme ılık şekillendirme denir [19, 20]. Yeniden kristalleşme sıcaklığı malzemenin cinsine, saflığına, deformasyon miktarına, tavlanmasına ve başlangıç tane boyutuna bağlı olarak, T_m ; erime sıcaklığı olmak üzere $(0.3 - 0.5)T_m$ arasında değişkenlik göstermektedir [21]. İŞ ile soğuk şekillendirmenin ayrıldığı sınır değeri $0.3T_m$ olarak tanımlanmaktadır [19]. Üst sınır olarak ise $0.5T_m$ değeri sıcak şekillendirmeye geçiş olarak kabul edilmektedir.

İŞ'nin katkısıyla, şekillendirme kuvvetleri ve basıncı azalmakta ve aktif hale gelen ek kayma düzlemleri yardımıyla, başta magnezyum alaşımları olmak üzere, malzemelerin şekillendirilebilirliği (sünekliği) artmaktadır. Dahası, alüminyum alaşımlarının şekillendirmesinde kritik bir etken olan geri yaylanma etkisi (springback) önemli derecede önlenmektedir [17]. Bu yöntem ile sıcak şekillendirmede karşılaşılabilen üretilen parçaların oksitlenmesi, boyutsal doğruluğun düşük olması gibi sorunların aşılmasının yanı sıra şekillendirme sonrası uygulanan ısıtma işlemi olan ihtiyaç ortadan kalkmaktadır [4].

Li ve ark. farklı malzemeler üzerinde yaptıkları İŞ işlemleri ile sıcaklığın etkisinin şekillendirilen kabın derinliğine artan yönde etki etkidiğini gözlemlemişlerdir (Şekil 4) [22].

Sac malzemelerin derin çekilme proseslerinde şekillendirilebilirliğin en önemli kriteri sınır çekme oranıdır (SÇO-LDR; Limiting Drawing Ratio). SÇO genel olarak tek kademede başarıyla şekillendirilebilen en büyük başlangıç sac çapının zımba çapına oranı olarak tanımlanmaktadır. Groche, alüminyum alaşımlarının yüksek sıcaklıklarda hidromekanik derin çekme yöntemi ile şekillendirilmesi konusunda ilk çalışmaları yapmıştır [23]. Yapılan çalışmada sıcaklığın etkisi ile sac malzemenin sınır çekme oranı sıcaklıkla artış göstermiştir. Ayrıca hidromekanik derin çekme prosesi ile aynı sıcaklıklarda derin çekme prosesine nazaran daha yüksek SÇO'lara ulaşıldığı görülmüştür (Şekil 5).

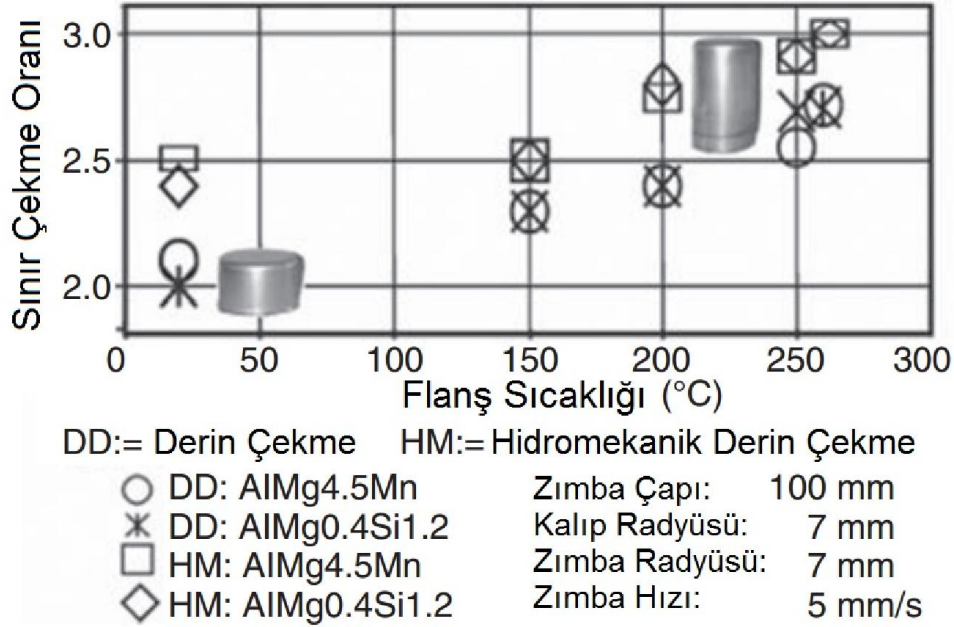


Şekil 4. İzotermal ısıtma (kalıp ve zımba sıcaklıkları aynı) şartlarında 3 farklı alüminyum alaşımının farklı sıcaklıklar altında şekillendirilmesi sonucu elde edilen kap derinliğinin değişimi [22]

İŞ prosesinin faydalarından tam olarak yararlanmak için Neugebauer ve arkadaşları, yaptıkları çalışmada aşağıdaki zorlukların aşılması gerektiğini belirtmişlerdir [24]:

1. Uygun sıcaklık değerlerinin ve dağılımlarının belirlenmesi
2. Sıcaklık destekli şekillendirme prosesinin tüm proses zincirine entegrasyonu
3. Etkin bir takım (kalıp, zımba vs.) tasarımı için sonlu elemanlar simülasyonlarının doğrulanması
4. Maliyetlerinin ekonomik sınırlar içerisinde yer alması

Waagener ve Hartmann'a göre, daha yüksek derin çekme oranlarında ılık derin çekme veya ısıtma işlemi kullanılmalıdır [25, 26].

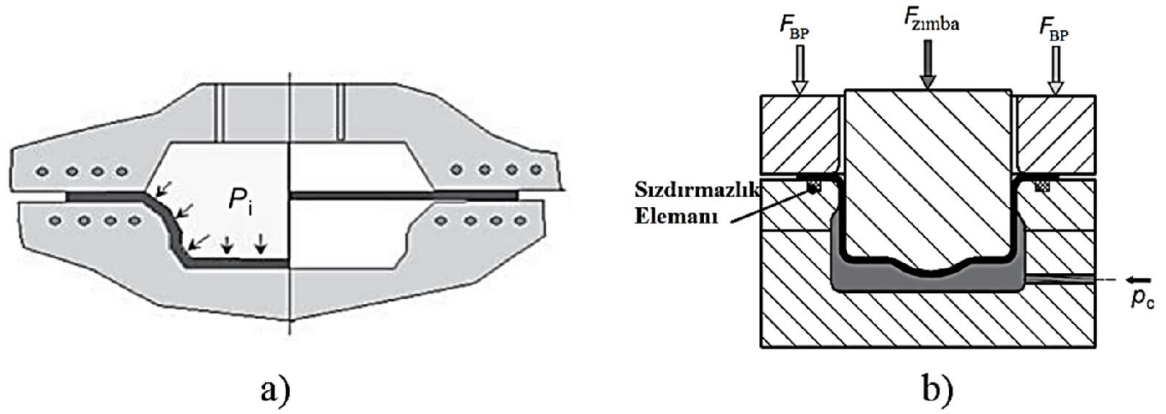


Şekil 5. Derin çekme ve HMD proseslerinin SÇO'ları arasındaki sıcaklığa bağlı ilişki [23]

1.2.2. Hidroşekillendirme ve Uygulama Alanları

Hidroşekillendirme prosesinin geçmişi 1940'lı yıllara dayanmaktadır [27-29]. Akışkan basıncının şekillendirme işlemi için takım olarak kullanımı 1900'lerin başlarına dayanmaktadır. İlk hidroşekillendirme işlemi Grey ve arkadaşları tarafından 1939 yılında yapılan çalışmadır [30]. Çalışmalarında Grey ve arkadaşları boru hidroşekillendirme prosesinin temelini atmış ve patentini almışlardır.

Hidroşekillendirme işlemi, iş parçasını (sac veya boru) plastik olarak şekillendirmek veya şekillendirilmesine yardımcı olmak için zımba, kalıp vs. yerine basınçlı akışkanın (sıvı veya gaz) kullanıldığı, bir metal şekillendirme yöntemidir [4]. Zımba veya kalıbın, basınçlı hidrolik ortam ile yer değiştirmesi dışında geleneksel derin çekme ile benzerlik gösterir. Basınçlı hidrolik ortamın zımbanın yerini alması halinde ise proses yüksek basınçlı sac hidroşekillendirme olarak adlandırılır (Şekil 6 a). Eğer kalıp, basınçlı hidrolik ortam ile yer değiştirir ise proses zımba ile sac hidroşekillendirme olarak adlandırılır (Şekil 6 b).



Şekil 6. a) Yüksek sac (dişi kalıpla) hidroşekillendirme b) Hidromekanik derin çekme [4]

Hidroşekillendirme işleminin sunduğu avantajlar aşağıdaki gibi sıralanabilir:

1. Şekillendirilebilirlikte artış
2. Kalıp maliyetlerinde azalma
3. Karmaşık şekilli parçaların tek kademede şekillendirilebilmesi
4. Daha üniform kalınlık dağılımı eldesi
5. Daha yüksek mukavemet
6. Düşük yüzey pürüzlülüğü
7. Daha dar toleranslarda imalat

Hidroşekillendirme prosesi başta otomotiv endüstrisi olmak üzere sağlık ve havacılık sektörlerinde de yaygın olarak kullanılmaktadır. Otomotiv endüstrisinde özellikle kaporta, kapı ve çamurluk sacı, yakıt deposu, egzoz borusu ve şase imalatında hidroşekillendirme yöntemi etkin bir şekilde kullanılmaktadır (Şekil 7). Ayrıca havacılık endüstrisinde, uçağın panelleri, gövde iskeletleri, mermi kovanları vb. karmaşık şekilli yapı ve parçaların imalatında hidroşekillendirme prosesi kullanılmaktadır.



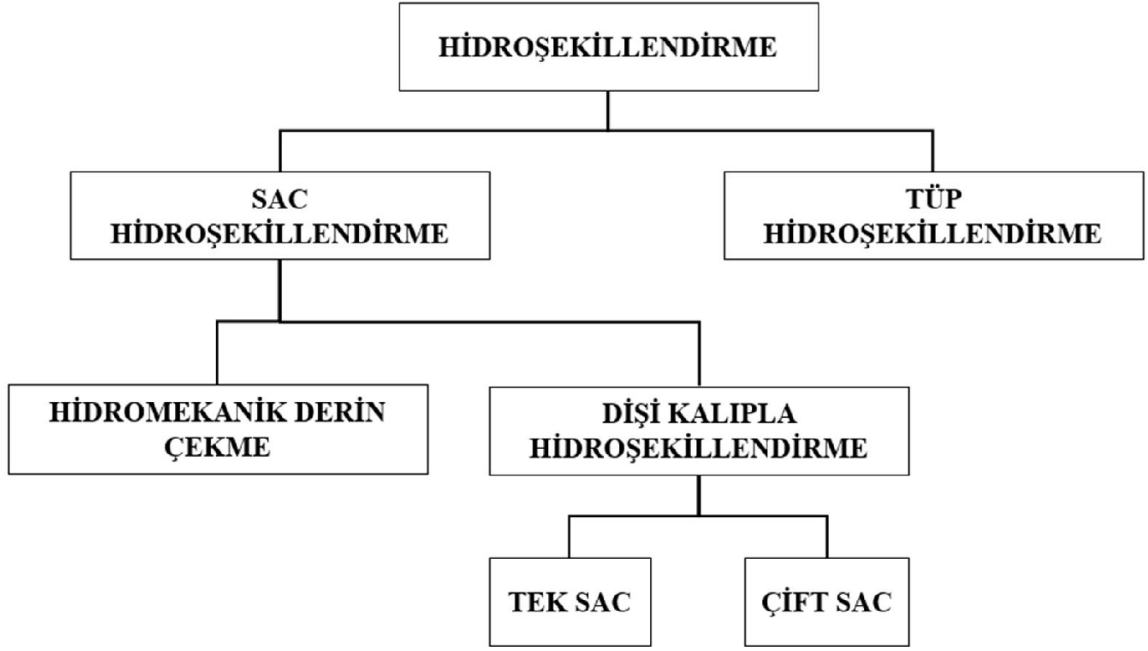
Şekil 7. Sac hidroşekillendirme prosesine ait endüstriyel örnekler: a) 2007 GM Pontiac Solstice GXP'ye ait çeşitli hidroşekillendirilmiş parçalar, b) tek adımda hidroşekillendirilmiş iki parçadan oluşan yakıt tankı [4]

1.2.2.1. Hidroşekillendirme Çeşitleri

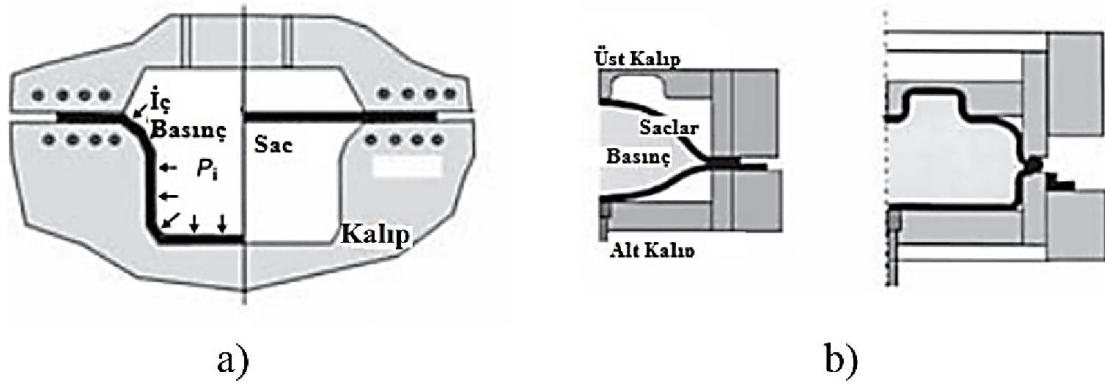
Hidroşekillendirme prosesi temelde sac ve boru hidroşekillendirme olarak ikiye ayrılmaktadır (Şekil 8).

1.2.2.1.1. Yüksek Basıncılı Sac (Dişi Kalıpla) Hidroşekillendirme

Dişi kalıpla sac hidroşekillendirme işleminde sac, zımba yerine kullanılan yüksek basınçlı akışkan ile kalıp içerisine doğru şekillendirilerek kalıbın şeklini alır (Şekil 6 a). Yüksek basınçlı sac şekillendirme işleminin tek ve çift sac ile hidroşekillendirme olmak üzere iki çeşidi mevcuttur. Tek sac ile hidroşekillendirme işleminde tek bir adet sac kalıp ile basınç kabı arasında eteklerinden sıkıştırılır ve ardında uygulanan yüksek akışkan basıncı ile kalıp içerisine doğru şekillendirilir (Şekil 9 a). Çift saclı hidroşekillendirme işleminin, iki adet sac kalıplar arasına eteklerinden sıkıştırıldıktan sonra aralarına uygulanan akışkan basıncının etkisiyle kalıplar içerisine doğru şekillendirilmesiyle içi boş bir geometri elde edilmesiyle gerçekleştirilir (Şekil 9 b).



Şekil 8. Hidroşekillendirme teknolojisinin sınıflandırması [31]

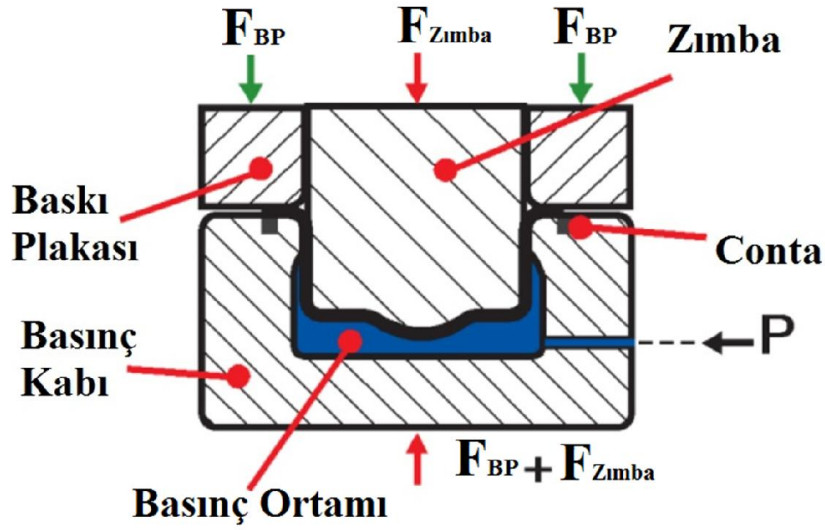


Şekil 9. Dişi kalıpla hidroşekillendirme, a) Tek sac b) çift sac [3]

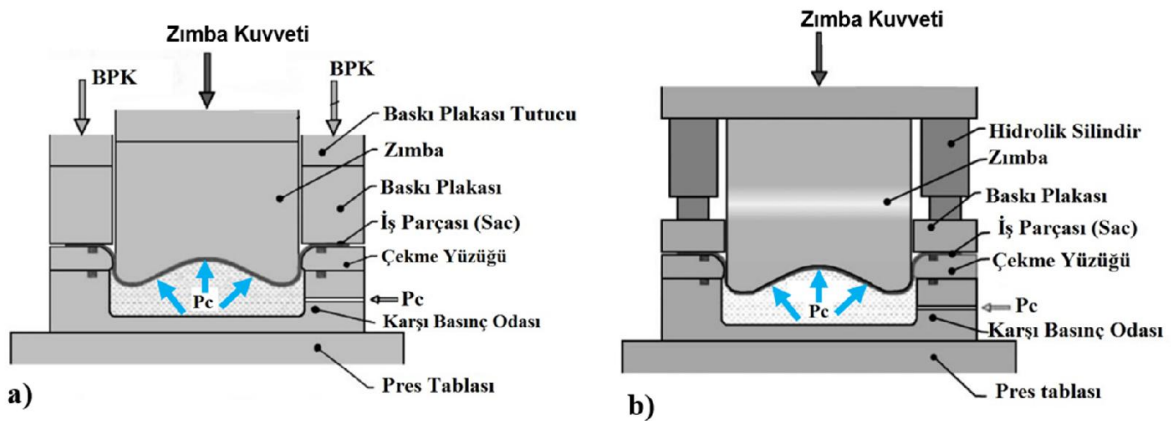
1.2.2.1.2. Hidromekanik Derin Çekme (HDC)

Zımba ile hidroşekillendirme işlemi, aynı zamanda hidromekanik derin çekme olarak da tanımlanmaktadır. Hidromekanik derin çekme işleminde, klasik derin çekme işleminin aksine dişi kalıbın yerini akışkan basıncı kabı almaktadır (Şekil 10). Hidromekanik derin çekme (HDC) prosesinde, temel şekillendirme tertibi, Şekil 11’de görüldüğü üzere zımba, baskı plakası, kalıp ve basınç odasından oluşmaktadır. Bu tip sac şekillendirme işlemi,

klasik (mekanik) derin çekme prosesi ile zımbanın tersi yönünde uygulanan karşı akışkan basıncı dışında benzerdir. Sac (iş parçası), zımba yüzeyine doğru derin çekilirken akışkan karşı basıncı, sacın diğer tarafına zımba hareketine ters doğrultuda uygulanmaktadır. Akışkan basıncının uygulandığı ortam “pasif” (zımbanın ileri hareketi yardımıyla akışkanın sıkıştırılamazlık prensibinden yararlanılarak) veya “aktif” (hariç bir pompadan yararlanılarak) tanımlanabilir [32].



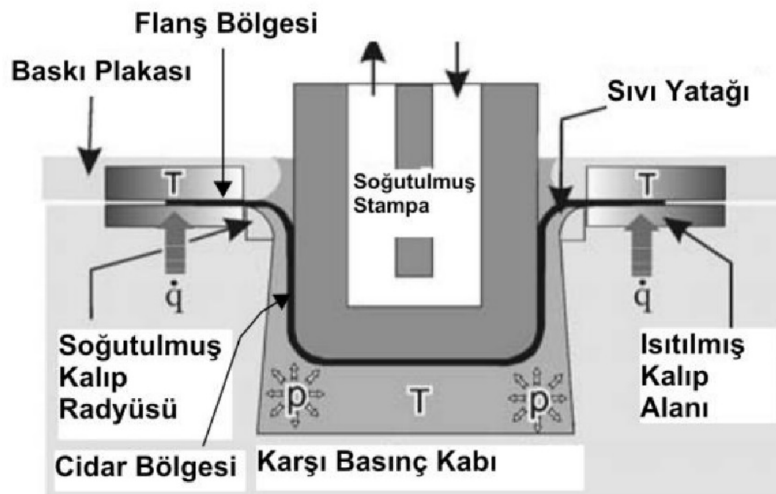
Şekil 10. Zımba ile hidroşekillendirme (hidromekanik derin çekme) prosesinin şematik gösterimi [32]



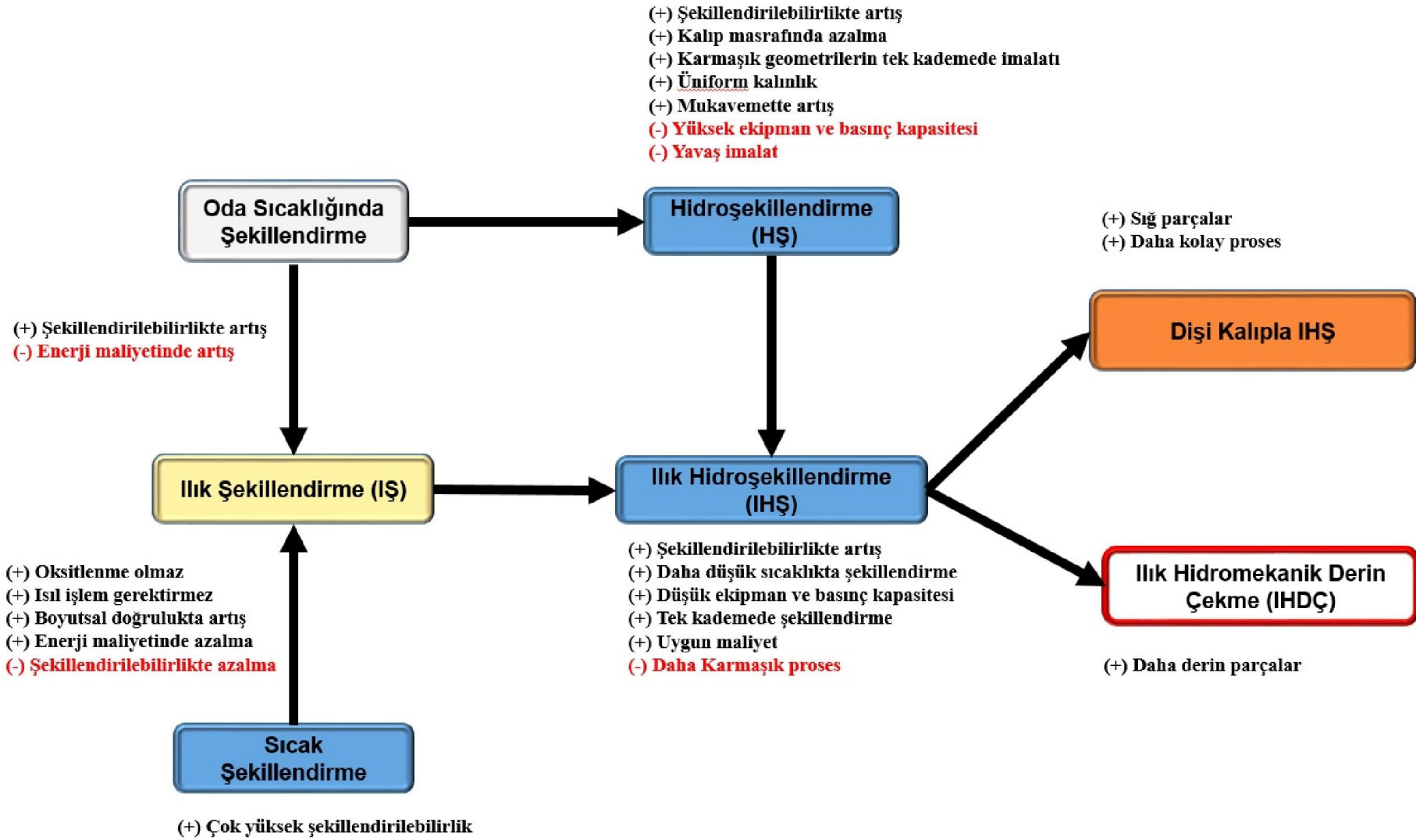
Şekil 11. Hidromekanik derin çekme: a) tek etkili, b) çift etkili [33]

1.2.2.1.3. Ilık Hidromekanik Derin Çekme (IHDC)

Bu tez çalışması kapsamında ılık hidromekanik derin çekme prosesi ele alınmıştır. Hidroşekillendirme ve ılık şekillendirme işlemleri bir araya getirilerek her iki yöntemin faydalarının birleştirilmeye çalışıldığı bu yöntem üzerine çalışmalar 2000’li yıllarda başlamıştır. Bu yöntem ile derin çekme kuvvetini azaltmak ve iletilebilir derin çekme kuvvetini arttırmak amaçlanmaktadır. IHDC prosesinde şekillendirilebilirlikte önemli miktarda artış, birden fazla parçanın birleştirilmesiyle imalat yerine tek kademedeki şekillendirme, üretim adımlarının ve parça ağırlığının azaltılması gibi avantajlar sunmaktadır [4, 23, 34-36]. Bunların yanı sıra hidroşekillendirme prosesinde çok yüksek pres kapasitesi ve boyutlara duyulan gereksinim, bu yöntemin ılık şekillendirme ile birleştirilmesi sayesinde gerekli şekillendirme kuvvetleri azaldığından pres kapasite ve boyutları azalmaktadır. Aynı zamanda bu yöntemle IŞ’ye kıyasla daha düşük sıcaklıklarda daha yüksek şekillendirilebilirlik elde edilmektedir. Dolayısıyla IHDC yöntemi ekonomik avantajlar da sağlamaktadır. Hidromekanik derin çekme işleminin bir diğer avantajı da akışkan basıncı sayesinde şekillendirmeye yardımcı olan sac ve zımba arasındaki sürtünme kuvvetini artırırken, akışkan yatağı sayesinde (Şekil 12) sac metal ile kalıbın üst kısmı arasında sürtünmeyi azaltmasıdır. Bu davranışı ile zımba profili bölgesindeki gerilme dağılımını iyileştirmektedir [37]. IHDC yönteminin avantaj ve dezavantajları diğer sac şekillendirme yöntemleri ile karşılaştırmalı olarak Şekil 13’de verilmiştir.



Şekil 12. Yüksek sıcaklıklarda gerçekleştirilen hidromekanik derin çekme işleminin proses prensipleri [23]



Şekil 13. Sac şekillendirme proseslerinin avantajlarına göre karşılaştırılması

Groche ve diğerkleri, yaptıkları çalışmada, derin çekmeye bir bariyer olarak oluşan kuvvetlerle iletilebilir kuvvetler arasındaki oranı göstermişlerdir [23]. Toplam derin çekme kuvvetini azaltmak ve iletilen derin çekme kuvvetini arttırmak amacıyla IHDC prosesi için aşağıdaki uygulamaları yapılması gerektiğini ifade etmişlerdir (Şekil 12):

- Akma gerilmesini azaltmak amacıyla flanş bölgesinde sac parça ısıtılmalıdır.
- Kalıp giriş bölgesinde sıvı yatağı aracılığıyla sürtünme kuvvetleri azaltılmalıdır.
- Kuvvet iletimini arttırmak için, akışkan basıncı aracılığıyla zımba ile sac arasındaki sürtünme kuvveti artırılmalıdır.
- Flanşlarına verilen ısı ile sıcaklığı artırılan sac, akışkan basıncının etkisi ile zımba cidarlarının sac ile tam teması yoluyla soğutulmalıdır.

Groche ve ark. [23] göre IHMD işleminde en önemli sistem parametreleri akma gerilmesi, sıcaklığa bağlı sürtünme katsayısı ve temas bölgelerinde sac ile kalıplar arasındaki ısı transfer katsayılarıdır.

Yapılan bazı deneysel çalışmalar ile farklı proseslerin malzemelerin şekillendirilebilirliklerine etkileri karşılaştırılmış ve IHDC yönteminin diğerk yöntemlere nazaran çok daha etkin olduğu belirlenmiştir (Tablo 2) [23, 26, 37, 38]. Bu deneysel çalışmalarda sıcaklık parametresinin proses üzerindeki etkileri araştırılmıştır.

Tablo 2. Farklı proseslerin malzemenin sınır çekme oranına etkilerinin karşılaştırılması [23, 26, 37]

Çalışma	Klasik Derin Çekme	Hidromekanik Derin Çekme	Ilık Şekillendirme	Ilık Hidromekanik Derin Çekme
Kurz (2004)	-	-	2.8	3.6
Groche ve ark. (2002)	-	2.5	2.7	-
Xu ve ark. (2002)	2.0	-	-	3.3

Önder ve ark., yaptıkları 200'ün üzerindeki deneysel ve sayısal çalışmada farklı geometrideki sacların (daire, elips, dikdörtgen, kare) farklı prosesler (klasik derin çekme,

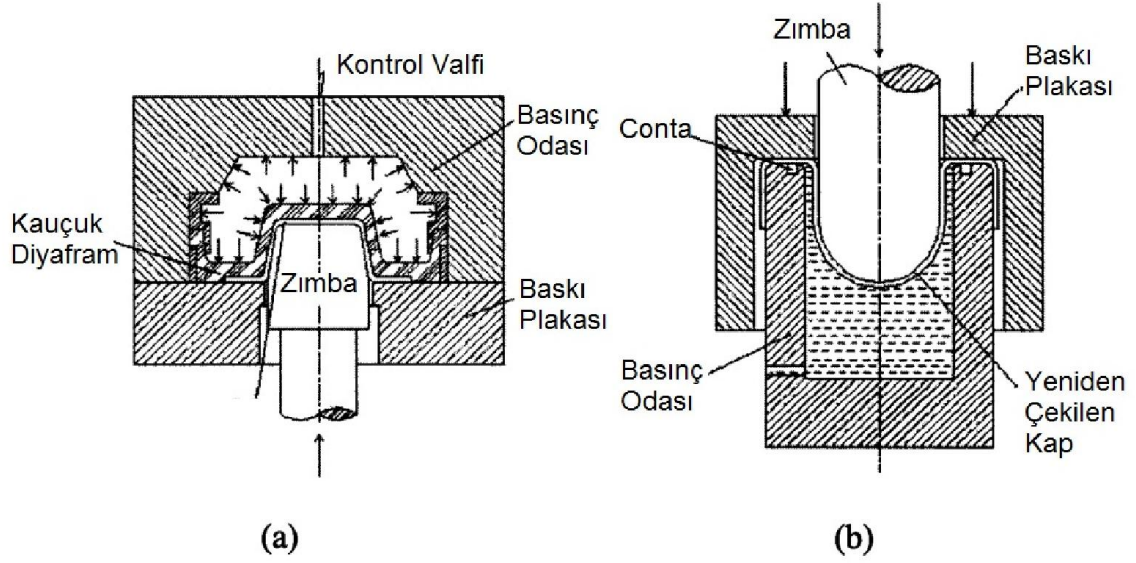
hidromekanik derin çekme ve yüksek basınçlı hidroşekillendirme) ile imal edilmelerini değerlendirerek hangi geometrinin hangi proses ile daha etkin bir biçimde şekillendirildiğini ortaya koymuşlardır [39]. Bolt ve ark. ise AA 6016-T4 ve AA 5754-O alaşımları ile yaptıkları deneylerde otomotiv parçalarının ılık şekillendirilmesinin uygulanabilirliğini araştırmışlardır [40]. Bu çalışmalarında farklı geometrilerdeki kapları (dikdörtgen kutu ve konik dikdörtgen kutu) şekillendirerek artan sıcaklığın (100-250°C) etkisi ile kapların derinliğinde önemli ölçüde (yaklaşık %25-65) artış tespit etmişlerdir.

1.2.2.1.4 Diğer Hidroşekillendirme Çeşitleri

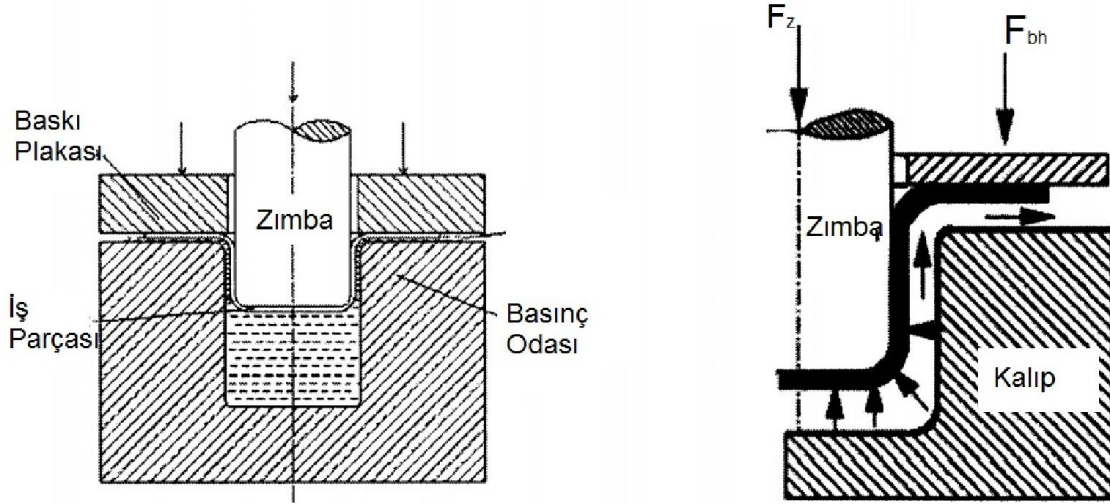
Yukarıda anlatılan ve kullanımı yaygın olan hidroşekillendirme (HŞ) proseslerinin yanı sıra özel kullanım alanları olan kauçuk diyafram ile HŞ, yeniden derin çekme ile HŞ vb. çeşitleri de mevcuttur [41].

Kauçuk diyafram ile HŞ işleminde üst basınç odasının üzerine yerleştirilmiş kauçuk diyafram konumlandırılmıştır (Şekil 14 a). İş parçası (sac) yerleştirildikten sonra üst basınç odası ile sıkıştırılır ve basınç odasında basınç artırılırken zımba yukarı doğru hareket sağlanır. Şekil 14 b'de hidromekanik yeniden derin çekme işlemi gösterilmiştir. Bu işlem hidromekanik derin çekme işlemi ile düz iş parçası yerine ön şekillendirilmiş kapların şekillendirilmesi esnasına dayanmaktadır.

Bir başka hidroşekillendirme yöntemi olan akışlı derin çekme işlemi de hidromekanik derin çekme işlemi ile benzerlik gösterir (Şekil 15). Tek farkı akışkan kaçağını önleyecek sızdırmazlık contalarının kullanılmamasıdır. Basınç odasındaki basınç miktarı akışkan kaçağı ile kontrol edilmektedir. Zımba kalıp boşluğuna giriş yaptığında sac şekillenir ve akışkan basıncı artarken sıvı sızar. Akışkan sıvı olarak genellikle su kullanılmaktadır. Buna rağmen oluşan yüksek basınç değeri sebebiyle iş parçası ile baskı plakası arasında önemli miktarda sürtünme artışı olur.

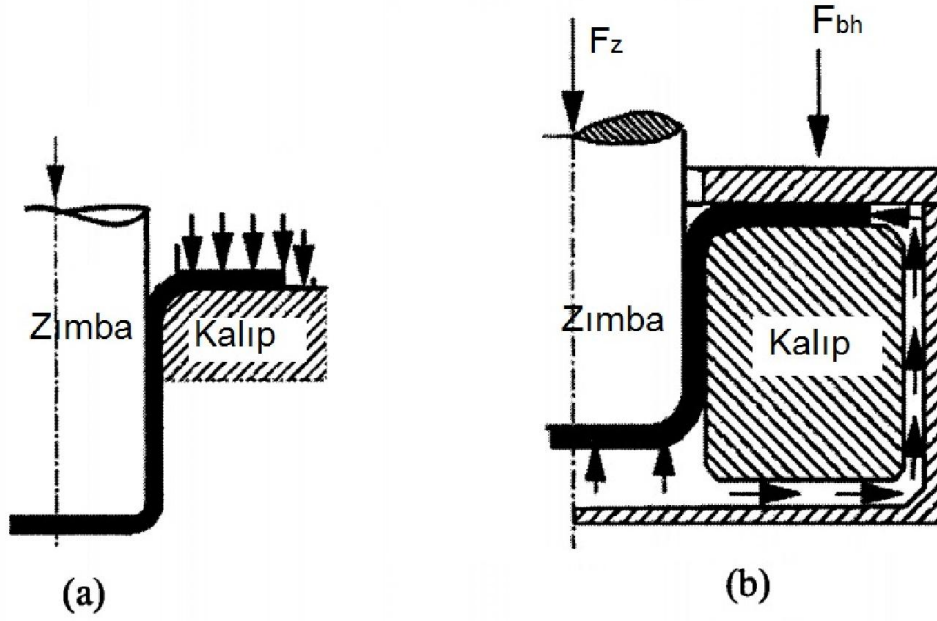


Şekil 14. a) Kauçuk diyafram ile hidroşekillendirme, b) Yeniden derin çekme ile hidroşekillendirme [42]



Şekil 15. Akışlı derin çekme yöntemi hidroşekillendirme [42, 43]

Baskı plakası kuvvetinin sıvı basıncı ile gerçekleştirildiği hidroşekillendirme işlemi Şekil 16 a'da görülmektedir. Burada standart baskı plakasının yerini kauçuk bir diyafram ve akışkan basıncı almaktadır. Bu yöntemin avantajı olarak sürtünmede azalma gösterilebilir. Benzer bir hidroşekillendirme işlemi de esnek şekillendirme veya yüksek iç basınçlı metal şekillendirme (Şekil 16 b). Bu yöntemde akışkan basıncı flanş bölgesinde buruşmayı önleyecek kadar yüksek olmalıdır.



Şekil 16. Çeşitli hidromekanik derin çekme proseslerinin şematik gösterimi: a) Hidrolik baskı plakası kuvveti ile şekillendirme, b) Yüksek iç basınç etkisiyle şekillendirme [43]

1.2.3. Ilık Hidroşekillendirmede Prosesinde Etkin Parametreleri

Mevcut çalışmalar incelendiğinde arttırılmış sıcaklığın SÇO'ya olan olumlu katkısı birçok kez araştırılarak ortaya konmuştur [23, 36-38]. Groche ve ark. ılık şekillendirme sıcaklıklarında gerçekleştirdikleri deneylerle SÇO'yu 2.5'ten 2.7'ye kadar arttırarak daha derin parçalar şekillendirmeyi başarmışlardır [23]. Magnezyum alaşımları şekillendirilirken sıcaklığın 225 °C üzerine çıkarılmasıyla akma gerilmesinde önemli miktarda düşüşe sebep olan sıcaklığın şekillendirmede anahtar bir parametre olduğu Kurz tarafından ifade edilmiştir [26]. Yine Bolt ve ark. yaptıkları çalışmada farklı geometrilerdeki kapların derin çekme işleminde sıcaklığın yardımıyla ulaşılan maksimum kap derinliğinin % 25-65 arasında artırılabilceğini ifade etmişlerdir [40]. Bolt ve ark., aynı zamanda, ılık şekillendirme işleminde farklı malzemeler için belirli bir derinlikte şekillendirmenin farklı sıcaklık değerlerinde olabileceğini belirlemişlerdir. Örneğin AA6016-T4 alaşımını belirli bir derinlikte şekillendirmek için gerekli sıcaklık değeri AA 5754-O alaşımını aynı derinlikte şekillendirmek için gerekene kıyasla daha düşüktür. Bu veriler göz önünde bulundurulduğunda şekillendirmenin maksimum değerde olması için sıcaklığın istenilen derinlikteki şekil için en optimum değerde olması gerekmektedir.

Literatürde incelenen çalışmalarda genellikle baskı plakası kuvveti değeri sabit olarak alınmaktadır [37, 44-47]. Halkacı ve ark., net baskı plakası kuvvetinin değişken olarak tanımlanması ile SÇO değerinin arttırılabileceğini belirtmişlerdir [47].

Bu bilgilerden hareketle bu tez çalışması kapsamında ılık hidroşekillendirme prosesine ait sıcaklık ve yükleme profilleri (baskı plakası kuvveti ve hidrolik basınç) parametreleri incelenmiştir.

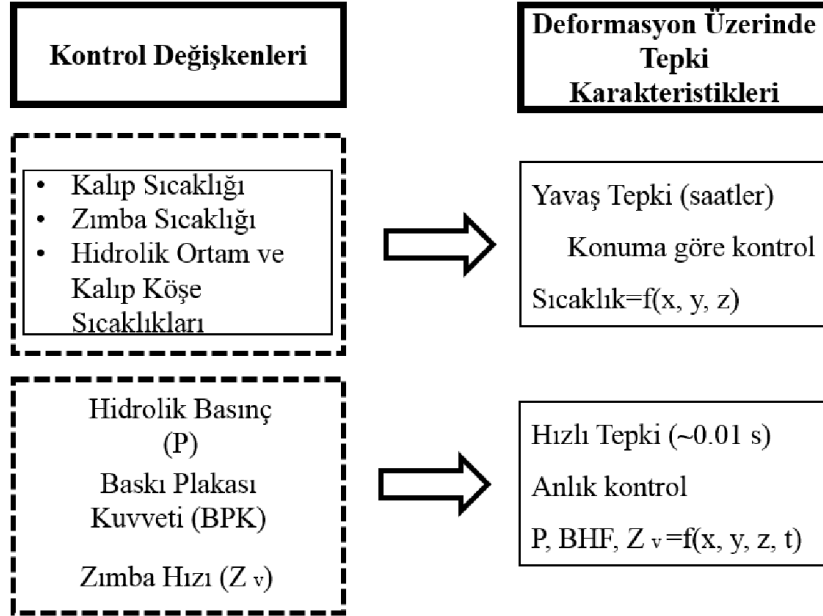
1.2.3.1. Sıcaklık Parametresi

Hafif metallerin, ılık sıcaklıklarda hidroşekillendirilmesi oldukça yeni bir yöntemdir. Sıcaklığın arttırılması ile daha düşük akışkan basınçlarında şekillendirme işlemi yapılması sağlanmaktadır. Literatürdeki deneysel çalışmalarda özellikle sıcaklık parametresinin SÇO üzerindeki etkisi araştırılmıştır [23, 37, 38]. Yapılan bu çalışmalarda sıcaklığın etkisi ile şekillendirme kuvvetlerinde azalma ve derin çekilen kapların yüksekliğinde artış elde edilmiştir.

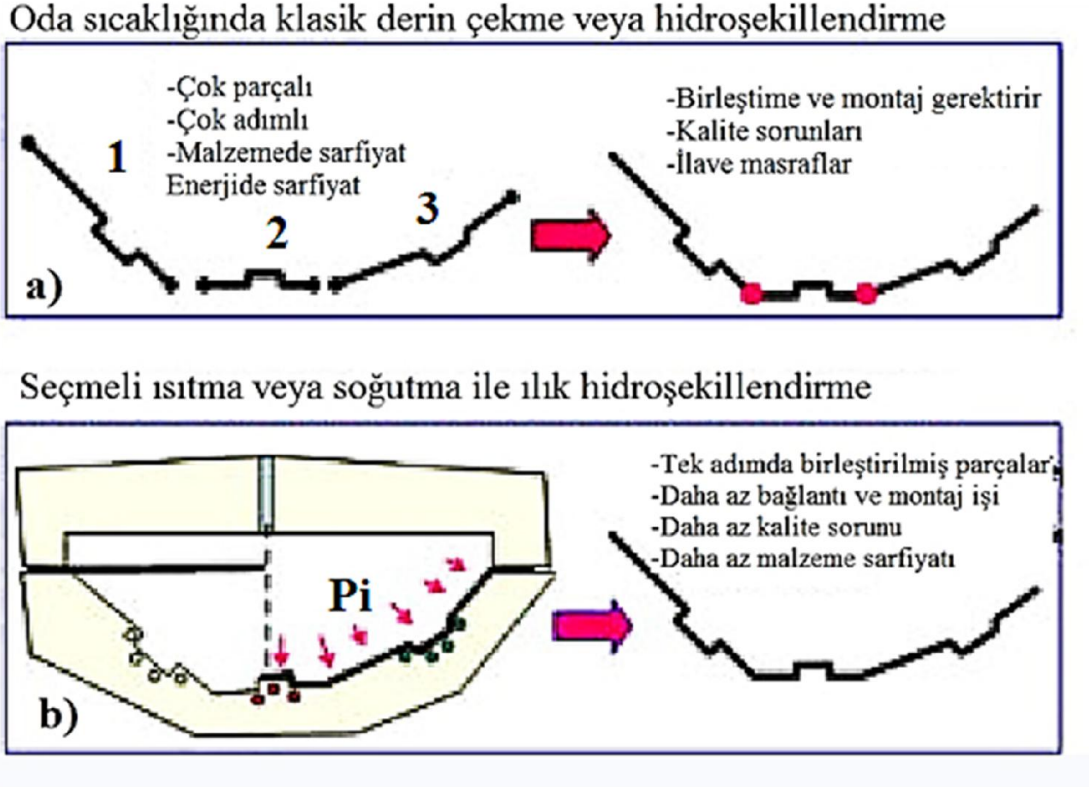
Groche ve ark. yaptıkları çalışmada hidromekanik derin çekme ile ılık şekillendirme proseslerinin etkilerini birleştirerek toplam şekillendirme kuvvetlerini azaltıp iletilen şekillendirme kuvvetini arttırmaya çalışmışlardır [23]. Çalışmada sonuç olarak sıcaklık etkisi ile desteklenen hidromekanik derin çekme prosesinin şekillendirme kapasitesini önemli ölçüde arttırdığı farklı şekillendirme yöntemlerindeki SÇO'lar karşılaştırılarak ortaya konmuştur. Novotny ve Geiger ise takımların ısıtılması ve akışkanın daha düşük sıcaklıklarda tutulması ile malzemenin akma gerilmesinde meydana gelen düşme sonucu daha derin parçaların çekilebileceğini gözlemlemişlerdir [16]. Sıcaklığın 200 °C'nin üzerine çıkarılması ile parçada aşırı incelme olmadan kalıp içerisinde yüksek boşluk doldurma oranları Mahabunphachai ve ark. tarafından elde edilmiştir [48]. Yine Mahabunphachai ve Koç sac metalin kalıp içerisini doldurmasında homojen sıcaklık dağılımının önemli bir etken olmadığını dolayısıyla maksimum parça şekillendirilebilirliği için optimum sıcaklık değerlerinin belirlenmesi gerektiğini belirtmişlerdir [49]. Choi ve ark. başarılı bir ılık hidroşekillendirme işlemi için proses boyunca kontrol edilmesi gereken değişkenleri (zımba ve kalıp sıcaklıkları, baskı plakası kuvveti ve hidrolik basınç) belirlemişlerdir (Şekil 17) [50]. Bu değişkenler iki grupta incelenebilir. Birinci gruptaki

değişkenler zaman referans alındığında kontrolü yavaş olan değişkenlerdir. Bunlara örnek olarak kalıbın ve akışkan ortamın sıcaklığı örnek verilebilir. Bunlar sac üzerindeki sıcaklık dağılımını önemli derecede etkilemektedirler. Genel olarak kalıplar ve akışkan ortam yüksek ısı kapasiteye sahiptirler ve istenen sıcaklığa ulaşmaları saatler alabilir. Dolayısıyla kalıplara ve akışkana ait optimum sıcaklık değerleri önceden belirlenmeli ve sisteme uygulanmalıdır. Choi ve arkadaşları bu çalışmalarında ılık hidroşekillendirme işlemindeki optimum sıcaklık dağılımı bulmak için adaptif-izotermal sonlu elemanlar analizine bağlı bir yöntem geliştirmişlerdir. Aynı zamanda zımba sıcaklığının 25 °C'ta tutulması gerektiğini ve böylelikle sacın zımbaya temas eden bölgelerindeki mukavemeti artırırken sacın kalıp içine akışını kolaylaştırmak için kalıpları daha yüksek sıcaklıkta tutmuşlardır. Choi ve ark. diğer bir çalışmalarında sıcaklık parametresini literatürdeki deneysel verilerden yararlanarak analitik olarak incelemiştir [35].

Ilık hidroşekillendirme prosesinde sıcaklığın etkisiyle öngörülen bazı avantajlar klasik derin çekme ve hidroşekillendirme prosesleri ile karşılaştırılarak Şekil 18'da verilmiştir.



Şekil 17. Ilık hidroşekillendirme prosesindeki kontrol değişkenleri [50]



Şekil 18. Ilık hidroşekillendirmenin potansiyel yararları ve klasik derin çekme ile karşılaştırması: a) Oda sıcaklığında klasik derin çekme ve hidroşekillendirme, b) Seçmeli ısıtma ve soğutma ile ılık hidroşekillendirme [50]

1.2.3.2. Baskı Plakası Kuvveti (BPK) ve Hidrolik Basıncı (P) Parametreleri

Sac hidroşekillendirme işleminde karmaşık şekildeki parçaların üretimi söz konusu olduğunda BPK kontrolü önemli bir etken haline gelmektedir. Ilık hidromekanik derin çekme prosesiyle ilgili yapılan çalışmalarda genellikle BPK sabit değerde uygulanmıştır [23, 37, 38, 44, 45, 47]. Farklı bir çalışma olarak Shulkin ve arkadaşları ise sekiz noktalı bir BPK kontrol sistemi tasarlamışlardır [51]. Çalışmalarında sac metal ile baskı plakası arasından sızan akışkanın da modellendiği bir sonlu elmanlar simülasyonu oluşturarak şekillendirme kuvvetini tahmin ederek en uygun BPK kontrol sistemini oluşturmuşlardır. Altan ve arkadaşları ise PamStamp ticari sonlu elemanlar yazılımını ve adaptif sonlu elemanlar optimizasyon tekniğini kullanarak minimum incelmeyi veren, buruşma ve akışkan kaçağının olmadığı BPK ve hidrolik basıncını zımba konumuna bağlı olarak belirlemişlerdir [52]. Choi ve arkadaşları 2007 yılında yaptıkları çalışmada BPK ve hidrolik basıncını, sıcaklık ve zımba hızı ile birlikte analitik olarak optimize etmişlerdir [35]. Bir başka çalışmalarında Choi ve arkadaşları BPK ve hidrolik basıncının optimum

değerlerini yine bulanık mantık algoritması ile oluşturulmuş bir alt programı ABAQUS ticari sonlu elemanlar yazılımı ile birleştirerek zamana bağlı değişken profiller olarak belirlemişlerdir [34].

1.3. AA 5754-O Alüminyum Alaşımı

Bu çalışmada otomotiv sektöründe yaygın olarak kullanılan bir alüminyum alaşımı olan AA 5754-O malzemesi sektöre yönelik bir çalışma gerçekleştirmek için seçilmiştir. AA 5754-O malzemesinin seçilmesinin bir diğer nedeni de oda sıcaklığındaki şekillendirilebilirliğinin sınırlı olmasıdır.

5XXX serisi alüminyum alaşımları, başta otomobil iç panelleri olmak üzere otomotiv endüstrisinde yaygın kullanıma sahiptirler. AA 5754, diğer alüminyum alaşımlarına nazaran daha hafif olması, yüksek korozyon direnci ve iyi yorulma dayanımı, iyi kaynak edilebilirliği ile yüksek sünekliğinden dolayı otomotiv endüstrisinde kullanılan ham maddeler arasında önemli bir konumdadır [53]. AA 5754'ün diğer kullanım alanları, nükleer uygulamalar, basınçlı kaplar ve tanker imalatı olarak sıralanabilir. Ancak AA 5754 de diğer alüminyum alaşımlarında olduğu gibi mikro yapısal hasara olan duyarlılığından dolayı oda sıcaklığında düşük şekillendirilebilirliğe sahiptir [54]. Oda sıcaklığında şekillendirilebilirliğinin düşük olmasının yanı sıra AA5754'ün ham madde maliyetinin düşük karbonlu çelik ile kıyaslandığında fazla olması başka bir dezavantajdır [55]. AA5754 vb. diğer alaşımların şekillendirilebilirliğini artırmak hidroşekillendirme [22, 46, 56] ve ılık şekillendirme yöntemlerinin bir arada kullanılması ile mümkündür [57, 58].

Bu tez çalışmasında yukarıda belirtilen yöntemlerin birleştirilmesi ile ilgili çalışmanın gerçekleştirilebilmesi ve deneysel verilerle uyumluluğun sağlanması için ilk olarak AA 5754-O'nun malzeme özellikleri 112M913 nolu TÜBİTAK projesi kapsamında çekme ve hidrolik şişirme testleri kapsamında belirlenmişlerdir.

AA 5754-O malzemesinin kimyasal bileşimi Tablo 3'te verilirken temel mekanik özellikleri Tablo 4'te verilmiştir. Tablo 5'te AA 5754-O malzemesinin mekanik özelliklerinin haddeme doğrultusundaki değişimleri detaylandırılmıştır. AA 5754-O malzemesinin anizotropi değerleri ve bu değerlerin elde edildiği yöntemler Tablo 6'te verilmiştir.

Tablo 3. AA 5754-O alüminyum alaşımının kimyasal yapısı (% ağırlık) [57]

Al	Mg	Mn	Fe	Si	Cu	Ni	Ti	Zn
Denge	3.0	0.24	0.26	0.03	0.02	<0.01	<0.01	<0.01

Tablo 4. AA 5754-O'nun temel mekanik özellikleri [47]

Elastisite Modülü [MPa]	Kayma Modülü [MPa]	Poisson Oranı	Yoğunluk [kg/m ³]
70	26.9	0.33	2700

Tablo 5. Kalınlığı 1 mm olan AA 5754-O sac malzemesine ait mekanik özellikler ve haddeleme doğrultusuna (HD) bağlı değişimleri [47]

Malzeme Özellikleri	Doğrultu		
	HD	45°	90°
Akma Gerilmesi [MPa]	90	91	93
Çekme Dayanımı [MPa]	212	209	208
Yüzde Uzama (%)	22.05	27	25.27
Pekleşme Üssü (n)	0.339	0.335	0.341
Mukavemet Katsayısı, K [MPa]	470	448	456

İlk hidroşekillendirme işleminin Sayısal analizinde kullanılan, hem iş parçası (sac) AA 5754-O, hem de kalıp imalatında kullanılan AISI 4140'a ait ısıl katsayılar Tablo 10'da verilmiştir.

Tablo 6. Kalınlığı 1 mm olan AA 5754-O sac malzemesine ait deneysel olarak elde edilen anizotropi değerleri

Yöntem	R ₀	R ₄₅	R ₉₀	R _n	ΔR
Optik Komperatör	0.76	0.67	0.75	0.71	0.087

1.4. Sac Şekillendirmede Kullanılan Sonlu Eleman Analizi Ticari Yazılımları

Sac şekillendirme işleminde sonlu elemanlar analizi kullanımı oldukça önemli bir yer tutmaktadır. Dolayısıyla sonlu elemanlar analizi (SEA) yazılımları da sac şekillendirme simülasyonlarının gerçekleştirilmesinde ve uygulamalarında önemli aşamalar kaydetmiştir. Bunların başında LS-DYNA [44, 45, 57, 59-62], MSC.Nastran [34, 63], MSC.Marc [64], ANSYS/LS-DYNA[65], vb. genel maksatlı ticari SEA yazılımları mevcuttur. Bu programlar diğer birçok problem yanı sıra sac şekillendirme problemi için de başarılı çözümler sunmaktadır. Genel maksatlı bu kodların yanı sıra sac metal şekillendirme konusuna yönelik özelleşmiş SEA yazılımları da bulunmaktadır. Dynaform [66-69], FormingSuite, PamStamp [70-72], Deform, Autoform [67, 73, 74] isimli yazılımlar bu grubu temsil etmektedir.

Bu çalışma kapsamında LS-DYNA ticari yazılımı, sac şekillendirme yaygın kullanımı, probleme müdahalede kullanıcıyı etkin kılması, etkin sonuç inceleme ara yüzü ve lineer olmayan fiziksel problemlerin çözümündeki üstünlüğünden dolayı tercih edilmiştir.

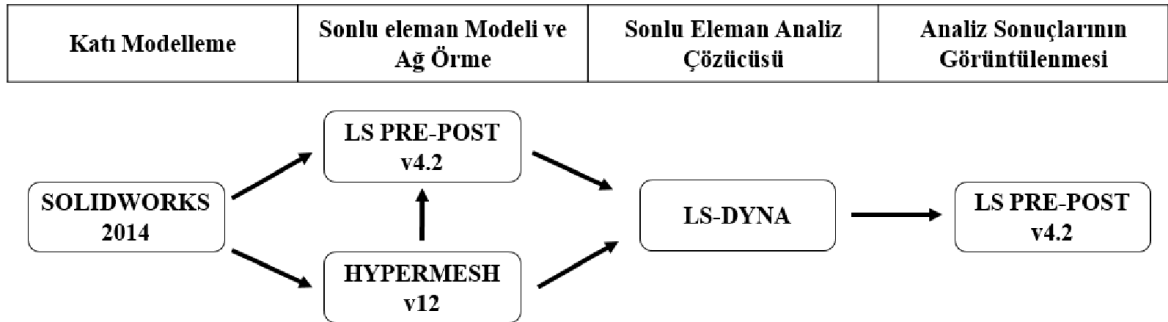
1.5. LS-DYNA

LS-DYNA, Livemore Software Technology Corporation (LSTC) tarafından geliştirilmiş genel maksatlı ileri multifizik simülasyon ticari yazılımıdır [75]. Her geçen gün çözüm kabiliyetlerine, yeni ve daha karmaşık gerçek hayat problemlerini katsa da asıl başarılı olduğu çalışma alanı açık adımlı zaman integrasyonunu (explicit) kullanan doğrusal olmayan transient (sürekli olmayan) dinamik sonlu elemanlar analizleridir [76]. Büyük yapısal deformasyonların olduğu, kısa sürede gerçekleşen olayların simülasyonu için tercih edilen bu yazılım kapsamlı malzeme modelleri, karmaşık temas ve çözüm algoritmaları ile ön plana çıkmaktadır. LS-DYNA tüm bu güçlü özelliklerinden dolayı otomotiv, havacılık ve uzay, inşaat, askeri, imalat ve biyomühendislik endüstrilerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. LS-DYNA'nın güçlü özellikleri aşağıdaki gibi sıralanabilir [77]:

- Çok sayıda malzeme modeline ve hasar kriteri tanımlama kabiliyetine sahiptir.

- Geniş bir eleman formülasyonu yelpazesi vardır.
- Karmaşık temas durumlarını otomatik olarak tanımlayabilen birçok algoritması mevcuttur.
- Otomotiv endüstrisine özel uygulamaları içermektedir. (emniyet kemeri, hava yastığı, insan dokusu, kalp ve beyin modelleme)
- Metal şekillendirmeye özel uygulamalara sahiptir.
- Güçlü ve çeşitli çözüm algoritmalarına sahiptir.

Sonlu elemanlar analizlerinde kullanılan programlar modelin oluşturulduğu ve başlangıç ve sınır koşullarının tanımlandığı ön-işlemci (pre-processor), çözümün gerçekleştirildiği çözücü (solver) ve sonuçların elde edilip incelendiği son-işlemci (post-processor) olmak üzere üç kısımdan oluşurlar. Bu çalışmada kullanılan programlar Şekil 19'da görülmektedir.



Şekil 19. Tez kapsamında sonlu elemanlar modelinin hazırlanmasında, çözülmesinde ve sonuçların incelenmesinde kullanılan programlar

1.6. Çalışmanın Amacı ve Özgünlüğü

Bu çalışmanın amacı, ılık hidromekanik derin çekme prosesini sonlu elemanlar yöntemiyle modelleyip farklı parametreler için bir analiz prosedürü geliştirmek ve oluşturulan modelin doğruluğunu kontrol etmektir. Böylece, gelecekte bu konuda yapılabilecek akademik ve ticari tabanlı deneysel ve/veya sayısal çalışmalara bir referans kaynak oluşturulması ve deneme yanılma yöntemiyle gerçekleştirilen çalışmaları bertaraf ederek maddi ve zaman kayıplarını minimuma indirmek hedeflenmiştir. Farklı eleman

formülasyonları, malzeme modelleri, sürtünme, çözücü algoritmaları vb. sonlu elemanlar analizi parametreleri sistematik bir biçimde karşılaştırılmış ve deneysel verilerle en uyumlu sonuçları veren kombinasyonlar belirlenmeye çalışılmıştır.

Çalışmanın bir diğer amacı da, ılık hidromekanik derin çekme prosesi ile hafif alaşımların şekillendirilebilirliğinde önemli parametreler olan kalıp ve zımba sıcaklık dağılımları ile yükleme profillerinin (sıvı basıncı ve baskı plakası kuvveti) optimizasyonunu gerçekleştirmektir. Bu doğrultuda belirlenen aralıklarda sıcaklık değerleri ve yükleme profillerine ait fonksiyonların katsayıları parametrik olarak tanımlanarak bu aralıklarda optimum sonuçları veren değerler elde edilmeye çalışılmıştır.

Hazırlanan detaylı sonlu elemanlar modeli prosedürü ve sıcaklık dağılımları ile yükleme profilleri için uygulanan sayısal parametrik optimizasyon çalışmanın özgün yanını oluşturmaktadır.

2. DENEYSEL VE SAYISAL ÇALIŞMALAR

Tezin bu bölümü Deneysel Çalışmalar (2.1) ve Sayısal Çalışmalar (2.2) olmak üzere iki alt ana başlıkta incelenecektir.

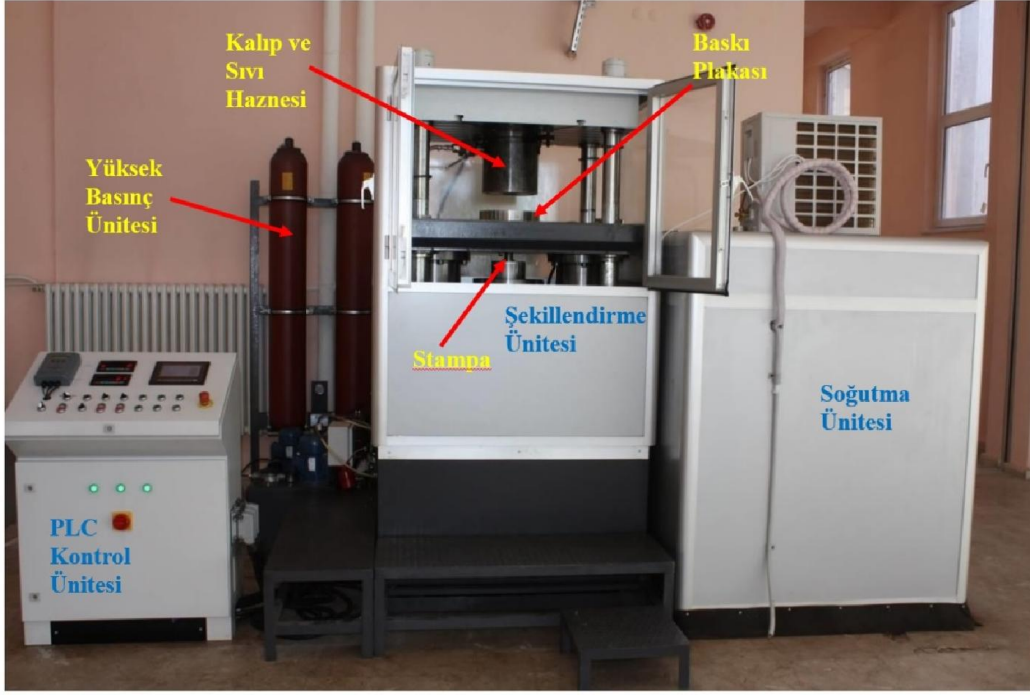
2.1. Deneysel Çalışmalar

Deneysel çalışmalar kısmında öncelikle mevcut deney düzeneği özellikleri ve çalışma prensipleri anlatılmıştır. Daha sonra sayısal çalışmalara alt yapı sağlayacak malzeme özelliklerinin belirlenmesinde yapılan çekme testi deneyi ve şişirme testi deneylerinden ve sonuçlarından bahsedilmiştir. Son olarak sayısal modelin teyit edilmiş ve analiz sonuçları deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

2.1.1. Deney Düzeneği

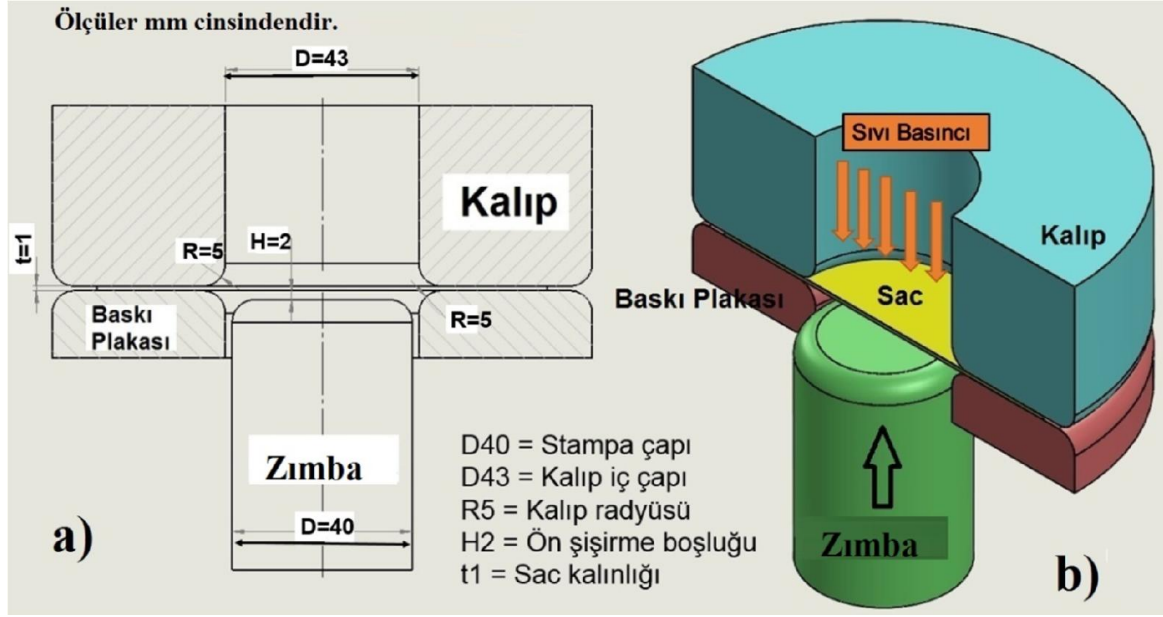
Sac şekillendirme işleminin deneysel çalışmaları 112M913 numaralı, “Ilık Hidromekanik Derin Çekmede Sıcaklık, Sıvı Basıncı ve Baskı Plakası Kuvvetinin Proses ve Üretilen Parçalara Etkilerinin Araştırılması” başlıklı TÜBİTAK projesi kapsamında Selçuk Üniversitesi, Hidroşekillendirme Laboratuvarı’ndaki hidroşekillendirme deney düzeneği ile proje araştırma grubundaki diğer lisansüstü öğrenciler tarafından gerçekleştirilmiştir (Şekil 20). Deneylerden elde edilen değerler sonlu elemanlar analiz modellerinin oluşturulmasında ve analiz sonuçlarının doğrulanması amacıyla projenin diğer ayağı olan KTÜ’de yürütülen bu tez çalışmasında kullanılmıştır.

Deney düzeneği şekillendirme ünitesi yanı sıra yüksek basınç ünitesi, soğutma ünitesi, ısıtma ünitesi ve bunların kontrolünde kullanılan PLC ünitesinden oluşmaktadır (Şekil 20). Yüksek basınç ünitesi yaklaşık 33 bar sıvı basıncı sağlama kapasitesine sahip iken hidrolik pres baskı plakasına 120,000 N kuvvet uygulayabilmektedir.



Şekil 20. Hidroşekillendirme deney düzeneği ve oluşturan üniteler

Kalıp, baskı plakası ve zımbanın imalatı AISI 4140 çeliğinden gerçekleştirilmiştir. Parçalara ait boyutlar Şekil 21’de gösterilmiştir. Hidroşekillendirme deney düzeneği çift etkili/tesirli (double action) olarak tasarlanmıştır. Hem baskı plakası hem de zımba hareket halindeyken kalıp sabit tutulmaktadır. Genel derin çekme ve hidroşekillendirme düzeneklerinin aksine bu deney düzeneğinde kalıp yukarıda, baskı plakası aşağıdadır. Zımba hareketi de aşağıdan yukarı doğru düzenlenmiştir.



Şekil 21. Hidroşekillendirme modelinde: a) Denei düzeneğinin ölçüleri, b) Şekillendirme sisteminin 3 boyutlu kesit görünümü

2.1.2. Malzemenin Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi

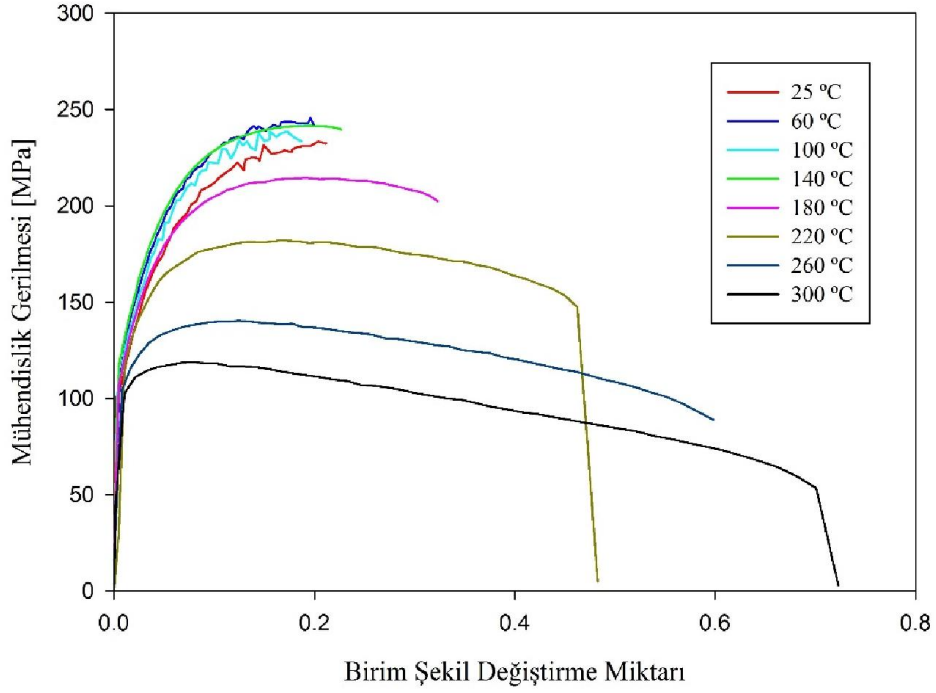
Malzemenin mekanik özellikleri Selçuk Üniversitesi, Hidroşekillendirme Laboratuvarı'ndaki hidroşekillendirme presinde ve Selçuk Üniversitesi, İleri Teknoloji ve Araştırma ve Uygulama Merkezi'nde (İLTEK) çekme testi deney düzeneğinde yapılan deneylerle belirlenmiştir.

2.1.2.1. Çekme Testi Deneyi ve Sonuçları

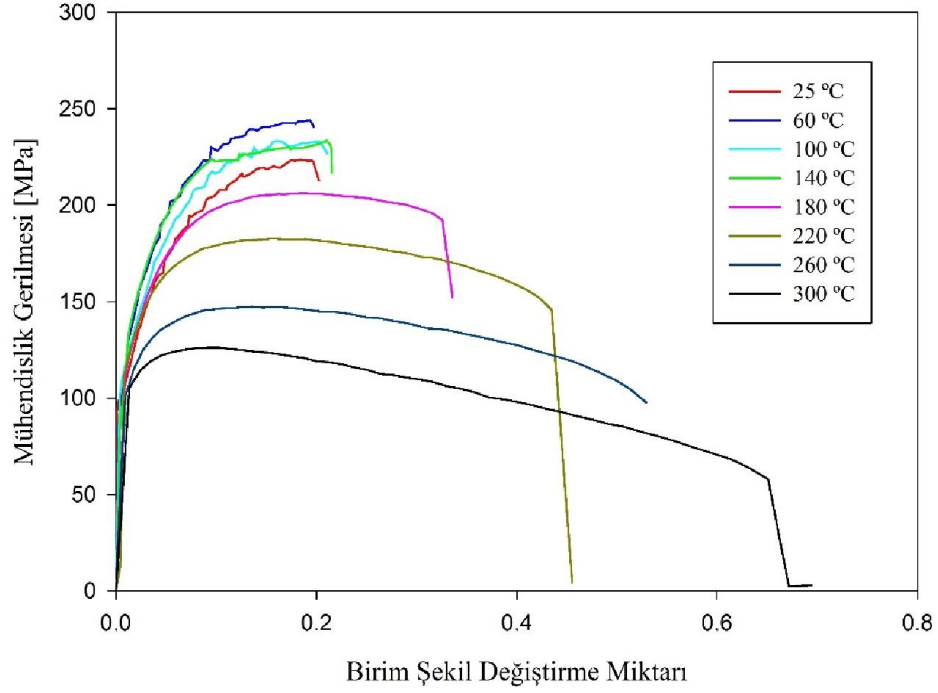
Ilık hidromekanik derin çekme prosesinde malzemenin tamamında homojen bir sıcaklık yerine zımbaya temas eden bölgelerinde soğuk şekillendirme, flanş kısımlarında ise ılık şekillendirme sıcaklıkları daha uygun olmaktadır. Dolayısıyla proses boyunca sac malzeme üzerinde oda sıcaklığından ılık şekillendirme sıcaklığına kadar bir sıcaklık dağılımı söz konusudur. Bu sebeple AA 5754-O malzemesinin farklı sıcaklıklarda (20, 60, 100, 140, 180, 220, 260, 300 °C) ve farklı birim şekil değiştirme hızlarında (25, 100, 250 mm/dk) standart çekme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Her bir sıcaklık, çene hızı kombinasyonu için 3 tekrar toplamda 72 adet ($8 \times 3 \times 3 = 72$) çekme deneyi yapılmıştır. Bu çekme deneyleri yapılırken ASTM E8-04 (Metalik Malzemelerin Çekme Deneyleri için

Standart Test Metotları) standardı temel alınmıştır [78]. Elde edilen bu akma eğrileri Şekil 22-23'te görülmektedir [79].

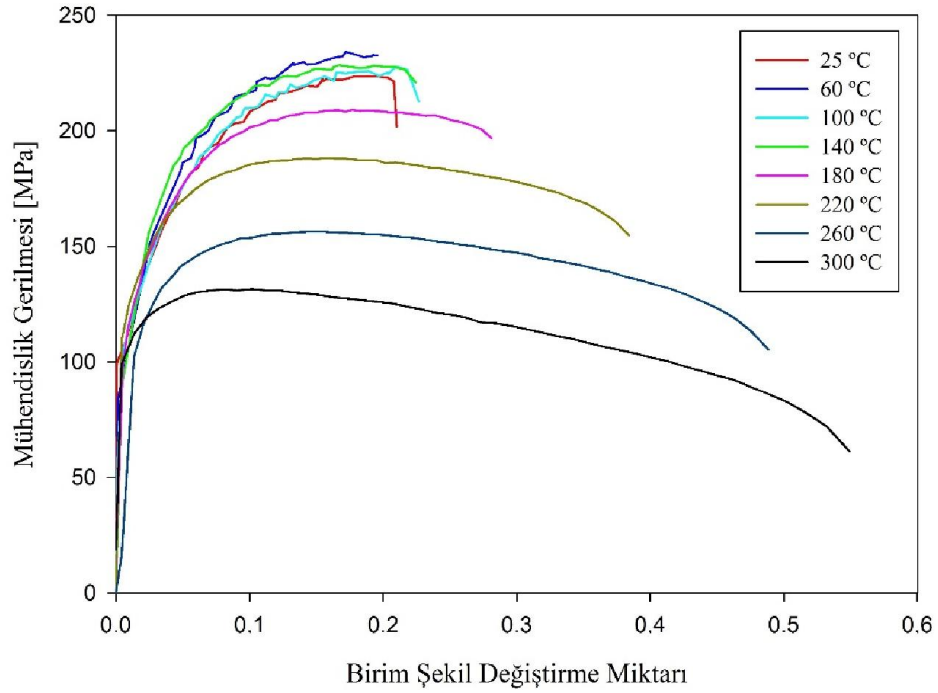
AA 5754-O malzemesine ait diğer mekanik özellikler, malzemenin literatürden elde edilen diğer tüm özellikleri ile birlikte kısım 1.3. AA 5754-O Alüminyum Alaşımı 'nde detaylı olarak verilmiştir.



Şekil 22. AA 5754-O sac malzemesi için 25 mm/dk çene hızında ve farklı sıcaklıklardaki mühendislik gerilmesi-birim şekil değiştirme grafikleri [79]



Şekil 23. AA 5754-O sac malzemesi için 100 mm/dk çene hızında ve farklı sıcaklıklardaki mühendislik gerilmesi-birim şekil değiştirme grafikleri [79]

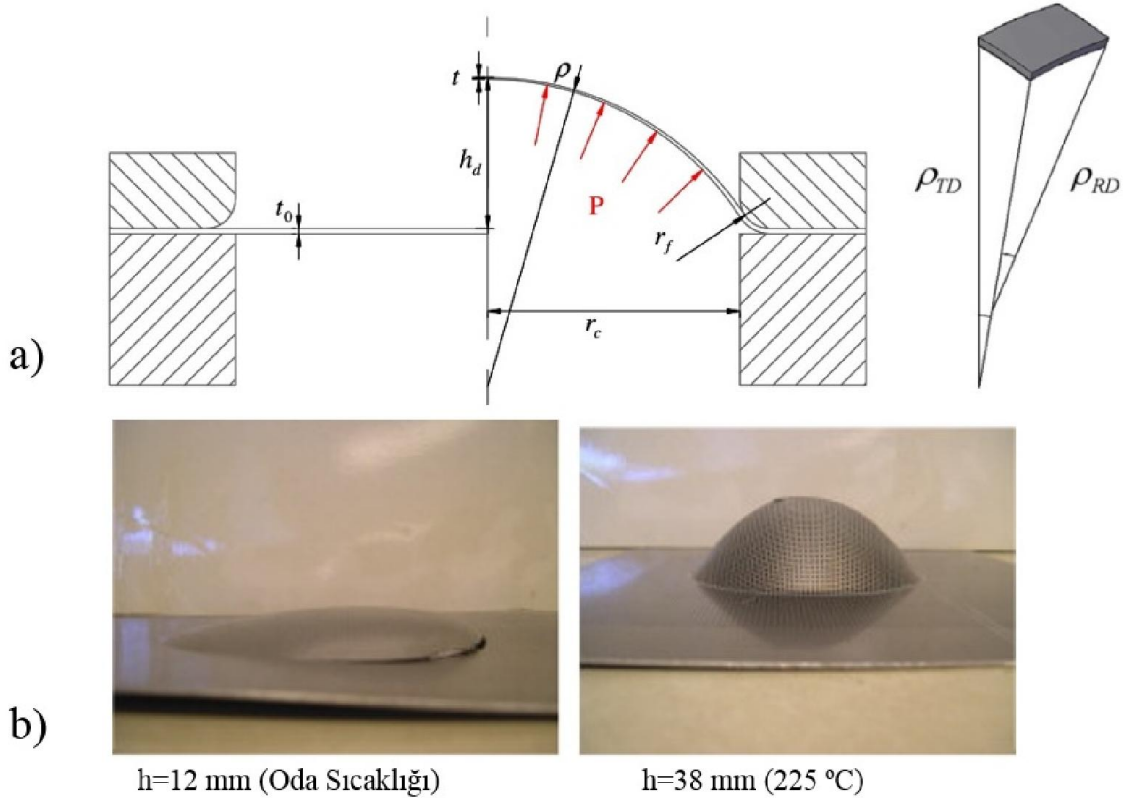


Şekil 24. AA 5754-O sac malzemesi için 250 mm/dk çene hızında ve farklı sıcaklıklardaki mühendislik gerilmesi-birim şekil değiştirme grafikleri [79]

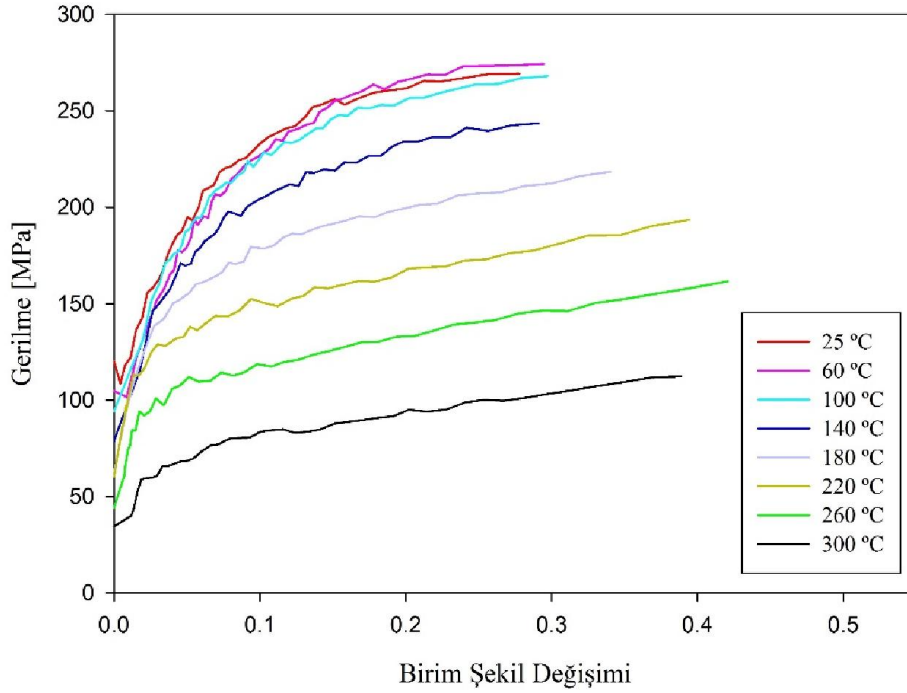
2.1.2.2. Hidrolik Şişirme Testi Deneyi Sonuçları

Hidrolik şişirme (hydraulic bulge test) deneylerinde amaç sacı kalıp içerisine yüksek hidrolik basınç etkisiyle patlayıncaya kadar şişirerek malzemenin iki eksenli yüklemeye altındaki akma eğrilerini elde etmektir. Hidrolik şişirme deneyleri klasik çekme testi ile karşılaştırıldığında daha yüksek birim şekil değişim miktarlarında akma gerilmesinin magnezyum alaşımı için hidrolik şişirme testi ile akma eğrilerini başarıyla elde etmiştir [80]. Billur ve arkadaşları ise hidrolik şişirme deneyi için en doğru metodu ve parametrelerdeki belirsizliklerin akma eğrilerine etkilerini SS201 ve AA 5754 malzemeleri için araştırmışlardır [81].

Bu tezinde içinde bulunduğu TÜBİTAK projesi (112M913) kapsamında ŞÜKÜR'ün [82] yüksek lisans tez çalışması sırasında gerçekleştirilen hidrolik şişirme deneyleri sonucunda farklı sıcaklıklarda elde ettiği akma eğrileri Şekil 26'de görülmektedir.



Şekil 25. Hidrolik şişirme deneyi: a) Sacın başlangıçtaki hali (sol), Sacın şişirme ile şekillendirildiği herhangi bir an (sağ), b) Oda sıcaklığında hidrolik şişirme (sol), 225 °C'deki hidrolik şişirme (sağ) [83]



Şekil 26. Hidrolik şişirme deneyinden elde edilen akma eğrileri [82]

2.1.3. Sonlu Eleman Modelinin Doğrulanmasında Kullanılan Hidromekanik Derin Çekme Deneyi

Sonlu elemanlar analizleri için hazırlanan modellerin deneysel veriler ile uyumluluğu, yapılan analizlerin sonuçlarının güvenilirliği açısından büyük önem arz etmektedir. Bu sebeple deneysel çalışmadan elde edilen veriler, hazırlanan ilk örnek sonlu eleman modelinden elde edilen verilerle uyumlu olmalıdır. Bunun için hidromekanik derin çekme deneyi ile elde edilen bir silindirik kaptan çeyrek kesit olarak kap merkezinden (A noktası) kabın flanş kenarına (B noktası) kadar olan eğrisel mesafe boyunca sac kalınlığı hassas komperatör ile ölçülmüştür (Şekil 27). Elde edilen kalınlık verileri simülasyon sonucunda elde edilen kalınlık verilerinin karşılaştırması kısım 2.2.4. Sonlu Eleman Modelinin Doğrulanması'nda detaylı olarak verilmiştir.



Şekil 27. Hidromekanik derin çekme işlemi sonucunda elde edilen ve üzerinden kalınlık ölçümü yapılan silindirik kap

2.2. Sayısal Analizler

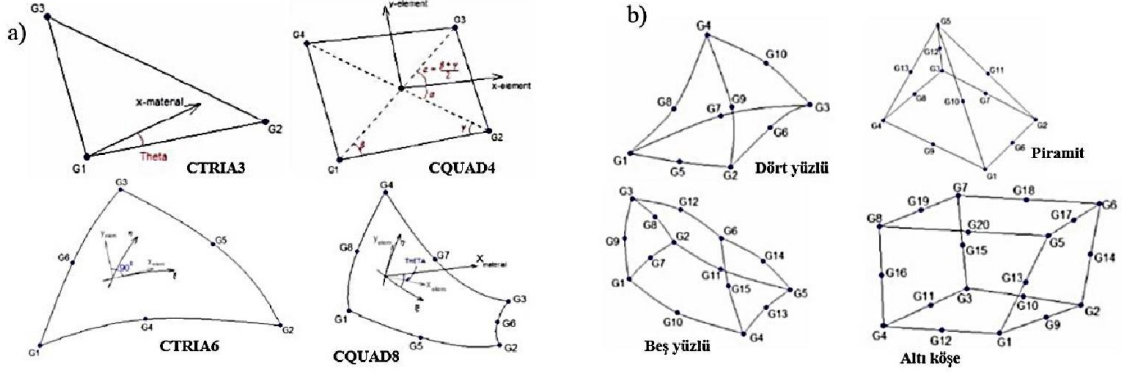
Sayısal analizler kısmında sonlu elemanlar modelinin oluşturulması, başlangıç ve sınır koşulları, malzeme modelleri, sonlu elemanlar modelinin teyidi ve optimizasyon çalışmalarından bahsedilmiştir.

2.2.1. Hidromekanik Derin Çekme Prosesi için Sayısal Modelin Hazırlanması

2.2.1.1. Ağ Yapısı ve Oluşturulan Model

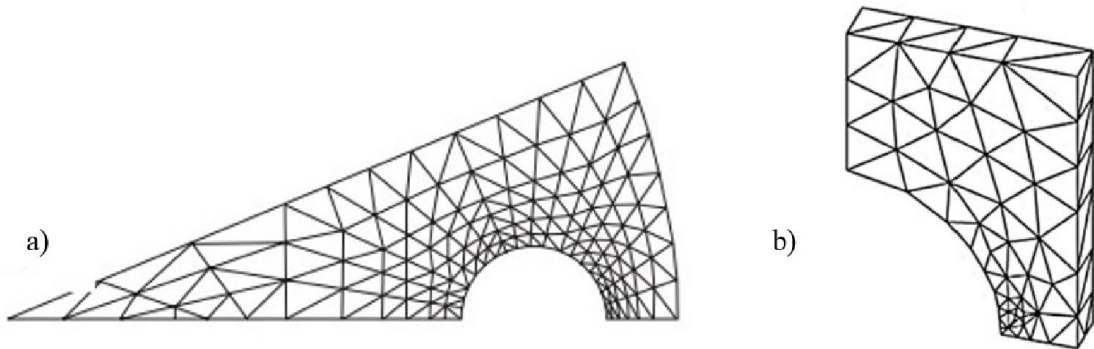
Eleman, sonlu elemanlar yönteminde sürekli bir bölgede oluşturulan ayırık bölgelerin her birine denir. Bu ayırık bölgelerin oluşturulması işlemine ayırıklaştırma (discretization) veya ağ örme (meshing) adı verilir. Ağ oluşturma; literatürde geometrik yapıya yakınsayan çok kenarlı veya çok yüzlü ağlar örme işlemidir [84, 85]. Sonlu elemanlar modelinin oluşturulmasında 2 (üçgen, dörtgen) ve 3 (dört yüzlü, piramit vs.) boyutlu eleman tipleri

geliştirilmiştir (Şekil 28) [86]. Şekil 29’te 2 ve 3 boyutlu ağ örme işlemlerine ait örnekler görülmektedir.



Şekil 28. Eleman tiplerine bazı örnekler: a) Kabuk (Shell) eleman tipleri, b) Katı (Solid) eleman tipleri [86]

Elemanların oluşturulmasında ön işlemci olarak Altair HyperWorks (Altair Engineering, Troy Michigan, ABD) firmasının geliştirmiş olduğu HyperMesh yazılımı kullanılmıştır. Burada modele ait parçalar SolidWorks (Dassault, Fransa) 3 boyutlu katı modelleme programında yüzey olarak tasarlandıktan sonra oluşturulan geometriler sırayla ağ örme işlemi için HyperMesh programına aktarılmıştır.



Şekil 29. Ağ örme örnekleri: a) 2 boyutlu ağ örme, b) 3 boyutlu ağ örme [87, 88]

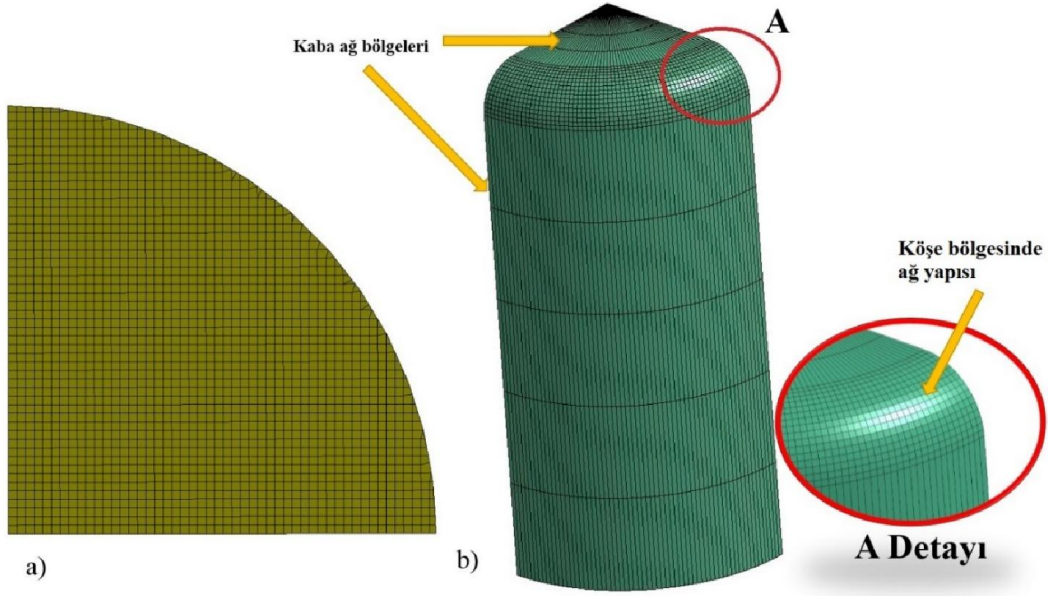
Şekillendirilmek istenen sacın kalınlığı, diğer boyutlarının yanında çok küçük olması nedeniyle kabuk (shell) elemanlarla modellenmesi uygun görülmüştür. Hypermesh ara yüzünde detaylı bir şekilde ağ oluşturulurken LS-DYNA çözücüsü ile uyumlu olarak çalışabilen eleman formülasyonu tam olarak integre edilebilen (fully integrated shell element, Element Type 16) ve göreceli olarak daha uzun çözüm süreleri ile sonuçlanan üçgen ve dörtgen kabuk elemanlar kullanılmıştır. Her bir elemanda kalınlık doğrultusunda 7 adet integrasyon noktası tanımlanmıştır. Bu eleman formülasyonunun tercih edilmesinin nedeni çözüm sırasında çok daha fazla geçici bellek (RAM) kullanmasına rağmen çözümden güvenilir sonuçlar vermesidir [89]. Kalıp, baskı plakası ve zımba ise rijit cisimler olarak tanımlanmışlar ve yine bir kabuk eleman olan ve tam integrasyonlu eleman formülasyonuna göre çok daha hızlı çözüm veren ve kalınlık boyunca 3 integrasyon noktasına sahip Belytschko-Tsay (Element Type 2) elemanlar ile örülmüştür.

İş parçası için ağ örgüsü oluşturulurken, yoğun deformasyona uğrayacağından ve yüksek hassasiyette sonuç vermesi istendiğinden yüksek sayıda elemanla örülmüştür. Kalıp, baskı plakası ve zımba rijit olarak kabul edildiğinden, bu parçalara köşe bölgelerinde geometriyi tam yansıtması için yoğun olarak ağ örülürken diğer bölgelerinde çözüm süresini kısaltılması amacıyla kaba ağ örülmüştür (Şekil 30). Her bir parça için ağ örülürken kullanılan eleman sayıları Tablo 7’de verilmiştir.

Tablo 7. Ağ örülen parçaların eleman sayıları

Parça Adı	Sac	Kalıp	Baskı Plakası	Zımba
Eleman Sayısı	1000-20000	1600	1536	1600

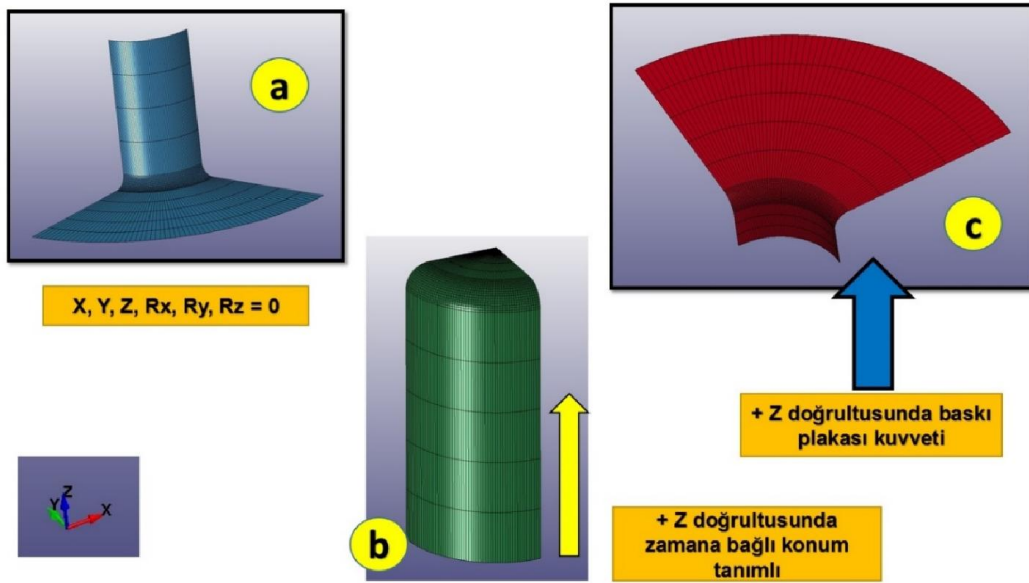
Tablo 7’den de görüleceği üzere kalıp, baskı plakası ve zımba için eleman sayısı rijit olarak kabul edildiklerinden dolayı eleman sayıları sabit kalırken sac deformasyona uğradığından en uygun eleman sayısı tabloda belirtilen aralıkta değerlendirmeye alınmıştır. Sac için ağ örgüsünde kullanılan optimum eleman sayısını belirleme için yapılan çalışma kısım 2.2.3. Optimum Eleman Sayısının Belirlenmesi’nde detaylandırılmıştır.



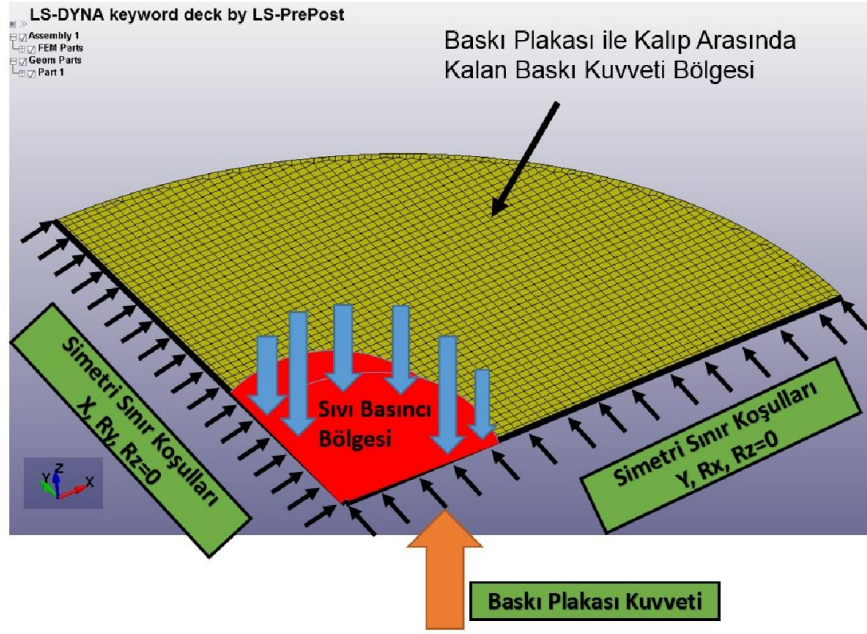
Şekil 30. Hypermesh kullanılarak oluşturulan ağ yapıları: a) Sac (iş parçası), b) Zimba

2.2.1.2. Başlangıç ve Sınır Koşulları

Şekil 31’de takımlar için başlangıç ve sınır koşulları görsel olarak belirtilmiştir. Kalıp için tüm hareket serbestlik dereceleri (her üç eksen üzerindeki ötelenme ve dönmeler) sınırlandırılmıştır. Zimba ve baskı plakası için z eksenini doğrultusundaki hareketi hariç diğer tüm serbestlik dereceleri sınırlandırılmıştır.



Şekil 31. Takımlar için sınır ve başlangıç koşulları: a) Kalıp, b) Zimba, c) Baskı plakası



Şekil 32. Sac (iş parçası) modeli için başlangıç ve sınır koşulları

Sac için başlangıç ve sınır koşulları Şekil 32’de verilmiştir. Baskı plakası kuvveti, baskı plakası aracılığıyla + z eksenı yönünde sacın baskı plakası ile kalıp arasında kalan elemanlarına tesir ettirilmektedir. Baskı plakası kuvveti uygulanırken net kuvvetinin uygulanmasına dikkat edilmiştir. Çünkü hidrolik basınç, sızdırmazlık elemanına baskı plakası kuvvetine ters yönde etkimektedir. Dolayısıyla sızdırmazlık elemanına gelen sıvı basıncı kuvvete dönüştürölüp deneysel olarak uygulanan baskı plakası kuvvetinden çıkartılarak net kuvvet elde edilmiştir. Aynı zamanda zımba, sacı alt kısmından yukarı (+ z yönünde) doğru ittirirken bu harekete ters yönde kalıp içerisinde kalan elemanlara hidrolik basınç uygulanmaktadır. Hidrolik basıncın uygulanmasında, akışkan sıvının (su) modellenmesi yerine sıvı basıncının etkiyeceği bölge radyal olarak tanımlanmış ve bu bölge içerisinde giren her elemana normalı doğrultusunda (sıvı basıncı her doğrultuda aynı olduğundan) hidrolik basınç etki ettirilmiştir (Şekil 32).

2.2.1.3. Malzeme Modelleri

Sayısal modellemenin oluşturulmasında önemli faktörlerden biri de malzeme modelidir. Şekillendirilecek malzemenin fiziksel davranışı, oluşturulan malzeme modeli ile

uyumlu olmalıdır. Bundan dolayı deneyde oluşan fiziksel şartların gerçeğe en yakın şekilde yansıtılabilmesi için en uygun malzeme modelinin seçilmesi kritik öneme sahiptir.

Literatürde yapılan çalışmalarda Power-law Plasticity [90], Piecewise-linear Plasticity, 3_Parameter_Barlat [44, 90], Transversely Anisotropic Elastic Plastic, Johnson-Cook [44] ve Elastic Viscoplastic Thermal [91] ile kullanıcı tanımlı [46, 57], malzeme modellerini sac şekillendirme proseslerinde kullanımı ön plana çıkmaktadır.

Bu malzeme modellerinden Piecewise-linear Plasticity kullanılması halinde analizin yapıldığı sabit sıcaklıktaki akma eğrisine ihtiyaç duyulmaktadır. Power-law plasticity malzeme modeli ise üstel bir fonksiyon esasına (Holloman Kanunu) dayandığından malzeme gerilme ve pekleşme üssü katsayılarının işlem yapılan sabit sıcaklıktaki değerleri bilinmelidir.

Bu tez çalışmasında şekillendirilen sac üzerinde proses süresince değişken bir sıcaklık gradyanı olduğundan yukarıda bahsi geçen malzeme modelleri uygun olmamaktadır. Bu şartları sağlayan ve ele alınan Johnson-Cook ve Elastik Viskoplastik Termal malzeme modelleri ile ilgili detaylar aşağıda verilmiştir.

2.2.1.3.1. Johnson-Cook Malzeme Modeli

Hidromekanik derin çekme modelinin oluşturulmasında iş parçası için eğri uyumlama tekniğine dayalı ve deneysel test sonuçları ile elde edilmiş olan LS-DYNA ticari sonlu elemanlar analiz yazılımında bulunan MAT-15 numaralı elastik-plastik izotropik Johnson-Cook (JC) [75] malzeme modeli, kullanılmıştır.

JC yapısal modeli [92-94], birim şekil değişiminin, birim şekil değiştirme hızının ve sıcaklığın akma gerilmesi üzerindeki etkisini hesaba katan deneysel bir mukavemet modelidir [95]. Bu model aşağıdaki denklemlerle ifade edilir:

$$\sigma_f = (A + B \varepsilon_p^n) (1 + C \ln \dot{\varepsilon}_p^*) (1 - T^{*m}) \quad (1)$$

Burada:

σ_f [MPa]: akma gerilmesi

A [MPa]: akmaya başlama gerilmesi

B [MPa]: pekleşme (hardening) modülü

C: birim şekil değiştirme hızı hassasiyeti

n: pekleşme katsayısı

m: ısıl yumuşama (thermal softening) katsayısı

ϵ_p : eşdeğer plastik birim şekil değişimi

$\dot{\epsilon}_p^*$: boyutsuz plastik birim şekil değişim hızı ve

T^* : homolog (normalize edilmiş) sıcaklık

değerlerini ifade eder. Buradaki A, B, C, n ve m gerilme-birim şekil değiştirme eğrilerinden elde edilen veriler uyumlanarak istatistiksel olarak hesaplanmaktadır [95]. Denklem içerisindeki birinci parantez içerisindeki ifade deformasyon sertleşmesini tanımlarken ikinci ve üçüncü parantezler içindeki ifadeler sırasıyla, birim şekil değiştirme hızı ve sıcaklık hassasiyetini oluşturur.

Bu malzeme modelinin dezavantajlarından birisi, gerçek malzemeler sıcaklığa bağlı birim şekil değiştirme hızı hassasiyeti sergilerken, bu malzeme modelinde birim şekil değiştirme hızı ile sıcaklığın birbirinden bağımsız olarak tanımlanmıştır [96].

Farklı sıcaklıklar (25, 40, 100, 140, 180, 220, 260, 300 °C) ve farklı birim şekil değiştirme hızlarında (25, 100, 250 mm/dk) yapılan çekme deneyleri sonucu elde edilen 24 adet gerilme-birim şekil değişimi eğrisinden faydalanılarak ve en küçük kareler yöntemi kullanılarak Johnson-Cook malzeme modeline ait katsayılar belirlenmiştir. Bu işlem STATISTICA 10 (StatSoft Inc., ABD) istatistik analiz yazılımı deneme sürümü ile gerçekleştirilmiştir. Uyumlama işleminde doğrusal olmayan tahmin (nonlinear estimation) işlemi deneysel veriler arasında interpolasyon ve ekstrapolasyon yapılarak gerçekleştirilmiştir. Bu katsayıların belirlenmesinde kullanılan yöntemde katsayılar

yaklaşık %93 korelasyon (R^2) oranı ile elde edilmiştir. Elde edilen katsayılar Tablo 8’de görülmektedir.

Tablo 8. Johnson-Cook malzeme modeli için hesaplanan katsayıları

Johnson-Cook Malzeme Modeli Katsayıları				
A [MPa]	B [MPa]	C	n	m
103.773	296.552	-0.003101	0.4368	1.24513

Yapılan analizlerde yukarıda elde edilen malzeme modeli katsayıları ile oda sıcaklığındaki simülasyonlarda yüksek oranda hassasiyet elde edilirken, yüksek sıcaklıklara çıkıldıkça analiz sonuçlarının sıcaklık etkisini tam olarak yansıtamadığı görülmüştür. Buna sebep olarak iki neden ön plana çıkmıştır:

Birincisi, bu malzeme modeline ait hasar kriteri katsayıları, eldeki çekme deneyi verilerinin yetersizliğinden dolayı hesaplanamamıştır. Dolayısıyla JC malzeme modeli analitik alt yapısı gereği maksimum 1 birim şekil değiştirme miktarın kadar analizleri sürdürmeye devam etmektedir.

İkinci olarak bu çalışmada JC malzeme modeli katsayıları çekme testi deneyi verileri yardımıyla belirlenmiştir. Literatürdeki çalışmalara [53, 95, 97-99], bakıldığında ise bu işlem genellikle Split-Hopkinson Pressure Bar test deney düzeneği kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Farklı deney sistemi kullanılarak elde edilen katsayıların işlem sonucuna etki edebileceği düşünülmektedir.

2.2.1.3.2. MAT 106 Elastik-Viskoplastik-Termal Malzeme Modeli

Malzemenin sıcaklığa bağlı etkilerini yansıtan bir diğer malzeme modeli de LS-DYNA’da bulunan MAT 106 Elastik-Viskoplastik-Termal Malzeme modelidir [100]. Bu malzeme modelinin en önemli özelliği sıcaklığa bağlı malzeme özelliklerinin doğrudan deneysel verilerden eğriler aracılığıyla tablo ve/veya eğriler şeklinde tanımlanabilmesidir. Böylece herhangi bir kabul ve/veya yaklaşım olmaksızın malzemenin özellikleri ham

deneysel veriler aracılığıyla tamamen fiziksel davranışına benzer biçimde modellenebilmektedir.

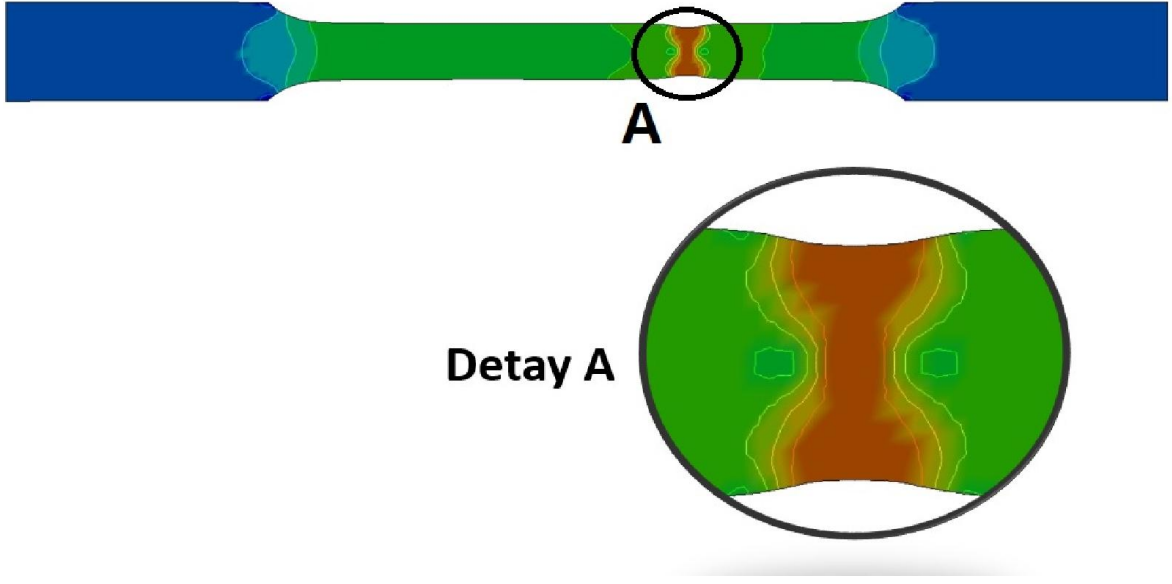
Bu tez çalışmasında Johson-Cook malzeme modelinin kullanılmasıyla karşılaşılan problemlerden sonra MAT 106 Elastik-Viskoplastik-Termal Malzeme modelinin kullanılmasına karar verilmiştir. Malzemenin hidrolik şişirme deneyinden elde edilen akma eğrileri (25, 40, 100, 140, 180, 220, 260, 300 °C) her bir eğri olacak şekilde LS-DYNA'ya tablo olarak girilmiştir. Böylece uygulanan malzeme modelinin von Mises akma davranışı farklı sıcaklıklar için modellenmiştir. AA 5754-O için kısım 1.3. AA 5754-O Alüminyum Alaşımı 'nda belirtilen malzeme özelliklerinin her biri aynı zamanda sıcaklığa bağlı olarak dikkate alınmıştır. Bu şekilde malzemenin akma eğrisi yanı sıra elastisite modülü, Poisson oranı, ısıl genleşme katsayısı, akma gerilmesi vb. diğer özelliklerinin de sıcaklığa bağlı değişimleri modele yansıtılmıştır.

2.2.1.3.3. Malzeme Modelinin Doğrulanması

Kullanılan malzeme modelinin Sayısal olarak doğrulanması için deneysel olarak gerçekleştirilen çekme testinin benzetimi yapılmıştır. Çekme testine tabi tutulan numunenin geometrisi ve oluşturulan ağ yapısı Şekil 33'de verilmiştir. Deformasyonun gerçekleştiği bölgede, daha yakınsak sonuçlar almak amacıyla eleman sayısı artırılarak ağ yoğunlaştırılmıştır. Malzeme modelin doğrulanması için biri düşük (25 °C) diğeri yüksek sıcaklıkta iki çekme testi benzetimi yapıp aynı sıcaklıklarda yapılan şişirme deneyleri sonucunda elde edilen gerilme-birim şekil değişimi eğrileri birbirleri ile karşılaştırılmıştır (Şekil 34 ve Şekil 35).

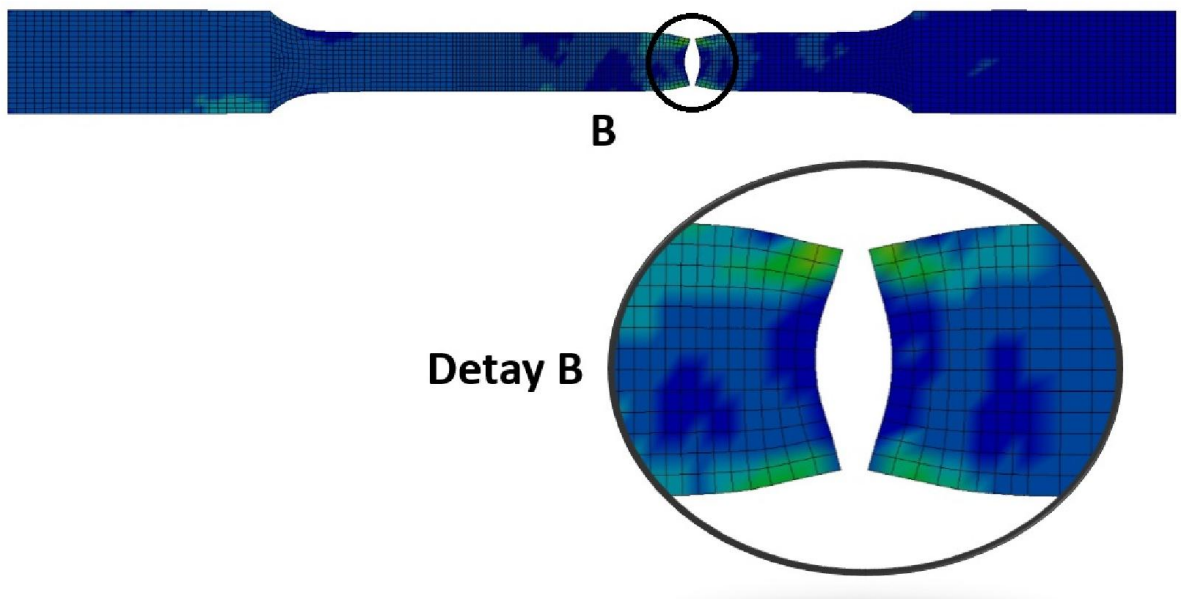


Şekil 33. ASTM E8-04 (Metalik Malzemelerin Çekme Testi için Test Metotları) standardı kullanılarak oluşturulan çekme testi numunesine ait sonlu eleman ağı

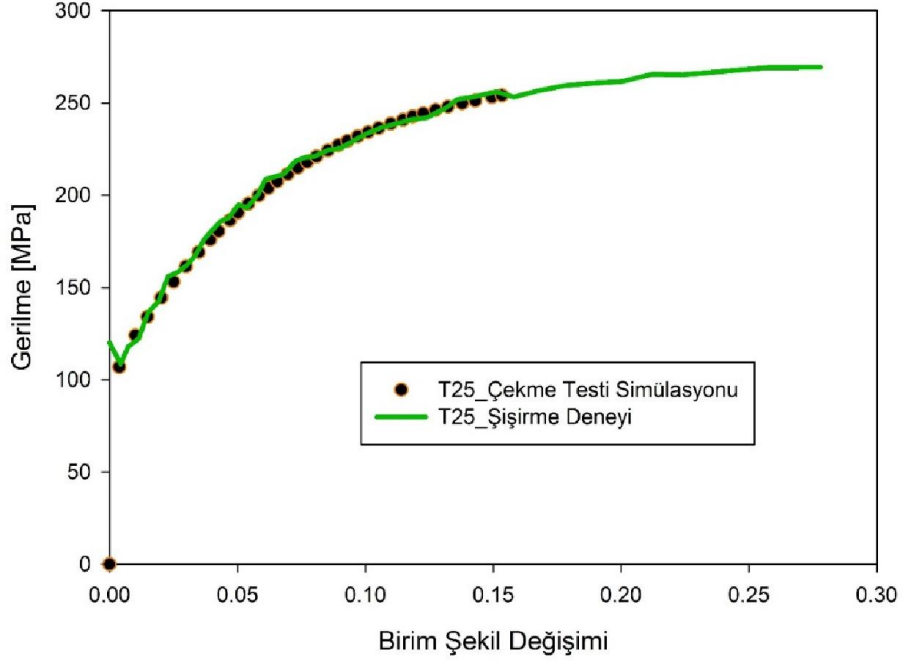


Şekil 34. 300 °C sıcaklıkta yapılan çekme deneyi sonlu eleman analizinde numune üzerinde von Mises gerilmesi dağılımı ve boyun verme bölgesinin detayı

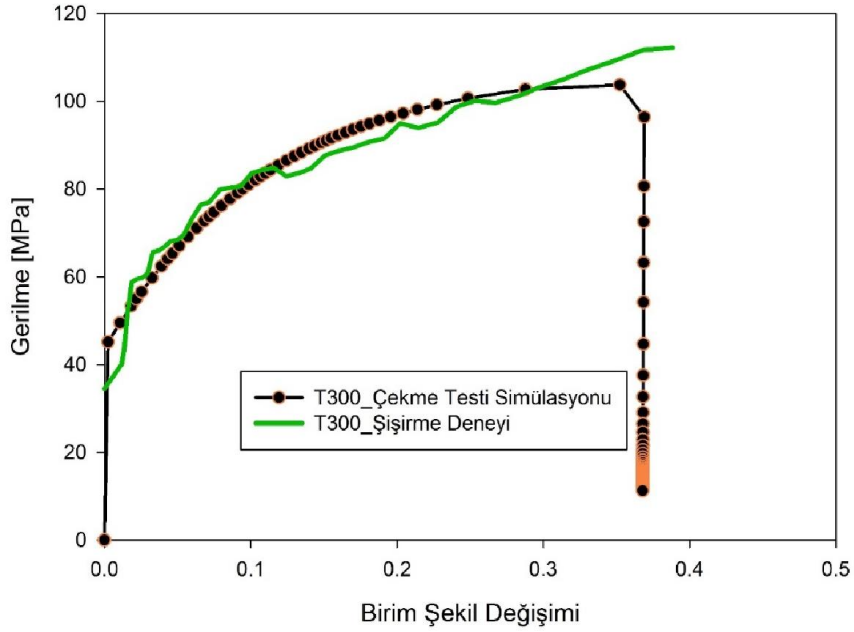
Şekil 36 ve Şekil 37’ten de görüldüğü üzere gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri hem yüksek hem de düşük sıcaklıklarda çok büyük oranda uyum göstermiştir. Böylece malzeme özelliklerinin modele tam olarak yansıtıldığı sonucuna varılmıştır.



Şekil 35. Çekme testi sonlu eleman analizi sonucunda boyun verme bölgesinde meydana gelen yırtılma



Şekil 36. 25 °C sıcaklıktaki çekme testi benzetimi ile şişirme deneyi sonucu elde edilen gerilme-birim şekil değişimi eğrilerinin karşılaştırılması



Şekil 37. 300 °C sıcaklıktaki çekme testi benzetimi ile şişirme deneyi sonucu elde edilen gerilme-birim şekil değişimi eğrilerinin karşılaştırılması

2.2.1.4. Temas (Kontak) Algoritması ve Sürtünme Katsayıları

LS-DYNA programı bünyesinde çok sayıda temas algoritması barındırmaktadır. Bu algoritmaların her biri farklı fiziksel problemler için başarılı çözümler sunmaktadır. Bu çalışmada metal şekillendirme işlemi için sürtünme ve temas davranışını başarılı bir şekilde tanımlayan “CONTACT_FORMING_ONE_WAY_SURFACE_TO_SURFACE” temas kartı kullanılmıştır. Bu kart aynı zamanda sürtünme ve temas üzerindeki sıcaklık etkisini de etkin bir şekilde tanımlamaktadır. Hazırlanan modelde 3 farklı yüzey çifti arasında temas tanımlanmıştır. Bu yüzey çiftleri ve aralarında tanımlanan Coulomb sürtünme katsayıları Tablo 9’de verilmiştir. Bu sürtünme katsayıları literatürde elde edilen sürtünme katsayılarından [59, 101] faydalanılarak, deneyle uyumlu sonuç elde edilinceye kadar farklı sürtünme katsayılarının denenmesi yoluyla elde edilmişlerdir. Zımba ile sac arasındaki sürtünme katsayısının diğer yüzeyler arasındaki sürtünme katsayılarından daha büyük seçilmesinin sebebi sacın şekillendirme sonundaki kalınlık miktarına etkisidir. Bunun belirlenmesinde yapılan çalışma kısım 2.2.2. Sürtünme Katsayılarının Sac Kalınlığına Etkisinin Belirlenmesi’nde verilmiştir.

Tablo 9. Temas yüzey çiftleri ve aralarında tanımlanan sürtünme katsayıları

Temas Yüzey Çiftleri	Baskı Plakası ile Sac	Kalıp ile Sac	Zımba ile Sac
Coulomb Sürtünme Katsayıları	0.05	0.05	0.25

2.2.2. Sürtünme Katsayılarının Sac Kalınlığına Etkisinin Belirlenmesi

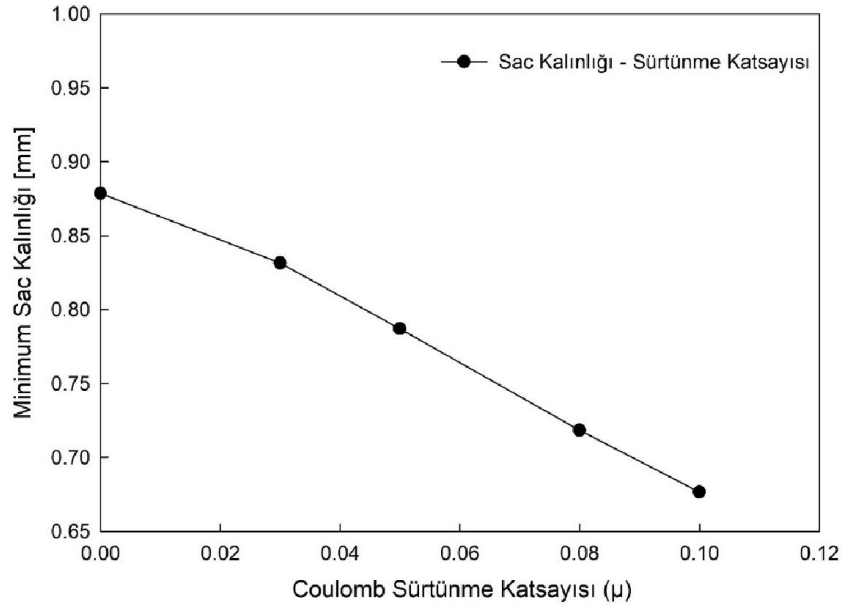
Sürtünme katsayısının doğru belirlenmesi şekillendirmede büyük rol oynaması ve sacın şekillendirmesi sonunda elde edilen kalınlık dağılımının gerçekte uyumlu olması açısından önem arz etmektedir. Bu etkiyi doğru tanımlamak amacıyla, sürtünme katsayısının farklı değerleri kullanılarak bir dizi analiz gerçekleştirilmiştir.

Öncelikle tüm temas yüzey çiftleri arasındaki sürtünme katsayısı sabit alınarak ($\mu=0-0.1$) sürtünme katsayısının şekillendirilmiş sac kalınlığı üzerindeki etkisi

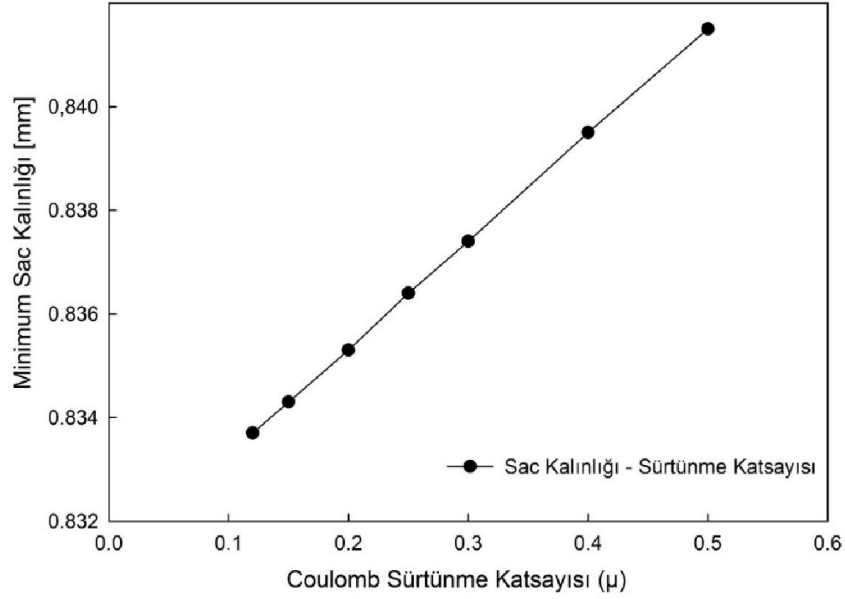
incelenmiştir. Şekil 38'den görüleceği üzere sürtünme katsayısı sac kalınlığının önemli miktarda azalmasına sebep olmaktadır.

İkincil olarak, sac ile kalıp ve sac ile baskı plakası arasındaki sürtünme katsayısı $\mu=0.05$ değerinde sabit tutulurken sac ile zımba arasındaki sürtünme katsayısının şekillendirilmiş sac kalkanlığına etkisi incelenmiştir. Şekil 39'da görüldüğü üzere sac ile zımba arasındaki sürtünme katsayısının artmasıyla şekillendirilmiş sac kalınlığında artış gözlenmektedir. Aynı miktarda (sabit zımba ilerleme mesafesi) derin çekme işlemi için bu durum prosele olumlu bir katkı sağlamaktadır. Bundan dolayı sac ile zımba arasındaki sürtünme katsayısı sac ile kalıp ve baskı plakası arasındaki sürtünme katsayısına göre büyük seçilmiştir.

Bu değerlendirmeler sonucu yapılan analizlerden, deneylerle en uyumlu sürtünme katsayıları belirlenmiş ve ilerleyen simülasyonlarda bu katsayılar kullanılmıştır. Elde edilen katsayılar Tablo 9'da verilmiştir.



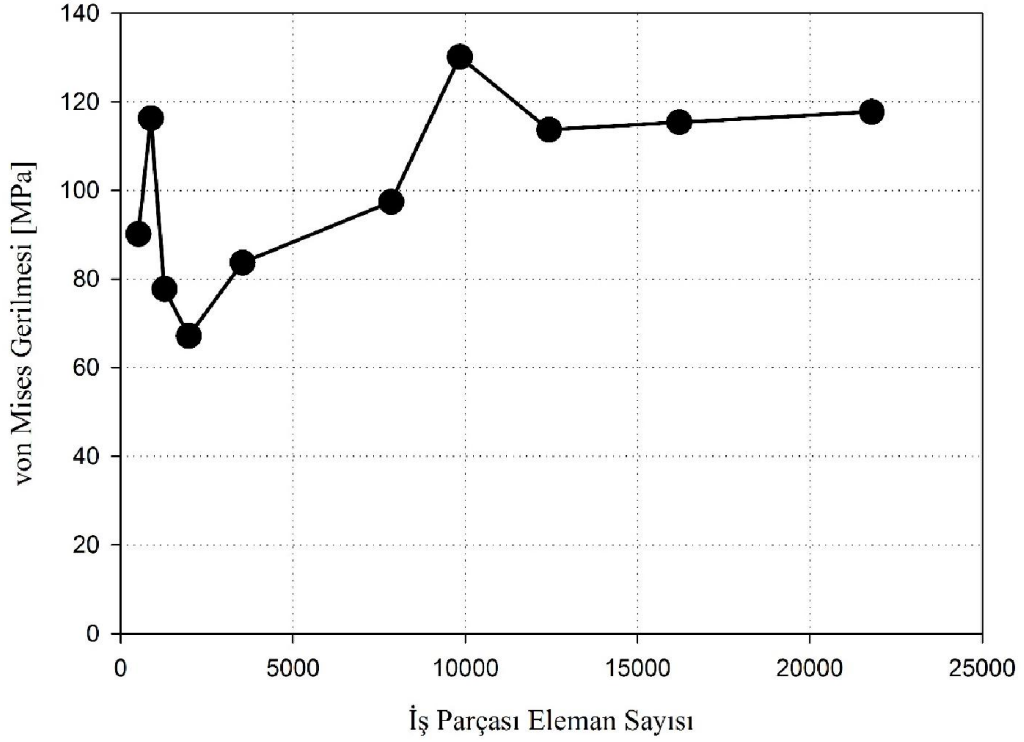
Şekil 38. Temas etkileşimi olan yüzeylerde sürtünme katsayısının artırılması ile sacdaki kalınlık değişim



Şekil 39. Sac ile zımba arasındaki sürtünme katsayısının artırılması sonucu sac için elde edilen kalınlık değişimi (Sac-kalıp-baskı plakası arasında $\mu=0.05$ iken)

2.2.3. Optimum Eleman Sayısının Belirlenmesi

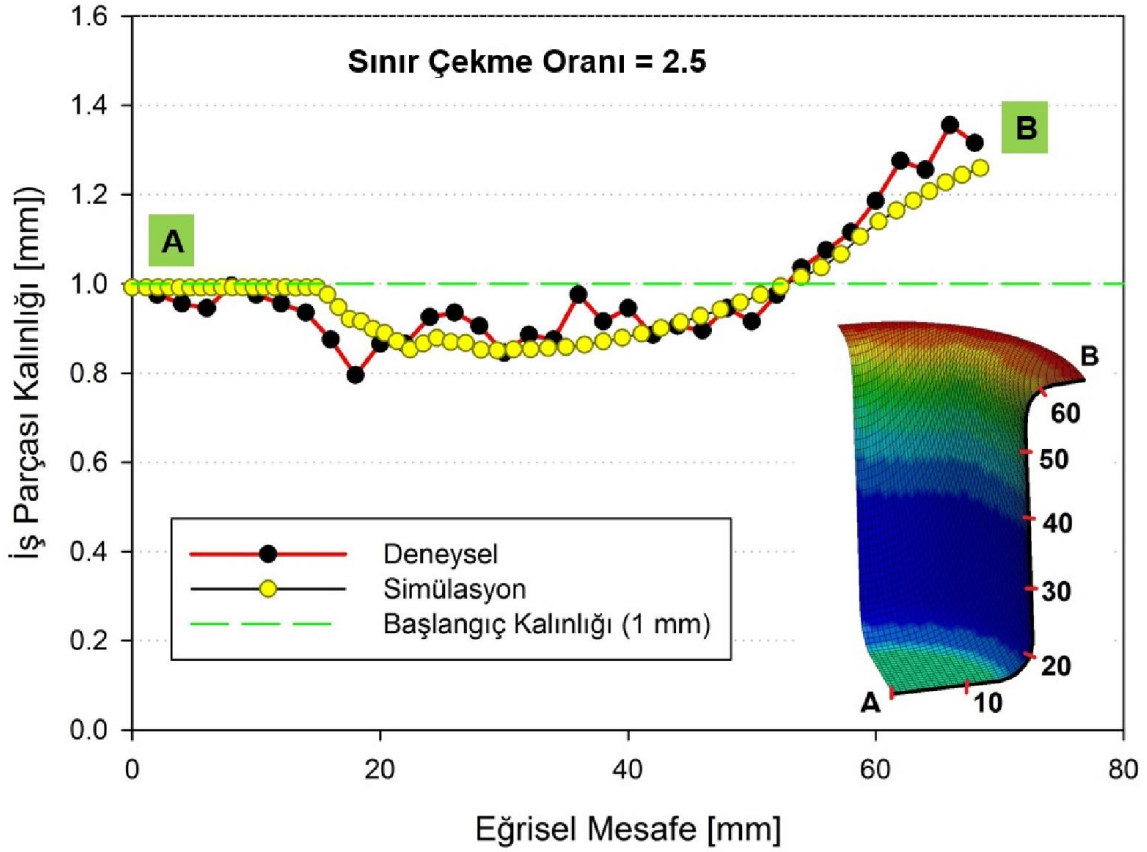
Hidromekanik derin çekme prosesi için oluşturulan sonlu elemanlar analizi modelinde prosesin aksenal simetrik olması nedeniyle çeyrek model oluşturulmuştur. Böylece çözüm süresi kısaltılmıştır. Ayrıca optimum eleman sayısı belirlenerek doğru çözümden uzaklaşmadan çözüm süresi minimuma düşürülmeye çalışılmıştır. Bunun için 100 mm çapındaki sacın belirli bir düğüm noktasındaki von Mises gerilmesi değerleri farklı eleman sayılarında yapılan analizlerle karşılaştırılmıştır (Şekil 40). Şekilden de görülebileceği üzere yaklaşık 1000 ila 12000 eleman sayıları aralığında ölçülen gerilme değerinde dalgalanma görülürken 12000 eleman sayısından itibaren sonuç %4 değişmektedir. Bu sebeple 12000 eleman sayısı bu sac çapı için optimum değer olarak kabul edilmiştir. Böylece analiz süresinde olası zaman kayıpları minimuma indirilmiştir. Bu çalışma sacın küçük boyut değişimleri için kabul görmesine rağmen büyük boyut değişimlerinde tekrarlanmalıdır.



Şekil 40. Sac için kullanılan eleman sayısının sonuçlara etkisi

2.2.4. Sonlu Eleman Modelinin Doğrulanması

Sonlu eleman metodu sayısal bir yaklaşım olduğundan oluşturulan modelin deneysel verilerle teyidi analizin güvenilirliği açısından önemlidir. Bu doğrulamayı yapmak amacıyla kısım 2.1.3. Sonlu Eleman Modelinin Doğrulanmasında Kullanılan Hidromekanik Derin Çekme Deneyi'nde verilen sınır çekme oranı 2.5 olan deneysel hidromekanik derin çekilmiş numune merkezden başlamak üzere eğrisel mesafe boyunca ölçülen kalınlık değişimleri simülasyonlardan elde edilen kalınlık değişimleri ile karşılaştırılmıştır. Şekil 41'dan da görülebileceği üzere deney ve sayısal analiz sonuçları arasında büyük ölçüde uyum sağlanmıştır. Böylece sayısal yaklaşımın doğruluğu teyit edilmiş olmuştur.

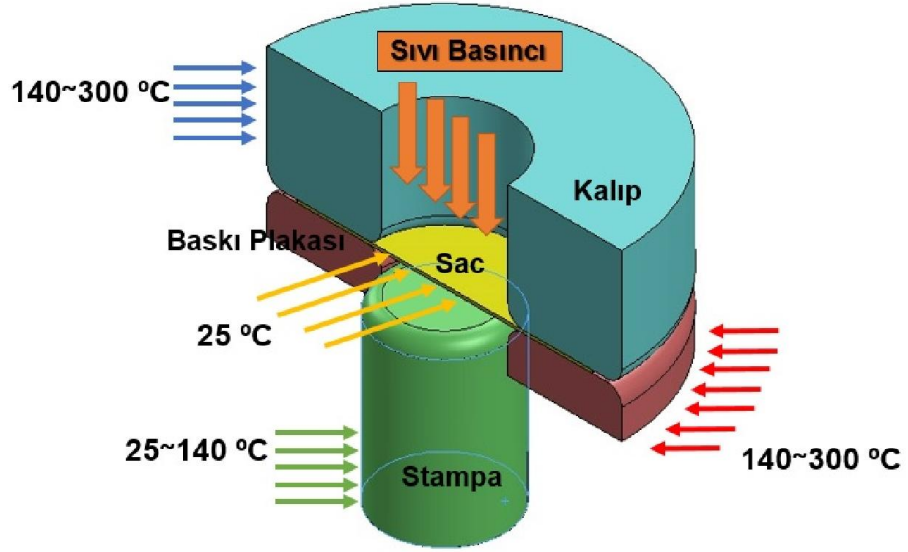


Şekil 41. Deneysel hidromekanik derin çekme ve sonlu eleman analizi sonucunda elde edilen kalınlıkların karşılaştırılması

2.2.5. Isıl Mekanik Analizin Oluşturulması

Ilık hidromekanik derin çekme işleminin genel görünümü ve sıcaklık sınır koşulları Şekil 42’de verilmiştir. Literatürdeki çalışmalarda zımba sıcaklığının, kalıp ve baskı plakası sıcaklığına nazaran daha düşük olmasının sacın şekillendirilmesine olumlu katkıda bulunduğu belirtilmiştir [57]. Bundan dolayı zımbaya 25 °C sabit sıcaklık atanırken kalıp ve baskı plakasına ılık şekillendirme sıcaklıklarında sabit değerler atanmıştır. Sac ise oda sıcaklığı (25 °C) başlangıç değeri olarak atanmış daha sonra takımlarla ısıl dengeye gelmesi beklenmiştir. Isıl denge sağlandıktan sonra şekillendirme işlemi yapılmıştır.

Bu analizde hidromekanik derin çekme modelinden farklı olarak *ısıl mekanik analiz* (coupled thermo-mechanical transient analysis) yapılmıştır. Isıl çözücü (thermal solver) olarak LS-DYNA’nın 3 numaralı “diagonal scaled conjugate gradient iterative algoritması” kullanılmıştır.



Şekil 42. Ilık hidromekanik derin çekme prosesinin genel görünümü ve sıcaklık başlangıç ve sınır koşulları

Tablo 10. AA 5754-O ve AISI 4140 için analizlerde kullanılan ısıl özellikler

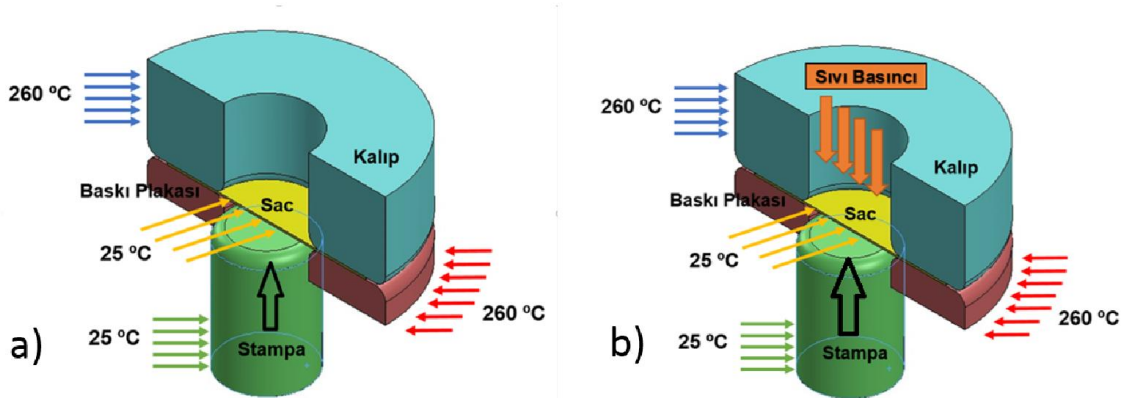
Isıl Özellikler	Kalıp (AISI 4140)	Baskı Plakası (AISI 4140)	Zimba (AISI 4140)	Sac (AA 5754-O)	Su	Hava
Isı İletim Katsayısı [W/m °K]	38.95 [102]	38.95	38.95	220 [57]	0.54 [103]	0.024 [103]
Özgül Isı [J/kg °K]	473 [102]	473	473	904 [57]	-	-
Isıl Kapasite [J/°K]	12440	2385	1183	-	-	-
Isıl Genleşme Katsayısı [1/°K]	-	-	-	2.4×10^{-5} [104]	-	-

Tüm sistem bileşenleri (sac: AA 5754-O, takımlar: AISI 4140) ısıl izotropik (thermal isotropic) kabul edilmiştir. Isı transferi için malzemelere ve temas algoritmalarına atanan ısıl özellikler Tablo 10’da verilmiştir. Burada malzemelerin ısıl kapasiteleri özgül ısıları ile kütlelerinin çarpımından elde edilmiştir.

2.2.5.1. Sac Üzerindeki Sıcaklık Dağılımının Sonlu Elemanlar Analizi ile Modellenmesi ve Doğrulanması

Sıcaklık etkisinin sac üzerindeki dağılımının gerçekçi değerleri yansıtması analiz sonuçlarının güvenilirliği açısından önemlidir. Bu amaçla hem ılık şekillendirme hem de ılık hidromekanik derin çekme prosesleri için farklı sıcaklıklarda ısıl mekanik analizler gerçekleştirilmiş ve analizler sonucunda elde edilen sıcaklık dağılımları takımlar (kalıp, baskı plakası ve zımba) üzerinde farklı noktalara yerleştirilen termokupullar yardımıyla ölçülen sıcaklık değerleri ile karşılaştırılmıştır.

Deneysel kalıp ve baskı plakası sıcaklığı ısıtıcılarla 260 °C, zımba ise soğutma ile 25 °C sıcaklık değerlerinde sabit tutulurken; sacın başlangıç sıcaklığı olan 25 °C’den ısıl dengeye gelmektedir (Şekil 43). Sac, kalıplar arasına yerleştirilmeden önce kalıpların 260 °C’de ısıl dengeye gelmesi için yaklaşık 10~15 dakika kadar beklenmektedir. Kalıplarda denge durumuna ulaşıldıktan sonra farklı sıcaklıklardaki kalıplar ve zımba ile sacın da denge sıcaklığına gelmesi için 15 saniye beklenmektedir.



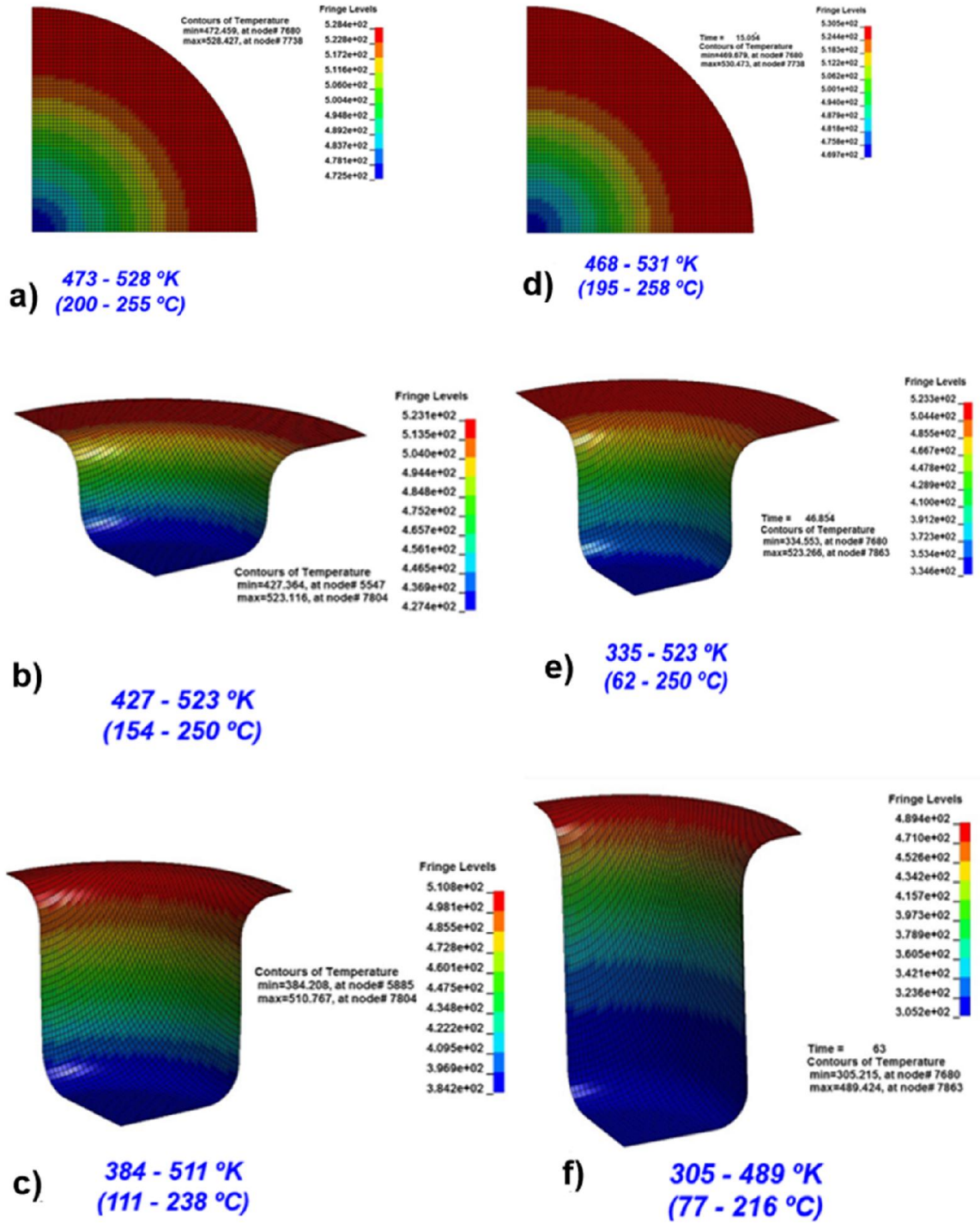
Şekil 43. Prosesler, başlangıç sıcaklık ve sınır koşulları a) IŞ prosesi, b) IHDC prosesi

Termokupullardan ölçülen değerler incelendiğinde sacın kalıp ve baskı plakası ile temas ettiği bölgelerde sıcaklığın 260 °C'nin bir miktar altında değerler aldığı, zımbaya temas ettiği bölgelerin sıcaklığının ise sacın başlangıç sıcaklığı olan 25 °C'nin 60-100 °C üzerine çıktığı gözlemlenmiştir. Böylece analiz sonucunda sac üzerindeki sıcaklık gradyanının sacın merkezinden kenarlarına doğru belirtilen bu minimum ve maksimum değerler arasında değişmesi öngörülmüştür.

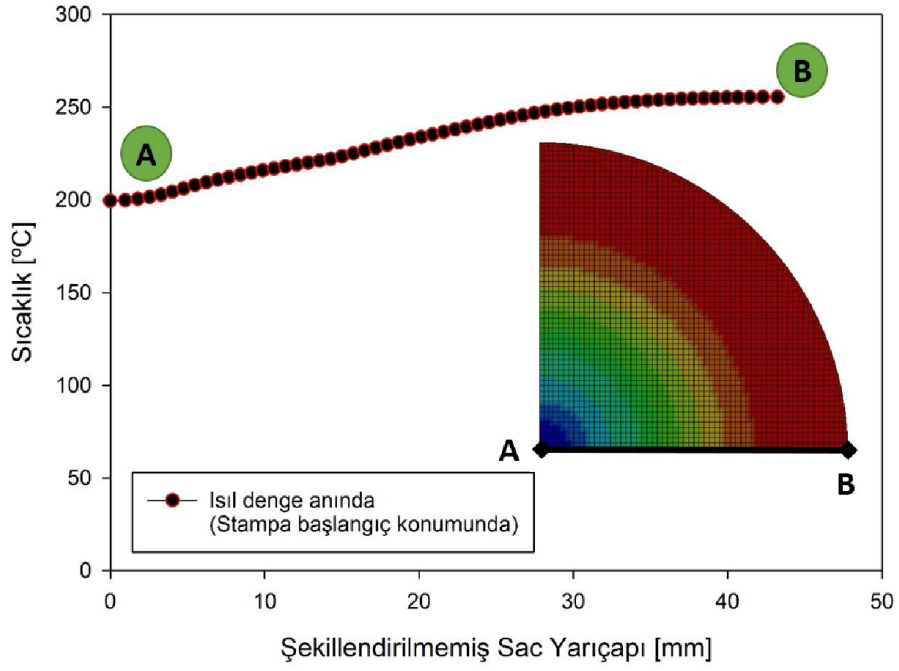
Yapılan analizler sonucunda zımbanın ilerlemesi referans alınarak 3 farklı konumda sac üzerinde gözlemlenen sıcaklık dağılımı yukarıda bahsedilen sıcaklık aralığında yer aldığı hem IŞ hem de IHDC prosesleri için elde edilmiştir (Şekil 44).

IHDC prosesinde aynı sac ölçüleri kullanılmasına rağmen daha yüksek oranda şekillendirilebilirdik elde edildiğinden zımba ilerlemesi IŞ'dekine göre daha Şekil 44-a'da IŞ işleminde 15. saniye sonunda sac üzerindeki sıcaklık gradyanının ısı denge hali görülmektedir. Şekil altında mavi ile belirtilen sıcaklık aralığına bakıldığında den ge durumunda sacın merkezi (zımba ile temas eden bölge) 200 °C iken sacın kenarları (kalıp ve baskı plakası arasında kalan bölge en dış kenar) 255 °C'dir. Bu iki bölge arasında sıcaklık gradyanı parçanın aksel simetrik geometrisinden de beklenildiği üzere düzgün olarak değişmektedir. Şekil 44-b ve c'de görüldüğü üzere zımba ilerleyip sac ile temas süresi ve alanı arttıkça sacın merkezindeki sıcaklık daha da düşerek zımba sıcaklığına yaklaşmaktadır.

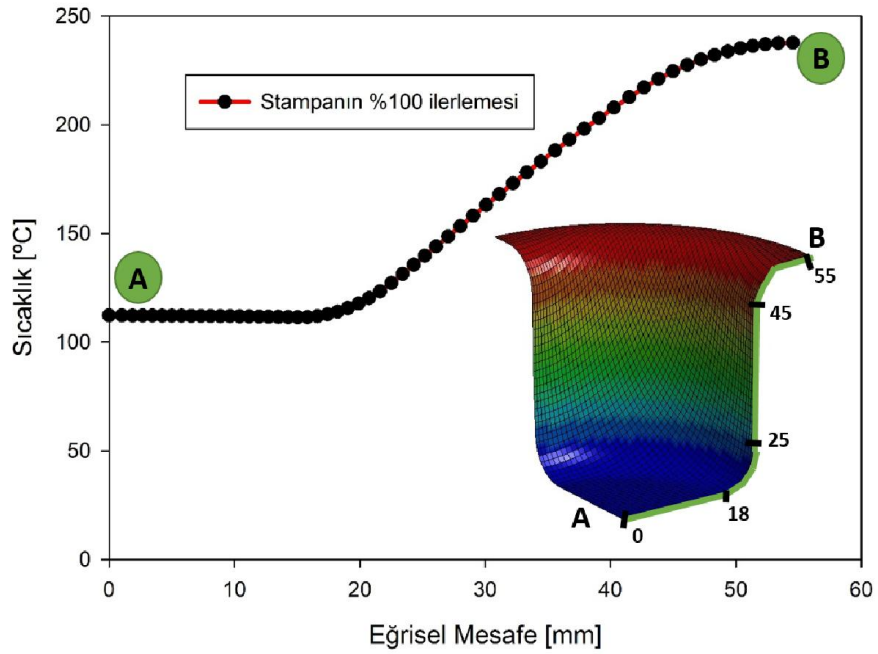
Sıcaklığın eğrisel uzunluk boyunca değişimi IŞ prosesi için Şekil 45 ve Şekil 46'da verilmiştir. Sıcaklık değerleri sac merkezinden kenarına doğru ölçülmüştür. Grafiklerden de gözlemlendiği üzere sıcaklık, zımba sıcaklığı (25 °C) ile kalıp sıcaklığı (260 °C) arasında değişmektedir.



Şekil 44. A) IŞ analizi sıcaklık dağılımları a) 15. s sonunda ısıl dengede b) %50 zımba ilerlemesinde, c) %100 zımba ilerlemesinde (proses sonu) B) IHDC analizi sıcaklık dağılımları d) 15. s sonunda ısıl dengede, e) %50 zımba ilerlemesinde, f) %100 zımba ilerlemesinde (proses sonu)



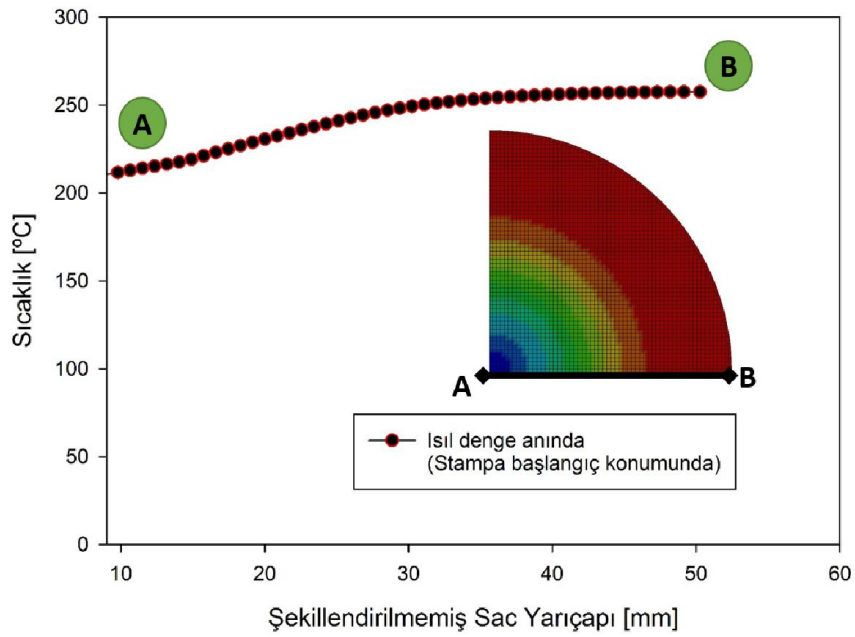
Şekil 45. IŞ prosesinde şekillendirme öncesinde ısıl denge halinde sac merkezinden kenarına doğru sıcaklık değişimi



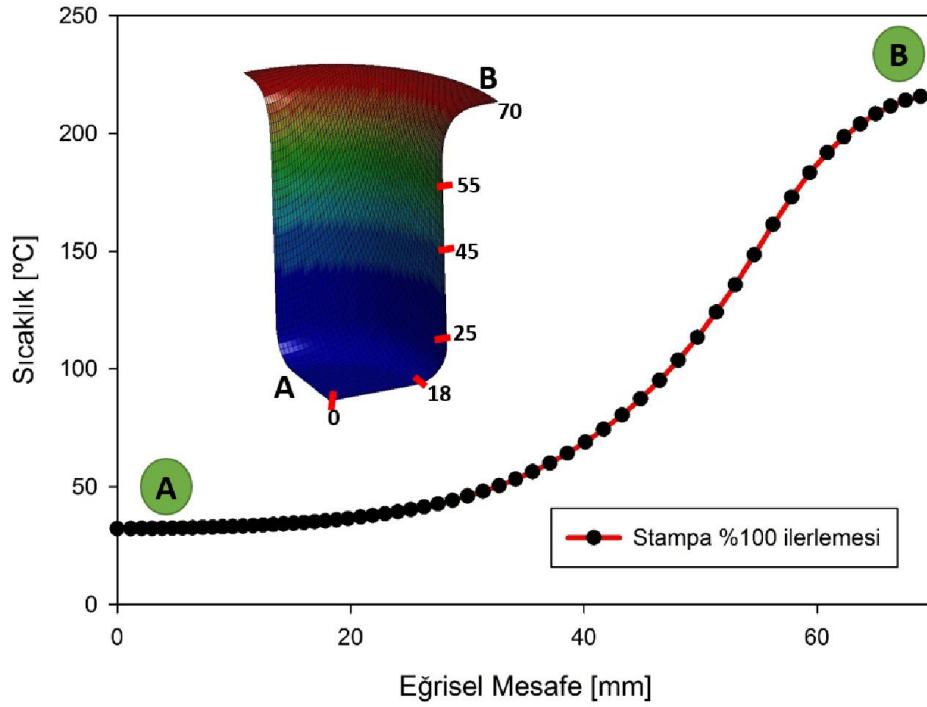
Şekil 46. IŞ prosesi sonunda sac üzerinde eğrisel mesafe boyunca sıcaklık gradyanı

IHDÇ işleminde sac üzerindeki sıcaklık dağılımı Şekil 44'ten de görülebileceği üzere IŞ ile benzer davranış sergilemektedir. Sacın 15. saniyedeki sıcaklık denge durumu, sıcaklık sınır değerleri ve gradyanı, her iki proseste de sac çapı ve sıcaklık sınır koşulları aynı olduğundan birbirine çok yakın değerler olarak elde edilmiştir (Şekil 44-c). IHDÇ işleminde sac sıvı basıncı yardımıyla zımbaya bastırıldığı için, sacın merkezindeki sıcaklıklar IŞ'ye göre daha düşük değerlerde elde edilmiş ve sacın zımbaya temas ettiği bölgeler daha etkin bir şekilde soğutulabilmiştir.

IHDÇ prosesi için sıcaklığın eğrisel uzunluk boyunca değişimi Şekil 47 ve Şekil 48'de grafiksel olarak verilmiştir. Bu sıcaklıklar analizler sonucunda sac merkezinden kenarına doğru elde edilmiştir. Grafiklerden de görülebileceği gibi sıcaklık zımba sıcaklığı ile kalıp sıcaklığı arasında değişmektedir.



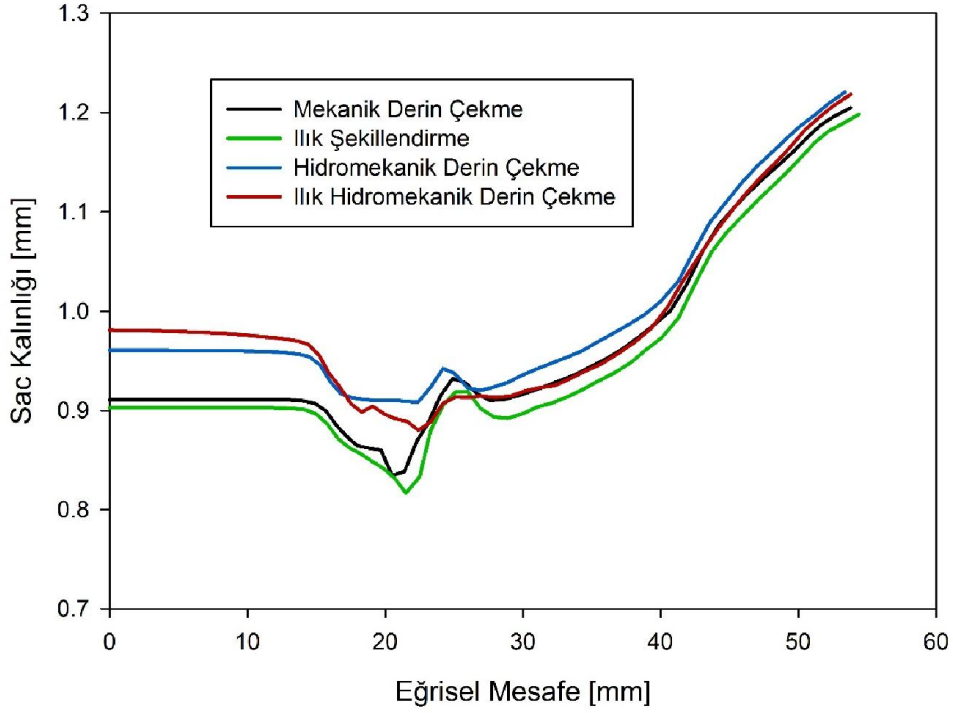
Şekil 47. IHDÇ prosesinde şekillendirme öncesinde ısıl denge halinde sac merkezinden kenara doğru sıcaklık değişimi



Şekil 48. IHDC prosesi sonunda eğrisel mesafe boyunca sıcaklık gradyanı

2.2.6. Farklı Sac Şekillendirme Yöntemlerinin Karşılaştırılması

Literatürde incelenen çalışmalarda klasik derin çekme prosesi ile elde edilen parçaların derinliğinin sıcaklığın artırılmasıyla veya hidroşekillendirme yönteminin uygulanmasıyla daha da artacağı çeşitli deneylerle belirlenmiştir [23, 26, 47]. Dolayısıyla hem ılık şekillendirme hem de hidroşekillendirme prosesinin birleştirilmesiyle olumlu özelliklerinin de birleşmesi ve daha iyi şekillendirilebilirlik sağlaması beklenmektedir. Bu beklentiyi doğrulamak amacıyla aynı kuvvet, zımba ilerlemesi (aynı derinlik) vs. şartları uygulanarak klasik derin çekme prosesinin, ılık şekillendirme, hidromekanik derin çekme ve ılık hidromekanik derin çekme proseslerinin şekillendirme sonucunda sac merkezinden kenarına olan kalınlık değişimleri karşılaştırılmıştır. Şekil 49'dan da görülebileceği üzere aynı derinlikte çekilen silindirik kap sıcaklığın artmasıyla sac'ta şekillendirme artarak daha ince sac profili gözlenmektedir. Buna karşın ılık hidromekanik derin çekme prosesinde ılık şekillendirme ile hidroşekillendirme proseslerinin avantajlarının birleşmesiyle aynı derinlikteki kaptaki sac kalınlığı daha az azalmış ve daha homojen dağılım göstermiştir.



Şekil 49. Farklı sac şekillendirme yöntemlerinin karşılaştırılması

2.2.7. Optimizasyon Çalışmaları

Önceki bölümlerde de belirtildiği üzere optimum proses parametrelerinin bulunması, imalatın ve ürünün hem kalitesi, hem de maliyeti açısından oldukça önemlidir. En iyi sonuçların, parça kalitesinin en hızlı biçimde en düşük maliyetle gerçekleştirilebilmesi için proste kritik etkiye sahip parametreler belirlenip bunların optimizasyonu gerçekleştirilmelidir. Ilık hidromekanik derin çekme prosesi için kritik parametreler olarak sıcaklık ve yükleme profilleri (baskı plakası kuvveti ve hidrolik basınç) kısım 1.2.3. Ilık Hidroşekillendirmede Prosesinde Etkin Parametreleri'nde belirlenmiş ve bu çalışma kapsamında değerlendirmeye alınmıştır.

Optimizasyon çalışmaları kapsamında LS-DYNA çözücüsü ile uyumlu olarak çalışan ticari LS-OPT v4.2 (LSTC, Livemore, CA, ABD) optimizasyon modülü kullanılmıştır. Sacı, aynı kap derinliğinde en az incelmeyle şekillendirmek optimizasyonda amaç olarak belirlenmiştir. Bu doğrultuda maksimum %20 incelmeyi aşmayacak şekilde kontrol kriteri oluşturulmuştur. Böylece 1 mm sac kalınlığı için sac en fazla 0.8 mm'ye kadar incelme

sözkonusu olmuştur. Optimizasyon stratejisi, örnekleme yöntemi, algoritma ve diğer gerekli ayarlamalar LS-OPT kullanıcı ara yüzü ile oluşturulan SE modeline entegre edilerek tek iterasyonlu meta-model tabanlı optimizasyon modeli oluşturulmuştur. Yapay sinir ağları, doğrusal olmayan sistemlerin sayısal olarak modellenmesinde ve çözümlenmesinde başarılı bir şekilde kullanılmaktadır [105]. Bu çalışmada “radial basis function” sinir ağı kullanılırken, örnekleme yöntemi olarak “space-filling” metodu kullanılmıştır. Sıcaklık optimizasyonu için 10 örnekleme noktası yeterli olurken, yükleme profilleri için yapılan çalışmada parametre sayısının fazlalığına bağlı olarak en az 16 adet örnekleme noktası kullanılmıştır. Tepki yüzeyindeki optimum noktayı bulmak için global algoritma aktif hale getirilmiştir. Bu yöntem ile elde edilen sonuçlarda %90’nın üzerinde korelasyon oranları elde edilmiştir. Kullanılan optimizasyon ayarları Tablo 11’de verilmiştir.

Tablo 11. LS-OPT için optimizasyon ayarları

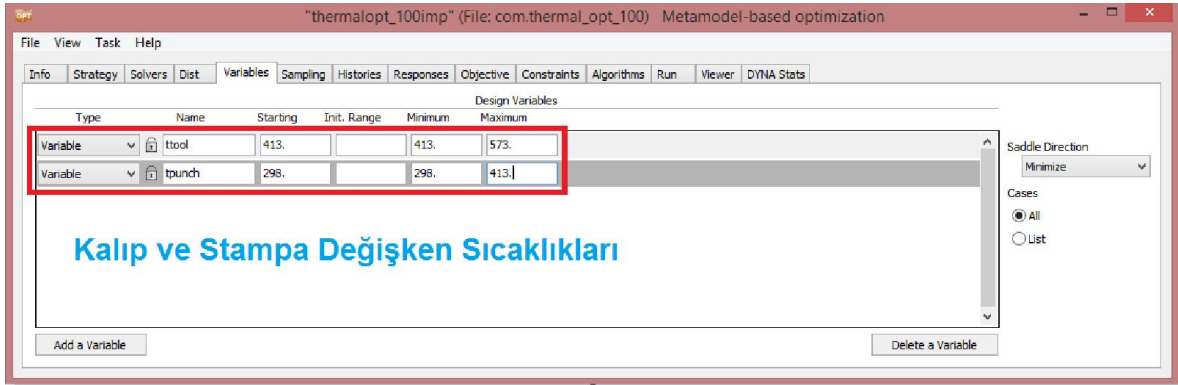
Strateji	Örnek Noktalama Yöntemi	Algoritma
Tek iterasyon	Meta-model: Radial Basis Fuction Network: Space Filling	Global Algorithm with Population size: 100 Number of generations: 250

Bu kısım, sıcaklık optimizasyonu ve yükleme profillerinin optimizasyonu olarak iki başlık altında değerlendirilmiştir. Her iki başlığın altında da optimizasyon işleminin prosedürü detaylı olarak anlatılmıştır.

2.2.7.1. Sıcaklık Optimizasyonu

Sıcaklık optimizasyonu işlemi sadece IHDÇ prosesi için gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada sadece sıcaklık değişken kabul edilerek (diğer tüm parametreler sabit) aynı miktarda kap derinliği için elde edilen şekillendirilmiş sac üzerinde minimum incelmeyi veren sıcaklık değerleri kalıp ve zımba için belirlenmiştir.

Kalıp ve zımba sıcaklıkları LS-DYNA çözücüsüne parametrik olarak LS Pre-Post programı aracılığıyla oluşturulan model dosyasına tanıtılmıştır. Oluşturulan model daha sonra LS-OPT optimizasyon modülüne aktarılmış ve burada zımba ve kalıplara atanan parametrik sıcaklık değerleri (zımba için soğuk şekillendirme sıcaklıkları, kalıplar için ılık şekillendirme sıcaklıkları) değişken olarak tanımlanmıştır (Şekil 50).



Şekil 50. Kalıp ve zımba için değişken sıcaklık parametrelerinin LS-OPT ara yüzünde tanımlanması

Tablo 12. Optimizasyon için seçilen örnekleme noktaları ve değerleri

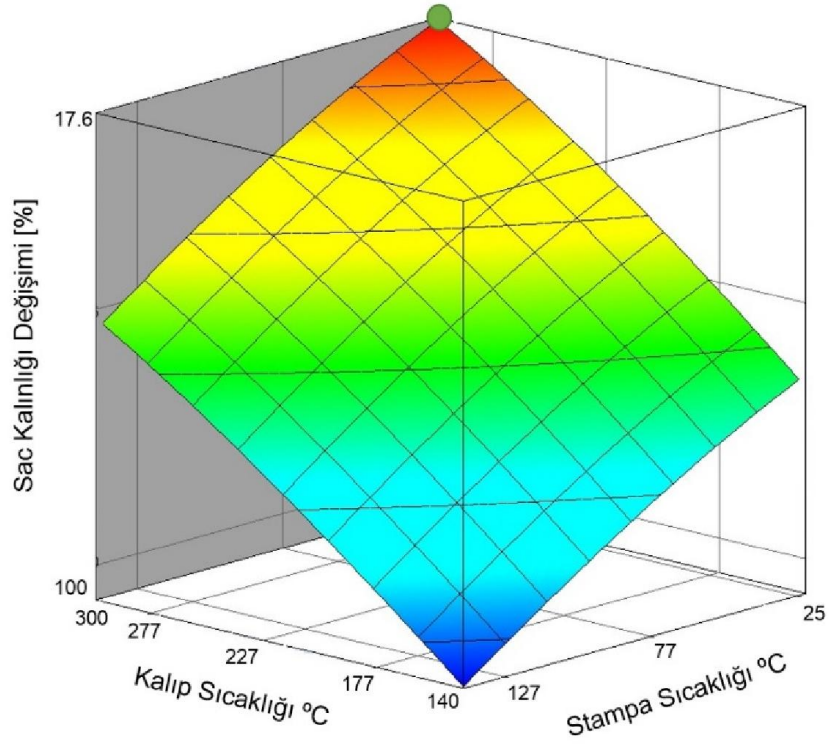
Örnekleme Numarası	Zımba Sıcaklığı [°C]	Kalıp ve Baskı Plakası Sıcaklığı [°C]	Sac Sıcaklığı = 25 °C'de sabit
1	25	140	
2	82	244	
3	91	140	
4	140	140	
5	107	300	
6	56	298	
7	140	253	
8	58	187	
9	116	197	
10	28	243	

Ardından bu değişkenler LS-OPT tarafından alınıp belirlenen aralıklarda etkin sonuç elde etmeye yetecek kadar kombinasyonları (bu çalışma için 10 adet) oluşturularak ayrı

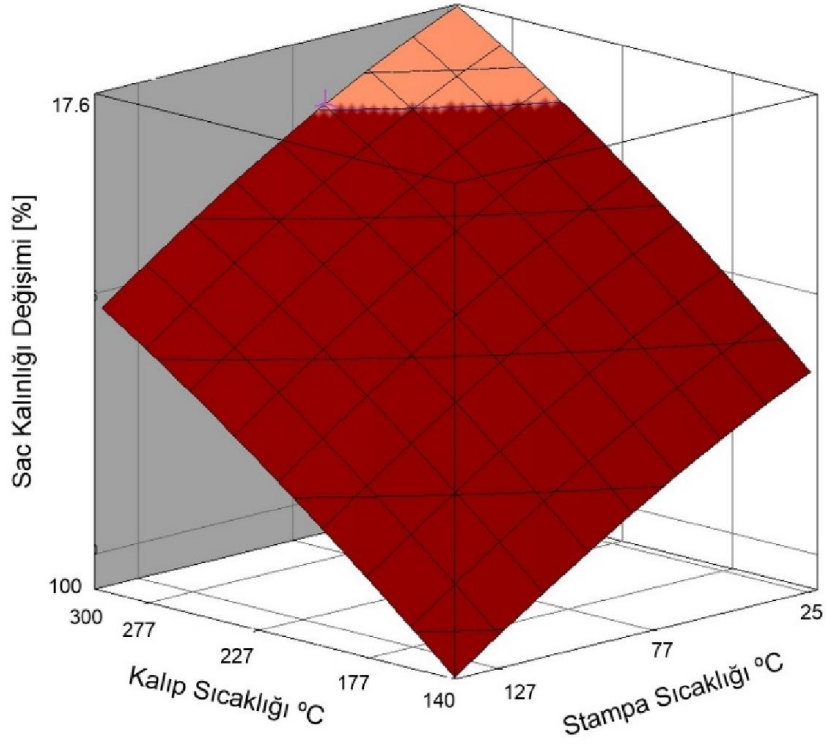
ayrı analize tabi tutulmaktadır (Tablo 12). Her bir analiz sonucunda elde edilen değerler yazılım tarafından toplanıp son bir analiz (bu çalışmada 11. analiz) ile istatistiksel olarak değerlendirilip maksimum şekillendirme için en az incelmeyi veren kalıp ve zımba sıcaklıkları için optimum kombinasyonu belirlenmektedir.

Yapılan analizler sonucunda istatistiksel değerlendirme ile cevap yüzeyi (response surface) Şekil 51'deki gibi elde edilmiştir. Şekil 51 incelendiğinde kalıp (kalıp ve baskı plakası) sıcaklıkları arttıkça ve zımba sıcaklığı azaldıkça minimum (%) yüzde incelmeye elde edilmektedir. Yapılan analizler sonucunda sabit yükleme profillerinin kullanılması halinde optimum sıcaklık kombinasyonu (grafikğin üst kısmındaki yeşil nokta) kalıplar için 300 °C ve zımba için 25 °C olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlardan da anlaşılacağı gibi IHDC prosesinde en uygun kalıp sıcaklığı olarak, göreceli olarak daha fazla deformasyonun meydana geldiği flanş bölgesinde ılık şekillendirme sıcaklığının üst sınırı olan 300 °C ve deformasyonu meydana getiren kuvveti taşıyan cidar bölgesinde de daha düşük sıcaklıkların oluşmasına neden olması için zımbada mümkün olan en düşük sıcaklık bulunmuştur. Belirlenen bu optimum değerlerle yapılan analiz sonucunda sac üzerindeki maksimum yüzde incelmeye miktarı %17.6 olarak gerçekleşmiştir.

Optimizasyon modeli oluşturulurken tecrübi ve literatürdeki değerlere dayanarak hasar kriteri olarak, sac kalınlığının %25 incelmeye sınır değeri olarak kabul edilmiştir. Şekil 52'deki koyu kırmızı bölge belirlenen bu değerin üzerindeki değerleri göstermektedir. Bu bölgedeki sıcaklık kombinasyonları ile yapılan analizlerde aşırı incelmeye ve/veya yırtılma sebebiyle şekillendirme tamamlanamamıştır.



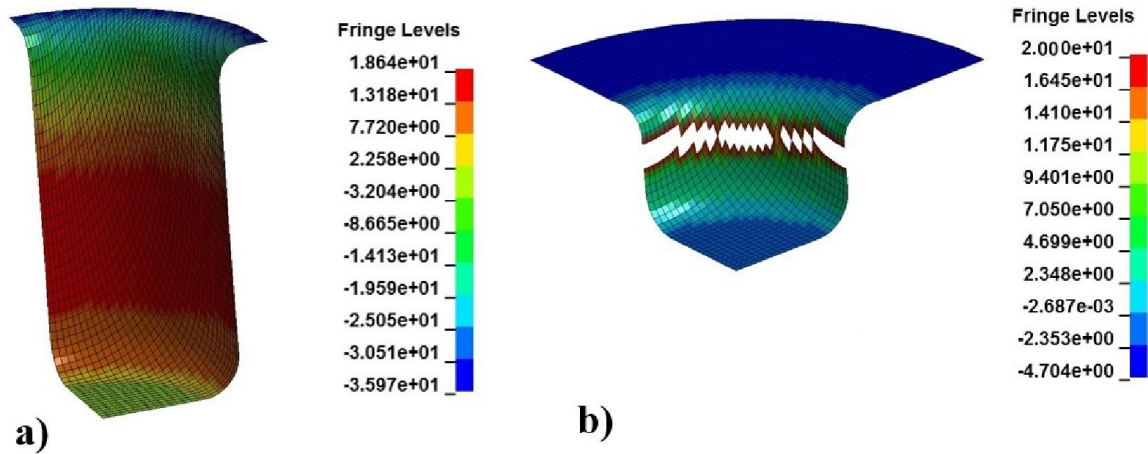
Şekil 51. Kalıp ve zımba için yapılan sıcaklık optimizasyonu sonuçları



Şekil 52. Kalıp ve zımba için yapılan sıcaklık optimizasyonu sınır değerleri (müsaade edilebilir inceleme: açık renkli bölge)

Koyu kırmızı bölgenin üzerindeki alanda kalan sıcaklık kombinasyonları ise yüzde incelme olarak belirlenen sınırlar içerisinde tanımlanan maksimum derinliğe kadar (45 mm) emniyetli bir şekilde çekilebilmişlerdir. Bu bölge değerleri incelendiğinde kalıp sıcaklığının 250-300 °C ve zımbanın 25-70 °C arasındaki kombinasyonlarında olduğu belirlenmiştir. Bu değerler Bu değerlendirmeler yapılırken tüm analizlerin aynı sac çapı, aynı yükleme profilleri ve zımba ilerlemesi için yapıldığı dikkate alınmalıdır. Böylece tek değişken parametre olarak sıcaklık kullanılmıştır.

Şekil 52’de tanımlanan şekillendirme açısından riskli koyu kırmızı bölge ve üzerindeki güvenli bölgede yapılan iki analizin sonuçları Şekil 53’da verilmiştir. Şekil 53 a’da görüldüğü üzere sac 260 °C kalıp, 25 °C zımba sıcaklığında, 45 mm derinliğine kadar başarılı bir şekilde şekillendirilirken iş parçasının maksimum yüzde incelme miktarı kırmızı ile görülen cidar bölgesinde %18.6 olarak ölçülmüştür. Bu değer aynı çaptaki ve aynı yükleme profillerinin uygulandığı 140 °C kalıp ve 25 °C zımba sıcaklığındaki sac (Şekil 53 b) için %20 incelme değerini aşarken 17.5 mm zımba ilerlemesinde yırtılmıştır. Bu görüntü sacın şekillendirilmesinde sıcaklığın güvenilir bir şekilde modellendiğini göstermekte ve optimum sıcaklık aralığını teyit etmektedir.



Şekil 53. Farklı sıcaklıklarda gerçekleştirilen ılık hidromekanik derin çekme işlemi ve yüzde kalınlık dağılımı a) 260 °C kalıp ve 25 °C zımba sıcaklığında (başarılı şekillendirme), b) 140 °C kalıp ve 25 °C zımba sıcaklığında (yetersiz şekillendirme ve hasar)

2.2.7.2. Yükleme Profillerinin Optimizasyonu

Sac şekillendirilirken kullanılacak yükleme profillerinin LS-OPT modülü ile en iyileştirilmesi işleminde karakteristiği proses boyunca değişen sıvı basıncı ve baskı plakası kuvveti parametreleri için en uygun eğrinin (profilin) belirlenmesine çalışılmıştır. En optimum profil, bir eğri fonksiyonu katsayılarının parametrik olarak belirlenmesiyle elde edilmektedir. Burada literatürde ve deneyde kullanılan genel eğri tipleri için zamana bağlı birer fonksiyon uydurulmakta ve ardından bu fonksiyonun katsayıları için minimum ve maksimum aralıklar ile iterasyon için başlangıç değerleri kareler toplamı yöntemi ile SigmaPlot (Systat Inc., San Jose, California, ABD) ve kullanıcı tanımlı fonksiyonlarla (user-defined function) Matlab (Mathworks Inc., Natick, Massachusetts, ABD) programlarında belirlenmektedir.

Belirlenen bu katsayılar ve oluşturdukları fonksiyon LS-PrePost'ta ve LS-OPT modülünde parametrik olarak girildikten sonra yine sıcaklık optimizasyonunda olduğu gibi parametre sayısına bağlı olarak analizler yapılmaktadır.

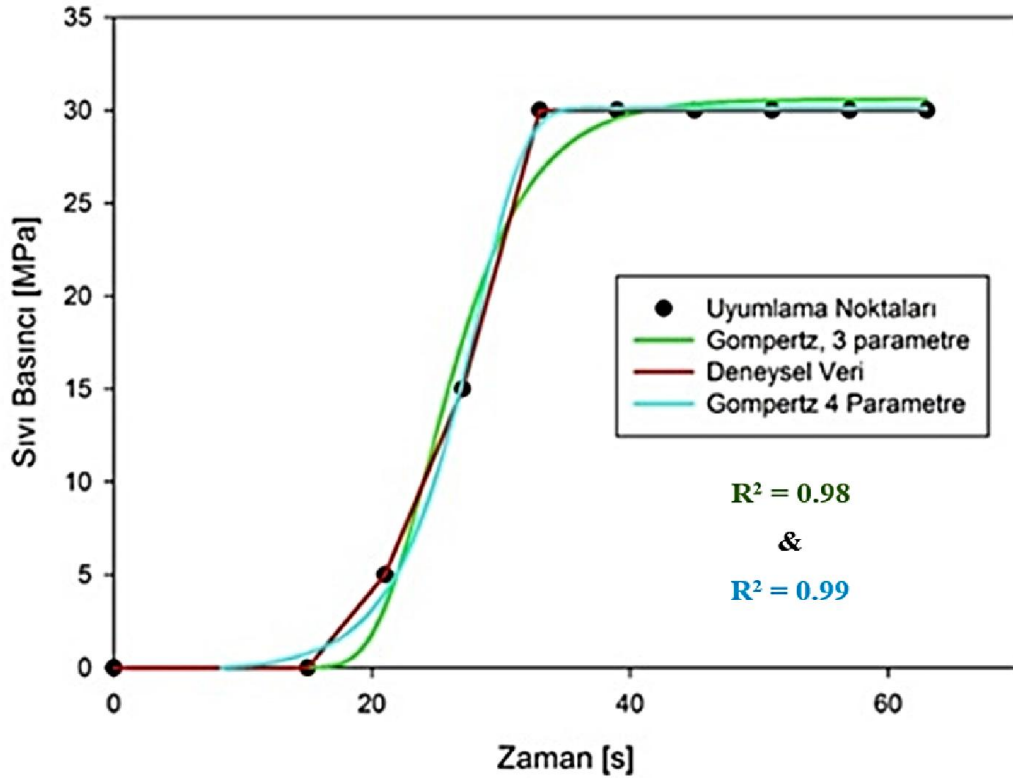
Bu bölümde sıvı basıncı optimizasyonu için örneklendirme yapılmıştır. Yapılan deneysel çalışmalardan elde edilen tecrübeler ve literatürden görülen veriler, sıvı basıncı eğrilerinin genel olarak sigmoidal eğri fonksiyonları tipinde olduğunu göstermiştir. Bundan dolayı elde edilen deneysel veriler kullanılarak bu verilere sigmoidal eğriler uyumlanmıştır. Eğri uyumlama yapılırken farklı tipteki sigmoidal eğrilerin deneysel verileri başarılı bir şekilde yansıttığı gözlenmiştir. Bu eğriler arasından Gompertz 3 Parametre (Denk. 1) ve Gompertz 4 Parametre (Denk. 2) fonksiyonlarının katsayıları sayıca daha az olduğundan örneklendirmede değerlendirmeye alınmışlardır. Çünkü katsayılar ne kadar fazla olursa LS-OPT'ta o kadar çok parametre olacak ve çözüm süresi uzayacaktır. Deneysel verilerin bu fonksiyonlara göre uyumlamaları ve korelasyon değerleri Şekil 54'te verilmiştir.

$$f = a + e \left[-e^{\left(-\frac{x-x_0}{b} \right)} \right] \quad (1)$$

$$f = y_0 + a * e \left[-e^{\left(-\frac{x-x_0}{b} \right)} \right] \quad (2)$$

Gompertz 3 Parametre için SigmaPlot veri işleme programı ile 0.98 korelasyon oranı ile elde edilen katsayılar ve iterasyon başlangıç değerleri Tablo 13’da verilmiştir.

Tablo 13’da verilen katsayılar LS-OPT ara yüzünde değişken parametreler olarak girilmiştir. Parametre sayısı 3 olduğundan ve değişken olarak girildiğinden LS-OPT optimizasyon ön analiz sayısının minimum değerini 16 adet olarak belirlemiştir.



Şekil 54. Deneysel verilerin sigmoidal tipteki eğrilere uyumlanması ve korelasyon oranları

Tablo 13. Gompertz 3 parametere sigmoidal tipi eğrisi için belirlenen katsayılar

Gompertz, 3 Parametre ($R^2 = 0.98$)			
Parametreler	Başlangıç Değeri	Minimum	Maksimum
a	30	-30	90
b	-6.318	-6.318	18.953
x_0	24.685	-24.685	74.053

3. SONUÇLAR

Bu çalışmada otomotiv sanayiinde ağırlık azaltma çalışmalarında önemli bir yer tutan olan AA 5754-O sac malzemesinin şekillendirilebilirliğinin artırılması amacıyla geliştirilen ılık hidromekanik derin çekme yöntemi, sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak modellenmiş ve sıcaklık ile yükleme profilleri (sıvı basıncı ve baskı plakası kuvveti) parametrelerin proses üzerine etkisi ile optimum şekillendirmeyi veren parametrik optimizasyonlar yapılmıştır. Analizler sırasında ayrıca, malzeme modeli seçimi, sistemin parçaları arasındaki sürtünme katsayılarının tayini, sıcaklık dağılımı, baskı plakası kuvvetinin zamana göre değişimi gibi şekillendirme üzerine önemli etkileri olan parametreler belirlenmiş ve sonuçlar 112M913 nolu “Ilık Hidromekanik Derin Çekmede Sıcaklık, Sıvı Basıncı ve Baskı Plakası Kuvvetinin Proses ve Üretilen Parçalara Etkilerinin Araştırılması” başlıklı TÜBİTAK projesinde elde edilen deneysel bulgularla karşılaştırılarak doğrulamalar yapılmıştır.

Bu çalışma sonucunda elde edilen temel bulgular aşağıda maddeler halinde özetlenmiştir:

- 1) Ilık hidromekanik derin çekme prosesinin sonlu eleman modelinin oluşturulması sırasında kullanılan eleman formülasyonu olarak deformasyona uğrayan sac için tam integrasyonlu kabuk (kalınlık boyunca 7 integrasyon noktalı) elemanların, rijit kabul edilen parçalar için ise 3 integrasyonlu Belytschko-Tsay kabuk elemanların kullanılmasının uygun olduğu tespit edilmiştir.
- 2) Sürtünme davranışını en iyi yansıtan sürtünme algoritması olarak “Forming One Way Surface to Surface” belirlenmiştir.
- 3) Coulomb sürtünme katsayıları sac-kalıp, sac-baskı plakası ve sac-zımba sürtünme yüzeyleri için sırasıyla 0.05, 0.05, 0.25 olarak belirlenmiştir.
- 4) AA 5754-O malzemesi için tercih edilen Johnson-Cook malzeme modelinin düşük sıcaklıklarda malzeme davranışını başarılı bir şekilde yansıtırken yüksek sıcaklıklarda deneysel verilerden saptığı gözlemlenmiştir. Kullanılan bir diğer malzeme modeli olan elastik viskoplastik termal malzeme modeli ise hem düşük hem yüksek sıcaklıklarda malzemenin fiziksel davranışını başarılı bir şekilde yansıtmıştır.

- 5) Proses için minimum incelmeyi veren sıcaklık optimizasyonu gerçekleştirilerek kalıp ve zimbaya atanması gereken optimum sıcaklık değerleri zimba için 25 °C, baskı plakası ve kalıp için 300 °C olarak belirlenmiştir.
- 6) Bu şekillendirme prosesi için optimum yükleme profillerinden sıvı basıncı profili için uyumlanan Gompertz 3 parametre fonksiyonun katsayıları $a = 30$, $b = -6.318$ ve $x_0 = 24.685$ olarak belirlenmiştir.

4. ÖNERİLER

Ilık hidromekanik derin çekme prosesi geliştirilmeye müsait olan ve hafif metallerin şekillendirilmesinde önemli avantajlar sağlayan bir yöntemdir. Bu yüzden, bu konudaki çalışmaların devamında aşağıdaki hususların incelenmesi yöntemin daha da iyi anlaşılması açısından faydalı olacaktır:

- 1) Malzemenin farklı sıcaklıklardaki gerilme-birim şekil değiştirme diyagramları çekme testlerinden elde edilmiştir. Bu verilerin hidrolik şişirme (hydraulic bulge) testi ile elde edilen gerilme-birim şekil değiştirme diyagramları karşılaştırması yapılabilir ve sonuçlara etkisi incelenebilir.
- 2) Yükleme profillerinin optimizasyonu yerine mevcut deney düzeneği veya hidroşekillendirme makinesi ile maksimum çekilebilir sac (iş parçası) çapı belirlenebilir.
- 3) Malzemelerde anizotropi özellikleri etkisi göz önüne alınarak şekillendirme parametreleri için optimizasyon yapılabilir.
- 4) AA 5754-O malzemesinin yanı sıra otomotiv sektöründe kullanılan veya kullanılması öngörülen diğer alüminyum ve magnezyum gibi hafif metal alaşımlarının ılık hidromekanik derin çekme işlemleri benzer yöntemlerle incelenebilir ve bu çalışmada kullanılan yöntemler vb . ile proses optimize edilebilir.
- 5) Farklı sıcaklıklarda şekillendirme sınır diyagramları (FLD) elde edilip bu eğrilerin doğruluğu deneysel ve sayısal olarak kontrol edilebilir.
- 6) Geri yaylanmanın (springback) sonuçlara etkisi incelenebilir.
- 7) Malzemenin birim şekil değiştirme hızı etkisi dikkate alınarak optimum birim şekil değiştirme hızı tespit edilebilir.

5. KAYNAKLAR

1. Merrill, K.R., The Oil Crisis of 1973-1974: A Brief History with Documents, First Edition. Bedford Series in History & Culture, Bedford/St. Martin's, 2007.
2. Carpenter, J. The FreedomCAR Challenge and Steel, American Iron and Steel Institute, Great Designs in Steel Seminar, Livonia MI, Feb, 96-111, 2004.
3. Petrol Piyasası Sektör Raporu, T.C. Enerji Piyasası Düzenleme Kurulu, Petrol Piyasası Dairesi Başkanlığı, Ankara, 2013.
4. Koç, M., Hydroforming for Advanced Manufacturing, Woodhead Publishing Ltd., Cambridge England, 2008.
5. Schultz, R.A. Aluminum for Light Weight Vehicles: an Objective Look at the Next Ten to Twenty Years, Metal Bulletin 14th International Aluminum Conference, 1999.
6. Hirsch, J. Automotive Trends in Aluminium-The European Perspective, Materials Forum, 28, (2004), 15-23.
7. Mildenberger, U. ve Khare, A., Planning for an Environment-friendly Car, Technovation, 20 (2000) 205-214.
8. Powers, W.F., Automotive Materials in the 21st Century, Advanced Materials and Processes, 157 (2000) 38-42.
9. Davis, S.C., Diegel, S.W. ve Boundy, R.G., Transportation energy data book: Edition 23, United States, 2003.
10. Finch, D.M., Wilson, S.P. ve Dorn, J.E., Deep-drawing aluminum alloys at elevated temperatures, ASM Transactions, 36 (1946) 254-289.
11. Finch, D.M., Wilson, S.P. ve Dorn, J.E., Deep Drawing Aluminum Alloys at Elevated Temperatures: Part II. Deep Drawing Boxes, ASM Transactions, 36 (1946) 290-310.
12. Shehata, F., Painter, M.J. ve Pearce, R., Warm forming of aluminium/magnesium alloy sheet, Journal of Mechanical Working Technology, 2 (1978) 279-290.
13. Schmoeckel, D., Liebler, B. ve Speck, F., TemperaturgefüÈhrter StofffluÈ beim Tiefziehen von Al-Blech È Grundlagen und Modellversuche, BaÈnder Bleche Rohre, 36 (1995) 14-21.

14. Schmoeckel, D., Liebler, B. ve Speck, F., TemperaturgefuÈhrter Stofffluû beim Tiefziehen von Al-Blech Ð Grundlagen und Modellversuche, BaÈnder Bleche Rohre, 36 (1995) 24-27.
15. Doege, E., Dröder, K. ve Jansen, S., Leichtbau mit magnesiumknetlegierungen, Werk-stattstechnik, 88 (1999) 465-468.
16. Novotny, S. ve Geiger, M., Process Design for Hydroforming of Lightweight Metal Sheets at Elevated Temperatures, Journal of Materials Processing Technology, 138 (2003) 594-599.
17. Shah, M.K., Material Characterization and Forming of Light Weight Alloys at Elevated Temperature, Master Thesis, The Ohio State University, 2011.
18. Bobbert, S., Novotny, S., Vahl, M. ve Geiger, M., Process strategies for sheet metal hydroforming of lightweight components, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 215 (2001) 967-976.
19. Groover, M.P., Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials Processes, and Systems. John Wiley & Sons, United States, 2007.
20. Şenalp, A.Z., Pekleşme Karakteristiğini Etkileyen Faktörler, Metal Şekillendirme ve Plastisite Teorisi, in Mechanical Engineering Department, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, 2009.
21. Reddy, L.K., Principles of Engineering Metallurgy, New Age International, New Delhi, 2007.
22. Li, D. ve Ghosh, A.K., Biaxial Warm Forming Behavior of Aluminum Sheet Alloys, Journal of Materials Processing Technology, 145 (2004) 281-293.
23. Groche, P., Huber, R., J. D. ve Schmoeckel, D., Hydromechanical Deep Drawing of Aluminum Alloys at Elevated Temperatures, Manufacturing Technologies, 51 (2002) 215-218.
24. Neugebauer, R., Altan, T., Geiger, M., Kleiner, M. ve Sterzing, A., Sheet Metal Forming at Elevated Temperatures, CIRP Annals - Manufacturing Technology, 55 (2006) 793-816.
25. Wagener, H.-W. ve Hosse-Hartmann, J., Zum Tiefziehen von Magnesium-Blech, Blech Rohre Profile, 48 (2001) 28-34.
26. Kurz, G., Heated Hydro-Mechanical Deep Drawing of Magnesium Sheet Metal, Essential Readings in Magnesium Technology, (2004) 389-393.

27. Gray, J.E., Devereaux, A.P. ve Parker, W.M., Apparatus for making wrought metal T's., 1940, US Patent 2203868.
28. Dohmann, F. ve Bieling, P., Theoretical basis and applications of high pressure forming, Bleche Rohre Profile, 38 (1991) 379-385.
29. Koç, M. ve Altan, T., An overall review of the tube hydroforming (THF) technology, Journal of Materials Processing Technology, 108 (2001) 384-393.
30. Grey, J.E., Devereaux, A.P. ve Parker, W.N., Apparatus for Making Wrought Metal T's, U.P. 2, Editor, 2203868.
31. Schmoeckel, D., Hielscher, C., Huber, R. ve Geiger, M., Metal Forming of Tubes and Sheets with Liquid and Other Flexible Media, CIRP Annals - Manufacturing Technology, 48 (1999) 497-513.
32. Aust, M., Modified Hydromechanical Deep-Drawing, Hydroforming of Tubes, Extrusions and Sheet Metals, 2 (2001) 215-234.
33. Siegert, K., Häussermann, M., Lösch, B. ve Rieger, R., Recent Developments in Hydroforming Technology, Journal of Materials Processing Technology, 98 (2000) 251-258.
34. Choi, H., Koç, M. ve Ni, J., Determination of Optimal Loading Profiles in Warm Hydroforming of Lightweight Materials, Journal of Materials Processing Technology, 190 (2007) 230-242.
35. Choi, H., Koç, M. ve Ni, J., A Study on the Analytical Modeling for Warm Hydro-mechanical Deep Drawing of Lightweight Materials, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 47 (2007) 1752-1766.
36. Koç, M., Agcayazi, A. ve Carsley, J., An Experimental Study on Robustness and Process Capability of the Warm Hydroforming Process, Journal of Manufacturing Science and Engineering, 133 (2011) 021008.
37. Xu, Y., Kang, D. ve Zhang, S., Investigation of SUS 304 Stainless Steel with Warm Hydro-mechanical Deep Drawing, Journal of Materials Science & Technology, 20 (2004) 92-93.
38. Siegert, K. ve Jäger, S., Warm forming of Magnesium Sheet Metal, SAE Technical Paper, October, 2004.
39. Önder, I.E. ve Tekkaya, A.E. Comparison of Conventional Deep Drawing, Hydromechanical Deep-drawing and High Pressure Sheet Metal Forming by Numerical Experiments, NUMISHEET 2005: Proceedings of the 6th International

Conference and Workshop on Numerical Simulation of 3 D Sheet Metal Forming Processes; Part A, 2005, 563-568.

40. Bolt, P., Lamboo, N. ve Rozier, P., Feasibility of Warm Drawing of Aluminium Products, Journal of Materials Processing Technology, 115 (2001) 118-121.
41. Choi, H., A Study on Warm Hydroforming of Lightweight Sheet Materials- Process Optimization, PhD. Dissertation, The University of Michigan, 2006.
42. Thiruvarudchelvan, S. ve Travis, F.W., Hydraulic-pressure-enhanced cup-drawing processes—an appraisal, Journal of Materials Processing Technology, 140 (2003) 70-75.
43. Zhang, S.H. ve Danckert, J., Development of hydro-mechanical deep drawing, Journal of Materials Processing Technology, 83 (1998) 14-25.
44. Gedikli, H., Cora, Ö.N. ve Koç, M., Parametric Investigation of Circular and Elliptical Bulge Tests in Warm Hydroforming Process for AA5754-O Sheet, Key Engineering Materials, 473 (2011) 594-601.
45. Gedikli, H., Cora, Ö.N. ve Koç, M., Comparative Investigations on Numerical Modeling for Warm Hydroforming of AA5754-O Aluminum Sheet Alloy, Materials & Design, 32 (2011) 2650-2662.
46. Abedrabbo, N., Pourboghra, F. ve Carsley, J.E. Warm Forming of Aluminum Alloys using a Coupled Thermo-Mechanical Anisotropic Material Model, AIP Conference Proceedings, 2005, IOP Institute of Physics Publishing Ltd., 635-640.
47. Halkaci, M., Turkoz, M., Dilmec, M., Halkaci, H. ve Daghan, B. Increasing the Limiting Drawing Ratio of AA 5754 Aluminum Sheet by Hydromechanical Deep Drawing Process, Proc. 10th International Conference Technology Plasticity (ICTP 2011), Aachen, Germany, 2011, 472-476.
48. Mahabunphachai, S., Koc, M. ve Carsley, J.E., Investigations on Deformation Behavior of AA5754 Sheet Alloy Under Warm Hydroforming Conditions, Journal of Manufacturing Science and Engineering, 133 (2011) 051007.
49. Mahabunphachai, S., Koç, M., Investigations on Forming of Aluminum 5052 and 6061 Sheet Alloys at Warm Temperatures, Materials & Design, 31 (2010) 2422-2434.
50. Choi, H., Koç, M. ve Ni, J., A Study on Warm Hydroforming of Al and Mg Sheet Materials: Mechanism and Proper Temperature Conditions, Journal of Manufacturing Science and Engineering, 130 (2008) 1752-1766.

51. Shulkin, L.B., Posteraro, R.A., Ahmetoglu, M.A., Kinzel, G.L. ve Altan, T., Blank holder force (BHF) control in viscous pressure forming (VPF) of sheet metal, Journal of Materials Processing Technology, 98 (2000) 7-16.
52. Altan, T., Tube and sheet hydroforming - new development in equipment, tooling and process simulation, in 2nd Annual North American Hydroforming Conference, Sempember, 2004, Ontario, Canada.
53. Wowk, D.L., Effects of Prestrain on the Strain Rate Sensitivity of AA5754 Sheet, PhD. Dissertation, Queen's University Kingston, Ontario, Canada, 2008.
54. Hosford, W.F. ve Caddell, R.M., Metal Forming. Prentice Hall, 1993.
55. Ayres, R.A., Alloying Aluminum with Magnesium for Ductility at Warm Temperatures (25 to 250 C), Metallurgical Transactions A, 10 (1979) 849-854.
56. Li, D. ve Ghosh, A., Tensile Deformation Behavior of Aluminum Alloys at Warm Forming Temperatures, Materials Science and Engineering: A, 352 (2003) 279-286.
57. Abedrabbo, N., Pourboghrat, F. ve Carsley, J., Forming of AA5182-O and AA5754-O at Elevated Temperatures Using Coupled Thermo-mechanical Finite Element Models, International Journal of Plasticity, 23 (2007) 841-875.
58. Abedrabbo, N., Pourboghrat, F. ve Carsley, J., Forming of Aluminum Alloys at Elevated Temperatures–Part 1: Material Characterization, International Journal of Plasticity, 22 (2006) 314-341.
59. Intarakumthornchai, T., Jirathearant, S., Thongprasert, S. ve Dechaumphai, P., FEA-Based Optimization of Blank Holder Force and Pressure for Hydromechanical Deep Drawing of Parabolic Cup using Greedy Search and RSM Methods, Engineering Journal, 14 (2010) 15-32.
60. Hu, W., Yao, L.G. ve Hua, Z.Z., Optimization of Sheet Metal Forming Processes by Adaptive Response Surface Based on Intelligent Sampling Method, Journal of Materials Processing Technology, 197 (2008) 77-88.
61. Jansson, T., Andersson, A. ve Nilsson, L., Optimization of Draw-in for an Automotive Sheet Metal Part: An Evaluation Using Surrogate Models and Response Surfaces, Journal of Materials Processing Technology, 159 (2005) 426-434.
62. Maker, B.N. ve Zhu, X., Input Parameters for Metal Forming Simulation Using LS-DYNA, Livermore Software Technology Corporation, 4 (2000) 43-46.

63. Liu, S.C. ve Hu, S.J., Variation Simulation for Deformable Sheet Metal Assemblies Using Finite Element Methods, Journal of Manufacturing Science and Engineering, 119 (1997) 368-374.
64. Koç, M., Mahabunphachai, S. ve Billur, E., Forming Characteristics of Austenitic Stainless Steel Sheet Alloys Under Warm Hydroforming Conditions, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 56 (2011) 97-113.
65. Narasimhan, N. ve Lovell, M., Predicting Springback in Sheet Metal Forming: An Explicit to Implicit Sequential Solution Procedure, Finite Elements in Analysis and Design, 33 (1999) 29-42.
66. Filice, L., Fratini, L. ve Micari, F., Analysis of Material Formability in Incremental Forming, CIRP Annals - Manufacturing Technology, 51 (2002) 199-202.
67. Asgari, S.A., Pereira, M., Rolfe, B.F., Dingle, M. ve Hodgson, P.D., Statistical Analysis of Finite Element Modeling in Sheet Metal Forming and Springback Analysis, Journal of Materials Processing Technology, 203 (2008) 129-136.
68. Wang, Y., Shen, Q., Wang, Y. ve Zhang, Y., Research on Applying One-Step Simulation to Blank Design in Sheet Metal Forming, Journal of Materials Processing Technology, 120 (2002) 111-114.
69. Huang, Y., Lo, Z.Y. ve Du, R., Minimization of the Thickness Variation in Multi-Step Sheet Metal Stamping, Journal of Materials Processing Technology, 177 (2006) 84-86.
70. Park, J.-J. ve Kim, Y.-H., Fundamental Studies on the Incremental Sheet Metal Forming Technique, Journal of Materials Processing Technology, 140 (2003) 447-453.
71. Kim, Y.H. ve Park, J.J., Effect of Process Parameters on Formability in Incremental Forming of Sheet Metal, Journal of Materials Processing Technology, 130-131 (2002) 42-46.
72. Gantar, G., Pepelnjak, T. ve Kuzman, K., Optimization of Sheet Metal Forming Processes by the Use of Numerical Simulations, Journal of Materials Processing Technology, 130-131 (2002) 54-59.
73. Kubli, W. ve Reissner, J., Optimization of Sheet-Metal Forming Processes Using the Special-Purpose Program AUTOFORM, Journal of Materials Processing Technology, 50 (1995) 292-305.
74. Tekkaya, A.E., State-of-the-art of Simulation of Sheet Metal Forming, Journal of Materials Processing Technology, 103 (2000) 14-22.

75. Hallquist, J.O. ve Manual, L.-D.T., Livermore Software Technology Corporation, Livermore, CA, (1998).
76. <http://en.wikipedia.org/wiki/LS-DYNA12>, Eylül 2014.
77. Gümrük, R., Şekil Verme İşleminin Çarpma Performansına Etkilerinin Sonlu elemanlar Yöntemi ile İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Technical University, Trabzon, 2006.
78. Standard, A., Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials, Annual Book of ASTM Standards, 2004.
79. Türköz, M., Halkacı, H.S. ve Koç, M., The Effect of Temperature and Strain-Rate Sensitivity on Formability of AA 5754, Applied Mechanics and Materials, 217 (2012) 1596-1601.
80. Kaya, S., Altan, T., Groche, P. ve Klöpsch, C., Determination of the Flow Stress of Magnesium AZ31-O Sheet at Elevated Temperatures Using the Hydraulic Bulge Test, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 48 (2008) 550-557.
81. Billur, E. ve Koç, M. A Comparative Study on Hydraulic Bulge Testing and Analysis Methods, ASME 2008 International Manufacturing Science and Engineering Conference collocated with the 3rd JSME/ASME International Conference on Materials and Processing, October, 2008, American Society of Mechanical Engineers, 59-65.
82. Şükür, E.F., AL 5754 Sac Malzemenin Ilık Sıcaklıklardaki Akma Eğrilerinin Şişirme Deneyiyle Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Konya, 2014.
83. Koç, M., Billur, E. ve Cora, Ö.N., An Experimental Study on the Comparative Assessment of Hydraulic Bulge Test Analysis Methods, Materials & Design, 32 (2011) 272-281.
84. Edelsbrunner, H., Geometry and Topology for Mesh Generation. Cambridge University Press, 2001.
85. Frey, P. ve George, P.-L., Mesh Generation: Application to Finite Elements. Hermes Science, 2000.
86. Brancheau, J., E, Practical Aspects of Finite Element Simulation: A Study Guide. Altair Company, 2014.
87. Zienkiewicz, O.C. ve Taylor, R.L., The Finite Element Method, 5th. Butterworth-heinemann, 1, The Basis. 2000.

88. Moaveni, S., Finite Element Analysis: Theory and Application with ANSYS. Pearson Education, India, 2003.
89. Hallquist, J.O., LS-DYNA Keyword User's Manual, Livermore Software Technology Corporation, 970 (2007).
90. Zampaloni, M., Abedrabbo, N. ve Pourboghrat, F., Experimental and Numerical Study of Stamp Hydroforming of Sheet Metals, International Journal of Mechanical sciences, 45 (2003) 1815-1848.
91. Shapiro, A., Finite element modeling of hot stamping, Steel Research International, 80 (2009) 658-664.
92. Meyers, M.A., Dynamic Behavior of Materials. John Wiley & Sons, United States, 1994.
93. Johnson, G.R. ve Cook, W.H. A Constitutive Model and Data for Metals Subjected to Large Strains, High Strain Rates and High Temperatures, Proceedings of the 7th International Symposium on Ballistics, April, 1983, The Netherlands, 541-547.
94. Johnson, G.R. ve Cook, W.H., Fracture Characteristics of Three Metals Subjected to Various Strains, Strain Rates, Temperatures and Pressures, Engineering Fracture Mechanics, 21 (1985) 31-48.
95. Smerd, R.O., Constitutive Behavior of Aluminum Alloy Sheet at High Strain Rates, Master Thesis, University of Waterloo, Waterloo, Ontario, Canada, 2005.
96. Hu, X., Wagoner, R., Daehn, G. ve Ghosh, S., The effect of inertia on tensile ductility, Metallurgical and Materials Transactions A, 25 (1994) 2723-2735.
97. Güden, M., Kılıçaslan, C., Çakırcalı, M., Kıranlı, E., Shchukin, V.Y. ve Petronko, V.V., Cross wedge rolling of a Ti6Al4V (ELI) alloy: the experimental studies and the finite element simulation of the deformation and failure, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 65 (2012) 1273-1287.
98. Dorogoy, A. ve Rittel, D., Determination of the Johnson–Cook Material Parameters Using the SCS Specimen, Experimental Mechanics, 49 (2009) 881-885.
99. Calamaz, M., Coupard, D. ve Girod, F., A new material model for 2D numerical simulation of serrated chip formation when machining titanium alloy Ti–6Al–4V, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 48 (2008) 275-288.
100. Hallquist, J.O., LS-DYNA Theory Manual, Livermore Software Technology Corporation, 3 (2006).

101. Kaya, S., Improving the Formability Limits of Lightweight Metal Alloy Sheet Using Advanced Processes: Finite Element Modeling and Experimental Validation, PhD Dissertation, The Ohio State University, 2008.
102. Yeo, S., Kurnia, W. ve Tan, P., Electro-thermal Modelling of Anode and Cathode in Micro-EDM, Journal of Physics D: Applied Physics, 40 (2007) 2513.
103. <http://www.engineeringtoolbox.com>, 16 Ağustos 2014.
104. Winklhofer, J., Trattnig, G., Lind, C., Sommitsch, C., Feuerhuber, H., Barlat, F., Moon, Y. ve Lee, M. Process Simulation of Aluminium Sheet Metal Deep Drawing at Elevated Temperatures, AIP Conference Proceedings, Jun, 2010, 927-934.
105. Pawlus, W., Robbersmyr, K.G. ve Karimi, H.R., Performance evaluation of feed forward neural networks for modeling a vehicle to pole central collision, Recent researches in geography, geology, energy, environment and biomedicine. WSEAS Press, Corfu Island, July, 2011, 467-472.

ÖZGEÇMİŞ

Doğan ACAR, 1984 yılında Muđla’da doğdu. Ortaöđrenimini Milas Anadolu Lisesi’nde tamamladı. 2004 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü’nü kazandı. Buradaki eğitimini tamamladıktan sonra askeri hizmetini yedek subay olarak Elazığ 54. Bakım Merkez Komutanlığı’nda yaptı. 2012 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim dalında yüksek lisans öğrenimine başladı. Yüksek lisans öğrenimi ile eş zamanlı olarak 1 yıl süreyle Çolakođlu Makine ve Mühendislik (Trabzon) firmasında Kalite Kontrol ve İmalat Sorumlusu olarak görev yaptıktan sonra 1 yıl süreyle de 112M913 nolu TÜBİTAK projesinde tam zamanlı bursiyer olarak çalıştı. Mart 2014’te Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsüne araştırma görevlisi olarak atandı. Halen aynı göreviyle birlikte projedeki çalışmalarına devam etmektedir. Doğan ACAR İngilizce bilmektedir.