



**ÇELİK BORULARDA HİDROLİK
ŞEKİLLENDİRME DAVRANIŞININ
DENEYSEL VE NUMERİK OLARAK
İNCELENMESİ**

Rıza MARANGOZ

Yüksek Lisans Tezi

**Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Dr. Öğr. Üyesi S.Özmen ERUSLU
İkinci Danışman: Dr. Öğr. Üyesi İ. Savaş DALMIŞ
2019**

T.C.
TEKİRDAĞ NAMIK KEMAL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**ÇELİK BORULARDA HİDROLİK ŞEKİLLENDİRME DAVRANIŞININ
DENEYSEL VE NUMERİK OLARAK İNCELENMESİ**

Rıza MARANGOZ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMAN: Dr. Öğr. Üyesi S.Özmen ERUSLU
İkinci Danışman: Dr. Öğr. Üyesi İ. Savaş DALMIŞ

TEKİRDAĞ-2019

Her hakkı saklıdır.



Bu tezde görsel, işitsel ve yazılı biçimde sunulan tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uyularak tarafımdan elde edildiğini, tez içinde yer alan ancak bu çalışmaya özgü olmayan tüm sonuç ve bilgileri tezde eksiksiz biçimde kaynak göstererek belirttiğimi beyan ederim.

Rıza MARANGOZ

İMZA

Dr. Öğr. Üyesi S.Özmen ERUSLU ve Dr. Öğr. Üyesi İbrahim Savaş DALMIŞ danışmanlığında, Rıza MARANGOZ tarafından hazırlanan “Çelik Borularda Hidrolik Şekillendirme Davranışının Deneysel Ve Numerik Olarak İncelenmesi” başlıklı bu çalışma aşağıdaki jüri tarafından 25.12.2019 tarihinde Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans tezi olarak oy birliği ile kabul edilmiştir.

Jüri Başkanı : Prof. Dr. Serdar Osman YILMAZ

İmza:

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Sait Özmen ERUSLU

İmza:

Üye : Dr. Öğr. Üyesi İbrahim Savaş DALMIŞ

İmza:

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Vedat TAŞKIN

İmza:

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Olcay EKŞİ

İmza:

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu adına

Doç. Dr. Bahar UYMAZ
Enstitü Müdürü

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

ÇELİK BORULARDA HİDROLİK ŞEKİLLENDİRME DAVRANIŞININ DENEYSEL VE NUMERİK OLARAK İNCELENMESİ

Rıza MARANGOZ

Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi S. Özmen ERUSLU

Bu çalışmada egzoz bağlantı sistemlerinde kullanılan bağlantı ekipmanları hidrolik şişirme yöntemi ile üretilmiştir. Malzeme olarak aluzink kaplanmış düşük karbonlu çelik kullanılmıştır. Çalışmada hidrolik şişirme ile üretilmiş bağlantı parçasının deformasyon özellikleri incelenmiştir. Hidrolik şişirme ünitesi dizayn parametrelerinin etkileri sonlu elemanlar analizi (Ansys LsDyna) kullanılarak incelenmiştir. Çalışmada basınç artış hızı, basınçlandırılmış bölge uzunluğunun etkisi, artık gerilmelerin etkisi ve elastik geri gelmelerin etkisi incelenmiştir. Deneylerden elde edilen minimum kalınlık değerleri sonlu elemanlar analizi ile karşılaştırılmıştır. İncelme etkileri, artan basınca bağlı olarak deformasyon etkileri ortaya konulmuştur. Deformasyon sertliği etkileri sonlu elemanlar malzeme modeline eklenmiştir. Tüp parçalarının hasarı şekillendirme sınır eğrileri diyagramında Hill-Swift kriterlerine göre değerlendirilmiştir. Bağlantı ekipmanlarının deformasyon karakteristikleri ayrıca elektron mikroskopu görüntüleri ve mikro vickers sertlik ölçümleri ile incelenmiştir. Hidrolik şişirmeyle üretilmiş numunelerde plastik genlemenin ve sertliğin en yüksek değeri form verilen bölgenin orta kısımlarında elde edilmiştir. Bu bölgede maksimum çekme artık gerilmeleri ve en yüksek cidar incelmesi belirlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Egzoz Borusu Konektörü, Hidrolik Şekillendirme, Deformasyon Sertleşmesi, Artık Gerilmeler, Elastik Geri Gelme Etkileri.

ABSTRACT

MSc. Thesis

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL INVESTIGATION OF STEEL PIPES FORMABILITY WITH HYDROFORMING

Rıza MARANGOZ

Tekirdağ Namık Kemal University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Dr. Sait Özmen ERUSLU

In this work exhaust pipe clamp adaptors are produced by hydrobulge forming. Aluzinc coated low carbon steel pipes are used in forming. Deformation behaviors of galvalume exhaust pipe connectors at the hydrobulge process are studied. The effects of design parameters on hydrobulge process is analysed by using explicit type finite element analysis (Ansys LsDyna). Pressure rate, unconstraint length, residual stresses, and spring back effect are considered in the analysis. Minimum thickness values obtained from the experiments are compared with finite element analysis (Fem). Relation between percentage of thinning and increasing pressure is studied. Strain hardening effects of galvalume cold-formed steel are implemented to Fem study. Failure of tubular parts is evaluated at forming limit diagram according to Hill- Swift criteria. The deformation characteristics of the produced connector headings are also discussed by scanning electron microscopy and microvickers hardening measurements. Maximum plastic strains and hardness are obtained at the middle of the form at the hydrobulge process. The ultimate tensile residual stresses and thickness reduction are determined at this region.

Keywords: Exhaust Pipe Connector, Hydroforming, Strain hardening effects, Residual Stress, Spring back effect

2019, 54 pages

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT	ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
ÇİZELGE DİZİNİ.....	vii
SİMGELER ve KISALTMALAR.....	viii
TEŞEKKÜR.....	x
1. GİRİŞ.....	1
2. KAYNAK ÖZETLERİ.....	4
2.1. Tüp Hidrolik Şekillendirme	6
2.2. Tüp Hidrolik Şekillendirme Sınıflandırmaları.....	6
2.2.1. Hidrolik Şişirme.....	6
2.2.2. Eksenel Kuvvet ve Basınçla Şişirme	7
2.2.3. T ve Y Şeklinde Tüp Parçaların Üretimi	8
2.3. Tüp Hidrolik Şekillendirme Uygulamalarında Hasar Durumları	8
2.3.1. Cidar İncelmesi:.....	8
2.3.2. Burkulma	9
2.3.3. Katlanma.....	9
2.3.4. Yırtılma.....	10
2.4. Tüp Hidrolik Şekillendirme İşleminin Otomotiv Parçalarında Basamakları	10
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	12
3.1. Tüp Hidrolik Şekillendirme Sistemi	12
3.2. Otomotiv Sektöründe Tipik Boru İşleme Yöntemleri ve Hidrolik Şekillendirmeyele Karşılaştırılması	14
3.3. Malzeme Özelliklerinin Belirlenmesi.....	16
3.4. Sonlu Elemanlar Modelleme	19
3.5. Dizayn Parametrelerinin Belirlenmesi.....	23
3.6. Hasar Durumunun Şekillendirme Sınır Eğrileri Hesaplamalarıyla İncelenmesi	30
4. ARAŞTIRMA BULGULARI.....	33
4.1. Deneysel Sonuçlar	33
4.2. Mikro Yapı İncelemesi	36
5. SONUÇLAR.....	40
KAYNAKLAR.....	41



ŞEKİL DİZİNİ

Şekil 1. 1. Derin çekme işleminde oluşan çizikler	12
Şekil 2. 1. a) Hidrolik şekillendirme işlemi ile oluşan egzoz, b) Kaynaklı birleştirme ile oluşan egzoz	6
Şekil 2. 2. Hidrolik şişirme ile hidrolik şekil verme.....	7
Şekil 2. 3. Eksenel kuvvet ve basınçla hidrolik şekil verme	7
Şekil 2. 4. a) Hidrolik şekillendirme işlemi ile oluşan Y tipi boru, b) Hidrolik şekillendirme işlemi ile oluşan T tipi boru [30].	8
Şekil 2. 5. Tüp hidrolik şekillendirme uygulamalarında burkulma hata türü [31].	9
Şekil 2. 6. Tüp hidrolik şekillendirme uygulamalarında katlanma hata türü [31].	9
Şekil 2. 7. Tüp hidrolik şekillendirme uygulamalarında yırtılma hata türü	20
Şekil 2. 8. Tüp hidrolik şekillendirme öncesi parçalara uygulanan ön işlemler [30].	11
Şekil 2. 9. Tüp hidrolik şekillendirme a) Kesit resmi b) Bitmiş tüp boru	13
Şekil 3. 1. Hidrolik şekillendirme deney düzeneği a) Kesit resmin b) İmalat resmi.....	13
Şekil 3. 2. Tüp hidrolik şekillendirme sistemi.....	13
Şekil 3. 3. Krave ve Vults örneği.....	14
Şekil 3. 4. Vultz açma kalıbın detayları.....	15
Şekil 3. 5. Kelepçe	15
Şekil 3. 6. a) Üretilmiş Vultz b) Kesit Görüntüsü	16
Şekil 3. 7. Aluzink kaplamalı çelik saçlarda gerilme genleme değerlerinin değişimi.....	17
Şekil 3. 8. Hidrolik şişirme ünitesi sınır koşulları	29
Şekil 3. 9. Kritik zaman analizi	21
Şekil 3. 10. Analizlerde ortaya çıkan enerji değişimleri.....	21
Şekil 3. 11. Kabuk elemanlarda mesh hassasiyet analizi	22
Şekil 3. 12. Hidrolik şişirme ünitesi sonlu elemanlar modeli.....	23
Şekil 3. 13. Hidrolik şişirme yönteminde basınçlandırma bölgesi	24
Şekil 3. 14. Sonlu elemanlar analizinde basınç artış hızının şekil değiştirme sonuçlarına etkisi (P=50MPa)	26
Şekil 3. 15. Sonlu elemanlar analizinde basınçlandırma mesafesinin şekil değiştirme sonuçlarına etkisi (P=50 MPa)	26
Şekil 3. 16. Deformasyon sonuçları a) Plastik genleme ve b)Total şekil değiştirme sonuçları (P=65 MPa)	27
Şekil 3. 17. Von Mises artık gerilme sonuçları (P=65Mpa).....	27
Şekil 3. 18. Asal artık gerilme sonuçları (P=65 MPa).....	28
Şekil 3. 19. Sonlu elemanlar analizinde elastik geri gelme sonuçları (Basınçlandırma bölgesi x=90mm)	39
Şekil 3. 20. Sonlu elemanlar analizinde elastik geri gelme sonuçları (Basınçlandırma bölgesi x=80mm)	39
Şekil 3. 21. DX54D Çelik saçlarda şekillendirme sınır eğrileri	32
Şekil 4. 1. Form değişim eğrileri (500Bar Hidrolik İç basınç).....	33
Şekil 4. 2. Form değişim eğrileri (550Bar Hidrolik İç basınç).....	34
Şekil 4. 3. Form değişim eğrileri (650Bar Hidrolik İç basınç).....	34
Şekil 4. 4. Mikro vikers sertlik ölçüm noktaları	36
Şekil 4. 5. Micro Vikers (HV0.1) Sertlik Değerleri	47

Şekil 4. 6. Kaplama bölgesi görüntüsü (Ölçüm noktası 2) 550MPa hidrolik iç basınç altında (2000 x SEM)	48
Şekil 4. 7. Kaplama bölgesi görüntüsü (Ölçüm noktası 1) 550MPa hidrolik iç basınç altında (2000 x SEM)	48
Şekil 4. 8. Kaplama bölgesi görüntüsü (Ölçüm noktası 1) 650MPa hidrolik iç basınç altında (4000 x SEM)	49



ÇİZELGE DİZİNİ

Çizelge 3. 1. Aluzink saçların mekanik özellikleri	17
Çizelge 3. 2. Dizayn parametrelerinin sonlu elemanlar analiz (SEA) sonuçlarına etkisi.....	25
Çizelge 3.3. Hidrolik şişirme ünitesinde kullanılan dizayn parametreleri	31
Çizelge 4. 1. Hidrolik şekillendirmeyeyle form verilmiş numunelerde deformasyon oranları.....	35
Çizelge 4. 2. Hidrolik şekillendirmeyeyle form verilmiş numunelerde kalınlık değişimleri.....	35



SİMGELER VE KISALTMALAR

EN 10246 DX54D	: Avrupa standartlarında düşük karbonlu Aluzink kaplamalı çelik saclar.
K	: Mukavemet katsayısı
n	: Deformasyon sertleşmesi katsayısı
R	: Lankford katsayısı
w_0	: Saç numune başlangıç kalınlığı
w	: Saç numune son kalınlığı
l_0	: Saç numune ilk boyu
l	: Saç numune son boyu
σ_E	: Mühendislik gerilmesi
ε_E	: Mühendislik genlemesi
σ_E	: Mühendislik gerilmesi
σ_T	: Gerçek gerilme
ε_T	: Gerçek genleme
σ_r	: Radyal gerilmeler
σ_θ	: Çevresel gerilmeler
m	: sürtünme katsayısı
k	: Kayma dayanımı
x	: Desteklenmemiş basınçlandırma bölgesi
σ_{yp}	: Akma mukavemeti
σ_z	: Eksenel gerilme
p_i	: Tüp içi hidrolik basınç
a	: Tüp iç radüs
b	: Tüp dış radüs
P	: Hidrolik şişirme basıncı
P_r	: Basınç artış hızı
ε_1	: Maksimum genleme

ε_2	: Minimum genleme
α	: Gerilme oranı
ε_{xx}^p	: X yönündeki plastik genleme
ε_{yy}^p	: Y yönündeki plastik genleme
ε_{zz}^p	: Z yönündeki plastik genleme
ε_{xy}^p	: XY yönünde plastik kayma genlemesi
ε_{xz}^p	: XZ yönünde plastik kayma genlemesi
ε_{yz}^p	: YZ yönünde plastik kayma genlemesi
$\hat{\varepsilon}^p$	: Eşdeğer plastik genleme
$\hat{\sigma}$	: Eşdeğer Von Mises akma gerilmesi
σ_{xx}	: X yönündeki normal gerilme
σ_{yy}	: Y yönündeki normal gerilme
σ_{zz}	: Z yönündeki normal gerilme
t_0	: Başlangıç cidar kalınlığı
t_1	: Form verme sonrası cidar kalınlığı

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tezimin her aşamasında bana yardımlarını esirgemeyen değerli hocam Dr. Öğr. Üyesi S.Özmen ERUSLU'ya şükranlarımı sunmayı bir borç bilirim. Araştırmamın analiz kısmında bana yardımlarını esirgemeyen sayın hocalarım Prof. Dr. S.Osman YILMAZ, Dr. Öğr. Üyesi İbrahim Savaş DALMIŞ'a çalışmamın deneysel kısımlarında yardımlarını esirgemeyen sayın hocalarım Arş. Gör. Dr. Kenan ÇINAR ve Araş. Gör. Kenan CAN'a teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca çalışmamın uygulama aşamasında yardımlarını esirgemeyen Dinex çalışanı mesai arkadaşlarıma ve süpervizör Nevzat USLU'ya ve tez çalışmasında deneysel ve görsel destek veren Dinex firmasına teşekkürü bir borç bilirim.

Aralık, 2019

Rıza MARANGOZ
Makine Mühendisi

1. GİRİŞ

Hidrolik basınç altında şekillendirme işlemi, kalıp tarafından sıkıştırılmış içi boş yapıya sahip boru veya sac üzerine yüksek basınçlı akışkan gönderilerek borunun veya sacın cidarlarının kalıbın geometrisine göre genişlemesi ve istenen şekle getirilmesidir.

İşlemde tüp veya sac malzeme kullanılmasından dolayı, tüp şekillendirme prosesine tüp hidrolik şekillendirme, sac şekillendirme prosesine ise sac hidrolik şekillendirme adı verilir.

Birkaç özel üretim yöntemi ile elde edilebilecek bir otomotiv ya da uçak parçası yüksek basınç altında şekillendirme işlemi kullanılarak, bir defada şekillendirilebilir.

Hidrolik şekillendirme işleminde akışkan olarak hidrolik yağ veya bor yağ elastik katı olarak kauçuk veya poliüretan kullanılmaktadır.

Sac metal şekillendirmede en önemli maliyet arttırıcı unsurunun, kalıp tasarımı ve imalat maliyeti olduğu bilinmektedir. Hidrolik şekillendirme sistemi ilk kuruluş için oldukça maliyetlidir. Sıvı basıncıyla şekillendirme yöntemlerinin kullanılmasıyla, basınçlı sıvı dışı ya da erkek kalıbın görevini üstlenerek kalıp sayısını azaltmakta ve kalıp maliyetini düşürmektedir. Sıvı basıncı sac malzemenin yüzeyine eşit basınç yapacağı için sacın incelme tüm sac yüzeyinde aynı olacaktır. Hidrolik şekillendirme ile sac metal parça üzerinde dayanım açısından problem oluşturan kalınlık azalmaları önlenabilmektedir. Derin çekme kalıplarında farklı kalınlıklarda ki saclar için kalıp değişmektedir. Fakat hidrolik şekillendirme işleminde tek kalıp ile farklı kalınlıkta saclar şekillenebilir.

Soğuk şekillendirme yapabilen tüm metaller, alüminyum, pirinç, karbon ve paslanmaz çelik, bakır ve yüksek mukavemetli alaşımlara hidrolik şekillendirme ile şekil verilebilmektedir.

Çoklu pres çevrimi gerektiren karmaşık parçalar tek bir hidrolik şekillendirme döngüsünde üretilebilir. Havacılık, tıbbi ve ticari pişirme kabı uygulamaları çoğu zaman üstün yüzey kalitesi olan parçaları talep eder. Geleneksel şekillendirme yöntemlerinde kalıp ile metal yüzeylerinin şekillendirme esnasında temasından dolayı metal yüzeyde çizikler oluşmaktadır. Hidrolik şekillendirme uygulamalarında kullanılan esnek diyafram yüzey lekelerini ortadan kaldırır, cilalama gibi pahalı son bitirme işlemlerine duyulan ihtiyacı azaltır.



Şekil 1.1. Derin çekme işleminde oluşan çizikler

Yüksek basınç altında metalleri şekillendirme yönteminin diğer üretim yöntemlerine göre üstünlükleri: [1]

- Dişi veya erkek kalıptan birisi kullanıldığı için kalıp maliyetleri ve işçilik masrafları düşüktür.

- Bazı Hidrolik şekillendirme çalışmalarında zımba kullanımına gerek yoktur.

- Parçalar daha hafif, ucuz, dayanıklı, rijit, kaliteli ürünlerdir.

- Ara işlem sayısı azdır.

- Hurda miktarı düşüktür.

- Parçaların yüzey kalitesi yüksek, kalıcı gerilmeler ve geri yaylanma düşüktür.

- Karmaşık şekilli parçalar tek operasyonda üretilebilir.

- Parçanın yüzeyine eşit basınç uygulandığı için noktasal aşırı yüklerin malzeme ve tane yapısına olumsuz etkileri azdır.

Hidrolik şekillendirmeyele üretimin diğer üretim yöntemlerine göre dezavantajları ise;

- Operasyon süresi uzundur.

- Kalıp yüzeyi kalitesi yüksek ve parlak olmalıdır.

- Yüksek basınçlara çıkmak gerekmektedir. (özellikle kalın saclar için).

- Yüksek basınçlarda sızdırmazlık problemleri oluşmaktadır.
- Hidrolik şekillendirme ve kalıp tasarımı için bilgi birikimi gerekmektedir.



2. KAYNAK ÖZETLERİ

İnce/ kalın cidarlı tüplerin ve plastisite teorilerinin gelişimiyle birlikte tüp hidrolik şekillendirmeye ilgili çalışmalarda artış gözlenmiştir [2], [3], [4], [5]. Tüplerin burkulma, lokal katlanma (buruşma) ve patlama davranışlarının ortaya konulmasını sağlayan basit modeller ortaya konulmuştur [3]. Bilgisayar destekli analiz yaklaşımlarının artmasıyla proses optimizasyon aşamaları hızlanmıştır. Özellikle sonlu elemanlar analizi tabanlı çalışmalar hidrolik şekillendirme proseslerinde ki karmaşık yükleme durumunda malzeme davranışını gerçek koşullarıyla incelemeye olanak vermiştir [3].

Hidrolik şişirme prosesleri üzerine yapılan çalışmalar iç basınç yanında saç cidarında dış yüklerin uygulanmasıyla ince cidarlı tüplerde cidar incelleme problemlerinin önüne geçildiğini ortaya koymuştur [6], [7], [8]. Kompleks yapıya sahip tüp parçaların (T ve Y şeklinde) üretimi dış kuvvet destekli kalıplar kullanılarak sağlanmıştır [3], [8], [9].

Metallerin şekil alma davranışını geliştirmek için birçok teknik kullanılmaktadır. Thanakijkasem ve arkadaşları tavlamanın paslanmaz çelik tüplerin hidrolik şekillendirme davranışına etkilerini incelemişlerdir [10].

Lorenzo L. ve arkadaşları, Al6060 tüplerin hidrolik şekillendirme işleminde yerel ısıtılmanın etkilerine odaklanmıştır. [11]. Dong ve arkadaşları ısıtılma işlem ve deformasyon sertleşmesinin Al6061 tüplerin hidrolik şekil alma davranışına etkisini incelemişlerdir [12]. Anderson M. ve arkadaşları, hidrolik şekillendirme uygulamalarında kullanılan paslanmaz çeliklerde gerilme giderme tavlama sürecinin etkilerini incelemişlerdir [13].

Chu G.N. ve arkadaşları düşük basınçlarda hidroforming ile şekillendirilen tüplerde iç basınç elastik geri gelme ilişkisini incelemişlerdir [14].

Tüp hidrolik şekillendirme proseslerinde kalıp geometrisinin, sürtünme katsayısının ve deformasyon sertleşmesinin etkileri literatürde birçok çalışmada ortaya konmuştur [15], [16] [17], [7].

Saç metallerin şekillendirilmesinde hasar bölgelerinin ve emniyetli çalışma limitlerinin belirlenmesinde şekillendirme sınır eğrileri yaklaşımı kullanılmaktadır. Keeler ve arkadaşları bu yaklaşımı ilk kez ortaya atmışlardır [18]. Marciniak ve Kuczynski, bir matematiksel model geliştirerek şekillendirme sınır eğrilerinin teorik olarak tanımlanmasını sağlamıştır [19].

Swift_Hill Swift difüzyon modeli ile Hill lokal destabilizasyon modelini birleştirerek sınır şekillendirme eğrilerini tanımlamışlardır [18], [20].

Son yıllarda sonlu elemanlar analiz yaklaşımları şekillendirme sınır eğrilerinin sayısal analizinde kullanılmaktadır. Çalışmalarda hasar kriterleri kullanılarak sac şekillendirme sırasında oluşacak hasarlar tahmin edilmektedir [21], [22], [23].

Otomotiv egzoz parçalarında yüksek korozyon ve mekanik özellikleri sebebiyle sıcak daldırma yöntemiyle üretilen galvalume (Aluzinc) çelikler kullanılmaktadır. Boyutsal hassasiyet bu tarz çeliklerde çok önemlidir. Kim ve arkadaşları galvanizli ve galvalume tip çeliklerde elastik geri gelme etkisini incelemişlerdir [24]. Rover grup çalışanları tavlınmamış ve kaplamasız çeliklerde hidrolik şekillendirmeye bağlı olarak mekanik özelliklerin değişimini incelemişlerdir [25]. Roger çalışmasında tüp hidrolik şekillendirmenin otomotiv parçalarında kullanımını ayrıntılı bir şekilde ortaya koymuştur [26]. Çalışmasında genlik ve hasar hesaplamalarında şekillendirme sınır eğrileri yaklaşımını kullanmıştır.

Galvanizli çeliklerde çinko kaplamaların hasarı Parisot ve arkadaşları tarafından incelenmiştir [27]. Çalışmalarında tane sınırı hasarı, kayma mekanizmaları ve kaplama hasarlarını elektron mikroskobu kullanarak incelemişlerdir. Venkataraman galvalume çelikler için yaptığı çalışmada faz diyagramlarını kullanarak dentrik ve dentrik olmayan bölgede hasar mekanizmalarını mikro çekme etkisi altında incelemişlerdir [28].

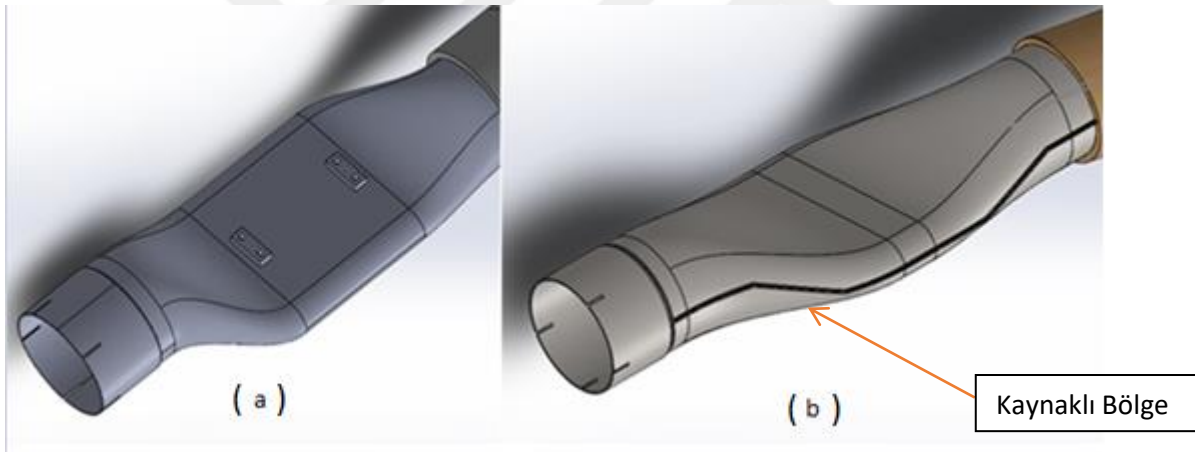
Guo ve arkadaşları Aluzink kaplamalı düşük karbonlu çeliklerde α - Al dentritlerin boyutlarının kaplama korozyonuna etkisini incelemişlerdir [29].

Bu çalışmada galvalume çelikten yapılmış egzoz borusu bağlantı parçalarının hidrolik şekillendirme davranışı incelenmiştir. Çalışmada geleneksel kelepçe adaptör boru şekli seçilmiştir. Bu konektör başlıkları genellikle geleneksel tüp şekillendirme ekipmanlarıyla üretilir. Çalışmada hidrolik şekillendirme prosesi sonlu elemanlar analizi kullanılarak geliştirilmiştir. Hidrolik şekillendirme basıncı, basınç artış oranı, hidrolik basınçlandırma mesafesi, basınç zamanı ve geri yayılma etkileri sonlu elemanlar analiziyle belirlenmiştir. Sonuçlar Swift-Hill kriterlerine göre şekillendirme sınır eğrileri yaklaşımıyla değerlendirildikten sonra optimum hidrolik şekillendirme proses koşulları elde edilmiştir.

2.1. Tüp Hidrolik Şekillendirme

Tüp hidrolik şekillendirme kalıp içerisindeki tüp boruya yüksek basınç ve eksenel kuvvet uygulanarak şekil verme işlemidir. Geleneksel yöntemlerde derin çekme prosesleri kullanılarak iki ayrı sac parça bir araya getirilmekte ve kaynak işlemi uygulanmaktadır. Tüp hidrolik şekillendirme işlemleriyle kaynakların ortadan kaldırılması ve karmaşık şekillerin tek bir kalıp içerisinde üretilmesiyle verimli optimum sonuçlar elde edilir.

Tüp hidrolik şekillendirme ile üretilen parçalar, kaynak kullanılmadan tek parça olarak üretilir. Bu yöntemin parçanın mukavemetini ve yüzey kalitesini artırması gibi birçok imalat avantajı vardır. Derin çekme kalıplarında ve kaynaklı metallere üretilen parçalar karşılaştırıldığında, hidrolik şekillendirme ile üretilen parçalar hafiftir, birim başına daha düşük bir maliyete sahiptir ve daha yüksek mukavemette sahiptir.

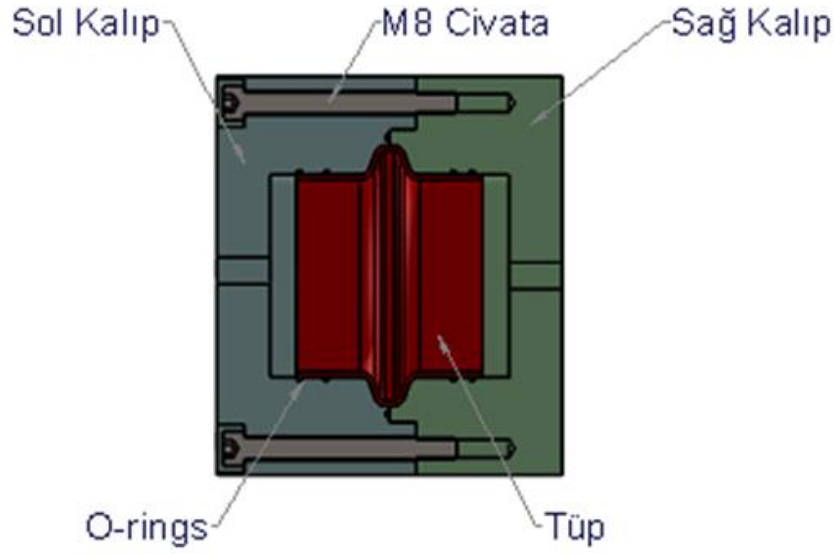


Şekil 2. 1. a) Hidrolik şekillendirme işlemi ile oluşan egzoz, b) Kaynaklı birleştirme ile oluşan egzoz

2.2. Tüp Hidrolik Şekillendirme Sınıflandırmaları

2.2.1. Hidrolik Şişirme

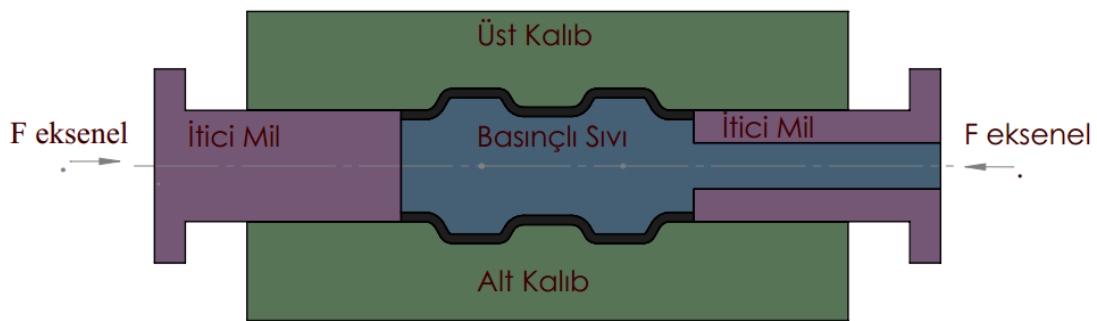
Yalnız hidrolik basınç etkisi altında gerçekleştirilen bir işlemdir. Şişirme işlemi için yüksek basınçlara çıkmak gerekmektedir. Cidar kalınlıklarının hassas olarak ayarlanması bu işlemde zordur. Basınç artış hızı ve basınçlandırma kademelerinin uygun olarak ayarlanması gerekmektedir [5].



Şekil 2. 2. Hidrolik şişirme ile hidrolik şekil verme

2.2.2. Eksenel Kuvvet ve Basınçla Şişirme

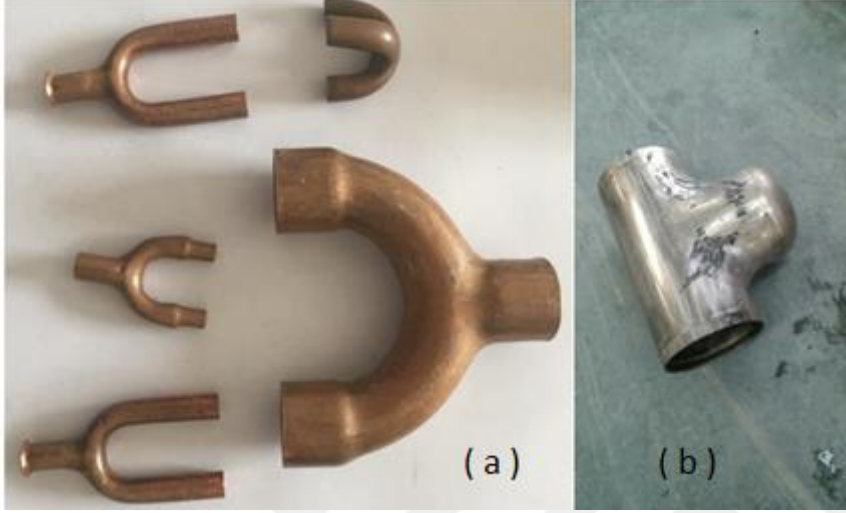
Bu işlemde iç basıncın yanı sıra parçaya eksenel kuvvet uygulanarak sürtünme kuvveti yenilir ve kalıp içinde oluşacak forma daha fazla malzeme gitmesi sağlanılarak yırtılmaların önüne geçilir. Form verme işlemi sırasında tüplerde hasar oluşumunu engellemek amacıyla eksenel kuvvet hidrolik basınç dengesinin ayarlanması gerekmektedir[6].



Şekil 2. 3. Eksenel kuvvet ve basınçla hidrolik şekil verme

2.2.3. T ve Y Şeklinde Tüp Parçaların Üretimi

Bu tarz tüp hidrolik şekillendirme yönteminde eksenel yük, iç basınç kuvvetlerine ek olarak kalıp boşluğu dış bir pres tarafından basınç altında tutularak T ve Y tipi özel tip tüp parçaların istenilen cidar kalitesinde üretilmesi mümkün olmaktadır [6].



Şekil 2. 4. a) Hidrolik şekillendirme işlemi ile oluşan Y tipi boru, b) Hidrolik şekillendirme işlemi ile oluşan T tipi boru [30].

2.3. Tüp Hidrolik Şekillendirme Uygulamalarında Hasar Durumları

2.3.1. Cidar İncelmesi:

Hidrolik Şekillendirme işleminin başlamasıyla tüp malzemenin et kalınlığında incelmede başlar. Bu incelme hidrolik şişirme yöntemine göre eksenel basınçlarla çalışıldığında azalmaktadır. Geleneksel yöntemlere göre her iki yöntemde daha homojen cidar kalınlığı sağlamaktadır.

2.3.2. Burkulma

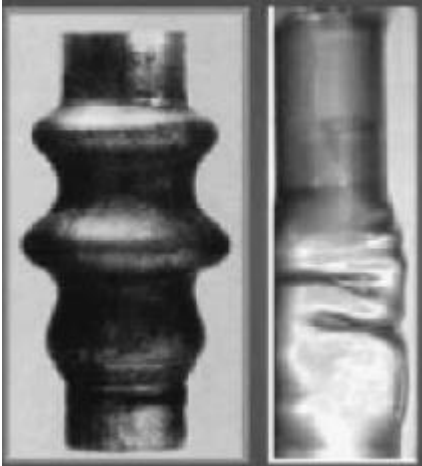
İnce uzun parçalarda yüksek eksenel kuvvet ve düşük iç basınç ile şekillendirme durumlarında gerçekleşmektedir. Bu tarz çalışmalarda çap cidar kalınlığı oranı ve kuvvet uygulanan tüp uzunluğunun hassas bir şekilde ayarlanması gerekmektedir.



Şekil 2. 5. Tüp hidrolik şekillendirme uygulamalarında burkulma hata türü [31].

2.3.3. Katlanma

İnce uzun parçalarda yüksek eksenel kuvvet ve düşük iç basınç ile şekillendirme durumlarında iş parçasının malzemenin homojen olmayan lokal katlanma olasılığı artar. İç basıncın yükseltilmesiyle eksenel kuvvet dengesi sağlanmakta katlanma problemleri azalmaktadır. İç basınç eksenel kuvvet dengesinin iyi ayarlanması, gerekmektedir.



Şekil 2. 6. Tüp hidrolik şekillendirme uygulamalarında katlanma hata türü [31].

2.3.4. Yırtılma

Cidar incelmesini takiben yerel yırtılmalar şeklinde başlamaktadır. Dış yarıçap/ İç yarıçap oranına ($d_1/d_0 > 1,4$) bağlı olarak belirli oran üzerinde görülmektedir. Tüp cidarlarının iç basınç şişirme etkisi altında davranışları (anizotrop, pekleşme vs.) yırtılma hasarında belirleyicidir.



Şekil 2. 7. Tüp hidrolik şekillendirme uygulamalarında yırtılma hata türü

2.4. Tüp Hidrolik Şekillendirme İşleminin Otomotiv Parçalarında Basamakları

Otomotiv parçalarındaki tüp hidrolik şekillendirme uygulamaları incelendiğinde, hidrolik şekillendirme öncesi parçalar ön işlemler gerektirmektedir. Bu işlemler maddeler halinde aşağıda verilmiştir.

a. İstenilen tüp parça bükümler içeriyorsa, düz boru, boru bükme makinesine yüklenir.

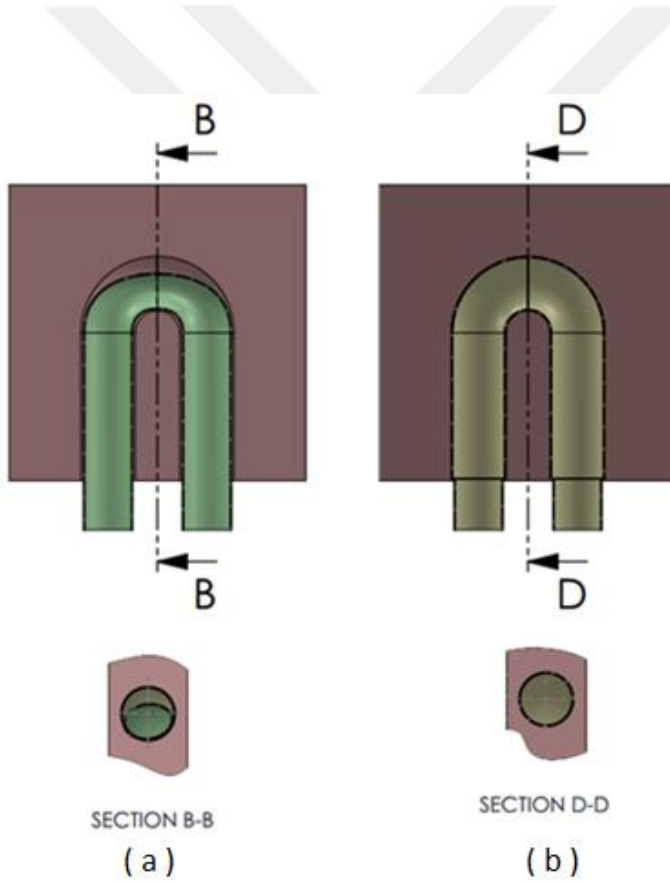
b. Bükülmüş Tüp daha sonra ön form vermek için prese yerleştirilir. Bu pres işleminin amacı, parçanın şekil değişimini başlatarak, hidrolik şekillendirme işlemine yardımcı olmaktır.

c. Parça daha sonra bir hidrolik şekillendirme presine gider. Bu pres borunun içindeki hidrolik akışkanı basınçlandırarak parçaya son şeklini verir. Yeni hidrolik şekil verilecek parçalar, gerektiğinde bir parça yıkama sisteminden geçer.

d. Son olarak, parça lazer merkezine götürülerek istenilen ölçülerde kesilir.



Şekil 2. 8. Tüp hidrolik şekillendirme öncesi parçalara uygulanan ön işlemler [30].



Şekil 2. 9. Tüp hidrolik şekillendirme a) Ön şekillendirilmiş tüp boru b) Bitmiş tüp boru

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Tüp Hidrolik Şekillendirme Sistemi

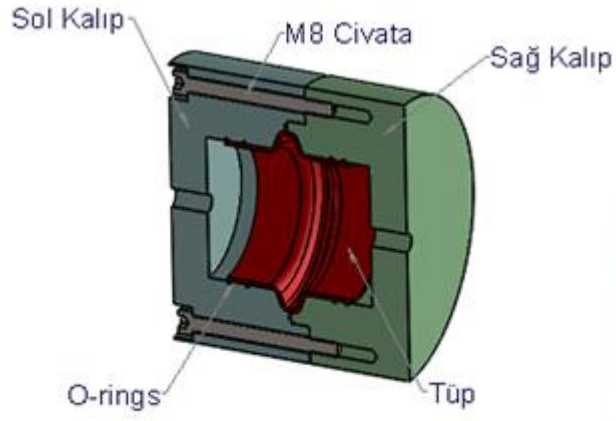
Konnektör boru başlığı, motor çıkışı ile egzoz parçaları arasındaki bağlantıda kullanılan egzoz sistemleri için önemli ekipmanlardır. Bağlantı parçaları birbirine kelepçe adaptörü ve kaynaklı bağlantılar ile bağlanır. Malzemenin deformasyon özellikleri ve üretim yöntemi, bağlantı parçalarının hizmet ömrü için önemli parametrelerdir.

Bağlantı parçaları genellikle hidrolik pres tarzı şekillendirme ekipmanlarıyla üretilir. Üretim yöntemine dayalı malzeme sertleşmesi, artık gerilme etkileri, geri yaylanma etkileri ve kaynak bağlantıları sebebiyle oluşan artık gerilme etkileri malzeme yorulma ömrünü etkilemektedir.

Bu çalışmada, hidrolik şekillendirme adı verilen alternatif üretim yöntemi ayrıntılı olarak ele alınmıştır. Sürecin optimizasyonu sonlu elemanlar analiziyle elde edilmiştir.

Egzoz borusu bağlantı parçaların da kullanılan boru şeklindeki form için deneysel hidrolik şekillendirme düzeneği şekil 3.1 ve şekil 3.2'de verilmiştir.

Hidrolik şekillendirme işleminde akışkan ortamı, 10 lt / dak akış hacmi ile kontrol edilen, basınç oranı 700Bar'a kadar olan hidrolik pompalarla basınçlandırılmıştır. Hidrolik şekillendirme sistemine entegre edilmiş manometre ile basınç ölçülmüştür.

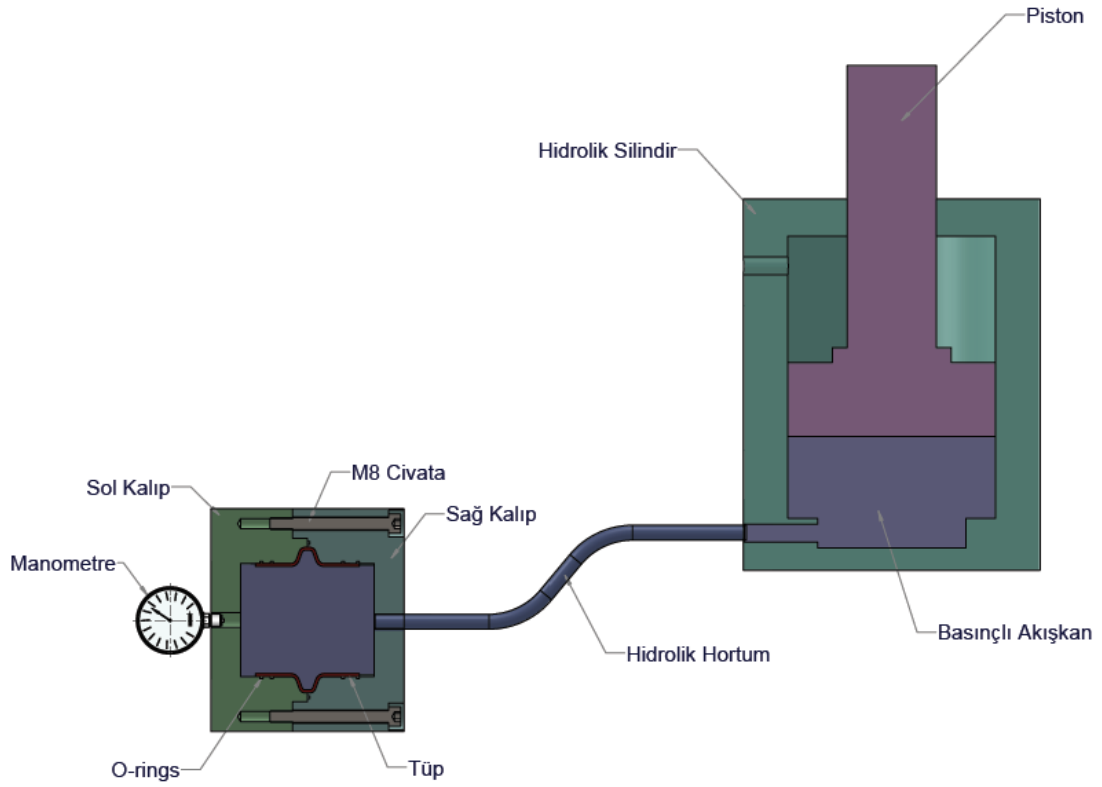


(a)



(b)

Şekil 3. 1. Hidrolik şekillendirme deney düzeneği a) Kesit resmi b) İmalat resmi

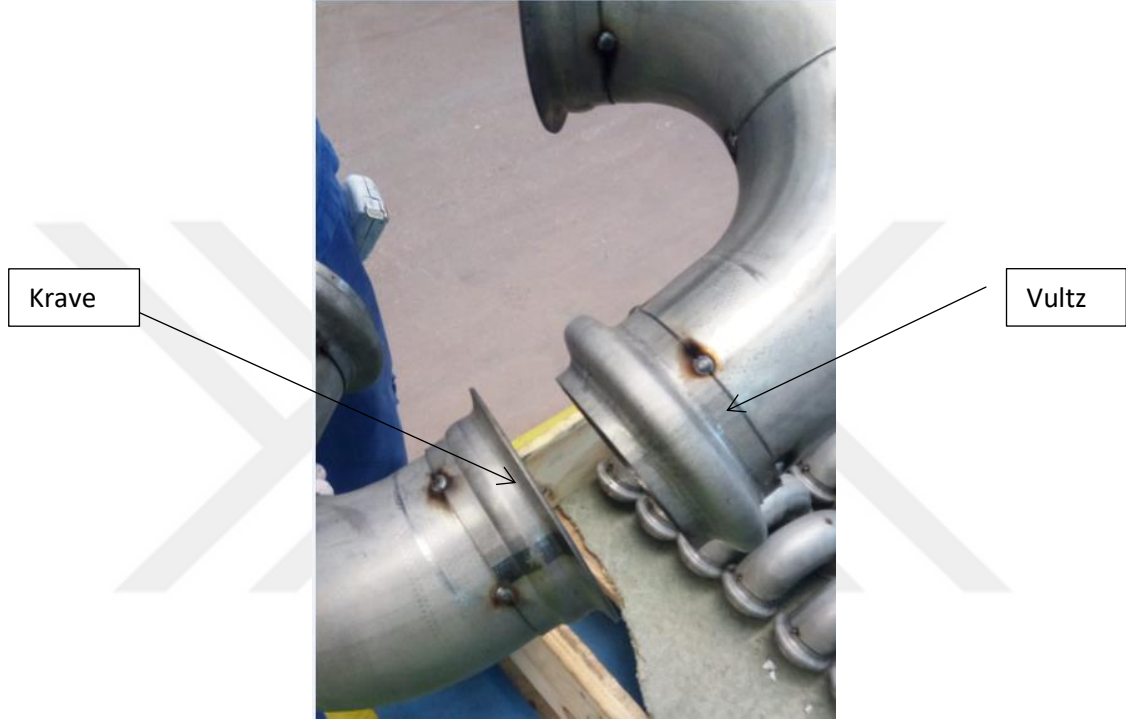


Şekil 3. 2. Tüp hidrolik şekillendirme sistemi

3.2. Otomotiv Sektöründe Tipik Boru İşleme Yöntemleri ve Hidrolik Şekillendirmeye

Karşılaştırılması

Otomotiv sektöründe kullanılan egzoz sistemlerinde motor çıkışına ve boru birleştirmelerinde konnektör bağlantı ekipmanı olarak aşağıdaki şekilde gösterilen vultz ve krave adı verilen parçalar kullanılmaktadır (Şekil 3.3)



Şekil 3. 3. Krave ve Vults örneği

İki parça birbirine, borulara kaynatılacak iki adet flanş ile de bağlanabilir. Krave ve vultz, ara conta ve bir kelepçe yardımıyla iki farklı boruyu birbirine kolay bir şekilde bağlamaktadır.

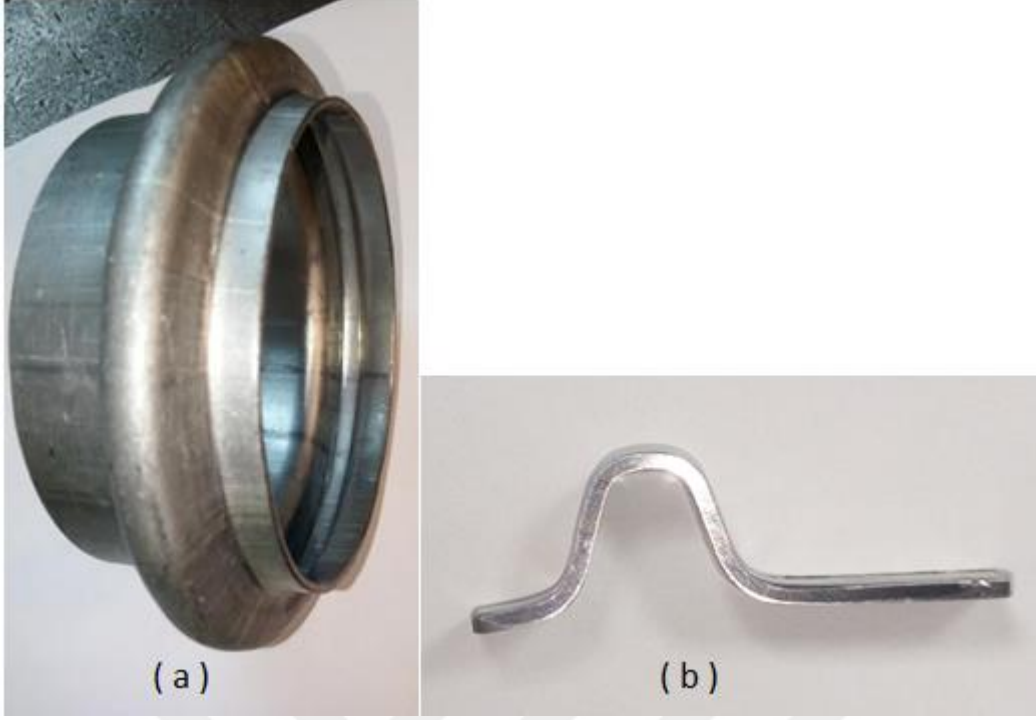
Krave ve vultz şekil 3.4.'de gösterilen bu işlem için tasarlanmış hidrolik ünite destekli özel amaçlı üretim tezgahlarında üretilmektedir. Şekilde gösterilen aparat yardımıyla borulara 40 ton hidrolik basınç altında vultz açılır.



Şekil 3. 4. Vultz açma kalıbın detayları



Şekil 3. 5. Kelepçe



Şekil 3. 6. a) Üretilmiş vultz b) Kesit Görüntüsü

Yukarıda gösterilen geleneksel üretim yöntemiyle hidrolik şekillendirme yöntemi karşılaştırıldığında aşağıda belirtilen problemlerin giderileceği düşünülmektedir.

- Bu bağlantı yöntemi fazladan malzeme, kaynak işçiliği ve montaj işçiliği getirmektedir. Geniş kapsamlı bir hidroforming ünitesinin geliştirilmesiyle bu problem ortadan kaldırılabilir.
- Geleneksel yöntemle üretilmiş yukarıdaki şekilde gösterilen bağlantı parçaları incelendiğinde cidar homojenliğinin sağlanmadığı gözlenmiştir. Bu problem hidroforming ünitesiyle giderilebilir.

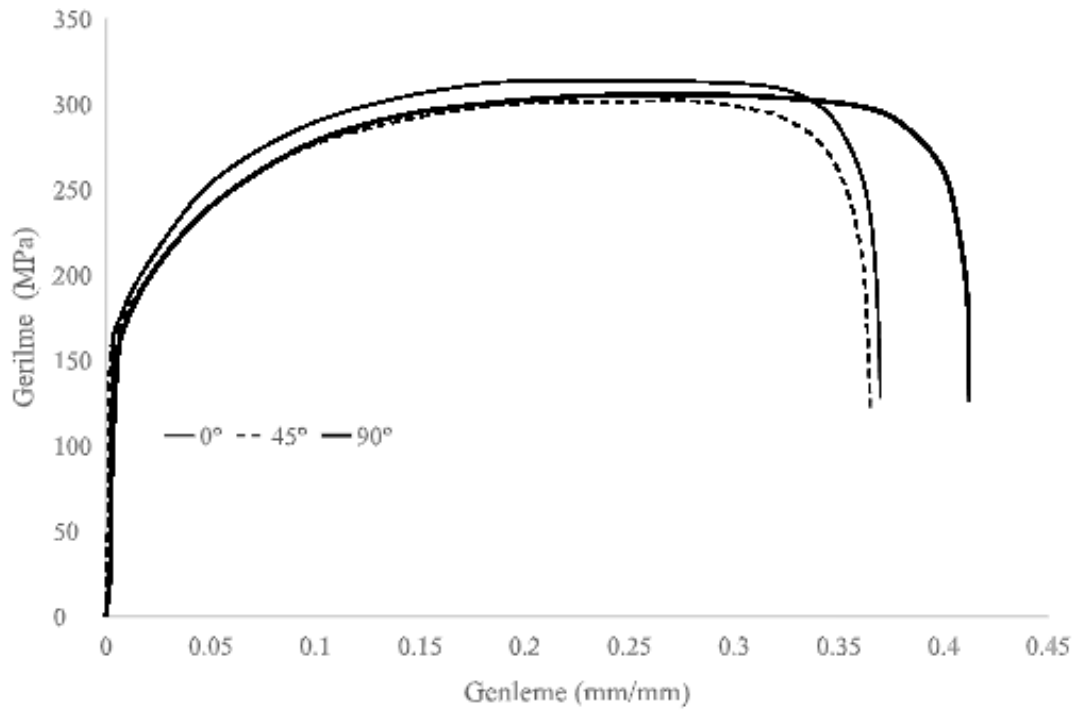
3.3. Malzeme Özelliklerinin Belirlenmesi

Bu çalışmada egzozlarda kullanılan (EN 10246 DX54D) standart numarasına sahip Alüminyum- Çinko kaplamalı (Galvalume) boruların malzeme özellikleri çekme testi yardımıyla belirlenmiştir.

Soğuk şekil değiştirme yöntemiyle üretilmiş çelik plakaların anizotropik özelliklerini belirlemek amacıyla üç farklı yönden (0° , 45° , 90°), her bir yönden üçer numune çıkartılmış mekanik özellikleri belirlenmiştir. (Çizelge 3.1),(Şekil 3.7)

Çizelge 3. 1. Aluzink saçların mekanik özellikleri

Plaka Oryantasyon Açısı	Akma Mukavemeti (MPa)	Çekme Mukavemeti (MPa)	Maksimum Genleme ϵ	Mukavemet Katsayısı K (MPa)	Deformasyon Sertleşmesi Katsayısı (n)	Lankford Katsayısı R
0°	159.5	313.8	0.366	501.7	0.22	1.228
45°	182.3	301.6	0.369	502.5	0.22	0.958
90°	157.9	305.4	0.404	510.5	0.29	1.049
Ortalama	166.5	306.9	0.379	504.9	0.24	1.078



Şekil 3. 7. Aluzink kaplamalı çelik saçlarda gerilme genleme değerlerinin değişimi

Burada Lankford katsayısı malzeme anizotropi özelliklerini belirlemede kullanılmakta olup aşağıdaki formülle tanımlanmıştır.

$$R = \frac{\ln \frac{w}{w_0}}{\ln \frac{l_0 - w_0}{l - w}}, \quad (3.1)$$

Burada w_0 ve w numunelerin enine yöndeki başlangıç ve son değerlerini, l_0 ve l numunelerin başlangıç ve son boylarını belirtmektedir.

Ortalama değer olarak tüm yönlerdeki anizotropi değişimlerini dikkate alarak aşağıdaki formülle tanımlanabilir.

$$R = \frac{1}{4}(R_0 + 2R_{45} + R_{90}) \quad (3.2)$$

Elde edilen sonuçlarda R katsayısının 1 değerine yakın olduğu görülmektedir. Bu katsayı 1 değerinin altında olduğunda kalınlık boyunca genleme değerlerinin arttığı bilinmektedir [32]. Şekil 3.7’de mekanik özelliklerin yöne bağlı değiştiği görülmektedir.

Çalışmada anizotropi etkisinin yanında deformasyon sertleşmesi etkileri de dikkate alınmıştır.

Deformasyon sertleşmesi katsayılarını bulabilmek için öncelikle mühendislik gerilme-genleme eğrisinden aşağıda verilmiş olan Holloman denklemleri kullanılarak gerçek gerilme-genleme değerlerine ulaşılmıştır.

$$\varepsilon_T = \ln(\varepsilon_E + 1) \quad (3.3)$$

$$\sigma_T = \sigma_E (\varepsilon_E + 1) \quad (3.4)$$

Burada σ_E ve ε_E sırasıyla mühendislik gerilme genleme değerlerini göstermekte olup , σ_T ve ε_T ise gerçek gerilme genleme değerlerini göstermektedir.

Pekleşen bir malzemede gerçek gerilme ile gerçek genleme arasındaki ilişki aşağıdaki gibi tanımlanabilir.

$$\sigma_T = K \varepsilon^n \quad (3.5)$$

Burada K mukavemet katsayısını, n deformasyon sertleşmesi katsayısını belirtmektedir. Bu değerler gerçek gerilme genleme eğrilerinden en küçük kareler yöntemi kullanılarak çıkartılmışlardır.

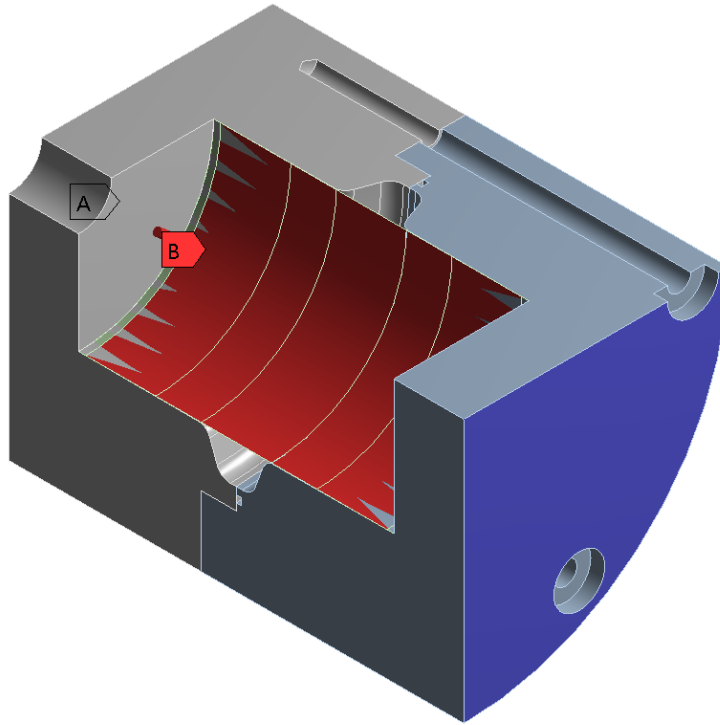
3.4. Sonlu Elemanlar Modelleme

Bu kısımda deneylerde kullanılan egzoz boru bağlantı parçalarının hidrolik şişirme davranışı sonlu elemanlar analizleriyle incelenmiştir. Sonlu elemanlar analizlerinde Ansys Ls-Dyna explicit analiz yaklaşımı kullanılmıştır. Çalışmada analiz süresinin kısaltması amacıyla modeldeki simetri sebebiyle simetri sınır koşulları uygulanmıştır. Hidrolik şişirme ünitesinde kullanılan sınır koşulları şekil 3.8’de verilmiştir.

A: Explicit Dynamics

Fixed Support
Time: 1,2e-003 s
2.07.2019 16:07

A Fixed Support
B Pressure



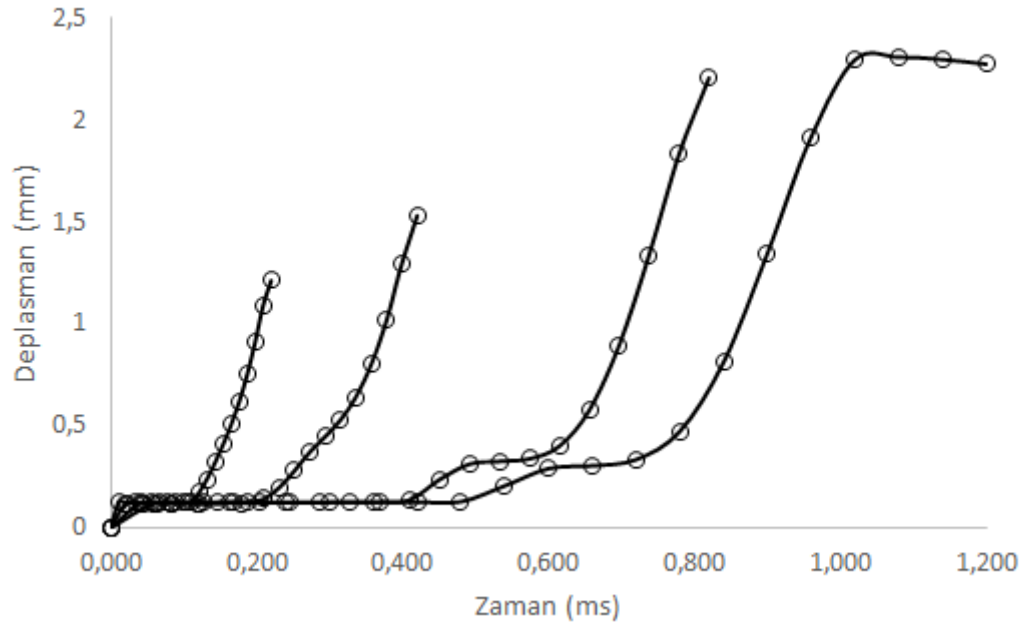
Şekil 3. 8. Hidrolik şişirme ünitesi sınır koşulları

Eksplisit yaklaşımda kullanılan kritik simülasyon zamanı 50MPa iç basınç altındaki boru parça için şekilde gösterildiği gibi 1milisaniye (ms) olarak belirlenmiştir (Şekil 3.9).

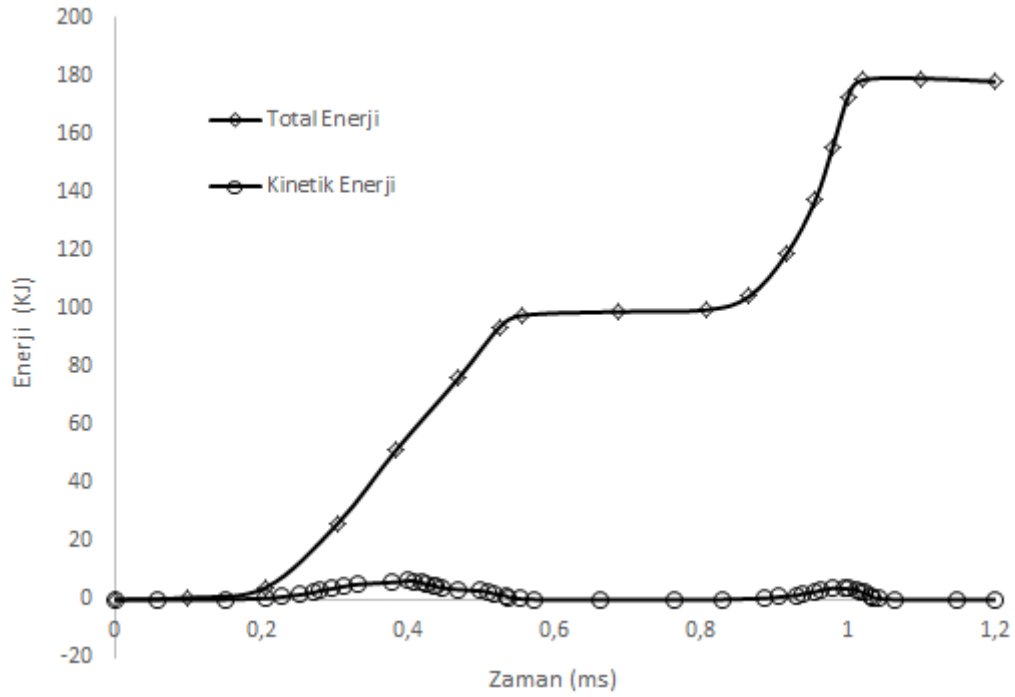
Analizlerde ortaya çıkan toplam enerji ve kinetik enerjinin zamana bağlı değişimleri 65MPa iç basınç altında şekil 3.10'da verilmiştir. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde, sistemdeki kinetik enerjinin toplam enerjinin %2-5 arasında değiştiği ihmal edilebilir bir düzeyde olduğu gözlenmiştir. Enerjinin büyük oranda şekil değiştirmede kullanıldığı, deneysel çalışmalarla uyumlu olarak yarı statik (quasi-statik) bir analiz gerçekleştiği söylenebilir.

Deneylerde kullanılan sac metallerin çekme özelliklerine bağlı olarak analizlerde malzeme modeli belirlenmiştir. Bu kapsamda malzemenin plastik davranışını dikkate alan multilinear izotropik sertleşme malzeme modeli analizlerde sac metal için seçilmiştir. Genleme sertleşmesi etkileri gerçek gerilme - genleme eğrilerine bağlı olarak elde edilmiş daha sonra malzeme özellikleri revize edilmiştir.

Analizlerde kalıplar elastik izotropik özelliklerde modellenmiştir. Plastik bölgedeki deformasyon davranışları ihmal edilmiştir.

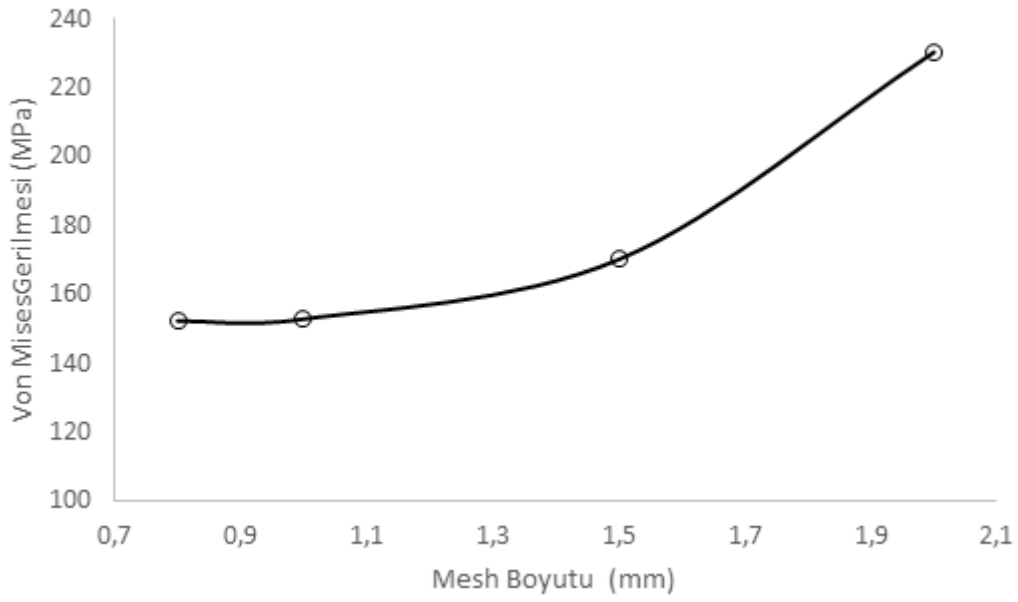


Şekil 3. 9. Kritik zaman analizi



Şekil 3. 10. Analizlerde ortaya çıkan enerji değişimleri

Sonlu elemanlar analizlerinde şekil değişimine maruz kalan saç metal boru kısmı dört düğüme sahip olan kabuk elemanlarla modellenmiştir. Kalıp kısımlarında üç boyutlu 8 düğüme sahip solid elemanlar kullanılmıştır. Mesh hassasiyet analizi, 16MPa iç basınç altındaki kabuk elemanlar için şekil 3.11’de verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi 1mm mesh boyutu ile 0.8mm mesh boyutu arasında yapılan incelemede Von Mises Gerilme sonuçlarında önemli bir değişim olmadığı görülmüştür. Bu sebeple analizlerimizde saç metal modellemelerinde 1mm mesh boyutuna sahip kabuk elemanlar kullanılmıştır (Şekil 3.12).



Şekil 3. 11. Kabuk elemanlarda mesh hassasiyet analizi



Şekil 3. 12. Hidrolik şişirme ünitesi sonlu elemanlar modeli

3.5. Dizayn Parametrelerinin Belirlenmesi

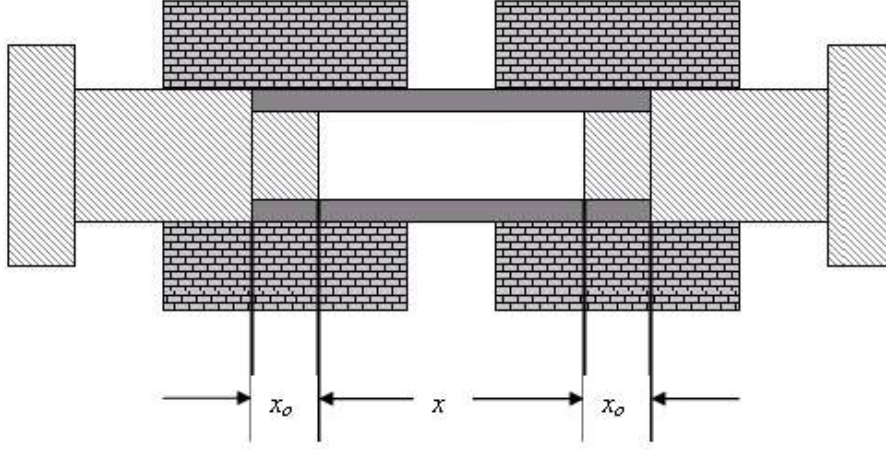
Çalışmada geliştirilen hidrolik şişirme ünitesinde belirlenen dizayn parametreleri içten basınçlandırılmış ince cidarlı tüplerde düzlem genleme koşullarında gerilme- genleme hesaplamalarına dayanmaktadır [6], [8].

Bu yaklaşıma göre tüp ortalama çapındaki değişim çevresel yöndeki genlemelerin ihmal edilebilir düzeyde olmasından dolayı ($\epsilon_{\theta}=0$) , radyal yöndeki kuvvetlerin dengesinden bulunabilir [8].

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{\sigma_r - \sigma_{\theta}}{r} = \frac{-2mk}{x} \quad (3.6)$$

$$\sigma_r - \sigma_{\theta} = \frac{\sigma_{yp}}{\sqrt{3}} \quad (3.7)$$

Burada σ_r, σ_θ sırasıyla radyal ve çevresel gerilmeleri, r tüp radüsünü, k malzeme kayma mukavemetini, x desteklenmemiş basınçlandırma bölgesini ve m sürtünme katsayısını göstermektedir. Şekil 3.13'de denklemden kullanılan x parametresi gösterilmiştir.



Şekil 3. 13. Hidrolik şişirme yönteminde basınçlandırma bölgesi

Von Mises kriterine göre kayma mukavemeti ve akma mukavemeti arasındaki ilişki aşağıdaki gibi tanımlanabilir.

$$\sigma_{yp} = \sqrt{3} k \quad (3.8)$$

Yukarıdaki denklemlerde integral işlemi ve sınır koşullarının uygulanmasıyla integral sabitleri bulunur. İçten basınca maruz tüplerde radyal ve eksenel yöndeki gerilmeler Von Mises akma gerilmelerinin eklenmesiyle aşağıdaki şekilde elde edilir.

$$\sigma_r = -p_i - \frac{\sigma_{yp}}{\sqrt{3}b} \ln \frac{a}{b} - \frac{2m\sigma_{yp}(a-b)}{\sqrt{3}x} \quad (3.9)$$

$$\sigma_z = \sigma_r - \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_{yp} \quad (3.10)$$

Burada p_i tüp içerisindeki basınç değerini, a ve b iç ve dış tüp radüs değerini, m sürtünme katsayısını göstermektedir.

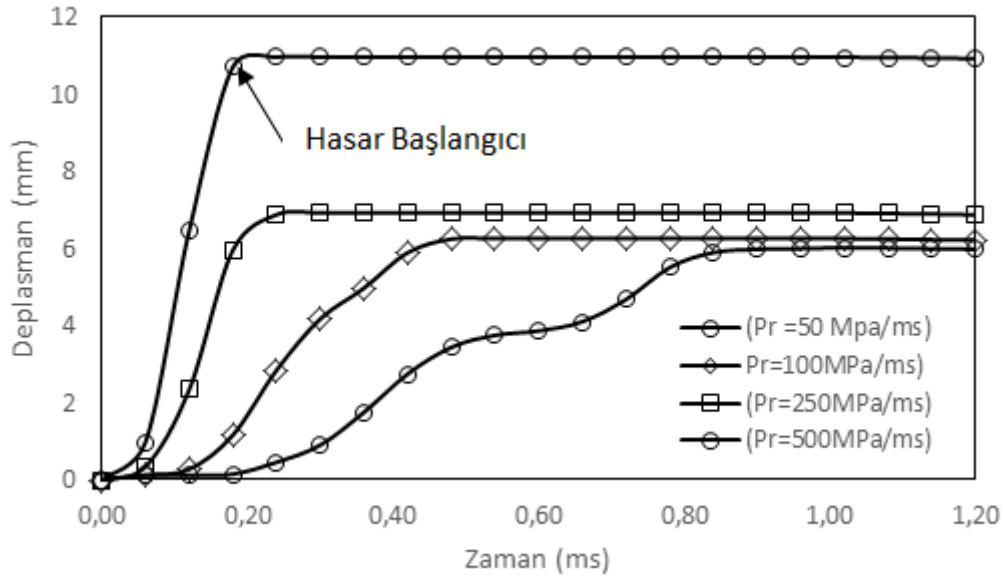
Yukarıdaki denklemlerde görüldüğü gibi iç basınç, basınçlandırma bölgesi ve sürtünme katsayısı hidrolik şişirme işlemi için önemli parametrelerdir. Çalışmamızda

sürtünme katsayısı deneysel ve sonlu elemanlar çalışmalarından elde edilen basınç şekil değiştirme eğrilerinden yola çıkarak 0.2 olarak belirlenmiştir.

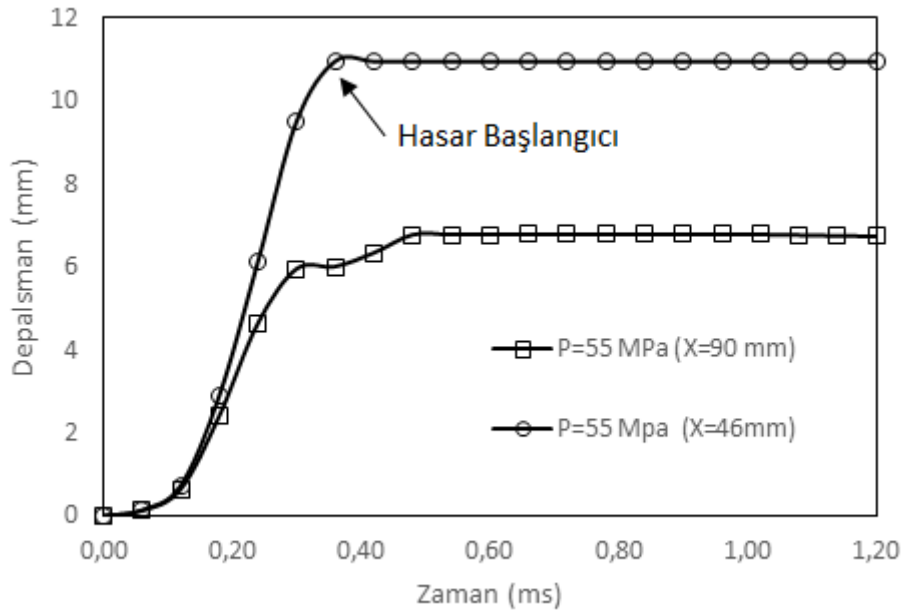
Analizlerde iç basınç, iç basınç artış hızının etkisi ve basınçlandırma mesafesinin etkisi göz önüne alınmıştır. Deneysel çalışma analiz çıktılarına göre geliştirilmiştir. Analiz parametrelerinin değişimine bağlı olarak elde edilen sonuçlar aşağıdaki tablo ve şekillerde verilmiştir.

Çizelge 3. 2. Dizayn parametrelerinin sonlu elemanlar analiz (SEA) sonuçlarına etkisi

Model Numarası	Basınç P (MPa)	Basınç Artış Hızı P_r (MPa/ms)	Basınçlandırma Mesafesi X (mm)	Sürtünme Katsayısı	Maks. Şekil Değ.(mm)	Plastik Genleme Sonuçları (mm/mm)
Model 1	50	50	90	0.2	5.98	0.234
Model 2	50	100	90	0.2	6.22	0.244
Model 3	50	250	90	0.2	6.88	0.44
Model 4	50	500	90	0.2	10.71	0.46
Model 5	50	50	80	0.2	5.89	0.26
Model 6	55	55	80	0.2	7.53	0.28
Model 7	65	65	80	0.2	9.42	0.33
Model 8	50	50	46	0.2	7.45	0.23
Model 9	55	55	46	0.2	10.89	0.37
Model 10	55	55	46	0.1	10.75	0.30



Şekil 3. 14. Sonlu elemanlar analizinde basınç artış hızının şekil değiştirme sonuçlarına etkisi ($P=50$ MPa)

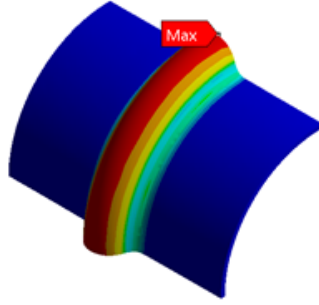


Şekil 3. 15. Sonlu elemanlar analizinde basınçlandırma mesafesinin şekil değiştirme sonuçlarına etkisi ($P=50$ MPa)

Sonlu elemanlar analiz sonuçları basınç artış hızı ve basınçlandırma mesafesinin etkili parametreler olduğunu göstermektedir.

A: Explicit Dynamics
 Equivalent Plastic Strain
 Type: Equivalent Plastic Strain - Top/Bottom
 Unit: mm/mm
 Time: 1,2e-003
 Cycle Number: 328940
 10.09.2019 15:27

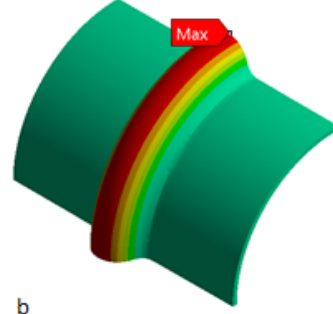
0,33114 Max
 0,29435
 0,25756
 0,22076
 0,18397
 0,14718
 0,11038
 0,073588
 0,036794
 0 Min



a

A: Explicit Dynamics
 Total Deformation
 Type: Total Deformation
 Unit: mm
 Time: 1,2e-003
 Cycle Number: 328940
 10.09.2019 15:26

9,4231 Max
 8,3761
 7,3291
 6,2821
 5,235
 4,188
 3,141
 2,094
 1,047
 0 Min



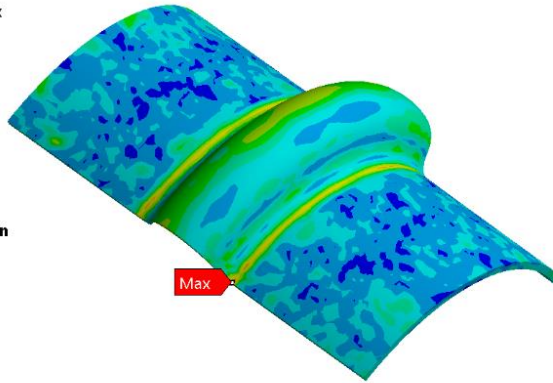
b

Şekil 3. 16. Deformasyon sonuçları a) plastik genleme b) total şekil değiştirme (P=65 MPa)

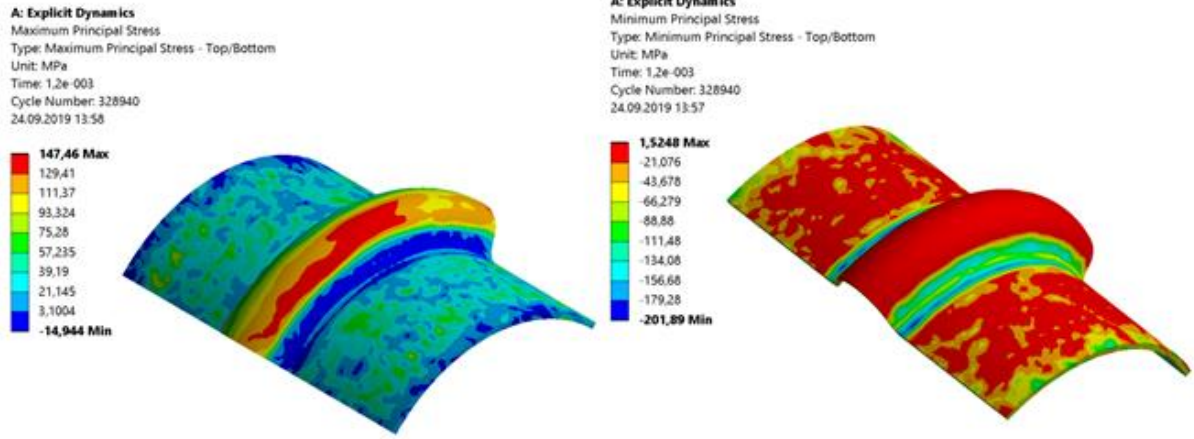
Maksimum plastik genleme ve deformasyon değerleri form verilen kısmın ortasında elde edilmiştir (Şekil 3.16).

A: Explicit Dynamics
 Equivalent Stress
 Type: Equivalent (von-Mises) Stress - Top/Bottom
 Unit: MPa
 Time: 1,2e-003
 Cycle Number: 328940
 9.09.2019 11:22

219,72 Max
 195,33
 170,94
 146,55
 122,16
 97,769
 73,38
 48,99
 24,6
 0,21085 Min



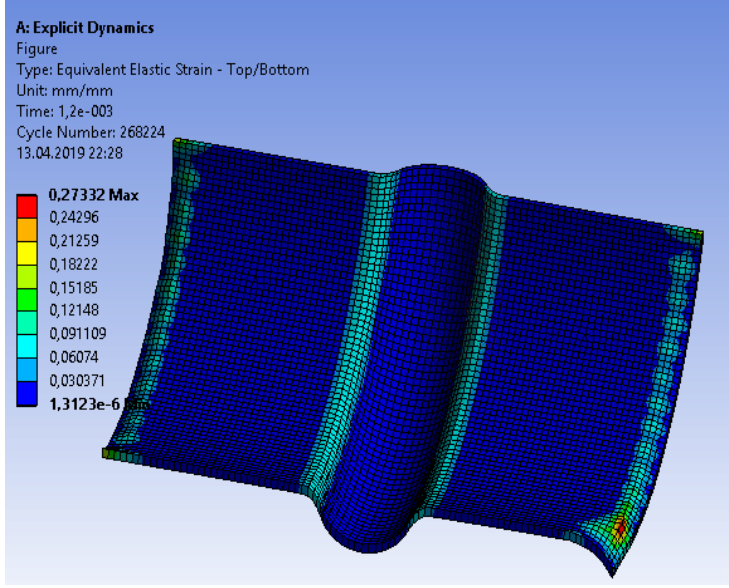
Şekil 3. 17. Von Mises artık gerilme sonuçları (P=65Mpa)



Şekil 3. 18. Asal artık gerilme sonuçları (P=65 MPa)

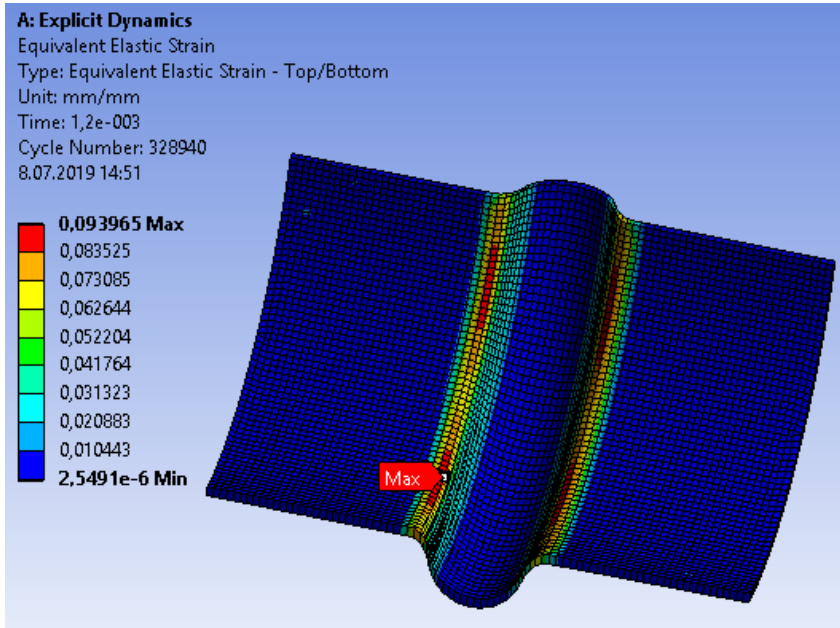
Maksimum artık gerilmeler form verilen bölgenin başlangıcında elde edilmiştir. Basma ve Çekme artık gerilmelerinin saç incelmelerinde önemli olduğu bilinmektedir. Çekme artık gerilmelerinin yoğun olduğu bölgelerde incelme ve hasar başladığı önceki çalışmalarda ortaya konulmuştur [33], [34]. Şekil 3.19’da görüldüğü gibi basma artık gerilmelerinin form başlangıcında, çekme artık gerilmelerinin formun tepe noktasında maksimum değerlerine ulaştığı gözlenmiştir. Elde edilen sonuçlar form verilen metallerin incelme ve hasar mekanizmalarıyla birlikte değerlendirilmiştir.

Sonlu elemanlar sonuçları elastik geri gelme etkisinin de dikkate alınması gerektiğini göstermektedir. Aşağıda elastik geri gelme neticesinde çarpılma beklenen saç kısımları gösterilmiştir.



Şekil 3. 19. Sonlu elemanlar analizinde elastik geri gelme sonuçları (Basınçlandırma bölgesi x=90mm)

Özellikle köşe kısımlarda çarpılma etkileri önem kazanmaktadır. Bu kısımlarda egzoz borularına kaynaklı birleştirme gerçekleştirilmektedir. Şekil 3.19’de görüldüğü gibi maksimum geri gelmenin kenar kısımlarda gerçekleştiği görülmektedir. Çalışmada basınçlandırma bölgesinin uygun bir şekilde seçilmesiyle kenar kısımlardaki elastik geri gelme önlenmiştir.



Şekil 3. 20. Sonlu elemanlar analizinde elastik geri gelme sonuçları (Basınçlandırma bölgesi x=80mm)

3.6. Hasar Durumunun Şekillendirme Sınır Eğrileri Hesaplamalarıyla İncelenmesi

Sonlu elemanlar analizleriyle elde edilen sonuçlarda hasar durumu Swift- Hill kriteri kullanılarak şekillendirme sınır eğrileri yaklaşımıyla değerlendirilmiştir. Slota ve arkadaşları düşük karbonlu çelikler için şekillendirme sınır eğrileri için geliştirilmiş matematiksel yaklaşımları deneylerden elde edilen sınır genleme eğrileriyle karşılaştırmışlardır [18]. Yaptıkları çalışmada matematiksel yaklaşımlarla deneysel eğriler arasında uyum gözlenmiştir.

Şekillendirme sınır eğrilerinde kullanılan şekillendirme sınır genleme değerleri, gerilme- genleme denklemlerinin Hollomon denklemiyle deformasyon sertleşme etkilerini içerecek şekilde düzenlemesiyle aşağıdaki şekilde tanımlanabilir [18].

$\varepsilon_2 < 0$ ise :

$$\varepsilon_1 = \frac{1 + (1 - \alpha) R}{1 + \alpha} n \quad (3.11)$$

$$\varepsilon_2 = \frac{\alpha - (1 - \alpha) R}{1 + \alpha} n \quad (3.12)$$

$\varepsilon_2 > 0$ ise

$$\varepsilon_1 = \frac{[1 + R(1 - \alpha)] \cdot \left[1 - \frac{2R}{1 + r} \alpha + \alpha^2 \right]}{(1 + \alpha)(1 + R) \left[1 - \frac{1 + 4R + 2R^2}{(1 + R)^2} \alpha + \alpha^2 \right]} n \quad (3.13)$$

$$\varepsilon_2 = \frac{[(1 + R)\alpha - R] \cdot \left[1 - \frac{2R}{1 + R} \alpha + \alpha^2 \right]}{(1 + \alpha)(1 + R) \left[1 - \frac{1 + 4R + 2R^2}{(1 + R)^2} \alpha + \alpha^2 \right]} n \quad (3.14)$$

Burada R plastik anizotropi parametresi, α gerilme oranı ($\alpha = \sigma_2 / \sigma_1$), n deformasyon sertleşmesi katsayısını belirtmektedir. Plastik anizotropi parametresi R (Lankford katsayısı) ve n deformasyon sertleşmesi katsayısı malzeme karakterizasyonu kısmında deneysel çekme verileriyle belirlenmiştir (Çizelge 3. 1). Çalışmada , α gerilme oranı iki eksenli çekme etkisi söz konusu olduğu için , $\alpha=1$ olarak alınmıştır [35].

Çalışmada sonlu elemanlar analizlerinden elde edilen gerilme-genleme sonuçları Levy-Mises yaklaşımına göre aşağıda çıkartımı yapılmış efektif plastik genlemelerde yerine konularak şekillendirme sınır genleme eğrilerinde hasar değerlendirmeleri yapılmıştır (Şekil 3.21).

$$\varepsilon_{xx}^p = (\hat{\varepsilon}^p / \hat{\sigma}) [\sigma_{xx} - \frac{1}{2}(\sigma_{yy} + \sigma_{zz})] \quad (3.15)$$

$$\varepsilon_{yy}^p = (\hat{\varepsilon}^p / \hat{\sigma}) [\sigma_{yy} - \frac{1}{2}(\sigma_{zz} + \sigma_{xx})] \quad (3.16)$$

$$\varepsilon_{zz}^p = (\hat{\varepsilon}^p / \hat{\sigma}) [\sigma_{zz} - \frac{1}{2}(\sigma_{xx} + \sigma_{yy})] \quad (3.17)$$

$$\varepsilon_{xy}^p = \frac{3}{2} (\hat{\varepsilon}^p / \hat{\sigma}) \sigma_{xy} \quad (3.18)$$

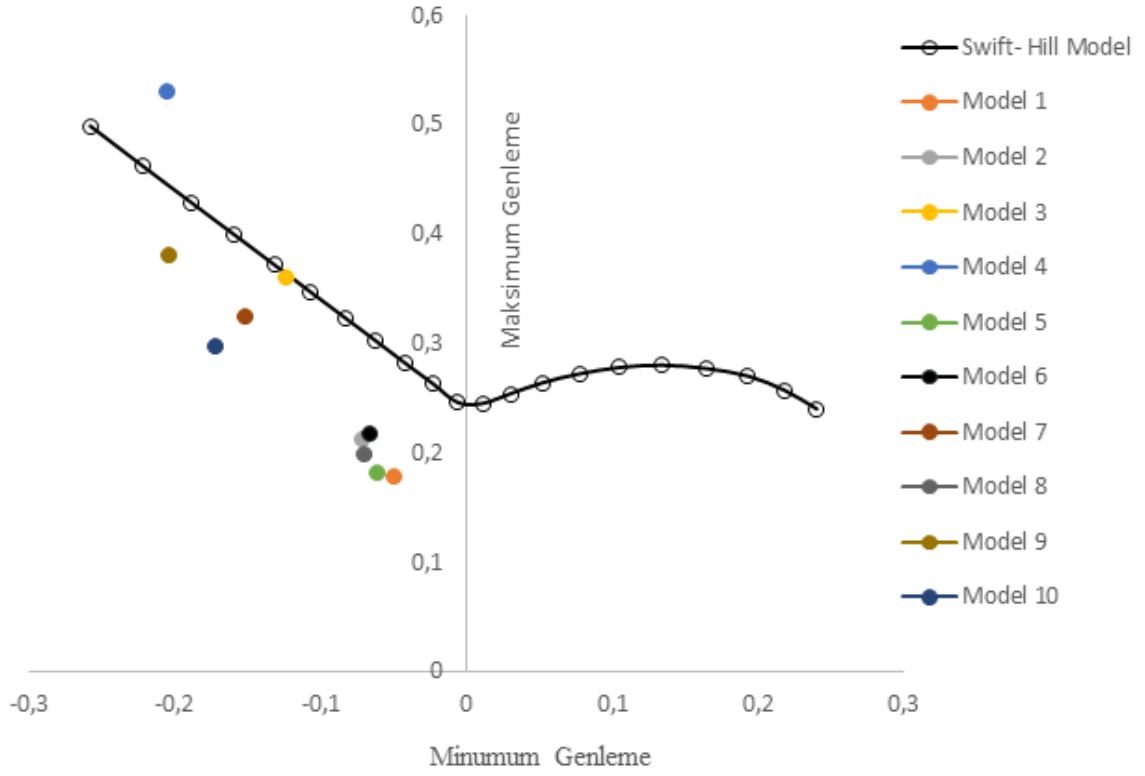
$$\varepsilon_{yz}^p = \frac{3}{2} (\hat{\varepsilon}^p / \hat{\sigma}) \sigma_{yz} \quad (3.19)$$

$$\varepsilon_{zx}^p = \frac{3}{2} (\hat{\varepsilon}^p / \hat{\sigma}) \sigma_{zx} \quad (3.20)$$

Burada ($\hat{\varepsilon}^p$) eşdeğer plastik genleme değerini, ($\hat{\sigma}$) eşdeğer Von Mises akma gerilmesi değerini, σ_{xx}, σ_{yy} ve σ_{zz} verilen yönlerdeki gerilme değerlerini göstermektedir. Şekillendirme sınır eğrileri kullanılarak değerlendirilen sonlu elemanlar sonuçlarından yola çıkarak deneysel proses için saptanan dizayn parametreleri çizelge 3.3'te verilmiştir.

Çizelge 3.3. Hidrolik şişirme ünitesinde kullanılan dizayn parametreleri

Model	Model Numarası	Basınç (MPa)	Basınç artışı hızı (MPa/ms)	Basınçlandırma mesafesi X (mm)	Sürtünme katsayısı
1	Model 5	50	50	80	0.2
2	Model 6	55	55	80	0.2
3	Model 7	65	65	80	0.2



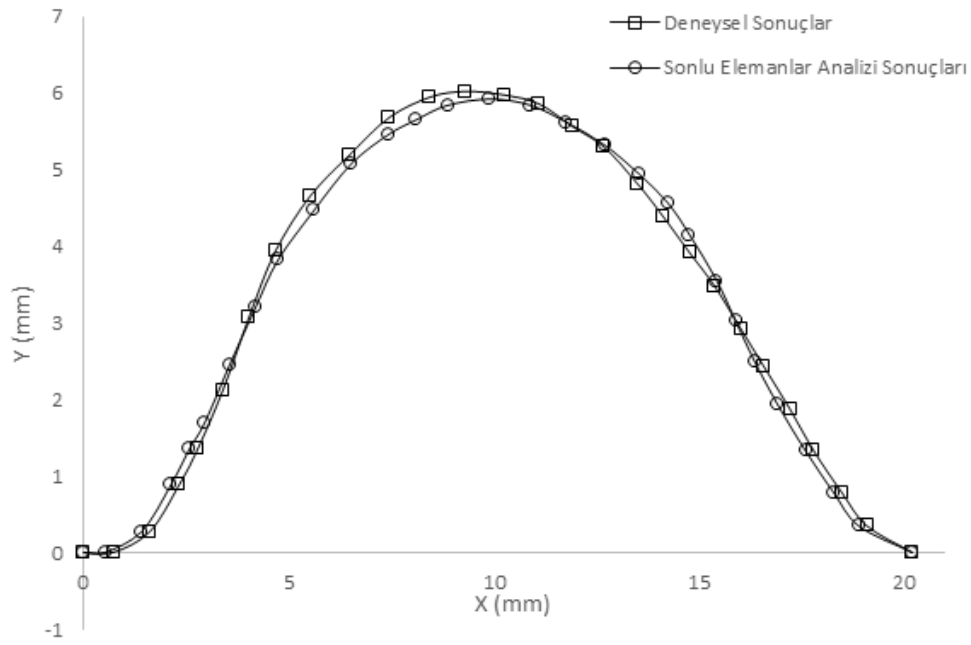
Şekil 3. 21. DX54D Çelik saclarda şekillendirme sınır eğrileri

Şekil 3.21'den görüldüğü gibi basınç artış hızı hasarın oluşumuna bağlı olarak yeterince düşük seçilmelidir. Çalışmada basınç artış hızı ve hidrolik iç basınç değerleri deneysel prosese eklenen bir manometre yardımıyla kontrol edilmiştir. Hidrolik basınçlandırma bölgesi ve elastik geri gelme etkisi önemli parametreler olup bu parametreler basınç ayar şaftının prosese eklenmesiyle kontrol altında tutulmuştur.

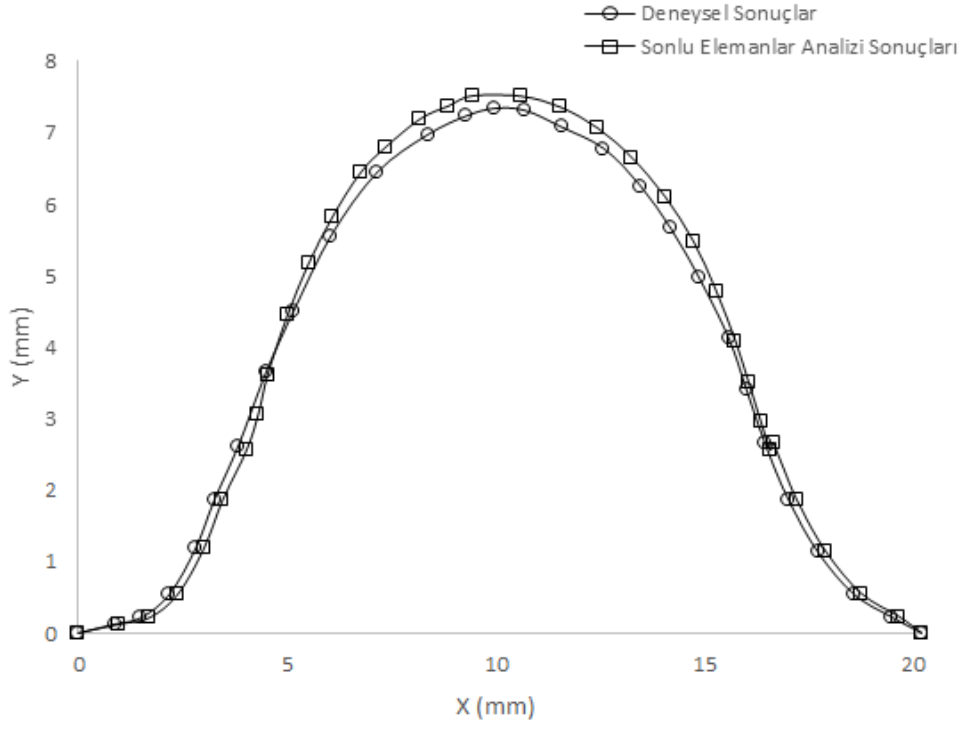
4. ARAŞTIRMA BULGULARI

4.1. Deneysel Sonuçlar

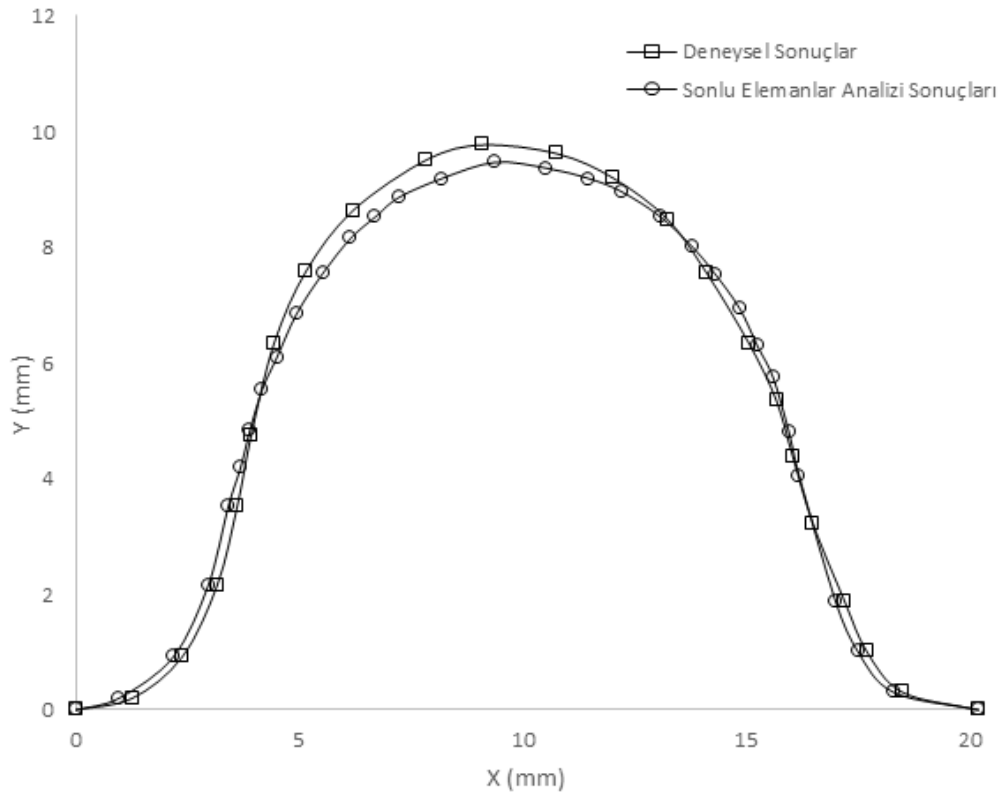
Bu bölümde deneylerde kullanılan hidrolik şişirme ünitesiyle elde edilen numunelerdeki form ve kalınlık değişimleri sonlu elemanlar analizlerinden elde edilen sonuçlarla aşağıdaki grafik ve tablolarda karşılaştırılmıştır.



Şekil 4. 1. Form değişim eğrileri (500Bar hidrolik iç basınç)



Şekil 4. 2. Form değişim eğrileri (550Bar hidrolik iç basınç)



Şekil 4. 3. Form değişim eğrileri (650Bar hidrolik iç basınç)

Çizelge 4. 1. Hidrolik şekillendirmeyele form verilmiş numunelerde deformasyon oranları

Numune Numarası	Basınç (Bar)	Maksimum Deneysel Deformasyon (mm)	Sonlu Elemanlar Anal. Deformasyon	Deneysel Deformasyon (mm)
1	500	6.14	5.93	4.52
2	550	7.32	7.47	5.5
3	650	9.55	9.42	9.7

Şekiller ve tablo incelendiğinde analiz sonuçlarıyla deneysel çalışmaların uyumlu olduğu gözlenmiştir. Form verilen kısımlardaki kalınlık incelme miktarları çizelge 4.2’de verilmiştir. Sonlu elemanlar analizlerinde incelme oranları aşağıdaki formülle belirlenmiştir.

$$\varepsilon_{zz}^p = \ln \frac{t_1}{t_0} \quad (4.1)$$

Burada ε_{zz}^p denklem 3.17’de belirtilen z yönündeki plastik genlemeyi, t_0 başlangıç kalınlığını,

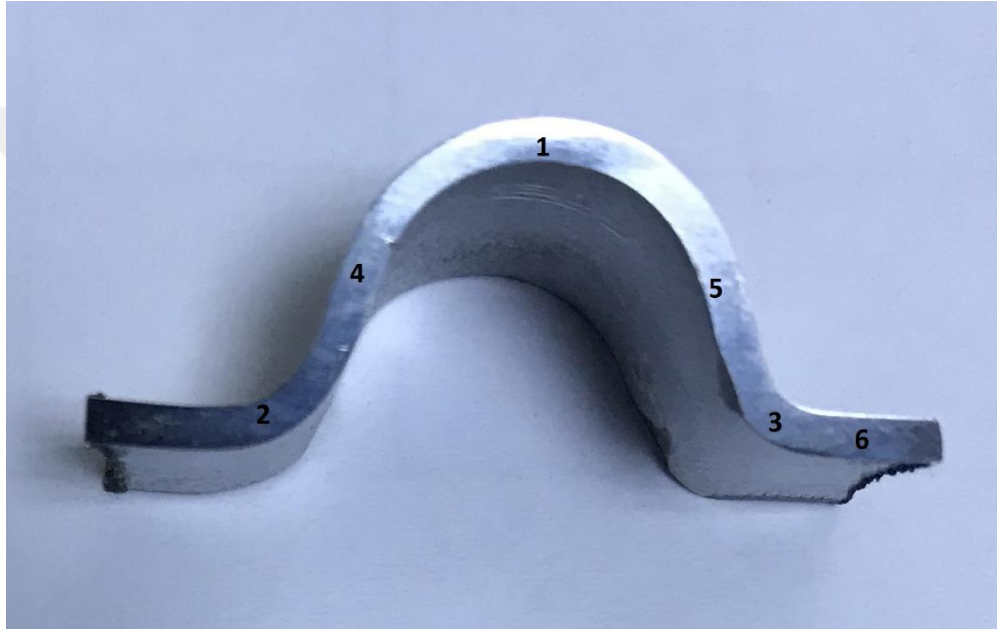
t_1 form verme sonunda elde edilen kalınlığı belirtmektedir. Numunelerde form verme öncesi başlangıç cidar kalınlığı 1.5mm’dir.

Çizelge 4. 2. Hidrolik şekillendirmeyele form verilmiş numunelerde kalınlık değişimleri

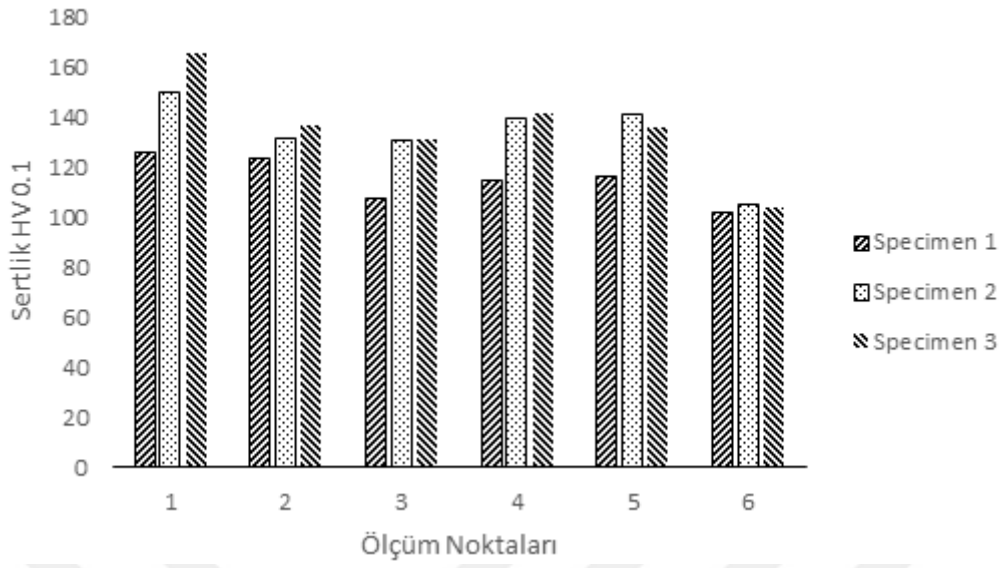
Numune Numarası	Basınç (Bar)	Deneysel Minumum Form Kalınlığı (mm)	Sonlu Elemanlar Anal. Minumum Form Kalınlığı (mm)	Deneysel İncelme Oranı (%)
1	500	1.35	1.31	10
2	550	1.27	1.25	15.3
3	650	1.21	1.19	19.3

4.2. Mikro Yapı İncelemesi

Çalışmanın bu bölümünde form verilen bölgenin ve kaplama kısmının hasar durumu elektron mikroskobu ölçümleriyle değerlendirilmiştir. Ayrıca şekil verilen bölgenin mikro vikers sertlik ölçümleri şekil 4.4’de gösterilen bölgeler için gerçekleştirilmiştir. Numune indisleri çizelge 4.2’de gösterildiği şekilde basınç artışını göstermektedir. Şekilden görüldüğü gibi basınç artışına bağlı olarak mikro sertlik değerlerinde artış gözlenmiştir. Plastik genleme sertlikte etkili bir parametredir. Analizlerde elde edilen plastik genlik sonuçlarıyla mikro sertlik sonuçları arasında uyum olduğu gözlenmektedir.

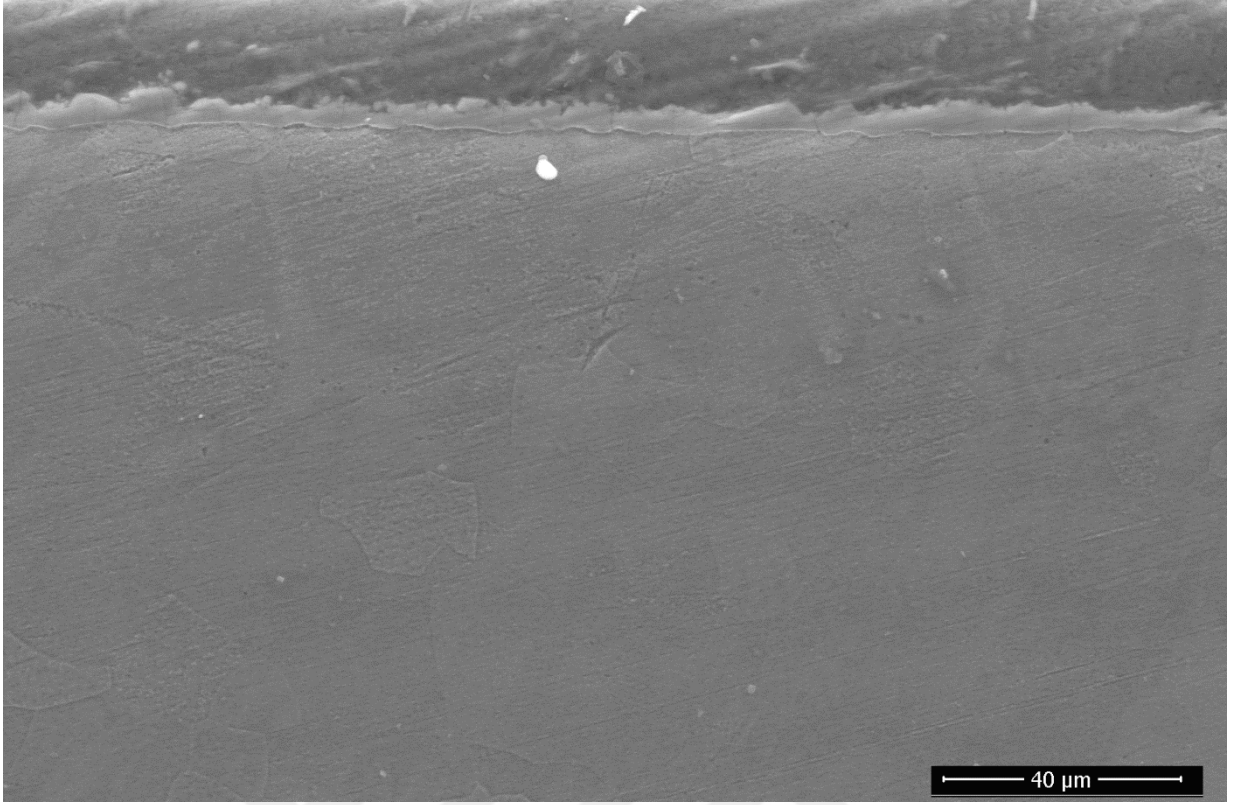


Şekil 4. 4. Mikro vikers sertlik ölçüm noktaları

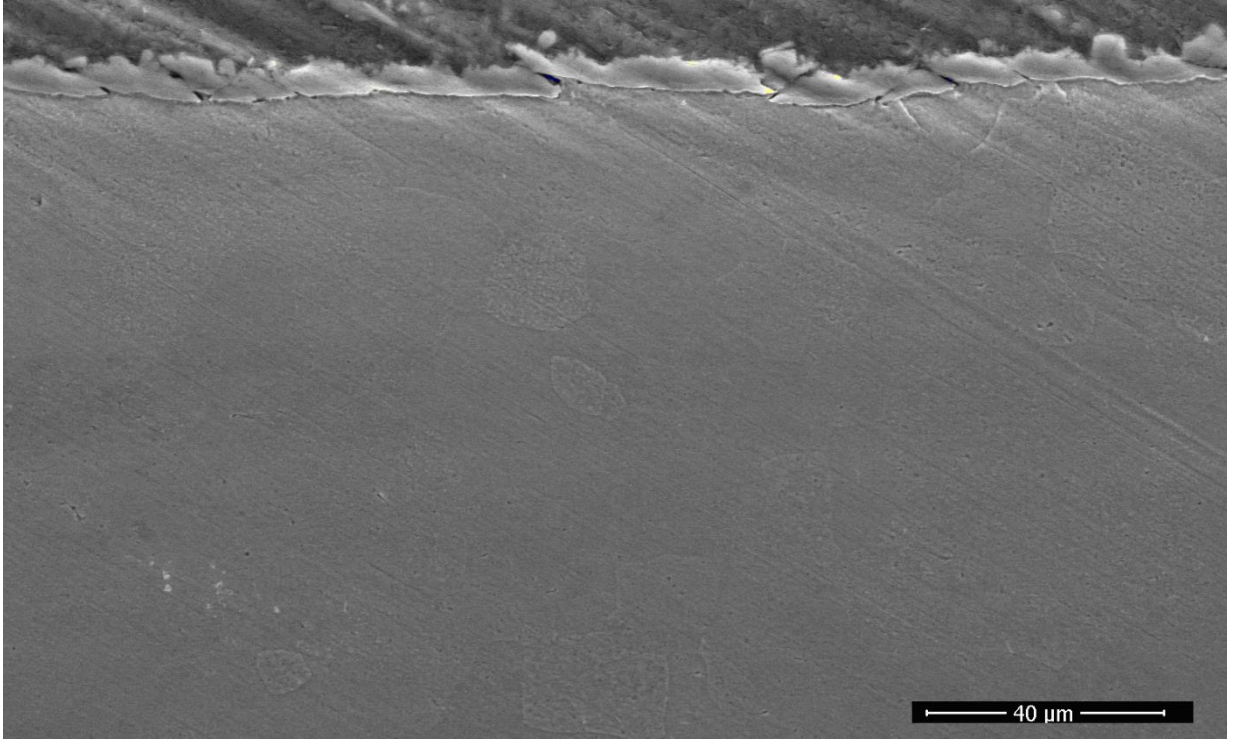


Şekil 4. 5. Micro vikers (HV0.1) sertlik değerleri

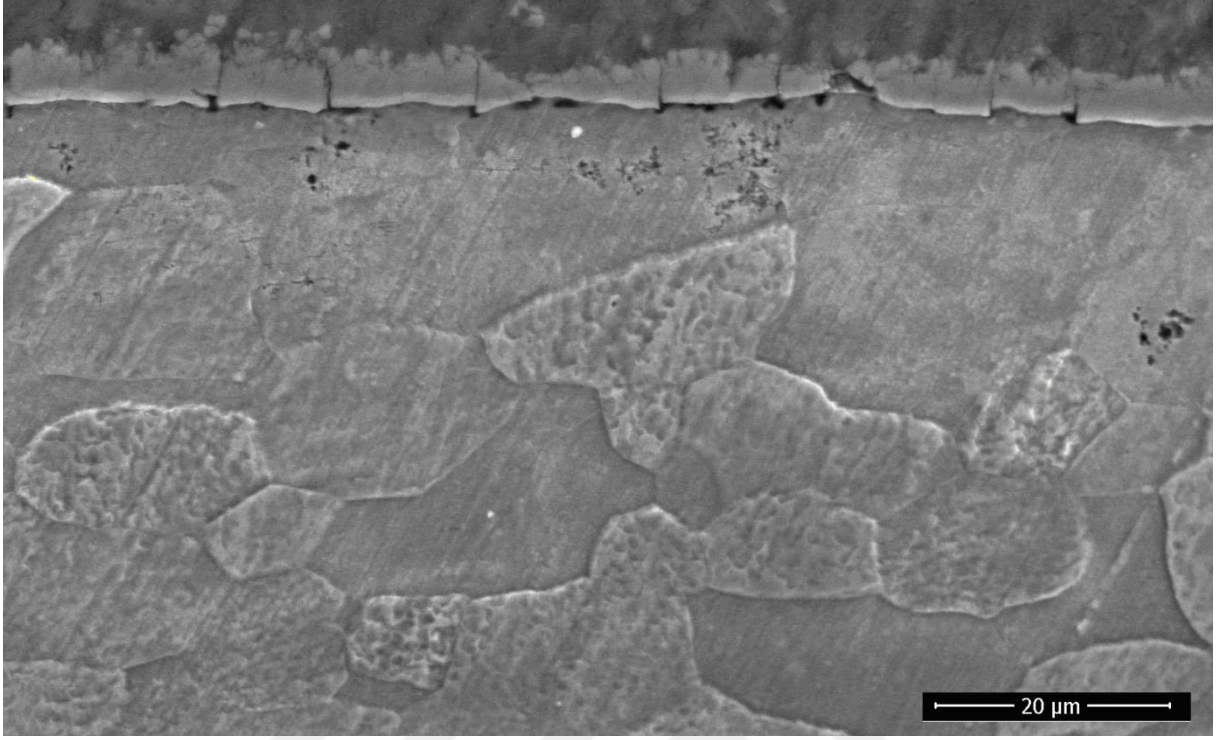
Hidrolik şekillendirilmiş numunelerin mikroskopik analizleri şekil 4.6-4.8’de verilmiştir. Plastik şekil vermenin maksimuma ulaştığı ölçüm noktası 1 için kaplama ve ara yüz bölgesindeki hasar durumu şekil 4.7-4.8’de verilmiştir. Şekillerde artan basınca bağlı olarak kaplama ve ara yüz bölgesinde hasar oluştuğu gözlenmektedir. Kaplamanın form sırasında iç basınç ve sürtünme etkileriyle deforme olduğu tüm şekillerde gözlenmektedir. Analizlerde ortaya çıkan çekme artık gerilmelerinin etkili olduğu form tepe noktalarının aynı zamanda forma bağlı olarak en çok hasara uğrayan noktalar olduğu gözlenmiştir.



Şekil 4. 6. Kaplama bölgesi görüntüsü (Ölçüm noktası 2) 550MPa hidrolik iç basınç altında (2000 x SEM)



Şekil 4. 7. Kaplama bölgesi görüntüsü (Ölçüm noktası 1) 550MPa hidrolik iç basınç altında (2000 x SEM)



Şekil 4. 8. Kaplama bölgesi görüntüsü (Ölçüm noktası 1) 650MPa hidrolik iç basınç altında (4000 x SEM)

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada egzoz borularında kullanılan bağlantı adaptörleri hidrolik şişirme yöntemiyle üretilmiştir. Hidrolik şişirme ünitesi proses parametreleri sonlu elemanlar yöntemi kullanarak belirlenmiştir. Anizotropi etkileri sonlu elemanlar analizlerinde ve şekillendirme sınır eğrileri hesaplamalarında dikkate alınmıştır. Basınç artış hızı, hidrolik basınçlandırma mesafesi, sürtünme katsayısı efektif parametreler olarak belirlenmiştir. Kaynak çarpılmalarından etkilenen boru kenar kısımlarında oluşan elastik geri gelme etkisi, basınçlandırma mesafesinin uygun bir şekilde seçilmesiyle elimine edilmiştir. Boru bağlantı parçalarının analiz sonuçları Swift-Hill hasar kriterine bağlı olarak şekillendirme sınır eğrileri kullanılarak değerlendirilmiştir. Analizlerden elde edilen sonuçlara bağlı olarak üç optimum model belirlenmiş ve hidrolik şişirme ünitesinin tasarımında kullanılmıştır. Çalışmada yüksek deformasyon etkileri sonlu elemanlar analizi ve metalografik analizler yapılarak incelenmiştir. Maksimum çekme artık gerilmeleri en yüksek şekillendirmenin, maksimum plastik genlemenin gerçekleştiği tüp orta noktalarında çıkmıştır. Bu gerilmelerin incelme ve hasar başlattığı bilinmektedir. Gerilmenin en yüksek olduğu bu bölge aynı zamanda en sert bölge bulunmuştur. İncelme oranları maksimum %19,5 değerindedir. Metalografik incelemede kaplama kalınlığının şekil verme işleminde iç basınç ve sürtünme etkisiyle hasara uğradığı gözlenmiştir. Ayrıca kaplama bölgesine yakın kalınlığın incelendiği kısımlarda hasar başlangıç noktaları gözlenmiştir. Çalışmada korozyon direnci yüksek olan Aluzink kaplamaların yüksek deformasyon etkisi altında hasar direncinin kritik olduğu görülmüştür.

KAYNAKLAR

- [1] S.O. Eruslu, I. Dalmis, "Hydroforming analysis of structural steels," *Journal Technical University of Gabrova*, vol. 56, pp. 43-47, 2018.
- [2] M. Koch, T. Altan "Prediction of forming limits and parameters in the tube hydroforming process", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 42, pp. 123-138, 2002.
- [3] P. Ray, "Computer aided optimization of tube hydroforming processes", PH. D. thesis, School of Mechanical and Manufacturing Engineering Dublin City University, 2005.
- [4] S.M.H. Seyedkashi, M.H. Naeini, G.H. Liaghat, M.M. Mashadi, M. Mirzaali, K. Shojaei, Y.H. Moon "The effect of tube dimensions on optimized pressure and force loading paths in tube hydroforming process," *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 26, pp. 1817-1822, 2012.
- [5] C. Yang, G. Ngaile, "Analytical model for planar tube hydroforming: Prediction of formed shape, corner fill, wall thinning, and forming pressure," *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 50, pp. 1263-1279, 2008.
- [6] M. Ahmed, M.S.J. Hashmi, "Estimation of machine parameters for hydraulic bulge forming of tubular components," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 64, pp. 9-23, 1997.
- [7] A. Alaswad, K.Y. Benyounis, A.G. Olabi, "Tube hydroforming process: A reference guide," *Materials and Design*, vol. 33, pp. 328-339, 2012.
- [8] N. Jain, "Modelling and analysis of dual hydroforming process," M.S. Thesis, Texas A-M University Mechanical Engineering, 2003.
- [9] M.D. Islam," Experimental and finite element study of the hydroforming bi-layered tubular component," M.S. Thesis, School of Mechanical and Manufacturing Engineering Dublin City University, 2005.
- [10] P. Thanakijkasem, A. Pattarangkun, S. Mahabunphachai, V. Uthaisangsuk, S. Chtima, "Comparative study of finite element analysis in tube hydroforming of stainless steel 304," *International Journal of Automotive Technology*, vol. 16, pp. 611-617, 2015.
- [11] I.Lorenzo, E. Maspero, M. Strano, "Hydroforming of locally heat treated tubes," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 16, pp. 157-165, 2014.
- [12] G.J. Dong, J. Bi, B. Du, X.H. Chen, C.C Zhao, "Research on AA6061 tubular components prepared by combined technology of heat treatment and internal high pressure forming," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 247, pp. 126-138, 2017.
- [13] M. Anderson, J. Gholipour, F. Bridier, P. Bocher, M. Jahazi, J. Savoie, P. Wanjara, "Improving the formability of stainless steel 321 through multistep deformation for hydroforming applications," *Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering*, vol. 37, pp. 39-52, 2012.
- [14] G.N. Chu, C.Y. Lin, W. Li, Y.L. Lin, "Effect of internal pressure on spring back during low pressure tube hydroforming," *International Journal of Material Forming*, vol. 11, pp. 855-866, 2018.
- [15] A. Abdelkefi, P. Malécot, N. Boudeau, N. Guermazi, N. Haddar1, " On the tube hydroforming process using rectangular, trapezoidal, and trapezoid-sectional dies: Modeling and experiments," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 93, pp. 1725-1735, 2017.
- [16] M.Y. Hwang, Y.K. Lin, "Analysis and finite element simulation of the tube bulge hydroforming process," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 125-126, pp. 821-825, 2002.

- [17] K. Manebe, M. Amino, "Effects of process parameters and material properties on deformation process in tube hydroforming," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 123, pp. 285-291, 2002
- [18] J. Slota, E. Speak, "Comparison of the forming limit diagram (FLD) models for drawing quality (DQ) steel sheets," *Metallurgia*, vol. 44, pp. 249-253, 2005.
- [19] Z. Marciniak, K. Kuczynski, "Limit strains in the processes of stretch-forming sheet metal," *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 9, pp. 609-612, 1967.
- [20] F. Djavanroodi, A. Derogar, "Experimental and numerical evaluation of forming limit diagram for Ti6Al4V titanium and Al6061-T6 aluminum alloys sheets," *Materials and Design*, Vol. 31, pp. 4866-4875, 2010.
- [21] M. Kadkhodayan, H. Aleyasin, "An experimental and numerical study of forming limit diagram of low carbon steel sheets," *Journal of Solid Mechanics*, Vol. 7, pp. 146-157, 2015.
- [22] K. Yoshida, T. Kuwabara, "Effect of strain hardening behavior on forming limit stresses of steel tube subjected to nonproportional loading paths," *International Journal of Plasticity*, vol. 23, pp. 1260-1284, 2007.
- [23] SE Clift, P. Hartley, CEN Sturgess, GW. Rowe, "Fracture prediction in plastic deformation process," *International Journal of Mechanical Science*, vol. 32, pp. 1-17, 1990.
- [24] K.J. Kim, P.F. Thomson, "Springback and side-wall curl of galvanized and galvalume steel sheet," *Journal of Mechanical Working Technology*, vol. 19, pp. 223-238, 1989.
- [25] M.W. Boyles, G.M. Davies, "Through process characterization of steel for hydroformed body structure components," *Journal of Materials & Manufacturing*, vol. 108, pp. 1077-1085, 1999.
- [26] D. Roger, "Tube hydroforming of steel for automotive applications," PH. D. thesis, Swansea University, 2003.
- [27] R. Parisot, S. Forest, A. Pineau, F. Nguyen, X. Demonet and J.M. Mategne "Deformation and damage mechanisms of zinc coatings on hot-dip galvanized steel sheets: Part II. damage modes," *Metallurgical and Materials Transactions*, vol. 35, pp. 813-823, 2004.
- [28] R. Venkataraman, "Effects of coatings properties on the formability of coated sheet steels," PH. D. thesis," Colorado School of Mine Department of Metallurgical and Materials Science, 1989.
- [29] T. Guo, C. Liu, C. Ran, X. Dong, "Effects of spangle size on performances of hot-dip 55%Al-Zn alloy coating," *International Jour. of Electromechanical Science*, vol. 13, pp. 505-519, 2018.
- [30] American Hydroformers, "What Is hydroforming: Tube hydroforming step by step process," Agosto, 2019. Internet Document <https://americanhydroformers.com/what-is-hydroforming/> [Erişim tarihi: 18 Agosto 2019].
- [31] F. Dohmann, CH. Hartl, "Tube hydroforming-research and practical applications," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 71, pp. 174-186, 1997.
- [32] T. Trzepieciniski, H.G. Lemu, "Effect of computational parameters on springback prediction by numerical simulation," *Metals*, vol. 7, pp. 380-394, 2017.
- [33] J.S: Karami, G. Payganeh, M. Khodsetan, "Numerical and experimental study of residual stress measurement and thickness distribution of T-shape steel tube produced by tube hydroforming," *Journal of Modern Processes in Manufacturing and Production*, vol. 5, pp. 87-99, 2016.
- [34] J. Lunqvist "Numerical simulation of tube hydroforming" Licentiate Thesis, Lulea University of Technology Department of Civil and Environmental Engineering Division of Structural Mechanics, 2004.

- [35] F. Abbassi, O. Pantale, A. Zghal, R. Rakotomalala, “Prediction of sheet metal formability (FLD) by using diverse method,” *III European Conference on Computational Mechanics, 2006*, pp. 532-541.



ÖZGEÇMİŞ

Rıza MARANGOZ 1979 yılında TEKİRDAĞ 'da doğdu. 1997-2000, 19 Mayıs Üniversitesi Bafra M.Y. O. Tütün Yetiştiriciliği Ve İşlemeciliği, 2001-2005, Dumlupınar Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Talaşlı Üretim Öğretmenliği, 2015 Trakya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği bölümlerini başarı ile tamamlayarak, 2018 yılında yüksek lisans eğitimine Namık Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Bölümüne başladı. 2017 yılından bu yana Dinex Egzoz Sistemlerinde Tasarım Sorumlusu olarak çalışmaktadır.

