



T.C.
KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



**U Kesitli Metal Körüklerin Hidro Şekillendirme ile İmalatının
DeneySEL ve Sayısal Yöntemlerle İncelenmesi**

Mehmet GÜN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Ekim-2025
KONYA

Her Hakkı Saklıdır
TEZ KABUL VE ONAYI

Mehmet GÜN tarafından hazırlanan “U Kesitli Metal Körüklerin Hidro Şekillendirme ile İmalatının Deneysel ve Sayısal Yöntemlerle İncelenmesi” adlı tez çalışması 26/09/2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Prof. Dr. H. Selçuk HALKACI
(Konya Teknik Üniversitesi)

.....

Danışman

Prof. Dr. H. Selçuk HALKACI
(Konya Teknik Üniversitesi)

.....

Üye

Prof. Dr. Haydar LİVATYALI
(Yıldız Teknik Üniversitesi)

.....

Üye

Doç. Dr. Mevlüt TÜRKÖZ
(Konya Teknik Üniversitesi)

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Mevlüt UYAN
Enstitü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Mehmet GÜN

Tarih: 26/09/2025

ÖZET

YÜKSEK LİSANS

U Kesitli Metal Körüklerin Hidro Şekillendirme ile İmalatının Deneysel ve Sayısal Yöntemlerle İncelenmesi

Mehmet GÜN

Konya Teknik Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. H. Selçuk HALKACI

2025, 71 Sayfa

Jüri

Danışmanın Prof. Dr. H. Selçuk HALKACI
Prof. Dr. Haydar LİVATYALI
Doç. Dr. Mevlüt TÜRKOZ

Körüklü metal borular; titreşimlerin sönümlenmesi, ısı iletiminin artırılması, sıcaklık değişimlerinden kaynaklanan genleşmelerin telafi edilmesi ve ölçme aletleri ile sensörlerde hassas boyut değişimlerinin algılanması gibi farklı amaçlarla yaygın olarak kullanılmaktadır. Körükler, çap, malzeme, cidar kalınlığı ve geometrik özelliklerine bağlı olarak çok çeşitli tiplerde üretilebilmektedir.

Bu yüksek lisans tezinde, sanayide sıklıkla kullanılan körüklü boruların, ülkemizde yaygın olmayan hidro şekillendirme yöntemiyle üretilebilirliği araştırılmıştır. Tüp hidro şekillendirme yönteminde kritik proses parametreleri olan ön şekillendirme basıncı, katlama sıvı basıncı, eksenel ilerleme ve bunların birbirine bağlı değişimlerini ifade eden yükleme eğrileri incelenmiştir.

Yapılan çalışmalarda ilk olarak 16 mm dış çap ve 0,4–0,5 mm cidar kalınlığına sahip ST 37 (S235JR) çelik borular kullanılarak ön deneyler yapılmıştır. Bunun sonucunda; kalınlık/çap oranının yüksek (0,025–0,03) olması, pres kuvvetlerinin yetersizliği nedeniyle başarılı sonuç elde edilmesi zorlaşmıştır. Bunun yanında; kıvrımlı yapıyı oluşturacak kalıp dilimlerinin ara mesafelerinin uzunluğunun borunun üst bölgesindeki yükleme ve basınçlandırma yapılan bölgeden daha kısa olması ilave burkulma yüklerine neden olmuş olup ön deneylerde boru çapında neredeyse 2/1 oranında şişmeler meydana gelmiştir. Aynı boyutlardaki 321 Paslanmaz numunelerde ise doğrudan üst bölgede yırtılmalar meydana gelmiştir. Bu durum sade karbon çeliği ile yüksek

korozyon direncine sahip paslanmaz çelik arasındaki şekillenebilme kabiliyeti farkını ortaya koymaktadır. Yine sade karbon çeliği ile yapılan diğer denemelerde ise borunun boğaz bölgesinin genişlemesi önlenmiş ve körüklü yapının şekillenme başlangıcı elde edilebilmiştir. Son olarak; ön deneyler, yapılan çalışmalarda kalıp tasarımında, figür boşluğunu oluşturacak bölgelerdeki gereksiz hacimsel boşlukların basınçla şekillenme esnasında malzeme kaymasına ve kaçaklarına neden olacağı anlaşılmıştır. Ardından; ön deneylerin ardından çıkarılan sonuçlara göre hataları optimize etmek için genişletilmiş boru boyutlarına göre yeni kalıp tasarımı ve imalatı yapılmıştır. Önceki boyutlara nazaran kalınlık/çap oranı neredeyse 1/3 oranında düşürülmüş olan 0,011 kalınlık/çap oranına sahip olan 25 mm çap ve 0,28 mm kalınlığındaki AISI 316 paslanmaz çelik borular seçilerek başarıya ulaşmak istenmiştir. Körüklü boru üretimi için seçilen ve kısmen daha ince cidarlı olan 316 paslanmaz boru ile imal edilmek istenen boyutlarda ki borunun proses değişkenlerini belirlemek için imalat aşaması önden LS-DYNA sonlu elemanlar yazılımı ile modellenerek simüle edilmiş olup, yükleme eğrileri de benzetimlerde sınımayanılma yöntemiyle belirlenmiştir. Üretilen parçalar tel erozyon yöntemi ile simetri eksenini boyunca kesilmiş, körük profilleri ise optik komparatör, CMM, 2D optik ölçüm cihazı ve form tarayıcı sistemleri kullanılarak ölçülmüştür.

Elde edilen sonuçlar, dip ve tepe kıvrımları ile cidar kalınlıklarındaki değişimlerin tekrarlanabilir olduğunu ve profillerin kabul edilebilir toleranslarda üretilebileceğini göstermiştir. Bir körüklü boru üretimindeki %10' un altı ideal ve kabul edilebilir belirlenen %10-15 kalınlık incilmesi, tepe noktalarında sonlu elemanlar yazılımı sonuçlarına göre %11,7 çıkarken proses sonrası üretilen ürünlerde ise %7-%14 arasında normal değerler arasında ölçülmüştür. Ayrıca; yapılan ölçümlere göre körük kıvrımlarının toplam genişliğinde; kalıp kapanma mesafesi / kıvrım boyu = %80 oranında bir geri yaylanma hareketi görülmüştür. Istampı kuvveti ile uygulanan kapanma yükü ile 14 mm olan genişlik, yük kaldırıldıktan sonra yaklaşık 18 mm' ye genişlemiştir

Anahtar Kelimeler: AISI 316, Cidar İncelmesi, Körüklü Boru, Paslanmaz Çelik, Tüp Hidro-Şekillendirme, Yükleme Eğrisi

ABSTRACT

MS THESIS

Experimental and Numerical Study on the Hydroforming Process for Producing U-Sectioned Metal Bellows

Mehmet GÜN

**Konya Technical University
Institute of Graduate Studies
Department of Mechanical Engineering**

Advisor: Prof. Dr. H. Selçuk HALKACI

2025, 71 Pages

Jury

**Advisor Prof. Dr. H. Selçuk HALKACI
Prof. Dr. Haydar LİVATYALI
Doç. Dr. Mevlüt TÜRKÖZ**

Bellows-type metal pipes are widely used for various purposes, such as damping vibrations, increasing heat transfer, compensating for expansions caused by temperature changes, and detecting precise dimensional changes in measuring instruments and sensors. Bellows can be manufactured in a wide variety of types depending on their diameter, material, wall thickness, and geometric properties.

This master's thesis investigates the feasibility of producing bellows pipes, which are frequently used in industry, using the hydroforming method, which is not widely used in our country. The critical process parameters in the tube hydroforming method, namely pre-forming pressure, folding fluid pressure, axial feed, and the loading curves expressing their interdependent changes, were examined.

In the studies conducted, preliminary experiments were first carried out using ST 37 (S235JR) steel pipes with an outer diameter of 16 mm and a wall thickness of 0.4–0.5 mm. As a result, it was difficult to obtain successful results due to the high thickness/diameter ratio (0.025–0.03) and insufficient pressing forces. In addition, the length of the gaps between the mould segments forming the curved structure being shorter than the loading and pressurisation area at the top of the pipe caused additional buckling loads, resulting in swelling of nearly 2/1 of the pipe diameter in the preliminary tests. In the 321 stainless steel samples of the same dimensions, tears occurred directly in the upper region. This situation highlights the difference in formability between plain carbon steel and stainless steel with high corrosion resistance. In other tests conducted with plain carbon steel, the expansion of the throat region of the pipe was prevented, and the initial formation of the bellows structure was achieved. Finally, preliminary experiments revealed that unnecessary volumetric voids in the areas forming the figure cavity during mould design would cause material displacement and leakage during pressure forming. Subsequently, based on the results obtained from preliminary experiments, a new mould design and manufacturing process were implemented to optimise errors according to the

expanded pipe dimensions. It was intended to achieve success by selecting AISI 316 stainless steel pipes with a diameter of 25 mm and a thickness of 0.28 mm, which have a thickness/diameter ratio of 0.011, reducing the thickness/diameter ratio by almost 1/3 compared to the previous dimensions. To determine the process variables for the pipe dimensions to be manufactured using the selected 316 stainless steel pipe, which is partially thinner-walled, the manufacturing stage was modelled and simulated using LS-DYNA finite element software, and the loading curves were determined in the simulations using the trial-and-error method. The produced parts were cut along the symmetry axis using the wire erosion method, and the bellows profiles were measured using an optical comparator, CMM, 2D optical measuring device, and form scanning systems.

The results obtained demonstrate that the changes in the wall thicknesses at the bottom and top bends are reproducible and that the profiles can be produced within acceptable tolerances. In bellows pipe production, a thickness reduction of less than 10% is ideal and acceptable, while the 10-15% reduction determined as acceptable yielded 11.7% at the peak points according to finite element software results and was measured between 7% and 14% in normal values in the products produced after the process. Furthermore, according to the measurements taken, a springback movement of 80% was observed in the total width of the bellows bends. The width, which was 14 mm under the closing load applied by the stamping force, expanded to approximately 18 mm after the load was removed.

Keywords: AISI 316, Bellows Pipe, Loading Curve, Stainless Steel, Tube Hydroforming, Wall Thinning.

ÖNSÖZ

Bu çalışmanın hazırlanması sırasında yardımlarını, tüm desteğini ve yol gösterici fikirlerini esirgemedi beni yönlendiren danışmanım Prof. Dr. Hüseyin Selçuk HALKACI' ya, beni kendi tez öğrencilerinden ayırmayıp, her konuda yardımcı olan ve bu çalışmanın hazırlanmasına büyük emeği geçen, LS-DYNA ve Metallerde şekillendirme konularda bana yetkinlik kazandıran değerli hocam Doç. Dr. Mevlüt TÜRKÖZ'e ve tezimin her aşamasında yardımlarını esirgemeyen, deneysel çalışmalarda baş başa çalışmaları yürüttüğümüz Arş. Gör. Mevlüt AYDIN' a sonsuz teşekkürlerimi sunuyorum. Ayrıca; prototip süreçleri için yapmış olduğumuz kalıp çalışmalarında desteklerini esirgemeyen YUMAK Otomotiv Mühendislik, Ar-Ge ve Kalıphane ekiplerine şükranlarımı sunuyorum. Son olarak; hep yanımda olan, maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen, ilham kaynağım aileme, tüm hocalarıma ve arkadaşlarıma sonsuz saygı ve teşekkürü borç bilirim.

Mehmet GÜN
KONYA-2025

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
ÖNSÖZ.....	viii
İÇİNDEKİLER	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR	xi
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	4
2.1 Körüklü Borular	5
2.1.1 Körüklü boru çeşitleri	6
2.1.2 Körüklü borularda kullanılan malzemeler	6
2.2 Hidro-Şekillendirme.....	9
2.2.1 Hidro Şekillendirmenin Avantajları.....	10
2.2.2 Hidro Şekillendirme Çeşitleri	10
2.3 Körüklü Boru İmalat Yöntemleri.....	13
2.3.1 Mekanik Yöntem.....	13
2.3.2 Hidrolik Yöntem	14
2.3.3 Körüklü Boruların Hidro Şekillendirme ile İmalatı.....	15
3. MALZEME VE YÖNTEM	22
3.1 Körüklü Boru Ölçülerinin Belirlenmesi.....	25
3.2 Kalıp Tasarımlarının Yapılması ve İmal Edilmesi	27
3.2.1 Alt kalıp.....	30
3.2.1 Üst kalıp	30
3.2.3 Kalıp form diskleri	31
3.2.4 Üst baskı kapağı, disk ayarlayıcı ve hareket merkezleme pimleri	32
3.2.5 Kalıp Parçalarının İmalatı	33

3.3 Malzeme Seçimi ve İmalat Süreçlerinin Belirlenmesi.....	35
3.3.2. Körüklü boru üretiminde kullanılan malzemeler	35
3.3.3 Hidro şekillendirme presi ve operasyonun çalışma prensibi	39
3.4. Sonlu Elemanlar Analizlerinin Yapılması	40
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	42
4.1 Silindirik Tüpe Gelen Eksenel Baskı Kuvvetinin Hesaplanması.....	42
4.2 Sonlu Elemanlar Metodu ile Tasarım Doğrulama ve Parametrelerin Belirlenmesi	45
4.3 Hidro-Şekillendirme Presinin Programlanması ve Yükleme Eğrilerinin Tahmin Edilerek Deneylerin Yapılması	51
4.2.1 Paslanmaz 321’ den körüklü boru oluşumu deneylerin yapılması	51
4.2.2 İmal edilen körüklü boruların kontrol ve ölçümlerinin yapılması	53
4.2.3 ST-37 ‘den körüklü boru üretim deneylerinin yapılması.....	54
4.2.4 AISI 316’ dan körüklü boru oluşumu ve deneylerin yapılması	56
4.2.5 Boru Ölçümlerinin Yapılması.....	64
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	67
KAYNAKLAR	69
EK-1 Körüklü Boru Ölçüm Raporu.....	71

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler;

G_{akma} :	Akma mukavemeti (MPa)
$A_{iç}$:	Boru iç çap alanı (mm ²)
$A_{dış}$:	Boru dış çap alanı (mm ²)
A_{boru} :	Boru basınç uygulama alanı (mm ²)
F_{max} :	Borulara uygulanacak max kuvvet (N)
D :	Boru dış çapı (mm)
t :	Boru cidar kalınlığı (mm)
$D_{iç}$:	Boru iç çapı (mm)
$P_{iç}$:	Şekillenme iç basıncı (bar)
$P_{iç\ st-37}$:	ST-37 malzeme için şekillenme iç basıncı (bar)
$P_{iç\ aisi\ 316}$:	AISI 316 malzeme için şekillenme iç basıncı (bar)
$P_{iç\ aisi\ 321}$:	AISI 321 malzeme için şekillenme iç basıncı (bar)

Kısaltmalar;

FE ve SE :	Sonlu elemanlar metodu
BŞD :	Birim şekil değişimi
NC :	Sayısal Kontrol
HŞ :	Hidro-Şekillendirme

1. GİRİŞ

Titreşimleri sönümlemek, ısı iletimini artırmak, sıcaklık değişmelerinden kaynaklanan uzamaları telafi etmek, ölçme aletlerinde ve sensörlerde hassas boyut değişmelerini hissetmek vb. amaçlarla körüklü borular kullanılmaktadır. Bu iş parçaları çap, cidar kalınlığı ve kıvrım boyutlarına göre çeşitli yöntemlerle üretilebilmektedir.

Teknolojinin gelişmesiyle, hafif malzemelerden karmaşık şekilli, dayanıklı parçaların üretilmesi ihtiyacı doğmuştur. Günümüzde bu tip iş parçalarının üretiminde alışılmamış imalat yöntemlerinden biri olan ve yüksek basınçlı sıvıyla şekillendirme olarak tanımlanabilecek hidro-şekillendirme de kullanılmaktadır.

Konunun Önemi:

Çok kıvrımlı metal körükler daha küçük rijitlik, daha büyük kompanzasyon kapasitesi ve daha uzun kullanım ömrü avantajları nedeniyle, yüksek basınç, yüksek frekanslı titreşim ve büyük eksenel yer değiştirme gibi karmaşık çalışma koşullarında mükemmel performansa sahiptir ve birçok durumda kullanılmaları zorunlu hale gelmiştir. Boru hatlarında, otomotivde, roket motorunda ve mikro-elektromekanik sistemlerde vb. kullanılan elastik bileşenlerdir.

Haddeleme, elektro-şekillendirme, mekanik yöntemler, hidrolik yöntemler vb. çeşitli şekillendirme yöntemleri arasında hidro-şekillendirme, körükleri şekillendirmek için gelişmiş ve tercih edilen bir teknoloji haline gelmiştir. Günümüzde yüksek verimlilik ve esneklik avantajları nedeniyle roket motorlarından petrol borulama sistemlerine kadar birçok yerde körüklü borular kullanılmaktadırlar. Körükler tek kıvrımdan oluşabildiği gibi kullanım yerlerine göre çok kıvrımlı olabilmektedir. Ayrıca körük kesitleri U, S, Omega vb. şekillerde olabilmektedir. Körük imalatında incelmeler, katlanmalar ve çatlamlar gibi çok farklı hasarlar oluşabilmektedir. Özellikle çok kıvrımlı körük imalatı için üretim tipleri ve proses parametrelerinin belirlenmesi titizlikle yapılması gerekmektedir.

Basınçlı akışkan ile şişirme işlemleri tüplerin şekillendirilmesinde yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Şekillendirme işleminin başlangıcında, şişirilecek tüp (boru) katlamalı şekilde kıvrım profilli yapılmış olan kalıbın içine yerleştirilerek kalıp kapatılır. Kalıbın kapanmasıyla tüp içerisine basınçlı sıvı veya akışkan gönderilerek basınç uygulanır. Sıkışan akışkan tüpü şekillendirerek kalıbın şeklini almaya zorlanır. Kalıbın açılmasından sonra is parçası içerisine sıkışmış akışkan akar daha sonra kıvrımlar kapanarak son formu alır. Geleneksel yöntemlerde çok sayılı operasyonlu körüklü boru

imalatında, hidro-şekillendirme de olduğu gibi tek kademede, malzemede deforme olmaksızın istenilen bükümü elde etmek mümkün olmayacaktır.

Körüklü borular Şekil 1.1’de görüldüğü gibi çoklu enine oluklara sahip, silindirik ince duvarlı kıvrımlı bir kabuk yapı veya genleşme derzleri olarak da bilinen dalga şekilli borulardır. Körükler elastiktir ve basınç, aksel kuvvet, enine kuvvet veya eğilme momenti etkisi altında elastik olarak yer değiştirme kabiliyetine sahiptir. Körükler Amerika’da yaygın olarak oluklu boru veya oluklu kutu (corrugated tubes or corrugated boxes), Avrupa’da metal körük olarak adlandırılır. Mükemmel performansı nedeniyle otomatik kontrol ve ölçüm cihazlarında, vakum teknolojisinde, mekanik endüstrisinde, elektrik endüstrisi, ulaşım ve atom enerjisi endüstrisinde ve hassas bileşenler, şok emme bileşenleri, eş merkezli olmayan aksel tahrik bileşenleri, dengeleme bileşenleri, sızdırmazlık bileşenleri, valf bileşenleri ve boru hattı bağlantıları gibi diğer alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır.



Şekil 1.1 Hidro-şekillendirilmiş körüklü boru örnekleri (cctcl.com)

Farklı metal malzemelerin uygulama ve performanslarına göre metal körükler seçilmelidir. Metal körüklerin ortak malzemeleri karbon çeliği, bakır, paslanmaz çelik, çelik astarlı plastik, alüminyum, titanyum ve benzeri olarak bilinmektedir. Metal körükler, borunun dışına basınç uygulandığında sıkıştırılabilen veya uzatılabilen elastik borulardır. Serbest bırakılan basınç ve malzeme akma dayanımının üzerinde gerilmeye maruz kalmadığı sürece, körükler orijinal şekline dönecektir. Metal körükler esas olarak küçük bükülme yarıçapı, düzensiz dönüşler, borulardaki ısı geçişinin artırılması, termal etkilerden kaynaklanan uzunluk değişimlerinin telafisi vb. yerlerde kullanılır (Anonymous 1, 2019).

Bu tezin amacı sanayide kullanılan körüklü boruların hidro-şekillendirme yöntemiyle üretilmesidir. Körüklü borular çap, kalınlık, malzeme, körük yapısı ve boyutlara göre çok değişken tiplerde olabilmektedir. Hidro-şekillendirme yöntemiyle körüklü boru imalatında proses parametreleri olan; ön şekillendirme basıncı, katlama sıvı basıncı, eksenel ilerleme ve bunların proses sırasındaki birbirlerine bağlı olarak değişmelerini ifade eden yükleme eğrileri belirlenmelidir.

Bu çalışmada çok körüklü çelik boruların Hidro-şekillendirmeyle imal edilmesi hedeflenmektedir. İkinci bir hedef yükleme eğrilerinin belirlenmesidir. Bu eğrilerin deneylerle belirlenebilmesi neredeyse mümkün değildir ve mutlaka simülasyonlardan yararlanmak gerekir. Deneylerle uyumlu olan başarılı analizlerin gerçekleştirilmesi durumunda körüklü boru imalatında kullanılan farklı malzemeleri kapsayacak tarzda sonuçların genelleştirilmesi de hedeflenmektedir.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Yuan vd. (2021) yaptıkları çalışmada, güçlendirilmiş S-biçimli sekiz sayısına benzer formda olan bir körüklü boru tasarımını ele almışlardır. Körük dalgalarının, iki dairesel teğetsel formunun daha yüksek basınç dayanımları olduğu sonucuna varılmış ve teorik hesaplarla da körük formunun dayanıma etkisinin doğrulaması yapılmıştır. Çalışmada, güçlendirilmiş körükler 304 paslanmaz çelikten imal edilmiştir. Subramanian vd. (2021) Entegre Türbin Ünitesinin Bir Genleşme Körüğünün Arıza Nedeni Analizi adlı çalışmalarında; hidro-şekillendirme ile imal edilmiş ve 316 L paslanmaz çelikten yapılmış bir genleşme dersindeki kırılmayı incelemiştir. Yapılan incelemeler sonucunda kırılmanın körük bölgesinden başladığını ve termal etkilerden daha çok genleşme yoğunlaşma sonrasında körük dip noktalarında oluşabilen su birikintilerinin sebep olduğu korozif çatlaklardan ya da hidro şekillendirme esnasında kalmış gerilme yığılmalarından kaynaklı olduğu tespit edilmiştir. Çeşitli şekillerde boru şeklindeki körüklerin oluşturulması için tek adımlı bir hidro şekillendirme süreci isimli deneysel çalışmada Kang vd. (2007); tek adımlı bir hidro-şekillendirme işleminde çatlaksız, sağlam metalik boru körükler üretmek ve yüksek kaliteli bir ürün elde etmek için iç basıncın kontrolünün aksel besleme ile birlikte gerekli olduğunun ve sürtünme koşulları yani uygun bir yağlayıcı kullanımının da önemini vurgulamışlardır. Safari vd. (2019) Metal körüklü borularda proses parametrelerini inceledikleri ve çok amaçlı optimizasyon yaptıkları çalışmada, metalik körüklerin hidro şekillendirme deneyler yapmışlardır. Bu amaçla, yanıt yüzey yöntemi (RSM) kullanılarak, ana proses parametrelerinin ve bunların etkileşimlerinin hidroformlu metalik körüklerin özellikleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Girdi değişkenleri olarak iç basınç, kalıp stroku ve kalıp dolgusu seçilmişlerdir. Sonuç olarak, kıvrım yüksekliğindeki artışın ve körük kıvrımı üst noktasının kalınlığındaki azalmanın iç basıncı ve kalıp vuruşunu artırarak gerçekleşeceğini göstermektedir. Ayrıca, körük üst noktasının kıvrım yüksekliği ve kalınlığının, kalıp dolgusundaki artışla artacağı görülmüştür. Supriadi vd. (2020) çalışmalarında körüklü boru imalatında fireyi azaltmak ve körüklerin boyut doğruluğu ve tekrarlanabilirliğini iyileştirmek için yarı kalıpsız körük şekillendirme için görüntü tabanlı bir bulanık kontrol sistemi geliştirilmiştir. Sonlu elemanlar analizinin de bu süreç için uygun kontrolü sağladığını gözlemlemiştir.

Çok kıvrımlı metalik körüklerde kıvrımlar arasındaki karmaşık kısıtlama etkileri nedeniyle hidro şekillendirmede, gerilme konsantrasyonu ve buruşma ve kırılma gibi kusurlar kolaylıkla meydana gelebileceği bilinmektedir (Jing vd., 2020, Kang vd. (2007). Araştırmacılar ABAQUS platformu, dört kıvrımlı U-şekilli metalik körüklü hidro biçimlendirmenin bir 3D-FE modeli ile analiz etmişlerdir. Deney sonucunda; farklı tabakaların duvar incelme derecelerinin hidroformlamadan sonra değiştiği bulunmuştur, incelmeler iç kıvrım için en büyük ve dış kıvrım için ise en küçüktür. Ayrıca; geri yaylanma değerleri, iç kıvrımda dış kıvrımdan daha küçüktür ve iç basınçta bir artış ve kalıp boşluğunun fazla olması, maksimum duvar incelme derecesine ve geri yaylanma artışına neden olduğu anlaşılmıştır. Eşit Et Kalınlığına Sahip Mikro Boyutlu Spiral Borunun hidro-şekillendirilmesinde, Huo vd. (2021) küçük boyutlu spirallerin normal sıcaklıkta ve yüksek sıcaklıkta (700 C°) hidro-şekillendirilmenin avantajlı olduğu gösterilmiştir. Malzeme mekanik özelliklerine göre deney ve şekillendirme işleminde, hidroformlu spiral borunun farklı sıcaklıklarda sonlu eleman modeli oluşturulmuş olup, kullanılan 700 C°'lik sıcaklığın kalınlık eşitliğindeki olumlu etkileri anlatılmıştır.

Çok kıvrımlı körüklerde kalıntı gerilme analizi ve ölçümünün yapıldığı bir çalışmada Lin vd. (2021) kalıntı gerilmenin varlığı, körüğün korozif özelliği ve şişirme performansı üzerinde bir etkisi olduğu tespit edilmiş ve sonlu eleman modeli ile nikel alaşımlı çok kıvrımlı körüğün şekillendirmesindeki kalıntı gerilme simüle edilmiştir. Sonuç olarak; hidro-şekillendirme ile elde edilen körüğün tabaka sayısı ve şekillendirme basıncının artık gerilme üzerindeki etkileri tartışılmıştır. Çok kıvrımlı uygulamalarda imalat esnasında körük daha az şekillendirme basıncına sahip ise daha düşük şekillendirme artık gerilimi elde edilebilir olduğu belirtilmiştir.

2.1 Körüklü Borular

Metalik körükler aynı zamanda genleşme veya genleşme derzleri olarak da bilinen dalga şekilli borulardır. Bu körükler, borunun dışına basınç uygulandığında sıkıştırılabilen veya uzatılabilen elastik borulardır. Serbest bırakılan basınç ve malzeme akma dayanımının üzerinde gerilmediğinde, körükler orijinal şekline dönecektir. Metal körükler esas olarak; küçük bükülme yarıçapı, düzensiz dönüşler, boruların termal deformasyonlarının yayılması, sabit dirsekler vb. hususunda avantaj sağlamaktadır. Şekil 2.1 de hidro şekillendirilmiş bakır ve çelik borular görülmektedir.



Şekil 2.1 Bakır ve Çelik Hidro Şekillendirilmiş Boru

2.1.1 Körüklü boru çeşitleri

Oluklu borular kullanım alanında esas olarak; metal körükler, **körüklü genişleme derzleri**, oluklu ısı eşanjör boruları, diyafram kutuları ve metal hortumlarını içerir. Metal körükler esas olarak boru hatlarının termal deformasyonunu, şok emilimini ve oturma deformasyonunu telafi etmek için petrokimya, enstrümantasyon, havacılık, kimya, elektrik, çimento, metalurji ve diğer endüstrilerde yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Plastik ve diğer malzemelerden yapılmış körüklü borularda çok farklı amaçlarla kullanılmaktadır. Şekil 2.2 de kullanım alanlarında örnekler verilmiştir. Körükler, bileşim malzemelerine göre metal ve metal olmayan körük olarak, yapılarına göre de tek katmanlı ve çok katmanlı olarak ayrılabilir. Tek katmanlı körükler yaygın olarak kullanılmaktadır. Çok katmanlı körükler, önemli ölçümlerde kullanılan yüksek mukavemete, iyi dayanıklılığa ve düşük gerilmeye sahiptir. Körüklerin malzemeleri bronz, pirinç, paslanmaz çelik, titanyum alaşımı ve nikel alaşımıdır. (Anonymous, 2009).

2.1.2 Körüklü borularda kullanılan malzemeler

Endüstride metal, kauçuk, kompozit, PTFE ve kumaş dahil olmak üzere birçok farklı körüklü boru türü bulunmaktadır. Hangi hortum tipinin kullanılacağına karar vermek, hortumun kullanıldığı uygulamaya bağlıdır. Körüklü metal borular diğerlerine



Şekil 2.2 Körüklü Boru Bazı Kullanım Alanları

nazaran daha çok kullanılmaktadır. Genel olarak, metal hortum kullanması durumunda dikkat edilmesi gereken 8 madde bulunmaktadır. (Anonymous, 2019)

1. Aşırı Sıcaklıklar: Hortumdan geçen ortamın sıcaklığı veya çevredeki atmosfer sıcaklığı çok soğuk ve sıcaksa, bu şartlara dayanabilen tek malzeme metaldir.
2. Kimyasal Uyumluluk: Metal hortum, diğer hortum tiplerinin çoğundan daha çeşitli kimyasalları işleyebilir. Hortum agresif kimyasallara (iç veya dış) maruz kalacaksa, metal hortum düşünülmelidir.
3. Geçirmezlik: Metal olmayan hortum, hortum duvarından atmosfere gaz geçişine karşı hassastır. Metal hortum ise geçirgenliğe izin vermez. Gazların hortumun içinde tutulması önemliyse metal hortum gerekebilir.
4. Ağır Arıza Potansiyeli: Metal bir hortum arızalandığında genellikle küçük delikler veya çatlaklar oluşur. Ani bir hortum arızası potansiyel olarak felaket ise, metal bir hortum, ürünü daha yavaş bir hızda sızdırarak arızanın etkilerini en aza indirmeye yardımcı olabilir.
5. Aşınma ve Aşırı Eğilme Durumları: Aşınma ve aşırı bükülmeyi önlemek için, teller ve hatta diğer hortumlar üzerinde koruyucu bir kapak olarak kullanılabilir.
6. Yanmazlık: Diğer hortum türleri ateşe maruz kaldığında erir, metal hortum ise 1300° F'ye kadar bütünlüğünü korur.

7. Verimli Vakumlama: Tam vakum altında metal hortum şeklini korurken diğer hortum türleri çökebilir.
8. Kolay Montaj ve Esneklik: Metal hortuma hemen hemen her tür bağlantı takılabilir, diğer hortum türleri ise özel saplar ve bilezikler gerektirir.

Mükemmel performansı nedeniyle otomatik kontrol ve ölçüm cihazlarında, vakum teknolojisinde, mekanik endüstrisinde, elektrik endüstrisi, ulaşım ve atom enerjisi endüstrisinde ve hassas bileşenler, şok emme bileşenleri, eş merkezli olmayan eksenel tahrik bileşenleri gibi diğer alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Dengeleme bileşenleri, sızdırmazlık bileşenleri, valf bileşenleri ve boru hattı bağlantıları. Farklı metal malzemelerin uygulama ve performanslarına göre metal körükler seçilmektedir. Metal körüklerin ortak malzemeleri karbon çeliği, bakır, paslanmaz çelik, çelik astarlı plastik, alüminyum, titanyum vb. Bazı alaşımlar ve özellikleri aşağıda verilmiştir (Anonim, 2009).

Paslanmaz çelikler;

Körükler SUS321 G - 194 °C ~ + 400 °C çok yüksek eğilme yorulma mukavemetine ve korozyon direncine, iyi kaynak performansına sahiptir, aşındırıcı ortam, sızdırmazlık, bağlantı ve dengeleme elemanı ölçüsü olarak kullanılabilir. Yaygın markalar 304, 304L, 316, 316L, 317L, 310S, 321, vs.'dir. 6SMO, 254L, N904 veya N08367 gibi 08926Mo özel paslanmaz çeliğin (süper paslanmaz çelik) daha özel, yüksek korozyona dayanıklılığı vardır. Dupleks paslanmaz çelik, yüksek mukavemet ancak zayıf uzama sunar, küçük körükler için tavsiye edilmez, büyük körük işleme teknik koşullara göre düşünülebilir. Panda ve ark, (2014) korozyon mukavemeti ile ilgili çalışmalar yapmıştır.

Bakır alaşımları;

Kalay bronz C51900 ~ 0.1 X - 60 °C ~ + 100 °C metal körüklü boru mükemmel esneklik ve mukavemeti birleştirdi, iyi bir lehimleme ve korozyona dayanıklı performansa sahiptir. Histerezis ve elastik ikincil etki küçüktür ve ölçüm elemanları olarak yaygın şekilde kullanılır.

Pirinç Körükler C24000 H - 60 °C ~ + 100 °C düşük elastikiyet, büyük histerezis ve son etkiye sahip, lehimleme cinsiyeti iyidir. Koroziif olmayan ortamlar için kullanılabilir ve ölçüm elemanı olarak cihazda hassasiyet yüksek değildir.

Berilyum bronz Körükler C17510 P - 60 °C ~ + 150 °C, manyetik olmayan, çok küçük bir histerezise ve elastik ikincil etkiye, yüksek esnekliğe, korozyon direncine sahiptir, yüksek hassasiyetli ölçüm cihazı için kullanılır.

Nikel bazlı alaşımlar;

Yüksek korozyon ve yüksek sıcaklık koşulları, klorür iyonlarına, deniz suyuna, aside, alkali korozyona ve yüksek nikel alaşımı, Incoloy 800, Inconel 825 gibi nikel ferrokrom alaşımları gibi yüksek sıcaklığa dayanıklı alaşımlı malzemelere karşı direnci dikkate almalıdır., Monel625 ve alaşım c-400.

Titanyum alaşımlar;

Genellikle saf titanyum Gr.1'dir. Dikkate alınması gereken zayıf kaynak performansı ile yüksek uzamaya sahiptir.

2.2 Hidro-Şekillendirme

Hidro şekillendirme; temel olarak metal sac veya tüp malzemenin akışkan bir ortam vasıtasıyla (su, viskoz, polimerik malzeme, vs.) kapalı bir kapta şekillendirilmesidir. İlk olarak 1890'larda ortaya çıkmış ancak asıl kullanımı II. dünya savaşı sonrasında gerçekleştirmiş bir imalat yöntemidir. İlk araştırmalar Almanya' da havacılık sektöründe ve Japonya'da gerçekleştirilmesine rağmen günümüzde Amerika, Rusya, Fransa, İsrail, Türkiye gibi değişik ülkelerde gerek üniversite gerekse özel araştırma birimlerinde yoğun bir şekilde konu üzerinde çalışılmaktadır. Yöntem, yeterli bilgi birikimine ulaşılamamış olmasından ve bazı teknik zorluklardan ötürü 1990'lara kadar gereken ilgiyi görmemiştir. Bu yıllardan sonra ise özellikle otomotiv, havacılık, mobilya, gıda sanayi gibi birçok endüstri dalında kullanılmaktadır.

Çeşitli endüstri dallarında kullanılan malzemelerin hem hafif hem de dayanıklı olması istenmektedir. Geleneksel çekme yöntemleri ile bu ihtiyaca yönelik ürünlerin üretilmesinde birçok problemler yaşanmaktadır. Malzeme özellikleri itibarıyla, mekanik

yöntemlerle yapılan şekillendirmelerde yaşanan kısıtlamalar ve meydana gelen problemler, daha iyi sonuçlar veren metotların araştırılmasına sebep olmuştur.

Hidro şekillendirme, uygulama alanı fazla olan üretim yöntemlerinden birisidir. Tüp malzemelerin kullanıldığı bütün endüstri dallarında hidro şekillendirme yöntemi uygulanmaktadır. Bu endüstri dalları sıralanırsa Uzay ve havacılık sanayi, Otomotiv sanayi, Tarım araçları, Enerji, Aydınlatma, Sağlık, Eğlence, Ofis ve dış mekân mobilya sanayi, Metal şekillendirme, Plastik enjeksiyon kalıp ekipmanları, Üretim ve imalat sanayi, Yemek sanayi vb.

2.2.1 Hidro Şekillendirmenin Avantajları

Hidro şekillendirmede üretilen parçaların **mukavemetleri de yüksektir**. Üretilen parçanın geometriki doğruluğu oldukça yüksek olup **yüzey pürüzlülüğü** de bir hayli düşüktür. Böylece bu yöntemle hassas ve kaliteli ürünler elde edilebilir. Hidro şekillendirme uygulamaları ile üretilen malzeme hem zaman hem de enerji bakımından ciddi kazançların elde edilmesini sağlar (Aydın vd., 2009).

Hidro şekillendirme;

- Esnekliği ve çevrim ömrünü artırır.
- Duvar kalınlığını eşitliğini korur.
- Konsantre artık stresi azaltır.
- İş sertleşmesini en aza indirir.
- Temiz bir prosestir;
- Hidro şekillendirme de basıncını oluşturmak için su kullanır, diğer çoğu işlem ise yağlama gerektirir. Şekil 2.3’de hidro şekillendirme ile imal edilmiş parçalar görülmektedir.

2.2.2 Hidro Şekillendirme Çeşitleri

Genel olarak hidro şekillendirme iki gruba ayrılmaktadır;

Tüp hidro şekillendirme.

Sac hidro şekillendirme.

Tüp Hidro Şekillendirme

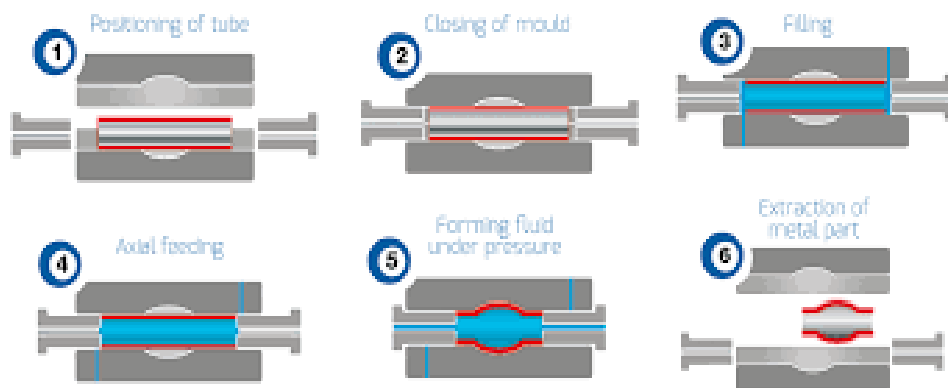
Tüp hidro şekillendirme, iki ucu açık boru malzemenin iç yüzeyine uygulanan akışkan basıncıyla malzemenin şeklinin değiştirilmesidir. Şişirme ile şekillendirmeye



Şekil 2.3 Hidro-şekillendirilebilir parçalar (Isprf.com)

benzerlik göstermektedir. Tüp hidro şekillendirmede zımba yerine akışkan sıvı kullanılmaktadır.

Malzemeye uygulanan iç basınç ile tüpün yüzeysel genişmesi sağlanmaktadır. Bu genişleme eksenel yönde sıfırdır. Başlangıçta tüp daireselliğini korumakla beraber çapında büyüme meydana gelmektedir. Tüp malzeme iki kalıp yarımı arasına yerleştirilir. Malzemedeki genişleme bu kalıp yarımına doğru gerçekleşmektedir. Şekil 2.4’de tüp hidro şekillendirme için işlem basamakları gösterilmiştir. Tüp hidro şekillendirmede değişik seviyeli akışkan basıncı kullanılmaktadır. Akışkan basıncı kalıbın kapanması aşaması boyunca kullanılır. Bu basınca Kalıp Kapanma Basıncı denir. Tüp malzeme kalıp kapandıktan sonra iki uçtan uygulanan kuvvetle kalıp içine itilir. Böylece Eksenel



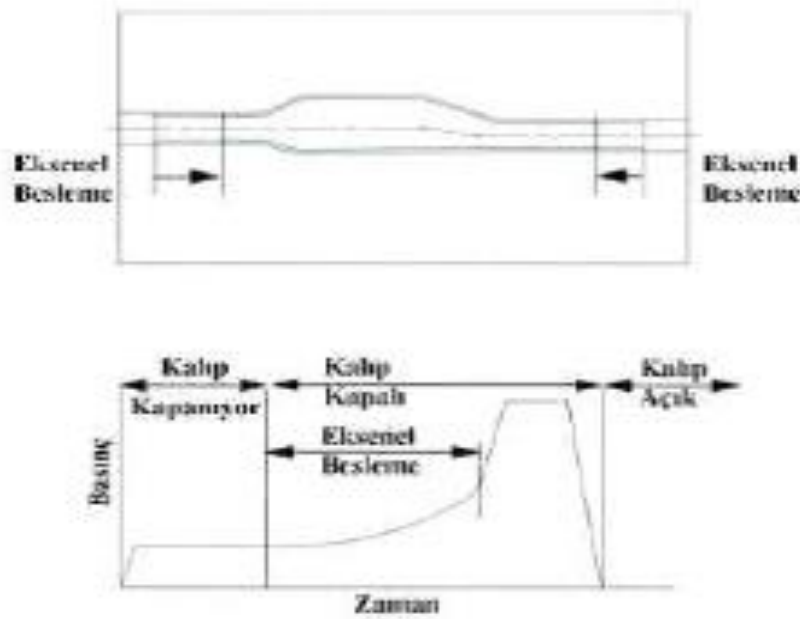
Şekil 2.4 Tüp hidro şekillendirme şematik gösterim

Besleme etkisi oluşturulmaktadır. Eksenel beslemeden sonra tp içerisindeki basınç Şekillendirme için gerekli olan maksimum seviyeye arttırılır. Bu basınç genellikle Kalibrasyon Basıncı olarak adlandırılır. (Aydın vd. 2009)

Hidro Őiřirmeyle Şekillendirme

Hidro Őiřirmede, düşük ve yüksek basınçlı Őekillendirmelerden farklı olarak, tüpün yzeyssel genleşmesi tamamen kalıp kapalı iken gerçekleşmektedir. Akışkan içerisindeki basınç sıralı bir Şekilde artmaktadır. Bu yöntemle T ve Y birleştirmeli tp malzemelerin üretilmesi mümkündür. Şekil 2.5’de hidro Şişirme boyunca basınç sıralaması gösterilmiştir. (Aydın, vd., 2009)

Son besleme işlemi parçanın Őekillene bilirliğini oldukça arttırmaktadır. Büyük gerilmeler i basınç tarafından, kesit çevresinde meydana gelirken, en düşük gerilme, eksenel kuvvet tarafından tp malzemenin uzunluğu boyunca uygulanır. Son besleme ve i basınç, Şekillenme limit diyagramında kalınlık değişiminin sabit bir çizgi seklinde



Şekil 2.5 Hidro Şişirme prosesi sıralaması

kalması için kontrol edilir. Sabit kalınlık çizgisi ne kadar uzunluktaysa kesit sekline ve genişleme miktarına bağlı olarak işlem ilerletilebilir. Uzunluk boyunca sıkıştırıcı kuvvetlere karşı çıkan kısmi dayanımın oluşması ve kesit genişlemesinden dolayı geometride değişiklikler meydana gelebilir. Şekil 2.6’da yırtılmış ve deforme olmuş örnek numuneler bulunmaktadır. (Jing vd., 2020)



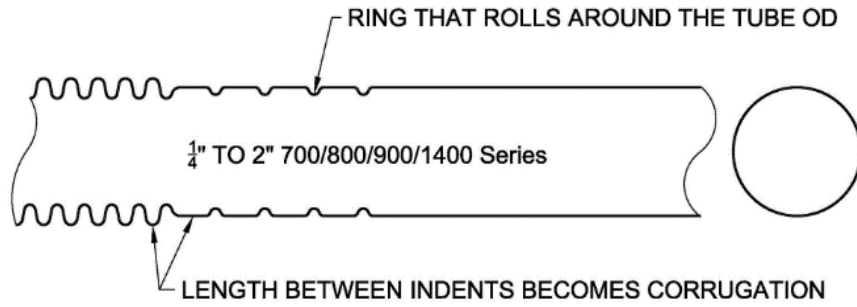
Şekil 2.6 Geometriden dolayı genişleyen parçalar

2.3 Körüklü Boru İmalat Yöntemleri

Üç temel körüklü boru imal etme yöntemi vardır; mekanik şekillendirme, hidrolik şekillendirme ve hidro şekillendirme. Her üç işlemde de körük kıvrımlarını oluşturmak için birçok benzerliğe ve birkaç temel farklılığa sahip makineler kullanılır. Her işlemin nihai ürünü etkileyen avantajları ve dezavantajları vardır. Dolayısıyla süreçler körük boyutlarına göre seçilebilir.

2.3.1 Mekanik Yöntem

6 ila 50 mm çaplarında ve genellikle daha kalın körüklerin imalatında kullanılan bu yöntem de Şekil 2.7’de görüldüğü gibi makineye beslenen boru etrafında bir halka dönerek düzenli aralıklarla hafif girintiler oluşturur. Daha sonra bu girintilere yerleştirilen yarım çember şeklinde iki takım çene kullanılır. Bu çenelerden biri sabit kalırken diğeri eksenel yönde hareket edip olukları oluşturur. Yani aralıklar oluklar arasında vadiler haline gelecektir. Böylece ilk oluşturulan izler arasındaki mesafe

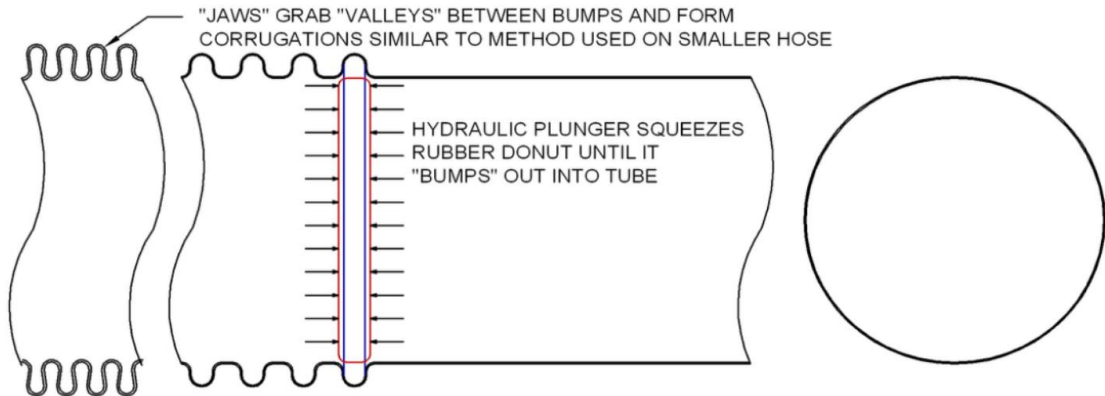


Şekil 2.7 Mekanik yöntemle körük üretimi

artırılarak oluk yükseklikleri ayarlanabilir. Herhangi bir sıvı kullanılmadığı için ayrıca temizliğe gerek duyulmaz. Benzer tipte geliştirilen bazı mekanik yöntemlerde ilk iz yapılmadan da oluklar oluşturulabilir. Bu yöntemler daha ince cidarlı ve çapları büyük körüklerde kullanılabilir. Bazı videolarda ([How is a metal bellows made. See with JINGNING. - YouTube](#)) sacdan önce boru imal edilip kaynatılmakta ve direkt olarak körükler şekillendirilmektedir (Anonim, 2020).

2.3.2 Hidrolik Yöntem

Metal körüklerin çapı arttıkça ve çapına oranla duvar kalınlığı çok ince ise bu durumda Şekil 2.8’de gösterilen kırmızı şekilli kauçuğa her iki taraftan hidrolik basınç uygulanarak ilk form verilir. Sonra mekanik yöntemdeki gibi iki çeneyle aksel olarak sıkıştırılıp körükler oluşturulur bu sırada içeride hidrolik basınç olduğu için daha büyük



Şekil 2.8 Hidrolik yöntemle körük üretimi

boyutlarda körük elde edilebilir. Bu yöntemde piston üzerindeki basınç kaldırıldığında, kauçuğunun elastik yapısı orijinal şekline geri dönmesini sağlar. Tüp daha sonra belirli bir mesafe ilerler ve işlem tekrarlanır. Bu şekilde tek tek oluklar oluşturulur (Anonim, 2020).

2.3.3 Körüklü Boruların Hidro Şekillendirme ile İmalatı

Yapılan tez çalışmasında körüklü boruları hidro şekillendirme ile imalatı üzerinde durulacağı için bu yöntem detaylıca anlatılacaktır. Hidro şekillendirme genel olarak tasarım esnekliğini sağlar ve çevrim ömrünü artırır, duvar kalınlığını korur, gerilme yığılmasını azaltır, artık stres ve deformasyon sertleşmesini en aza indirir. Hidro şekillendirme, su vb. sıvılar kullanan temiz bir işlemdir. Özetlenirse;

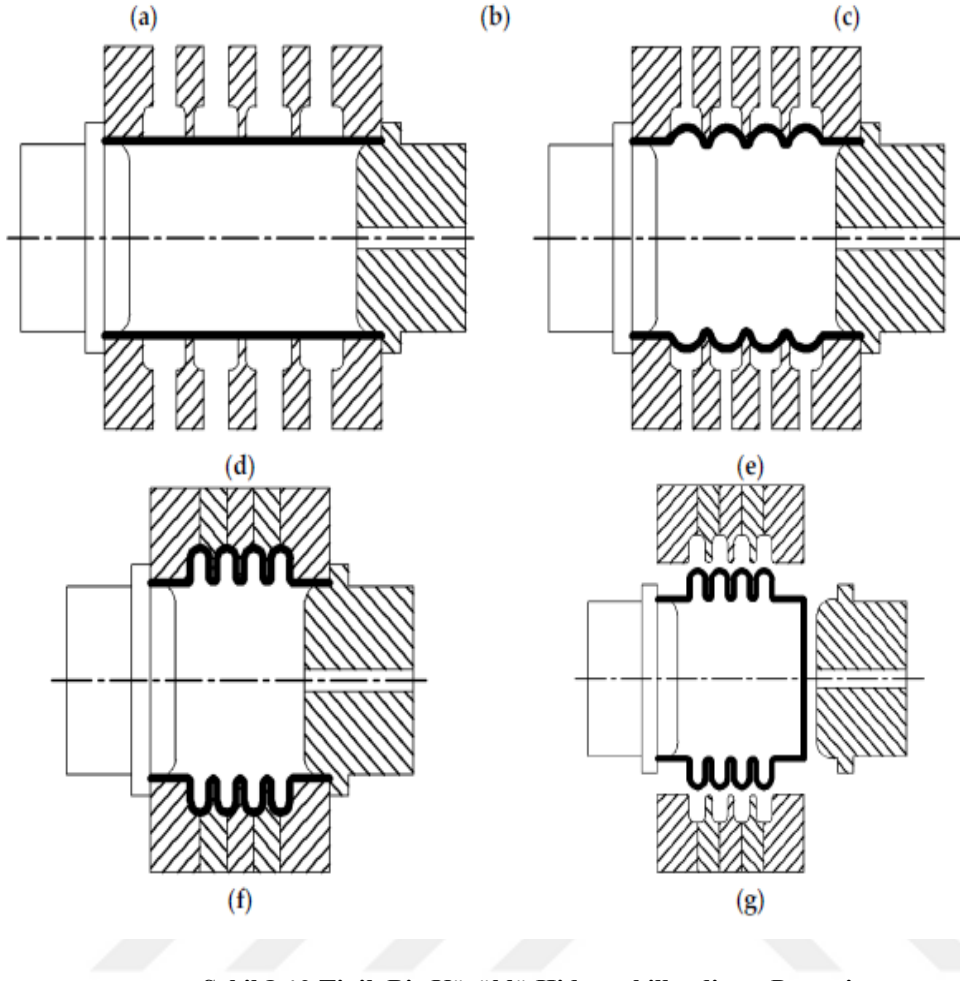
- Esnekliği ve çevrim ömrünü artırır.
- Daha homojen cidar kalınlığı oluşur.
- Gerilme yığılması ve artık stresi azaltır.
- Deformasyon sertleşmesini en aza indirir.

Şekil 2.9’da örnekleri görülen körüklü parçaların, hidro şekillendirme yöntemi ile



Şekil 1.9 Körüklü Hidro şekillendirme Prosesi ile Üretilmiş Borular

üretimi mümkündür. Şekil 2.10’da görüldüğü gibi, boru iş parçası kalıp alt yarımı üzerine yerleştirildikten sonra kalıp üst yarımı aksel yönde, hala açık olan takım dilimleriyle birlikte aşağı indirilir (başlangıç aşaması). Sonra şişirme aşamasında önce



Şekil 2.10 Tipik Bir Körüklü Hidro şekillendirme Prosesi

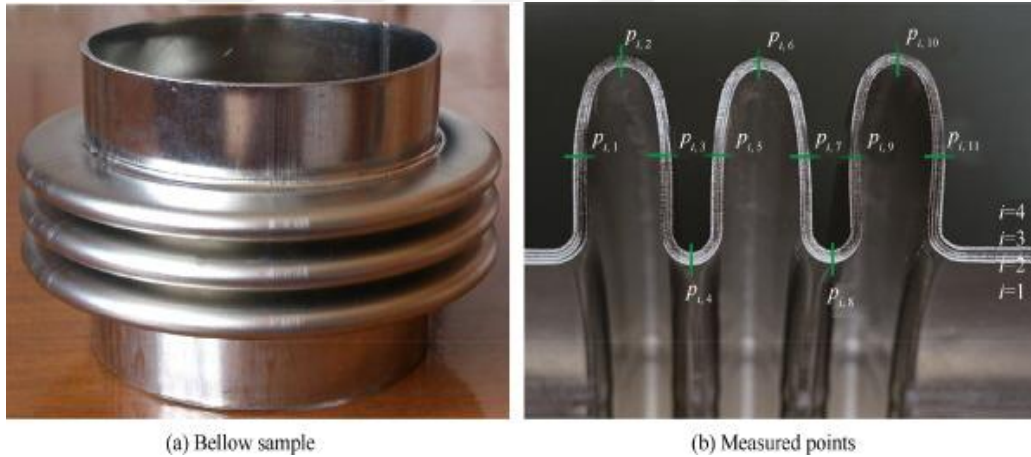
düşük basınçlı akışkan, tüp malzeme içine gönderilir ve açık dilimli takım hafifçe malzeme yüzeyini deforme etmesi için malzemeye baskı uygular. Sonra dilimler, her körük içine akışkan dolması için aksel yönde baskı uygular ve dilimlerin kapanması ile malzeme içindeki akışkan basıncı vasıtasıyla kalıp boşluğunun şeklini alıp körükleri oluşturur (Jing vd. 2020).

Bu çalışmada tüp hidro şekillendirme yöntemiyle körüklü boruların imalatı ile ilgili çalışmaları içermektedir. Tüp hidro şekillendirme esnasında basıncın yeterli olması, tüp malzemenin kalıp yüzeyine tam olarak oturmasını ve istenen geometrinin sağlıklı bir biçimde oluşmasını sağlamaktadır. Fakat basıncın çok fazla olması aynı zamanda malzemenin kesitinin ani bir şekilde incelmesini ve yırtılmaların oluşmasına sebep olur. Bu noktada basınç ve malzemede meydana gelen kesit değişimi arasında hassas bir denge oluşturulmalıdır. Basınç, şekillendirme esnasında artırılırken, kalınlık incelmeleri dengeli bir şekilde korunmalıdır. Şekillendirme esnasında aksel itme kuvveti ile tüp malzeme aksel doğrultusunda hareket ettirilerek yırtılmaların önüne geçilmesi, tüp malzemede

istenen körüklü geometrinin başarılı bir şekilde sağlanması ve şekillendirme sırasında meydana gelen hataların önüne geçilmesi sağlanmaktadır. Bu sayede ürünlerde ölçü tamlığı tam olarak sağlanırken, daha kaliteli üretimler hedeflenmektedir.

Kullanılan biçimlendirme işleminden bağımsız olarak, tüm oluklu metal borularda duvar kalınlığında orijinal düz boru ile tepeleri ve vadileri olan son hortum arasında farklılıklar vardır. Bu sonuç, her şekillendirme prosesi için et kalınlığı değişimlerinin ölçülmesiyle kolayca doğrulanır. Şekil 2.11’de kalınlık ölçüleri verilmiş kesit halindeki ürünler vardır.

Yapılan başka çalışmalarda körüklü boruların imal edilmesi için en uygun yöntemin hidro şekillendirme yöntemi olduğunu göstermektedir. Diğer geleneksel yöntemlerle kıyaslanacak olursa kalıp maliyeti, operasyon süresi veya cidar incilmesi açısından avantajlı olduğu anlaşılmıştır. Çok kıvrımlı metalik körük hidro şekillendirme de kıvrımlar arasındaki karmaşık kısıtlama etkileri nedeniyle, gerilme konsantrasyonu ve



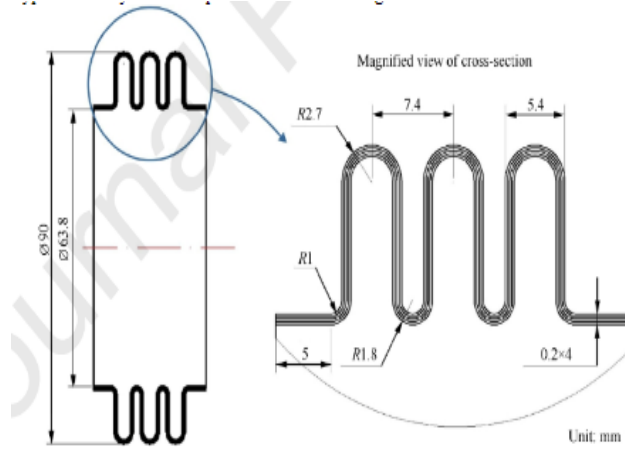
Şekil 2.11 Hidro Şekillendirilmiş Körüklü Boru Kalınlık Gösterimi

buruşma ve kırılma gibi kusurlar kolaylıkla meydana gelebilir. Deformasyonu ortaya çıkarmak için bir anahtardır. Sağlam bir ürün elde etmek için davranışlar LS-DYNA platformuna dayanan 3D modeli U-şekilli metalik körüklü hidro şekillendirme prosesi, deneylerle doğrulanabilmektedir. Stres ve gerginlik şişkinlik dahil tüm süreçte her kıvrımın dağılımları, et kalınlık değişimleri ve körük profilleri, katlama ve geri esneme aşamaları incelenebilir. Daha sonra farklı şekillendirme altındaki körüklerin deformasyon davranışları koşullar tartışılır. Farklı tabakaların duvar inceltme derecelerinin hidro şekillendirmeden sonra değiştiği saptanabilir. İç kıvrım için en büyüğü ve dış kıvrım için

en küçüğü. Kıvrılma aşamasında, kuronun duvar incelmesi derecesi nokta doğrusal olarak artacak ve süreç ilerledikçe de kıvrımlar arasındaki fark artacaktır. Yer değiştirmeleri tepe noktası iç kıvrımdan dış kıvrıma doğru azalır. Geri yaylanmadan sonra U-şekilli kesit değişecektir: Bir kıvrımın formu, diğer kıvrım adımındaki yüksekliğindeki değişiklikten çok daha büyüktür ve iç kıvrımın geri yaylanma değerleri dış kıvrımdan daha küçüktür. İç basınçta bir artış ve kalıp boşluğu, maksimum duvar inceltme derecesine ve geri esneme artışına neden olur. Proses parametrelerinin değişmesiyle, derin kıvrımlı körüklerde, hidro şekillendirme ve şekillenme sırasında meydana gelen deformasyon ve değişim sırasında duvar incelmesi ile geri yaylanma kolayca karşılaşılır. Bu araştırma, çok kıvrımlı körüklerin hassas şekillendirilmesi için faydalıdır (Liu ve ark., 2009).

Daha küçük sertlik, daha büyük telafi yetenekleri ve daha uzun kullanım ömrü avantajları nedeniyle, çok kıvrımlı metalik körükler, yüksek basınç, yüksek frekanslı titreşim ve büyük eksenel yer değiştirme gibi karmaşık çalışma koşullarında mükemmel performansla sahiptir ve önemli ve neredeyse yeri doldurulamaz elastik hale gelmiştir. Haddeleme, elektroforming vb. gibi çeşitli şekillendirme yöntemleri arasında hidro şekillendirme, yüksek verimlilik ve esneklik avantajları nedeniyle günümüzde körüğü oluşturmak için gelişmiş ve tercih edilen bir teknoloji haline gelmiştir. (Liu vd., 2009).

Çok kıvrımlı körüklü hidro şekillendirme, kıvrımlar arasında meydana gelen karmaşık temas davranışları ve kısıtlama etkileri olan üç boyutlu doğrusal olmayan bir fiziksel süreçtir. Hidro şekillendirmedeki deformasyon davranışları, farklı malzeme, geometri ve kıvrım sayılarına sahip körükler için farklıdır (Genellikle 2'den 6'ya, gerekirse daha da fazla). Kırışma ve çatlama gibi kusurların oluşma olasılığını artıracak malzeme akış zorluğu ve stres konsantrasyonu ile kolayca karşılaşabilir. Ayrıca, kaçınılmaz geri esneme, basıncın boşaltılması ve kalıpların çıkarılmasından sonra meydana gelir. Bu nedenle, hidro şekillendirmede şekillendirme kusurlarını önlemek ve hassas şekillendirmeyi gerçekleştirmek için çok kıvrımlı körüğün karmaşık deformasyon davranışlarını ortaya çıkarmak gerekir. Şekil 2.12'de gösterilen roket motorunda kullanılan üç kıvrıma sahip dört katmanlı U-şekilli bir körük için, hidro şekillendirmede körüğün tepesinde çatlama ve aşırı inceltme kolayca meydana gelir. Bu, imalatla geçiş oranının %40'ın altına düşmesine neden olmuştur. Şekillendirme kalitesini iyileştirmek için, özellikle farklı yükleme koşulları altında deformasyon davranışları, daha spesifik olarak gerilme/gerinim dağılımları, duvar incelmesi ve körük profilleri ele alınmalıdır.



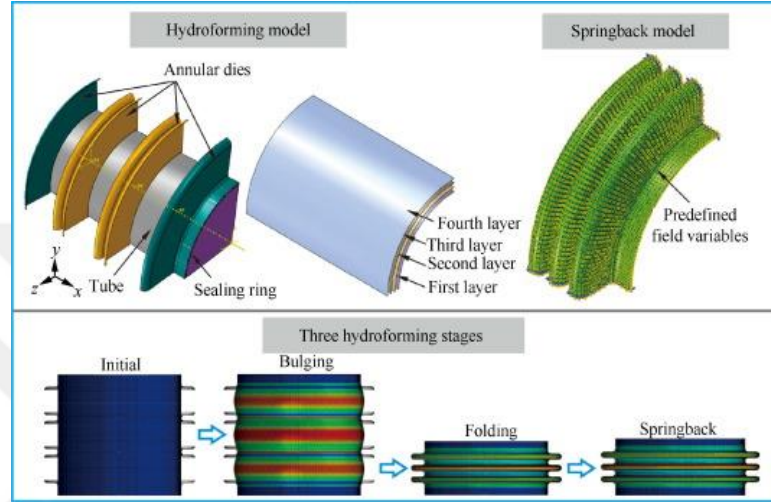
Şekil 2.12 Körüklü Yapı Ölçülendirmesi

Çalışmada, Şekil 2.12'de gösterilen tipik dört katmanlı U-şekilli bir körüğün deformasyon davranışları incelenmiştir. (Liu vd., 2009)

Geçmişte, birçok çalışma, hidro şekillendirme de tek veya çift kıvrımlı körüklerin/tüplerin deformasyon davranışlarına odaklanmıştır. İki'den fazla kıvrıma sahip çok katmanlı körükler üzerine yapılan araştırmalar neredeyse hiç rapor edilmemişken, bir grup araştırmacı tarafından, Körüklerin hidro şekillendirme deki deformasyon davranışlarını ele almak için bazı makul sonlu elemanlar (FE) modelleri oluşturulmuştur. “Lee”(2020), şişkinlik, katlama ve boşaltma aşamaları dahil olmak üzere tüm tek kıvrımlı körüklü hidro şekillendirme sürecini simüle etmek için bir FE modeli sundu. Modellemede, şişkinlik ve katlama aşamalarında açık bir entegrasyon yöntemi benimsenirken, geri esneme hesabı için boşaltma aşamasında örtük bir entegrasyon yöntemi kullanılmıştır. Çok kıvrımlı körükler için, FE modellemede tek kıvrımlı körüklerle karşılaştırıldığında temel fark, kıvrımlar arasındaki kısıtlamalardır. Olabi ve Alaswad, (2011) çift kıvrımlı T-şekilli tüp hidro şekillendirme için bir sonlu elemanlar modeli oluşturdu ve modelde, dış kıvrım ile kalıplar arasındaki temas davranışını tanımlamak için "sertten-esnek yüzeyden yüzeye" temas çifti uygulandı, teması tanımlamak için “esnek-esnek yüzeyden yüzeye” temas çifti seçilirken Temaslı kıvrımlar arasındaki davranış. Benzer bir temas çifti, İslam vd. (2006) tarafından da hidro şekillendirme çok kıvrımlı boru şeklindeki bileşenlerde benimsenmiştir (Jing vd., 2009).

Ayrıca, farklı temas çiftlerine farklı sürtünme katsayıları uygulanmıştır. Hesaplama verimliliğini artırmak için, tam mod yerine Jing vd. (2009) tarafından yarım bir 3B model kullanılır. Şekil 2.13’de sonlu elemanlar metodu ile analiz edilmiş hidro şekillendirme bileşenleri gösterilmiştir.

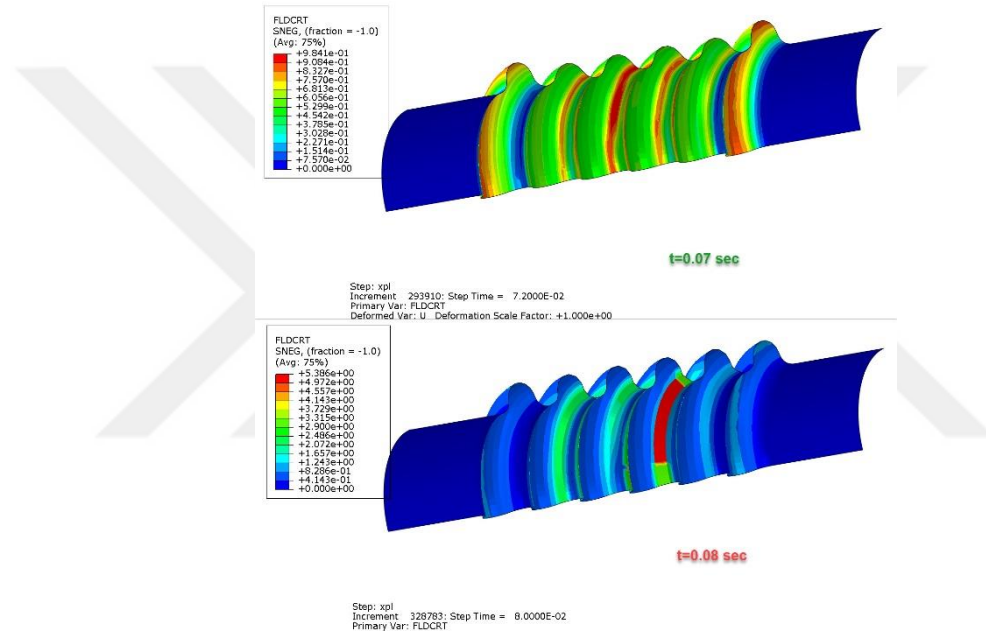
FE modellerine dayanarak, deformasyon davranışlarını ortaya çıkarmak için geometrik ve şekillendirme parametrelerinin şekillendirme sonuçları üzerindeki etkileri ele alınabilir. Geometrik parametreler esas olarak ilk tüp kalınlığını, taç ve kök çaplarını,



Şekil 2.13 Üç Aşamalı Hidro şekillendirme Proses

körüğün evrişim şeklini içerir. Şekillendirme parametreleri, iç basınç, eksenel kuvvet ve hareket, kalıp darbesi, sürtünme katsayısı vb. içerir. Yuan (2021), takviyeli s-şekilli körüklerin hidro-şekillendirmesini incelemiştir ve iç basınç ve dalga biçimi parametrelerinin hidro-şekillendirme sürecini doğrudan etkilediğine dikkat çekmiştir. Zhu ve Ark ise; farklı iç basınçlar altında kalınlık değişimlerini araştırmış ve FE yöntemini kullanarak bir E-contanın hidroformunda biçimlendirme penceresini elde etmiştir. Jing vd., (2009) körük geometrisinin etkisini göz önünde bulundurarak hidro şekillendirmede tek kıvrımlı bir körüğün şekillendirme davranışını ele aldı ve iki kıvrımlı bir körüğün geri esneme davranışlarını inceledi. Alaswad ve diğerleri, yükleme yolu ve geometri parametrelerinin deformasyon davranışları üzerindeki etkilerini elde etmiştir. Jing (2020), üç ana faktörün, yani başlangıç kalınlığının, iç basıncın ve kalıp aralığının körük profili üzerindeki etkilerini inceledi ve kalıp aralığının hidro şekillendirmede etkili olanı olduğunu buldu. Bakhshi vd. iç basıncın proses penceresi üzerindeki etkisini incelemiş ve güvenli bölgeyi elde etmiştir. Aslında, geometrik parametreler körük hidro şekillendirme de şekillendirme parametreleri üzerinde güçlü bir etkiye sahiptir. Faraji ve

ark. (2008), ta-kök çapı oranının yüksek olduğu bir metal körüğün imalatının, i basınç, aksenel hareket ve kalıp darbesi gibi şekillendirme parametrelerine karşı çok hassas olduğuna dikkat çekmiştir. Benzer bir gözlem Hashemi ve diğerleri tarafından bir CuSn6 körüklü hidro formlama da yapılmıştır. Küçük çaplı ince cidarlı körükler için %3'lk bir i basınç artışı ile çatlama meydana gelebileceğini bulmuşlardır. Sonuçlar, ta-kök çapındaki bir artışla, i basınç gibi uygun şekillendirme parametreleri aralığının önemli ölçüde azaldığını göstermiştir. alışmalarında, kalınlık dağılımı, tepe noktası hareketi ve geri esneme davranışını içeren deformasyon davranışları FE analizi ile incelenebilecektir. şekil 2.14'de hidro ekillendirme FE analizi mevcuttur (Jing vd., (2009).



şekil 2.14 Körüklü Boru FE Analizi

3. MALZEME VE YÖNTEM

Bu çalışmada öncelikle Konya Teknik Üniversitesi Hidro-şekillendirme laboratuvarının kapasite ve imkânları dâhilinde üretilebilecek olan, 10-30 mm çaplarda ve 0,5-3 mm kalınlıklarda, özellikle yaygın olarak kullanılan çok körüklü çelik 316 Paslanmaz boruların imal edilebilirliğinin araştırılması hedeflenmiştir. Tez çalışması boyunca takip edilecek adımlar aşağıdaki gibi özetlenmiş ve detaylandırılmıştır

- ST 37 malzemeden ön denemelerin yapılacağı uygun körük ölçülerinin belirlenmesi
- 316 Paslanmaz malzemeden son denemelerin yapılacağı uygun körük ölçülerinin belirlenmesi
- Kalıpların tasarlanması ve imalatı
- Yapılan kalıp tasarımına göre sonlu elemanlar analizinin yapılması,
- Boruların temin edilmesi
- İmalat adımlarının belirlenmesi ve HNC kontrol ile çalışan Hidro-şekillendirme presinin programlanması
- Yükleme eğrilerinin tahmin edilerek ön deneylerin yapılması
- Simülasyonların yapılması ve ön deneylerle doğrulanması
- Üretilen körüklerin boyutsal kontrolü
- Farklı malzeme ve/veya ölçülerde simülasyonların genelleştirilmesi

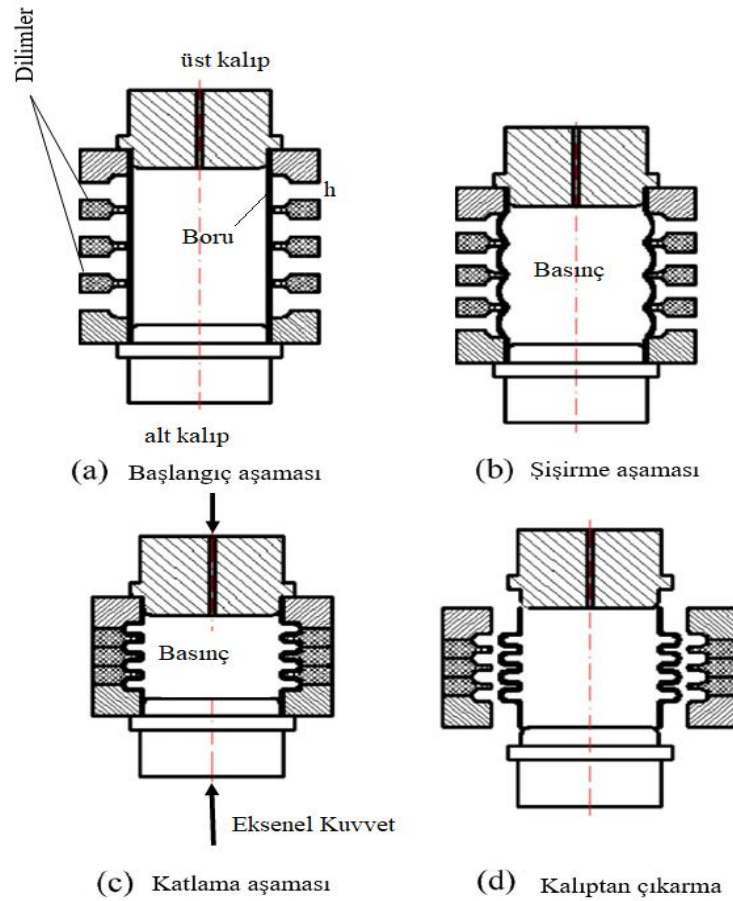
Çalışmada öncelikle makinalar, pompalar, motorlar, egzoz uygulamaları, gaz/buhar/kızgın su/buhar/yağ sistemlerinde kullanılan standart körüklü borulardan (<https://www.turkogluvana.com/tr/e-katalog#g2-1> sayfa 66-80) laboratuvarında bulunan standart Hidro-şekillendirme pres kapasitesine uygun olacak tarza dizel araçlarda kullanılan turbo yağ borularına benzetim yöntemleri de kullanılarak körük ölçüleri belirlenmiştir (Şekil 3.1).

İlk deneyler için boru ölçüleri Ø16,00x0,5 mm olarak belirlenmiştir. Ardından; boru ölçülerine göre körüklü borunun kıvrımlarının oluşturacağı dip ve tepe noktaların kesitlerinin çizgisel uzunlukları hesaplanmıştır. Tasarım ve hesabı yapılan körüklü boru için 7 kıvrımlı körüklü boru oluşacak şekilde, yarım ayı andıran körük figürü eklenmiş disklerin ana unsuru oluşturacağı bir kalıp tasarımı yapılmıştır. Tasarımı Solidworks yazılımında yapılan kalıp parçalarının toleransları belirlenerek; üretimi için CNC işleme merkezi, tel erozyon, dalma elektro erozyon makineleri kullanılmıştır.



Şekil 3.1 Paslanmaz Çelikten Üretilmiş Turbo Yağ Borusu

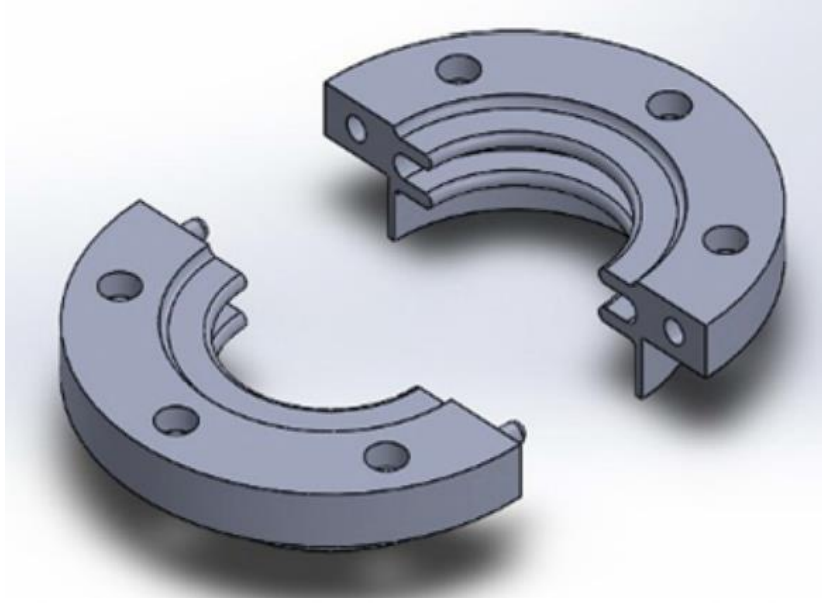
İmalat adımlarının belirlenmesi ve HNC kontrol ile çalışan Hidro-şekillendirme presinin programlanmasıyla ilk denemeler yapılmıştır. Yapılan deneysel çalışmalarda, körüklerin, hidro şekillendirme yöntemi ile üretilmesinde ilk olarak Şekil 3.2 (a)'da



Şekil 3.2 Tipik Bir Körüklü Hidro-şekillendirme Proses adımları

(Liu vd. 2020)'den uyarlanmıştır

görüldüğü gibi, boru alt kalıba yerleştirilir. Üst kalıp eksenel yönde, hala açık olan Şekil 3.3'de görülen takım dilimleriyle birlikte aşağı indirilir (başlangıç aşaması). Sonra

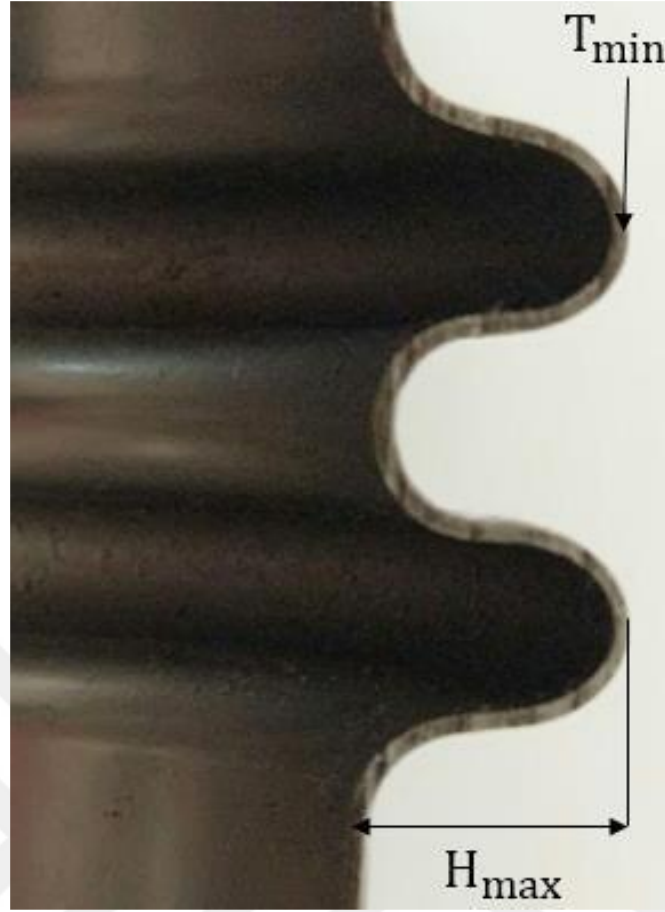


**Şekil 3.3 Yarım daire şeklindeki dilimler şekillendirmeden sonra çıkartılır
(Prithvirajan vd.,2019)**

şişirme aşamasında önce düşük basınçlı akışkan, tüp malzeme içine gönderilir ve açık dilimli takım hafifçe malzeme yüzeyini deforme etmesi için malzemeye baskı uygular. Sonra dilimler, her körük içine akışkan dolması için eksenel yönde baskı uygular ve dilimlerin kapanması ile malzeme içindeki akışkan basıncı vasıtası ile kalıp boşluğunun şeklini alarak körükler oluşturulmaktadır.

Tüp hidro şekillendirme esnasında basıncın yeterli olması, tüp malzemenin kalıp yüzeyine tam olarak oturmasını ve istenen geometrinin sağlıklı bir biçimde oluşmasını sağlamaktadır. Fakat basıncın çok fazla olması aynı zamanda malzemenin kesitinin ani bir şekilde incelmeye ve yırtılmasına sebep olmaktadır. Bu noktada basınç ve malzemede meydana gelen kesit değişimi arasında hassas bir denge oluşturulmalıdır. Basınç, şekillendirme esnasında artırılırken, kalınlık incelmesi dengeli bir şekilde korunmalıdır. Şekillendirme esnasında eksenel itme kuvveti ile tüp malzeme eksen doğrultusunda hareket ettirilerek yırtılmaların önüne geçilmesi, tüp malzemede istenen körüklü geometrinin başarılı bir şekilde sağlanması ve şekillendirme sırasında meydana gelen hataların önüne geçilmesi sağlanmaktadır. Bu sayede ürünlerde ölçü tamlığı tam olarak sağlanırken, daha kaliteli üretimler hedeflenmiştir.

Üretilen parçalar tel erozyon yöntemi ile simetri ekseninden geçen düzlemden Şekil 3.4’deki gibi kesilerek ölçülmüştür. Dip ve tepe radyuslarının benzer, kalınlıklarının homojen olması amaçlanmıştır. Böylece prosesi tamamlandıktan sonraki toleranslar belirlenecektir.

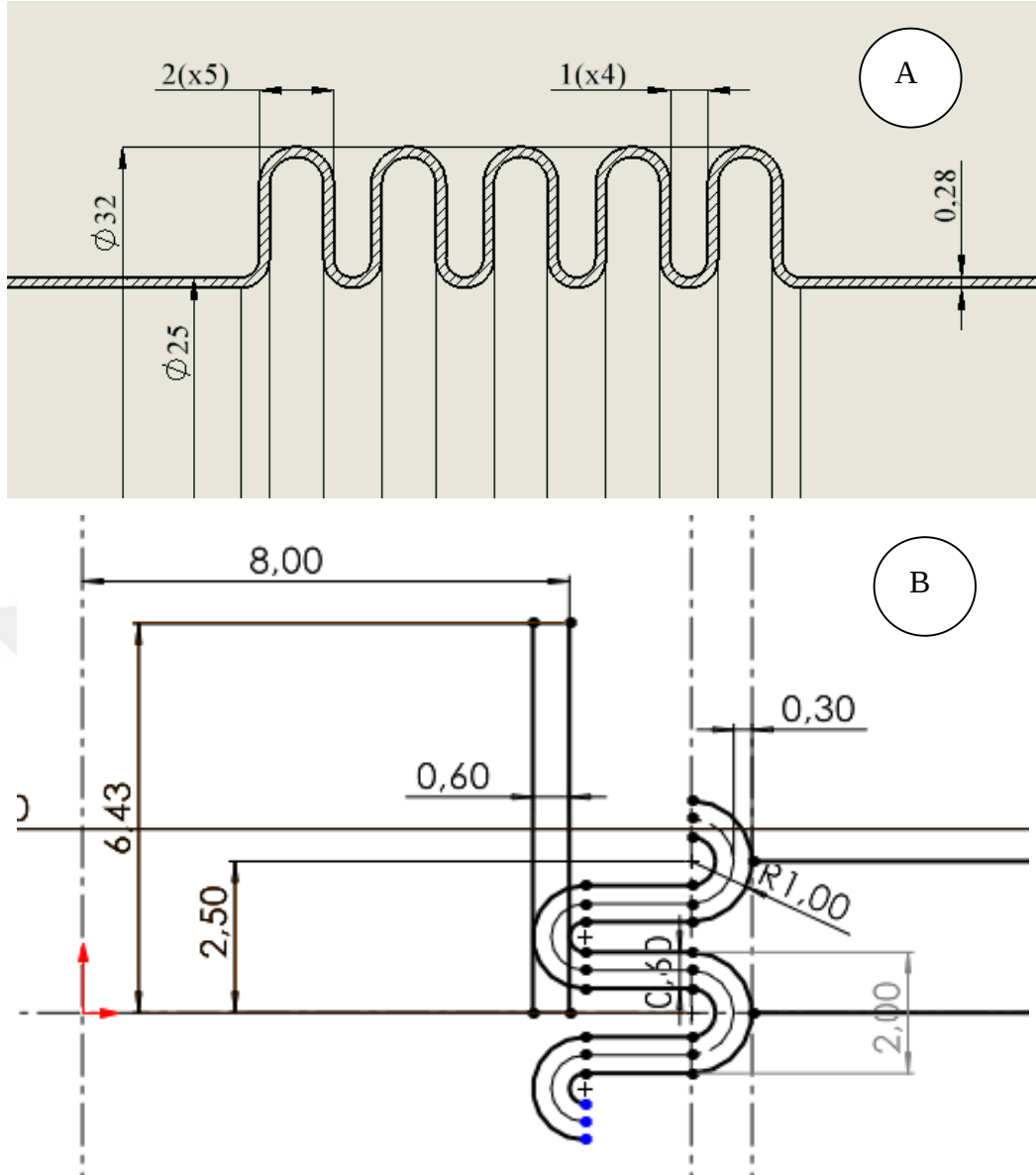


Şekil 2.4 Kesiti Alınmış Körüklü Boru

3.1 Körüklü Boru Ölçülerinin Belirlenmesi

Tez çalışmasında körüklü boru olarak Şekil 3.1’de görülen ve dizel araçlarda kullanılan “turbo yağ borusu” na benzer bir numune üretilmiştir. Her ne kadar bu iş parçası paslanmaz çelik malzemeden üretilmiş olsa da üretim kolaylığı ve geometriye benzer hazır borunun bulunması nedeniyle öncelikle ST 37 ve 321 Paslanmaz malzemeden ilk deneme üretimlerin yapılmasına karar verilmiştir. Ön denemelerin ardından; piyasada çok daha fazlaca kullanılan 316 Paslanmaz çelikten asıl istenen nihai boyutlarda körüklü borular üretilmiştir.

Kullanılacak olan ST 37 borunun ölçüleri Ø16 mm olarak belirlenmiş olup kıvrımları oluştuktan sonraki körüklerin dış çapı Ø22 mm olacaktır. Kıvrım genişlikleri 2,1 mm olarak tasarlanmış olup 7 kıvrımlı bir körük üretilmiştir. Borunun cidar kalınlıkları da 0,45 mm olarak belirlenmiştir. Şekil 3.5 A’da üretilecek körük ölçüleri görülmektedir. Yapılan diğer denemelerde ise 25 mm dış çapında 0,28 mm cidar



Şekil 3.5 Cidar Ölçüleri Belirlenmiş Olan Borunun Tarafsız ekseninden 2 D Görünümü

kalınlığında AISI 316 çelik sacdan dairesel şekilde kıvrılıp kaynaklanarak üretilmiş bir boru kullanılmıştır. Paslanmaz çelikten üretimi yapılan körüklü boru tasarımı Şekil 3.5 B' de gösterildiği üzere 5 kıvrımlı ve her bir kıvrım genişliği 2 mm, aralıkları ise 1 mm olacak şekilde yapılmıştır.

İlk denemeler için yapılan tasarımda, toplamda 7 körük olacağından körüklü borunun konveks bölgelerinin oluşması için $7 \times (\pi \times r)$ bir boru uzunluğuna ihtiyaç varken, konkav bölgeler içinde $6 \times (\pi \times r)$ boyutlarında bir uzunluk ihtiyacı bulunmaktadır. Ayrıca; ham boru dış çapı Ø16 ve dış körük çapı Ø22 olduğuna göre; (16-

$22)/2 = 3-1,5=1,5$ mm her bir körük duvarı için çapta istenen boru uzunluğudur, bu uzunluk boy için $14 \times 1,5$ mm alınmalıdır. Son olarak; borunun kalıba yerleştirilmesi için de iki taraflı $6,5'$ ar mm toplamda 13 mm uzunluk gerekmektedir. Dolayısıyla; 7 kıvrımlı istenen geometrinin oluşumu için;

$7 \times (\pi \times r) + 6 \times (\pi \times r) + 10 \times 1,5 + 13 = 74,82$ mm uzunluğunda bir boru ihtiyacı bulunmaktadır. Bu doğrultuda boru uzunluğu da 75 mm olarak seçilmiştir.

Nihai ürün için için yapılan tasarımda ise toplamda 5 körük oluşması için $7 \times (\pi \times r) + 6 \times (\pi \times r)$ boyutlarında bir L uzunlukta boru ihtiyacı bulunmaktadır. Ayrıca; ham boru dış çapı $\varnothing 25$ ve dış körük çapı $\varnothing 32$ olduğuna göre; $(32-25)/2 = 3,5-1,5=2$ mm her bir körük duvarı için çapta istenen boru uzunluğudur, bu uzunluk boy için 10×2 mm alınmalıdır. Son olarak; borunun kalıba yerleştirilmesi için de iki taraflı $11,5'$ er mm toplamda 23 mm uzunluk gerekmektedir. Dolayısıyla; 5 kıvrımlı istenen geometrinin oluşumu için;

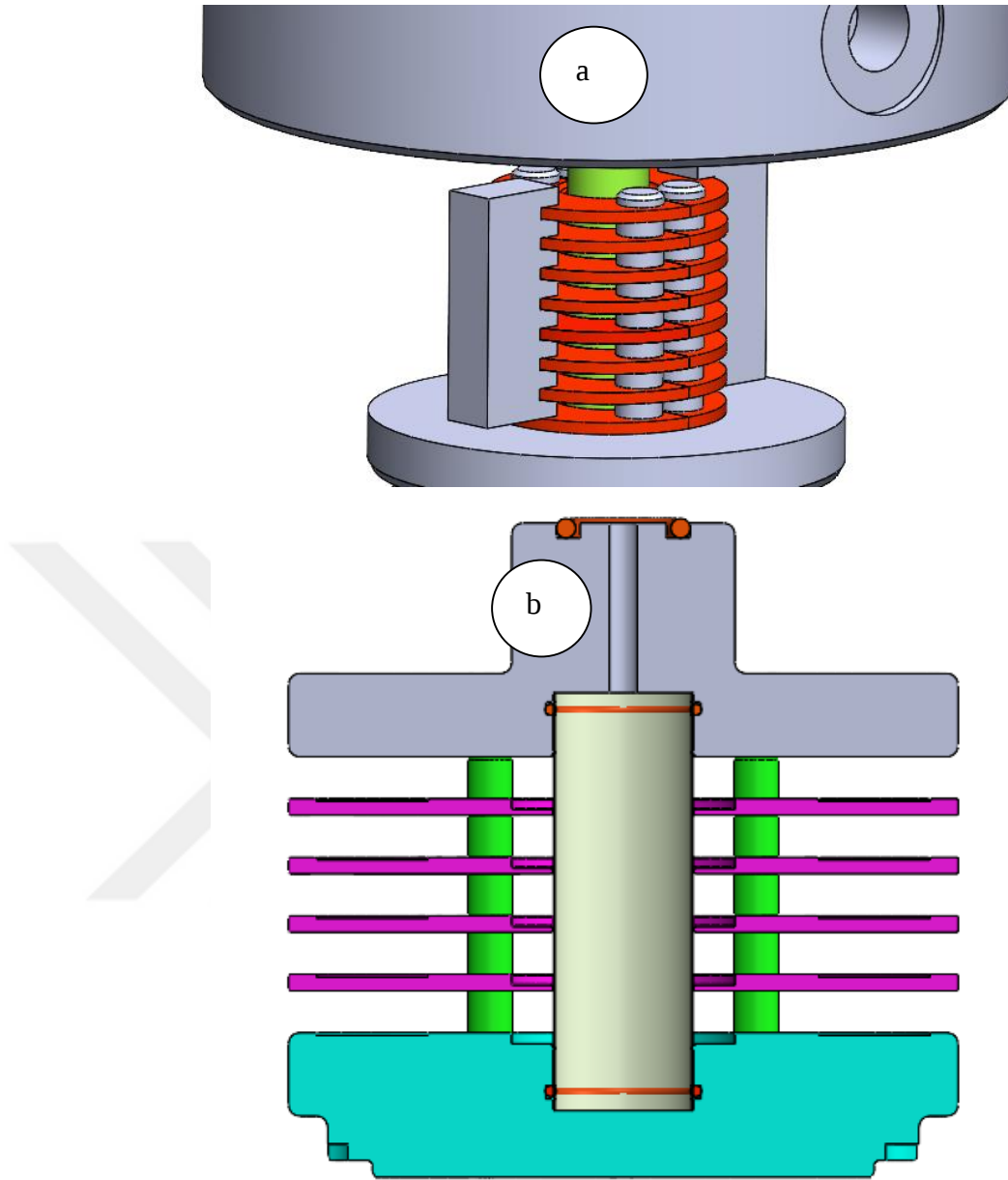
$5 \times (\pi \times r) + 4 \times (\pi \times r) + 10 \times 2 + 24 = 65,48$ mm uzunluğunda bir boru ihtiyacı bulunmaktadır. Bu doğrultuda yine boru uzunluğu da 75 mm olarak seçilmiştir.

Bilindiği üzere; Şekil 3.5'de görüldüğü gibi tam bir körük profili üretmek mümkün değildir. Çünkü bu profilde içteki ile dıştaki çizgi uzunlukları cidarlardaki incelmelerden nedeniyle aynı olmayacağından, Şekil 2.11 (b)'de görüldüğü gibi profilin konkav ve konveks kısımlarının da her yerdeki cidar kalınlıkları aynı olmayacaktır. Esasen körüklerin fonksiyonunu yerine getirmek için içteki ve dıştaki profil parçalarının %100 eşit olma zorunluluğu da yoktur.

3.2 Kalıp Tasarımlarının Yapılması ve İmal Edilmesi

Körüklü borunun proses parametrelerini belirlemek amacıyla Şekil 3.6 a'da görüldüğü gibi yedi kıvrımlı Şekil 3.6 b' de görüldüğü gibi de 5 kıvrımlı hidro şekillendirme kalıbı tasarımı için Solidworks yazılımı kullanılmıştır. Kalıp parçalarının işlenmesi için CNC kontrollü işleme merkezinde kullanılmak üzere VICI CAM tasarım programı kullanılmıştır. Ayrıca, kalıp tasarlandıktan sonra tasarım doğrulaması yapmak ve proses parametrelerini belirlemek için LS-DYNA yazılımı kullanılmıştır.

Kalıp çeliklerinde yoğun olarak; mevcut tesislerde ve malzeme tedarikçilerinde kolayca bulunabilen, yüksek mukavemeti, işlenebilirliği, sertliği, düşük sıcaklıkta



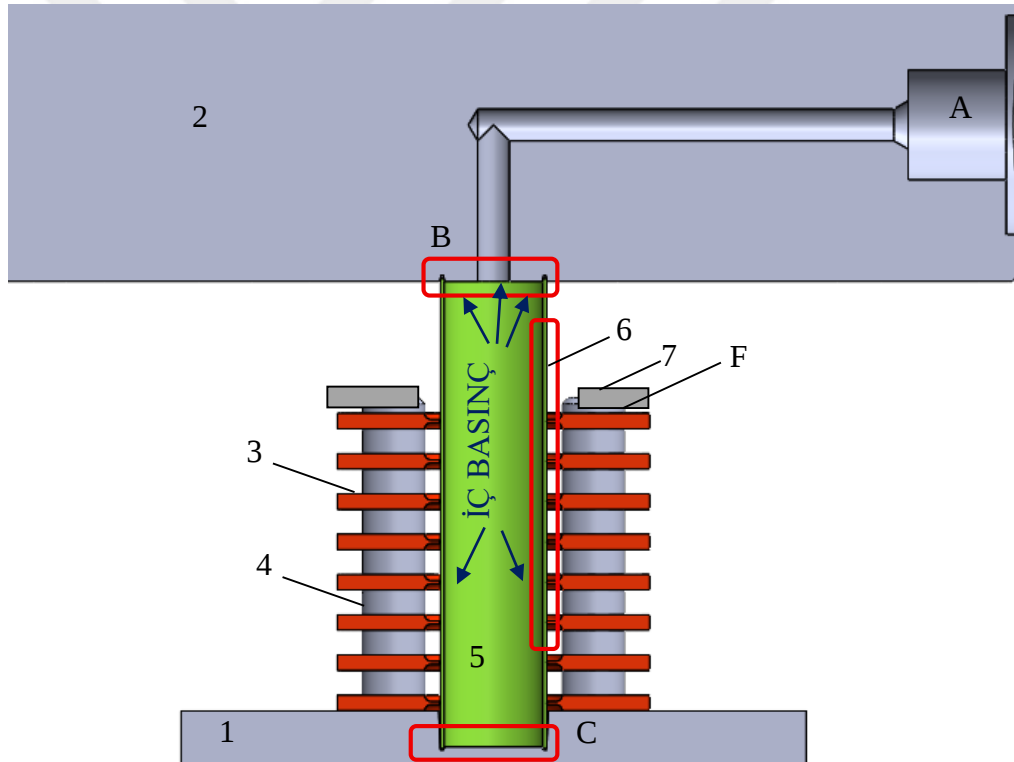
Şekil 3.6 Körüklü Boru kalıp tasarımı

tokluğu ve düşük deformasyon oranına sahip olan CK 45 çelikler kullanılmıştır ve özellikleri Çizelge 3.1’de verilmiştir.

Gerçekleştirilecek hidro skillendirme operasyonu için yapılan form kalıp dizaynı optimum çalışma şartları baz alınarak prototip amaçlı gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.7’ de verilen ilgili tasarımdaki “A” bölgesi yüksek basınçlı sıvının geçtiği bölge olup, “B” bölgesi ise girişteki basınçlı sıvının sızması için oluşturulmuş ve baskı kuvvetinin de aktarıldığı yerdir. “C” ile tanımlanan yer alt kalıptaki sızdırmazlığı sağlamakla beraber, baskı yükünü taşımaktadır. “D” bölgesi iç basınçtan kaynaklanan ve istenen şekil

Çizelge 3.1 CK45 Çeliğin Mekanik Özellikleri (DIN EN 10083-2:2006)

Özellik	Değer
Karbon oranı (C)	%0.42 – 0.50
Çekme dayanımı (Rm)	570 – 800 MPa (normal tavlı halde)
Akma dayanımı (Re)	~330 – 550 MPa
Sertlik (HB)	170 – 255 HB (tavlı durumda)
Elastikiyet modülü (E)	~210 GPa

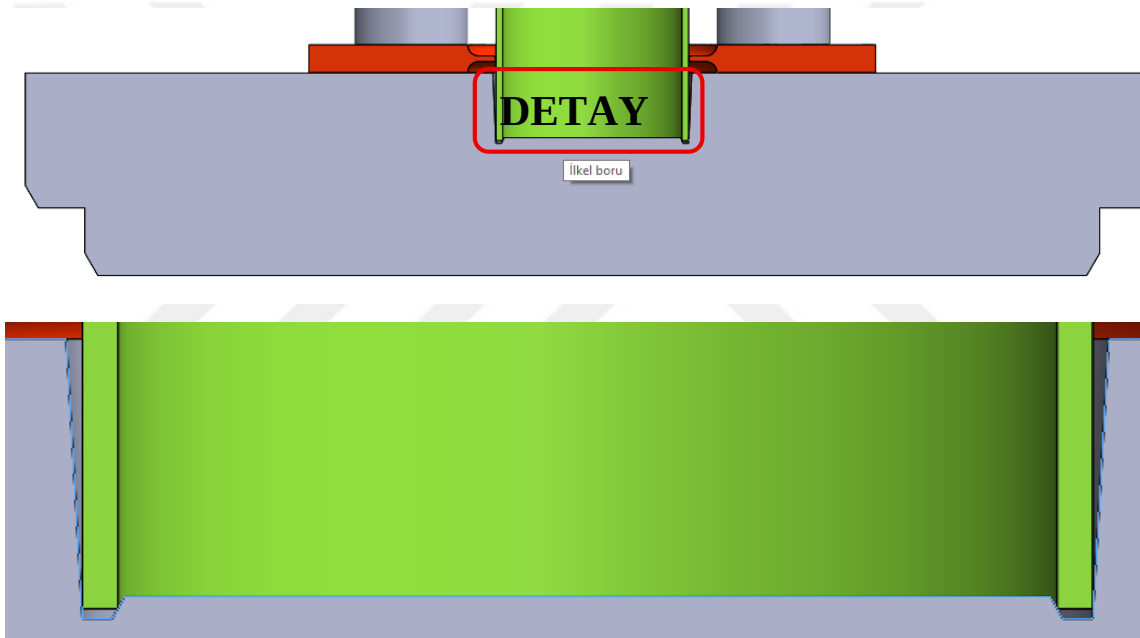


Şekil 3.7 Kesit Alınmış kalıp görünümü

değişimin başlayacağı ve oluşturulacağı boşluk bölgesidir. “F” bölgesi ise ön şekillendirmesi yapılmış borunun kalıp girintilerine yerleşmiş bölgelerine kuvvet uygulamak için eklenen yerdir.

3.2.1 Alt kalıp

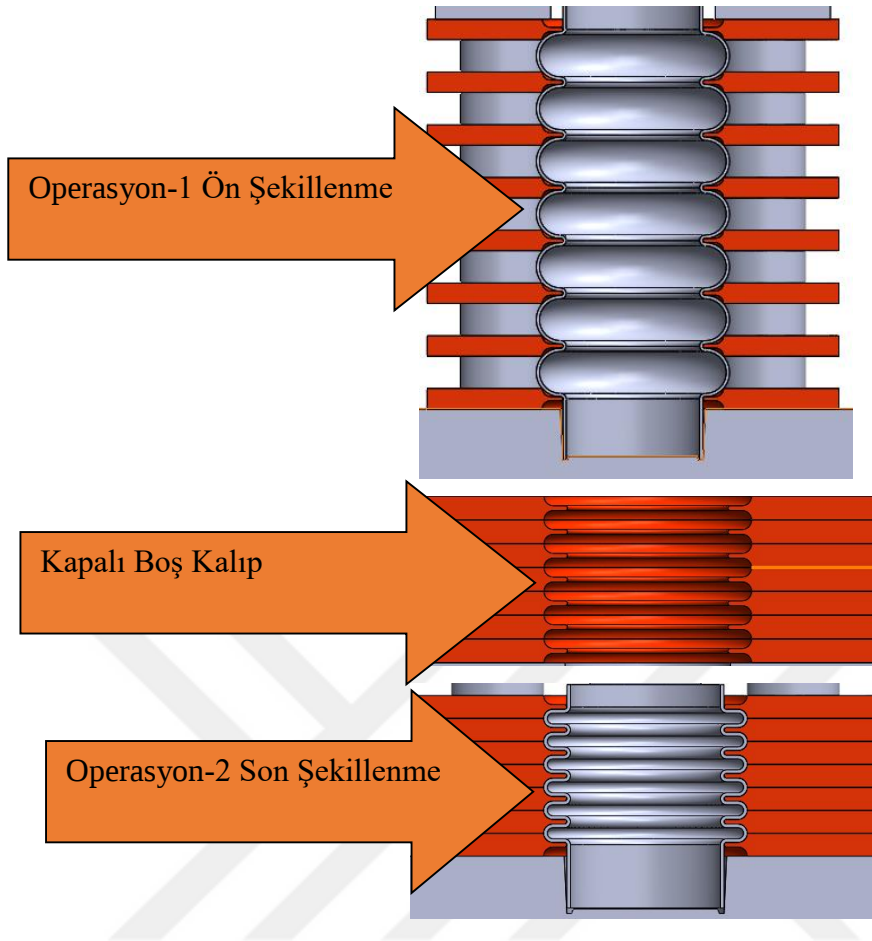
Hidro şekillendirme proseslerinde; iç basınç, baskı kuvveti, kayıplar, şekil değişimleri v.b birçok parametrenin belirlenmesi amacıyla, kullanılan basınç yükselticilerden ve gelen akışkan basıncının kayıpsız, bağlantı ekipmanları ve kalıp sistemin kaçaksız olması istenmektedir. Bundan dolayıdır ki; üretimi yapılacak körüklü borunun yerleştirildiği bölgenin sıvı akışkana gerekli sızdırmazlığı sağlaması son derece önemli hale gelmiştir. Alt plaka tasarımı; sızdırmazlık ihtiyacı gözetilecek şekilde, universal tornada hassas ve düşük Ra değerinde işlenen borunun altına ve cidar köşegenlerine temas edip, sıfır kaçak oluşturması için Şekil 3.8’ de görüldüğü gibi açılı şekilde tasarlanmıştır.



Şekil 3.8 Sızdırmazlık için Tasarlanan Alt Kalıp Boru Oturma Görüntüsü

3.2.1 Üst kalıp

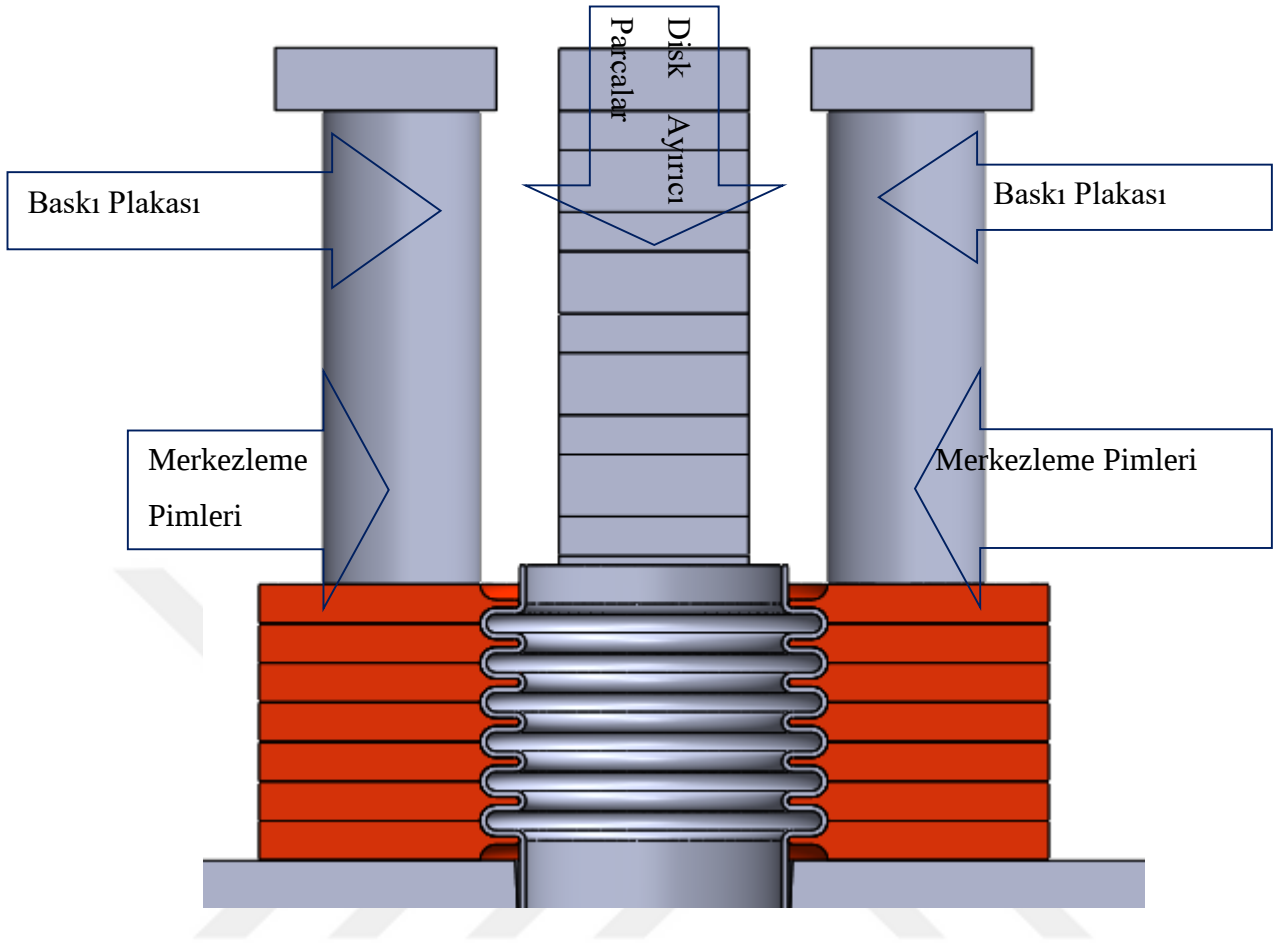
Üst kalıp parçasının; yapılan körüklü boru imalatında baskı kuvveti, şekil değişimlerini sağlamak, ön şekillendirmenin oluşmasından sonraki körükleri son haline getirecek itici kuvveti sağlamak gibi sistemde birçok fonksiyonu bulunmaktadır. Bunun yanında; sisteme gelen akışkan basıncının kayıpsız şekilde bağlandığı bileşendir. Alt kalıpta olduğu gibi üst kalıpta da üretimi yapılacak körüklü borunun yerleştirildiği bölgenin sıvı akışkana gerekli sızdırmazlığı sağlaması için borunun altına ve cidar



Şekil 3.10 Körüklü Boru Ön ve Son Şekillendirme İşlemi

3.2.4 Üst baskı kapağı, disk ayarlayıcı ve hareket merkezleme pimleri

Ana bileşenler dışında Şekil 3.11’ de gösterilen, kalıp hareketlerini ve merkezlemeyi sağlayan yardımcı bileşenlerin de sistemdeki fonksiyonellikleri oldukça önemlidir. İlk olarak, Kalıp disklerini ayıran karşılıklı olarak kullanılacak iki parça üretimi yapılacak körüklerin genişliklerini belirleyen bileşenlerden bir tanesidir, kanal genişliklerinin disklerle uygun toleranslandırılması proses esnasında herhangi bir sıkışma olmaması için önemlidir. İkincil olarak; baskıyı sağlayan ve ıstampa hareketi ile kalıbın kapanması için kuvvet uygulayan üst baskı kapağı, körüklü borunun oluşması için disklerin bir arada durmasını ve merkezleme pimlerinin birbirine bağlanmasını sağlar, ayrıca son şekil verme işlemine de kuvveti aktaran temas elemanıdır, baskı kapağı deliklerinin pim ile uyumu oldukça kritiktir. Son olarak, Merkezleme Pimleri de kalıbın tüm bileşenlerinin bir arada durmasını sağlayan ve körüklerin oluşması için kapanan



Şekil 3.11 Kalıptaki yardımcı bileşenler.

disklere bir yatak rolünü üstlenen silindirlerdir. Şekil 3.11’ de pim ve baskı parçası görünmektedir.

3.2.5 Kalıp Parçalarının İmalatı

Kalıp tasarımı mekanizmanın doğru çalışması ve prosesin doğru yapılabilmesi için olması gereken tüm parametreler göz önünde bulundurularak yapılmış olsa dahi, operasyonel işlemler teknik resimde istenilen toleranslara göre yapılmadığından, kalıptaki parça çiftleri birbirleri ile uyumlu çalışamayabilmektedir. Bundan dolayı; Şekil 3.12’ de gösterilen kalıbın parçalarının belirlenen kriterlerde üretilmesi elzemdir. Bu süreçte, hassasiyeti yakalayabilmek adına 1 µm hassasiyetli CNC kontrollü işleme merkezleri, tel erozyon ve dalma erozyon tezgâhları kullanılmıştır.



Şekil 3.12 Üretimi Yapılmış olan Körüklü Boru Hidro Şekillendirme Kalıbı

Kalıp Malzemesinin Seçimi;

İlk olarak numune kalıbında kullanılacak çelikler CK45 olarak seçilmiştir. CK45 çeliği (AISI 1045 veya C45 olarak da bilinir), kalıp üretiminde oldukça yaygın olarak kullanılır. Çünkü; mekanik özellikleri ve işlenebilirlik dengesi açısından birçok uygulamaya uygundur. İşte CK45'in kalıp üretiminde tercih edilme nedenleri:

Çizelge 3.1' de mekanik özellikleri verilen orta düzey karbon içeriği ($\sim\%0.45$ C) sayesinde çeliğe iyi bir sertlik ve mukavemet kazandırırken, hala işlenebilir kalmasını sağlamaktadır. Buna ilaveten; Isıl işlemle CK45, su verilip temperlenerek yüksek sertliklere çıkarılabilir. Bu da kalıplarda gerekli olan aşınma direncini kazandırmaktadır. Bir diğer iyi özelliği de yüksek tokluk ve darbe dayanımına sahip olmasıdır. Özellikle darbeli çalışan veya mekanik stres altında çalışan kalıplar için idealdir. Kırılmaya karşı dayanıklıdır. Ayrıca; yüzey sertleştirme için uygun olup, CK45'in yüzeyi sementasyon, nitrasyon veya indüksiyonla sertleştirilebilir, bu da kalıpların sadece dış yüzeyinin aşınmaya dirençli olmasını sağlar, iç kısmı ise tokluğunu koruyacaktır. Son olarak; Uygun maliyetli bir malzeme olarak bilinmektedir. Alaşımsız bir çelik olduğu için, alaşımlı takım çeliklerine göre daha ekonomiktir. İyi kaynaklanabilirlik ve işlenebilirlik CNC ile işlenmesi ve kaynakla birleştirilmesi görece kolaydır. (DIN EN 10083-2:2006 – Islah çelikleri standardı)

Kalıp Bileşenlerinin İmalatı;

Alt ve Üst Kalıplar nrasında CNC işleme merkezinde üretilmiş ve bağlantı delikleri delinmiştir. Son olarak sızdırmazlık sağlamak için borların oturacağı yuvalar herhangi bir talaşlı imalat metodu ile yapılamayacağından, tornada açılı figürlü parçalar işlenerek dalma elektro erozyon tezgâhında son işlemler yapılmıştır.

Ayırıcı parçalar ise 2 adet olmak üzere 12 mm' lik doğrudan tel erozyon tezgâhında kalıp disklerinin geçeceği toleransta kesilerek son halini almıştır.

Kalıp Diskleri, daha önce de bahsedildiği üzere kalıbı oluşturan ana etmenlerdir. Körüklü boru figürü disklerin birleşmesi ile meydana gelmektedir. Bu parçalar ile olarak tel erozyon tezgâhında yatay kesitte kesilmiştir. Ardından; CNC dik işleme merkezine koyulan diskler VICI yazılımında CAM yardımıyla NC kodları alınarak. Körük oyukları işlenmek suretiyle son haline getirilmiştir.

Merkezleme Pimleri ise torna tezgâhlarında işlenmiş ve sonrasında taşlanmıştır. Baskı plakaları da yine disklerde olduğu gibi tel erozyonda kesilerek imal edilmiştir.

Son olarak tüm işlemleri yapılmış olan kalıp parçaları birbirine alıştırılarak montajlandıktan sonra prosese hazır hale getirilmiştir.

3.3 Malzeme Seçimi ve İmalat Süreçlerinin Belirlenmesi

Malzeme seçimi, şekil değişimi yetenekleri uygulanacak sıvının çıkarılacağı basınç, son şekillendirme için uygulanacak baskı kuvvetinin belirlenmesi, körüklerin istenilen seviyede ve ölçülerde oluşması, baskı hızının şekil değişimi ile senkron olarak hareket etmesi ve istenilen nihai ürünün elde edilmesi için oldukça önemlidir. Otomotivde egzoz sistemlerindeki körüklü borularda da çokça kullanılan 316 Paslanmaz çelik, yüksek sıcaklıklarda çalışabilme, iyi kaynaklanabilirlik, termal yorulma direnci üstünlüğü olduğu için ideal seçim olarak belirlenmiştir.

3.3.2. Körüklü boru üretiminde kullanılan malzemeler

AISI 321 Paslanmaz Çelik; AISI 321 paslanmaz borular makina imalatında, aşınmaya karşı direnç istenen yerlerde, yaklaşık 800-900 C° sıcaklığın olduğu ortamlarda, maliyetin yüksek olmaması ama korozyon direncinin ve sıcaklık dayanımının iyi olması istenen hemen hemen tüm ortamlarda kullanılabilir. Kimyasal makina ve parça imalatlarında da sıklıkla kullanılan malzeme gıda ve gıda proses hatlarında,

cıvatalarda, vidalarda, ulaşım ve taşıma araçlarının parçalarında sıklıkla kullanılan ve fiyatı makul olan bir paslanmaz çelik malzemedir. Ayrıca; AISI 321, yüksek sıcaklıklarda üstün performans gösteren ve titanyum ile stabilize edilmiş bir paslanmaz çelik türüdür. Bu özellikleri nedeniyle, özellikle körüklü boru (esnek metal hortum/kompansatör) üretiminde yaygın şekilde tercih edilmektedir. Bu duruma sebep olarak aşağıdaki maddeler sıralanabilecektir.

Yüksek Sıcaklık Dayanımı: 321 kalite paslanmaz çelik, yaklaşık 800-900 °C'ye kadar uzun süreli kullanımda yapısal kararlılığını koruyabilir (Outokumpu Teknik Kataloğu, 2020). Bu özellik, körüklü boruların ısı genleşmeye maruz kaldığı uygulamalarda kritik öneme sahiptir.

Titanyum Stabilizasyonu: 321 çeliği, karbon karbür çökmesini engellemek için titanyum (Ti) ilavesiyle stabilize edilmiştir. Bu sayede, yüksek sıcaklıkta "tane sınırı korozyonu" ve "korozyon çatlaması" riskleri azaltılır (ASM International, 1998).

Termal Yorulma Direnci: Körüklü borular, sürekli genişip büzülme nedeniyle termal yorulmaya maruz kalır. 321'in iyi termal yorulma dayanımı, bu tür dinamik uygulamalar için uygundur (Flexonics Teknik Kataloğu, 2019).

İyi Kaynaklanabilirlik: 321 paslanmaz çelik, kaynak sonrası tane sınırı korozyonuna karşı dirençlidir; bu, körüklü boruların üretiminde önemli bir avantajdır (ASTM A240 / A240M Standardı, 2021).

Genel Korozyon Direnci: 321, 304 paslanmaz çeliğe benzer genel korozyon direnci sağlar ancak yüksek sıcaklıklarda daha stabildir. Bu, ortam şartlarına bağlı olarak kullanım alanlarını genişletir (MatWeb, 2024).

ST- 37 Çelik Borular; Körüklü borularda çoğunlukta paslanmaz grubu kullanılıyor olsa da deneylerde şekil değişim kabiliyeti yüksek olduğundan ST-37 malzemedan de faydalanılmıştır. ST-37 sınıfının mekanik özellikleri Çizelge 3.2'de verilmiştir.

316 Paslanmaz Çelik; Körüklü boruların hem piyasada bulunabilirliği açısından hem de yöntem ve uygulama için en uygun malzeme olacağından ana deneyler için seçilen malzeme AISI 316 Paslanmaz çelik olmuştur. Körüklü borular, genellikle yüksek sıcaklık, basınç ve korozyon koşullarına dayanıklı olmaları gereken endüstriyel sistemlerde kullanılmaktadır. Bu yapıların üretiminde malzeme seçimi kritik önem

Çizelge 3.2 ST-37 Çeliğin Özellik Tablosu (CHN Çelik)

St 37, St 37.2 , S235JR Kimyasal Özellikleri

C % maks.	Mn % maks.	P % maks.	S % maks.	Cu % maks.	N % maks.
0.17	1.40	0.040	0.040	-	0.0120

St 37, St 37.2 , S235JR Mekanik Özellikleri

AKMA DAYANIMI min Mpa	ÇEKME DAYANIMI min Mpa	UZAMA %	IMPACT TEST DAYANIMI min
235	360-510	26	20°C 27J

taşımaktadır. 316 paslanmaz çelik, kimyasal dayanıklılığı, mekanik özellikleri ve şekillendirilebilirliği sayesinde körüklü boru üretiminde yaygın olarak tercih edilen bir malzemedir. 316 paslanmaz çeliğin körüklü borular için uygunluğunu teknik özellikler ve uygulama avantajları bağlamında incelemektedir. Körüklü borular, esnek yapı gerektiren uygulamalarda, genellikle titreşimleri sönmek, termal genleşmeleri karşılamak veya hassas sistemleri korumak amacıyla kullanılmaktadır. Bu ürünler, özellikle petrokimya, otomotiv, havacılık ve enerji sektörlerinde yoğun olarak yer almaktadır. Bu gibi zorlu uygulamalarda kullanılacak malzemelerin hem şekillendirilebilir hem de kimyasal ve termal dayanım açısından üstün özelliklere sahip olması gerekmektedir (Callister & Rethwisch, 2020). 316 paslanmaz çelik, bu gereksinimleri karşılayan en yaygın ve uygun malzemelerden biri olarak belirlenmiştir.

316 Paslanmaz Çeliğin Özellikleri

316 paslanmaz çelik, %16-18 krom, %10-14 nikel ve %2-3 molibden içeren bir östenitik çelik türüdür. Molibden elementi, özellikle klorür iyonlarına karşı korozyon direncini artırmaktadır. Bu özelliği sayesinde 316 kalite çelik, deniz suyu ve kimyasal ortamlarda kullanılabilir (Davis, 1994). Ayrıca iyi kaynaklanabilirliği ve soğuk şekillendirme yeteneği sayesinde körük yapısının üretiminde önemli avantajlar sağlamaktadır. Körüklü borular, genellikle hidro şekillendirme, mekanik katlama veya derin çekme gibi yöntemlerle üretilmektedir. Bu yöntemlerde malzemenin yüksek sünekliğe ve şekil alma kapasitesine sahip olması gerekmektedir. 316 paslanmaz çelik, düşük karbon içeriği ve östenitik mikro yapısı sayesinde bu işlemlerde çatlamadan şekil

alabilmektedir. (ASM International, 2002). Ayrıca körüklü boruların kullanıldığı sistemlerde oluşan çevrimsel yükler ve sıcaklık değişimleri, yorulma dayanımını önemli hale getirir. 316 çelik, östenitik yapısı nedeniyle darbe dayanımı ve yorulma performansı açısından da tercih edilmektedir.

316 Paslanmaz Çeliğin Körüklü Borularda Kullanım Avantajları

- Yüksek korozyon direnci: Özellikle klorür, sülfürik ve fosforik asit içeren ortamlarda 304 kaliteye göre daha üstün performans sağlar (Sedriks, 1996).
- İyi şekillendirilebilirlik: Soğuk şekillendirme, hidro şekillendirme ve katlama gibi işlemler sırasında çatlama riski düşüktür (ASM International, 2002).
- Yüksek mekanik dayanım: Basınca, gerilime ve titreşimli yüklere karşı dayanıklılığı yüksektir.
- Yorulma ve darbe direnci: Tekrarlayan yükler ve termal döngüler altında yapısal stabilitesini korur (Callister & Rethwisch, 2020).
- Yüksek sıcaklık dayanımı: Yüksek sıcaklık altında oksidasyona ve mukavemet kaybına karşı dirençlidir.
- Kaynaklanabilirlik: Düşük karbon içeriği sayesinde kaynak sonrası tane büyümesi ve korozyon riski düşüktür.
- Hijyen ve yüzey kalitesi: Gıda ve ilaç endüstrilerinde kullanım için uygundur; pürüzsüz yüzeyi sayesinde bakteri tutmaz (Davis, 1994).
- Uzun ömür ve düşük bakım gereksinimi: Dayanıklılığı sayesinde bakım maliyetlerini azaltır.

Körüklü boruların üretiminde 316 paslanmaz çeliğin tercih edilmesinin temel sebepleri arasında yüksek korozyon direnci, şekillendirme kabiliyeti, mekanik dayanım ve uzun ömür sayılabilir. Endüstriyel uygulamaların zorlu koşulları göz önüne alındığında, 316 kalite çeliğin bu özel kullanım alanı için uygunluğu açıktır. Hem üretim verimliliği hem de kullanım ömrü açısından bu malzeme, optimum çözüm sunmaktadır.

Çizelge 3.3' de belirtilen 21.08.2025 YUMAK Otomotiv malzeme ve metalografi laboratuvarında numunenin kimyasal analizi tamamlanmıştır. Söz konusu numunenin

Çizelge 3.3. Deneylerde kullanılan boruların spectrometre analizi



yumak
AIR BRAKE SYSTEMS

SPEKTROMETRE ANALİZ SONUÇLARI (CHEMICAL RESULTS)

Numune No/Sample Id : ATMACA

Müşteri/Customer : YUMAK

Yumak No/Yumak Id : -

Mühendis/Engineer :

BATUHAN YILMAZ

Isıl İşlem/Heat Treatment :

-

Tarih/Date :

21.08.2025

Analiz Eden/Tester :

BATUHAN YILMAZ

Malzeme/Şarz No : -

Şarj Materyalleri/Filler -

	Fe [%]	C [%]	Si [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]	Cr [%]
1	68.2	0.0347	0.258	1.20	0.0248	0.0034	17.7
2	68.2	0.0257	0.252	1.23	0.0264	0.0033	17.8
↑		0.100	1.00	2.00	0.0450	0.0300	18.0
Ø	68.2	0.0302	0.255	1.22	0.0256	0.0033	17.8
↓		0.0300	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	16.0

	Mo [%]	Ni [%]	Cu [%]	Sn [%]
1	2.02	9.78	0.372	0.0121
2	1.98	9.78	0.377	0.0126
↑	3.00	14.0	1.00	
Ø	2.00	9.78	0.375	0.0123
↓	2.00	10.0	0.0000	

Açıklama/Explanation :

Spektrometre :

FOUNDRY

Kalite/Grade :

316

malzemesinin tasarım için belirlenen malzeme olan ‘‘1.4401 Numaralı 316 Paslanmaz Çelik (X5CrNiMo17-12-2)’’ olduğu tespit edilmiştir.

3.3.3 Hidro şekillendirme presi ve operasyonun çalışma prensibi

Tez çalışmasında yapılan deneylerde Konya Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü Hidro-şekillendirme Laboratuvarı’nda bulunan Şekil 3.13’ de gösterilen ve son olarak URMAMEN (2021) tarafından modifikasyonu yapılan 1000 bar kapasiteli hidro şekillendirme presi kullanılmıştır.

Proses parametreleri belirlenecek olan körüklü borunun, ön şekillendirme işleminin yapılabilmesi için boru içerisinde iç basınç oluşması gerektiği anlatılmıştır. Bu

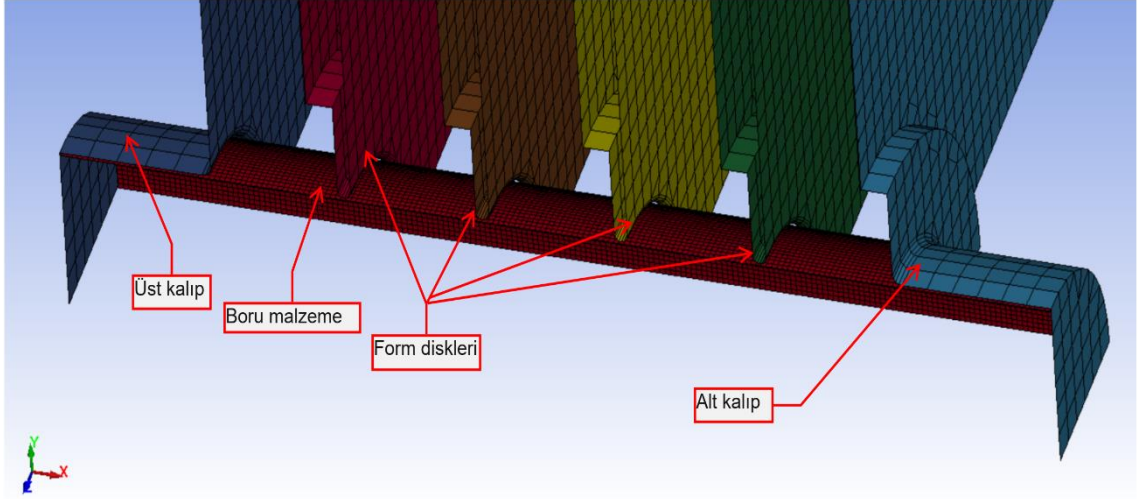


Şekil 3.13 Deneylerin Gerçekleştirileceği Hidro Şekillendirme Presi

basıncın oluşabilmesi için kalıp tasarımında sızdırmazlık sağlamak amacı ile borunun alt ve üst alınlarında açılı formlar oluşturulsa dahi sızdırmazlığı sağlayacak ve iç basınca karşılık deney parçasını sabit tutacak etken baskı kuvveti olacaktır. Gerekli baskı kuvveti hesabı uygulanacak akışkan basıncına göre hesaplanmalıdır. Şekil değişimlerinden kaynaklı körükler oluşmaya başladıktan sonra boy kısaltmaları olacak ve bu kısaltmalar stampanın belirli bir hızda sıkma mesafesini kapatması ile prosesin ilk aşaması geçerli kılınacaktır. Son olarak; basınç ile yapılan ön şekillendirme işlemi bittikten sonra disklerin kapanması ile körüklerin oluşumu tamamlanacaktır.

3.4. Sonlu Elemanlar Analizlerinin Yapılması

Körüklü borunun imal edilmesi prosesinde boru içerisine belirli değerlerde artan sıvı basıncı uygulanırken aynı zamanda kalıplarla eksenel sıkıştırma kuvveti uygulanması gerekmektedir. Parçanın başarıyla şekillendirilebilmesi için de sıvı basıncı-eksenel sıkıştırma kuvveti yükleme eğrisi optimum değerlerde uygulanmalıdır. Tez çalışmasında optimum yükleme eğrisi hidro-şekillendirme prosesinin Sonlu Elemanlar Analizlerinden (SEA) elde edilmiştir. Sonlu Elemanlar Modeli Ls-Dyna Prepost yazılımında oluşturulmuş, model kurulurken 3.2. Bölümde anlatılan kalıp tasarımındaki alt ve üst kalıplar ile form diskinin geometrik modelinden yararlanılmıştır. Analiz süresini



Şekil 3.14 Körüklü boru hidro şekillendirme prosesinin sonlu elemanlar modeli

kısaltmak amacıyla kalıplar ve başlangıç boru malzemesi çeyrek olarak modellenmiştir. Kalıplar ve form diskleri rijit olarak, boru malzemesi ise deforme olabilir dört kenarlı kabuk elemanlar ile modellenmiştir. 25 mm çap ve 0,28 mm kalınlığa sahip AISI 316 paslanmaz çelik boruda toplamda 16654 adet eleman kullanılmıştır. Yakınsama analizleri yapılmış ve şekillenen parçada körük radyüslerinin daha net olarak elde edilebilmesi için eleman boyutu 0,4 mm alınmıştır.

Boru, izotropik malzeme olarak modellenmiş ve malzeme modeli oluşturulurken 209 GPa elastiklik modülü, 0,28 poisson oranı elastik sabitleri ile elastik davranışı; 18 numaralı pekleşme kuralı malzeme modelinde de 1700 MPa mukavemet katsayısı ve 0,45 pekleşme üssü katsayıları ile plastik bölgesi modellenmiştir. Pekleşme kuralı katsayıları malzeme kataloglarından alınmıştır.

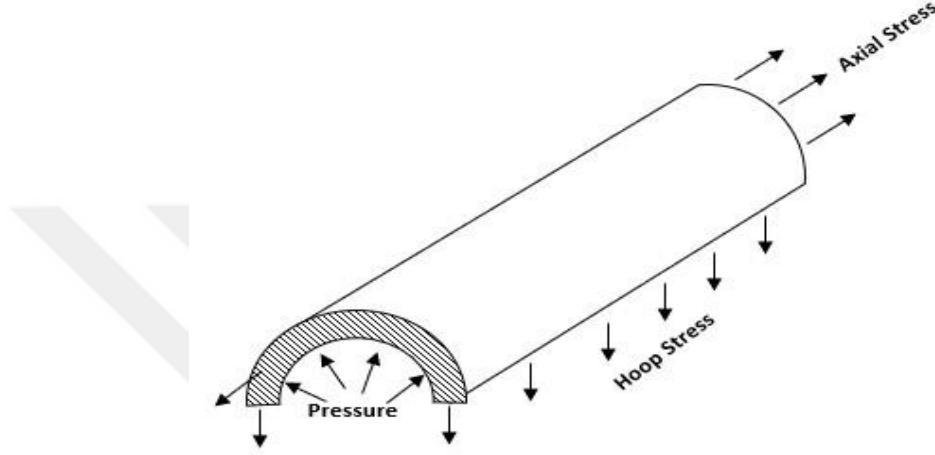
Sınır şart olarak simetri sınır şartlarının yanında alt kalıbın tüm doğrultudaki hareketleri kısıtlanmış, üst kalıba ise borunun eksenine doğrultusunda basma kuvveti tanımlanmıştır. Ayrıca boru içinden de basınç tanımlanmıştır. Kuvvete ve basınca analiz zamanına göre değişken değerler atanmış ve körük geometrisini elde edecek, malzemede burkulmaya ve aşırı incelmeye neden olmayacak optimum değerler deneme ve yanılma ile tespit edilmiştir.

Kalıplar, form diskleri ve boru arasında sürtünme teması tanımlanmış, çelik/çelik arasındaki tipik sürtünme katsayısı olarak 0,2 değeri alınmıştır

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

4.1 Silindirik Tüpe Gelen Eksenel Baskı Kuvvetinin Hesaplanması

Şekillendirmenin ilk aşamasında tüpe gelen iç basıncın ve sızdırmazlık için gerekli olan eksenel kuvvetin kabaca analitik olarak hesaplanması gerekmektedir. İnce cidarlı tüpte oluşacak gerilmeler Şekil 4.1’deki gibi gösterilebilir.



Şekil 4.1 İnce cidarlı borularda oluşan gerilmeler

Dış çap : $D = 16 \text{ mm}$

Et kalınlığı (t) = $0,5 \text{ mm}$

İç çap $D_i = D - 2t = 15,2 \text{ mm}$

Boy (L) = 75 mm

Malzeme tipi: ST 37 & AISI 321

Cidar-Çap oranı ≥ 10 ise boru ölçüleri ince cidarlıdır, o halde;

Borunun akmaya başladığı basınç Tresca akma kriterine göre;

$$P_{iç} = (2 \times G_{akma} \times t) / D_i$$

ST-37 için;

$$P_{iç \text{ st-37}} = (2 \times 235 \times 0,5) / 15 \quad \text{ise}; \quad P_{iç \text{ st-37}} = 15,67 \text{ MPa} = 157 \text{ bar}$$

AISI 321 için;

$$P_{iç \text{ aisi 321}} = (2 \times 310 \times 0,5) / 15 \quad \text{ise}; \quad P_{iç \text{ aisi 321}} = 20,67 \text{ MPa} = 207 \text{ bar}$$

Yapılacak deney basıncı boruların akma sınırının altında başlanarak üst sınırlara çıkılıp, şekil değişimi için gerekirse aşılmalıdır.

Bahsedildiği üzere; ilk olarak Ø16 x 0,5 olarak boru için iç bölgeye verilen basıncın Baskı kuvvetine ters yönde bir kuvvet oluşturacağı ihmal edilmemelidir. İlk

olarak 100 bar ve devamında 100'er bar aralıklarla 500 bara kadar basınçlandırma yapacağımızı var sayarsak;

$$D: \varnothing 16 \text{ mm}$$

$$t=0,5 \text{ mm}$$

$$D_{\text{iç}} = \varnothing 15,0 \text{ mm}$$

100 barda sızdırmazlık için minimum baskı plakası kuvveti;

$$P = F/A \Rightarrow F = P \times A \quad \text{ise;} \quad P = 100 \text{ BAR} = 10 \text{ MPa}$$

$$A = \pi \times r \times r \quad \text{ise;} \quad r = D/2 = (16-1) / 2 = 15/2 = 7,5 \text{ mm ise;}$$

$$A = \pi \times 7,5 \times 7,5 = 176,6 \text{ mm}^2 \quad \text{bu durumda;}$$

$$F \geq 176,6 \times 10 = 1766 \text{ N kuvvet uygulanması gerekmektedir.}$$

Aynı denklemde baskı plakasının minimum yük değeri;

200 bar için;

$$F \geq 3533 \text{ N}$$

300 bar için;

$$F \geq 5300 \text{ N}$$

400 bar için;

$$F \geq 7065 \text{ N}$$

500 bar için;

$$F \geq 8831 \text{ N} \quad \text{olmalıdır.}$$

Buna ilaveten; Baskı plakası yükü basıncı yenmelidir ancak boruda da bir deformasyon oluşturmamalıdır.

Soğuk Çekilmiş AISI 321 için;

$$F_{\text{max}} \leq G_{\text{akma}} \times A_{\text{boru}}$$

$G_{\text{akma}} = 205 \text{ MPa}$ ancak soğuk çekim olduğundan 310 MPa olduğu durumda;

$$A_{\text{iç}} = 176,6 \text{ mm}^2$$

$$A_{\text{dış}} = 208,5 \text{ mm}^2$$

$$A_{\text{boru}} = 208,5 - 176,6 = 31,88 \text{ mm}^2$$

$$F_{\text{max}} \leq 310 \times 31,88 = 9883 \text{ N ise;} \quad \text{ilave kuvvetler } 9883 \text{ N' u aşmamalıdır.}$$

Test esnasında 500 bar basınçlara çıkılacağına $883+988 \Rightarrow 1871 \text{ kg}$ gibi bir baskı yükü geçilmemelidir.

Soğuk Çekilmiş ST-37 için;

$$F_{\text{max}} \leq G_{\text{akma}} \times A_{\text{boru}}$$

$$G_{\text{akma}} = 235 \text{ MPa olduğu durumda,}$$

$$A_{iç} = 176,6 \text{ mm}^2$$

$$A_{dış} = 208,5 \text{ mm}^2$$

$$A_{boru} = 208,5 - 176,6 = 31,88 \text{ mm}^2$$

$$F_{max} \leq 235 \times 31,88 = 7492 \text{ N ise; ilave kuvvetler } 7492 \text{ N' u aşmamalıdır.}$$

Test esnasında 500 bar basınçlara çıkılacağında $883+750 \Rightarrow 1633 \text{ kg}$ gibi bir baskı yükü geçilmemelidir.

Üretimi Yapılacak Olan 316 Paslanmaz son boyutlar için;

$$\text{Dış çap : } D = 25 \text{ mm}$$

$$\text{Et kalınlığı (t) = 0,28 mm}$$

$$\text{İç çap } D_i = D - 2t = 24,54 \text{ mm}$$

$$\text{Boy (L) = 75 mm}$$

Malzeme tipi: AISI 316

$G_{akma} = 205 \text{ MPa}$ ancak soğuk çekim olduğundan 290 MPa olduğu durumda

Cidar-Çap oranı ≥ 10 ise boru ölçüleri ince cidarlıdır, o halde;

Borunun akmaya başladığı basınç Tresca akma kriterine göre;

$$P_{iç} = (2 \times G_{akma} \times t) / D_i$$

AISI 316 için;

$$P_{iç \text{ aisi 316}} = (2 \times 290 \times 0,28) / 24,54 \text{ ise; } P_{iç \text{ aisi 316}} = 6,35 \text{ MPa} = 64 \text{ bar}$$

Ön deneyler sonucunda anlaşılmıştır ki, yapılacak deney basıncı boruların akma sınırının üstünde başlanmalı ve şekil değişiminin başlamasının ardından akma sınırlarında yakın üst değerlerde olmalıdır.

Bahsedildiği üzere; $\varnothing 25 \times 0,28$ olarak boru için iç bölgeye verilen basıncın Baskı kuvvetine ters yönde bir kuvvet oluşturacağı ihmal edilmemelidir. İlk olarak 5 saniye boyunca, 180 bar ve devamında da 72' inci saniyeye kadar 80 bar basınçlandırmayı yapacağımızı var sayarsak;

$$D: \varnothing 25 \text{ mm}$$

$$t=0,28 \text{ mm}$$

$$D_{iç} = \varnothing 24,54 \text{ mm}$$

180 barda sızdırmazlık için minimum baskı yükü;

$$P = F/A \Rightarrow F = P \times A \quad \text{ise; } P = 180 \text{ BAR} = 18 \text{ MPa}$$

$$A = \pi \times r \times r \quad \text{ise; } r = D/2 = (25-0,56) / 2 = 24,54/2 = 12,27 \text{ mm ise;}$$

$$A = \pi \times 12,27 \times 12,27 = 472,73 \text{ mm}^2 \quad \text{bu durumda;}$$

$$F \geq 472,73 \times 18 = 8509 \text{ N kuvvet uygulanması gerekmektedir.}$$

Aynı denklemde baskı plakasının minimum yük değeri;

80 bar için;

$F \geq 472,73 \times 8 = 3790$ N kuvvet uygulanması gerekmektedir.

Buna ilaveten; Baskı plakası yükü basıncı yenmelidir ancak boruda da bir deformasyon oluşturmamalıdır.

Soğuk Çekilmiş AISI 316 için;

$F_{\max} \leq G_{\text{akma}} \times A_{\text{boru}}$

$G_{\text{akma}} = 205$ MPa ancak soğuk çekim olduğundan 310 MPa olduğu durumda;

$A_{\text{iç}} = 472,73 \text{ mm}^2$

$A_{\text{dış}} = 490,63 \text{ mm}^2$

$A_{\text{boru}} = 490,63 - 472,73 = 17,9 \text{ mm}^2$

$F_{\max} \leq 290 \times 17,9 = 5191$ N ise; ilave kuvvetler 5191 N' u aşmamalıdır.

Test başlangıcı esnasında 180bar basınçlara çıkılacağına $8509 + 5191 \Rightarrow 13700$ N yani ;

1396 kg gibi bir baskı yükü geçilmemelidir.

Test başlangıcı esnasında 80 bar basınçlara çıkılacağına $3790 + 5191 \Rightarrow 8981$ N yani ;

915 kg gibi bir baskı yükü geçilmemelidir.

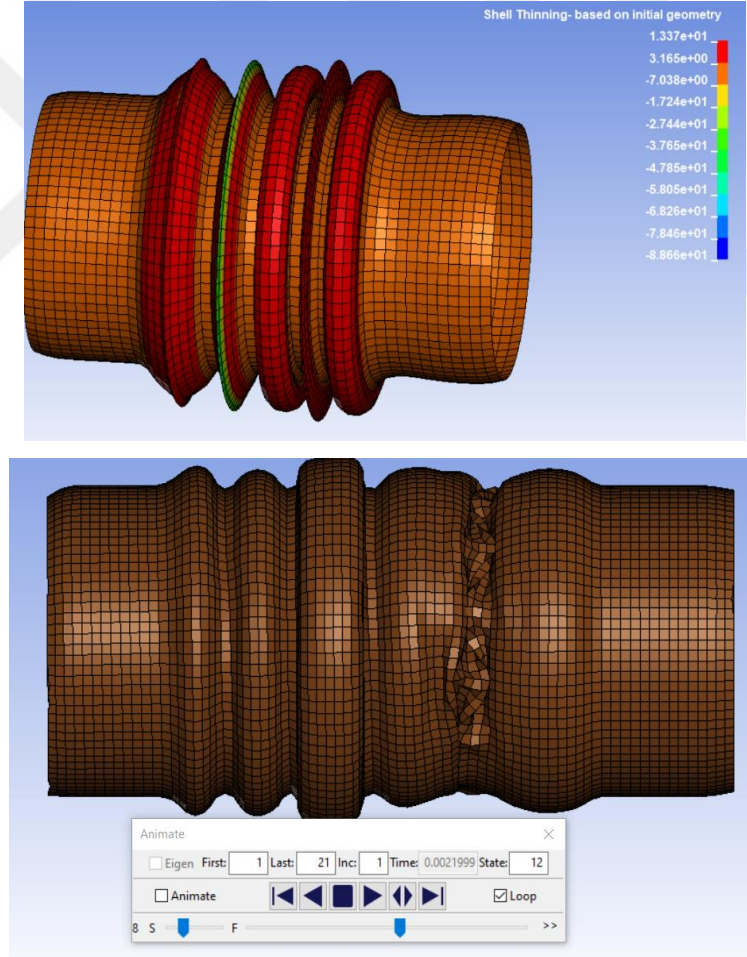
4.2 Sonlu Elemanlar Metodu ile Tasarım Doğrulama ve Parametrelerin Belirlenmesi

Gerçekleştirilen SE analizlerinde öncelikle form disklerinin konumlarının yanında prosesin uygulama metodunun belirlenmesine yönelik olarak basıncın ve kuvvetin uygulamaya başlama zamanları araştırılmıştır. Buna göre başarılı bir şekillendirme için form disklerinin kendi aralarında ve kalıplarla olan mesafesinin eşit olmasının uygun olduğu görülmüştür. Form diskleri arasında yay yerleştirmenin şekillenme açısından önemli bir etkisinin olmadığı görülmüştür. Prosesin uygulama adımlarının;

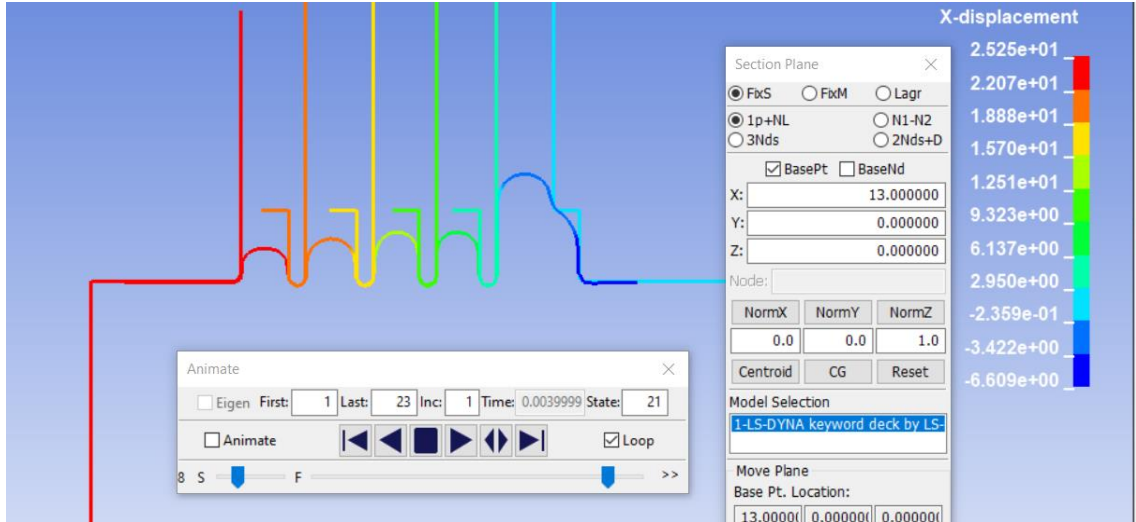
1. Az miktarda eksenel kuvvet ile kalıbın boruyla olan tam temasının sağlanması,
2. Maksimum değerine artan basınç yükleme profili ile borunun şişirilmesi ve bu sırada boru boyundaki azalmaya karşılık kuvvet değerinin artırılarak uygulanmaya devam edilmesi,

3. Körük bölgesinde deformasyon elde edildikten sonra kuvvetin daha da artırılarak kalıpların ve form disklerinin tamamen kapatılması ve bu sırada belirli bir basıncın boru içerisinde uygulanmaya devam edilerek nihai geometrinin elde edilmesi, şeklinde olmasının proses açısından daha uygun olduğu tespit edilmiştir.

Körüklü borunun başarıyla  retilbilmesi için basınç ve kuvvetin yükleme profillerinin optimum seviyede uygulanması gerektiği görülmüştür. Kuvvetin fazla olması durumunda  ekil 4.2’de g r ld   gibi boruda burkulmaların olu mu , sürtünme katsayısının 0,05’in altında olması durumunda boru kalıp içerisinde kayarak homojen  ekillenmeme sorunu ya anmı tır( ekil 4.3). Çok sayıda farklı yükleme profilleri ile yapılan analizler neticesinde  izelge 4.1’de görülen basınç ve eksenel baskı kuvveti yükleme eğrileri ile en uygun  ekillendirmenin mümkün olduğu belirlenmiştir.



Şekil 4.2. Fazla eksenel kuvvet nedeniyle meydana gelen burkulma



Şekil 4.3. Sürtünme katsayısının 0,05'in altında olması durumunda borunun kalıp içerisinde kayarak homojen şekillenmeme sorunu

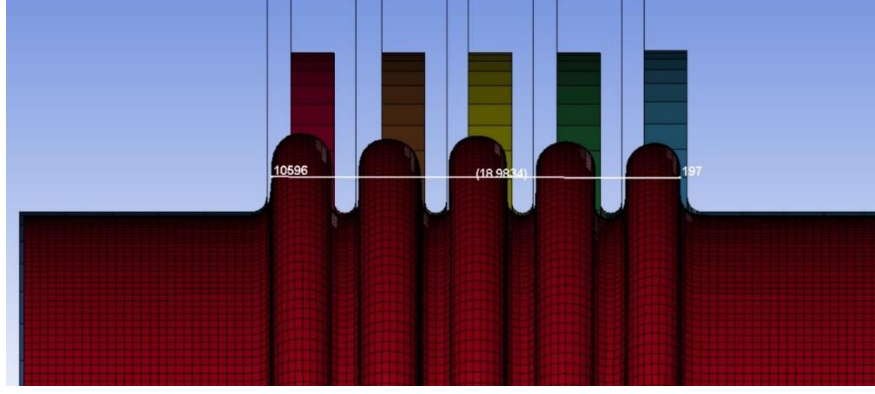
Çizelge 4.1. Körüklü boru üretiminde tespit edilen optimum yükleme profilleri

Zaman (s)	Basınç (MPa)	Eksenel Kuvvet (N)
0	0	0
0.001	0	750
0.005	18	1250
0.0051	8	1250
0.072	8	40000

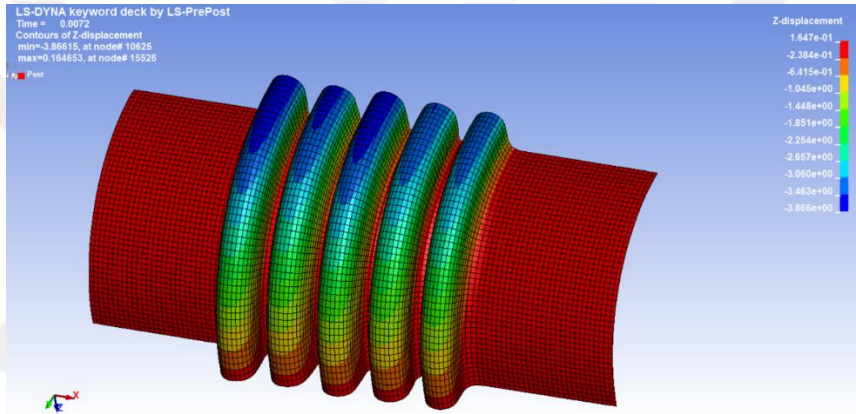
Tespit edilen optimum yükleme profilleri ile Şekil 4.4'te görüldüğü gibi kalıplar tamamen kapatılarak, Şekil 4.5'te görülen radyal doğrultu olan z doğrultusunda körükler büyük oranda homojen bir şekilde deforme edilerek makul bir geometri elde edilebilmiştir.

Gerçekleşen şekillenme işlemi sonucunda 75 mm başlangıç boyundaki boruda boy Şekil 4.6'da görüldüğü gibi 32,4 mm azalmıştır.

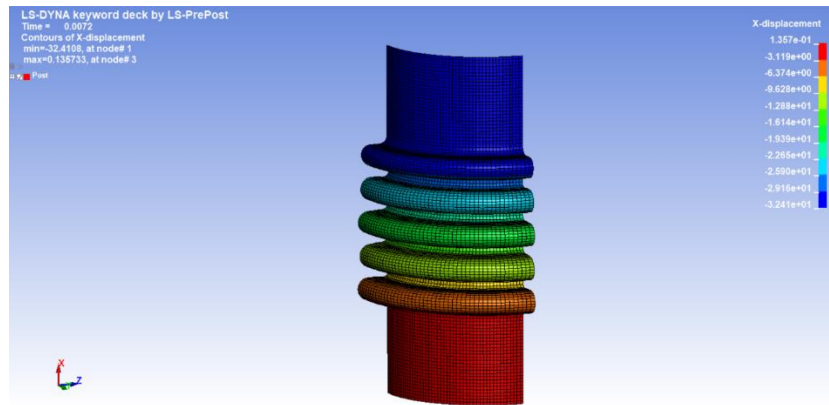
Körüklü borunun yarı çapı Şekil 4.7'de görüldüğü gibi 15,76 mm ila 16,22 mm aralığındadır.



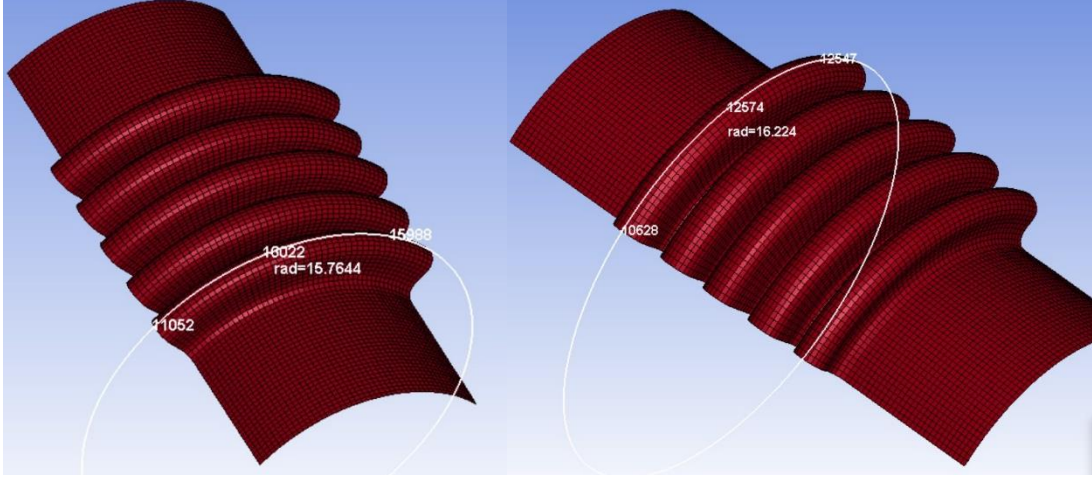
Şekil 4.4. Tespit edilen optimum yükleme profilleri ile kalıplar tamamen kapatılarak körüklü boru şekillenebilmiştir.



Şekil 4.5. Tespit edilen optimum yükleme profilleri ile körükler radyal z doğrultusunda büyük oranda homojen şekil değiştirerek elde edilebilmiştir.



Şekil 4.6. Tespit edilen optimum yükleme profilleri ile yapılan şekillenme sonrasında 75 mm başlangıç boyuna sahip boruda boy 32,4 mm azalmıştır.



Şekil 4.7. Tespit edilen optimum yükleme profilleri ile yapılan şekillenme sonrasında körük çapları

İnce cidarlı malzemelere uygulanan şekillendirme işleminde, prosesin başarısını belirleyen bir diğer husus malzemedeki incelme oranıdır. Tespit edilen optimum yükleme profilleri ile yapılan şekillendirme işlemi sonucunda boruda meydana gelen kalınlık dağılımı Şekil 4.8’de verilmiştir.

Kalınlık Değişiminin (Shell Thinning) Analizi

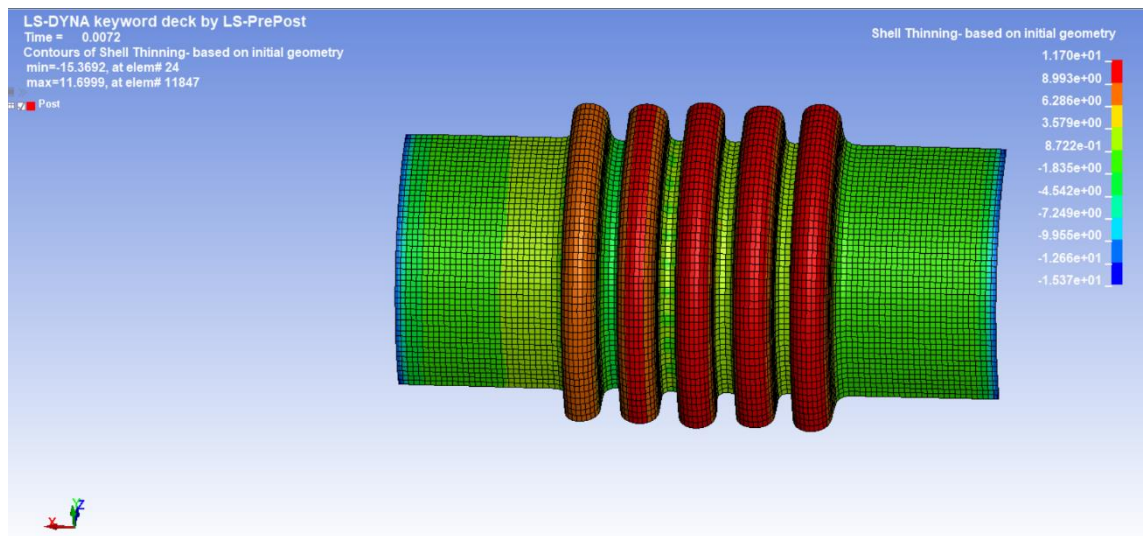
Boru Çapı; 24,84 mm

Cidar Kalınlığı: 0,24 mm

K: 1700 MPa

n: 0,2

İlk 5 saniye İç basınç: 180 bar 5-72 saniye arası iç basınç: 80 bar



Şekil 4.8. Tespit edilen optimum yükleme profilleri ile yapılan şekillenme sonrasında boruda en fazla %11,7 oranında incelme meydana gelmiştir.

Sac metal şekillendirme proseslerinde, malzemelerin kalınlık değişimleri, parçanın işlevselliğini ve mekanik dayanımını doğrudan etkileyen kritik bir parametrelerdir. Bu tür değişimler, çoğunlukla iç basınçların oluşturduğu çekme gerilmeleri altında gelişen inceltme (thinning) veya basma gerilmeleri ile oluşan kalınlaşma (thickening) şeklinde gözlemlenir (Groche et al., 2012).

Şekil 4.8’de sunulan sonlu elemanlar analizi, şekillendirme işlemi sırasında meydana gelen kalınlık değişimlerini gösterilmektedir. Analiz sonuçlarına göre, kırmızı renklerle gösterilen bölgelerde cidar kalınlığında maksimum %11,7 oranında inceltme meydana gelmiştir. Bu bölgeler, özellikle körük yapının tepe alanlarında yoğunlaşmakta olup, şekillendirme sırasında kalıcı deformasyonlara uğramaktadır. Bu oran, paslanmaz çelikler için Çizelge 4.2’de verilen literatüre göre kabul edilebilir aralıkta yer almaktadır.

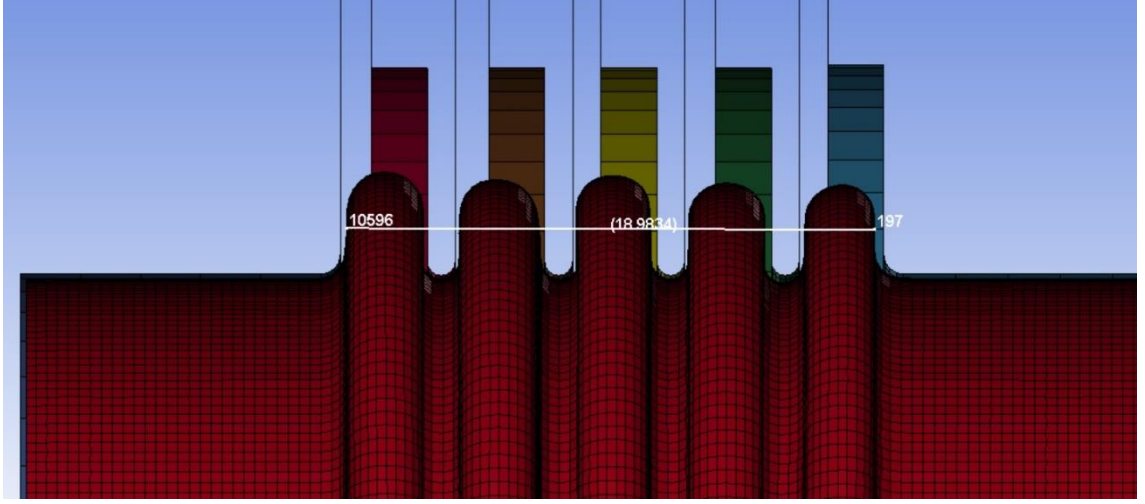
Buna karşın, yeşil tonlarla gösterilen bölgelerde, kalınlık artışı gözlenmekte olup ihmal edilebilir derecededir. Bu alanlarda malzeme sıkışması nedeniyle yaklaşık %4 civarında kalınlaşma meydana gelmiştir. Bu tür kalınlaşmalar genellikle parça mukavemetini olumsuz etkilememektedir. (Wang et al., 2018). Ancak; imal edilen körüklü borunun da üretim toleranslarını ve montaj uyumunu bozabilecek geometrik sapmalara yol açabilecek olsa da tolerans aralıkları içerisinde yer almaktadır.

Çizelge 4.2 Literatürde kabul görmüş inceltme aralıkları

İnceltme Oranı	Durum	Kaynak
%10’un altı	İdeal	(Hydroforming1688. (2023).
%10–15	Kabul edilebilir	(Zhang et al., 2021)
%18-20	Yırtılma yakın	(Wang, Y. vd. ,2021).
%20’nin üstü	Yırtılma olur	(Zhang et al., 2021); (Hydroforming1688, 2023)

Analizde çıkan inceltme ideal sınırlara yakın olmakla birlikte değerler en mükemmel aralıklara göre daha da yakınsanması ve kalınlık değişiminin en düzenli şekilde olabilmesi için kalıp geometrisi, sürtünme koşulları veya malzeme özellikleri üzerinde daha fazla optimizasyon yapılması önerilmektedir. Cidar kalınlıkları ve sürtünme kat sayısı güncellenerek analiz sonuçları yeniden değerlendirilecektir.

Analizlerde elde edilen körüklü kısmın boyutu Şekil 4.9’da görüldüğü gibi ~19 mm olmuştur. Körüklü boru için üretilmiş kalıplarda kullanılan disk tasarımları finalde 2 mm körük genişlikleri ve 1 mm körük aralıkları için kurgulanmış olup, beş körüğe sahip üretilmek istenen körük geometrisinde normal şekil değişimi durumunda; $5 \times 2 \text{ mm} + 4 \times 1 \text{ mm} = 14 \text{ mm}$ olması beklenen toplam körük boyu yaklaşık 19 mm civarında elde



Şekil 4.9 Analizde ortaya çıkan körük boyutu

edilmiştir. Bu durum sayesinde, net ölçülerde birim körük genişliklerine ulaşmak istendiğinde, körük yapısını oluşturacak kalıp boşluklarının istenilen değerden bir miktar düşük olması gerektiği ve geri yaylanma ile beraber tam istenilen boyutlara ulaşılacağı sonucuna varılmıştır. Örneğin 2 mm körük ölçülerin de AISI 316 hammaddeli bir körüklü boru imal edileceğinde dişi kalıp figürü yaklaşık 1,6 mm yapılarak geri yaylanma ile birlikte 2 mm genişliğine yaklaşacaktır.

4.3 Hidro-Şekillendirme Presinin Programlanması ve Yükleme Eğrilerinin Tahmin Edilerek Deneylerin Yapılması

Analizlerle elde edilen yükleme eğrileri ile ilgili verilerin hidro-şekillendirme presinin HNC kontrol ünitesine girilmesiyle deneyler yapılarak körüklü borular imal edilmektedir.

4.2.1 Paslanmaz 321’ den körüklü boru oluşumu deneylerin yapılması

Birinci Deney;

İlk olarak 200 bar basınçta test edilen 75 mm uzunluğunda kesilmiş boru prese bağlanan kalıp içerisine yerleştirilmiştir. Kalıba yerleştirilen boru 800 N ile sıkıştırılmak üzere ıstampa boruyu sabitleyecek şekilde kapatılmıştır. Ardından; presteki diğer değişkenler güncellenerek akışkan basıncı açılarak sistem çalıştırılmıştır.

İlk deney sonucunda; belirli 200 bara ulaşmadan 10-15. saniye aralığında boru ağzından sızdırma meydana gelmiştir. Şekil 4.10' da gösterilen bağlanan 1. Numune boruda herhangi bir şekil değişimi gözlenmemiştir.



Şekil 4.10 İlk Deney Numunesinin Görseli

İkincil olarak 300 bar basınçta test edilen 75 mm boya sahip boru prese bağlanan kalıp içerisine yerleştirilmiştir. Kalıba yerleştirilen boru 1000 N ile sıkıştırılmak üzere ıstampa boruyu sabitleyecek şekilde kapatılmıştır. Ardından; presteki diğer değişkenler güncellenerek akışkan basıncı açılarak sistem çalıştırılmıştır.

İkinci deney sonucunda; belirli 300 bara ulaşmadan 15-20. saniye aralığında 260 bar civarında boru ağzından sızdırma meydana gelmiştir. Bağlanan 2. Numune borunun kesit profilinde göz ile görülür herhangi bir şekil değişimi gözlenmezken Şekil 4.11 de gösterilen borunun çapının kalıptaki disklerin iç çaplarına kadar genişlediği görülmüştür.



Şekil 4.11 İkinci Deney Numunesinin Görseli

Üçüncül olarak 400 bar basınçta test edilen 75 mm uzunluğundaki boru prese bağlanan kalıp içerisine yerleştirilmiştir. Kalıba yerleştirilen boru 5000 N ile sıkıştırılmak

üzere ıstampa boruyu sabitleyecek şekilde kapatılmıştır. Ardından; presteki diğer değişkenler güncellenerek akışkan basıncı açılarak sistem çalıştırılmıştır.

Üçüncü deney sonucunda; önceden belirlenmiş 400 bar değerine yaklaşık 20-25.saniye aralığında ulaşılmıştır. 350 bar civarında boru ağzından sızdırma meydana gelse de istenilen basınca ulaşılmıştır. Bağlanan 3. Numune borunun kesit profilinde proses tasarımı kurgulanan ön şekillendirme işlemi göz ile görülür şekilde başlamıştır. Ancak; değişim beklendiği gibi 7 kademeli bir körük oluşumu ile sonuçlanmamıştır. İlave olarak; Şekil 4.12’ de gösterildiği üzere boru çapının kalıptaki disklerin iç çaplarına kadar genişlediği görülmüş ve ön şekillenmenin başladığı gözlenmiştir.



Şekil 4.12 İkinci Deney Numunesinin Görseli

4.2.2 İmal edilen körüklü boruların kontrol ve ölçümlerinin yapılması

Üretimi yapılan körüklü borunun ilk deneyleri Şekil 4.13’ de görüldüğü üzere istenildiği gibi çıkmamıştır. Sonuç olarak elde edilen numunenin ölçümü yapılmış ve Çizelge 4.3 de listelenmiştir.



Şekil 4.13 Üretimi Yapılan Körüklü Boru

Çizelge 4.3 Körüklü Boru Ölçümü

+Z Eksen Konumu	Çap Ölçümü [mm]	Cıdar Kalınlığı [mm]	Şekillenme Durumu
0	16,50	0,55	Yırtılma Yok
10	17	0,53	Yırtılma Yok
17,5	16,60	0,55	Yırtılma Yok
25	17,50	0,53	Yırtılma Yok
32,5	16,70	0,55	Yırtılma Yok
40	17	0,53	Yırtılma Yok
50	18,70	0,49	Yırtılma Yok
60	22,5	0,42	Yırtılma Yok

4.2.3 ST-37 ‘den körüklü boru üretim deneylerinin yapılması

İlk olarak 321 Paslanmaz çelikteki oluşumda yırtılma olmadan meydana gelen şekil değişimlerindeki olumsuz gözlemler sonucu akma dayanımı nispeten daha düşük ve şekil değim kabiliyeti daha düşük olan 16 çapındaki ST-37 boru numuneleri test edilecek şekilde 75 mm uzunluğunda kesilerek boru prese bağlanan kalıp içerisine yerleştirilmiştir. Kalıba yerleştirilen boru 1000 N ile sıkıştırılmak üzere üst kalıp boruyu sabitleyecek şekilde kapatılmıştır. Ardından; presteki diğer değişkenler güncellenerek akışkan basıncı açılarak sistem çalıştırılmıştır.

Deney öncesinde önceki deneylerdeki gözlemlere göre belirlenen baskı plakası kuvveti, akışkan basıncı ve ıstampa ilerlemesi gibi proses değişkenleri hidro şekillendirme presinde ayarlanmıştır. Istampaya kapandıktan sonra ilk olarak 100 bar ile başlanmış ve kademeli olarak basınç artışı 500 bara kadar çıkarılarak ve beraberinde ıstampanın ilerlemesi ile de körüklerin oluşumu hedeflenmiştir.

ST-37 ile yapılan ilk deney sonucunda; belirlenen basınç değerine ulaşmadan yaklaşık 370 barda ve yaklaşık 20. saniye ani basınç ve sıkıştırma sıvı akışkanı kaçağı ve hemen akabinde de borunun üst bölgesinde şişme ve yırtılma meydana gelmiştir. Yırtılan boru ağzından fışkırma meydana gelmiş ve pres durdurulmuştur. Şekil 4.14’ de görüldüğü gibi bağlanan numune borunun alt bölgelerinde körük kıvrımlarının başladığı ancak; borunun genişleyip yırtılmasından kaynaklı şekil değişiminin durduğu görülmüştür.



Şekil 4.14 ST-37 ile Üretimi Yapılan ve Yırtilan Boru

ST-37 ile yapılan ilk deney sonucunda; borunun genişleyip yırtılmasından kaynaklı şekil değişiminin durduğu görülmüştür. Bu durumda, 75 mm kesilen borunun yaklaşık 20 mm'lik kısmının ilk etapta dışarıda kalmış olmasının şişmenin temel nedeni olduğu anlaşılmıştır. Şekil değişimi istenen bölgenin alanının kalıbın üst kısmında kalan bölgesinden kat kat düşük olması, iç basıncın oluşturduğu birim şekil değişimi ile daha önceden form almaya başlamıştır. Buda basınç kaybına ve borunun diğer bölgelerinin şekil değişimine uğramamasına neden olmuştur.

Yine ST-37 ile yapılan ikinci deneylerde ise şişen bölgeye ilave yüksük eklenmiş ve üst bölgedeki şişmenin önüne geçilmiştir. Bununla beraber; Hidro şekillendirme presi parametreleri yine önceki deneyde olduğu gibi ayarlanmış ve 7 kıvrımlı körük yapısı deneme için 3'e düşürülmüş ve proses çalıştırılmıştır. Deney sonucunda; Şekil 4.15' de görülen borudaki körük yapısı oluşmuştur.

Son olarak; hem kalıptaki eksik ve fazla bileşenler belirlenmiş, hem de yırtılma, şekil değişimi ve ıstampanın durmaksızın ilerlemesinin prosese katkısı, yapılan ilk



Şekil 4.15 ST-37 ile Üretimi Yapılan 3 Kıvrımlı Körüklü Boru

deneyler sonucunda anlaşılmıştır. 7 kıvrımlı bir körüklü boru oluşturmak için yapılan üçüncü ve son deneyler için presteki basınç limitleri, yeniden belirlenerek yaklaşık 410 barlık bir basınca kademeli olarak artırılmış ve ıstampa hareketi kesintisiz olacak şekilde

30. saniyede tamamlanması için ayarlanmıştır. Sonuç itibarı ile iki farklı numunede de aynı değişkenler ile proses çalıştırılmış ve birbirine yakın sonuçlar alınarak kıvrımlı yapı başarılı bir şekilde elde edilmiştir.

ST-37 borudan yapılan son deneylerde Şekil 4.16' da gösterildiği üzere gözlemlenmiştir ki; şekil değişiminin ilk aşaması basınçlanma ile kalıp boşluklarına genişleyecek şekilde olmakta, sonrasında da baskı plakasının yukarı doğru hareket ettiği ve yükün uygulandığı taraftan körük oluşumu başlamaktadır.



Şekil 4.16 ST-37 ile Üretimi Yapılan 7 Kıvrımlı Körüklü Boru

4.2.4 AISI 316'dan körüklü boru oluşumu ve deneylerin yapılması

Parametreleri tahmin etme metodu ile yapılan deneysel çalışmalar neticesinde; Ø16*0,5 ölçülerinde boruların şekillenmesi için cidar/çap oranlarının mevcut hidro-şekillendirme presinin kapasitesine göre sınırlarda olması ve ilk deneyler sonucunda körüklü borular elde edilebilse de tam sağlıklı numune sonuçları alınamamıştır. Bu durumdan kaynaklı; ikinci bir kalıp imal edilmesine karar verilmiş ve daha önce de bahsedildiği üzere; malzeme tercihi, piyasada körüklü boru yapımında çokça kullanılan

316 paslanmaz çelikten yana kullanılmıştır. Bu doğrultuda; proses parametreleri belirlenmek istenen körüklü boru, 5 kıvrıma sahip olacak şekilde $\text{Ø}25 \times 0,28$ ölçülerinde ince cidarlı bir borudan, deneysel çalışmalar sonucunda imal edilmiştir.

Şekil 4.17’ de görülen 5 kıvrımlı körüklü boruları imal etmek için yapılan deneysel çalışmaları yaparken hidro-şekillendirme presinin parametrelerini belirlemek amacıyla bir sonlu elemanlar yazılımı olan LS-DYNA yazılımı kullanılmıştır. İlk olarak boyutları belirlenen ve bu boyutlara göre kalıp tasarımı yapılan 316 paslanmaz malzemeden üretilecek körüklü boru için şekillenme basıncı, oluşacak cidar incelmeleri,

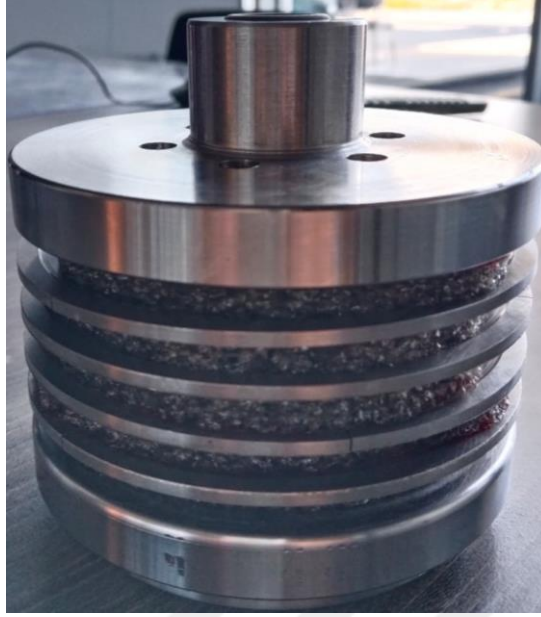


Şekil 4.17 Üretimi Yapılan 5 Kıvrımlı Körüklü Borular

geri yaylanmalar, kalıp kapanma hızı ve zamanı, analiz esnasında belirlenip hidro-şekillendirme prosesi ve imal edilecek ürün geometrisi deneyden önce simüle edilmiştir.

Ardından; deneye başlamadan önce sonlu elemanlar metodu tarafından belirlenen parametreler hidro-şekillendirme presi kontrolcüsüne girilerek beş adet numune üretimlerinin, ikinci tasarıma göre imal edilmiş ve montajlanmış körüklü boru kalıpları ile yapılması hedeflenmiştir. Bu doğrultuda 75 mm boyuna kesilmiş $\text{Ø}25 \times 0,28$ ölçülerindeki borular kalıp içerisine yerleştirilip üst kalıp kapağını borunun üstüne koyarak son dilim boşluğunu oluşturarak, kapalı bir hacim oluşturulmak suretiyle Şekil 4.18’ de olduğu gibi kapatılmıştır. Sonraki durumda içinde boru olan kalıp hidro-şekillendirme presine yerleştirilmiştir.

Deney için ilk 5 saniyede 160 barlık bir basınç kullanılmış olup ön şekillenmenin başladığı görülmüştür. Dolayısıyla, şekil değişiminin yani kalıp disklerinden mesnetlenerek, aralıklardaki dışa doğru şişmenin başlamasından sonra iç basınç 80 bar



Şekil 4.18 Deney sonrası kalıptan çıkarılan AISI 316' dan üretilmiş numune

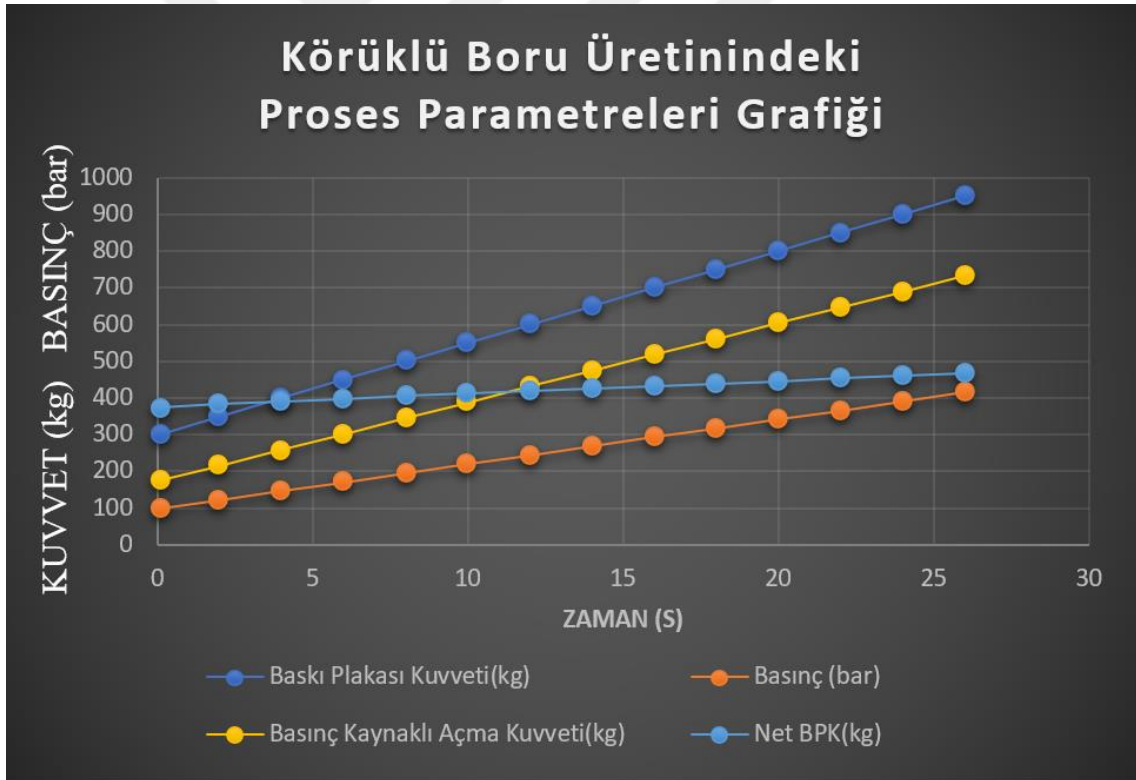
olarak devam etmiş ve 35-40. saniyelerin sonunda körük yapılarını oluşturacak şekilde kalıp tam olarak kapanmıştır. Bu aşamadan sonra oluşan körük profillerinin kalıcı deformasyon olabilmesi, geri esnemenin azalması ve şişmenin istenilen boyutta olması için 72. saniyede 16 ton yüke kadar baskı yükü verilmeye devam etmiş ve proses tamamlanarak, ıstampa stroğu genişletilmiştir. Pres arası boşluğu açıldıktan sonra kalıp içerisindeki yağ boşaltılarak, dışarıya alınmış ve üretilen körüklü boru kalıptan çıkarılmıştır(Şekil 4.19). Üretilen ürünleri kalıptan ayırmak el ile yapıldığında çok ta pratik olmadığı gibi prototip çalışmalar için yapılan bu ayırım metodunun yüksek adetli seri üretim şartları için iyileştirilmesi gerektiği anlaşılmıştır.



Şekil 4.19 Deney sonrası kalıptan çıkarılan AISI 316' dan üretilmiş numune

Yukarıdaki anlatılan proses aynı parametrelerle ve birkaç tekrar ile yinelenerek prosesin sürekliliği de bu anlamda teyit edilmiştir. Bununla beraber; imal edilen boruların ölçüleri ve yaptıkları boyutsal değişimler analizde çıkan değerlere yakınlık göstermiştir. Bu sonuç sayesinde son elemanlar metodunun bir hidro şekillendirme hidro-şekillendirmedeki önemi bir kez daha teyit edilmiştir.

Yapılan deneylerde 100 MPa kapasiteli çift etkili hidro şekillendirme presinde yapılmıştır. Seçilen boru çapında AISI 321 paslanmazlar da körüklerin oluşumu için 200-350 bar basınçların yetersiz olduğu anlaşılmıştır. Şekil 4.20’de verilen grafikte de görüldüğü üzere, istenilen sayıda kıvrım oluşturabilmek için asgari basınç değerinin 400 bar civarında olduğu deneylerde anlaşılmıştır. Bu doğrultuda tam şekillenmeyi sağlayacak akışkan basıncının 500 barlarda olacağı düşünülmektedir. Borunun hem şekil değişimi sağlaması için hem de gerekli sistem sızdırmazlığını oluşmasını sağlayacak 100 bar – 500 bar arasında bir basınç ihtiyacı oluşmuş olup paralelinde de 180 kg’ dan 1500



Şekil 4.20. Ø 16x0,5 ST-37 Borunun Proses Parametreleri Grafiği

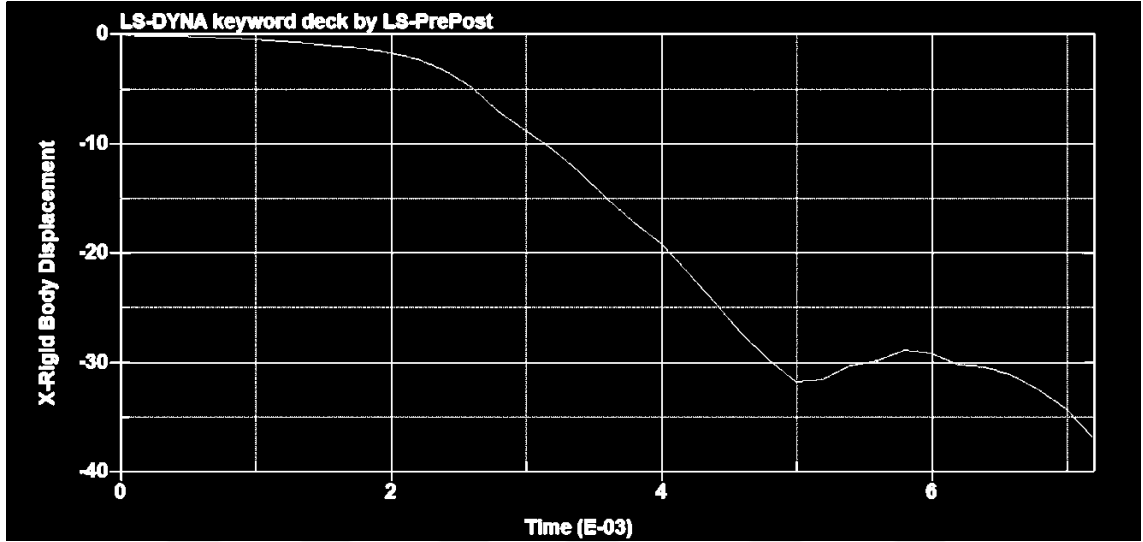
kg değerlerine çıkacak bir baskı kuvveti değerlerine ihtiyaç duyulmuştur. Ayrıca; ST-37 borular içinde şekil değişiminin 250-300 bar basınçlar arasında başladığı ve 330-400 bar basınçlarda tam akmayı ve şekil değişimin sağladığı anlaşılmıştır. Baskı kuvvetinin ve akışkan basıncının birbiri ile senkron artışının ve boy kısalması ile alt ve üst kalıp hareket

hızının birbirine uyumunun proses için çok çok önemli unsurlar olduğu anlaşılmıştır. Bunun yanında; deneyde kullanılan malzemelerden Paslanmaz 316 ve Paslanmaz 321' in ST-37'den çok daha zor şekillendirilebildiği anlaşılmıştır.

Kalıp tasarımında iki aşaması olan proses için (iç basınçla şekillenmenin başlaması ve bası oluşturularak körüklerin katlanması) ilk aşamada da sadece iç basınç şekillendirmesinin yeterli olmayacağı ve ıstampanın kapanmasının kusursuz olması gerektiği anlaşılmıştır. Çalışma esnasında körüğü oluşturacak ayraçlar ilk olarak katı ve elastiklik özelliği olmayan bir malzemeden yapılmış olup ıstampanın hareket ediyor olmasına rağmen şekil değişimini kısıtlayıcı bir etki oluşturmuştur. Sonrasında, ayraç olarak elastikiyet özelliği olan silikon kauçuk o-ringler kullanılmış ve proses tam doğru hali almıştır. Yine numune boruyu kalıba yerleştirilirken boğaz yüzüğünün olmayışı ve bu sebepten kıvrım oluşacak yüzeylerin yüzey alanlarının boğaz bölgesinin yüzey alanından düşük kalması, iç basıncın oluşturduğu ilave eğilme ve şişme yüklerine neden olmuştur. Mekanik özelliklerinin üstünlüğü ile seçilmiş olan 321 paslanmaz çeliğin şekil değişimi kabiliyetlerinin ST-37'ye oranla daha düşük olduğu anlaşılmıştır. Ayrıca hidro şekillendirme aşamalarında problem yaşamamak ve üretimlerin istenilen şartlarda yapılması için baskı plaka kuvveti, iç basınç, malzeme, körük boyutu, boru boyutu, şekil değişim ölçüleri, pres stroku, baskı plaka hızı ve kalıp tasarımı gibi tüm proses gerekçelerinin doğru oluşturulması ve uygun kapasitelerin seçilmesi gerekmektedir. Bunun yanında sistemin bileşenlerinin ve değişkenlerinin uyum içinde olması son derece önemlidir. Ayrıca; deneysel çalışma sayısını azaltmak ve daha az deneyle başarıya ulaşmak için öncesinde sonlu elemanlar analizinin yapılmış olması sürece ışık tutacaktır. İlk deneyler sonucunda edinilen deneyimler doğrultusunda daha ince cidarlı yapıda AISI 316 bir boru için bir kalıp tasarımı ve üretimi yapılmış ve ilgili çalışmanın proses geçerliliği sonlu elemanlar metodu ile birlikte deneyler ile de doğrulanmıştır.

Tez çalışmasının önceki bölümlerinde de anlatıldığı üzere; sonlu elemanlar analizi yapmadan ST-37, 321 Paslanmaz gibi malzemelerden çokça deney yapılmış ancak nihai bir sonuca tam olarak ulaşılmamıştır. İlk deneylerde yapılan metot da prosesleri tahmin edilerek yakınsanacak uygulamalarla tam manasıyla istenilen geometride bir körüklü boru imal etmek için belki de yüzlerce deneyin ardından prosesin isterleri belirlenebilecektir. Bu doğrultuda; seçilmiş olan malzemeye ve tasarlanmış olan kalıp geometrisine göre LS-DYNA yazılımı ile analiz yapıp presteki üretim için tezgâha girilecek parametrelerin belirlenmesi, zaman ve üründe ki doğruluk açısından kritik bir

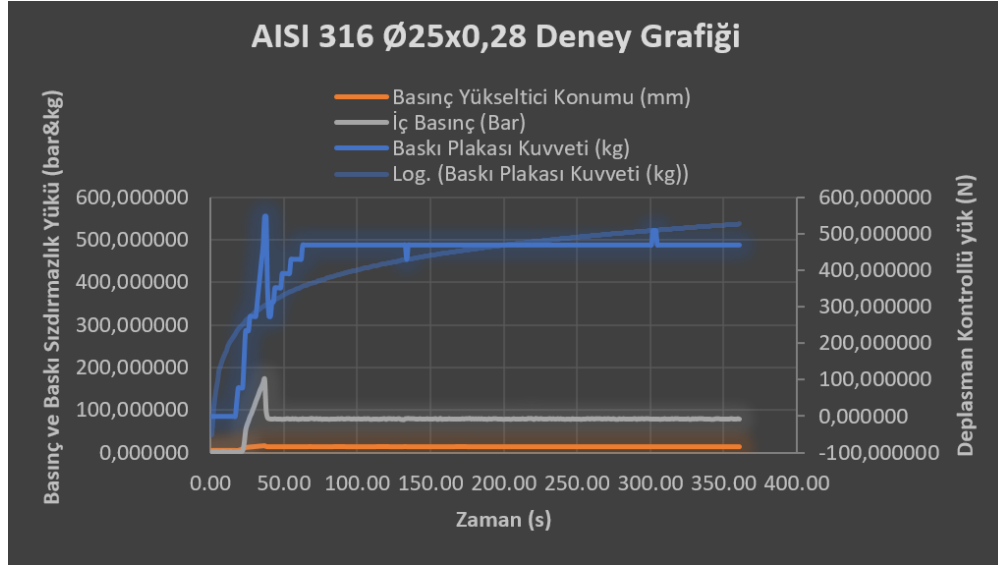
rol üstlenmiştir. Nitekim, Şekil 4.21’de görüldüğü gibi deplasman kontrollü yapılan belirli zaman aralığında yapılan simülasyon hidro-şekillendirme presinde kuvvet ve zaman kontrollü olarak tanımlanabilmiştir. Yapılan analiz sonucunda körüklerin tepe noktalarındaki boru cidarlarında yaklaşık %10-13 civarı incelmeler meydana gelmiştir. Ayrıca, körük katmanları arasında ki kıvrım geometrisi tam 90 derece değil bir miktar açılmalarla oluşmuştur. Bu durumun şekil değişim yükünden kurtulduktan sonra



Şekil 4.21 LS-DYNA’ dan alınan deplasman değişimi

malzemenin elastik deformasyona bölgesindeki kısımlarının geri yaylanma oluşturmasından kaynaklı olduğu anlaşılmıştır. Toplam körük boyu kalıp formunda 14 mm olması gerekirken analiz sonrasında yaklaşık 18 mm olarak görülmüştür. Konunun önemli bir çıktısı da yapılan simülasyonlardaki çıktıların deneyler ile elde edilen ürünlerdeki değerlere çok yakın botta olmasıdır.

Daha öncede tanımlandığı gibi 160 bar ön şekillenme basıncı 80 bar şekillenme basıncı verilerek silindirik bir profile sahip olan Ø25 x 0,28 mm boyutlarındaki ince cidarlı bir boru 316 paslanmaz çelikten üretilmiş ve bir körüklü boru üretmek için gerekli proses parametreleri belirlenmiştir. Şekil 4.22’de görüldüğü üzere ilk olarak şekil değişimi için 160 bar basınçlara çıkılmış ardından da 80 bar basınçla 70’ inci saniyelere kadar devam eden proses sürdürülmüştür. Yine grafikten anlaşıldığı üzere sızdırmazlık sağlamak için gerekli olan baskı yükü basınç değişimi ile doğru orantılı olarak artmış ve azalmıştır. Ayrıca; deney sırasında üretimi yapılan körüklü borunun şekil değişimi oluşurken deformasyon sertleşmeleri ve yırtılmaların zaman içerisinde meydana



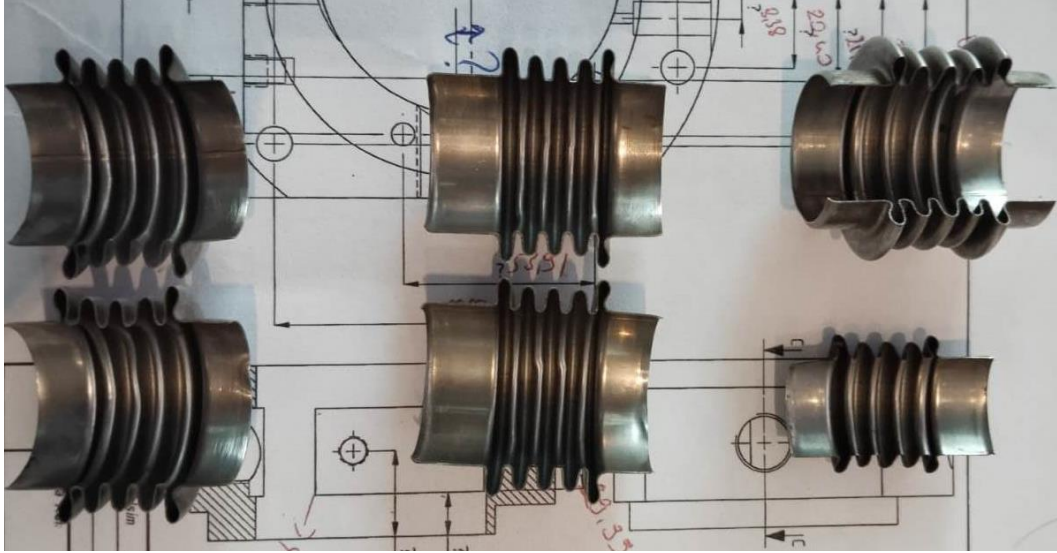
Şekil 4.22. Ø 25x0,28 AISI 316 Tüpün Proses Parametreleri Grafiği

gelmemesi için proses zaman aralığının şekil değişimi süresinden daha uzun bir süre kuvvet uygulandığı anlaşılmıştır.

Hidro-şekillendirme presinde aynı parametre değerlerinde çokça tekrar yapılmış ve birbirine çok yakın özellik ve boyutlarda körüklü boruların üretilmesi sağlanmıştır. Üretimin yapıldığı esnada bir kez daha anlaşılmıştır ki kalıp bileşenlerinin birbirine göre uyumlu hareket edebilmesi ve şekil değişim kabiliyetlerinin sıkıntıya uğramaması için sürtünmelerin minimum seviyede olmasının son derece önemlidir. Öyle ki merkezleme pimlerinin yataklama fonksiyonunu getirmediği veya kısıtlı getirdiği durumlarda bazı bileşenlerde deformasyonlar ve körük kanallarında kaçıklıklar meydana gelmiştir.

Yapılan deneyler sonrasında üretilen 5 kıvrıma sahip körüklü boruların detaylı incelenmesi yapılmıştır. Son deneyler AISI 316 Paslanmaz boru için yapılan kalıpta yapılmış olup art arda beş farklı numune üretimi tamamlanmıştır. Üretilen ürünleri görsel incelemeleri yapıldıktan sonra boyutsal kontrolleri yapılmış ve ardından üç farklı numune, ürünün iç körük figürünü ve cidar kalınlıklarındaki değişimi gözlemlemek amacı ile kesilmiştir. Kesilen körüklü borular, Şekil 4.23' de görülmektedir.

Daha öncede bahsedildiği üzere üretim için kullanılan paslanmaz boru dikişli olarak üretilmiştir. Bu dikiş çalışmayı yapmadan önce şekillenebilirlik noktasında soru işaretleri oluşturmuş olsa da numunelerin şekillenmesinde hiçbir sorun oluşmamıştır. Bunun yanında kıvrım yapıları hadde yönüne dik doğrultuda kolayca şekillenebilmiştir. Yine görsel olarak analizde çıkan görsele yakın bir körüklü boru üretimi yapılmış olup sadece olarak birinci ve beşinci körüklerde çap değerleri diğerlerine nazır %3 civarında



Şekil 4.23 Üretimi yapıp incelemek üzere kesilen borular

daha büyük gelmiştir. Bu farklılığın nedeninin borunun boy kısmından baskılanmasıyla oluştuğu anlaşılmıştır ve seri üretim şartlarında gerekli önlemler alınabilecektir. Bunun yanında körük tasarım çapı Ø32 olarak belirlenen ürün tasarımı hem analizde hem de üretilen nihai numunelerde aynı değerlerde gelmektedir. Aynı zamanda üretilen borulardaki körük genişliklerinde geri esnemelerden kaynaklı boyutsal artışların olduğu ve toplam genişliğin yaklaşık 18 mm civarlarında seyrettiği anlaşılmıştır. Bu durumda üretim sonuçlarının analiz değeri ile birebir örtüştüğü anlamına gelmektedir.

Numune borular hassas şekilde tam yarı kesitten tel erozyon cihazları ile kesilmiştir. Kesilen parçaların optik ölçüm cihazında yaklaşık 30X yakınlaşma ile ölçümleri yapılmıştır (Şekil 4.26). Ölçüm sonuçlarına göre; körük tepelerinde %10-15 arasında bir cidar incelmesi meydana geldiği anlaşılmıştır. Ayrıca körü duvarlarının



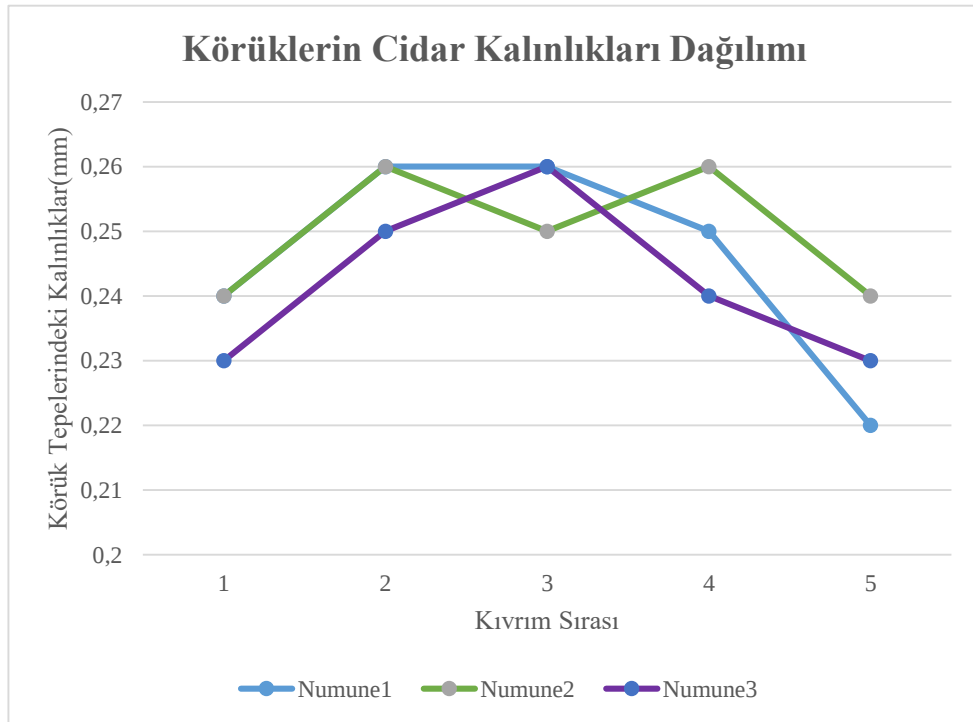
Şekil 4.26 İncelemek üzere kesilen boruların optik cihazdaki görünümü

birbirine paralel olmadığı ve yine körüklerin tepe noktasından geçen simetri eksenlerine göre simetrik olduğu anlaşılmıştır. Tüm bunlar ile beraber nihai ölçümler üç farklı numune üzerinde yapılmış ve radyus, körükler arası mesafe, körük tepe çapı, körük dip çapı, tam genişlik boyu ve cidardaki incelmeler gibi boyutsal bölgelerin her proses sonrasında birbirine yakın olduğu anlaşılmıştır. Dolayısıyla; proses parametrelerin belirlenmiş olabilmesi için en önemli faktörlerden olan tekrarlanabilirlik yüksek oranda sağlanmıştır.

4.2.5 Boru Ölçümlerinin Yapılması

Başlangıçta boru kalınlığı 0,28 mm iken üretim sonrası kalınlıklar kıvrım tepelerinde Şekil 4.24’de görüldüğü gibi 0,22 ila 0,26 mm arasında ölçülmüştür. Ölçümler optik ölçüm cihazı ile yapılmış olup prosesin doğruluğu; tasarım, analiz sonuçları ve standartlara göre sağlanmıştır. Tüm ölçümlere bir çizelge EK-1’de verilmiştir.

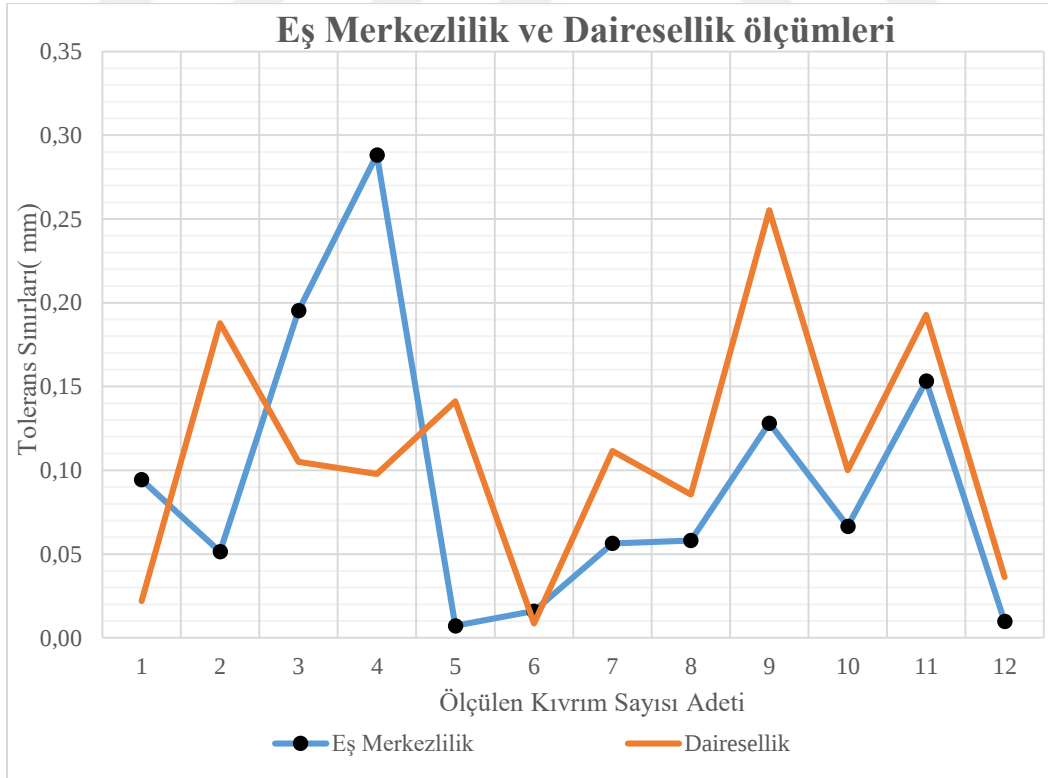
İmal edilen borular üzerinde yapılan ölçüm sonuçlarına göre şekillenen boru cidar kalınlığı, profil boyutlarındaki dış çapların değişimine ters orantılı olarak artmakta veya



Şekil 4.24. Cidar İncelmeleri

azalmaktadır. Yani; 25 mm çapında ki boru cidarının 32 mm genişlediğinde ki körük kıvrımı çapına dönüşmesi ile 31,5 mm veya 33 mm boyutlarındaki durum arasında ufak ta olsa farklılıklar oluşmaktadır. Örneğin; imal edilen 1. numunede 31,5-32,1 ve 32,3 mm çapına sahip olan kıvrımlardaki cidar kalınlığı 0,28 mm' den 0,26-0,25 mm' ye düşmüşken, 35,3 mm çapına sahip olan kıvrımdaki cidar kalınlığı 0,28 mm' den 0,22 mm' ye incelmıştır. Bu durumda cidar incelmelerinin şekil değişimi ile birlikte paralel azalıp artabileceği ve aynı şekil değişimlerinin olduğu durumlarda gerekli boyutsal hassasiyet sağlandığı takdirde de cidarların homojen şekilde elde edildiği sonucuna varılmıştır.

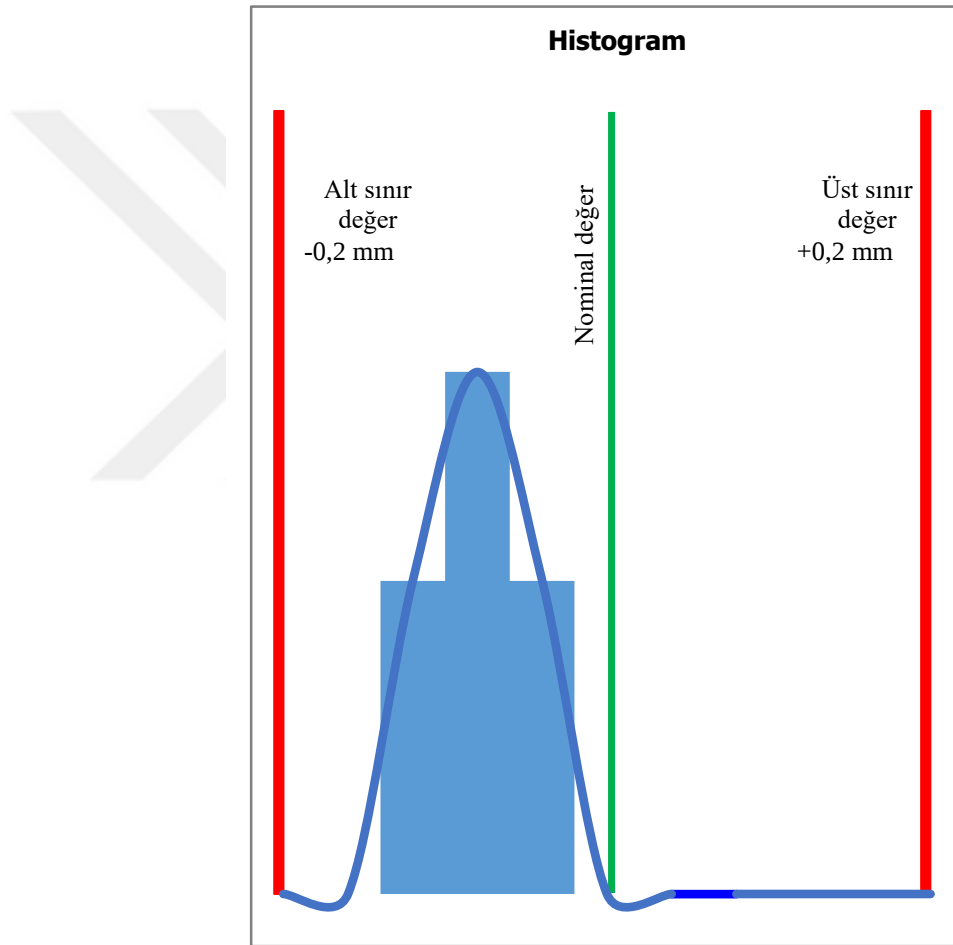
360 derece ile ölçüm yapabilen optik ölçüm cihazında yapılan ölçümler neticesinde; imal edilen körüklü boruların kıvrımlarının dairesellikleri ve birbirine olan eş merkezlilikleri elde edilmiştir. Ölçümler yapılırken $\pm 0,2$ olarak eş merkezlilik ve dairesellik toleransı herhangi bir standarda bağlı kalmaksızın, bu tip körüklü boruların uygulama alanlarındaki montajlanmış durumları göz önünde bulundurularak tahmin edilerek verilmiştir. Bunun yanında proses gereği en mükemmel şekil değişiminin sağlandığı orta kıvrım referans kabul edilerek ölçümler yapılmıştır. Şekil 4.25' de ölçüm sonuçları 12 kıvrım örneklemini alarak gösterilmiştir. Sonuç olarak; yapılan ölçüm



Şekil 4.25. Eş Merkezliliği ve Dairesellik Ölçüm Grafiği

sonuçları, hidro-şekillendirme esnasında iç basınçla şekillendirme yapılmış bir borunun kıvrımlı yapısındaki şekil değişiminin birbirine göre pozisyon dağılımı ve daireselliği incelendiğinde, çevresel olarak eşit sayılacak derecede homojen şekillenmeler sağlanabildiği anlaşılmıştır.

Şekil 4.26’de ölçüm sonuçlarının verilen toleransların hangi sınırında olduğuyla ilgili histogram eğrileri verilmiştir. Bu doğrultuda, yeşil çizgi nominal değeri (0,00) turuncu ile gösterilen çizgiler tanımlanmış olan $\pm 0,2$ toleransları tanımlamaktadır. Histogramdan anlaşılmıştır ki imal edilen körüklü boruların konsantriktik ve



Şekil 4.26 Eş Merkezlilik ve Dairesellik Toleransının Alt Tolerans Ortalaması

daireselliklerinin ölçüleri alt tolerans sınırlarında gelmektedir. Yani; toplam aralıkta 0,4 olarak tanımlanan sınırlar 0,25 mm civarlarında ölçülmüştür. Buda tekrarlanabilirliğin yeterli olduğu anlamına gelmektedir.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu yüksek lisans tezinde U kesitli metal körüklerin hidro-şekillendirme ile imalatında proses parametrelerinin belirlenmesi için deneysel ve sayısal bir çalışma gerçekleştirilmiştir.

Tüp hidro-şekillendirme LS-DYNA sonlu elemanlar yazılımı ile modellenmiştir. Başarılı bir üretimin gerçekleştirilebilmesi için; kritik proses parametreleri olan ön şekillendirme basıncı, katlama sıvı basıncı, eksenel ilerleme ve bunların birbirine bağlı değişimlerini ifade eden yükleme eğrileri; sayısal deneme yanılma yöntemiyle belirlenmiştir. Sayısal yöntemlerle elde edilen yükleme eğrileri üzerinde hiçbir değişiklik yapılmadan deneysel çıktılar ve beklenen üretimler gerçekleştirilebilmiştir. Böylece prosesin genelleştirilebileceği sonucuna ulaşılmıştır.

Yapılan ön deney çalışmalarında ilk olarak 16 mm dış çap ve 0,4–0,5 mm cidar kalınlığına sahip AISI 321 paslanmaz borular kullanılmış olup şekillenme sadece, boru dış çapı ile kalıp boşluğu arasında temas oluşana kadar devam etmiştir. Bunun yanında; farklı malzeme tiplerinin aynı değişkenlerdeki etkileşiminin görülmesi için yapılan deneylerde ise aynı çap ve cidar boyutlarındaki ST 37 (S235JR) çelik borular kullanılmış, ancak kalınlık/çap oranının yüksek (0,025–0,03) olması, şekillendirme basıncının oluşturulması için kullanılan pres kuvvetlerinin kapasiteyi aşması nedeniyle daha ince cidarlı ve daha geniş çaplı boru boyutlarının kullanılması ile daha düzgün körük profilleri oluşturulabileceği sonucu elde edilmiştir. Ön deneylerden anlaşılan sonuçlardan alınan deneysel çıktıları göre prototip kalıbı tasarımı iyileştirilmiş ve daha sonra, kolay şekillenmesi amacı ile kalınlık/çap oranı 0,011 olan 25 mm çap ve 0,28 mm kalınlığındaki AISI 316 paslanmaz çelik borularla yapılan denemelerde oldukça başarılı şekillendirmeler elde edilerek istenilen 5 kıvrımlı körüklü boru imalatı sağlanmıştır.

Üretilen parçalar tel erozyon yöntemi ile simetri eksenini boyunca kesilmiş, körük profilleri VICI optik komparatör ölçüm cihazı ile ölçülmüştür. Elde edilen sonuçlar; dip ve tepe kıvrımları ile cidar kalınlıklarındaki değişimlerin sırasıyla tekrarlanabilir olduğunu ve profillerin kabul edilebilir toleranslarda üretilebileceğini göstermiştir.

Sonuç olarak; bir körüklü borunun hidro-şekillendirilmesi süreci, sıvı iç basıncın oluşturduğu birim alana etki eden gerilmelerin boru malzemelerinin akma sınırını

geçerek, malzemede şekil değişiminin başlamasını sağlamakta ve başlayan şekil değişimini kalıp aralıklarının mesnetlenmesinden faydalanarak kıvrımlı bir yapıya dönüştürme işlemidir. Bu tez çalışmasında deneyleri yapılan bu metot endüstride kullanılan çokça körüklü boru üretimi yapılan üretim yöntemine göre kat ve kat daha kısa operasyon süresi aralıklarında ve daha sürekliliği olan maliyeti düşük bir proses olarak tanımlanmıştır. Proseste ilk olarak; körük katmanları oluşturacak boyutta plakalar elastik yöntemlerle aralıkları açılmış olarak ham borunun etrafını hassas boşluklu olacak bir şekilde konumlandırılmaktadır. Ardından; ön şekillendirme için bir sıvı basıncı verilerek plakaların aralarına boru şişerek kalıp boşluklarına girmeye ve eksenel kuvvet ile birlikte de kalıbın kapatılmasıyla körüklü boru profili oluşmaktadır.

Ayrıca; proseste boru çapının 1/10' genişliğinde bir körük genişliği oluşturmak için cidar incelmesinin yaklaşık %10-15 civarında oluşacağı anlaşılmıştır. Deneysel çalışmalarda gözlemlenen bu değerlerin proses parametrelerinin yakınsaması için kullanılan sonlu elemanlar simülasyonlarındaki değerlere çok yakın çıkmasıyla da; körük boru imalatı için seçilen yarı mamul malzemeden istenilen boru geometrisini oluşturabilmek amacı ile, şekillenme basınçları, kalıp kapanma hızları ve yükleri, harcanacak malzeme boyu gibi proses parametrelerinin belirlenmesinde yapıyı daha önceden analiz etmiş olmanın çok önemli yol gösterici bir unsur olabileceği doğrulanmıştır.

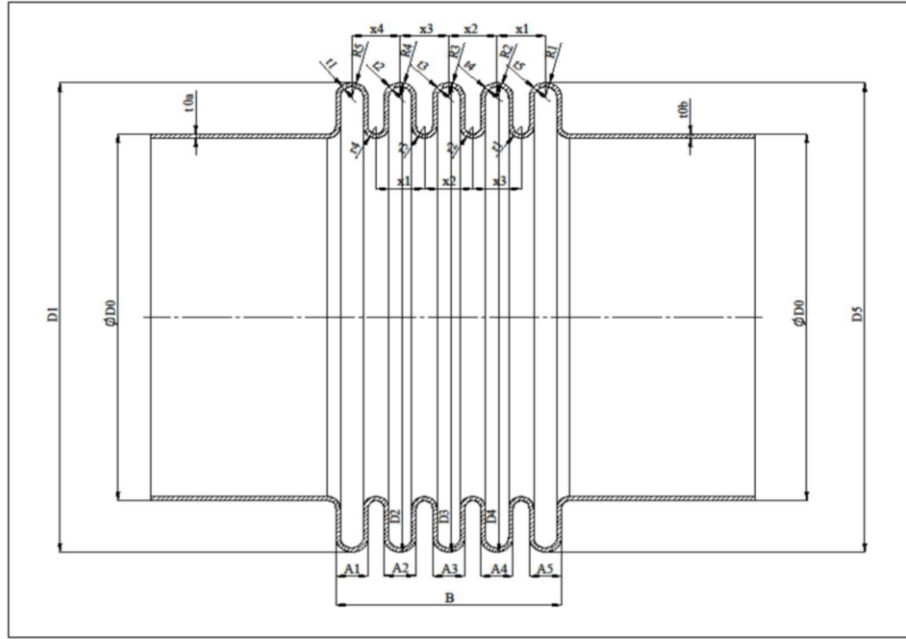
KAYNAKLAR

- Anonim, <https://bircelik.com/tr/kategori/321-1-4541-> [ZyrtTrh:01.05.2025]
- Anonim, 2020, Web adresi: <https://www.penflex.com/making-hose-from-tube-penflex-uses-several-mechanical-forming-methods-to-form-hose/> [ZyrtTrh:02.03.2023]
- Anonim, MatWeb – AISI 1045 Çelik Veritabanı [ZyrtTrh:02.04.2025]
- ASM International, Stainless Steels and Nickel Alloy Engineering, 1998.
- ASM International. (2002). ASM specialty handbook:Stainless steels. ASM International.
- ASTM A240 / A240M Standard Specification for Chromium and Chromium-Nickel
- AYDIN, M., KADI, İ., & YAŞAR, M. (2009). Investigating Theoretical And Experimental Formability Of Sheet Metal Materials Using Hydraulic Fluid. Technology, 12(3), 143-155.
- Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2020). Materials science and engineering: An introduction (10th ed.). Wiley.
- Davis, J. R. (1994). Stainless steels. ASM International.
- Deutsches Institut für Normung. (2003). DIN 8584: Manufacturing processes forming – Metal forming. Berlin: Beuth Verlag.
- DIN EN 10083-2:2006 – Islah çelikleri standardı
- Flexonics, Metal Expansion Joints Technical Guide, 2019.
- Groche, P., Wohletz, S., Brenneis, M., Obermeier, E., & Resch, F. (2012). Joining by forming—a review on joint mechanisms, applications and future trends. Journal of Materials Processing Technology, 212(8), 1373–1390.
- Huo, S., Yan, W., Xu, X., & Yuan, Z. (2021). Bending characteristics of the reinforced S-shaped bellows under internal pressure. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 192, 104412.
- Islam, M. D., Olabi, A. G., & Hashmi, M. S. J. (2006). Feasibility of multi-layered tubular components forming by hydroforming and finite element simulation. Journal of Materials processing technology, 174(1-3), 394-398.
- Jing, L. I. U., Zhiyong, L. V., Yang, L. I. U., & Lanyun, L. I. (2020). Deformation behaviors of four-layered U-shaped metallic bellows in hydroforming. Chinese Journal of Aeronautics, 33(12), 3479-3494.
- Kang, B. H., Lee, M. Y., Shon, S. M., & Moon, Y. H. (2007). Forming various shapes of tubular bellows using a single-step hydroforming process. Journal of Materials Processing Technology, 194(1-3), 1-6.
- Lin, J., Wang, X., Lei, Y., Ding, J., Li, K., & Guo, F., 2021, Residual stress analysis and measurement in multi-layer bellows, Journal of Manufacturing Processes, 72, 179-194.
- MatWeb Material Property Data, AISI 321 Stainless Steel, 2024.
- Olabi, A. G., & Alaswad, A. (2011). Experimental and finite element investigation of formability and failures in bi-layered tube hydroforming. Advances in Engineering software, 42(10), 815-820.
- Outokumpu Teknik Kataloğu, Stainless Steels, 2020.
- Panda, B., Sujata, M., Madan, M., & Bhaumik, S. K. (2014). Stress corrosion cracking in 316L stainless steel bellows of a pressure safety valve. Engineering Failure Analysis, 36, 379-389.
- Safari, M., Joudaki, J., & Ghadiri, Y. (2019). A comprehensive study of the hydroforming process of metallic bellows: investigation and multi-objective optimization of the process parameters. International Journal of Engineering, 32(11), 1681-1688.

- Sedriks, A. J. (1996). Corrosion of stainless steels (2nd ed.). Wiley-Interscience.
- Stainless Steel Plate, Sheet, and Strip for Pressure Vessels and for General Applications, 2021
- Subramanian, C., Roy, H., Kumar, A., Mondal, A., Ray, S., De, S. K., ... & Saha, A. (2021). Failure cause analysis of an expansion bellow of integrated turbine unit. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 191, 104360.
- Supriadi, S., Furushima, T., & Manabe, K. I. (2020). A Vision-Based Fuzzy Control to Adjust Compression Speed for a Semi-Dieless Bellows-Forming. *Metals*, 10(6), 720.
- Wang, C., Li, Y., Wang, H., & Lin, Y. (2018). Numerical simulation and experimental validation of thickness distribution in sheet hydroforming process. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 97, 2401–2411.
- Yuan, Z., Huo, S., Ren, J., & Han, J. (2019). Study on the hydroforming technology of reinforced s-shaped bellows. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 103, 2541-2552.



EK-1 Körüklü Boru Ölçüm Raporu



Birimler [mm]
D0-D5 ölçüleri Dijital Kumpasta,
Diğer ölçüler VICI optik komparatör,
ile ölçülmüştür

Ölçünün Tanımı	Ölçünün Tolerans Aralığı (min-max)		Geri Esnemesiz Nominal Ölçü	Numune 1	Numune 2	Numune 3	Ortalama STD sapma
B	12	16	14	18.5	17.5	17.5	0.471
A1	2	3	2	2.5	2.5	2.5	0.19
A2	2	3	2	3	2.75	2.75	
A3	2	3	2	3	2.75	2.75	
A4	2	3	2	3	2.75	2.75	
A5	2	3	2	2.5	2.5	2.5	
D0	24.8	25.2	25	25	25	25	1.69
D1	31	33	32	35.3	35.3	35.3	
D2	31	33	32	31.5	31.5	31.5	
D3	31	33	32	32.1	31.5	31.5	
D4	31	33	32	32.3	31.8	32.2	
D5	31	33	32	35.3	34.5	35.3	
t0a	0.27	0.29	0.28	0.28	0.28	0.28	0.013
t0b	0.27	0.29	0.28	0.28	0.28	0.28	
t1	0.23	0.26	0.245	0.24	0.24	0.23	
t2	0.23	0.26	0.245	0.26	0.26	0.25	
t3	0.23	0.26	0.245	0.26	0.25	0.26	
t4	0.23	0.26	0.245	0.25	0.26	0.24	
t5	0.23	0.26	0.245	0.22	0.24	0.23	0.058
R1	0.8	1.2	1	1.1	1.1	1.1	
R2	0.8	1.2	1	1.16	1.14	1.16	
R3	0.8	1.2	1	1.2	1.18	1.25	
R4	0.8	1.2	1	1.08	1.1	1.05	
R5	0.8	1.2	1	1.25	1.16	1.1	
X1	2.5	3.5	3	3.57	3.85	3.79	0.24
X2	2.5	3.5	3	3.97	3.81	3.9	
X3	2.5	3.5	3	4.17	3.85	3.75	
X4	2.5	3.5	3	4.31	3.46	3.51	
r1	0.58	0.98	0.78	0.82	1.2	0.74	0.12
r2	0.58	0.98	0.78	0.78	0.71	0.8	
r3	0.58	0.98	0.78	0.81	0.8	0.85	
r4	0.58	0.98	0.78	0.76	0.86	0.77	
x1	2.5	3	3	3.33	3.94	3.87	0.32
x2	2.5	3	3	4.54	3.88	4.01	
x3	2.5	3	3	4.4	3.94	3.98	