



T.C.
KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



ARAÇ SÜSPANSİYON SİSTEMLERİNDE
KULLANILAN BURÇLARIN FLANŞ
ŞEKİLLENDİRME İŞLEMİNDE MEYDANA
GELEN YIRTILMALARIN İNCELENMESİ VE
İYİLEŞTİRME ÇALIŞMALARI

Enes TOPBAŞ
YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Ocak-2024
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Enes TOPBAŞ tarafından hazırlanan “Araç Süspansiyon Sistemlerinde Kullanılan Burçların Flanş Şekillendirme İşleminde Meydana Gelen Yırtılmaların İncelenmesi Ve İyileştirme Çalışmaları ” adlı tez çalışması 24/01/2024 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

Doç. Dr. Mevlüt TÜRKÖZ
(Konya Teknik Üniversitesi)

.....

Üye

Prof. Dr. Murat DİLMEÇ
(Necmettin Erbakan 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.

Enes TOPBAŞ

Tarih:05.01.2024

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ARAÇ SÜSPANSİYON SİSTEMLERİNDE KULLANILAN BURÇLARIN FLANŞ ŞEKİLLENDİRME İŞLEMİNDE MEYDANA GELEN YIRTILMALARIN İNCELENMESİ VE İYİLEŞTİRME ÇALIŞMALARI

Enes TOPBAŞ

Konya Teknik Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Mevlüt TÜRKÖZ

2024, 56 Sayfa

Jüri
Doç. Dr. Mevlüt TÜRKÖZ
Prof. Dr. H. Selçuk HALKACI
Prof. Dr. Murat DİLMEÇ

Burçlar araçların süspansiyon sisteminin en önemli parçalarından birini oluşturur. Salıncaklar, burçlar sayesinde araç şasesine bağlanır ve burçların içerisinde bulunan kauçuk, yoldan gelen titreşim ve ani yükleri absorbe ederek araç sürüşünün konforlu ve güvenilir olmasını sağlar. Kauçuklu burçlarda dış borunun uç kısmında genellikle flanş oluşturma işlemi yapılmaktadır. İmalat aşamasında özellikle boğaz açma işlemi sırasında borularda yırtılmalar meydana gelebilmektedir. Bu kapsamda tez çalışmasında fire oranları %20'nin üzerinde olan, 40,3 mm çapında ve 2 mm et kalınlığındaki S355JR-N standartlarında dikişli çelik borudan üretilen ve flanş çapı 59 mm olan parça seçilmiştir. Metalografik incelemeler, borulara uygulanan mekanik testler ve şekillendirme işleminin Sonlu Elemanlar Analizleri (SEA) ile yırtılmaya neden olan etkenlerin belirlenmesi, prosesin optimizasyonu ve kalıp tasarımının iyileştirilmesi ile yırtılmaların önüne geçilmesi hedeflenmiştir. Çekme deneyi ile yırtılma yaşanan boruların mekanik özellikleri belirlenmiştir. Borulara normalizasyon işlemi yapılarak metalografik incelemeler ile içyapıları elde edilmiştir. Prosesin ve parametrelerin incelenmesi amacıyla flanş şekillendirme işleminin SEA'ları yapılmış, kalınlık incelenmesi ve flanş çapı %90'dan fazla oranla doğru tahmin edilmiştir. Halen iki kademede %16,1 incelme oranı ile üretilen parça için proses iyileştirilmesi ve kalıp geometrisi üzerine optimizasyon çalışmaları yapılmıştır. Böylece hedeflenen parça tek kademede %9,5 incelme oranı ile elde edilebilmiştir. Optimize edilmiş kalıplarla 100'den fazla parçanın deneme üretimi yapılmış ve parçaların hiçbirinde yırtılma hasarı ile karşılaşılmamıştır. Böylece tezin araç süspansiyon sistemlerinde kullanılan burçların flanş şekillendirme işleminde meydana gelen yırtılmaların engellenmesi amacıyla tam olarak ulaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Çekme deneyi, Flanş şekillendirme, S355JR, Sonlu Elemanlar Analizleri

ABSTRACT

MS THESIS

INSPECTION AND IMPROVEMENT STUDIES OF TEARS OCCURRED DURING THE FLANGE FORMING PROCESS OF BUSHINGS USED IN VEHICLE SUSPENSION SYSTEMS

Enes TOPBAŞ

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

Advisor: Assoc. Prof. Mevlüt TÜRKÖZ

2024, 56 Pages

**Jury
Assoc. Prof. Mevlüt TÜRKÖZ
Prof. Dr. H. Selçuk HALKACI
Prof. Dr. Murat DLME**

Bushings constitute one of the most important parts of the suspension system of vehicles. Control arms are connected to the vehicle chassis thanks to bushings, and the rubber inside the bushings absorbs vibration and sudden loads from the road, making vehicle driving comfortable and reliable. In rubber bushings, flange forming is usually done at the end of the outer pipe. During the manufacturing, ruptures may occur in the pipes, especially during the flaring process. In this context, in the thesis a part manufactured from welded steel pipe of S355JR-N standards with a diameter of 40.3 mm and a wall thickness of 2 mm, with a flange diameter of 59 mm, was selected. It is aimed to prevent tearing by determining the factors that cause tearing, optimizing the process and improving the die design through metallographic examinations, mechanical tests applied to the pipes and Finite Element Analysis (FEA) of the forming process. The mechanical properties of the teared pipes were determined by the tensile test. Normalization was performed on the pipes and their internal structures were obtained by metallographic examinations. In order to examine the process and parameters, SEAs of the flange forming process were performed, and the thickness reduction and flange diameter were predicted accurately with a rate of more than 90%. Optimization studies on the process and die geometry have been carried out for the part currently produced in two stages with a thinning rate of 16,1%. Thus, the targeted part could be obtained in a single step with a thinning rate of 9,5%. Trial production of more than 100 parts was made with optimized dies and no tear damage was encountered in any of the parts. Thus, the aim of the thesis to prevent tearing that occurs during the flange forming process of bushings used in vehicle suspension systems has been fully achieved.

Keywords: Tensile test, Flange forming, S355JR, Finite Element Analysis

ÖNSÖZ

Yüksek lisans tez sürecim boyunca değerli bilgi ve tecrübeleriyle bana yol gösteren kıymetli hocam Doç. Dr. Mevlüt TÜRKÖZ'e en samimi duygularıyla teşekkür ederim.

Çalışmalarımın deney faaliyetlerini gerçekleştirdiğim, Aydınlar Otomotiv Endüstri San. ve Tic. A.Ş.'ye ve çalışmalar sırasında yardımını esirgemeyen tüm çalışma arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Yüksek lisans tez sürecimde bilgi, önerileri ve yardımları için Mak. Öğr. Mustafa ÖZŞAPÇI Bey'e, Met. ve Malz. Müh. Ahmet Asım ESER Bey'e ve Metalograf Ali Sinan SARIKAYA Bey'e teşekkür ederim.

Kalıp tasarımı ve üretimi süreçlerinde yardımcı olan Kalıphane Müdürü Ali YURTERİ Bey'e, kıymetli bilgiler ve yardımları için teşekkür ederim.

Bugünlere gelmemde maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen Rahmetli Babam, Annem ve Kardeşime en derin duygularıyla teşekkürü borç bilirim.

Enes TOPBAŞ
KONYA-2024

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR	ix
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	4
2.1. Tek Kademedeki Flanş Şekillendirme	5
2.2. Elektromanyetik ile Flanş Şekillendirme	10
2.3. Normalizasyon Isıl İşlemi	14
3. MATERYAL VE YÖNTEM	15
3.1. Çekme Deneylerinin Yapılışı	16
3.2. Mikroyapı Analizlerinin Yapılışı	18
3.3. Numunelere Normalizasyon İşleminin Yapılması	20
3.4. Flanş Şekillendirme İşlemi.....	22
3.5. Sonlu Elemanlar Analizleri	24
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA	29
4.1. Çekme Deneyi Sonuçları.....	29
4.2. Mikroyapı Analizi Sonuçları.....	30
4.3. Normalizasyon İşlemi ve Ağız Genişletme Deney Sonuçları.....	31
4.4. Sonlu Elemanlar Analizleri Sonuçları.....	35
4.4.1. Sürtünme katsayısının malzemenin şekillendirilmesine etkisi.....	38

4.4.2. Kademe sayısının prosese etkisi.....	39
4.5. Flanş Şekillendirme İşlemi Sonuçları	45
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	52
5.1 Sonuçlar	52
5.2 Öneriler	54
KAYNAKLAR	55



SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

kgf	: Kilogramkuvvet
kV	: Kilovolt
MPa	: Megapaskal
mm	: Milimetre
mm/s	: Milimetre/saniye
mm/dk	: Milimetre/dakika
sn	: Saniye
°C	: Santigrad Derece

Kısaltmalar

ASTM	: American Society for Testing and Materials
BŞD	: Birim Şekil Değiştirme
BSD	: Brinell Sertlik Değeri
DIN	: Deutsches Institut für Normung
EMF	: Elektromanyetik Şekillendirme
EN	: Europeane Norm
FEA	: Finite Element Analysis
ISO	: International Organization for Standardization
SEA	: Sonlu Elemanlar Analizi
ŞSE	: Şekil Sınırlandırma Eğrisi
ŞSD	: Şekil Sınırlandırma Diyagramı

1. GİRİŞ

Otomobilin yol tutuş yetenekleri sürüş güvenliğinin sağlanmasındaki en önemli faktördür. Otomobilin yerle bağlantısı ve yol tutuşu birçok parçanın birlikte çalışmasıyla sağlanır, süspansiyon sistemi de bunlardan biridir. Süspansiyon sistemi aracın tekerleklerini bağlantı elemanları, yaylar ve şok emiciler yardımıyla araç gövdesine bağlayan sistemlerdir. Burçlar, süspansiyon sistemlerinin dinamik davranışlarının belirlenmesi ve tasarlanması safhasında anahtar rol üstlenmektedir. Özellikle denge çubuklarında ve salıncak kollarında (Şekil 1.1) karşılaşılan burçlar her aracın süspansiyon sisteminde bulunan, titreşim sönümleme elamanı olarak kullanılan hiperelastik malzemelerdir. Yoldan ve aracın hareketli parçalarından gelen titreşim, şok ve darbe gibi etkileri sönümleyerek araç gövdesine iletilmesini engelleyen, sürüş konfor gereksinimini sağlayan en önemli parçalardan biridir. Bir araç üzerinde (otomobil) farklı tiplerde (Şekil 1.2) yaklaşık 50 adet kauçuk burç bulunmaktadır. Kauçuk burçlar otomobillerde olduğu gibi ticari araçlarda, ağır vasıta araçlarda, römorklarda, trenlerde, traktörlerde süspansiyon sistemine sahip birçok araçta kullanılmaktadır. Bazı burçların dış kısmında Şekil 1.3'teki gibi flanşlı borular kullanılmaktadır. Borunun uç kısmında flanş (tube flange) formu eksantrik veya hidrolik preslerde kalıplar aracılığıyla uygulanan flanş şekillendirme imalat yöntemi ile elde edilmektedir.

Bu tez çalışması, AYD Otomotiv Endüstri A.Ş. kuruluşunda üretimi devam eden ve boru ucu genişletme oranı yüksek olan flanşlı borularda, fire oranının fazlalığı problemini araştırmak ve bir çözüm getirmek amacıyla yürütülmüştür. Seri üretimi yapılan boruların yırtılmadan (Şekil 1.4) kaynaklı hurda miktarının fazla olması burç üretim süreçlerini yavaşlatmakla beraber maliyetleri de artırmaktadır. Bu açıdan yırtılmaların önüne geçilmesi için çözümler bulunması böylece hem üretimin aksamasına engel olmak hem de hurda miktarının düşürülmesiyle üretim maliyetlerinin azaltılması amacı açısından bu tez çalışması önem teşkil etmektedir.

Flanşlı boru imalatı sırasında malzeme olarak genellikle DIN 2393 (EN 10305-2) standardına göre gizli dikişli soğuk çekilmiş ST52-3 NBK çelik kullanılmaktadır. Tezde boru üzerinden çıkarılan numunelere çekme deneyi yapılarak çelik malzemenin mekanik özellikleri belirlenmiştir. Ayrıca farklı üreticilerden normalize edilmiş olarak (NBK) ve soğuk çekmeden sonra ısıtılma işlemi görmemiş (sert parlak) olarak (BK) iki farklı üreticiden temin edilen malzemelerin mikroyapı incelemeleri gerçekleştirilmiş ve normalizasyon

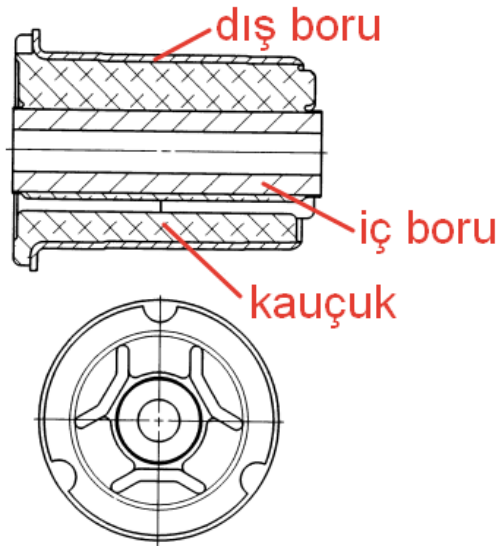
işleminin uygunluğu değerlendirilmiştir. Tez kapsamında borulara ayrıca normalizasyon ısıtıl işlemi uygulanmış ve ağız genişletme deneyi ile normalizasyon işleminin çeliğin şekillenme kabiliyetine etkisi araştırılmıştır. Tezin devamında mevcut flanş şekillendirme prosesinin sonlu elemanlar analizleri (SEA) yapılarak öncelikle proses flanş bölgesinde meydana gelen birim şekilde değiştirme (BŞD) miktarları ve flanş çapı aracılığı ile doğrulanmıştır. Sonrasında bu değerlerde iyileşme sağlayacak kalıp ve proses tasarımı gerçekleştirilmiştir. Yeni kalıpların imal edilmesinden sonra şekillendirilen parçalar fire oranları, boyutsal toleranslar ve kalınlık değerleri açısından değerlendirilmiştir. Sonuçta önceki prosese göre önemli derecede iyileştirilmiş bir proses elde edilmiştir.



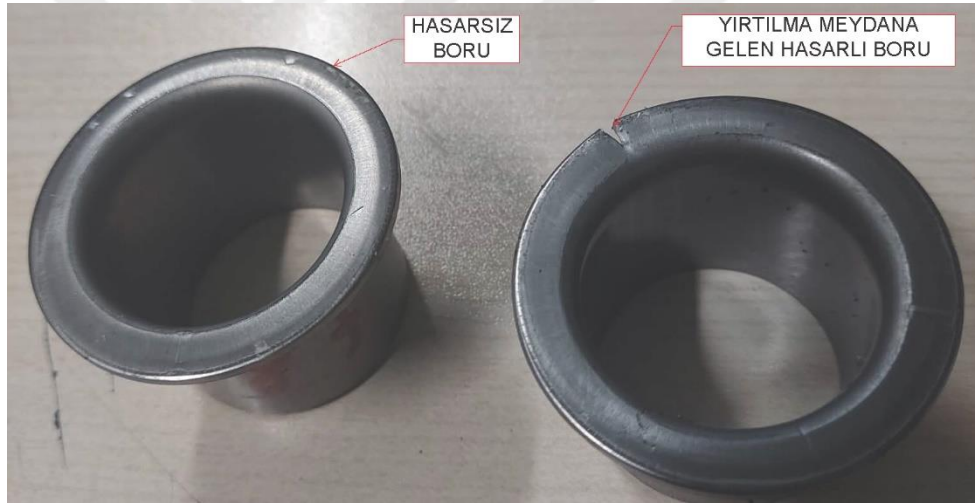
Şekil 1.1. AYD marka rotül ve burçlu salıncak (<https://aydtr.com>)



Şekil 1.2. Çeşitli kauçuk-metal burçlar (Heißeing, ve Ersoy, 2011)



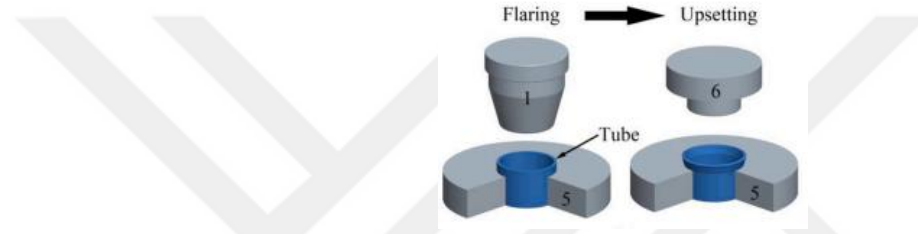
Şekil 1.3. Audi A6 (1996) Kauçuklu burcun kesit görünüşü (Reimpell ve ark., 2001)



Şekil 1.4. Hasarsız ve yırtılma meydana gelen hasarlı boru örnekleri

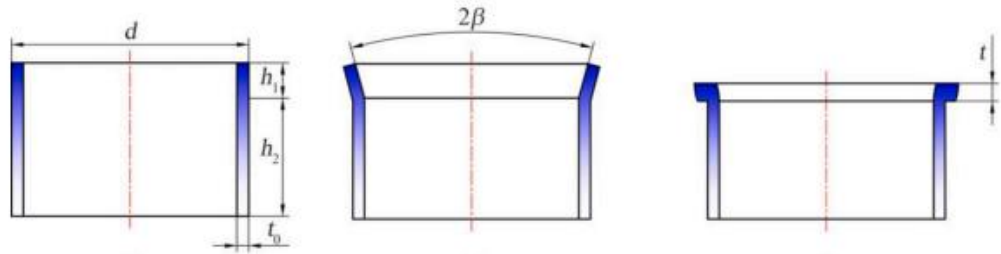
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Sanayide özellikle şapka çapı yüksek olan borularda iki operasyon ile bu boyutlarda borular elde edilmektedir. Borular ilk olarak genişletme (boğaz açma: flaring) kalıpları ile belli bir açı da uç kısımları açılır ve bu işlem sonunda şapka oluşumu için kullanılan ikinci kalıp ile şapka elde edilir (Şekil 2.1). Literatürde de bu konuyla alakalı çalışmalardan biri de Guan ve ark. (2022) tarafından yapılan çalışmada yığma işleminden önce yapılacak bir uç genişletme işlemi (boğaz açma), yığma işleminde şapka oluşumunda hasara neden oluşabilecek kıvrım ve gerilmeleri azaltarak şapka oluşumunu kolaylaştırmıştır.

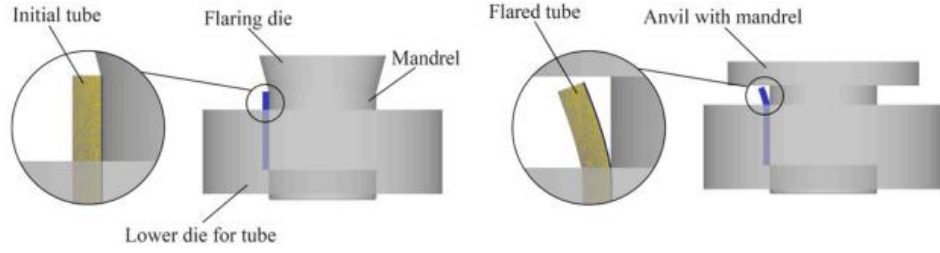


Şekil 2.1. Genişletme ve yığma operasyonu (Guan ve ark., 2022)

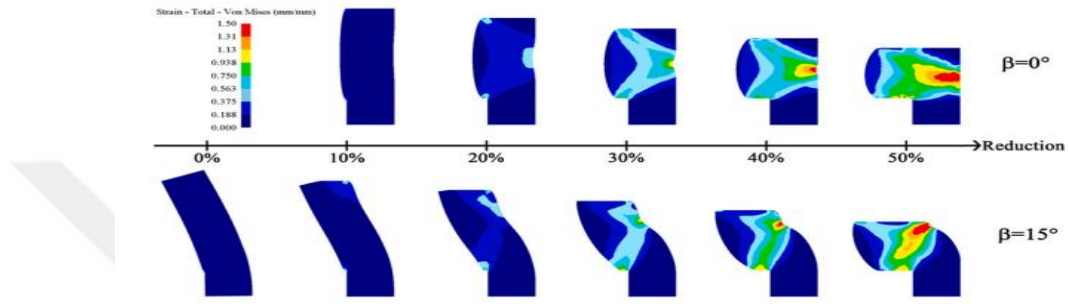
Guan ve ark. (2022) tarafından yapılan çalışmada Şekil 2.2’de görüldüğü gibi d çapında, h serbest yüksekliğinde olan boru, h_2 şapka altı yüksekliğine ve 2β eğim açısına sahip olacak şekilde genişletilmiş ve ardından belirli bir t kalınlığında şapkalı boru elde edilmiştir. Şekil 2.3’te ise yapılan işlemlere ait sonlu elemanlar analizleri gösterilmiştir. Yapılan bu çalışmada 2β eğim açısı 0° için doğrudan yığma işlemi yapıldığında, şapka bölgesinde bükme deformasyonundan daha çok yığma deformasyonu oluşmuştur. Sonuçta Şekil 2.4’de görüldüğü gibi eğim açısının artması flanş boyunu artırmaktadır.



Şekil 2.2. Genişletme ve yığma birleşik işlem şeması (Guan ve ark., 2022)



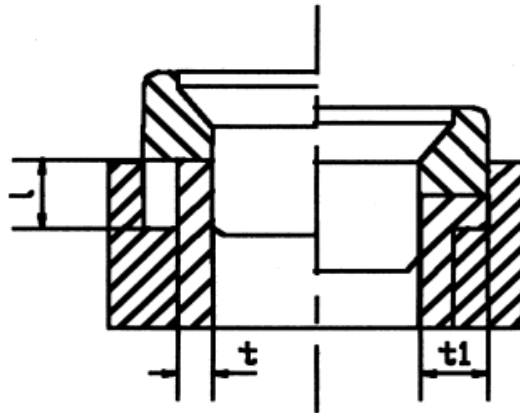
Şekil 2.3. Sonlu elemanlar ile gösterim (Guan ve ark., 2022)



Şekil 2.4. Boru flanşının simülasyon edilişi (Guan ve ark., 2022)

2.1. Tek Kademedeki Flanş Şekillendirme

Wang ve ark. (2001) tarafından yapılan çalışmada boru şapka (tube flange) yani flanş bölgesinin dışı ve erkek kalıp arasında şekillendirilmesi araştırılmıştır. Bu kapsamda FEM simülasyonu ile boru boyutlarının ve sürtünmenin malzeme akışı üzerine etkisi incelenmiştir. Şekil 2.5'te boru genişletme, yığma ve ekstrüzyon dahil olmak üzere birleşik bir şekil verme işlemi olan boru flanşının soğuk yığma-ekstrüzyon prensibi ile imalatı gösterilmiştir.



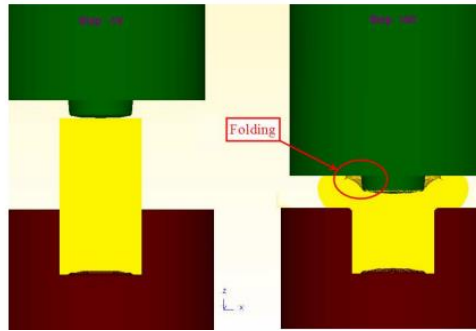
Şekil 2.5. Boru flanşının soğuk yığma-ekstrüzyonunun şematik gösterimi (Wang ve ark., 2001)

Boru uç kısmındaki malzeme birikimi deformasyonun ana nedenidir. Yük uygulandığı anda borunun uç kısmı eksenel kuvvet altında ezilirken, aynı zamanda malzeme radyal yönde dışarı akarak flanş oluşturur. Deformasyon sürecinde boru genişletme miktarı deformasyon için en önemli kriterdir ve sürtünme faktöründen (μ) etkilenir. Daha büyük bir μ değeri daha az miktarda boru genişletme deformasyonu ile sonuçlanmakta ve boru iç duvarında kolayca bir katlama kusuruna neden olduğu bildirilmiştir. μ değeri daha küçükse, boru genişletme deformasyon miktarı daha büyük olmakta ve bu kez de ekstrüzyonda kolayca boru dış duvarında katlama hatasına neden olur. Bu nedenle boru serbest ucunun erkek kalıp ve dişi kalıp ile arasındaki sürtünme koşulu tüm flanş oluşturma sürecinde önemli rol oynar. Şekil 2.6’da kademeli olarak flanş oluşumunun simülasyon sonucu gösterilmiştir.



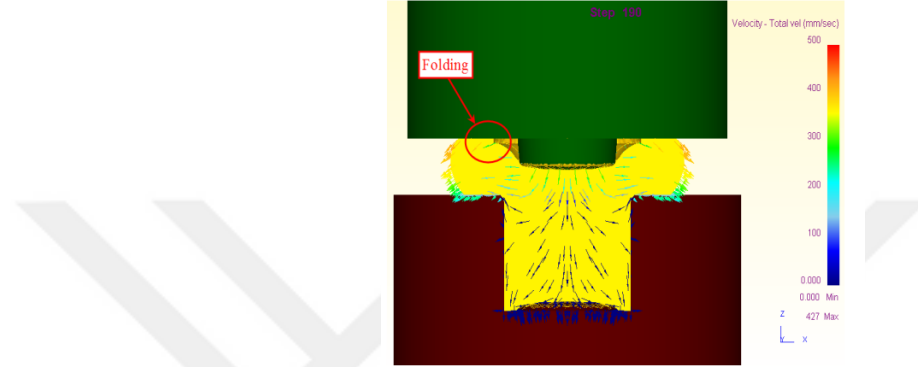
Şekil 2.6. Boru uç kısmının simülasyon görünümü (Wang ve ark., 2001)

Chang ve ark. (2013) tarafından yapılan çalışmada soğuk dövme işlemi sırasında içi dolu milin yığma işlemiyle baş oluşturma prosesi 3-D DEFORM yazılımıyla sonlu elemanlar analizi (SEA) yapılarak incelenmiştir. Şekil 2.7’de parçanın flanş şekillendirme işleminden önceki ve sonraki hali gösterilmiştir. Simülasyonda soğuk dövme sırasında meydana boru ucunda çap genişlemesi ve katlanma meydana geldiği gösterilmiştir.



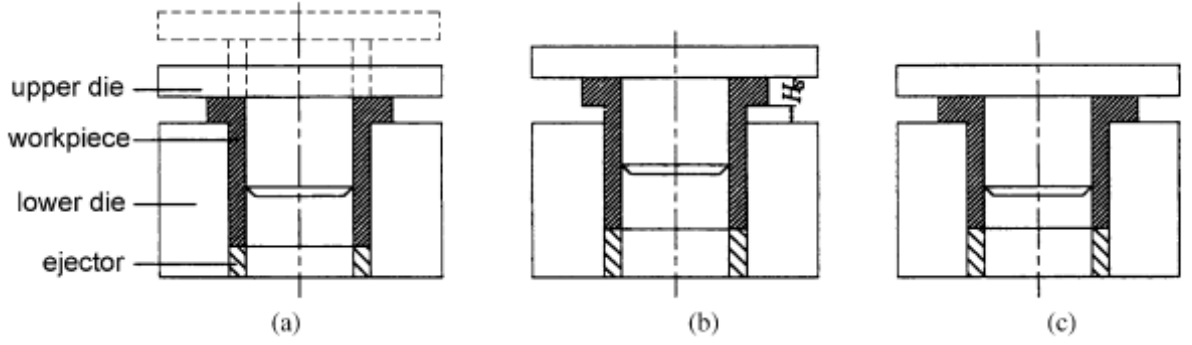
Şekil 2.7. Şapka oluşumunun simülasyonu (Chang ve ark., 2013)

Koç, aşağı doğru indiğinde koçun pimine göre borunun uç kısmının açıldığı, sürtünme faktörüyle beraber borunun dış yüzeyinin akış hızının iç yüzeye göre daha az olması sebebiyle boru ucunda katlanma ile flanş olduğu görülmüştür. Şekil 2.8’de görüldüğü gibi üst flanşın hız alanı iç içe vektör olarak görünür. Sonuç olarak bu çalışma ile 3-D DEFORM yazılımı ile SEA simülasyonun metal şekillendirme işlemi sırasında borunun kusurlarını doğru bir şekilde tahmin edebileceği bu nedenle şekillendirme kusurlarının, gerçek imalat sürecinde etkili bir şekilde önlenebileceği gösterilmiştir.



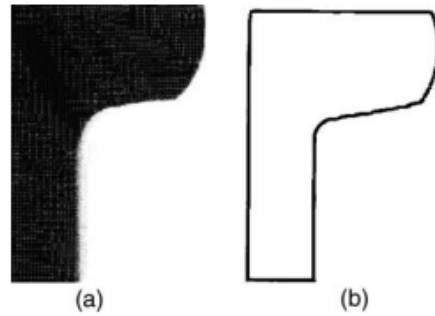
Şekil 2.8. Flanş şekillendirmeden sonra katlama hız alanının dağılımı (Chang ve ark., 2013)

Boru et kalınlığının 1,5 katından fazla kalınlığa sahip boruların uçlarında kalın ve geniş flanşlar üretmek zordur. Bu tür bir flanş elde etmek için Hu ve Wang (2004) tarafından yapılan çalışmada çok adımlı yığma yöntemi geliştirilmiş ve DEFORM kullanılarak süreç simüle edilmiştir. Flanşlı boru oluşturulması için bazı yöntemler vardır, ancak kalın cidarlı borularda kalın ve geniş bir flanş elde etmek zordur. Bu çalışmada borunun ucunda kalın ve geniş bir flanş oluşturmak için bir flanşın çok aşamalı olarak sıkıştırılmasına yönelik yeni bir yöntem önerilmiştir. Şekil 2.9’da çok aşamalı sıkıştırma işleminin şeması gösterilmiştir. Sadece alt kalıp üzerindeki borunun ucunda deformasyon bölgesi bulunmaktadır. İlk adımda, borunun alt kalıp üzerindeki metal kısmı sıkıştırılır. H , ilk adımda alt kalıp üzerindeki borunun yüksekliği, t ise boru çubuğunun duvar kalınlığıdır. Burkulmayı önlemek için sınırlama oranı H/t 3’ten küçük olmalıdır. Üst kalıp geri çekildikten sonra, alt kalıp içindeki boru yukarı doğru itilerek alt kalıp üzerinde H_s yüksekliğine ulaşır. İkinci adımda, üst kalıp aşağı iner ve alt kalıp üzerindeki borunun üstünde bulunan metal kısmı sıkıştırılır. Ardışık adımlar ikinci adıma benzer şekilde gerçekleştirilir. Sonuç olarak, çok aşamalı yığma yöntemiyle boru et kalınlığına göre 1.5 katı kalınlığında bir kalın ve geniş bir flanş oluşturulur. Adım uzunluğunu belirlemek için çok aşamalı yığma flanş sürecinde metal şekillenmesini analiz etmek amacıyla işlem FEM kodu DEFORM tarafından simüle edilmiştir.



Şekil 2.9. Çok aşamalı yığma işlemi gösterimi (Hu ve Wang, 2004)

Çok aşamalı yığma flanş işlemi, aksel simetrik rijit-plastik deformasyon sürecine basitleştirilmiştir. Simülasyonda, boru plastik bir gövde olarak modellenirken, üst ve alt kalıplar rijit gövdeler olarak kabul edilir. Boru yuvarlak çubuğu ile kalıplar arasındaki sürtünme sabit kayma sürtünmesi olarak dikkate alınır ve sürtünme katsayısı 0.2 olarak belirlenir. Sıcaklık 20 °C olarak kabul edilir. Üst kalıbın hızı ise 40 mm/s'dir. Simülasyon sonuçlarını deneysel sonuçlarla karşılaştırmak için borudan çok aşamalı yığma yöntemiyle flanş oluşturulması üzerine deneyler yapılmıştır. Deneysel numunenin kesit şekilleri ve flanş için çok aşamalı yığma işleminin simülasyon sonucu Şekil 2.10'da gösterilmektedir. Altıncı yığma adımından sonra, flanşın dış kenarında yükseklik 9.1 mm iken, simülasyon sonucu 9.05 mm'dir. Simülasyon sonucunun deneysel sonuçla uyumlu olduğunu görülmektedir.



Şekil 2.10. (a) Deney numunesi; (b) simülasyon sonucu gösterimi (Hu ve Wang, 2004)

Sonuç olarak yapılan simülasyon analizleri, kayma deformasyonunun çoğunlukla deformasyon bölgesinde meydana geldiğini göstermektedir. Bu durum, deformasyon sürecinin enerji açısından daha verimli bir şekilde gerçekleştiğini ortaya koymaktadır. Çok adımlı yığma işlemi için adım uzunluğunun doğru bir şekilde belirlenmesi son derece önemlidir. Adım uzunluğu, boru duvar kalınlığıyla bağlantılıdır. Yani, boru duvarı ne

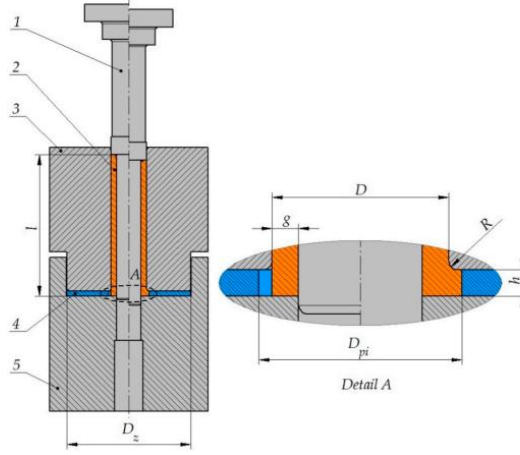
kadar ince ise, adım uzunluğu da o kadar kısa olmalıdır. Bu titiz adım uzunluğu seçimi, yığma sürecinin verimliliğini artırarak enerji tasarrufuna önemli bir katkı sağlayacaktır.

Winiarsk ve ark. (2020) tarafından yapılan çalışmada borularda flanş, artan halkalar kullanılarak malzemenin radyal yönde serbest akışını sınırlayarak aşamalı olarak oluşturmak için bir yöntem önerilmiştir. Yöntem, sayısal analiz ve deneysel testlerle doğrulanmıştır. Sayısal hesaplamalar, Deform-3D yazılım paketi kullanılarak sonlu elemanlar yöntemiyle gerçekleştirilmiştir. Alüminyum alaşımlı EN AW 6060 borular kullanılmıştır. Laboratuvar testleri, Instron 1000 HDX test makinesi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın amacı, önerilen flanş ekstrüzyon yönteminin geçerliliğini belirlemektir. Sonuçlar, yeni yöntemin görece büyük çaplı ve düzgün kalınlıklı flanşların üretilmesini mümkün kıldığını ve önerilen şekillendirme tekniğinin etkinliğini doğrulamaktadır. Şekil 2.11’de kullanılan aparat ve alüminyum borular gösterilmiştir.



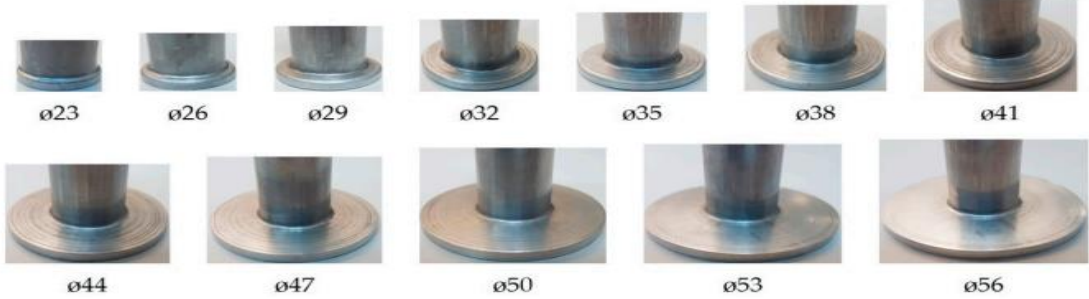
Şekil 2.11. Çalışmada kullanılan aparatlar ve alüminyum borular (Winiarsk ve ark., 2020)

Şekil 2.12’de aşamalı bir flanşın radyal dışa doğru çıkarılmasının şematik tasarımı görülmektedir. Önerilen ekstrüzyon yönteminde, boru (2) üzerine etki eden bir delgeç (1), bir kalıp (3) içine yerleştirilir ve bunun sonucunda bir yükseklik h ile tarif edilen kapalı kalıp boşluğu doldurulur. Kalıp boşluğu, bir delgeç, kalıp, iç çapı olan bir halka (4) ve bir taban (5) tarafından oluşturulur. Boru, sınırlayıcı halkaya temas edene kadar serbestçe radyal yönde ilerler. Bu zamana kadar flanş değişken bir kalınlığa sahiptir ve kalıp boşluğu tam olarak dolmamıştır. Flanş çapı artırılamadığından, kalıp boşluğunun doldurulması devam eder ve bu da flanşın uniform kalınlığını sağlar. Deforme edilen malzeme ile kapalı kalıp boşluğu doldurulduktan sonra, iç çapı daha büyük bir sınırlayıcı halka kullanılarak izlenim hacmi artırılır. Bundan sonra, flanş çapını artırmak için önceki şekilde ekstrüzyon işlemi devam eder. Artımlı radyal ekstrüzyon yöntemiyle bir flanşın davranışı sayısal analiz ve deneysel testlerle incelenmiştir.



Şekil 2.12. Artan radyal flanş ekstrüzyonunun şematik tasarımı (Winiarsk ve ark., 2020)

Çalışma sonucunda flanş oluşturma için aşamalı radyal ekstrüzyon işleminin, halkalar kullanılmadan yapılan ekstrüzyona göre %30 daha büyük çaplı flanşların oluşmasına imkân tanıdığı ifade edilmiştir. Uygun gerilme dağılımı nedeniyle, halkalar kullanılmadan yapılan ekstrüzyon yöntemine göre flanş kalınlığının iş parçası ekseninden uzaklığa bağlı olarak azaldığı durumlardan farklı olarak, önerilen yöntem ile homojen bir kalınlıkta flanşlar üretmek mümkün olmuştur. Çalışmada elde edilen borular Şekil 2.13'te verilmiştir.

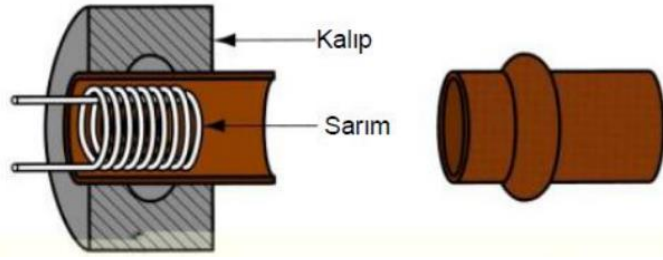


Şekil 2.13. Artımlı radyal ekstrüzyonda elde edilen flanşlı borular (Winiarsk ve ark., 2020)

2.2. Elektromanyetik ile Flanş Şekillendirme

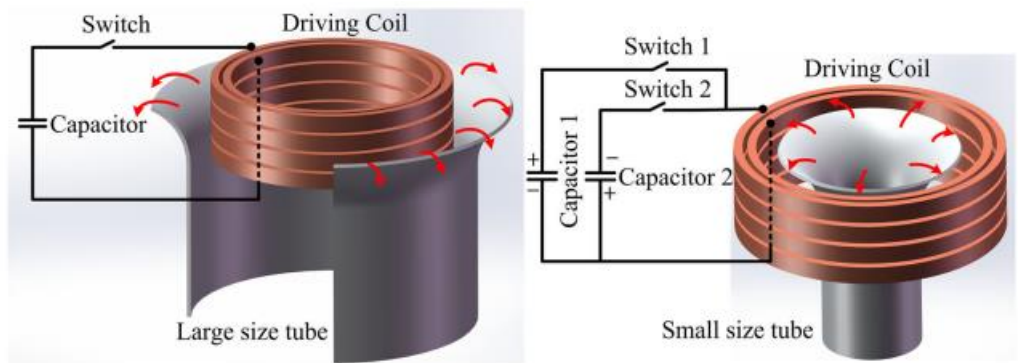
Elektromanyetik şekillendirme (EMF) işleminin, düz sacların yanında Şekil 2.14'te görüldüğü gibi boruların da şekillendirilmesinde kullanıldığı çalışmalar bulunmaktadır. EMF işlemi lorentz kuvvetleri olarak da adlandırılan kuvvetler sayesinde gerçekleşir. Bu yöntemde bir iletkene uygulanan gerilim manyetik bir alan oluşturur. Manyetik alandaki değişim ise girdap (eddy) akımlarının oluşmasını sağlar. Bu girdap akımları ise kendi manyetik alanlarının oluşmasını sağlar. Takım ve iş parçası arasında oluşan bu zıt manyetik alanların oluşturduğu kuvvetler yardımıyla iş parçası deforme

olur. EMF yüksek hızlı ve temassız bir şekillendirme teknolojisidir. Yöntem, özellikle alüminyum alaşımlı boruların flanş (şapka) oluşumu için etkili yaklaşımlardan biridir. Geleneksel şapka şekillendirme ile karşılaştırıldığında daha yüksek şekillendirme hızı, daha yüksek şekillendirme limiti ve daha az geri yaylanma gibi bir dizi avantaja sahiptir.



Şekil 2.14. EMF işleminin boruların şekillendirilmesinde kullanımı (<https://docplayer.biz.tr>)

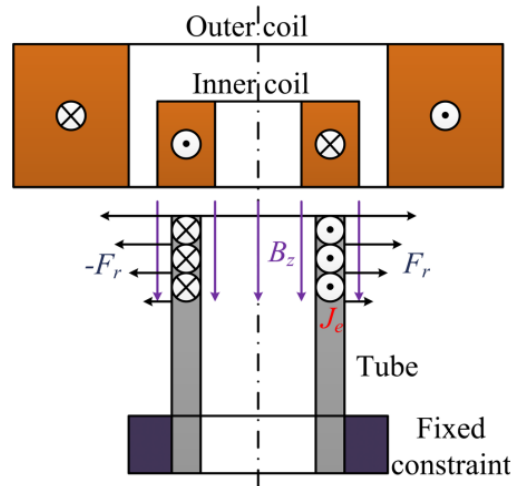
EMF işleminde küçük boyutlu borular söz konusu olduğunda daha küçük çapta bir bobin kullanılmalıdır. Bobin sarılarak küçük borunun içine konulması bobinin aşırı eğilmesi ve gerilmesine sebep olabileceği ve bu da bobinin ömrünü azaltacağı için bu yöntem daha çok büyük boyutlu borulara uygulanır. Yöntemin küçük boyutlu borulara uygulanması gerektiğinde bobinin Şekil 2.15'te görüldüğü gibi borunun dışına uygulanmasına yönelik olarak QL ve ark. (2017) tarafından bir yöntem önerilmiştir. Bu yöntemde uzun ve kısa darbe akımları uygulayan iki güç ünitesi ile itme yerine çekme kuvveti oluşturularak borunun dışarı doğru şekillendirilebileceği gösterilmiştir.



Şekil 2.15. Elektromanyetik flanşlamanın şematik diyagramı (QL ve ark., 2017)

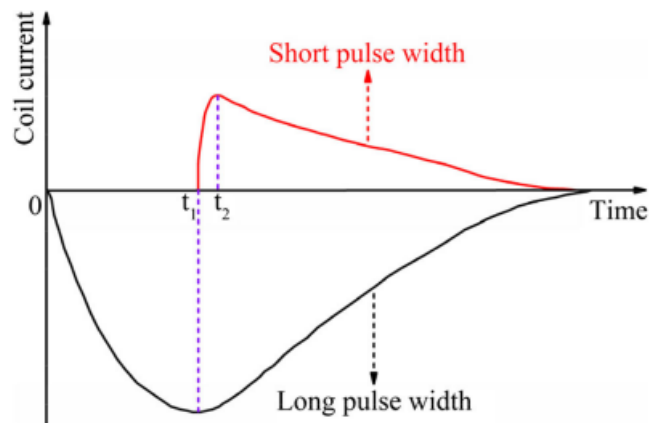
Xiong ve ark. (2019) tarafından yapılan başka bir çalışmada yine küçük boyutlu borulara flanş (şapka) oluşturma işlemine yönelik olarak çift bobinli elektromanyetik

şekillendirme yöntemi önerilmiştir. Bu yöntemde borunun dışı ya da içi yerine ucuna çift bobin yerleştirilmiştir (Şekil 2.16). Bu yöntemde sistem iki güç ünitesi ve bir çift bobinden oluşmakta olup deşarj akımları boruyu şekillendirecek Lorentz kuvvetini oluşturmak için hassas olarak kontrol edilmiştir.

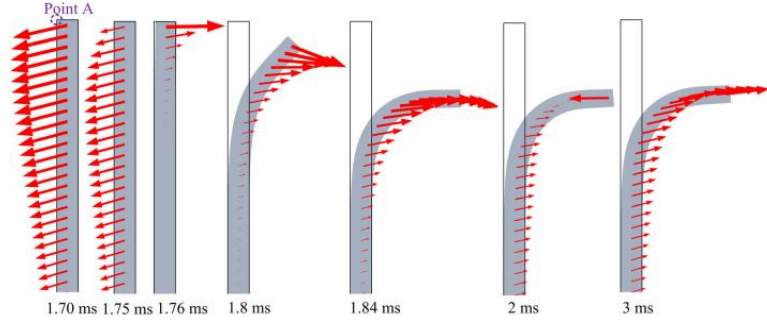


Şekil 2.16. Elektromanyetik flanşlama sisteminin şeması (Xiong ve ark., 2019)

Elektromanyetik flanşlama, borunun ucunda radyal doğrultuda bir kuvvet gerektirir. Saat yönündeki girdap akım yoğunluğu, aksel aşağı doğru bir manyetik alana etki ederse, bir radyal Lorentz kuvveti üretilir. Şekil 2.17’de uzun darbe genişliği akımı ve kısa darbe genişliği akımı sırasıyla dış bobine ve iç bobine yüklenilme diyagramı verilmiştir. Şekil 2.18’de EMF işlemindeki Lorentz kuvvet dağılımı gösterilmiştir.

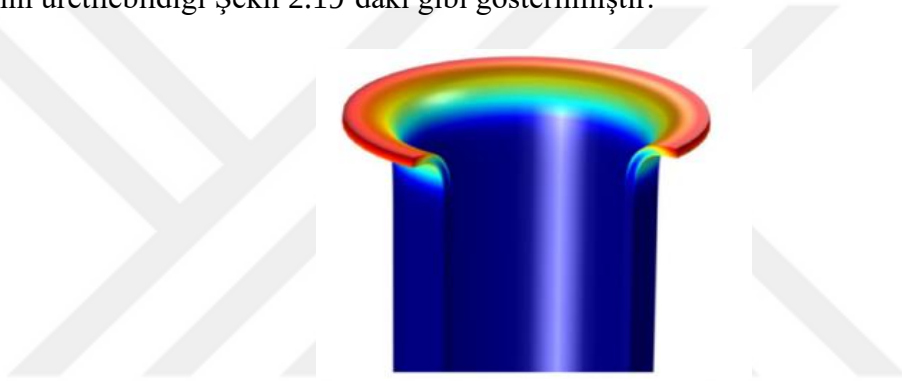


Şekil 2.17. Çift bobin akımının şematik diyagramı (Xiong ve ark., 2019)



Şekil 2.18. Lorentz kuvvet vektörünün borunun ucundaki dağılımı (Xiong ve ark., 2019)

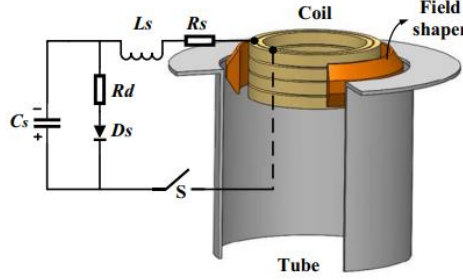
Bu yöntemin uygulanmasıyla, hem teorik analiz hem de sonlu elemanlar modellemesi ile küçük boyutlu tüpün uç flanşını elde edilebilirliği araştırılmıştır. Bobin konumlarını ayarlayarak şekillendirme için uygun bir Lorentz kuvveti elde edilerek boru flanşının üretilebildiği Şekil 2.19'daki gibi gösterilmiştir.



Şekil 2.19. EMF işlemi ile boru flanşı oluşturma simülasyon sonuçları (Xiong ve ark., 2019)

Elektromanyetik şekillendirmede, elektromanyetik kuvvet mesafe arttıkça azalır, bu da bobinlerin ve tüplerin geometrik olarak eşleşmesi gerekliliğini ortaya çıkarır. Genellikle, yeni boyutlardaki tüpler için yeni bobinler üretmek gerekmektedir ve bu hem pratik açıdan zorlu hem de maliyetli olmaktadır. Bu nedenle, Xiong ve ark. (2021) tarafından yapılan çalışmada mevcut elektromanyetik şekillendirme sistemi için daha esnek ve ekonomik bir yöntem önerilmektedir. Bu yöntem, bir alan şekillendirici solenoidin mevcut sisteme entegre edilmesini içerir. Alan şekillendirici solenoidin yapısı ve konumu ayarlanarak elektromanyetik kuvvetlerin dağılımı yeniden şekillendirilir ve farklı boyutlardaki tüpler oluşturulabilir, böylece bobin değiştirme gereksinimi ortadan kalkar. Alan şekillendirici solenoidin maliyeti, bir bobinden çok daha düşüktür. Bu yöntemin prensibi detaylı olarak açıklanmaktadır. Ardından, elektromanyetik-yapı birleşik sonlu eleman simülasyon modeli oluşturularak şekillendirme süreci hesaplanır. Sonuçlar, 110 mm iç çaplı A6063-T83 alüminyum alaşımı tüp şekillendirilirken, alan şekillendirici kullanılmadan 5.3 kV'dan 4.6 kV'ya deşarj gerilimi ayarlanabileceğini

göstermektedir. Bu, sistemin enerji tüketiminin %25 azaltılabileceği ve alan şekillendirici solenoidin üretim sürecinin bir bobine göre daha basit olduğu anlamına gelir. Ayrıca, farklı boyutlardaki tüplerin şekillendirilmesi durumunda, yeni yöntem geleneksel yöntemle göre daha etkili, esnek ve düşük maliyetlidir. Şekil 2.20’de şematik diyagram gösterilmiştir.



Şekil 2.20. Elektromanyetik flanşlama sisteminin alan şekillendirici ile şematik diyagramı (Xiong ve ark., 2021)

Sonuç olarak geleneksel elektromanyetik şekillendirme sürecinin dezavantajlarını gidermek için, süreci optimize etmek için bir alan şekillendirici kullanılmaktadır. Alan şekillendirici solenoidin üretim süreci, şekillendirme bobinine göre daha basittir ve maliyeti daha düşüktür. Özetle, bir alan şekillendiricinin kullanılması tüp şekillendirme sürecine büyük esneklik kazandırır ve sistemin ekonomisini iyileştirir.

2.3. Normalizasyon Isıl İşlemi

Normalizasyon işleminin amacı, çeliğe, homojen ve ince taneli bir yapı kazandırmaktır. İşlem, öngörülebilir bir mikroyapı ve çeliğe mekanik özellikler kazandırmak için uygulanır. Dövme, sıcak haddeleme ya da döküm işlemlerinden sonra çeliğin mikroyapısı iri taneli ve homojenize olmayan bir duruma gelir ve beynit, karbür gibi istenmeyen yapısal bileşenlerden oluşur. Bu mikroyapı, çeliğin mekanik özelliklerini ve tabi ki işlenebilirliğini olumsuz etkiler. Normalizasyon sayesinde çelik, ince taneli homojenize bir yapı ile öngörülebilir özellikler ve işlenebilirlik kazanır. Normalizasyon işlemi sırasında, malzeme neredeyse sertleştirme sıcaklığına (800-920°C) kadar ısıtılır. Bu sıcaklık seviyesinde yeni östenitik taneler oluşur. Östenitik taneler, bir önceki ferritik tanelere nazaran daha küçüktürler. Isıtma ve kısa bir tutma süresinin ardından parçalar serbest şekilde havada soğutulur (gaz). Soğutma sırasında, yeni ferritik taneler daha küçük boyutlarda oluşur. Bazı durumlar da hem ısıtma hem soğutma işlemi koruyucu gaz eşliğinde yapılır. Böylece oksidasyon ve karbonsuzlaşma önlenmiş olur (Callister ve Rethwisch, 2013).

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu tez çalışması AYD Otomotiv Endüstri firmasında fire oranları yüksek olan ve Şekil 3.1’de imalat teknik resmi verilen flanşlı borunda, flanş şekillendirme işleminin optimize edilerek parçanın daha kaliteli, daha az maliyetli ve fire oranları daha azaltılmış bir şekilde imal edilmesi amacıyla yapılmıştır. Tez kapsamında yapılan araştırmalar ile boru ucu şekillendirme işleminde geometrik parametrelerin, sürtünmenin, çıkarıcı tampon kuvvetinin ve malzemenin işlem durumunun şekillenmeye etkisi araştırılmıştır.

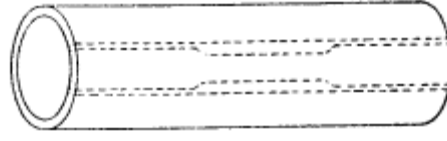
Tez çalışmasında kullanılan malzeme TS EN 10020 standardında S355JR olarak gösterilen ve eski standartta St52 olarak geçen yapı çeliğidir. S355JR malzeme soğuk çekmeden sonra koruyucu gaz altında normalize edilmiş olarak (NBK) ve soğuk çekmeden sonra ısıtıl işlem görmemiş (sert parlak) olarak (BK) iki farklı üreticiden temin edilmiştir. Deneysel çalışmalar NBK işlem şartına sahip çeliklerle gerçekleştirilmiştir. Ancak normalize edilmiş olarak satın alınan malzemelerde normalizasyon işleminin uygunluğuna kıyaslama yaparak karar vermek için normalize edilmemiş şarttaki BK borulara da mikroyapı analizleri gerçekleştirilmiştir. Hatta normalizasyon işleminin uygunluğu ve mikroyapıdaki etkisi, tez kapsamında uygulanan normalizasyon işlemi yapılmış boruların mikroyapıları incelenerek de değerlendirilmiştir. Böylece farklı üreticilerden temin edilen ve farklı işlem şartlarındaki boruların mikroyapıları karşılaştırılarak aradaki fark tespit edilmiştir.

Borular temin edildikten sonra öncelikle kimyasal analizleri yapılarak içeriklerinin standartlara uygunluğu kontrol edilmiştir. Kimyasal analizler AYD Otomotiv Endüstri firmasında bulunan spektrometre cihazında gerçekleştirilmiştir. Buna göre çeliklerin kimyasal bileşimi standartta olması gereken içerikleriyle birlikte Çizelge 3.1’de verilmiştir.

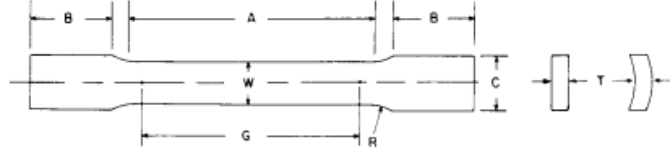
Çizelge 3.1. S355JR çelik malzemeye ait kimyasal içerikler

MALZEME	C % Mak.	Si % Mak.	Mn % Mak.	P % Mak.	S % Mak.	Cu % Mak.	N % Mak.
S355JR STANDART	0,24	0,55	1,60	0,035	0,035	0,55	0,0120
S355JR-N (NBK)	0,17	0,43	1,41	0,018	0,002	-	0,005
S355JR-C (BK)	0,20	0,20	1,46	0,018	0,005	-	0,007

ve veriler çekme test cihazı bilgisayarından alınarak işlenmiş böylece mühendislik ve gerçek çekme deney grafikleri oluşturulmuş ve mekanik özellikler hesaplanmıştır.



Şekil 3.2. Büyük çaplı borudan boyuna çekme test numunelerinin kesileceği yer (ASTM E8/E8M)

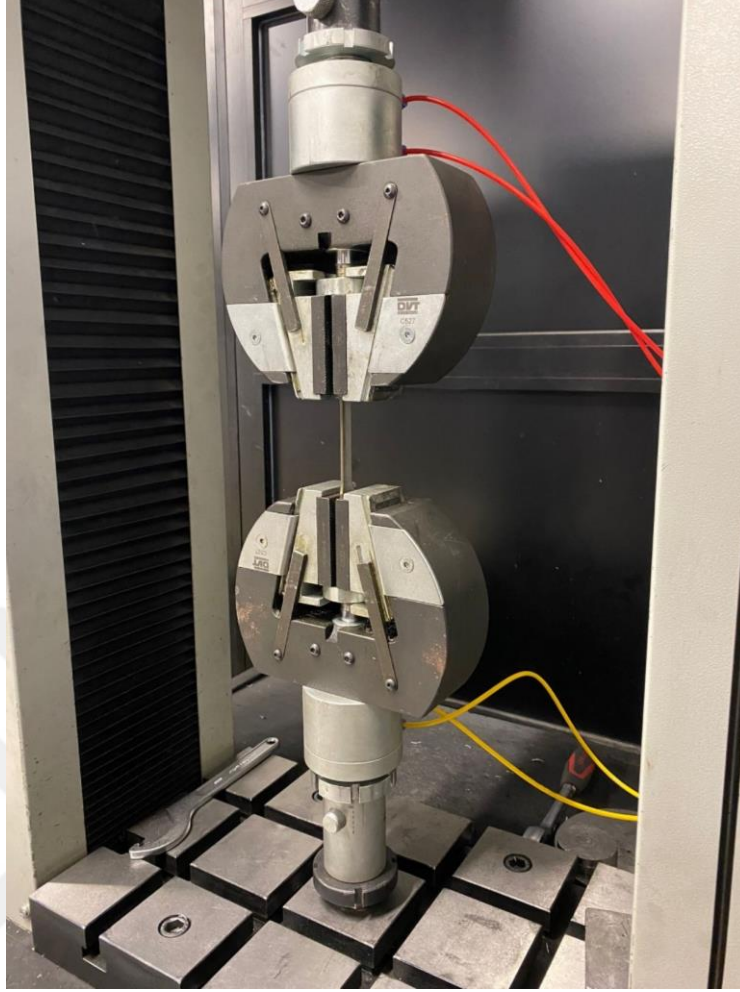


	Dimensions						
	Specimen 1	Specimen 2	Specimen 3	Specimen 4	Specimen 5	Specimen 6	Specimen 7
	mm [in.]	mm [in.]	mm [in.]	mm [in.]	mm [in.]	mm [in.]	mm [in.]
G—Gauge length	50.0 ± 0.1 [2.000 ± 0.005]	50.0 ± 0.1 [2.000 ± 0.005]	200.0 ± 0.2 [8.00 ± 0.01]	50.0 ± 0.1 [2.000 ± 0.005]	100.0 ± 0.1 [4.000 ± 0.005]	50.0 ± 0.1 [2.000 ± 0.005]	100.0 ± 0.1 [4.000 ± 0.005]
W—Width (Note 1)	12.5 ± 0.2 [0.500 ± 0.010]	40.0 ± 2.0 [1.5 ± 0.125-0.25]	40.0 ± 0.2 [1.5 ± 0.125-0.25]	20.0 ± 0.7 [0.750 ± 0.031]	20.0 ± 0.7 [0.750 ± 0.031]	25.0 ± 1.5 [1.000 ± 0.062]	25.0 ± 1.5 [1.000 ± 0.062]
T—Thickness			measured thickness of specimen				
R—Radius of fillet, min	12.5 [0.5]	25 [1]	25 [1]	25 [1]	25 [1]	25 [1]	25 [1]
A—Length of reduced section, min	60 [2.25]	60 [2.25]	230 [9]	60 [2.25]	120 [4.5]	60 [2.25]	120 [4.5]
B—Length of grip section, min (Note 2)	75 [3]	75 [3]	75 [3]	75 [3]	75 [3]	75 [3]	75 [3]
C—Width of grip section, approximate (Note 3)	20 [0.75]	50 [2]	50 [2]	25 [1]	25 [1]	40 [1.5]	40 [1.5]

Şekil 3.3. Büyük Çaplı Borulu Ürünler için Çekme Test Numuneleri (ASTM E8/E8M)



Şekil 3.4. Çekme deney numunelerinin hazırlanışı



Şekil 3.5. Çekme deneyini yapılışı

3.2. Mikroyapı Analizlerinin Yapılışı

Malzemelerin ve normalizasyon işleminin uygunluğunu değerlendirmek için mikroyapı analizleri gerçekleştirilmiştir. Boy borudan kesilen boru numunesi Qatm Brillant 240 marka kesme cihazında kesilmiş ve Buehler Simpliment 1000 marka bakalite alma cihazında bakalite alınmıştır. Bakalite alınmış numuneler kabadan inceye doğru Şekil 3.6'da görüldüğü zımparalanmış ve ardından parlatılmıştır. Ardından %2 nitrik asit ve %98 alkol karışımı asit çözeltisi dağlayıcısında 8-10 saniye süre ile dağlandıktan sonra optik mikroskopta incelemek üzere hazır hale getirilmiştir. Sonrasında NIKON MA200 (Şekil 3.7) marka optik mikroskop cihazında mikroyapı analizleri yapılmıştır. Ayrıca numunelerin INNOVATEST 400 TM (Şekil 3.8) marka mikro vickers sertlik cihazında sertlikleri ölçülmüştür.



Şekil 3.6. PRESI MINITECH 250 DPI makinesinde yapılan zımparalama işlemi



Şekil 3.7. NIKON MA200 mikroskop cihazı



Şekil 3.8. INNOVATEST 400 TM sertlik ölçme cihazı

3.3. Numunelere Normalizasyon İşleminin Yapılması

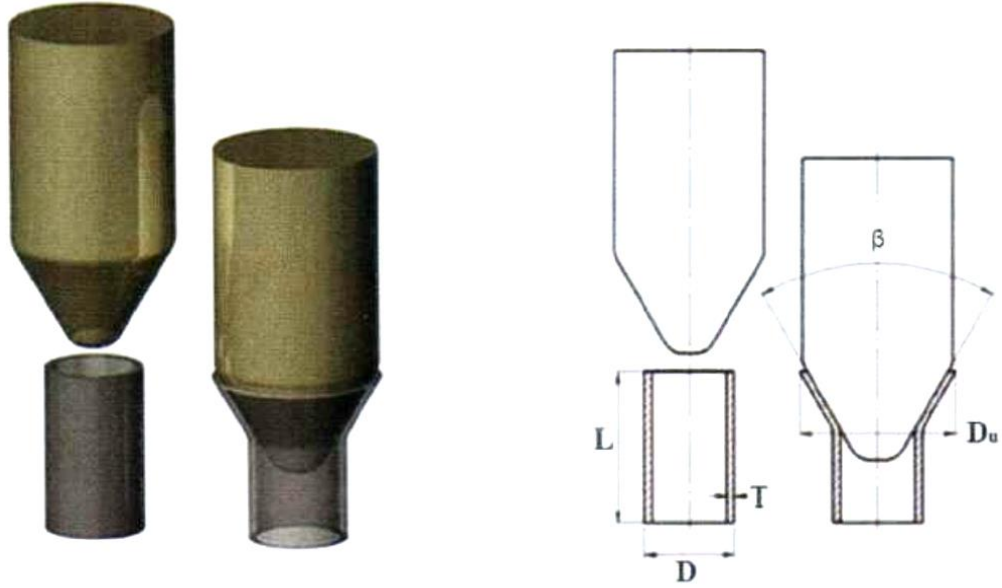
Normalizasyon genellikle karbonlu ve düşük alaşımlı çelikleri, dövme, sıcak haddeleme ya da döküm işlemlerinden sonra bozulan tane yapısını düzgün dağılmış eş eksenli taneler haline getirerek homojen bir yapı elde etmek için kullanılır. Normalizasyon sonrasında ulaşılan sertlik, çeliğin boyutsal özelliklerine ve kullanılan soğutma hızına (yaklaşık 100-250 BSD) göre değişir.

Tez çalışmasındaki borulara Normalizasyon işlemi (Şekil 3.9) yapılmış olup mikroyapı analizleri yapılarak NBK ve BK olarak alınan numunelerin mikroyapıları ile karşılaştırılmıştır. Ardından normalizasyon işleminin malzemenin şekillendirilebilirliğine etkisini belirlemek için ISO 8493 testine göre ağız genişletme deneyi yapılmıştır. Ağız genişletme testi (Şekil 3.10) için kullanılacak olan mandrel konik açısı test parçasının uzunluğunu belirler. Bu açı 30° ye eşit veya daha az ise, test parçasının uzunluğu yaklaşık test parçasının dış çapının iki katına eşit olmalıdır. Bu açı 30° den büyük olduğunda, test parçasının uzunluğu; test parçasının dış çapının bir buçuk katına eşit olmalıdır. Bu parametrelere uygun olacak şekilde 60° lik konik madrel ile test yapılmıştır. Boru çapı $\varnothing 40,3$ olduğundan dolayı test parçasının uzunluğu 60,5 mm olarak bulunmuştur. Yapılan test sonrasında test öncesi dış çap ve test sonrası maksimum dış çap değerlerinden genişleme yüzdesi bulunmuştur. Test sonrası maksimum dış çap parça test esnasında yırtılmaya başlamadan önceki çapıdır. Test hızı 50 mm/dk hızı aşmayacak

şekilde yapılmıştır. Konik mandrel standartlara uygun şekilde yağlanmış olup basma mesafesi en az 20 mm olacak şekilde ayarlanmıştır. Test sırasında test parçasına göre mandrelin dönmediği kontrol edilmiştir (Şekil 3.11).



Şekil 3.9. Normalizasyon işlemi



Şekil 3.10. Ağız genişletme deney prosesi



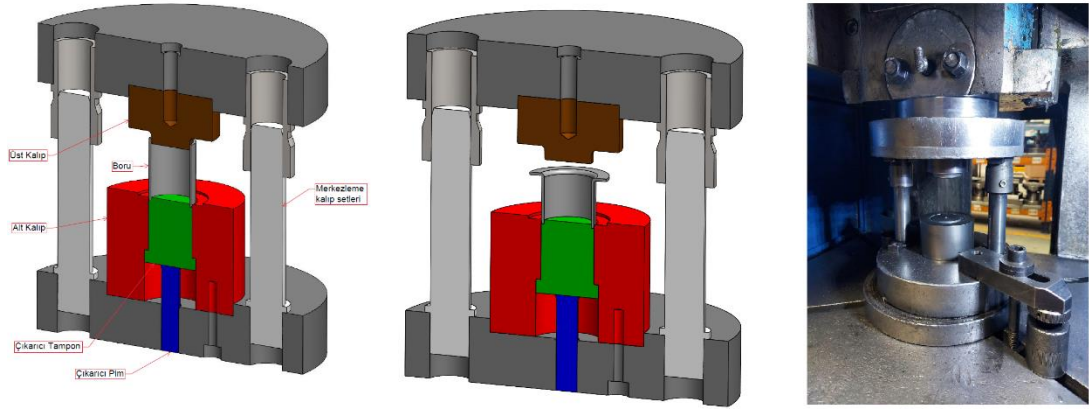
Şekil 3.11. Ağız genişletme deneyi

3.4. Flanş Şekillendirme İşlemi

Boru ucu şekillendirme işlemi, istenilen ölçülere uygun olarak şekilde imal edilmiş olan kalıplar aracılığıyla eksantrik veya hidrolik preslerde yapılır. Tez çalışmasına konu olan borunun, ilk olarak eksantrik prese bağlanmış boğaz açma kalıbı (Şekil 3.12) ile belirlenen ölçüye kadar uç kısmı genişletilir. Bu işlemden sonra yine eksantrik prese bağlanmış flanş oluşturma kalıbında (Şekil 3.13) ikinci operasyonu yapılır ve flanşlı boru elde edilir.



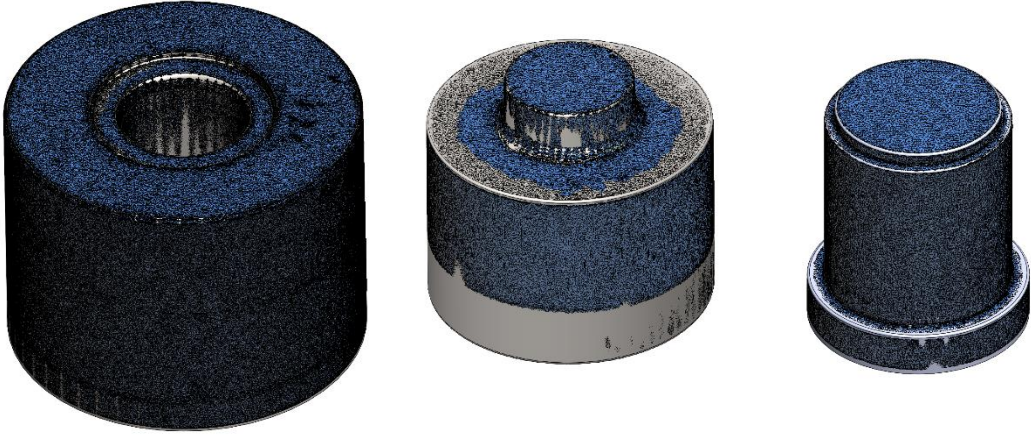
Şekil 3.12. Eksantrik prese bağlı boğaz açma kalıbı



Şekil 3.13. Flanş oluşturma kalıp katı modeli ve üretilmiş kalıp örneği

İkinci operasyondaki flanş oluşturma kalıbı alt kalıp, üst kalıp ve çıkarıcı tampondan oluşmaktadır. Şekil 3.13’de görüldüğü gibi alt ve üst kalıp merkezleme kalıp seti üzerine bağlanmaktadır. Tampon alt kalıp içerisinde çalışmakta ve görevi şekillenme sonrasında boruyu çıkarmaktır. İşlem sırasında düz boru önce çıkarıcı tampon üzerine yerleştirilmekte, hareketli olan üst kalıp aşağı inerek boruyu kalıp içerisinde doğru itmekte, çıkarıcı tampon en alta yaslandıktan sonra boru ucunda şekillenme işlemi gerçekleşmektedir. Çıkarıcı tampon üst kalıbın etkisiyle aşağı doğru inerken şekilde görülmeyen ve çıkarıcı pimin altında bulunan gaz yayı vasıtasıyla boruya doğru belirli bir kuvvet uygulamaktadır. Bu kuvvetin değeri kullanılan gaz yayının kapasitesine göre 1 ton ile 2 ton arasında değişmektedir. Şekillenme işlemi bitince üst kalıp geri yükselmekte ve gaz yayı kuvvetinin etkisiyle çıkarıcı tampon yukarı doğru hareket etmekte ve şekillenmiş boruyu alt kalıp içerisinden dışarıya çıkarmaktadır.

Bir sonraki bölümde anlatılan Sonlu Elemanlar Analizlerinin doğrulanması amacıyla tezde deneme üretimleri yapılmıştır. Bu amaçla Şekil 3.14'te gösterildiği gibi üretimde kullanılan kalıp özel tarama cihazı ile taratılarak gerçeğe en yakın geometrik modelin kullanılması sağlanmıştır. Flanşlı boru şekillendirme analizinden elde edilen veriler ile üretimden elde edilen sonuçların doğruluğunun karşılaştırılması için denemeler yapılmıştır. Bu kapsamda AYD burç fabrikası eksantrik bölümünde eksantrik prese kalıplar bağlanmış ve 40.3 mm dış çapında 2 mm et kalınlığında ve 49.5 mm ile 51.5 mm boyundaki S355JR borular şekillendirilmiştir.



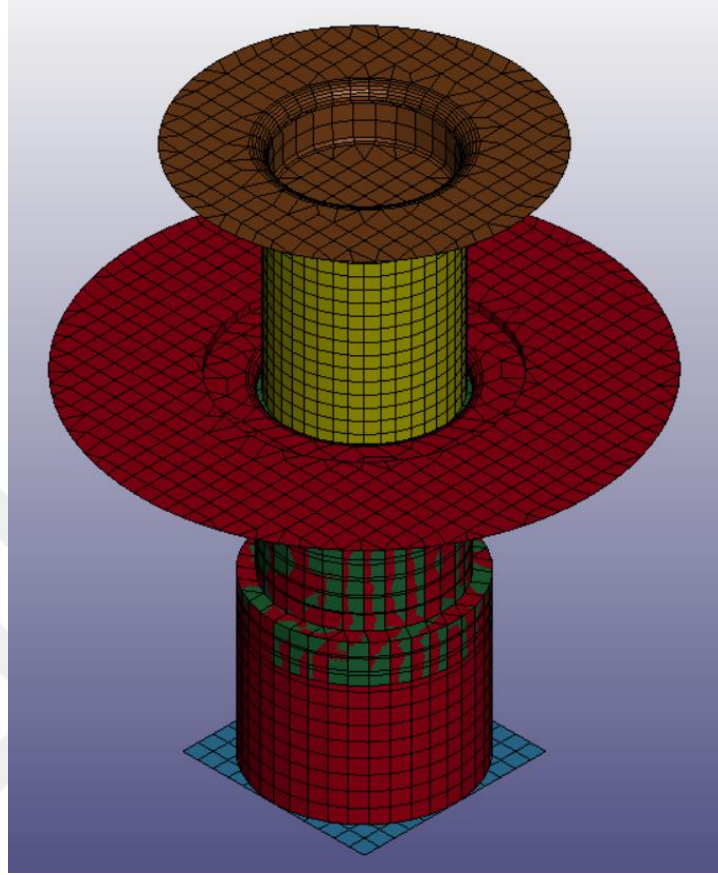
Şekil 3.14. Kalıp parçalarının tarama görseli ile kalıp modellemesinin doğrulanması

Deneme üretimlerinden elde edilen parçalar ile SEA doğrulandıktan sonra optimum kalıp tasarımları gerçekleştirilmiş ve elde edilen optimum geometriler ile kalıplar imal edilmiştir. Sonrasında optimum kalıplar ve proses parametreleri ile AYD Burç fabrikası eksantrik bölümünde deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

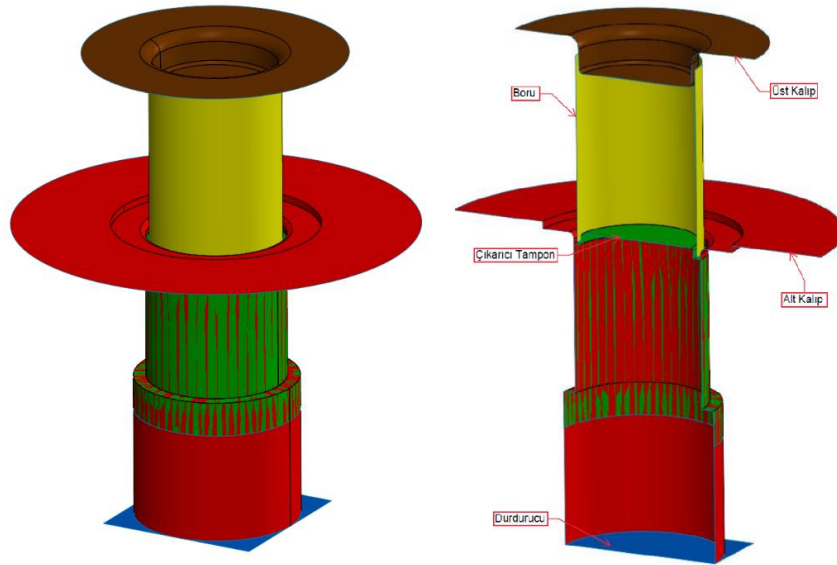
3.5. Sonlu Elemanlar Analizleri

Tez çalışması kapsamında araştırılan flanşlı borunun şekillendirme işlemlerinin yapıldığı kalıplar Şekil 3.14'teki gibi tarandıktan sonra mesh arayüzü kullanılarak Solidworks programı ile modellenmiştir (Şekil 3.16). Şekil 3.20'de durdurucu ismiyle oluşturulan parça analizlerde çıkarıcı tamponun ilerlemesini deneylerde olduğu gibi sınırlamak için modellenmiştir. Modellemede yüzey komutları kullanılmıştır. Modelleme işlemlerinden sonra igs uzantısı ile LS-DYNA programına aktarılmıştır. LS DYNA programında kalıp parçaları 4 mm, boru ise 2.8 mm boyutunda kabuk (Shell) elemanlar kullanılarak sonlu elemanlarına ayrılmıştır (Şekil 3.15). Kalıplarda dört ve üç kenarlı elemanlar karışık olarak kullanılırken, boruda sadece 4 kenarlı elemanlar kullanılmıştır. 51.5 mm boru boyunda kullanılan toplam eleman sayısı 680'dir. Sonrasında kalıp ve boru

malzemesinin kesit özellikleri Şekil 3.17’teki gibi tanımlanmıştır. Kesit özelliği olarak tüm düğüm noktalarında boru malzemenin kalınlığı 2 mm tanımlanmıştır.



Şekil 3.15. Geometrik modelin sonlu elemanlarına ayrılması



Şekil 3.16. Yüzey komutu ile SOLIDWORK programında modelleme

Keyword Input Form

NewID Draw RefBy Sort/TI Add Accept Delete Default Done

☐ Use *Parameter ☐ Comment (Subsys: 1 Tekkadem_I51_v3.dyn) Setting

*SECTION_SHELL_(TITLE) (5)

TITLE

Boru kesit özellikleri

1	SECID	ELFORM	SHRF	NIP	PROPT	QR/IRID	ICOMP	SETYP
1	2	0.8330000	5	1	0	0	1	
2	T1	T2	T3	T4	NLOC	MAREA	IDOF	EDGSET
	2.0000000	2.0000000	2.0000000	2.0000000	0.0	0.0	0.0	0

Repeated Data by Button and List

Şekil 3.17. Kesit özelliklerinin boru için tanımlanması

Boru malzemesinin modellenmesinde izotropik lineer plastik malzeme modeli kullanılmıştır. Ls-Dyna'da 24 numaralı malzeme kartının penceresinden Şekil 3.18'de görüldüğü gibi malzemenin elastik özellikleri ve tablo şeklinde malzemenin akma eğrisi tanımlanmıştır. S355JR malzemenin çekme deneylerinden elde edilen ve Şekil 3.19'da görülen malzemenin akma eğrisi Ls-Dyna programına girilmiştir.

Keyword Input Form

NewID MatDB RefBy Pick Add Accept Delete Default Done

☐ Use *Parameter ☐ Comment (Subsys: 1 Tekkadem_I51_v3.dyn) Setting

*MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY_(TITLE) (1)

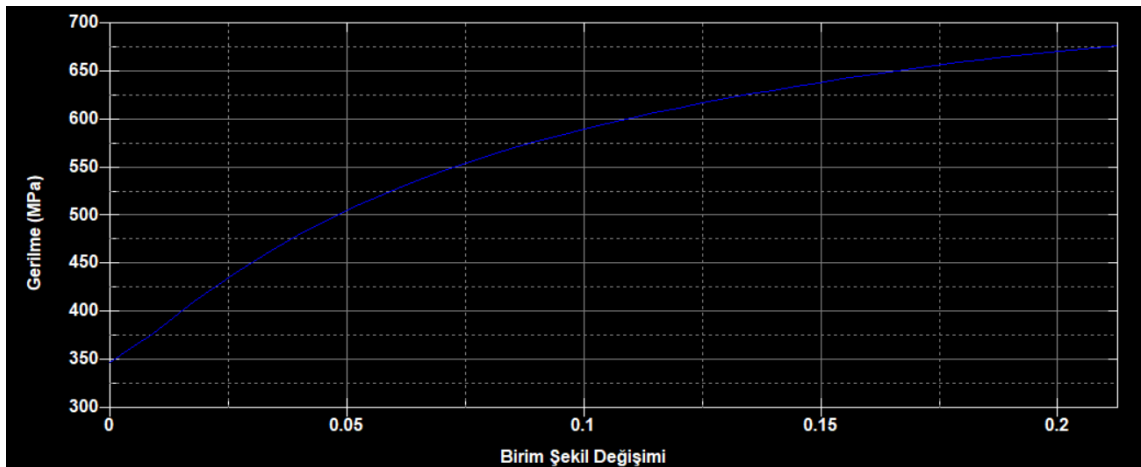
TITLE

S355JR (ST52) Çelik Malzeme

1	MID	RO	E	PR	SIGY	ETAN	FAIL	TDEL
1	7.830e-09	2.070e+05	0.2800000	0.0	0.0	0.0	0.0	
2	C	P	LCSS	LCSS	VP			
	0.0	0.0	2	0	0.0			
3	EPS1	EPS2	EPS3	EPS4	EPS5	EPS6	EPS7	EPS8
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4	ES1	ES2	ES3	ES4	ES5	ES6	ES7	ES8
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

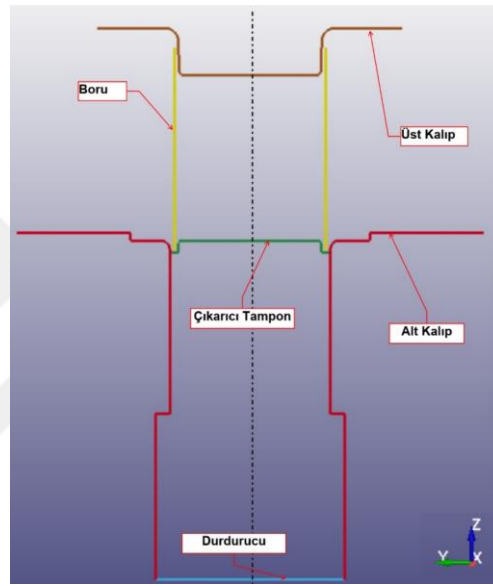
Plot Raise New Padd

Şekil 3.18. S355JR Boru malzemesinin modellenmesi



Şekil 3.19. Ls-Dyna programına girilen S355JR malzemenin akma eğrisi

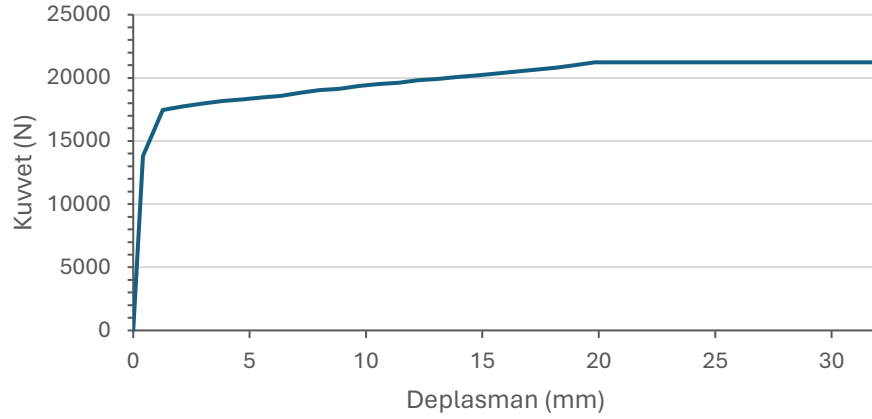
Sınır şart olarak alt kalıbın ve durdurucunun tüm eksenler doğrultusundaki hareketleri ve dönmeleri sıfırlanmış, üst kalıp ve çıkarıcı tamponun ise sadece z ekseni doğrultusundaki hareketi serbest bırakılmıştır. Üst kalıba alt kalıpla temas edinceye kadar -z yönünde hareket tanımı yapılmıştır. Çıkarıcı tampon gaz yayı adı verilen iticiler ile çalışarak operasyon sonunda borunun alt kalıpta sıkışmasını engelleyerek çıkarıcı görevi yapmaktadır. Sonlu elemanlar modelinde çıkarıcı tampona +z yönünde etki eden kuvvet tanımlanmıştır. Delta marka 1000 kgf itici kuvvete sahip gaz yayının ilerlemeye bağlı olarak kuvvet dağılımı basma test cihazı ile Şekil 3.21'deki gibi belirlenerek sonlu elemanlar modelinde Şekil 3.22'deki gerçek tepki kuvvetinin tanımlanması sağlanmıştır.



Şekil 3.20. Modelin kesit görünümü



Şekil 3.21. Gaz yayı kuvvet eğrisi elde etme deneyi



Şekil 3.22. Gaz yayının kuvvet testi sonucunda elde edilen deplasmana bağlı kuvvet grafiği

Sonlu elemanlar modelinde boru ile kalıplar arasındaki temas algoritması olarak Ls-Dyna temas kütüphanesindeki “Forming oneway surface to surface” kartı (Ls-Dyna Keyword Manual) kullanılmıştır. Bu tanımda sürtünme katsayısı olarak çelik/çelik malzemenin standart sürtünme katsayısı olarak 0.125 değeri kullanılmıştır (DYNAFORM User’s Manual). Simülasyon sırasında çıkarıcı tamponun durdurucu ile olan temasını tanımlamak için ise Ls-Dyna temas kütüphanesindeki “Contact surface to surface” kartı kullanılmıştır (Şekil 3.23).

Keyword Input Form

Buttons: NewID, Draw, Pick, Add, Accept, Delete, Default, Done, Setting

Options: ☐ Use *Parameter, ☐ Comment

(Subsys: 1 Tekkadem_I51_v3.dyn)

*CONTACT_FORMING_ONE_WAY_SURFACE_TO_SURFACE_ID/TITLE/MPP_(THERMAL) (3)

ID	CID	TITLE	MPP1	MPP2	IGNORE	BCKET	LCBCKT	NS2TRK	INITIIR	PARMAX	UNUSED	CPARM8
1	1	Boru/Ust_Kalip			0	200		3	2	1.0005		0
2												
3												
4	SSID	MSID	SSTYP	MSTYP	SBOXID	MBOXID	SPR	MPR				
5	FS	FD	DC	VC	VDC	PENCHK	BT	DT				
	0.1250000	0.0	0.0	0.0	20.000000	0	0.0	1.000e+20				

Total Card: 3 Smallest ID: 1 Largest ID: 3 Total deleted card: 0

Right Panel:

- 1 (1) Boru/Ust_Kalip
- 2 (2) Boru/Alt_Kalip
- 3 (3) Boru/Cikarici_Tampon

Şekil 3.23. Sürtünme katsayısının tanımlanması

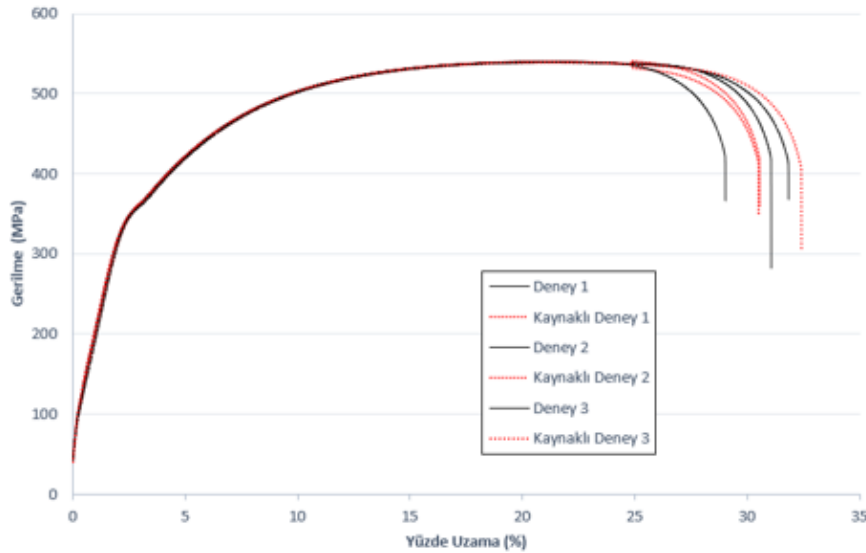
Analiz süresi 0.01 saniye olarak tanımlanmış ve çözümler explicit olarak yapılmıştır.

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

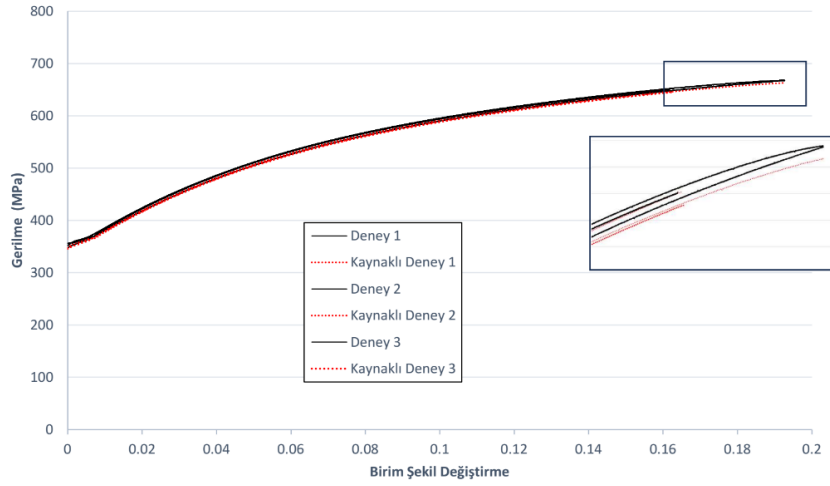
Flanş şekillendirme işleminde kullanılan çelik boru malzemenin çekme deneyi sonuçları, mikroyapı analizi ve normalizasyon işlemi sonrası etkisini de incelemek için yapılan ağız genişletme deneyi sonuçları aşağıda verilmiştir. Ayrıca sonlu elemanlar analiziyle elde edilen sonuçlar ve bu sonuçlar doğrultusunda belirlenen optimum kalıp geometrisi ile yapılan deney sonuçları da aşağıda ayrı bölümler halinde anlatılmıştır.

4.1. Çekme Deneyi Sonuçları

Çelik borudan üçer adet kaynak bölgesinden üçer adette kaynak harici bölgeden elde edilen çekme çubuğu numuneleri ile yapılan çekme deneyi sonuçları mühendislik değerleri cinsinden Şekil 4.1’de ve gerçek değerler cinsinden Şekil 4.2’de verilmiştir. Tez çalışmasında yapılan sonlu elemanlar analizlerinde malzeme davranışını modellemek için gerçek gerilme ve gerçek Birim Şekil Değiştirme (BŞD) sonuçları kullanılmıştır. Şekilde görüleceği gibi birbiri üzerine eğriler elde edilmiştir. Hem kaynak bölgesi dışı (Deney 1, 2 ve 3) hem de kaynak bölgesi (Kaynaklı Deney 1, 2 ve 3) için elde edilen sonuçların tekrarlanabilirlikleri oldukça yüksek çıkmıştır. Kaynak bölgesinin mekanik özellikleri kaynak harici bölgeye benzer çıkmıştır. Deney tekrarlarına bakıldığında kaynak bölgesinin iki tekrarı %30 uzarken bir tekrar %32’ye kadar uzamıştır. Kaynak harici bölgede ise bir tekrar %29 uzarken iki tekrar %31 uzamaya sahiptir.



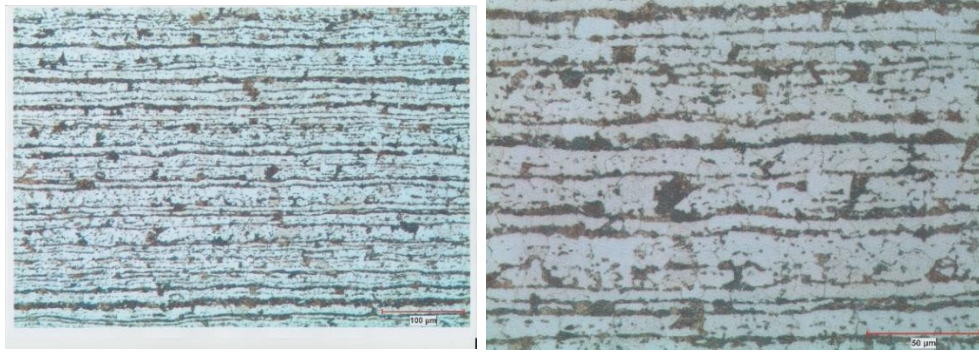
Şekil 4.1. Mühendislik akma eğrileri



Şekil 4.2. Gerçek akma eğrileri

4.2. Mikroyapı Analizi Sonuçları

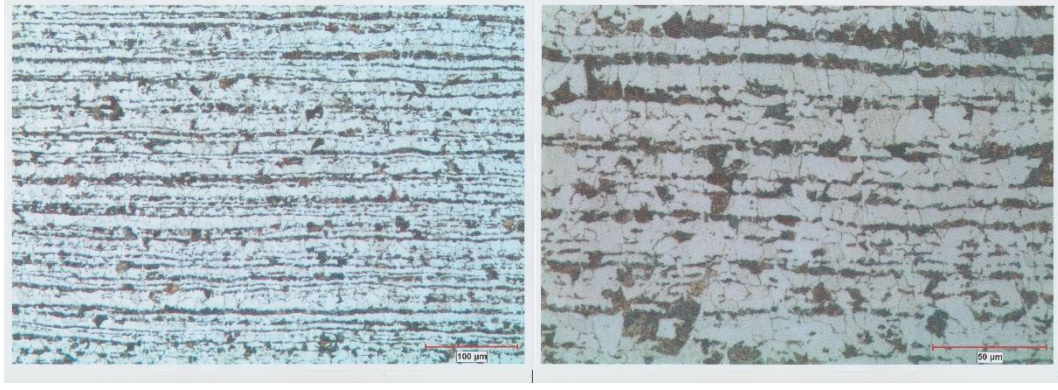
Mikroyapı analizleri öncelikle S355JR-N (ST52 NBK) malzemeden üretilen, hasar oluşan (Şekil 4.3) ve oluşmayan (Şekil 4.4) numuneler için yapılmıştır. Boruların tane yapıları incelendiğin her ikisi de ferrit (beyaz renkli) ve perlit (siyah renkli) fazlarından oluşan tipik düşük karbonlu bir çelik yapısına sahiptir. Her iki numunenin perlit fazında hadde etkisinden dolayı mekanik fiberleşme meydana gelmiş ve perlit fazı hadde yönünde uzamıştır. Tane büyüklüklerinin benzer olduğu görülmektedir. Ancak malzeme homojen olmayan bir yapıya sahiptir.



a)

b)

Şekil 4.3. Hasar oluşmuş S355JR-N boruya ait mikroyapı görüntüsü a) 200X b) 500X

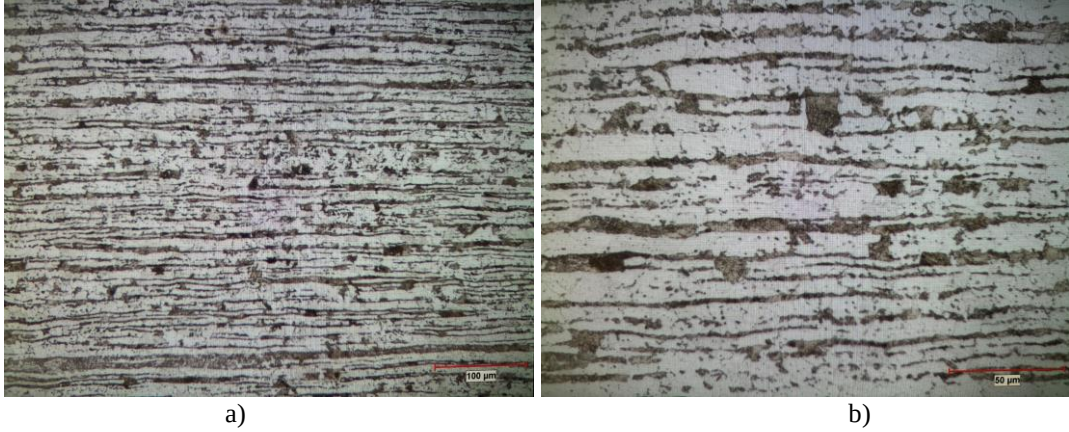


a)

b)

Şekil 4.4. Hasar oluşmamış S355JR-N boruya ait mikroyapı görüntüsü a) 200X b) 500X

Normalize edilmiş halde satın alınan malzemede mekanik fiberleşme kaynaklı homojensizlik olmaması gerektiği değerlendirilerek kıyaslamak amacıyla öncelikle normalize edilmemiş işlem durumundaki (S355JR-C) malzemenin mikro yapısı incelenmiş ve Şekil 4.5'te verilmiştir. Mikroyapı görüntüsü incelendiğinde normalize edilmemiş malzemede de mekanik fiberleşmenin mevcut olduğu görülmektedir. S355 malzemedeki perlit fazının fazlalığı sebebiyle (%18) hadde yönünde uzamış olduğu literatürdeki sonuçlarda da belirtilmektedir (İpekoğlu ve ark., 2018).



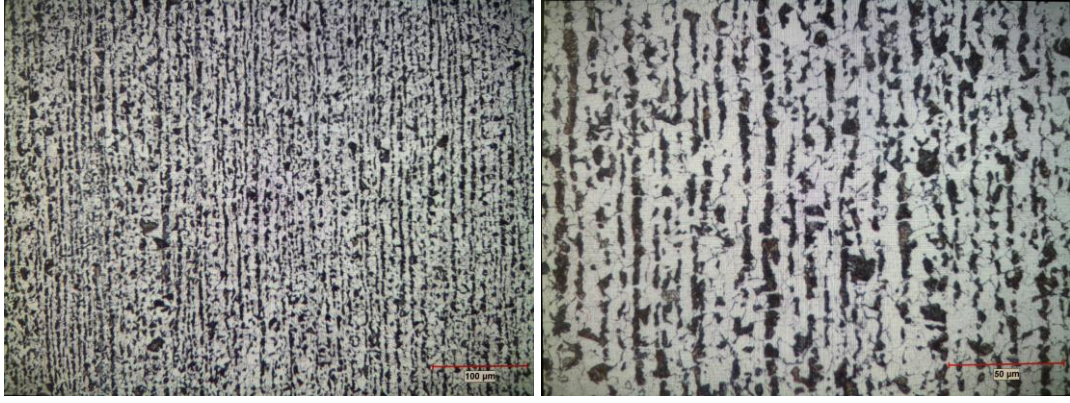
a)

b)

Şekil 4.5. S355JR-C malzemeye ait mikroyapı görüntüsü a) 200X b) 500X

4.3. Normalizasyon İşlemi ve Ağız Genişletme Deney Sonuçları

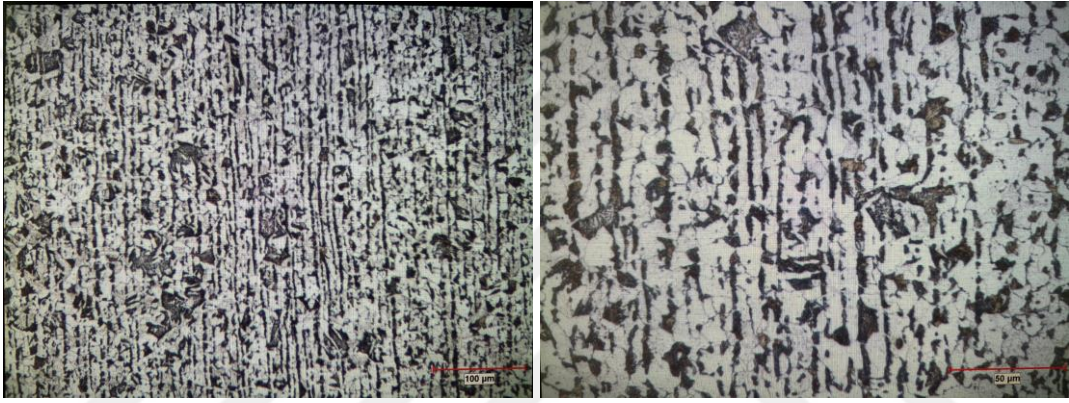
Normalizasyon işleminin mikroyapıdaki mekanik fiberleşmeye etkisini incelemek amacıyla her iki işlem durumundaki (S355JR-N ve S355JR-C) malzemeye tekrar normalizasyon işlemi uygulanmış ve mikroyapısı incelenmiştir. Sonuçta Şekil 4.6 ve Şekil 4.7'de görüldüğü gibi malzemelerde mekanik fiberleşmenin nispeten azaldığı ve daha homojen dağılmış ve küçük boyutlu tane yapısına sahip olduğu tespit edilmiştir.



a)

b)

Şekil 4.6. Normalizasyon işlemi sonrasında S355JR-N boruya ait mikroyapı görüntüsü a) 200X b) 500X



a)

b)

Şekil 4.7. Normalizasyon işlemi sonrasında S355JR-C boruya ait mikroyapı görüntüsü a) 200X b) 500X

İç yapıdaki bu değişikliğin malzemenin şekillendirilebilirliğine etkisini görmek için ağız genişletme deneyleri yapılmıştır. Ø40,3 çapa sahip S355JR-N olarak temin edilmiş ve tekrar normalizasyon işlemi yapılmış borulara üçer tekrarlı ağız genişletme deneyleri yapılarak sonuçlar karşılaştırılmıştır. Hasar anına ait çap değerini hassas olarak belirleyebilmek için her bir durumda çok sayıda deneme yapılarak üç başarılı tekrar elde edilmiştir (Şekil 4.8). Deney sonuçları Çizelge 4.1’de verilmiştir. Numunelerin yırtılma anına ait fotoğrafları Şekil 4.9’da gösterilmiştir. Ağız genişletme deney sonuçlarına göre S355JR-N olarak satın alınan malzemenin yırtılma anındaki çapı %95 güvenilirlikle $60,8 \pm 0,1$ mm iken, tekrar normalizasyon işlemi yapılmış malzemenin yırtılma çapı %95 güvenilirlikle $55,2 \pm 0,2$ mm olduğu belirlenmiştir. Malzemenin sertlik değerleri ölçüldüğünde temin edilmiş halde malzeme 150 BSD iken tekrar normalize edilmiş malzemenin sertliği 110 BSD’ye düşmüştür. S355 malzemenin standart sertlik değerinin 150 BSD ve üzeri olması gerektiği belirtilmektedir (Şekil 4.10). Sertlik ölçümü sonucuna

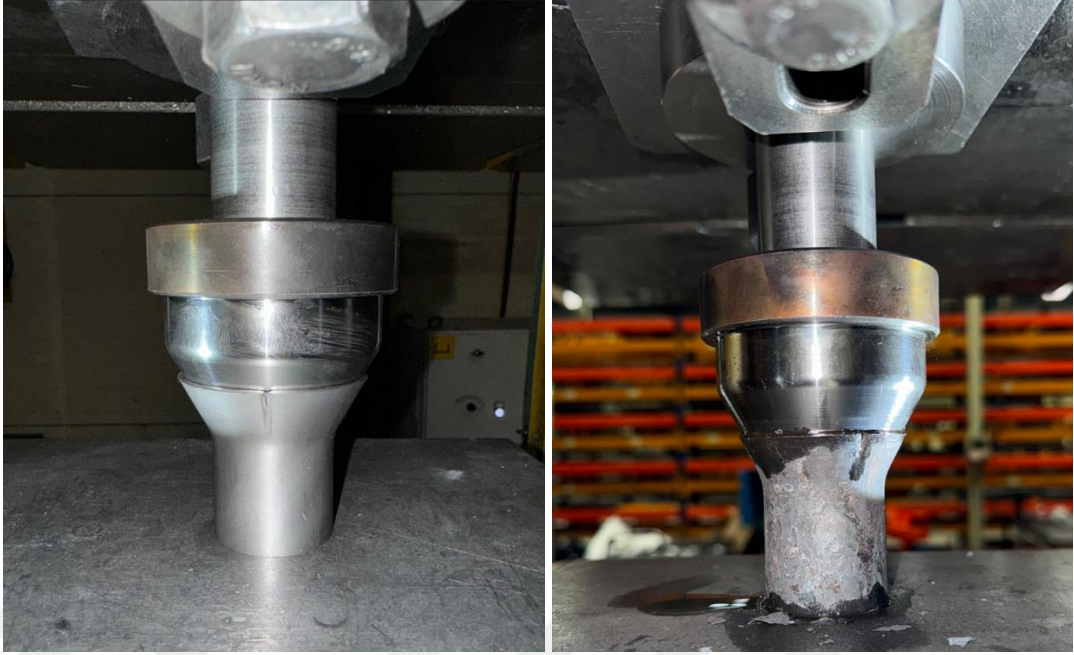
göre tekrar normalizasyon işlemi yapılmış numuneler daha yumuşak olduğu için sünekliğinin daha fazla olması beklenmektedir. Ancak ağız açma deneyi sonucuna göre yırtılma çapı azaldığı için şekillendirilebilirliğinin daha az olduğu anlaşılmaktadır. Tekrar normalizasyon işlemi yapılmış boruların şekillendirilebilirliğinin azalmasına malzeme yüzeyinde meydana gelen oksit (tufal) tabakasının neden olduğu düşünülmüştür. Normalizasyon yapılan fırın atmosfer kontrollü olmadığı için malzeme yüzeyinde oksit tabakası oluşmuştur. Oksit tabakası kaynaklı olarak malzeme yüzeyinin kötüleşmesi nedeniyle oluşan gerilme yığılmasının malzemenin daha erken hasara uğramasına neden olduğu değerlendirilmiştir. Oksit tabakası oluşmuş malzemeler önce kumlama işlemi yapılarak oksit tabakasının temizlenmesi sağlanmıştır. Oksit tabakasından kaynaklı çentik etkisinin oluşmaması için ek olarak boru uç kısmının iç ve dış kısmına ince pah kırılmış olup deney numunesi ve kalıp arasında poli etilen film kullanılarak tekrar deneme yapılmıştır (Şekil 4.11). Deney sonucunda %95 güvenilirlilikle $61,5 \pm 0,1$ mm hasar anı çap ölçüsü elde edilerek malzemenin sünekliğinde az da olsa bir artış olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 4.8. Ağız genişletme deneyi uygulanmış numuneler a) S355JR-N olarak satın alınan borular, b) S355JR-N'ye tekrar normalizasyon işlemi yapılmış borular

Çizelge 4.1. Ağız genişletme deneyi sonucu ölçülen çap değerleri (mm)

	S355JR-N Temin Edilmiş	S355JR-N Tekrar Normalize Edilmiş	S355JR-N Tekrar Normalize Edilmiş Kumlama Yapılmış
	Hasar Anı Çap Ölçüsü	Hasar Anı Çap Ölçüsü	Hasar Anı Çap Ölçüsü
Deney 1	60,80	55,07	61,4
Deney 2	60,86	55,20	61,49
Deney 3	60,76	55,28	61,52
Ortalama	60,80	55,20	61,5
Std Sapmax2	0,1	0,2	0,1



Şekil 4.9. Yırtılma anları

	Brinell Hardness Number	Vickers Hardness Number	Ultimate Tensile Strength N/mm ²
Grades S355	187	197	637
	179	189	608
	170	179	559
	163	172	539
Grades S275	156	165	530
	149	157	500
	143	150	481
	137	144	481
Grades S235	131	138	461
	126	133	451
	121	127	431

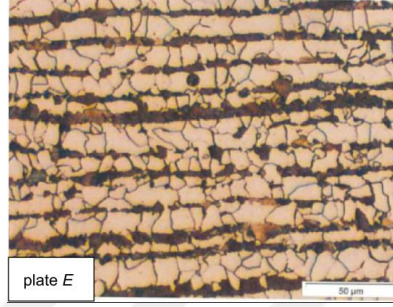
Şekil 4.10. S355 malzemeye ait sertlik tablosu (<https://www.steelconstruction.info>)



Şekil 4.11. S355JR-N tekrar normalize edilmiş kumlama yapılmış ve poşetlenmiş malzeme

Normalize edilmiş halde satın alınan malzemede mekanik fiberlerin bulunmasının uygunluğu, literatürde yine S355JR-N standardında kullanılan malzemelerin

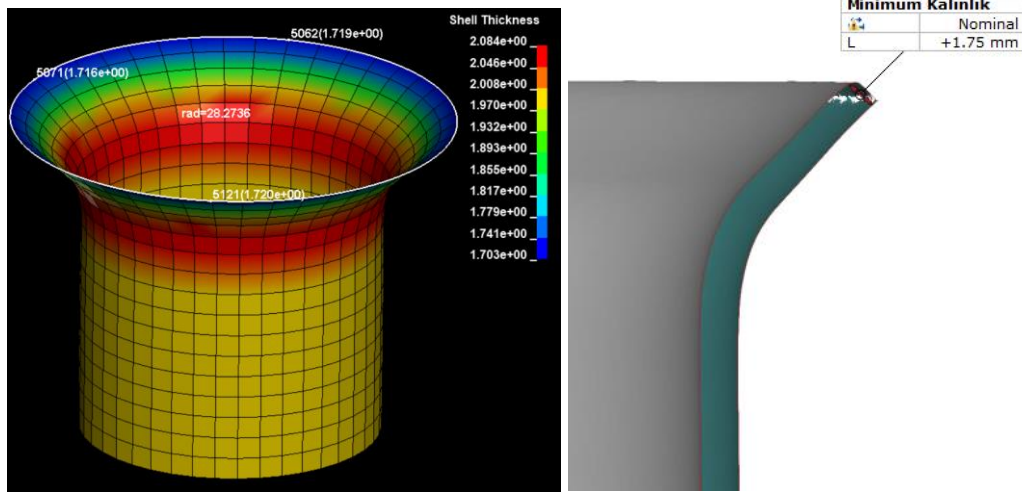
mikroyapılarının araştırılması ile değerlendirilmiştir. Sonuçta Slot ve ark. (2020) çalışmasında verilen Şekil 4.12’de görülen iç yapı fotoğrafında olduğu gibi normalize edilmiş malzemede mekanik fiberleşmenin görülebileceği bulunmuştur. Tekrar yapılan normalizasyon işlemi ile boru ucu genişletme deneylerinde süneklik artışı miktarının %1 gibi az bir değerde olmasından ve malzemenin sertliği standart değerın altına düştüğünden tezde S355JR-N malzemenin satın alındığı haliyle kullanılmasına karar verilmiştir.



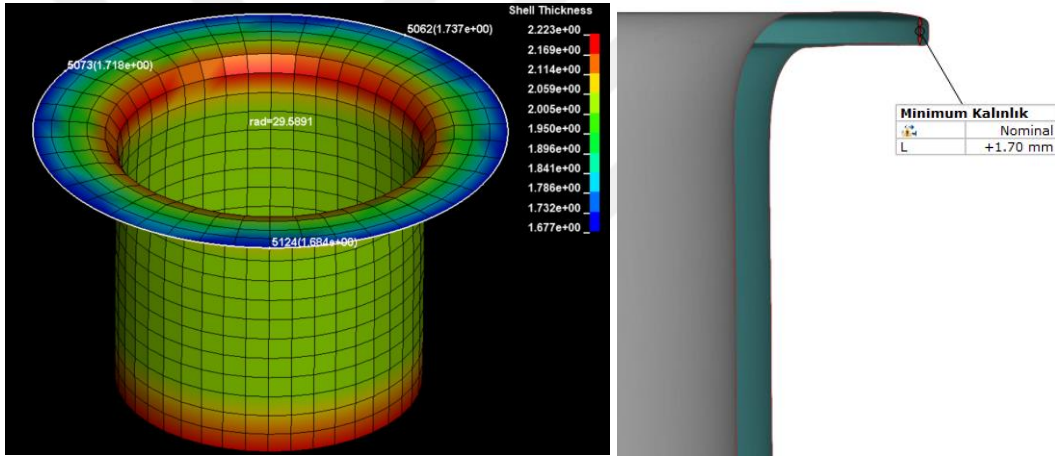
Şekil 4.12. Slot ve ark. (2020) çalışmasında S355-N malzemeye ait mikroyapı görüntüsü

4.4. Sonlu Elemanlar Analizleri Sonuçları

Sonlu elemanlar analizinde (SEA) ilk olarak AYD Otomotiv Kuruluşunda mevcuttaki iki kademe ile üretim prosesi modellenmiş ve ilk kademe ve ikinci kademe sonrasındaki kalınlık azalması ile çap değerleri belirlenerek deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Şekil 4.13’te analizlerde ilk kademe sonrasındaki kalınlık değerinin flanş dış çapında ortalama olarak 1,718 mm olduğu görülmektedir. Deney parçasının 3B tarama verisinden elde edilen kalınlık değeri ise 1,75 mm olarak ölçülmüştür. Burada toplam incelme değeri $2,00 - 1,75 = 0,25$ mm’dir. Deney ve analiz arasındaki fark $1,75 - 1,718 = 0,032$ mm olduğu için hata oranı $(0,032 / 0,25) \times 100 = \%12,8$ olarak hesaplanmıştır. İkinci kademe sonrasında analizden elde edilen kalınlık değeri ortalama olarak 1,713 mm olmuştur (Şekil 4.14). Deneylerden elde edilen kalınlık değeri ise 1,70 mm’dir. İkinci kademe sonrasında analizin hata oranı sadece $\%4,3$ olmuştur. Flanş çapları değerlendirildiğinde birinci kademe sonrasında analizden elde edilen çap ölçüsü 56,54 mm iken deneyden elde edilen çap değeri 56,13 mm’dir. İkinci kademe sonrasında ise analizden elde edilen flanş çapı 59,18 mm iken deneyde elde edilen değer 59,31 mm olmuştur. Bu sonuçlardan SEA modelinin deney sonuçlarını $\%90$ ’dan fazla oranla doğru tahmin ettiği bulunmuştur.



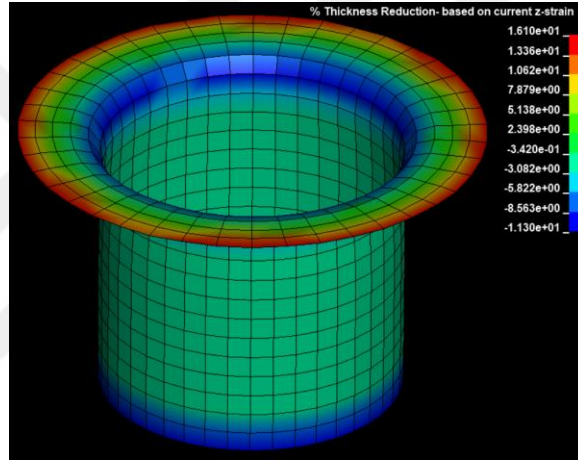
Şekil 4.13. Boğaz açma analiz ve deneysel 3b tarama sonucu



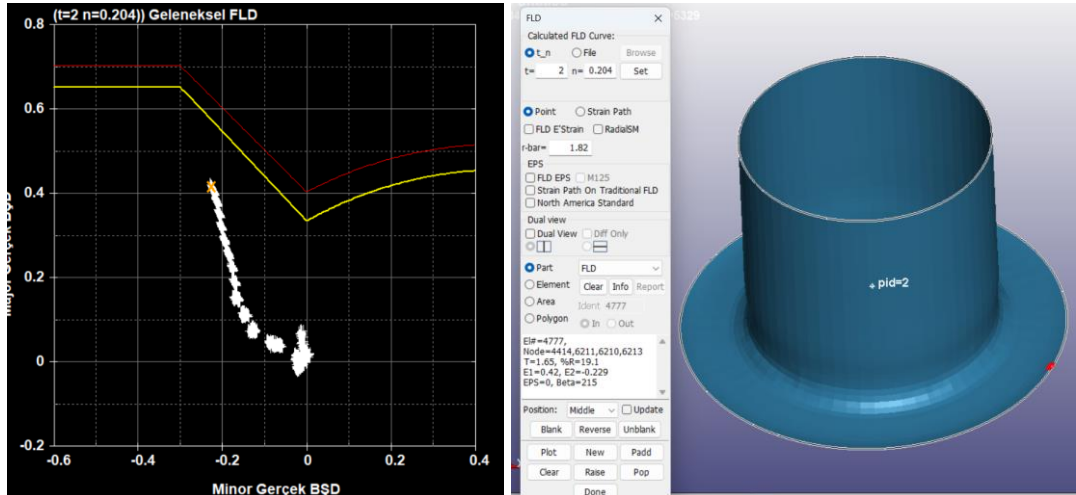
Şekil 4.14. İki kademedeki flanş şekillendirme analiz ve deneysel 3b tarama sonucu

Parçanın sahip olması gereken flanş çapı $59,00^{+2,00}_{0,00}$, boyu ise $35,00^{+0,30}_{0,00}$ mm'dir. Mevcuttaki kalıp tasarımlarıyla iki kademedeki üretim parçanın gerekli ölçü toleranslarıyla imal edilmesi için uygundur. Ancak fire oranları %20'leri geçmektedir. İşletmede %6'nın üzerindeki fire oranları kabul edilebilir olarak görülmemektedir. Analizlerden elde edilen maksimum incelme değeri Şekil 4.15'te görüldüğü gibi %16,1 genellikle pratikte kabul edilen %20 incelme değerinden daha az olmakla birlikte yakındır. Malzemenin hasar ihtimalini daha net değerlendirmek için deneysel Şekillendirme Sınır Diyagramına (ŞSD) ihtiyaç vardır. Ancak bu veri bulunmadığı için SEA yazılımında malzemenin pekleşme üssü ve malzeme kalınlığı değerine göre ampirik olarak hesaplanan ŞSD değeri kullanılarak şekillendirilebilirlik değerlendirmesi yapılmıştır. Malzemenin pekleşme üssü ve mukavemet katsayısı gerçek akma

verilerinden sırasıyla 0,204 ve 938 MPa olarak elde edilmiştir. Pekleşme üssünün 0,204 ve 2 mm malzeme kalınlığı için ikinci kademe sonrasında parçasının ŞSD diyagramı Şekil 4.16'da verilmiştir. Ampirik ŞSD diyagramına göre de malzemede hasar riski görülmemektedir. Ancak ampirik ŞSD'de şekillendirme sınır eğrisinin (ŞSE) minimum noktası 0,35 BŞD değerinde ve tek eksenli çekme deneyinin olduğu bölgede majör BŞD değeri 0,60'ı geçmektedir. Halbuki S355 malzemenin yüzde uzama değeri %30 civarındadır. Bu nedenle ampirik olarak elde edilen ŞSE'nin gerçek ŞSE'ye göre oldukça yukarı seviyeden geçtiği sonucuna ulaşılmıştır. Bu nedenlerle kalınlık incelmesi ve ŞSD ile yapılan hasar kriteri karşılaştırmasına göre parçanın ikinci kademe sonrasında hasar açısından risk oluşturabileceği, dolayısıyla proseste veya kalıpta yapılacak iyileştirmelerle maksimum incelme değerinin azaltılması gerektiği sonucuna ulaşılmıştır.



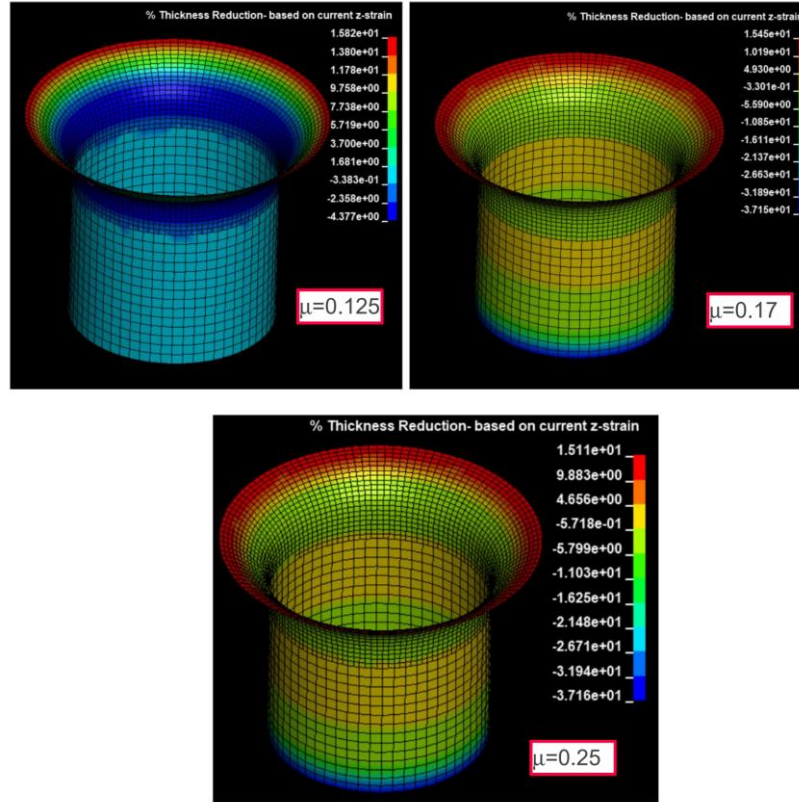
Şekil 4.15. İkinci kademe sonrasında parçanın incelme değeri



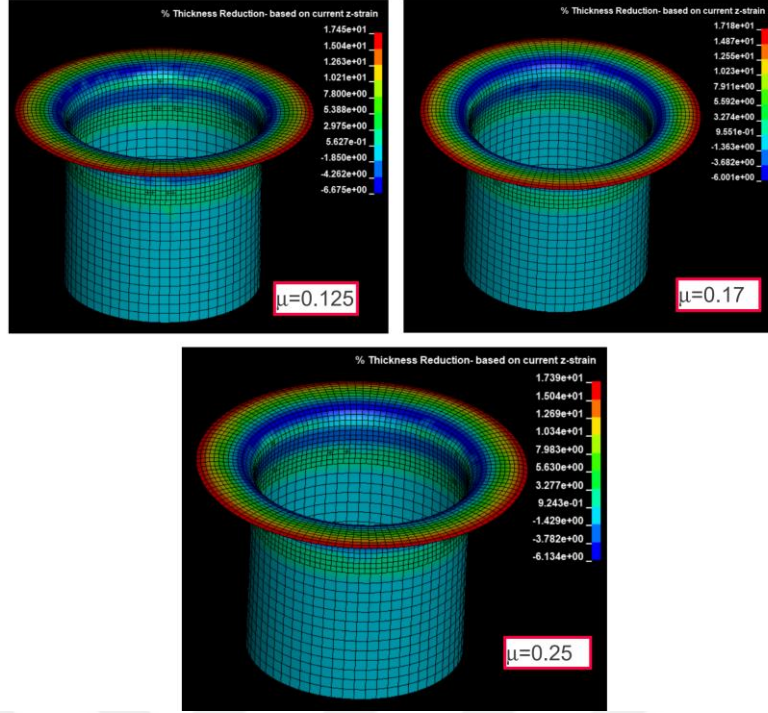
Şekil 4.16. İkinci kademe şekillendirme sonrasında parçanın ŞSD grafiği ve ŞSE'ye en yakın noktanın parça üzerindeki yeri

4.4.1. Sürtünme katsayısının malzemenin şekillendirilmesine etkisi

Sürtünme katsayısının malzemenin şekillendirilebilirliğine etkisini belirlemek için yapılan SEA çalışmalarında şekillendirmenin birinci kademesi olan boğaz açma işleminde ve ikinci kademe olan flanş şekillendirmede 0.125, 0.17 ve 0.25 sürtünme katsayısı değerleri ile analizler yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 4.17 ve Şekil 4.18’de verilmiştir. Buna göre farklı sürtünme katsayısı değerlerinde parçada meydana gelen maksimum inceltme değeri %15 ve %17 civarında kalmıştır. Bu nedenle sürtünme katsayısının şekillendirmeye önemli bir etkisinin olmadığı sonucuna ulaşılmıştır.



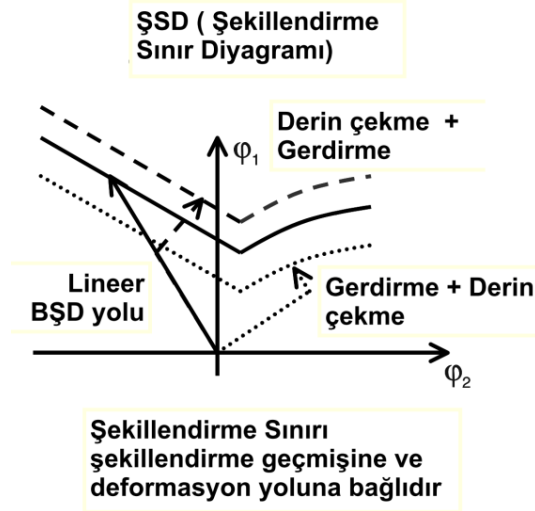
Şekil 4.17. Sürtünme katsayısının birinci kademe boğaz açma işlemine etkisi



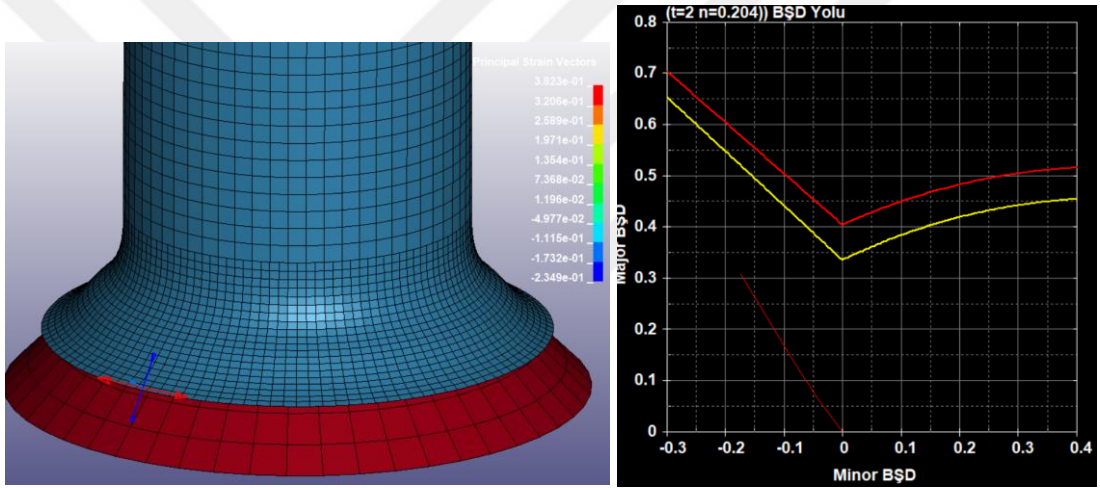
Şekil 4.18. Sürtünme katsayısının ikinci kademe flanş şekillendirme işlemine etkisi

4.4.2. Kademe sayısının prosese etkisi

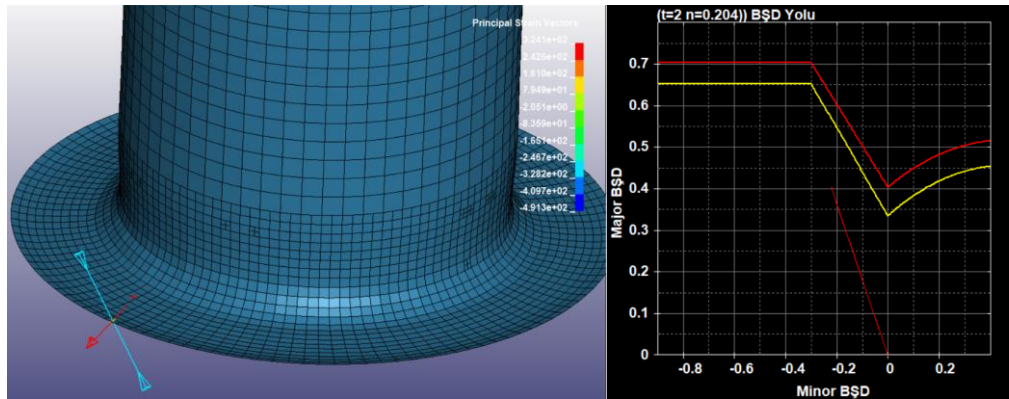
BŞD yolundaki değişimin malzemelerin şekillendirilebilirliğini etkilediği literatürde belirtilmektedir. Örnek olarak Uthaisangsuk ve ark. (2007) BŞD yolundaki değişimin şekillendirilebilirliğine etkisini Şekil 4.19’da göstermişlerdir. Flanş oluşturma işleminde ilk kademede hasarın genellikle yaşandığı maksimum flanş çapında BŞD yolu Şekil 4.20’de gösterilmiştir. İkinci kademede şekillendirme sırasında meydana gelen BŞD yolu Şekil 4.21’de gösterilmiştir. BŞD yollarında kademeler arasında minör ve majör BŞD oranlarının farklılık gösterdiği şekillerden anlaşılmaktadır. Bu nedenle BŞD yoluna bağlı şekillendirilebilirliğin azalması ihtimaline karşı prosesin tek kademede uygulanmasının flanş şekillendirme işleminde daha uygun olabileceği değerlendirilmiştir.



Şekil 4.19 BŞD yolunun değişimi (Uthaisangsuk ve ark. 2007)



Şekil 4.20. Flanş şekillendirmenin birinci kademesinde maksimum çap bölgesinde BŞD yolu



Şekil 4.21. Flanş şekillendirmenin ikinci kademesinde maksimum çap bölgesinde BŞD yolu

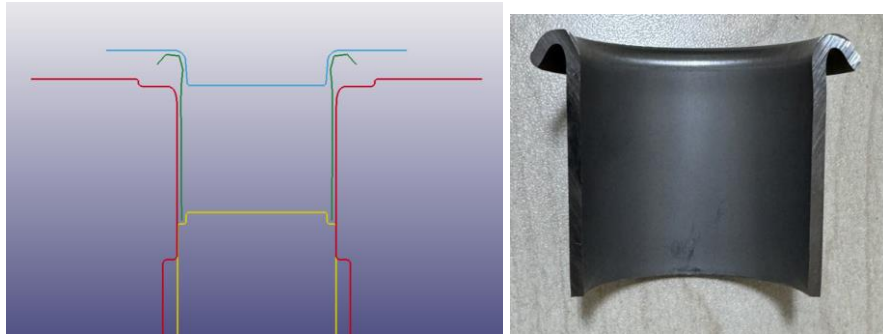
Yırtılma probleminde kalınlık incilmesi faktörünün etkisinin azaltılması için tek operasyon olarak üretim yapılması amacıyla ikinci kademedeki kullanılan kalıplar ile boğaz açma işlemi olan birinci kademe yapılmadan direkt olarak şekillendirme denemeleri

yapılmış ve sonuçta örnek parçalar Şekil 4.22’de gibi elde edilmiştir. Tek kademe şekillendirme işleminin SEA’sının yapılması için Bölüm 3.4’te anlatıldığı üzere 3B tarama ile elde edilen kalıp datası kullanılarak kurulan sonlu elemanlar modelinde deneylerde kullanılan 51,5 mm boyundaki boru ile analizler gerçekleştirilmiştir.



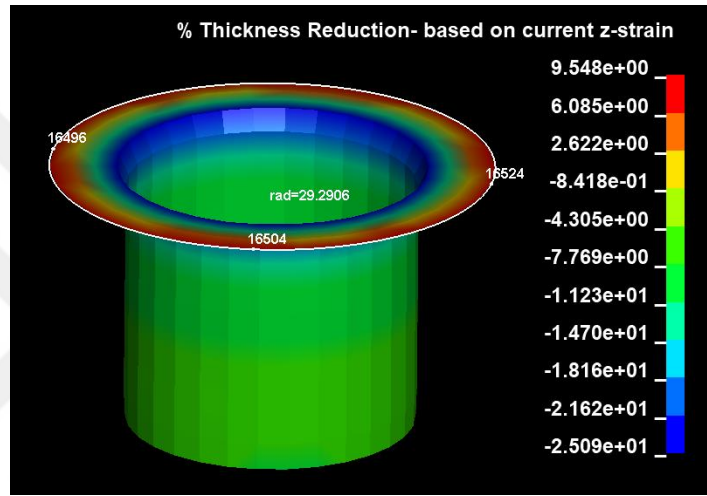
Şekil 4.22. Tek kademe üretim deneylerinde elde edilen parçalar

Analizlerde boru ucu şekillenirken Şekil 4.23’de görüldüğü gibi önce aşağıya doğru kıvrıldığı sonra üst kalıp ve alt kalıp arasında düzleştiği görülmüştür. Deney sırasında kalıp tam kapanmadan ara konumda deney durdurularak numune incelendiğinde Şekil 4.23’de görüldüğü gibi benzer davranışın deneyde de meydana geldiği belirlenmiştir.

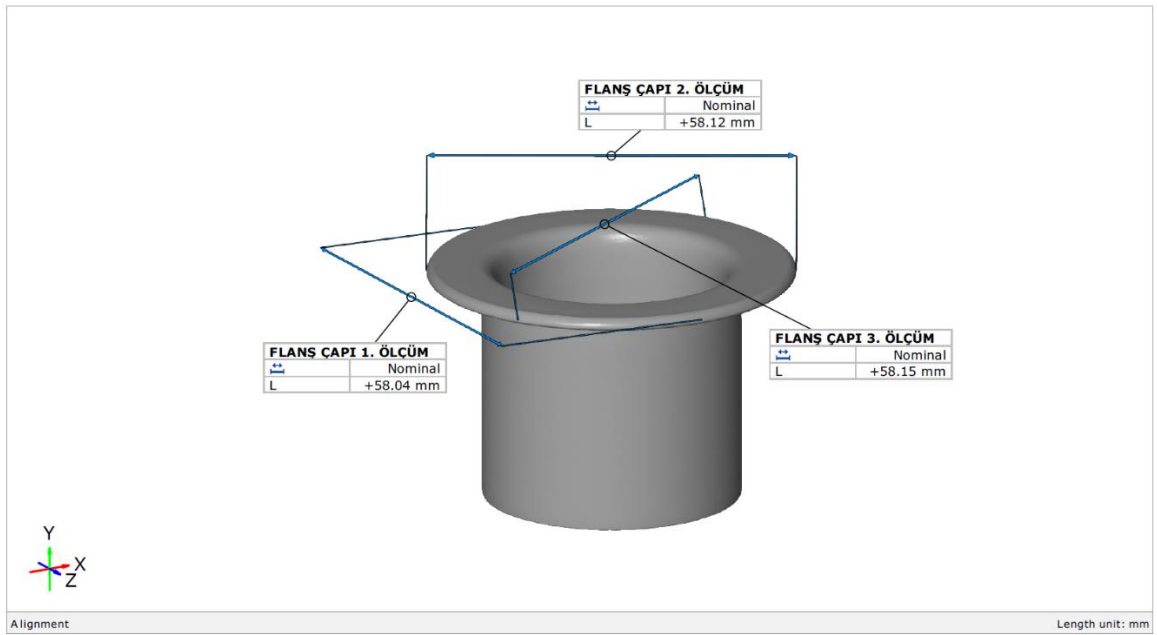


Şekil 4.23. Borunun tek kademe şekillenmesi sırasında aşağı doğru kıvrılması

Analiz sonucu elde edilen kalınlık incelmesi değerleri Şekil 4.24'te verilmiş olup %9,5 olarak elde edilen incelme değeri iki kademe şekillendirme sonrasındaki %16,1 incelme değerine (Şekil 4.14) göre oldukça azalmıştır. Tek kademe analizin doğrulanması için deney parçasının flanş çapı Şekil 4.25'te görüldüğü gibi ortalama 58,10 mm olarak ölçülmüştür. Şekil 4.24'te analizden elde edilen çap değeri 58,58 mm'dir. Böylece şekillendirme sonrasındaki geometrinin analizlerle büyük bir doğrulukla elde edildiği bulunmuştur. Böylece doğrulanmış analiz verilerine göre tek kademedeki şekillendirmenin iki kademe şekillendirmeye göre yırtılma hasarı açısından çok daha güvenli olduğu sonucuna ulaşılmıştır.



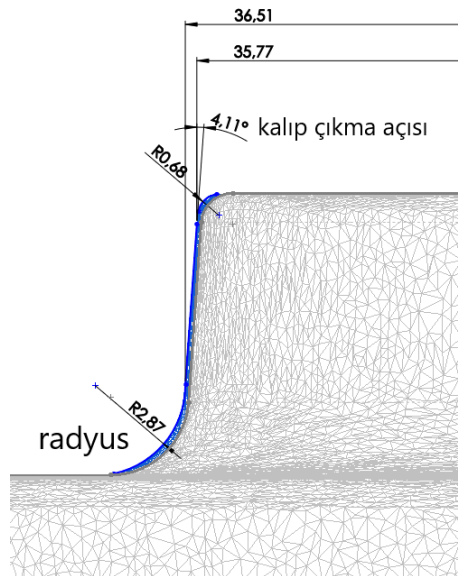
Şekil 4.24. Tek kademe mevcut kalıp ile analiz sonucu



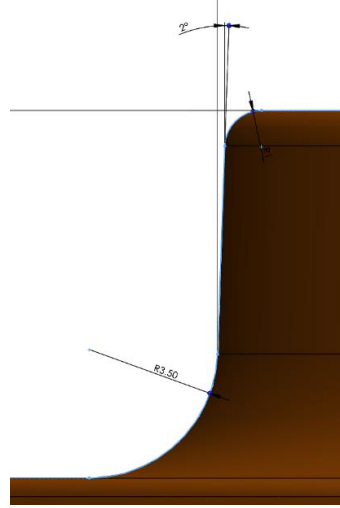
Şekil 4.25. Tek kademe mevcut kalıpta elde edilen flanşlı borunun 3b tarama ölçüm sonucu

Tek kademe flanş şekillendirme işleminin iki kademedeki şekillendirmeye göre çok daha uygun olduğunun tespit edilmesinden sonra tek kademedeki şekillendirme işleminde optimum kalıp geometrisinin belirlenmesi için çalışmalar yürütülmüştür. Optimum kalıp çalışmasında istenilen ölçüde flanş çapı ve minimum kesit daralması elde edilmeye çalışılmıştır. Mevcut kalıplarda üst kalıp radyüsü ve kalıp çıkma açısı Şekil 4.26’da görüldüğü gibi 3B taramadan elde edilen veriler yardımıyla ölçülmüştür. Üst kalıp radyusu ve kalıp çıkma açısının (Şekil 4.27) flanş çapına ve kesit daralmasına etkisi görmek için yapılan analizlerin sonucu Çizelge 4.2’de verilmiştir. Kalıp parametrelerinin flanş çapı ve maksimum incelmeye etkisi Şekil 4.28’de görülmektedir. Bu sonuçlara göre flanş çapı ve incelme üzerine kalıp radyüsünün etkisi oldukça fazla çıkmıştır. Buna karşın kalıp çıkma açısının belirtilen değerler üzerinde önemli bir etkisinin olmadığı bulunmuştur.

Parçalarda istenilen flanş ölçüsü ($\text{Ø}59+2$) 7, 8 ve 9. Denemelerde elde edilmiştir. Bu sonuçlar ile flanş ölçüsü ve maksimum incelmenin elde edildiği en uygun seçenek 7. tasarımıdır. Ancak analiz sonuçlarından görüleceği gibi kalıp çıkma açısının etkisi çok azdır. Operasyon sonucunda borunun üst kalıba sıkışma durumu olmasında borunun zarar görme ihtimali vardır. Bu nedenle radius ölçüsünün 3.5 mm ve kalıp çıkma açısının 2° olduğu 8. tasarımın en uygun kalıp tasarımı olduğuna karar verilmiştir. Seçilen optimum kalıp ölçüleriyle elde edilen kalınlık dağılımı ve parça Şekil 4.29’da gösterilmiştir.



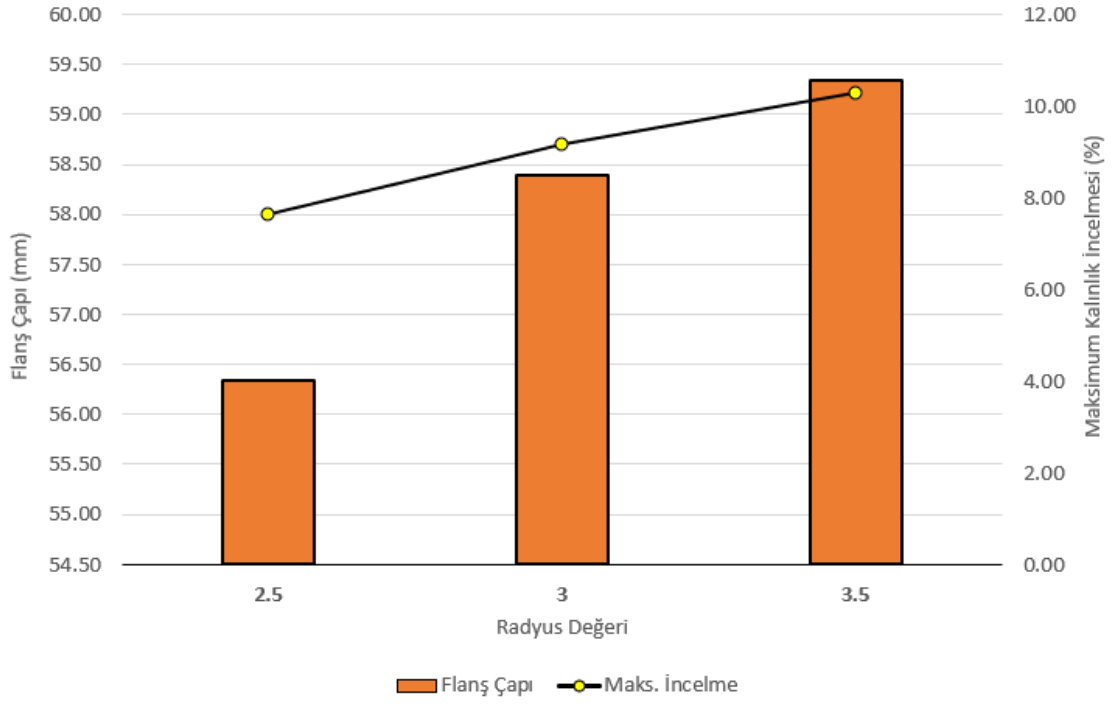
Şekil 4.26. Mevcut ikinci kademe üst kalıbın 3b taraması



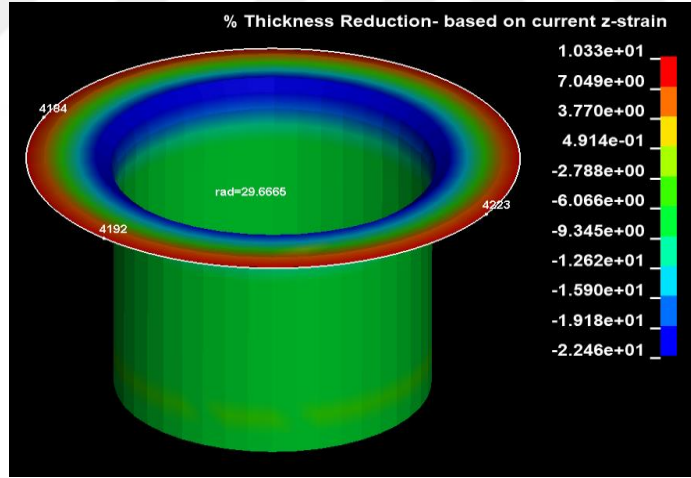
Şekil 4.27. Üst kalıpta radyus ve kalıp çıkma açısının gösterimi

Çizelge 4.2. Optimum kalıp analiz sonucu

	Üst Kalıp Parametreleri		Ölçüm Sonucu	
	Radyus	Kalıp Çıkma Açısı	Flanş Çapı	Maks. İncelme
1	2,5	1°	Ø56,04	7,50%
2	2,5	2°	Ø56,32	7,64%
3	2,5	4°	Ø56,68	7,76%
4	3	1°	Ø58,38	9,10%
5	3	2°	Ø58,41	9,26%
6	3	4°	Ø58,40	9,13%
7	3,5	1°	Ø59,34	10,18%
8	3,5	2°	Ø59,33	10,33%
9	3,5	4°	Ø59,34	10,35%



Şekil 4.28. Optimum kalıp analiz sonuç grafiği



Şekil 4.29. Optimum kalıp tasarımı analiz sonucu

4.5. Flanş Şekillendirme İşlemi Sonuçları

Flanş şekillendirme işlemlerinde mevcut üretim prosesinde yırtılmaların (Şekil 4.30) daha çok boğaz açma operasyonu adımıyla meydana geldiği üretim kayıtlarından tespit edilmiştir. Boğaz açma operasyonları sırasında yırtılmayan borulardan flanş şekillendirme sırasında da yırtılmalar meydana geldiği yine kayıtlarda bulunmaktadır.



Şekil 4.30. Boğaz açma işlemi sırasında sağlam ve yırtılan boru örnekleri

Mevcut kalıplarda 10'ar adet 49,5 mm ve 51,5 mm boy ölçülerinde boruların tek kademede şekillendirme işlemleri yapıldığında 49,5 mm boy ölçüsündeki bütün borularda Şekil 4.31'de görüldüğü gibi deformasyonlar meydana gelmiştir. 51,5 mm boy ölçüsüne sahip borularda işlemler aynı makine ve operatör ile gerçekleştirilmiş ve bu ölçü için hiçbir denemede Bölüm 4.4.2 de verilen Şekil 4.22'de görüldüğü gibi deformasyon gözlenmemiştir. Bu boy için elde edilen flanş çapı ölçüldüğünde ise ortalama flanş çapının 58,3 mm olduğu belirlenmiştir. Bu flanş ölçüsü parçanın kabul ölçüsü olan 59 mm'den küçük olduğu için mevcut ikinci kademe kalıbın tek kademede üretimde kullanılması uygun olmamıştır. Bu nedenle analizlerle optimum ölçüleri belirlenmiş olan kalıpların denemesine geçilmiştir.



Şekil 4.31. 49,5 boya sahip borunun mevcut kalıpta şekillendirilmesi

Analiz sonuçları ile belirlenen optimum kalıplar AYD Firmasının kalıphane bölümünde Şekil 4.32’de görüldüğü gibi imal edilmiştir. Sonra kalıp setlerine Şekil 4.33’te görüldüğü gibi montaj edilmiştir. Kalıp setleri ise 150 ton kapasitesindeki bir mekanik prese Şekil 4.34’te ki gibi bağlanmıştır.



Şekil 4.32. Optimum kalıp çalışması sonrası imal edilen üst kalıp



Şekil 4.33. Üst kalıbın montajı



Şekil 4.34. Kalıp setlerinin prese bağlanması

Kalıplar bağlandıktan sonra 51,5 mm boyunda 100 adet boru numunesi hazırlanmış flanş şekillendirme işlemleri yapılmıştır. Örnek olarak elde edilen bir flanşlı boru Şekil 4.35'te, şekillendirilmiş numunelerin toplu fotoğrafı da Şekil 4.36'da verilmiştir. Öncelikle 100 adet şekillendirme denemesinde hiçbir numunede hasar meydana gelmemiştir.

Parçaların uygunluğunu değerlendirmek için 3B tarama cihazında boyut ölçümleri Şekil 4.37'de görüldüğü gibi her bir numune için merkezinden geçen beş farklı kesit düzleminde yapılmıştır. Flanş çapı, maksimum flanş çapı bölgesinde malzeme kalınlığı, parçanın dış ve iç gövde çapı ile parça boyutu ölçüm sonuçları Çizelge 4.3'te verilmiştir.

Şekillendirilmiş parçada hasarların meydana geldiği maksimum flanş çapı bölgesinde kalınlık değeri %95 güvenilirlikle $1,82 \pm 0,01$ mm olarak ölçülmüş olup kalınlık incelmeleri %9,5 olarak hesaplanmıştır. Bu değer SEA'da %10,3 olarak elde edilmiş olup analizleri de doğrulamıştır.

Parçaların diğer boyutları %95 güvenilirlikle flanş çapı için $60,35 \pm 0,08$ mm, gövde dış çapı için $40,50 \pm 0,02$ mm, gövde iç çapı için $36,26 \pm 0,04$ ve parça boyu için $35,06 \pm 0,08$ mm olarak belirlenmiştir. Parça geometrisi Şekil 3.1'de verilen imalat teknik

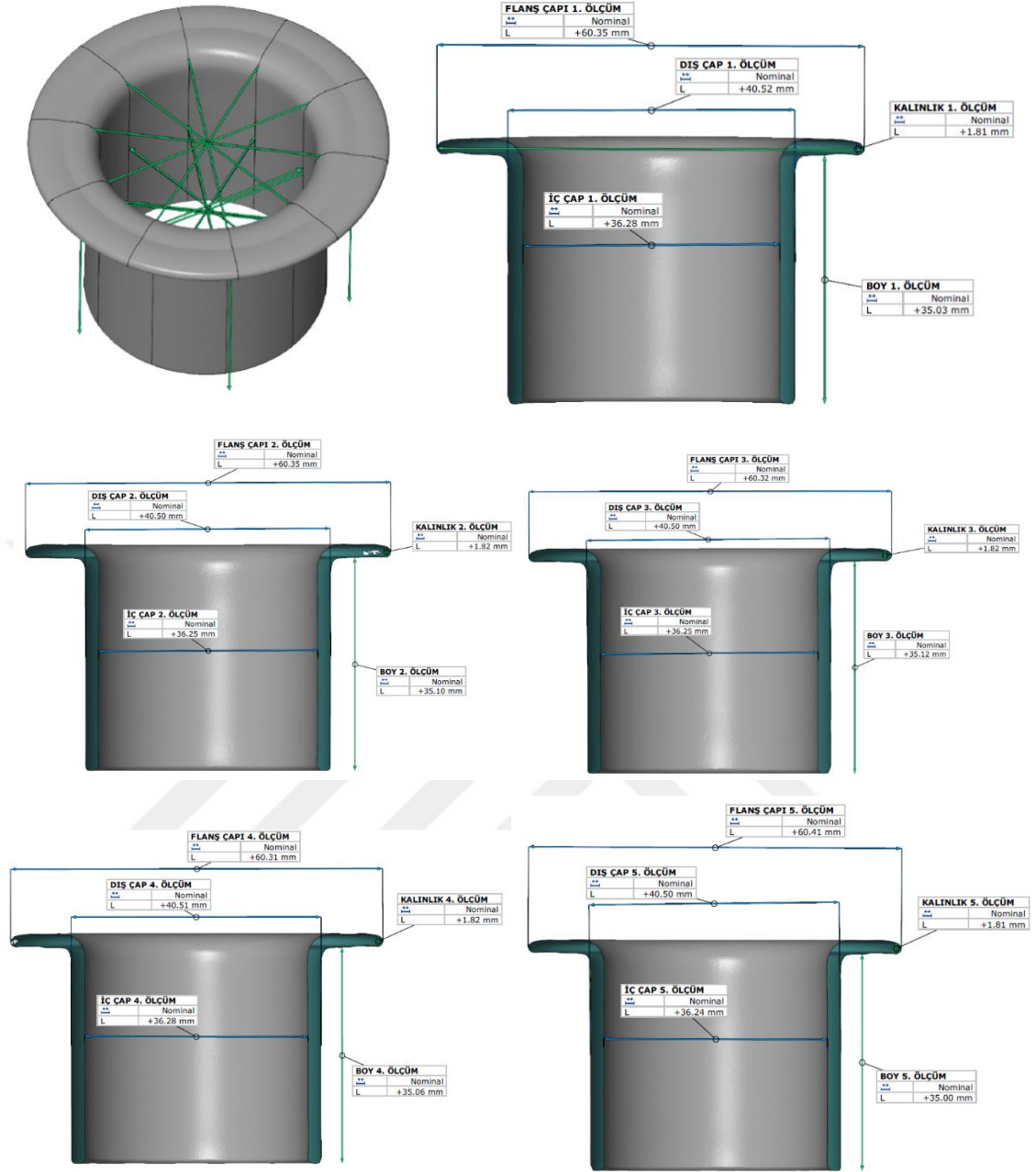
resmine göre kabul edilebilir ölçüler içerisinde olduğu görülmektedir. Flanş çapı parça için minimum ölçü olan 59 mm'nin üzerinde olduğu için daha kısa boru boylarıyla bile parçanın elde edilmesinin mümkün olduğu değerlendirilmiştir. Bu nedenle boyu daha az olan 49,5 ve 50,5 mm boyundaki borularla da deneme üretimleri yapılmıştır. Sonuçta 50,5 mm boyundaki parçada 60 mm ve 49,5 mm boyundaki boruda da 59,2 mm flanş çapı elde edilebilmiştir. Bu durumda gerekli minimum 59 mm flanş çapı 49,5 mm boyundaki boruda da bile elde edilebilmesi hammadde miktarında azalma sağladığı için üretim maliyetlerini azaltma açısından olumlu bir durumdur. Sonuç olarak hasarsız ve istenilen geometrik ölçü ve toleranslarda parçaların elde edilmesiyle tezin araç süspansiyon sistemlerinde kullanılan burçların flanş şekillendirme işleminde meydana gelen yırtılmaların engellenmesi amacına tam olarak ulaşılmıştır.



Şekil 4.35. Optimum kalıp çalışması sonucunda elde edilen flanşlı boru



Şekil 4.36. Optimize edilmiş kalıplar ile üretilmiş 100 adet deney numunesi



Şekil 4.37. Birinci numunenin 3B tarama ile ölçüm sonuçları

Çizelge 4.3. Numunelerin boyut ve kalınlık ölçümü sonuçları

		FLANŞ ÇAPI	KALINLIK	DIŞ ÇAP	İÇ ÇAP	BOY
1. NUMUNE	1. Kesit	60,35	1,81	40,52	36,28	35,03
	2. Kesit	60,35	1,82	40,50	36,25	35,10
	3. Kesit	60,32	1,82	40,50	36,25	35,12
	4. Kesit	60,31	1,82	40,51	36,28	35,06
	5. Kesit	60,41	1,81	40,50	36,24	35,00
2. NUMUNE	1. Kesit	60,32	1,82	40,50	36,28	35,01
	2. Kesit	60,31	1,82	40,49	36,26	35,04
	3. Kesit	60,34	1,81	40,51	36,28	35,06
	4. Kesit	60,35	1,82	40,50	36,28	35,00
	5. Kesit	60,36	1,81	40,51	36,24	35,09
3. NUMUNE	1. Kesit	60,27	1,82	40,50	36,29	35,05
	2. Kesit	60,39	1,82	40,49	36,23	35,01
	3. Kesit	60,31	1,83	40,52	36,26	35,07
	4. Kesit	60,31	1,81	40,49	36,21	35,07
	5. Kesit	60,37	1,81	40,50	36,26	35,02
4. NUMUNE	1. Kesit	60,32	1,81	40,50	36,27	35,08
	2. Kesit	60,32	1,83	40,50	36,24	35,08
	3. Kesit	60,34	1,82	40,51	36,28	35,12
	4. Kesit	60,37	1,81	40,50	36,25	35,12
	5. Kesit	60,31	1,82	40,51	36,26	35,09
5. NUMUNE	1. Kesit	60,38	1,82	40,49	36,27	35,06
	2. Kesit	60,42	1,82	40,51	36,26	35,08
	3. Kesit	60,33	1,80	40,49	36,24	35,12
	4. Kesit	60,43	1,82	40,50	36,25	35,06
	5. Kesit	60,34	1,83	40,50	36,24	35,00
ORTALAMA		60,35	1,82	40,50	36,26	35,06
STANDART SAPMAx2		0,08	0,01	0,02	0,04	0,08

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5,1 Sonuçlar

Flanş şekillendirme işlemleri, özellikle otomotiv sanayisinde süspansiyon sistemlerindeki burçların imalatında sıklıkla kullanılan imalat yöntemleri arasındadır, Proses, istenilen ölçülere uygun olacak şekilde imal edilmiş olan kalıplar aracılığıyla eksantrik veya hidrolik preslerde borunun çapının genişletilmesi ve ucunun düzlenmesiyle gerçekleştirilir, Flanş çapı malzemenin sünekliğine, kalıp ve proses parametrelerine bağlı olarak belirli değerleri geçtiğinde hasar meydana gelmektedir, Bu tez çalışması, AYD Otomotiv Endüstri A.Ş, kuruluşunda üretimi devam eden ve boru ucu genişletme oranı yüksek olan flanşlı borularda, fire oranının fazlalığı problemini araştırmak ve bir çözüm getirmek amacıyla yürütülmüştür, Bu kapsamda üretim kademe sayısı, sürtünme katsayısı, boru ısıtma işlem durumu ve kalıp geometrik parametrelerinin malzemenin şekillendirilmesine etkisi SEA ve deneysel çalışmalarla araştırılmış ve seçilen bir ürün için fire oranları azaltılmıştır,

Çalışmada fire oranları %20'nin üzerinde olan 40,3 mm çapında ve 2 mm et kalınlığındaki S355JR-N standartlarında dikişli çelik borudan üretilen flanş çapı $59,00^{+2,00}_{0,00}$ mm olan parça seçilmiştir, Tez çalışmasında öncelikle yırtılma probleminin nedeni metalografik incelemeler, borulara uygulanan mekanik testler ve şekillendirme işleminin sonlu elemanlar analizleri ile belirlenmiştir, Sonrasında proses parametrelerinin (sürtünme katsayısı, kademe sayısı) optimizasyonu ve daha sonra kalıp tasarımının iyileştirilmesi ile flanş şekillendirme işleminde karşılaşılan yırtılmalar engellenmiştir, Tez çalışmasından elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır,

- S355JR-N dikişli çelik borunun kaynak bölgesi ve harici bölgesinden çıkartılan numunelere uygulanan çekme deneyleri sonucunda hem kaynak bölgesi hem de harici bölge için süneklik değeri %30 çıkmıştır, Buradan kaynak bölgesinin borunun şekillenme kabiliyetini azaltmadığı sonucuna ulaşılmıştır,
- Normalize edilmiş (S355JR-N) ve edilmemiş (S355JR-C) durumdaki malzemelerin her ikisinde de perlit fazında hadde etkisinden dolayı mekanik fiberleşme meydana geldiği görülmüştür, Normaliz edilmemiş çeliğin sünekliğinin çok daha az olması ve tekrar yapılan normalizasyon işlemi ile mekanik fiberleşmenin azaltılmasına rağmen şekillenme kabiliyetinin

artmaması, mekanik fiberleşmenin malzemenin şekillendirilebilirliğine olumsuz bir etkisinin olmadığını göstermektedir,

- Ağız genişletme deney sonuçlarına göre normaliz edilmiş halde satın alınan S355JR-N malzemenin yırtılma anındaki çapı $60,8 \pm 0,1$ mm iken, tekrar normalizasyon işlemi yapılmış malzemenin yırtılma çapı $55,2 \pm 0,2$ mm olmuştur, Tekrar normalizasyon işleminin malzemenin sertliğini 150 BSD'den 110 BSD'ye düşürmesine rağmen yırtılma çapının azalması normalizasyon işlemi sırasında oluşan oksit tabakasından kaynaklanan yüzey düzgünsüzlükleri ve gerilme yığılmalarına bağlanmıştır,
- Ağız genişletme deney numunelerindeki oksit tabakası kumlama ile temizlenerek kalıp ve numune arasında PE film ile deneyler gerçekleştirildiğinde yırtılma çapı $61,5 \pm 0,1$ olarak elde edilmiştir, Böylece normalizasyon işlemiyle şekillendirilebilirlikte az da olsa bir artış meydana gelmiştir,
- Flanş şekillendirme işleminin SEA'ları ile borudaki kalınlık incelmesi ve flanş çapı %90'dan fazla oranla doğru tahmin edilmiştir,
- Farklı sürtünme katsayısı ile yapılan iki kademeli şekillendirme işlemi analizlerinde her iki kademede de sürtünme katsayısının etkisinin olmadığı sonucuna ulaşılmıştır,
- AYD Otomotiv Endüstri A.Ş., kuruluşunda uygulanan boğaz açma ve flanş şekillendirme olarak iki kademede uygulanan şekillendirme işleminde maksimum incelme değerinin mevcutta kullanılan kalıplar ile %16,1 değerinde olduğu SEA ile bulunmuştur, Tek kademe şekillendirme ile incelme %9,5 değerine azaltılabilmektedir, Böylece borunun yırtılma riski önemli ölçüde azaltılmıştır,
- Tek kademede şekillendirme işlemi için kalıp geometrisi optimizasyonu için yapılan SEA sonuçlarına göre parçanın flanş çapı ve maksimum incelme değeri üzerine en etkili parametre üst kalıp radyüsü çıkarken, kalıp çıkma açısının etkisinin olmadığı bulunmuştur, Kalıp radyüsü arttıkça flanş çapının arttığı bulunmuştur, Uygun flanş çapı açısından en uygun üst kalıp radyüsü 3,5 mm olarak elde edilmiştir,
- Optimize edilmiş kalıplarla tek kademe şekillendirmeye 100'den fazla parçanın deneme üretimi yapılmıştır, Parçaların hiçbirinde yırtılma hasarı ile

karşılaşılmamış ve parçalar hedeflenen geometride ve ölçü toleransları içerisinde elde edilmiştir, Böylece tezin araç süspansiyon sistemlerinde kullanılan burçların flanş şekillendirme işleminde meydana gelen yırtılmaların engellenmesi amacına tam olarak ulaşılmıştır,

5,2 Öneriler

Flanş şekillendirme ile ilgili ileride yapılabilecek çalışmalara ışık tutması açısından konuyla ilgili öneriler aşağıda sıralanmıştır:

- Flanş şekillendirme işleminden önce boru iş parçalarının kenarlarına açılan pahların şekillendirmeye etkisi incelenebilir, Bu incelemenin SEA'lar ile yapılabilmesi için borunun kabuk elemanlar yerine katı elemanlarla modellenmesi gerekecektir,
- Tez çalışmasında flanş şekillendirmede daha etkili olan üst kalıp geometrisi incelenmiştir, Flanşın düzlemselliğine etkisi açısından alt kalıp geometrisinin de etkisinin incelenmesi önerilir,
- Atmosfer kontrollü fırınlarda yapılacak normalizasyon işleminin şekillenmeye etkisi incelenmesi önerilir,
- Sıcak flanş şekillendirme prosesi araştırılabilir,

KAYNAKLAR

- Callister, W,D,, Rethwisch, D,D,, 2013, Materilas science and engineering, *Wiley*,
- Cao, QL,, Lai, ZP,, Xiong, Q,, Chen, Q,, Ding, TH,, Han, XT,, Li, L,, 2017, Electromagnetic attractive forming of sheet metals by means of adual-frequency discharge current: design and implementation, *Int JAdv Manuf Technol*, 90 (1–4), 309–316,
- Chang, T,P,, Huang, S,C,, Huang, T,F,, Dao, T,P,, 2013, Analysis of cold preforming process for hollow fasteners with thin flange, *Applied Mechanics and Materials*, 418, 246-249,
- Guan, Y,, Li, C,, Guo, S,, Lin, P,, 2022, A novel combined process of flaring-upsetting for forming end flanges on thin-walled tubes, *Journal of Materials Processing Technology*, 84, 927-936,
- HeiBing, B,, Ersoy, M,, 2011, Chassis Handbook, *Vieweg Teubner Verlag*, Berlin, 435-436,
- <https://aydtr.com> [Ziyaret Tarihi: 12 Şubat 2023]
- <https://docplayer.biz.tr> [Ziyaret Tarihi: 20 Mart 2023]
- <https://www.steelconstruction.info> [Ziyaret Tarihi: 12 Kasım 2023]
- Hu, X,, Wang, Z,R,, 2004, Numerical simulation and experimental study on the multi-step upsetting of a thick and wide flange on the end of a pipe, *Journal of Materials Processing Technology*, 151, 321-327,
- İpekoğlu, G,, Küçükömeroğlu, T,, Aktarer, S,M,, Sekban, D,M,, Çam, G,, 2018, Sürtünme karıştırma kaynağıyla birleştirilen st37/st52 levhaların mikroyapı karakterizasyonu ve mekanik özellikleri, *Dokuz eylül üniversitesi mühendislik fakültesi fen ve mühendislik dergisi*, 20(59), 471-480,
- Reimpell, J,, Stoll, H,D,, Betzler, J,W,, 2001, The Automotive Chassis: Engineering Principles, *Vogel-Buchverlag, Arnold, Butterworth-Heinemann, Würzburg*, 76-207

- Slot, H., Nicoreac, M., Maljaars, J., 2020, Influence of material anisotropy on fatigue crack growth in C–Mn steels of existing structures, *Fatigue Fracture of Engineering Materials Structures*, 43, 2527-2541,
- Uthaisangsuk, V., Prahl U., Bleck W., 2007, Stress based failure criterion for formability characterization of metastable steels, *Computational Materials Science*, 39, 43–48,
- Wang, Z., & Lu, J., Wang, Z., 2001, Numerical and experimental research of the cold upsetting–extruding of tube flanges, *Journal of Materials Processing Technology*, 110, 28-35,
- Winiarski, G., Gontarz, A., Samolyk, G., 2020, Theoretical and experimental analysis of a new process for forming flanges on hollow parts, *Materials* , 13, 4088,
- Xiong, Q., Huang, H., Xia, L., Tang, H., Qiu, L., 2019, A research based on advance dual-coil electromagnetic forming method on flanging of small-size tubes, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 102, 4087-4094,
- Xiong, Q., Li, Z., Tang, J., Zhou, H., Yang, M., Song, X., 2021, A flexible and economical method for electromagnetic flanging of tubes with field shapers, *Int J Adv Manuf Technol* 116, 1169–1177,