SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE BORU BÜKME ANALİZLERİ VE GERİ YAYLANMA MİKTARI ÖNGÖRÜSÜ

Sercan KIZILAY

T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE BORU BÜKME ANALİZLERİ VE GERİ YAYLANMA MİKTARI ÖNGÖRÜSÜ

Sercan KIZILAY
0000-0001-5692-4673

Prof. Dr. Abdil KUŞ
(Danışman)
0000-0002-4626-0719

YÜKSEK LİSANS TEZİ
OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2022
Her Hakkı Saklıdır

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE BORU BÜKME ANALİZLERİ VE GERİ YAYLANMA MİKTARI ÖNGÖRÜSÜ

Sercan KIZILAY

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Abdil KUŞ

Bu çalışmada, otomotiv sektöründe kullanılan boru profillerin boru bükme makinelerinde döner çekme yöntemi ile farklı çap ve et kalınlıklarında çelik malzemelerden boruların bükümü esnasında büküm parametlerinin geri esnemeye etkileri incelenmektedir. Boru bükme prosesi, uzay-havacılık ve otomotiv sektörlerinde oldukça kompleks şase kısımlarının tek parçada üretilebilmesini sağlayarak komponentin ağırlığını ve üretim maliyetini düşürmesi nedeniyle tercih edilmektedir. Boru bükme prosesinde Döner-Çekme (Rotary Draw), Makaralı-İtme (Push Rolling), Sıkıştırmayla (Compression) ve Pres Kütüğü (Ram) ile boru bükme yöntemleri kullanılır. Bükülen boruların kullanıldığı bu gibi yerlerde hassas büküm açısı ve uygun kesit alanı önem arz etmektedir. Boru bükme proseslerinde en sık karşılaşılan problem kesit alanı bozulmasıdır.
Büküm açısını etkileyen bir diğer önemli faktör de geri esneme miktarıdır. Makaralı itme ile bükümde kalıp çapından çok daha büyük radyüslü büküm işlemleri yapıldığı için geri esneme bükülen borunun malzemesi ve kesitine bağlı olarak daha yüksek ölçeklerde görülebilmektedir. Açık ve kapalı kesit alanına sahip profillerin geri yaylanma davranışları kesit alanlarının şekline, kesit alanı ölçülerine, bükme yarıçapına ve bükme açısına göre değişkenlikler gösterir. Bu çalışmada ayrıca boru kesit alanındaki bozukluklar incelenmektedir. Çünkü bükülen borunun iç yüzeyinde (borunun kalıba değdiği yüzey) kalınlaşma görülürken, borunun dış yüzeyinde ise incelmelere rastlanmaktadır. Son olarak, boru bükmede karşılaşılan problemlerin oluşmaması için neler yapılması gerektiği açıklanmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Dinamik sonlu elemanlar analizi, boru bükme, Ls-Dyna, geri esneme, makaralı itme,
2022, xii + 50 sayfa.

ABSTRACT

MSc Thesis

TUBE BENDING ANALYSIS BY FINITE ELEMENT METHOD AND PREDICTION OF SPRINGBACK ANGLE

Sercan KIZILAY

Bursa Uludag University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Automotive Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Abdil KUŞ

In this research, an investigation of bending parameters of tubular profiles bent by tube bending machines during bending through Push Rolling method shall be conducted for those used in automotive industry. Tube bending process offers production of chassis parts with highly complicated geometries as single components so that it can reduce weight and manufacturing cost of the components hence it has been preferred in fields of aerespace and automotive. Precise degree of bending and proper cross-section area is of paramount importance in such fields where bent tubes are used. Cross-section distortion is the most widely confronted problem in tube bending process. In tube bending process, Rotary Draw, Push Rolling, Compression and Ram methods are utilized.

Another significant factor affecting the degree of bending is the springback. Since bending radius is much larger in comparison to the die radius in the rotary draw bending, the springback occurs large scales depending on the cross-section and the material of the tube material. Springback behaviour of profiles with open and closed cross-section can be various depending on the dimensions and forms of the cross-section area, bending radii, and degree of bend. The distortions at the cross-section area of pipes are investigated. Because while thickening of the inner surface of a bending tube (the surface in vicinity of die) is observed, thinning on the extrados of the tube can be confronted. To sum up, what can be done to prevent such issues in tube bending shall be explained.

Key words: explicit dynamics finite element analysis, pipe bending, Ls-Dyna, springback, push rolling

2022, xii + 50 pages.

ÖNSÖZ ve/veya TEŞEKKÜR

Çalışmalarımda her konuda yardımcı olan danışman hocam Sayın Prof. Dr.
Abdil KUŞ'a teşekkürlerimi sunarım. Bana her konuda destek veren aileme teşekkürlerimi sunarım. Analiz konusunda yardımını esirgemeyen NETFORM Mühendislik Makine Metal firması yetkilisi Mert AYGEN'e teşekkür ederim.

Sercan KIZILAY
02/09/2022

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET…… vi
ÖNSÖZ ve/veya TEŞEKKÜR viii
İÇİNDEKİLER ix
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ x
ŞEKİLLER DİZİNİ....xi
ÇİZELGELER DİZİNİ xii
1 GİRİŞ……. 1
2 KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI 2
2.1 Döner çekmeli bükme (Rotary-Draw Bending RDB), ...6
2.2 Üç Silindirli İtmeli Bükme (Three Roll Push Bending, TRPB), ...7
2.3 Geri Esneme 9
2.4 CNC Büküm Prosesi 11
3 MATERYAL ve YÖNTEM 12
3.1 Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Dinamik Analiz 12
3.2 Deneysel Analiz 16
3.3 Şekillendirme Limit Diyagramları 18
3.4 Geri Esneme 19
4 BULGULAR 21
4.1 Teorik Model ile Hesaplama 21
4.2 Deneysel Bulgular 24
4.3 30°- 45° - 60° -75° -90° Açılarda Bükümlerin Analizi 25
4.4 Deneysel 30° - 45° - 60° - 75° - 90° Açılardaki Büküm İşlemi Bulguları 33
4.5 Deneysel 30°- 45° - 60° - 75°- 90° Açılardaki Et Kalınlıkları Bulguları 36
5 TARTIŞMA VE SONUÇ 45
KAYNAKLAR 47
ÖZGEÇMİŞ…… 50

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	**Açıklama**
OD	Çap
t	Kalınlık
D/t	Çap Kalınlık Oranı
g/cm^3	Özgül Yoğunluk
MPa	Elastisite modülü

Kısaltmalar	**Açıklama**
RDB	Döner Çekmeli Bükme (Rotary-Draw Bending)
TRPB	Üç Silindirli İtmeli Bükme (Three Roll Push Bending,)
Rm	Ortalama Bükme Yarıçapı
CLR	Merkez Hattı Yarıçapı (Central Line Radius)
IDX	Index Tablosu
OD	Çap
t	Kalınlık
TRPB	Üç Silindirli İtmeli Bükme
FE	Sonlu Elemanlar
SEY	Sonlu Elemanlar Yöntemi
FLD	Şekillendirme Limit Diyagramları

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 1.1.	Boru bükme makinası komple görünüş (Akyapak, 2022)……..	1
Şekil 1.2.	Boru bükme makinasında büküm topları ve kalıpları (Akyapak, 2022)…….	2
Şekil 2.1.	Döner çekme boru bükme……..	6
Şekil 2.2.	CNC boru bükme makinesi komple görünüş (Akyapak, 2022).	11
Şekil 3.1.	3B Döner çekme boru bükme sonlu elemanlar modeli……..	12
Şekil 3.2.	DP600 kalite çeliğin mühendislik gerilme-gerinme grafiği…….	13
Şekil 3.3.	Borunun 90° büküm simülasyon modeli……	14
Şekil 3.4.	Borunun 90° bükümü esnasındaki bölgesel deformasyon tanımlamaları …….	15
Şekil 3.5.	DYNAFORM boru bükme parametrik 3B modelleme arayüzü.	16
Şekil 3.6.	EN-ISO 6892-1 standardına göre çekme-kopma testi numunesi…….	16
Şekil 3.7.	Farklı gerinim oranlarında DP600 malzemesinin gerilme-gerinim grafiği……	17
Şekil 3.8.	Şekillendirme limit diyagramı (Uijl & Carless, 2012)……...	18
Şekil 4.1.	Mandrelsiz modelde DP600 kalite 50mm çaplı 1mm kalınlıkta çelik borunun 90° büküm simülasyonu deformasyon sonuç grafiği……..	21
Şekil 4.2.	Geri yaylanmanın hesaplanması ……	22
Şekil 4.3.	Mandrel kullanılan modelde DP600 kalite 50mm çaplı 1mm kalınlıkta çelik borunun 90° büküm simülasyonu deformasyon sonuç grafiği……...	23
Şekil 4.4.	Bükülen borunun çap kalınlık oranına göre geri esneme açısındaki değişim miktarı…….	24
Şekil 4.5.	Deneylerde kullanılan boru numune …….	24
Şekil 4.6.	90 Derece büküm sonuçları ……...	25
Şekil 4.7.	Büküm yapılan parça teknik resim ölçüleri 3D modeli …….	25
Şekil 4.8.	Büküm yapılan parça CATIA V5 programında 3D modeli…...	26
Şekil 4.9.	Büküm yapılan parça gerçek görünümü…….	26
Şekil 4.10.	Dynaform kırışıklık büküm görselleri 30° – 45° - 60° - 75° - 90°……...	27
Şekil 4.11.	Dynaform kalınlık büküm görselleri 30° – 45° - 60° - 75° - 90°……...	30
Şekil 4.12.	Gerçek büküm görselleri 30° – 45° - 60° - 75° - 90°...……..	33
Şekil 4.13.	Malzeme et kalınlığı ……..	36
Şekil 4.14.	Gerçek et kalınlığı büküm ölçüleri 30° – 45° - 60° - 75° - 90°..	37
Şekil 4.15.	30° – 45° - 60° - 75° - 90° bükümlerde oluşan kırışıklığın gerçek ve analiz sonuçlarının karşılaştırılması……...	40
Şekil 4.16	30° – 45° - 60° - 75° - 90° bükümlerde oluşan incelemenin gerçek ve analiz sonuçlarının karşılaştırılması……...	42

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 1.1. DP600 kalite çelik boru malzemesi elastik özellikleri..... 13
Çizelge 4.1. Bükülen boru çapı ve kalınlığa göre geri esneme açısındaki değişim……... 23

1 GİRİŞ

Bükme işlemi, çoğu endüstriyel alanda önemli bir şekillendirme işlemidir. Geri esneme ve kesit distorsiyonu, bükme işleminde yaygın olarak karşılaşılan problemlerdir. Kapalı ve açık kesitli kirişlerin geri esneme davranışı, kesit tipi, kesit boyutları, bükülme yarıçapı ve eğilme açısı gibi farklı parametrelerle değişmektedir. Boru gibi kapalı kesitler için en büyük problem kesit distorsiyonudur. İç kısımda (borunun iç yüzeyi kalıpla temas halindeyken) tüpün kalınlığı artarken, ekstradosta (borunun dış yüzeyi) tüpün kalınlığı azalır. Ayrıca, borular için başka bir enine kesit distorsiyonu tipi, bazı imalat işlemlerinde istenmeyen ekstradoslarda düzleşmedir.



Şekil 1.1. Boru bükme makinası komple görünüş (Akyapak, 2022)

Boru bükme makinası Şekil 1.1'de gösterilmiştir. Boru bükme makinesi boruları hidrolik olarak yüksek kalitede bükmektedir. Bu güçlü makineler, gelişmiş CNC özelliği ile Şekil 1.2'de gösterilen büküm topları ve kalıplarının konumları otomatik ayarlanarak büküm işlemini ardışık ve otomatik olarak gerçekleştirerek kolaylık sağlar, zaman kaybını önler ve verimliliği artırır.



Şekil 1.2. Boru bükme makinasında büküm topları ve kalıpları (Akyapak, 2022)

2 KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI

Silindir toplarla bükme, levhaların, levhaların, profillerin, boruların ve hatta haddelenmiş şekillerin ve ekstrüzyonların, şekillendirme ruloları kullanılarak istenen bir eğriliğe büküldüğü sürekli bir şekillendirme işlemidir (Quan et al., 2012). Kurulum süresini kısaltmak ve malzemeden tasarruf sağlamak, takım yatırım ve ekipman maliyetini düşürmek ve yüksek nihai şekil kalitesi elde etmek gibi avantajlarıyla yıllar içinde merdane bükme işlemi metal işlemede kullanılan temel işlemlerden biri olmuştur. Ayrıca, bu süreç, bir rüzgar türbin çarkında tepenin kalın konik şekli gibi büyük, kalın parçaların üretilmesi için endüstriler tarafından ciddi şekilde dikkate alınmaya başlayan bir üretim yöntemidir.

İnce duvarlı kiriş bükme işlemleri, havacılık ve otomobil endüstrilerinde, yeterli mukavemete sahip çok daha hafif ürünler tedarik etmeleri için yaygın olarak benimsenmiştir. Bükme, kaynak gibi geleneksel üretim süreçlerine kıyasla bazı avantajlara sahiptir. Bileşenin ağırlığını azaltabilir ve daha az parça nedeniyle takım maliyetini azaltabilir (Zhan vd., 2002).

Kiriş bükme uygulamaları, basit ev eşyalarından araç şasisi gibi karmaşık endüstriyel parçalara kadar çeşitlilik gösterir. Kiriş bükme işlemlerinde hem açık hem de kapalı kesitler istenilen yarıçapta bükülebilmektedir. En yaygın olarak kullanılan kapalı kesitli kiriş tiplerinden biri borudur ve boruların kullanıldığı her yerde, genellikle doğru bükme açısı ve uygun kesit istenir. Boru bükme işlemlerinde, yaygın olarak karşılaşılan sorun, borunun bükülmüş bölgedeki enine kesit bozulmasıdır. Tüp hidroforming, kapalı bölümlere istenilen şekilleri vermek için yeni bir teknoloji olarak tanımlanmıştır. Çoğu durumda, hidroformingin ilk adımı, borunun gerekli bir şekle bükülmesidir. Borunun kalıp boşluğuna yerleştirilmesini sağlamak için boru, son parçanın yaklaşık merkez hattına kadar bükülür (Lou & Stelson, 2001).

Penekli, (2008) Sonlu elemanlar yöntemini kullanarak yaygın olarak kullanılan T-Şekilli, U-Şekilli ve boru şeklindeki alüminyum kirişlerin farklı durumlar için geri esneme davranışını araştırmaya odaklanmaktadır. Bir kiriş için bir dizi analiz yapılır ve analizlerde değişen parametreler bükülme yarıçapı ve kalınlığıdır. Ayrıca, borular için düzleştirmede enine kesit bozulmasını gidermek için farklı iç basınçlar kullanılmış ve iç basıncın etkileri araştırılmıştır. Uygun iç basınç uygulanarak düzleşme distorsiyonu büyük ölçüde ortadan kaldırılır.

Li, Haizhang, Ph.D., University of Minnesota, (1993), Malafalı boru bükme işleminin sonlu elemanlar yöntemi ile geri yaylanma analizleri yapmışlardır.

Da-xin E ve arkadaşları, (2009), Boru bükmelerde geri esneme deformasyonu alanında çalışmalar yapmışlardır. Bükülen bir metal borunun geri esnemesi, kapsamlı deneyler ve sonlu elemanlar yöntemi (FEM) analizi yoluyla incelenmiştir. Geri yaylı bükülme açısı için yaklaşık bir denklem çıkarılmıştır. Malzemenin (boru şeklinde) mekanik

özelliklerinin, standart çekme testlerinde (malzemeler çubuk şeklinde olduğunda) bulunanlardan oldukça farklı olduğu belirtilmektedir. Bu, deneysel çalışma, FEM hesaplamaları ve geri esneme analizi sonuçlarında tutarsızlıklara neden olan başlıca nedenlerden biridir. Bu nedenle, malzemelerin mekanik özelliklerini boru şeklindeki formlarında incelenmesi önemlidir. Deneyler ve FEM simülasyonları, geri esneme açısının malzemelerin mekanik özelliklerinden önemli ölçüde etkilendiğini kanıtlamaktadır. Açı, plastik modül ile orantılı olarak azalır, ancak sertleşme indeksi ve elastik modül ile ters orantılı olarak değişir. Geri yaylanma açısı ayrıca boru deformasyon koşullarından da etkilenir: bağıl bükülme yarıçapı ile orantılı olarak artar, ancak bağıl duvar kalınlığı ile ters orantılı olarak değişir. Ek olarak, geri yaylanma açısı, bükme açısı ile doğrusal olmayan bir şekilde artar.

Man Yeong Ha, Jong Rae Cho, Pusan National University (2012) Geri yaylanmayı öngörmek için Inconel 625 İnce Boru Bükme için Teorik ve FE Analizi hakkında çalışma yapmıştır. Çalışmalarında, bükme işlemi sırasında bir Inconel 625 ince borunun geri esneme miktarını tahmin etmişlerdir. Boru bükme sırasında, geri esneme, boşaltmadan sonraki elastik deformasyondan kaynaklanmaktadır. Bunun, bükülmüş borunun hassas şekillendirilmesi üzerinde önemli bir etkisi vardır. Geri yaylanma, malzeme özelliklerine (dayanım katsayısı, iş sertleştirme üssü ve akma mukavemeti gibi), bükülme yarıçapına ve D/t'nin geometrik oranına bağlıdır. Inconel 625 alaşımları, diğer metallere göre yüksek mukavemete ve yüksek iş sertliğine sahiptir.

Lale Kestek, İstanbul Teknik Üniversitesi (2008), Sonlu elemanlar yöntemi ile boru bükme benzetimi alanında çalışma ortaya koymuştur.

Emir Sandıkçı, Trakya Üniversitesi (2012), Boru bükümünde karşılaşılan problemlere çözüm yaklaşımı getirmiştir. Boru bükümünü etkileyen 30 faktör tespit etmiştir. Bu faktörleri bükme yöntemleriyle iç içe alarak göstermiştir.

Shiuan-Guang Shr, B.S., The Ohio State University (1998), Çalışmada, farklı bükme prosesi türlerinin genel tartışmasını ve farklı tasarım parametrelerinin etkilerini içeren boru bükme prosesinin genel bir arka plan teknolojisi gözden geçirilmiştir.

Araştırmacılar ve yazarlar tarafından geliştirilen, geri esneme, toplam eğilme momenti ve kalınlık, normal gerilme ve normal gerinim dağılımları ve üzerindeki artık gerilmenin tahminini ve hesaplanmasını içeren analitik hesaplama modelleri özetlenmiştir. 3 boyutlu sonlu elemanlar programı kullanılarak gerçekleştirilen boru bükme işleminin simülasyonları, analitik hesaplamalar ve deneysel ölçümler ile karşılaştırılmıştır.

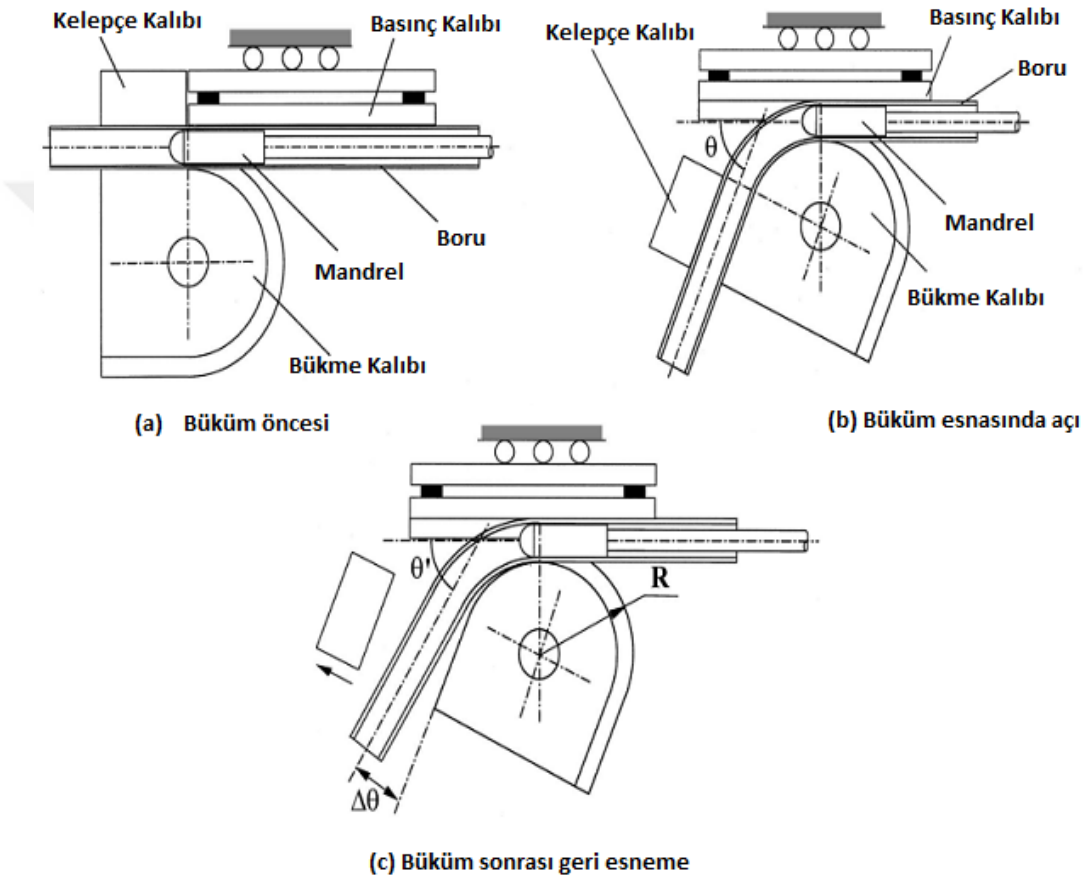
Y.X. Zhu ve arkadaşları, State Key Laboratory of Solidification Processing, School of Materials Science and Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China (2012), Çalışmada H96 borunun döner çekme bükülmesi için geri esneme tahmini yapılmıştır. İnce duvarlı döner çekmeli bükme için, geri esnemeden sonra kesit sarkması, geri esneme yarıçapı ve geri esneme açıları gibi geri esneme tahmininin doğruluğu araştırılmıştır.

Jianjun WU, Zengkun ZHANG, School of Mechanical Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China (2020) çalışmada 3D boruların esnek bükme işlemiyle ilgili geri yaylanma için geliştirilmiş bir prosedür tanımlanmıştır. 3D boruların geri yaylanma kontrolü için yeni ve kapsamlı bir strateji önerilmiştir. Strateji istenen şekli ve imalat şeklini tanımlama, yazıda sunulan iki takım tasarım yöntemini (örneğin DA (yer değiştirme ayarı) yöntemi ve B&T (bükme ve bükme) kullanarak imalat şeklini optimize etme ve elde etmek için üretim şeklinin ayrıklaştırılmasını yapmak olmak üzere üç aşamada açıklanmaktadır.

Andrea Ghiotti ve arkadaşları, University of Padua, Department of Industrial Engineering, via Venezia 1, 35131, Padova, Italy (2017), içi boş boruların üç silindirli itme bükme işleminde geri yaylanma ölçümü çalışmaları yapılmıştır. Çalışmada işlem sırasında bükülmüş geometrinin doğru gerçek zamanlı ölçümüne izin veren atalet ölçüm tekniklerine dayalı yeni bir hat içi yaklaşım sunmaktadır. Doğrulama deneyleri ve ayrıca ölçüm doğruluğunun değerlendirilmesi sunulmaktadır.

Bükme işlemindeki adımlar Şekil 2.1.'de gösterilmiştir. İşlemin başlangıcında, kelepçe kalıbı boruyu bükücünün ön ucundaki bükme kalıbına sıkıca kelepçeler Şekil 2.1(a).

Boru döner bükme kalıbının etrafından çekilirken, basınç kalıbı boru ile birlikte hareket eder ve boruyu radyal hareketten korurken, mandrel borunun çökmesini önlemek için borunun içini destekler Şekil 2.1(b), Şekil 2.1(c), geri yaylanmadan sonraki gerçek bükülme açısını göstermektedir. Tasarlanmış büküm açıları, bükümler arasındaki mesafeler ve büküm düzlemleri ile bir borunun art arda bükülmesi, ilerletilmesi ve döndürülmesi ile üç boyutlu bir kavisli tüp oluşturulur.



Şekil 2.1. Döner çekme boru bükme

2.1 Döner çekmeli bükme (Rotary-Draw Bending RDB),

Alternatif olarak Ortalama Bükme Yarıçapı (Rm) olarak gösterilen sabit bir merkez hattı yarıçapına (central line radius, CLR) sahip alet veya "kalıp setleri" kullanarak büktüğü için hassas bir teknolojidir (Yavuz, 2011). Döner çekmeli bükücüler, çeşitli büküm dereceleriyle birden fazla büküm işini depolamak için programlanabilir. Çoğu zaman, bükücüye bir konumlandırma indeks tablosu (IDX) eklenir ve operatörün birden

fazla büküme ve farklı düzlemlere sahip olabilen karmaşık bükümleri yeniden oluşturmasını sağlar.

Döner çekmeli bükücüler, tırabzanlar, çerçeveler, motorlu taşıt rulo kafesleri, kulplar, hatlar ve çok daha fazlası gibi uygulamalar için boru, boru ve katı malzemelerin bükülmesinde kullanılan en popüler makinelerdir. Döner çekmeli bükücüler, doğru takım uygulama ile eşleştirildiğinde estetik açıdan hoş bükümler oluşturur. CNC döner çekme bükme makineleri çok karmaşık olabilir ve yüksek kalite gereksinimleri olan ciddi bükümler üretmek için karmaşık takımlar kullanabilir. Komple takım, yalnızca nispeten büyük OD/t (çap/kalınlık) oranı ve ortalama bükülme yarıçapı Rm ve OD arasında nispeten küçük bir orana sahip bükülmesi zor boruların yüksek hassasiyette bükülmesi için gereklidir (Sözen, 2011).

2.2 Üç Silindirli İtmeli Bükme (Three Roll Push Bending, TRPB),

Birkaç düzlem bükme eğrisinden oluşan bükme geometrilerini üretmek için en yaygın olarak kullanılan serbest biçimli bükme işlemidir. Bununla birlikte, bir 3D şekillendirme mümkündür. Profil, takımlar boyunca itilirken bükme silindiri ve destek silindiri/ruloları arasında yönlendirilir. Şekillendirme silindirinin konumu, bükülme yarıçapını tanımlar. Bükme noktası, boru ile bükme silindiri arasındaki teğet noktadır. Bükme düzlemini değiştirmek için, itici boruyu uzunlamasına ekseni etrafında döndürür. Genel olarak, bir TRPB alet takımı, geleneksel bir döner çekme bükme makinesine uygulanabilir. İşlem çok esnektir, çünkü işlemin geometrik hassasiyeti döner çekmeli bükme ile karşılaştırılamaz olsa da, benzersiz bir takım seti ile birkaç bükme yarıçapı değeri Rm elde edilebilir (Penekli, 2008).

Borunun serbest ucunda veya basınç kalıbında eksenel takviye kullanımı, aşırı incelmeyi ve tüpün ekstradosunun çökmesini önlemek için faydalıdır. Mandrel, bilyalı veya küresel halkasız, çoğunlukla kırışıklıkları ve ovalleşmeyi önlemek için kullanılır. Nispeten kolay bükme işlemleri için (yani, zorluk faktörü BF azaldıkça), takım, eksenel destek, mandrel ve sıyırma kalıbı (çoğunlukla kırışmayı önleyen) ihtiyacını ortadan kaldırarak kademeli olarak basitleştirilebilir. Ayrıca, bazı özel durumlarda, ürünlerin özel gereksinimlerini karşılamak için standart takımların değiştirilmesi gerekir.

Bu tez çalışmasında teknikte Makaralı İtme (Push Rolling) olarak adlandırılan büküm yöntemi için bükümü yapılıp parçanın istenilen büküm açısı miktarına göre ayarlanmasına yönelik hesaplamalar ve iyileştirmeler yapılmıştır.

Makaralı-itme boru bükme yönteminin bükme grubunda bulunan temel elemanlar aşağıdaki gibidir;

1- Kalıp Makarası:
2- Kılavuz makara:
3- Destek makaraları:

Push Rolling bükümde büküm açısını etkileyen en önemli faktör bu üç unsurun (kalıp makarası, kılavuz makara, destek makaraları) birbirlerine göre konumlarının ayarlanmasıdır. Boru bükme makinesinde bükülecek profile temas eden 3 noktaya göre büküm açısı hesabı yapılmıştır. Kalıp makarası birinci nokta, destek makaraları ikinci nokta ve kılavuz makara da üçüncü nokta olacaktır. Borunun büküm açısına göre kılavuz makaranın yani üçüncü noktanın konumunun belirlenmesi sağlanmıştır. Burada ki işlem bükme açısının analitik olarak hesaplanmasıdır.

Bükme açısı kalıp makarasının çapından bağımsız şekilde oluştuğundan, kılavuz makaranın konumuna göre bükme açısı değerinin hesaplanabileceği analitik bir bağıntıya ihtiyaç duyulmaktadır. Elde edilen bağıntı, kılavuz makaranın konumu dışında diğer makaraların çap değerleri ile de ilişkilidir. Üç nokta hesabının yanında üç nokta için tanımlanacak üçgen üzerinde kosinüs teoremi de uygulanabilecektir. Boru bükme operasyonlarında bükme açısının analitik olarak belirlenen değeri, sonlu elemanlar yönteminden yararlanılarak tespit edilmeye çalışılmıştır.

Push Rolling bükümde kalıp çapından çok daha büyük radyüslü büküm işlemleri yapıldığı için geri esneme yaşanmaktadır. Geri esneme için en önemli paratmetreler aşağıdaki gibidir.

1-Malzeme yapısı
2-Malzeme boru çapı, et kalınlığı
3-İstenilen radyüs miktarı

4-Sıvama büküm işlemi devamında push rolling büküm yapılması

5-Rolling büküm işlemi devamında kalıp sıvama bükümü yapılması

Geri yaylanma miktarını öğrenebilmek için matematiksel model oluşturulmuştur. Matematiksel modellerden elde edilen geri yaylanma sonuçları deneysel verilerle karşılaştırılmıştır. Boru bükme makinesinde büküm işlemi yapıldıktan sonra 3 boyutlu ölçüm cihazı ile bükülmüş borunun hem analiz sonuçları ile hem de istenilen değerler ile karşılaştırılması yapılmıştır.

Kalıp makarası, kılavuz makara ve destek makaralarının çap ve konumlarına göre büküm işleminde istenmeyen düzlüklerin yaşanması problemi vardır. Büküm işleminde parçanın kalıp makarası ile destek makarası arasında kalan miktarı düz kalmaktadır. Özellikle bir boruda kalıp etrafına sıvama büküm sonrası push rolling büküm işlemi yapılması durumunda veya push rolling büküm sonrası sıvama büküm yapılması esnasında kalıp makarası ile destek makarası arasında istenmeyen düzlükler yaşanmaktadır. Bu düzlüklerin minimum seviyede olması için matematiksel model üzerinden optimum tasarım gerçekleştirilmiştir.

2.3 Geri Esneme

Bu süreç için temel ilke ve işleyişin açıklaması (Black & Kohser, 2020) de bulunabilir. Geri esnemeyi, uygulanan kuvvetleri ve gerekli olan temel gücü hesaplamak için matematiksel modeller verir. (Li et al., 2020; Yang & Shima, 1988), merdane bükme işleminin çeşitli periyotları sırasında deformasyonu tahmin etmek için bir simülasyon modeli oluşturmuştur. Hua ve diğerleri (1991, 1995); Hua & Lin, 1999a, 1999b) dört silindirli bükme işlemini incelemek ve bükme mekanizmasını anlamak için önemli miktarda çalışma yapmışlardır. Deneylere dayanarak, haddeleme bükme işleminin mekanizmasını tartışmışlardır. Piramit üç silindirli bükme prosesi bükme analizi bazı yayınlarda da bulunabilir (Bassett & Johnson, 1966; Hansen & Jannerup, 1979; Yang & Shima, 1988), ancak bunların hiçbiri işlem sırasında iş parçasının dinamik analizi ile ilgilenmez.

Boru bükme sırasında, geri esneme, boşaltmadan sonraki elastik deformasyondan kaynaklanır. Bunun, bükülmüş borunun hassas şekillendirilmesi üzerinde önemli bir etkisi vardır. Geri yaylanma, malzeme özelliklerine (dayanım katsayısı, iş sertleştirme üssü ve akma mukavemeti gibi), bükülme yarıçapına ve D/t'nin geometrik oranına bağlıdır. Bazı alaşımlar, diğer metallere göre yüksek mukavemete ve yüksek iş sertliğine sahiptir (Jeong vd., 2012). U şeklindeki borular bir bükme işlemi ile yapılır. Boru bükme sırasında, geri esneme, boşaltma sonrası elastik toparlanmadan kaynaklanır. Bunun, bükülmüş borunun hassas şekillendirilmesi üzerinde önemli bir etkisi vardır. Hassas şekillendirme için geri esneme üzerine birçok çalışma yapılmıştır (Al-Qureshi, 1999; Al-Qureshi & Russo, 2002; El Megharbel vd., 2008). Al-Qureshi ve Russo, boru bükmede bir geri yaylanma ve artık gerilmeyi tahmin etmek için kiriş bükme teorisini kullanarak teorik bir analiz modeli sunmuştur. Malzemenin elastik-mükemmel plastik davranışa sahip olduğu, Bauschinger etkilerinin olmadığı ve kesitin simetrik kaldığı varsayılmaktadır. El-Megharbel vd. iş sertleştirme davranışını alarak geliştirilmiş bir teorik analiz modeli sunmuştur. Çelik dairesel boru için geri esnemeyi tahmin etmek için teorik analiz modeli kullanmışlardır.

Boru bükülmesinin teorik analizinde et kalınlığı değişimleri, bükülmüş borunun düzleşmesi ve nötr eksen kayması gibi deformasyon davranışları dikkate alınamaz. Bu nedenle, bu teorik analiz, FE analiz sonuçlarıyla karşılaştırıldığında zayıf bir kesinliğe sahiptir. Bununla birlikte, teorik analiz, ön tasarımda çeşitli malzeme ve boyutlardaki boruların geri esneme ve eğilme momentini hızlı bir şekilde tahmin etmek için yararlı bir yöntemdir (Jeong vd., 2012). Kim & Lee (2007) FE analizi ve deneyleri kullanarak bükülme yarıçapı, bükülme açısı ve boru kalınlığının değişimine göre bakır boru için geri esnemenin değişimini çalışmıştır. Gu vd. (2006) ve Jiang vd. (2010) titanyum alaşımlı boruların NC bükülmesinde malzeme özelliklerine ve bükülme açısına göre geri esneme etkilerini gözlemlemek için üç boyutlu elastik-plastik sonlu elemanlar analizi ve sayısal-analitik yöntem gerçekleştirmiştir. Gu vd. (2008) ince duvarlı boru NC bükmede geri esnemeyi incelemiştir. Geri çekme mandrelinin etkisini gözlemlemek ve geri yaylanma kuralını oluşturmak için sayısal simülasyon yapılmıştır. Lee vd. (2011) yerel indüksiyon ısıtması ile boru bükme işleminde ters moment ve deformasyon davranışlarının etkisini incelemiştir.

2.4 CNC Büküm Prosesi



Şekil 2.2. CNC boru bükme makinesi komple görünüş (Akyapak, 2022)

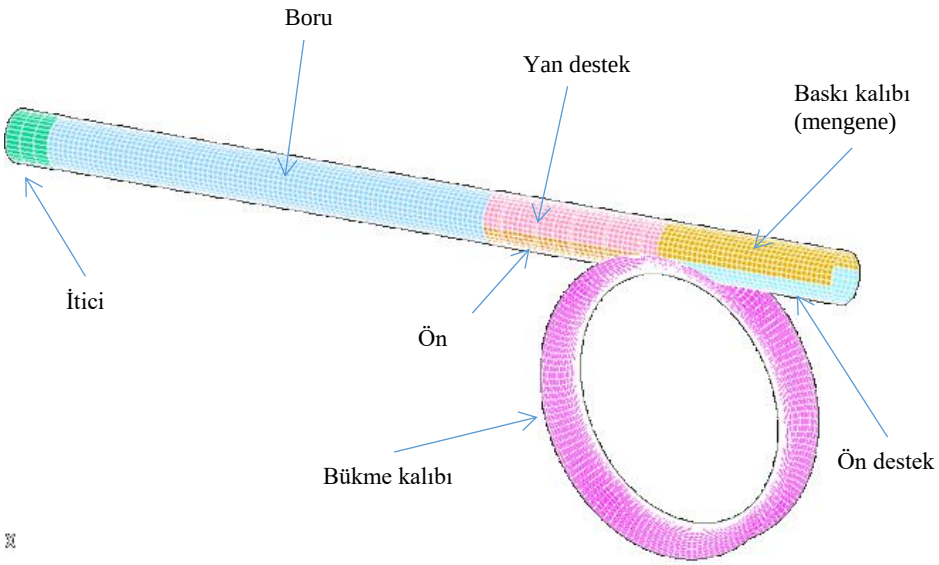
Boru CNC Prosesinde bükümde ilerleme, öteleme, dönüş ve büküm işlemleri servo kontrollü olarak yapılmaktadır. Servo kontrolü, servo eksen hızları kontrol paneli üzerinden yapılmaktadır. CNC bükümlerde servo kontrolü ile hassas bükümler gerçekleştirilmektedir. Bükümü yapılacak parça CAD datası olarak makineye yüklenebilmektedir. Şekil 2.2'de CNC boru bükme makinesi komple görünüşü verilmiştir. Makinede operatörün etkisi azaltılarak tüm büküm işlemlerinde bilgisayar kontrollü olarak yapılması sağlanmaktadır. CNC bükümün hassasiyet, tekrarlanabilirlik, bükümü yapılacak parçanın büküm sonrası oluşacak görüntüsü 3D olarak ekranda görünmesi gibi avantajları bulunmaktadır.

3 MATERYAL ve YÖNTEM

Otomotiv sektöründe kullanılan boru profillerin boru bükme makinelerinde döner çekme yöntemi ile farklı çap ve et kalınlıklarında çelik malzemelerden boruların bükümü esnasında büküm parametlerinin geri esnemeye etkileri incelenmektedir. Birinci çalışmada 50 mm çapında 1mm et kalınlığında DP600 kalite çelik boruyu 90 derece büküm işlemi simüle edilmiştir. İkinci çalışmada 30°- 45° - 60° -75° -90° açılarında bükümlerin analizleri incelenmiştir. Örnek olarak 30°- 45° - 60° -75° -90° açılarda büküm işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu açılarda malzemede meydana gelen burulmalar, malzeme dirsek kısımlarındaki incelmeler incelenmiştir.

3.1 Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Dinamik Analiz

Bu çalışmada çeşitli çap ve kalınlıklardaki bir boruyu bükme işleminin tam dinamik sonlu elemanlar yöntemi (SEY) ile çözümleri gerçekleştirilmiştir. Bu SEY 3B modelleri tam dinamik SEY simülasyonları için en yaygın kullanılan ticari paket programlardan biri olan LS-DYNA çözücüsünü kullanan DYNAFORM programının Boru Bükme modülündeki arayüzde önceden belirlenmiş parametreler; takım ve boru geometri ve malzemeleri tanımlanarak otomatik olarak oluşturulmuştur. Şekil 3.1'de 3B Döner çekme boru bükme sonlu elemanlar modeli gösterilmektedir.

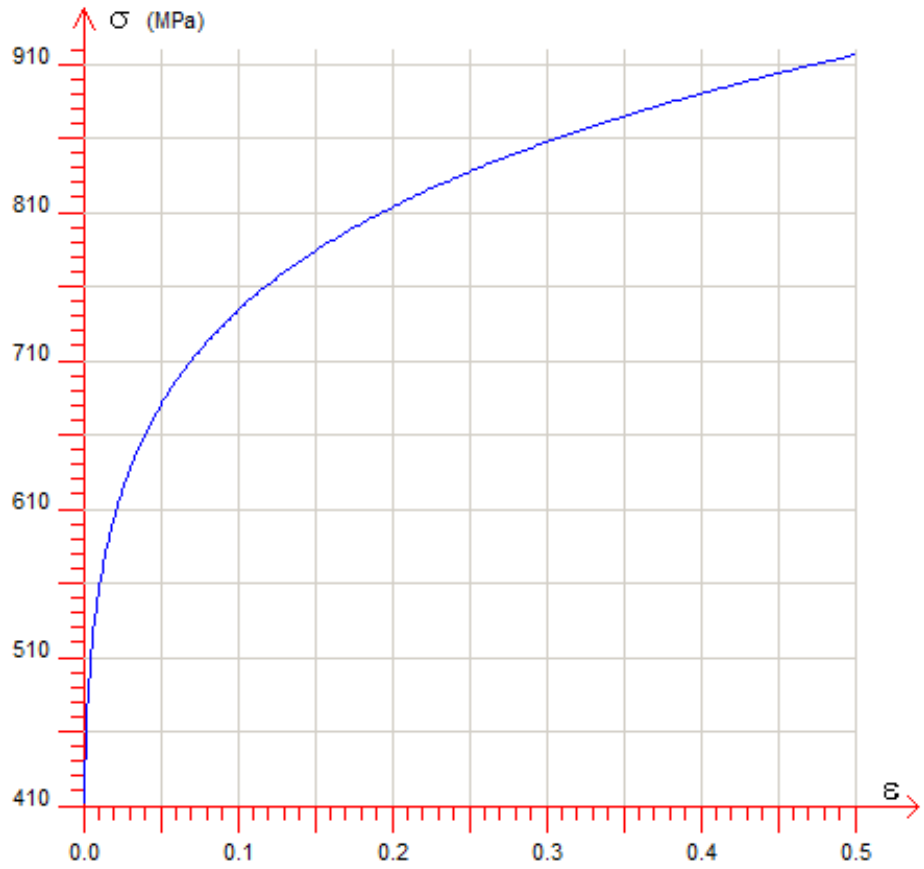


Şekil 3.1. 3B Döner çekme boru bükme sonlu elemanlar modeli

Boru malzemesi olarak DYNAFORM'da tanımlı olan malzeme kütüphanesinden otomotiv sektöründe yaygın kullanılan DP600 kalite çelik boru malzeme seçilmiştir. Çelik malzeme özellikleri Çizelge 1.1'de belirtilmiştir. Malzemenin mekanik özellikleri Şekil 3.2'deki mühendislik gerilme-gerinme grafiğinde belirtildiği şekildedir. DP600 kalite çelik malzemenin plastik gerinim sertleşmesi değerleri olan Çizelge 1.1'de tanımlanan K ve n malzeme sabitleri Basak & Panda (2016) çalışmasından elde edilmiştir.

Çizelge 1.1. DP600 kalite çelik boru malzemesi elastik özellikleri

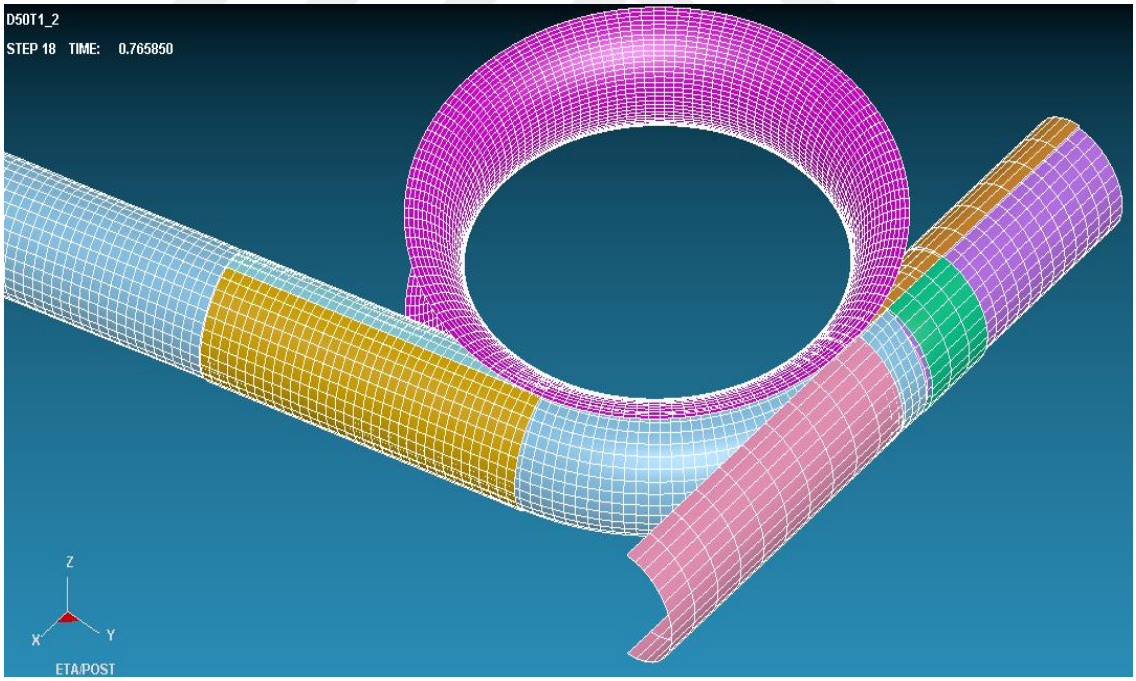
Özgül yoğunluk g/cm^3	Elastisite modülü MPa	Poisson oranı	K MPa	n
7,85	207000	0,28	1000	0,218



Şekil 3.2. DP600 kalite çeliğin mühendislik gerilme-gerinme grafiği

Element formülasyonu olarak büküm gibi elasto-plastik deformasyon simülasyonlarında en yaygın tercih edilen, hızlı ve doğru sonuç veren LS-DYNA explicit dinamik modellerden BELYTSCHKO-TSAY seçildi. Boru kabuk element olarak kalınlığı virtüel (sanal) olarak tanımlanır. Burada kalınlığı boyunca integrasyon nokta sayısı 5 olarak belirlendi.

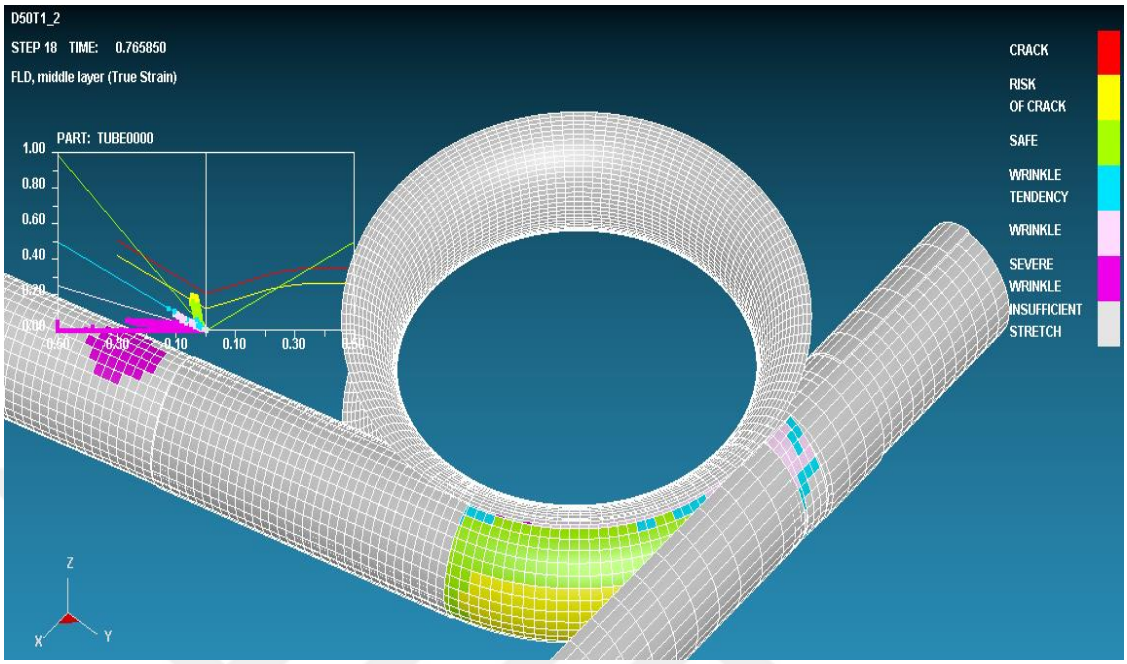
Büküm prosesi istenirse birkaç bükümlü olarak farklı açılarda ve boruyu kendi ekseni etrafında çevirerek yapılabilmektedir. Fakat bu araştırmanın maksadı geri esneme açısını farklı çap ve kalınlıklardaki DP600 kalite çelik boru için tespit etmek olduğu için simülasyonlardaki proseslerde tek büküm ve 150 mm çapında bir kalıp etrafında 90° büküm şeklinde tercih edilmiştir. Şekil 3.3'de borunun 90° büküm simülasyon modeli verilmiştir.



Şekil 3.3. Borunun 90° büküm simülasyon modeli

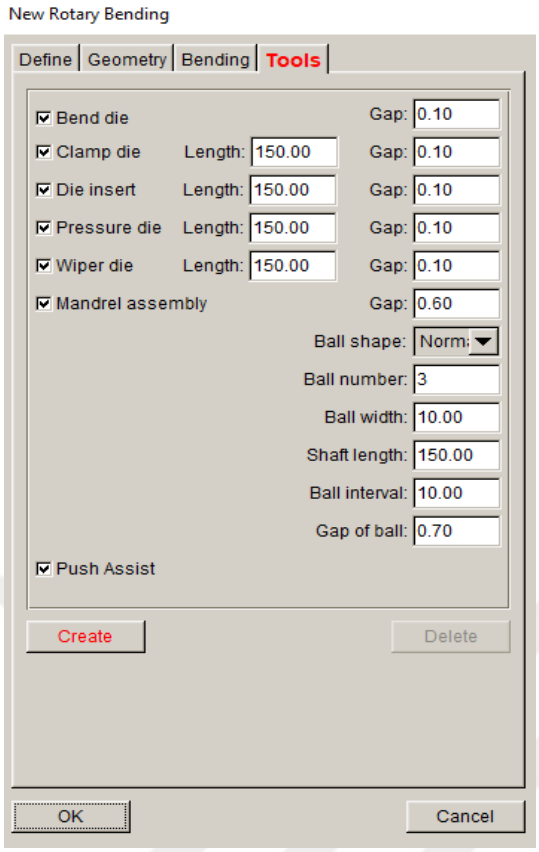
Yanı sıra deformasyon şekillendirme limitlerinin içinde olup olmadığı da incelenmiştir. Boru üzerinde çatlak ya da çatlak riski olan bölgeler, buruşma yani marullanma ya da

eğilimi olduğu bölgeler Şekil 3.4'de gösterildiği şekilde renk kodları ile SEY simülasyon sonuçlarında tespit edilebilmektedir.



Şekil 3.4. Borunun 90° bükümü esnasındaki bölgesel deformasyon tanımlamaları

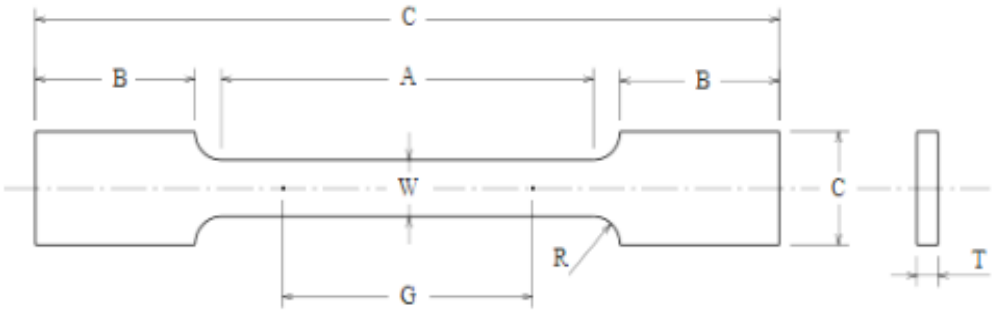
Kabuk element kullanılacağı için çok kalın cidarlı boruların simülasyonları için bu program elverişli olmayabilir. Dolayısıyla burada 3mm kalınlığa kadar borularda simülasyon gerçekleştireceğiz. İnce borularda buruşma riskini azaltmak amacıyla kaşık ve mandrel takımı gibi aparatlar da modele dahil edilmiştir. Mandrel grubunda her biri 10 mm genişlikte ve 10 mm aralıklı 3 toplu bir takım kullanılmıştır. Mandrel topları ile boru iç yüzeyi arası mesafe 0,7 mm olarak bırakılmıştır. Yani 50 mm çaplı bir boru için 48,6 mm çaplı toplar modellenmiştir. Modelin hazırlanması DYNAFORM programının Tube Bending/Forming modülü içinde Tube Rotary Bending seçeneği ile açılan Şekil 3.5'de gösterilen arayüzde kolayca yapılmaktadır.



Şekil 3.5. DYNAFORM boru bükme parametrik 3B modelleme arayüzü

3.2 Deneysel Analiz

Metalik malzemelerin mekanik özelliklerinin elde edilmesinde çekme-kopma testi yaygın olarak kullanılmaktadır. DP600 sac numuneler ile 4 adet farklı çekme hızlarında çekme-kopma testi yapılarak malzemenin simülasyon modellerine tanımlamak üzere gerilim-gerinim diyagramları elde edildi.



Şekil 3.6. EN-ISO 6892-1 standardına göre çekme-kopma testi numunesi

Bu test sonucunda, Young modülü (elastisite modülü), Poisson oranı, akma dayanımı, çekme dayanımı, mukavemet kaysayısı (K) ve üssel değerleri gibi (n) analizdeki malzeme modelinde kullanılacak plastisite değerleri de elde edilebilmektedir.

Lokal deformasyon öncesi üniform deformasyon gerçekleştiği esnada gerçek gerinme gerilme, ve gerinme oranı hesaplanabilmektedir (Liu, 2015).

Gerçek gerinme

$$\varepsilon = \ln \frac{G}{G_o} \tag{1.1}$$

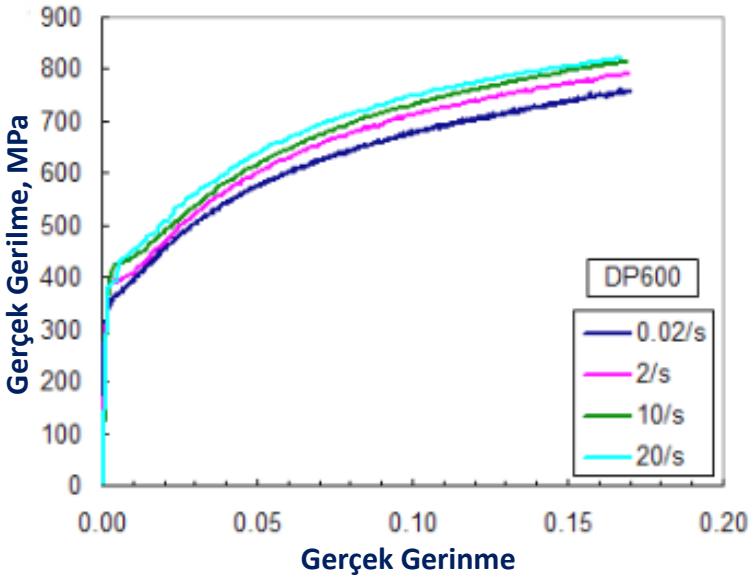
Burada G Şekil 3.6'da gösterildiği gibi mevcut ölçüm uzunluğu, G_o başlangıç ölçüm uzunluğudur. Gerçek gerilme yüklenen kuvvet ve kesit alanı kullanılarak Denk. (1.2) 'deki formülle hesaplanır.

$$\sigma = \frac{F}{S} = \frac{F \times \exp(\varepsilon)}{S_o} \tag{1.2}$$

Burada S_o başlangıç kesit alanıdır. Gerçek gerinme oranı şu şekilde hesaplanmaktadır:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{V}{G} \tag{1.3}$$

Burada V yükleme hızıdır.

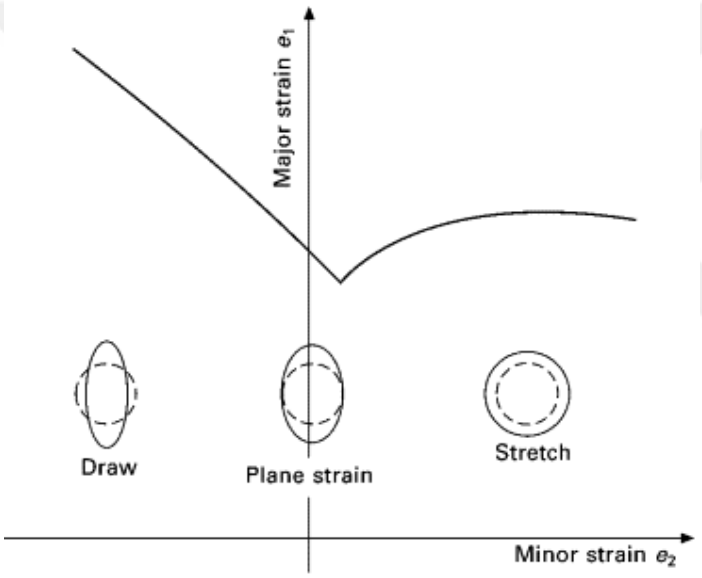


Şekil 3.7. Farklı gerinim oranlarında DP600 malzemesinin gerilme-gerinim grafiği

Şekil 3.7’de görüldüğü gibi farklı gerinim oranlarında gerilim gerinim grafiği DP600 sac malzeme için elde edilmesi için çekme testi cihazına bağlanan numunelere farklı hızlarda çekme kuvveti uygulandı.

3.3 Şekillendirme Limit Diyagramları

Şekillendirme limit diyagramları (FLD'ler), şekillendirme limitlerinin grafiksel temsilleridir; yani, yerel boyunlaşmanın meydana geldiği büyük ve küçük gerilimler. çatlaklar şekillendirme işlemlerinde nihai sınır olmasına rağmen, yerel boyun verme genellikle istenmeyen olarak kabul edilir (Uijl & Carless, 2012). Şekil 3.8’de şekillendirme limit diyagramı verilmiştir.



Şekil 3.8. Şekillendirme limit diyagramı (Uijl & Carless, 2012)

FLD'ler, büyük ve küçük gerinimleri temsil eden iki eksenin bir grafiği üzerinde başarısızlık kriterleri eşlenerek oluşturulabilir. Ana ve küçük gerilimler, ızgaralı levhalar kullanılarak ölçülebilir. Izgara için kullanılabilen genel teknikler, düzenli daire, çizgi veya nokta desenlerini veya rastgele uygulanan desenleri içerir. Gerilme üzerine ızgara deforme olur. Ana gerilme, maksimum gerilme yönündeki gerilme olarak tanımlanır. Minör zorlanma, ana zorlanmaya dik olan gerilimdir. Büyük gerinim her zaman pozitiftir ve dikey eksende çizilirken, küçük gerilim yatay eksende çizilir. Sonuçlar pozitif veya negatif olabilir.

3.4 Geri Esneme

Bu makale boyunca kullanıldığı gibi, geri yaylanma bir cismi deforme ettikten ve sonra serbest bıraktıktan sonra meydana gelen elastik olarak yönlendirilen şekil değişikliğini ifade eder. Konsept, bir metal teli veya şeridi elle büken herkes tarafından anlaşılır. Yeterince küçük bir bükülme yarıçapı için, bükülmenin bir kısmı boşaltmadan sonra kalır ve bir kısmı boşaltma sırasında geri kazanılır (veya geri sıçramıştır). Bazı kritik değerlerden daha büyük bükülme yarıçapları için gövdenin ilk şekli geri kazanılır. Deformasyonun geri kazanılan kısmına geri yaylanma denir. Bu nedenle, tanım, doğası gereği, yüklü durum ile yüksüz durum arasındaki geometrideki bir farkı ifade eder (Wagoner et al., 2006).

Bükülen bir metal borunun geri esnemesi, kapsamlı deneyler ve sonlu elemanlar yöntemi (FEM) analizi yoluyla incelenmiştir. Geri yaylı bükülme açısı için yaklaşık bir denklem çıkarılmıştır. Malzemenin (boru şeklinde) mekanik özelliklerinin, standart çekme testlerinde (malzemeler çubuk şeklinde olduğunda) bulunanlardan oldukça farklı olduğu belirtilmektedir. Bu, deneysel çalışma, FEM hesaplamaları ve geri esneme analizi sonuçlarında tutarsızlıklara neden olan başlıca nedenlerden biridir. Bu nedenle, malzemelerin mekanik özelliklerini boru şeklindeki formlarında incelemek çok önemlidir. Deneyler ve FEM simülasyonları, geri esneme açısının malzemelerin mekanik özelliklerinden önemli ölçüde etkilendiğini kanıtlamaktadır. Açı, plastik modül ile orantılı olarak azalır, ancak sertleşme indeksi ve elastik modül ile ters orantılı olarak değişir. Geri yaylanma açısı ayrıca boru deformasyon koşullarından da etkilenir: bağıl bükülme yarıçapı ile orantılı olarak artar, ancak bağıl duvar kalınlığı ile ters orantılı olarak değişir. Ek olarak, geri yaylanma açısı, bükme açısı ile doğrusal olmayan bir şekilde artar (Xin E vd., 2009).

Xin E vd. bükülen bir metal borunun geri esnemesini, kapsamlı deneyler ve sonlu elemanlar yöntemi (FEM) analizi yoluyla incelemişlerdir. Geri yaylı bükülme açısı için yaklaşık bir denklem çıkarılmıştır.

$$\delta\theta = \theta \frac{K}{E} \left\{ \frac{d}{2R} + \frac{t}{R} \left[e^{-\frac{\sqrt{3}}{2}\left(\frac{\sigma_A}{K}\right)^{1/n}} - 1 \right] \right\}^{n-1} \tag{1.4}$$

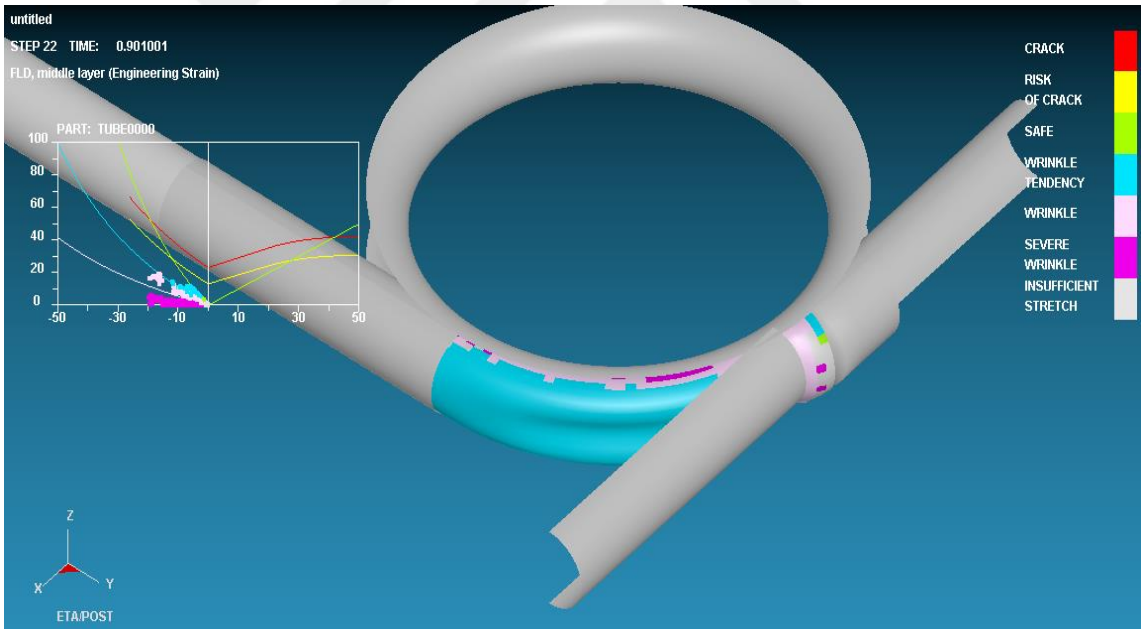
Denklem (1.4) den görülebildiği gibi eğer bükme açısı arttıkça deforme olan alan arttıkça geri esneme açısı artar ve $\delta\theta$ da artar. K değeri ne kadar büyük olursa, boru malzemesinin plastik deformasyona karşı direnci o kadar güçlü olur. E değeri ne kadar büyük olursa, malzemenin elastik deformasyona karşı direnci o kadar güçlü olur ve boru bükme işleminde elastik deformasyon oranı azalır.

4 BULGULAR

4.1 Teorik Model ile Hesaplama

İlk modelde 50 mm çapında 1mm et kalınlığında DP600 kalite çelik boruyu 90 derece büküm işlemi simüle edildi. Büküm kalıbının yarıçapı 150 mm olarak seçilmiştir. Büküm kalıbı, yan destek ve kaşık ile boru arasındaki sürtünme katsayıları 0,125 olarak seçilmiştir. Söz konusu ilk modelle yapılan büküm işleminde boru içerisine ince boruların bükümünde marullanma denilen kırışmayı engellemek ya da azaltmak için eklenen 3 parçalı mandrel kullanılmadı. Bu nedenle,

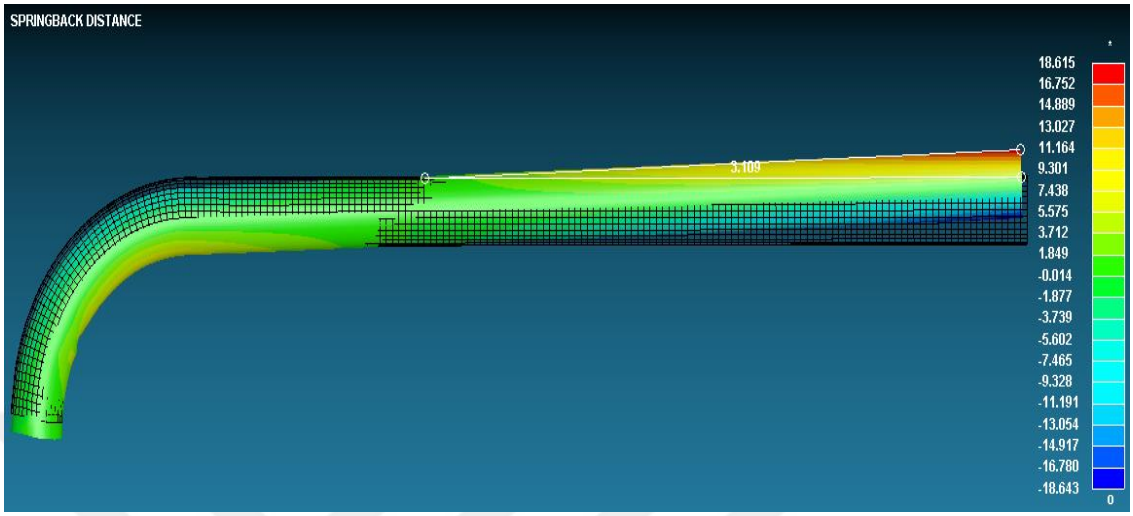
Şekil 4.1'de FLD diyagramı ve bükülen borudaki renk kodları ile gösterildiği üzere Wrinkle tendency (Marullanma eğilimi) bükülen kısımda görülmektedir. Bu simülasyonda geri esneme hesaplatılmadı ancak daha sonraki simülasyonlarda odak noktası olarak DP600 kalite çelik borularda çap ve et kalınlıklarına göre geri esneme açısındaki değişim gözlemlenmiştir.



Şekil 4.1. Mandrelsiz modelde DP600 kalite 50mm çaplı 1mm kalınlıkta çelik borunun 90° büküm simülasyonu deformasyon sonuç grafiği

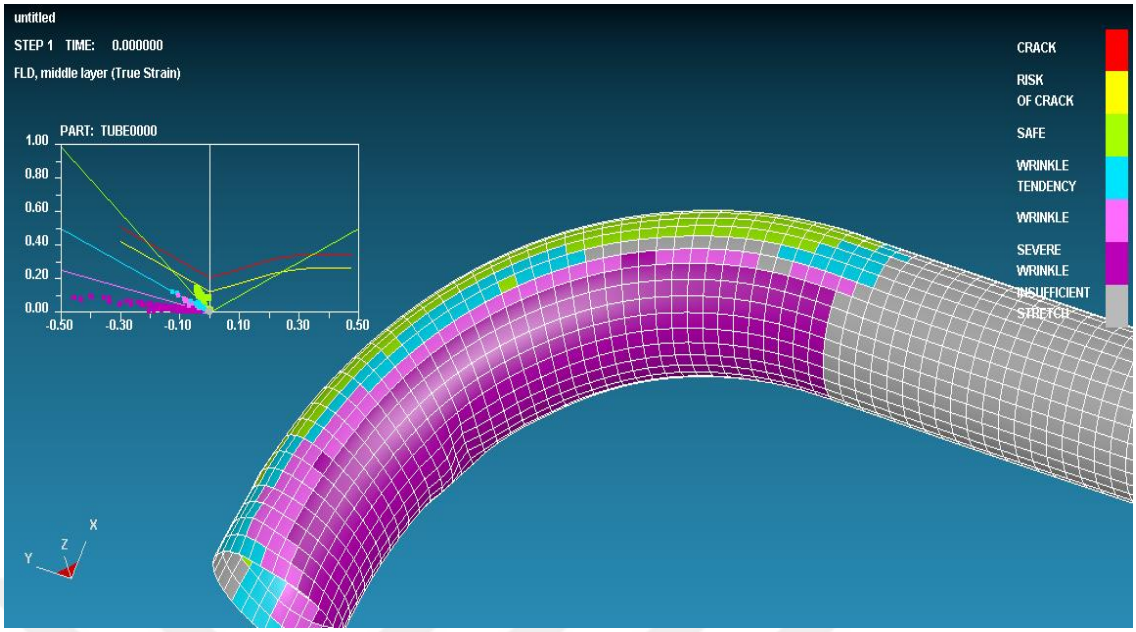
Şekil 4.2'de gösterilen aynı (Ø50mm ve kalınlık 1 mm) borunun 90° büküldüğü başka bir analizde geri esnemede hesaplatıldı. Normal mesafede maksimum 18,6 mm esnediği

görülen borunun açısal olarak hesaplandığında 3,1 derece geri yaylanma açısı değeri elde edilmiştir.



Şekil 4.2. Geri yaylanmanın hesaplanması

Bu modelde boru mandrellerle desteklendiği için bir önceki simülasyon sonucunda görülen dirsek kısmındaki iç bükey yüzey meydana gelmemiştir. Şekil 4.3'de görüldüğü üzere bükümün gerçekleştiği dirsek kısmının iç taraftaki yüzeyde marullanma meydana gelmektedir. Bu da ince cidarlı malzemelerde kaçınılmaz olmaktadır. Fakat diğer yüzeyler yırtılma, çatlak gibi riskler olmaksızın güvenle bükümü gerçekleştiği görülmektedir.

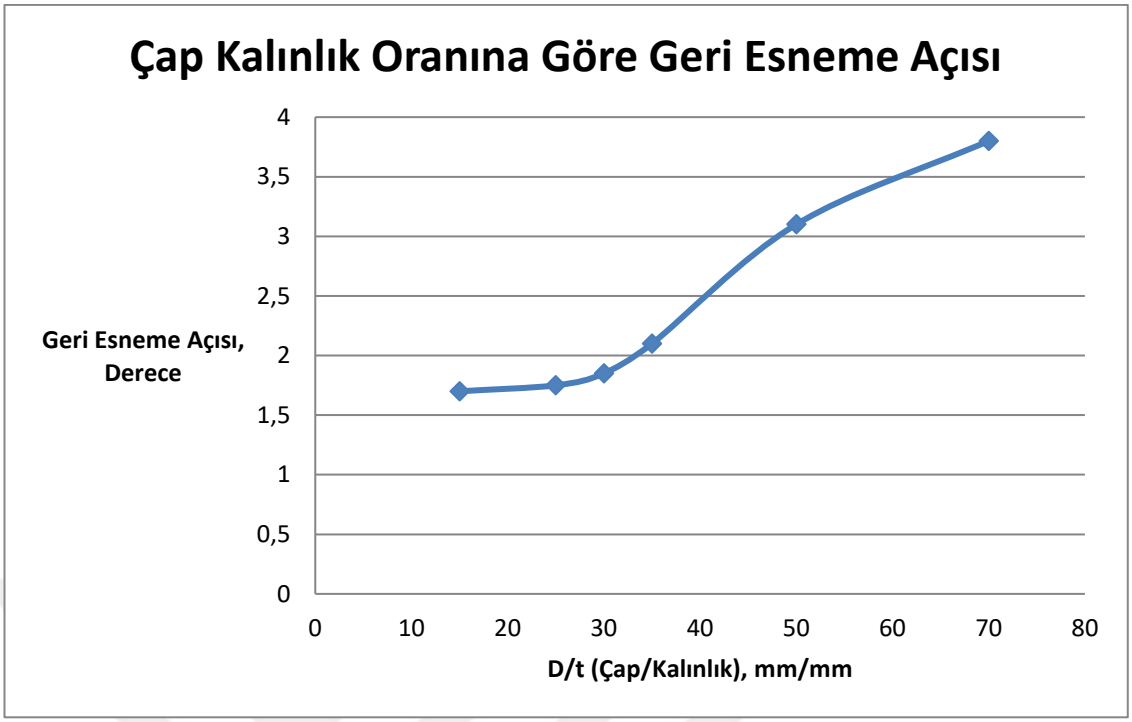


Şekil 4.3. Mandrel kullanılan modelde DP600 kalite 50mm çaplı 1mm kalınlıkta çelik borunun 90° büküm simülasyonu deformasyon sonuç grafiği

Çizelge 4.1. Bükülen boru çapı ve kalınlığa göre geri esneme açısındaki değişim

Çap (mm)	Kalınlık (mm)	Geri Esneme (derece)
30	1	1,8°
30	1,5	1,8°
30	2	1,7°
50	1	3,1°
50	1,5	2,6°
50	2	1,8°
70	1	3,8°
70	1,5	3,0°
70	2	2,1 °

Çizelge 4.1'de bükülen DP600 kalite çelik borunun çap ve kalınlık gibi geometrik parametreleri değiştirilerek parametrik bir çalışma yapılmıştır. Bu çalışmada, çap ve kalınlık oranındaki değişimin geri esneme açısına etkisi Şekil 4.4'deki grafikte gösterildiği şekilde elde edilmiştir. Çap düşük değerlerdeyken görülmüştür ki kalınlık değişimi geri esneme açısında daha az değişime neden olmuştur. Büyük çaplardaki boruların et kalınlığındaki artış geri esneme açısındaki azalmanın daha fazla olmasına neden olmaktadır.



Şekil 4.4. Bükülen borunun çap kalınlık oranına göre geri esneme açısındaki değişim miktarı

4.2 Deneysel Bulgular



Şekil 4.5. Deneylerde kullanılan boru numune

DP600 malzemeden üretilmiş 1,5 mm et kalınlığında 50 mm çapında 2 borunun bükümü sonucunda SEY simülasyonunda elde edilen geri esneme açısı olarak yaklaşık değerler elde edilmiştir. Şekil 4.5'de deneylerde kullanılan boru numune gösterilmektedir. Boru bükme makinesine numune bağlandıktan sonra 90 derece büküm elde etmek için CNC kontrol ekranından hesaplanan geri esneme değeri olan 2,6 derece

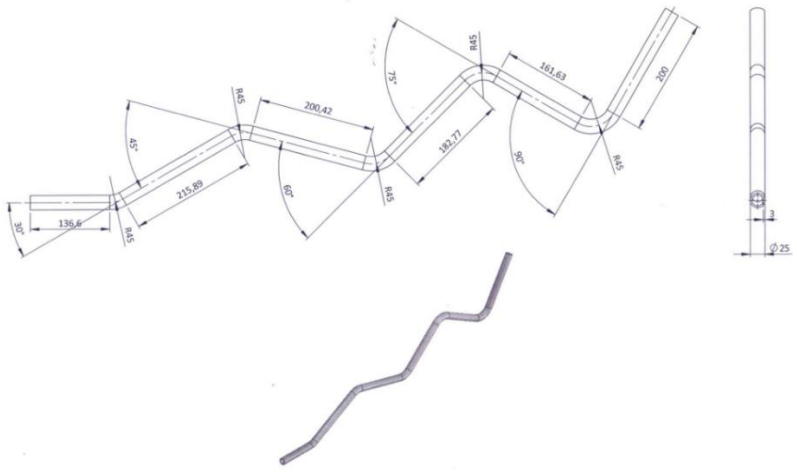
geri esneme telafisi için girildi. Bükümlerin sonucunda iki ayrı numuneden elde edilen büküm değerleri 90,4 ve 89,6 olarak ±0,4 derece sapma ile ölçüldü. Şekil 4.6'da 90 derece büküm sonuçları verilmiştir.



Şekil 4.6. 90 derece büküm sonuçları

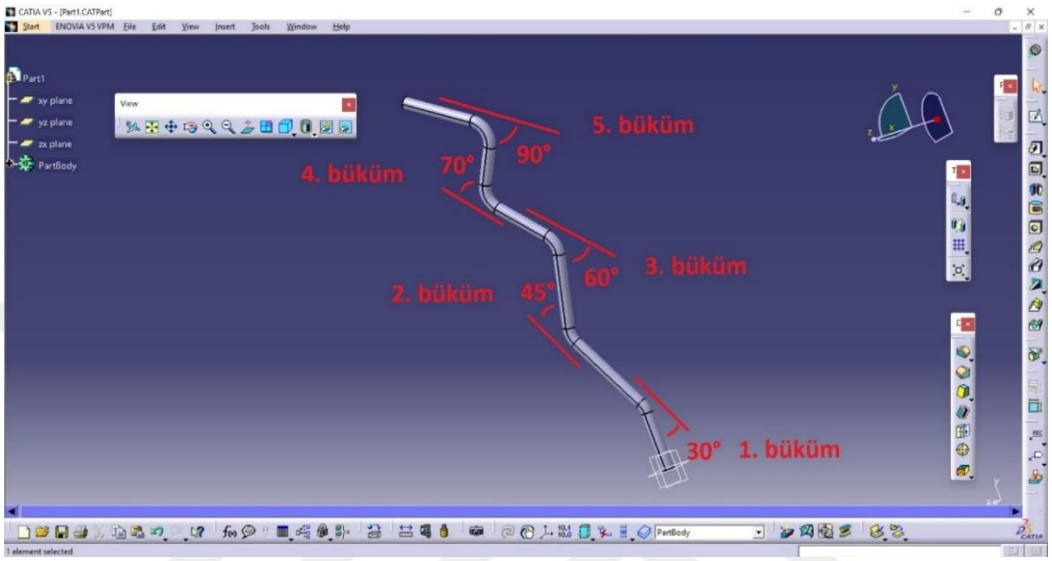
4.3 30°- 45° - 60° -75° -90° Açılarda Bükümlerin Analizi

Bu çalışmada 30°- 45° - 60° -75° -90° açılarında bükümlerin analizleri incelenmiştir. Örnek olarak 30°- 45° - 60° -75° -90° açılarda büküm işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu açılarda malzemede meydana gelen burulmalar, malzeme dirsek kısımlarındaki incelmeler incelenmiştir. Şekil 4.7'de büküm yapılan parçanın teknik resim ölçüleri 3D modeli çizilmiştir. Büküm yapılacak açılara göre çizim gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.7. Büküm yapılan parça teknik resim ölçüleri 3D modeli

St37 malzeme kalitesinde 25 mm çapında ve 3 mm et kalınlığına sahip boru profili örnek olarak alınmıştır. Boru profil Şekil 3.8'de gösterildiği üzere CATIA V5 programında çizilmiştir Akyapak ABM-38 Boru bükme makinesinde malafasız olarak büküm işlemleri gerçekleştirilmiştir. Boru kalıbı yarı çapı 45 mm'dir (R45).



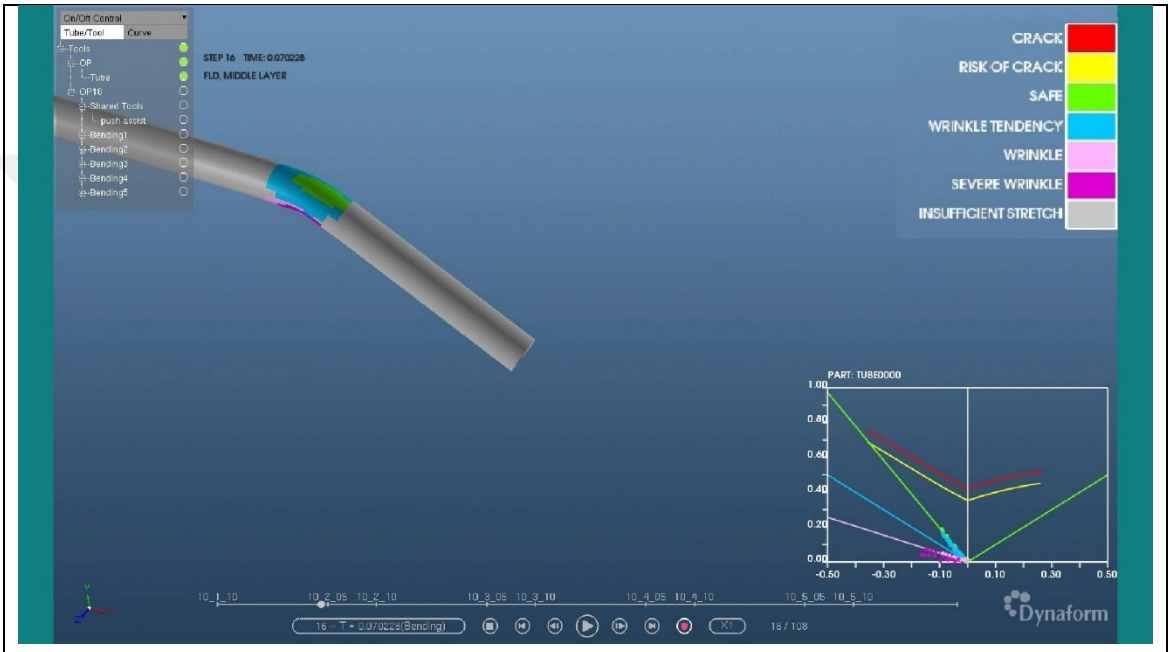
Şekil 4.8. Büküm yapılan parça CATIA V5 programında 3D modeli

Hazırlanan 3D modeline göre parça AKYAPAK ABM 38 Boru Bükme Makinesinde malafasız olarak büküm işlemi gerçekleştirilmiştir. Boru kalıbı olarak yarı çapı 45 mm olan boru kalıbı kullanılmıştır. Şekil 4.9'da büküm yapılan parçanın gerçek görünümü verilmiştir.



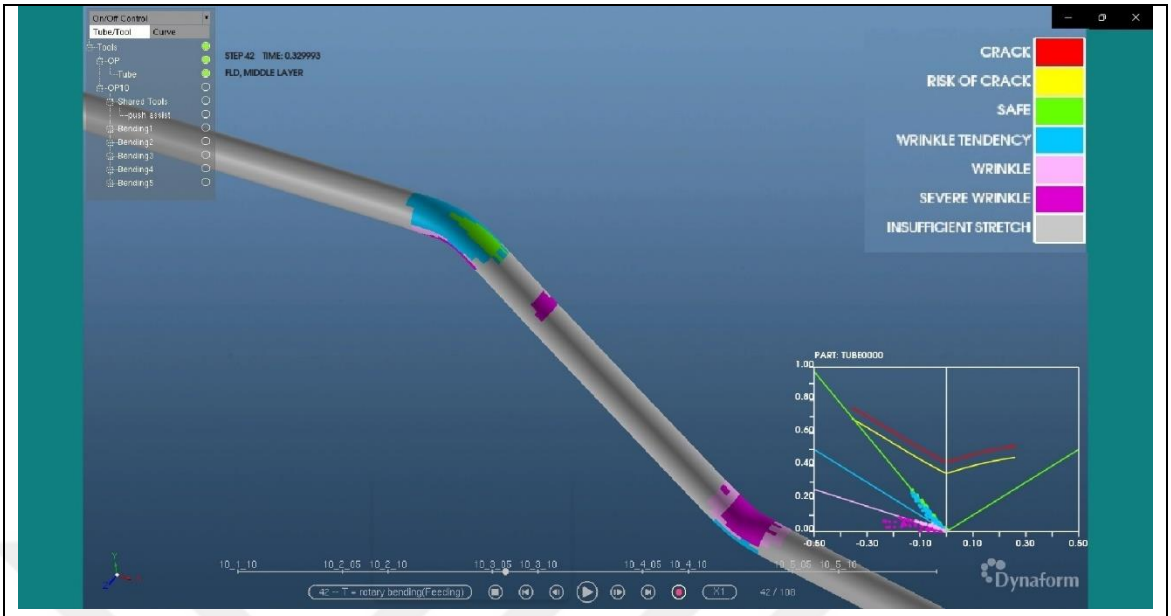
Şekil 4.9. Büküm yapılan parça gerçek görünümü

Dynaform programında büküm analizleri yapılmıştır. Teknik resimde belirtildiği üzere boru profile ilk olarak 30° büküm uygulanmıştır. Daha sonra aynı boru profile sırası ile 45° - 60° - 75° ve 90° büküm işlemleri uygulanmıştır. Bu analizde söz konusu bükümlerde meydana gelen marullanma-kırışıklıklar incelenmiştir. Şekil 4.10'da sırası ile yapılan büküm görselleri verilmiştir.

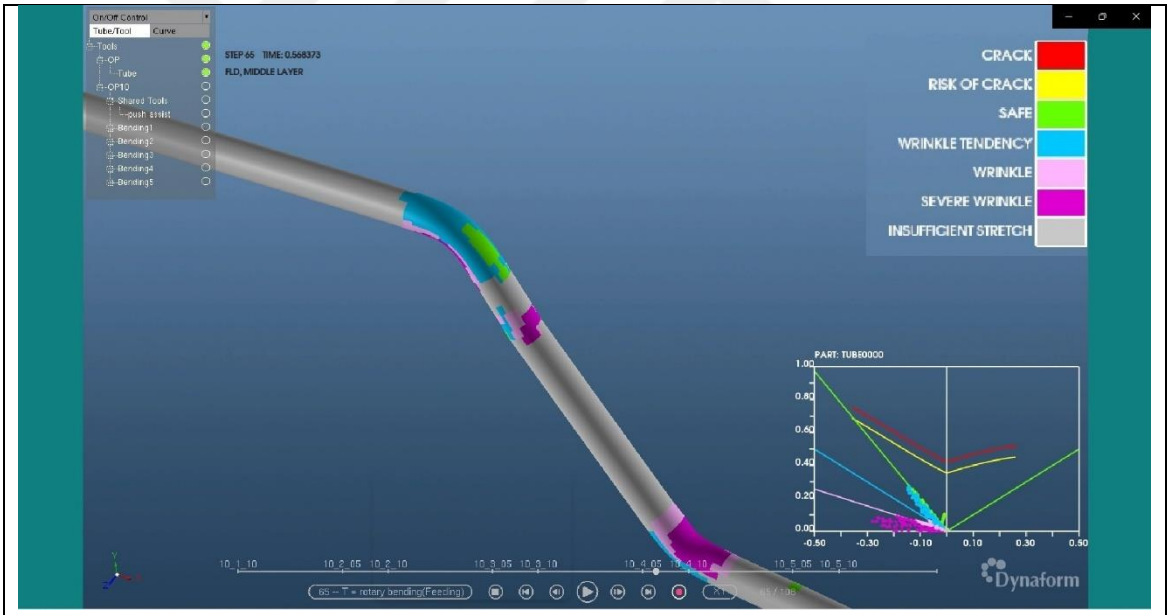


1. Büküm 30°

Şekil 4.10. Dynaform kırışıklık büküm görselleri 30° – 45° - 60° - 75° - 90°

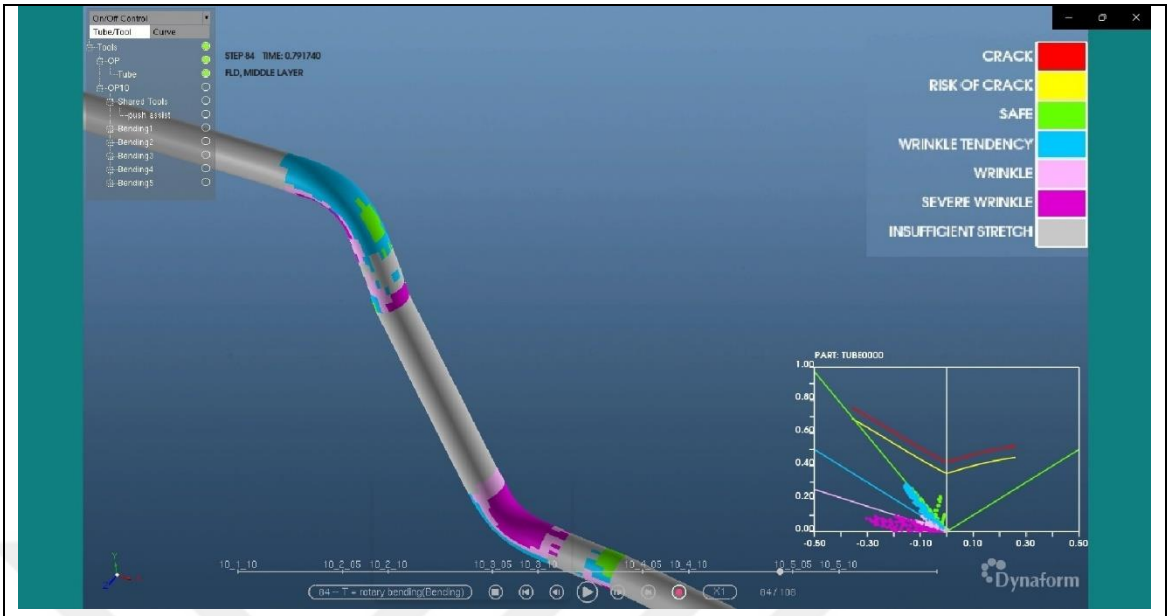


2. Büküm 45°

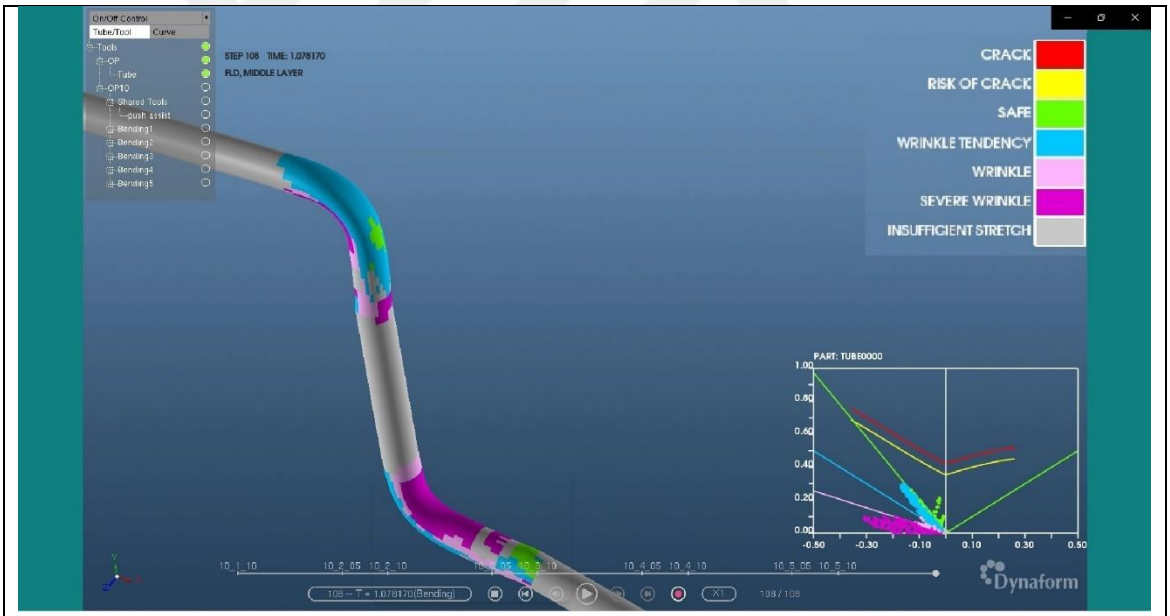


3. Büküm 60°

Şekil 4.10. Dynaform kırışıklık büküm görselleri 30° – 45° - 60° - 75° - 90° (devam)



4. Büküm 75°

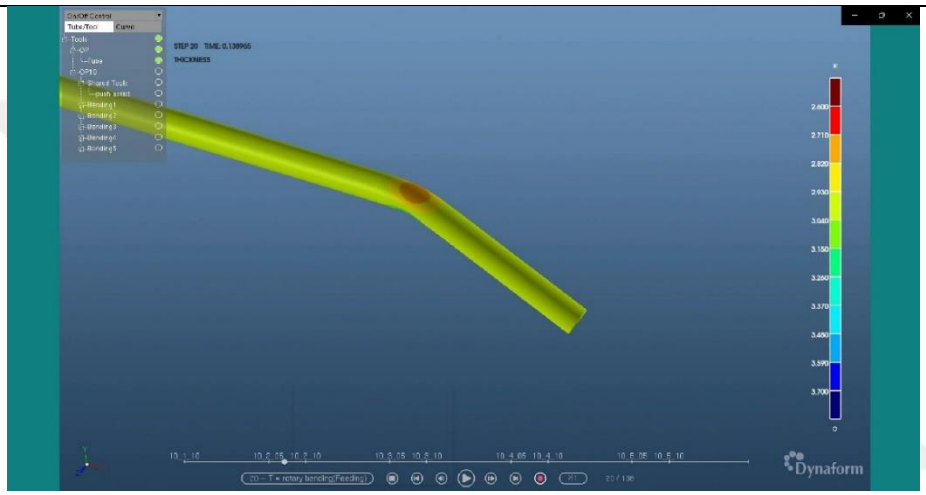


5. Büküm 90°

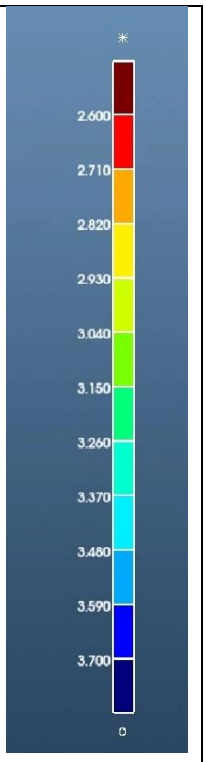
Şekil 4.10. Dynaform kırışıklık büküm görselleri 30° – 45° - 60° - 75° - 90° (devam)

Büküm açıları arttıkça malzemede kırışıklıkların arttığı görülmektedir. En az kırışıklık 30°'de olmaktadır. Büküm açıları 90°'ye çıkınca kırışıklıklar artmaktadır. Buna büküm açısının artması malzeme üzerinde kırışıklıkların artmasına sebebiyet vermektedir.

Dynaform programında büküm yapılan yüzeylerin kalınlık analizleri gözlemlenmiştir. Büküm yapılan borunun sırt kısımlarında incelemeler analiz edilmiştir. Şekil 4.11'e göre büküm açıları arttıkça borunun büküm yapılan bölümünde sırt kısımlarında incelmeler daha fazla olmaktadır. En az incelme 30°'de gözlemlenmiştir. En fazla incelme ise 90°'de gözlemlenmiştir. Analiz skalasına göre 2,7 mm'ye kadar incelen kısımlar kırmızı renk ile belirtilmiştir. 2,8 mm ile 2,7 mm arası turuncu renk ile 2,9 mm ile 2,8 mm arası sarı renk ile belirtilmiştir.

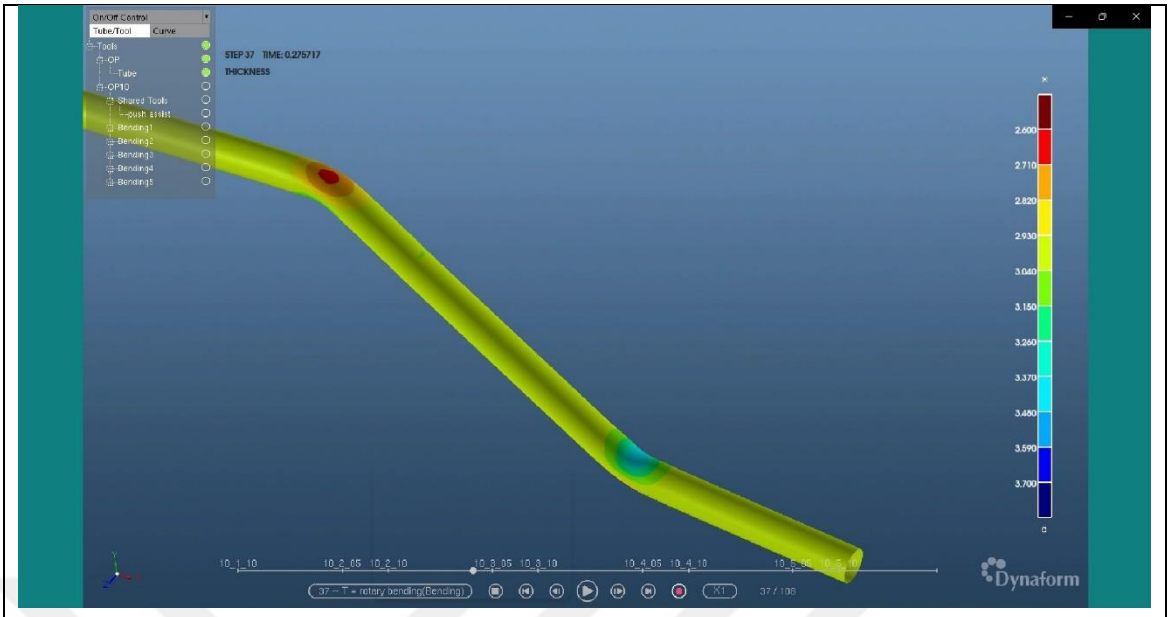


1. Büküm 30°

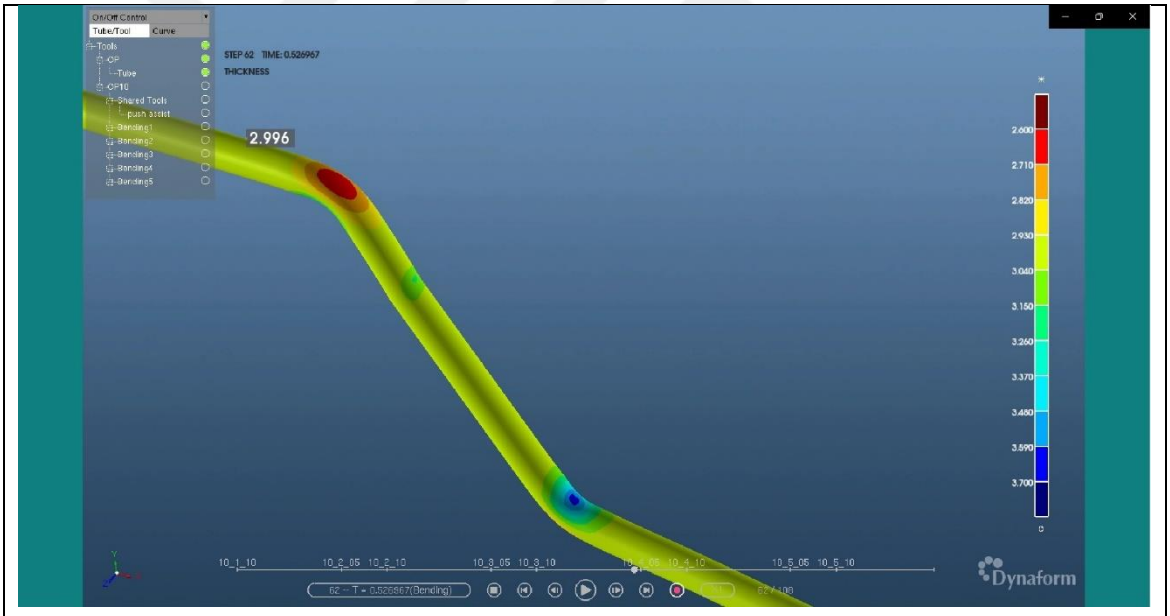


Renk skalası

Şekil 4.11. Dynaform kalınlık büküm görselleri 30° – 45° - 60° - 75° - 90°

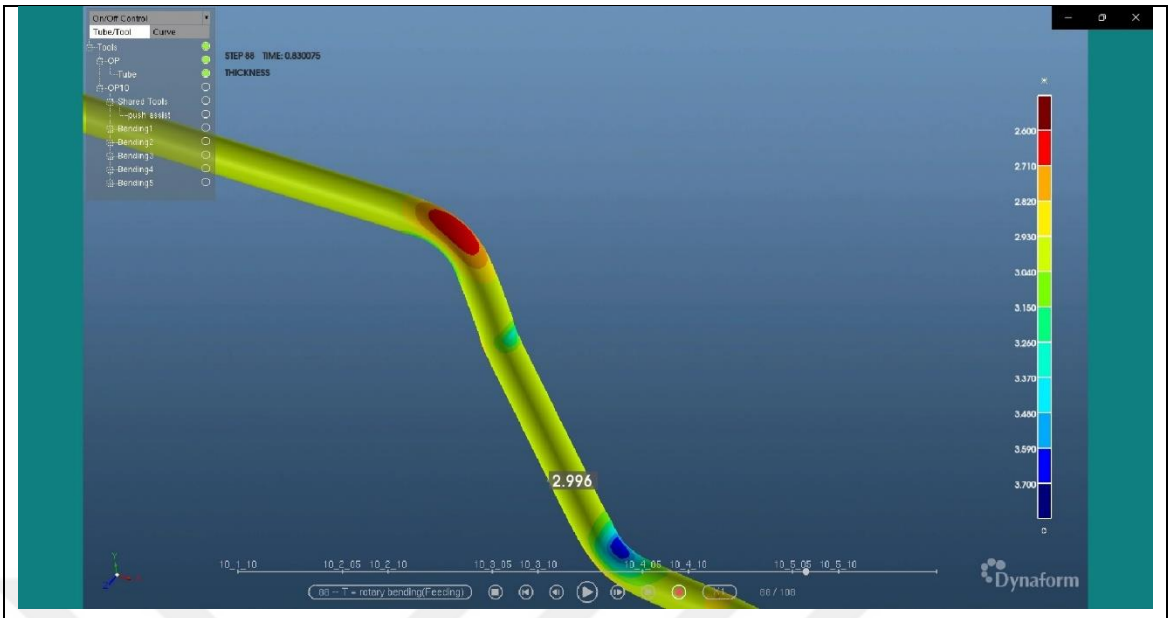


2. Büküm 45°

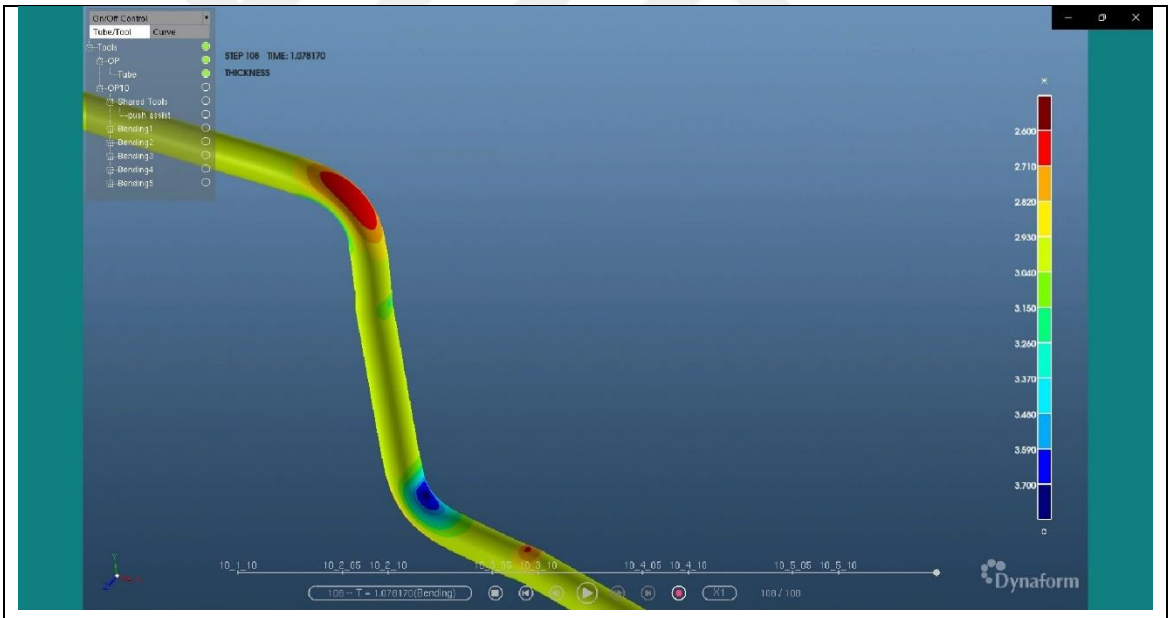


3. Büküm 60°

Şekil 4.11. Dynaform kalınlık büküm görselleri 30° – 45° - 60° - 75° - 90°



4. Büküm 75°



5. Büküm 90°

Şekil 4.11. Dynaform kalınlık büküm görselleri 30° – 45° - 60° - 75° - 90° (devam)

4.4 Deneysel 30° - 45° - 60° - 75° - 90° Açılardaki Büküm İşlemi Bulguları

İkinci çalışmada yapılan büküm işlemine göre büküm açıları arttıkça malzemede kırışıklıkların arttığı görülmektedir. En az kırışıklık 30°'de olmaktadır. Büküm açıları 90°'ye çıkınca kırışıklıklar artmaktadır. Şekil 4.12'de ise gerçek büküm görselleri gösterilmektedir. Buna büküm açısının artması malzeme üzerinde marullanmanın-kırışıklıkların artmasına sebebiyet vermektedir.

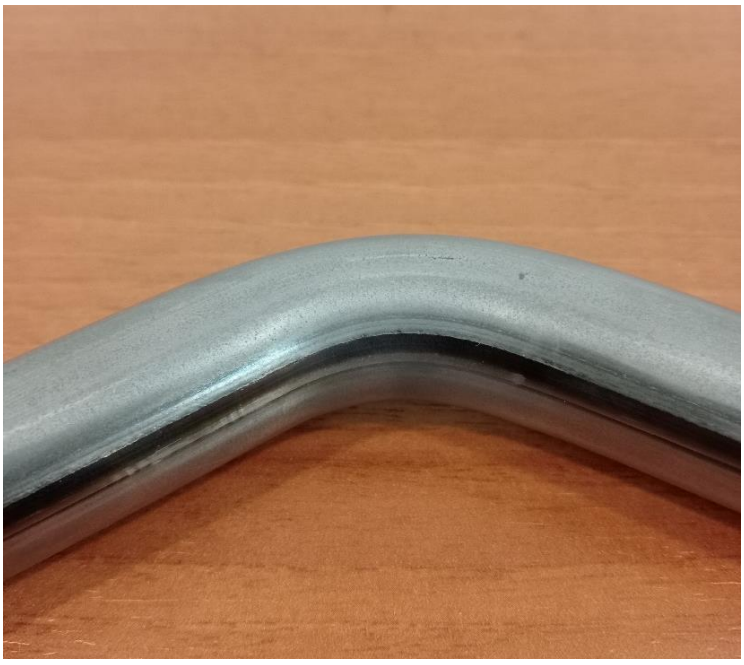


1. Büküm 30°

Şekil 4.12. Gerçek büküm görselleri 30° – 45° - 60° - 75° - 90°



2. Büküm 45°



3. Büküm 60°

Şekil 4.12. Gerçek büküm görselleri 30° – 45° - 60° - 75° - 90° (devam)



4. Büküm 75°



5. Büküm 90°

Şekil 4.12. Gerçek büküm görselleri 30° – 45° - 60° - 75° - 90° (devam)

4.5 Deneysel 30°- 45° - 60° - 75°- 90° Açılardaki Et Kalınlıkları Bulguları

Büküm açıları arttıkça malzemenin büküm köşelerinde inceldiği görülmektedir. En çok incelme 90° bükümün yapıldığı köşede gözlemlenmiştir. En az incelme 30° büküm yapılan köşede gözlemlenmiştir. Şekil 4.14'de ise gerçek bükümde köşe kısımlarından kesit alınarak parçanın köşe kısımlarının et kalınlığı ölçüm değerleri gösterilmektedir. Şekil 4.13'e göre büküm yapılan boru numunesinin et kalınlığı 3,07 mm ölçülmüştür. Ölçümler Mitutoyo marka 0-200 mm dijital kumpas ile yapılmıştır.



Şekil 4.13. Malzeme et kalınlığı



1. Büküm 30° (Et kalınlığı 3,00 mm)



2. Büküm 45° (Et kalınlığı 2,98 mm)

Şekil 4.14. Gerçek et kalınlığı büküm ölçüleri 30° – 45° - 60° - 75° - 90°



3. Büküm 60° (Et kalınlığı 2,98 mm)



4. Büküm 75° (Et kalınlığı 2,90 mm)

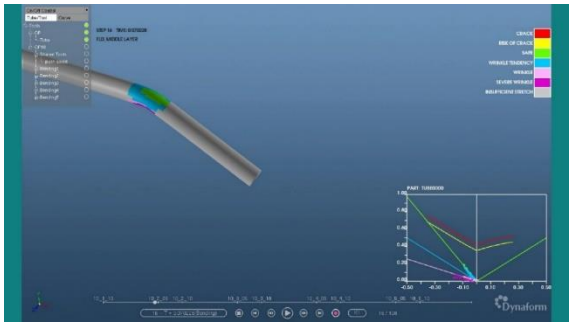
Şekil 4.14. Gerçek et kalınlığı büküm ölçüleri 30° – 45° - 60° - 75° - 90° (devam)



5. Büküm 90° (Et kalınlığı 2,88 mm)

Şekil 4.14. Gerçek et kalınlığı büküm ölçüleri 30° – 45° - 60° - 75° - 90° (devam)

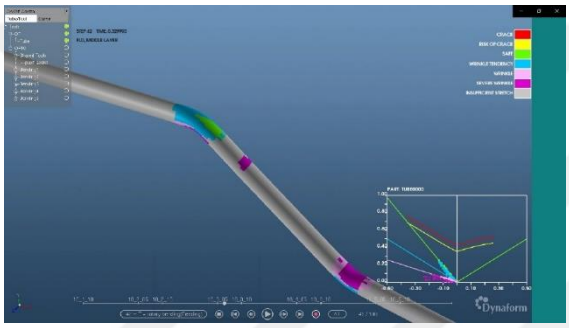
Şekil 4.15'de 30° – 45° - 60° - 75° - 90° bükümlerde oluşan kırışıklığın gerçek sonuçları ve analiz sonuçları karşılaştırılmıştır. Analiz sonuçlarında ve gerçek sonuçlarda büküm açısının artması ile malzemede kırışıklıkların arttığı görülmektedir. Gerçek sonuçlar ve analiz sonuçları birbirlerini doğrulamaktadır.



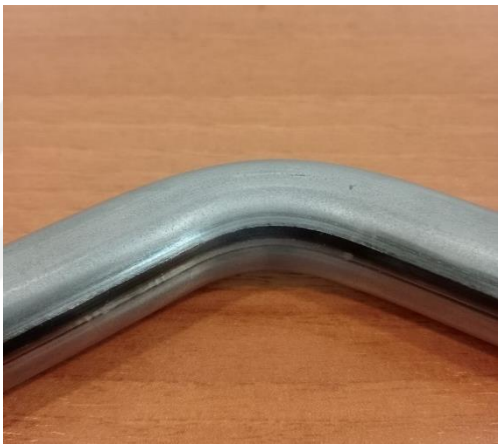
1. Büküm 30° analiz sonucu



1. Büküm 30° gerçek görünüm

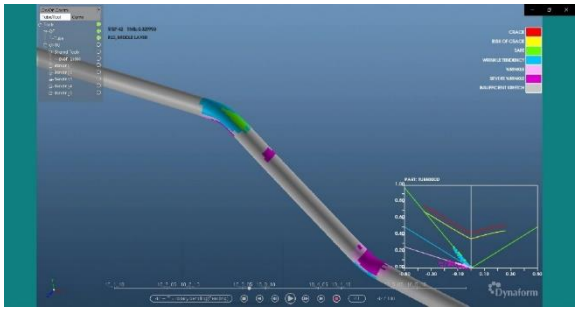


2. Büküm 45° analiz sonucu

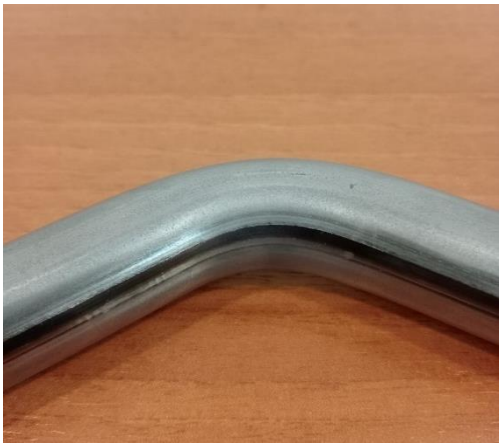


2. Büküm 45° gerçek görünüm

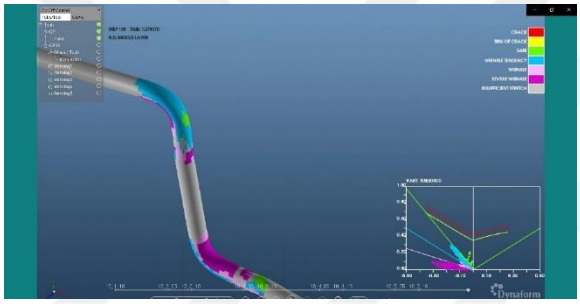
Şekil 4.15. 30° – 45° - 60° - 75° - 90° bükümlerde oluşan kırışıklığın gerçek ve analiz sonuçlarının karşılaştırılması



3. Büküm 60° analiz sonucu



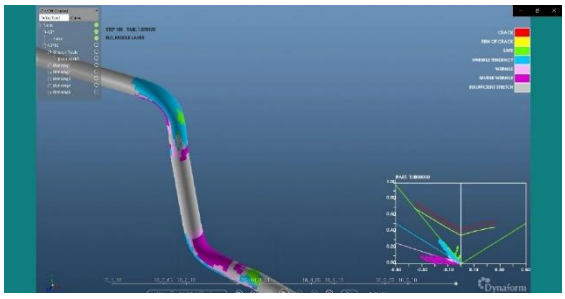
3. Büküm 90° gerçek görünüm



4. Büküm 75° analiz sonucu



4. Büküm 75° gerçek görünüm



5. Büküm 90° Analiz sonucu



5. Büküm 90° gerçek görünüm

Şekil 4.15. 30° – 45° - 60° - 75° - 90° bükümlerde oluşan kırışıklığın gerçek ve analiz sonuçlarının karşılaştırılması (devam

Şekil 4.16’da 30° – 45° - 60° - 75° - 90° bükümlerde malzemenin büküm yapılan sırt kısımlarında oluşan incelmenin gerçek ve analiz sonuçları karşılaştırılmıştır. Analiz sonuçlarında ve gerçek sonuçlarda büküm açısının artması ile malzemenin sırt kısımlarında inceldiği görülmektedir. Gerçek sonuçlar ve analiz sonuçları birbirlerini doğrulamaktadır. Malzemenin et kalınlığı gerçek ölçümlerde 3,07 mm ölçülmüştür. 30’lik° bükümde borunun sırt kısmının et kalınlığı 3,00 mm ölçülmüştür, 45°’lik bükümde borunun sırt kısmının et kalınlığı 2,98 mm ölçülmüştür, 60°’lik bükümde borunun sırt kısmının et kalınlığı 2,98 mm ölçülmüştür, 75°’lik bükümde borunun sırt kısmının et kalınlığı 2,90 mm ölçülmüştür, 90°’lik bükümde ise borunun sırt kısmı 2,88 mm ölçülmüştür.

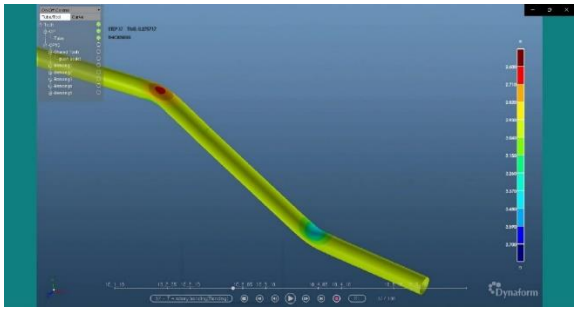


1. Büküm 30°



1. Büküm 30° (Et kalınlığı 3,00 mm)

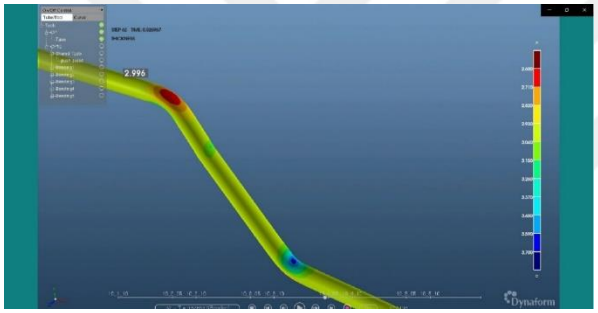
Şekil 4.16. 30° – 45° - 60° - 75° - 90° bükümlerde oluşan incelemenin gerçek ve analiz sonuçlarının karşılaştırılması



2. Büküm 45°



2. Büküm 45° (Et kalınlığı 2,98 mm)

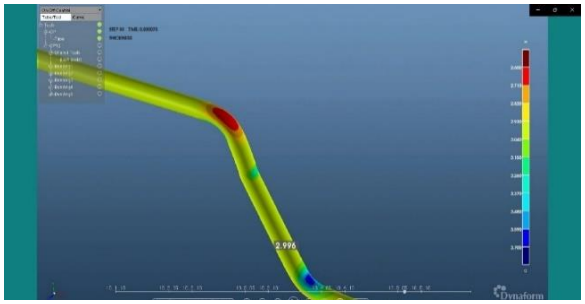


3. Büküm 60°



3. Büküm 60° (Et kalınlığı 2,98 mm)

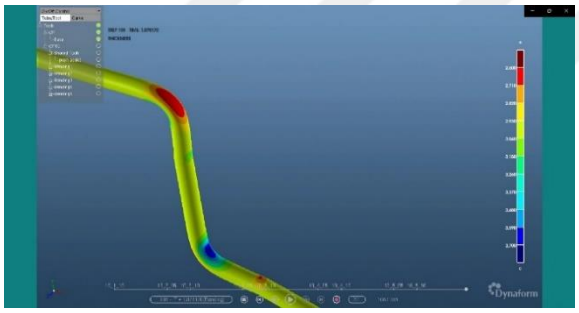
Şekil 4.16. 30° – 45° - 60° - 75° - 90° bükümlerde oluşan incelemenin gerçek ve analiz sonuçlarının karşılaştırılması (devam)



4. Büküm 75°



4. Büküm 75° (Et kalınlığı 2,90 mm)



5. Büküm 90°



5. Büküm 90° (Et kalınlığı 2,88 mm)

Şekil 4.16. 30° – 45° - 60° - 75° - 90° bükümlerde oluşan incelemenin gerçek ve analiz sonuçlarının karşılaştırılması (devam)

5 TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu çalışmada, otomotiv sektöründe ve farklı endüstrilerde de kullanılan boru profillerin boru bükme makinelerinde Döner çekme yöntemi ile farklı çap ve et kalınlıklarında DP600 kalite çelik malzemelerden boruların bükümü esnasında borudaki geometrik parametrelerdeki değişimlerin şekillendirme limit diyagramlarına (FLD) ve geri esnemeye etkileri incelenmiştir.

İkinci çalışmada ise St 37 malzeme kalitesinde boru profili üzerinde 30° - 45° - 60° - 75° - 90° açılarındaki büküm işlemleri ve bu büküm işlemleri sonucuna göre malzeme deformasyonları ve geri esneme miktarları analiz edilmiştir.

FLD'ler ile yerel boyunlaşmanın meydana geldiği büyük ve küçük gerilimler, çatlaklar şekillendirme işlemlerinde nihai sınır olmasına rağmen, yerel boyun verme genellikle istenmeyen deformasyon olarak kabul edilir. Mandrellerin modele dahil edilip edilmemesinin büküm sonucuna etkileri FLD grafikleri ile simüle edilmiştir. Simülasyon sonucunda görülen dirsek kısmındaki iç bükey yüzey meydana gelmemiştir. Bükümün gerçekleştiği dirsek kısmının iç taraftaki yüzeyde marullanma meydana gelmektedir. İkinci deneyde büküm açıları arttıkça bükümün gerçekleştiği dirsek kısmının iç taraftaki yüzeyde marullanma daha fazla olmaktadır.

DP600 kalite çelik borunun çap ve kalınlık gibi geometrik parametreleri değiştirilerek parametrik bir çalışma yapılmıştır. Teorik olarak parametrik çalışma yapılmadan önce 50 mm çapında 1,5 mm et kalınlığında DP600 iki boru numune bükülerek hesaplanan geri esneme değeri doğrulandı. Bu çalışmada, çap ve kalınlık oranındaki değişimin geri esneme açısına etkisi elde edilmiştir. Çap düşük değerlerdeyken görülmüştür ki kalınlık değişimi geri esneme açısında daha az değişime neden olmuştur. Büyük çaplardaki boruların et kalınlığındaki artış geri esneme açısındaki azalmanın daha fazla olmasına neden olmaktadır.

30° – 45° - 60° - 75° - 90° bükümlerde malzemenin büküm yapılan sırt kısımlarında oluşan incelmenin gerçek ve analiz sonuçları karşılaştırılmıştır. Analiz sonuçlarında ve gerçek sonuçlarda büküm açısının artması ile malzemenin sırt kısımlarında inceldiği görülmektedir. Gerçek sonuçlar ve analiz sonuçları birbirlerini doğrulamaktadır. Malzemenin et kalınlığı ölçümlerde 3,07 mm ölçülmüştür. 30'lik° bükümde borunun sırt kısmının et kalınlığı 3,00 mm ölçülmüştür, 45°'lik bükümde borunun sırt kısmının et kalınlığı 2,98 mm ölçülmüştür, 60°'lik bükümde borunun sırt kısmının et kalınlığı 2,98 mm ölçülmüştür, 75°'lik bükümde borunun sırt kısmının et kalınlığı 2,90 mm ölçülmüştür, 90°'lik bükümde ise borunun sırt kısmı 2,88 mm ölçülmüştür.

KAYNAKLAR

Akyapak. (2020). *ABM (Akyapak Boru Bükme Makinası) Katalog*.

Al-Qureshi, H. A. (1999). Elastic-plastic analysis of tube bending. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, *39*(1), 87–104. https://doi.org/10.1016/S0890-6955(98)00012-1

Al-Qureshi, H. A., & Russo, A. (2002). Spring-back and residual stresses in bending of thin-walled aluminium tubes. *Materials and Design*, *23*(2), 217–222. https://doi.org/10.1016/S0261-3069(01)00061-9

Basak, S., & Panda, S. K. (2016). Application of Barlat Yld-96 Yield Criterion for Predicting Formability of Pre-Strained Dual Phase Steel Sheets. *ASME 2016 International Manufacturing Science and Engineering Conference, June 2018*. https://doi.org/10.1115/msec2016-8753

Bassett, M. B., & Johnson, W. (1966). The bending of plate using a three-roll pyramid type plate bending machine. *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, *1*(5), 398–414. https://doi.org/10.1243/03093247V015398

Black, J. T., & Kohser, R. A. (2020). *DeGarmo's Materials and Processes in Manufacturing* (13th Editi). Wiley.

E, D. xin, He, H. hui, Liu, X. yi, & Ning, R. xin. (2009). Spring-back deformation in tube bending. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, *16*(2), 177–183. https://doi.org/10.1016/S1674-4799(09)60030-3

El Megharbel, A., El Nasser, G. A., & El Domiaty, A. (2008). Bending of tube and section made of strain-hardening materials. *Journal of Materials Processing Technology*, *203*(1–3), 372–380. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.10.078

Gu, R. J., Yang, H., Zhan, M., Li, H., & Li, H. W. (2008). Research on the springback of thin-walled tube NC bending based on the numerical simulation of the whole process. *Computational Materials Science*, *42*(4), 537–549. https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2007.09.001

Gu, Rui Jie, Yang, H., Zhan, M., & Li, H. (2006). Springback of thin-walled tube NC precision bending and its numerical simulation. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition)*, *16*(SUPPL.). https://doi.org/10.1016/S1003-6326(06)60268-9

Hansen, N. E., & Jannerup, O. (1979). Modelling of elastic-plastic bending of beams using a roller bending machine. *Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME*, *101*(3), 304–310. https://doi.org/10.1115/1.3439511

Hua, M., Baines, K., & Cole, I. M. (1995). Bending mechanisms, experimental techniques and preliminary tests for the continuous four-roll plate bending process. *Journal of Materials Processing Tech.*, *48*(1–4), 159–172. https://doi.org/10.1016/0924-0136(94)01647-J

Hua, M., Baines, K., & Sansome, D. H. (1991). Design and Performance Considerations of the Continuos Four-roll Bender: A Precision Machine for the Roller Bending of Plates. *Progress in Precision Engineering*, 277–289. https://doi.org/10.1007/978-3-642-84494-2_29

Hua, M., & Lin, Y. H. (1999a). Effect of strain hardening on the continuous four-roll plate edge bending process. *Journal of Materials Processing Technology*, *89–90*, 12–18. https://doi.org/10.1016/S0924-0136(99)00010-2

Hua, M., & Lin, Y. H. (1999b). Large deflection analysis of elastoplastic plate in steady continuous four-roll bending process. *International Journal of Mechanical Sciences*, *41*(12), 1461–1483. https://doi.org/10.1016/S0020-7403(98)00104-0

Jeong, H. S., Ha, M. Y., & Cho, J. R. (2012). Theoretical and FE analysis for inconel 625 fine tube bending to predict springback. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, *13*(12), 2143–2148. https://doi.org/10.1007/s12541-012-0284-z

Jiang, Z. Q., Yang, H., Zhan, M., Xu, X. D., & Li, G. J. (2010). Coupling effects of material properties and the bending angle on the springback angle of a titanium alloy tube during numerically controlled bending. *Materials and Design*, *31*(4), 2001–2010. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.10.029

Kim, H. J., & Lee, C. M. (2007). A Study on the Bending Process for Precision Pipe Forming.pdf. *Journal of the Korean Socety for Precision Engineering*, *24*(6), 58–65.

Lee, H. W., Bae, J. H., Kim, M. S., & Kim, C. (2011). Optimum design of pipe bending based on high-frequency induction heating using dynamic reverse moment. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, *12*(6), 1051–1058. https://doi.org/10.1007/s12541-011-0140-6

Li, Y., Li, A., Yue, Z., Qiu, L., Badreddine, H., Gao, J., & Wang, Y. (2020). Springback prediction of AL6061 pipe in free bending process based on finite element and analytic methods. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, *109*(7–8), 1789–1799. https://doi.org/10.1007/s00170-020-05772-2

Liu, W. (2015). Identification of strainrate dependent hardening sensitivity of metallic sheets under in-plane biaxial loading. *Mechanical Engineering [Physics.Class-Ph]*, *March 2015*, 158.

Lou, H., & Stelson, K. A. (2001). Three-dimensional tube geometry control for rotary draw tube bending, Part 1: Bend angle and overall tube geometry control. *Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME*, *123*(2), 258–265. https://doi.org/10.1115/1.1351813

Penekli, U. (2008). *Finite Element Analysis of Bending Operation of Aluminum Profiles*. Orta Doğu Teknik Üniversitesi.

Quan, T. H., Champliaud, H., Feng, Z., & Thien-My, D. (2012). Dynamic analysis of a workpiece deformation in the roll bending process by FEM simulation. *24th European Modeling and Simulation Symposium, EMSS 2012*, *c*, 477–482.

Sözen, L. (2011). *Boru Bükme Operasyonu Sonucunda Meydana Gelen Geri Yaylanma Miktarının Öngörülmesi*.

Uijl, N. J. Den, & Carless, L. J. (2012). Advanced metal-forming technologies for automotive applications. *Advanced Materials in Automotive Engineering*, 28–56. https://doi.org/10.1533/9780857095466.28

Wagoner, R. H., Wang, J. F., Li, M., & Ohio, T. (2006). *Springback*. *c*, 1–23.

Yang, M., & Shima, S. (1988). Simulation of pyramid type three-roll bending process. *International Journal of Mechanical Sciences*, *30*(12), 877–886. https://doi.org/10.1016/0020-7403(88)90071-9

Yavuz, M. (2011). *Boru Bükme Kalıp Tasarımı ve Üretim Parametrelerinin İncelenmesi*. Uludağ Üniversitesi.

Zhan, M., Yang, H., Jiang, Z. Q., Zhao, Z. S., & Lin, Y. (2002). A study on a 3D FE simulation method of the NC bending process of thin-walled tube. *Journal of Materials Processing Technology*, *129*(1–3), 273–276.

https://doi.org/10.1016/S0924-0136(02)00664-7