

T.C.
GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ
ENSTİTÜSÜ

BORU DİRSEK PARÇALARININ
SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE
ŞEKİLLENDİRİLMESİ

Hakan KARABULUT
YÜKSEK LİSANS TEZİ

TASARIM VE İMALAT MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

GEBZE

2007

T.C.
GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ
ENSTİTÜSÜ

BORU DİRSEK PARÇALARININ
SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE
ŞEKİLLENDİRİLMESİ

Hakan KARABULUT
YÜKSEK LİSANS TEZİ

TASARIM VE İMALAT MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

TEZ DANIŞMANI
Yrd.Doç.Dr. Zafer ŞENALP

GEBZE

2007

 GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ	YÜKSEK LİSANS JÜRİ ONAY FORMU
--	---

G.Y.T.E. Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 11/06/2007 tarih ve 2007/20 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 26/06/2007 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Hakan KARABULUT 'un tez çalışması Tasarım ve İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı' nda YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI)

: Yrd.Doç.Dr. Zafer ŞENALP

ÜYE

: Doç.Dr. Fehmi ERZİNCANLI

ÜYE

: Yrd. Doç.Dr. Mehmet GÖKTÜRK

ONAY

G.Y.T.E. Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun tarih ve/..... sayılı kararı.

İMZA/MÜHÜR

ÖZET

**TEZİN BAŞLIĞI : BORU DİRSEK PARÇALARININ
SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE
ŞEKİLLENDİRİLMESİ**

YAZAR ADI : Hakan KARABULUT

Boru dirsek bağlantı parçaları petrokimya, doğalgaz, makina imalat sanayi, mimari, gemi inşa sanayi, basınçlı kaplar, kimya, uzay ve havacılık, tüp ve boru mühendisliği gibi alanlarda boru sistemlerinin birer anahtar parçası olarak görev görürler. Bu çalışmada; borulama sistemlerinde kullanılan paslanmaz çelik dirsek parçalarının soğuk şekil verme yöntemi ile imalatının simülasyonu sonlu elemanlar analizi ile gerçekleştirilmiştir.

Pro/Engineer programı ile oluşturulan geometrik model; simülasyonların gerçekleştirilebilmesi için doğrusal olmayan açık sonlu elemanlar analizi yazılımı ANSYS/LS – DYNA ‘ya aktarıldı. Simülasyonlar ile boru parçasında soğuk şekil verilmesi işlemi boyunca meydana gelen gerilme/gerinim dağılımlarının elde edilmesi ile şekil verme süreci boyunca boru yapısının değişimi üzerine bilgi sahibi olundu. Şekil verme süresi, sürtünme koşulları ve kalıp – ana boru malzemeleri arasındaki boşluk mesafesine göre farklı simülasyonlar gerçekleştirildi. Gerçekleştirilen her simülasyon için sonuçlar karşılaştırıldı.

SUMMARY

**NAME OF THE THESIS : FORMING OF PIPE ELBOW
FITTINGS WITH FINITE ELEMENT METHOD**

NAME OF THE AUTHOR : Hakan KARABULUT

Pipe elbow fittings are widely used as a key part in the field of petrochemical, natural gas, mechanical industry, architectural, shipbuilding, pressure vessels, chemical, air and aerospace industry, tube and pipe engineering. In this thesis; cold forming of stainless steel pipe elbows used in piping systems is simulated via finite element analysis.

In order to determine the stress/strain distributions and have an information about tube structure during the forming process, and hence to further develop the process, a finite element simulation was developed to study the process. The non – linear explicit finite element analysis software ANSYS/LS – DYNA was used for the analysis. The geometry of the model is obtained by Pro/Engineer commercial CAD software. The process is pre – processed in ANSYS and results were manipulated using ANSYS/LS – DYNA post – processing tools. Results are compared according to the basis of different forming time, friction conditions and the distances between molds and main tube.

TEŞEKKÜR

Çalışmamın her aşamasında fikirlerini ve önerilerini paylaşan, bilgi ve deneyimi ile yol gösteren danışman hocam Yrd.Doç.Dr. Zafer ŞENALP'e, göstermiş olduğu hoşgörü, sabır ve teşvikinden ötürü genel müdürüm M.Fatih İNCETAHTACI 'ya, maddi ve manevi destekleri için sevgili aileme, mesai arkadaşlarıma ve dostlarıma teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	iv
SUMMARY	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	x
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
TABLolar DİZİNİ	xiv
1. GİRİŞ	1
1.1. Alın Kaynaklı Boru Bağlantı Sistemleri	2
1.1.1. 90° Dirsekler	3
1.1.2. 45° Dirsekler	4
1.1.3. 180° Dönüşler	5
1.1.4. Eşmerkezli ve Merkezden Kaçık Düşürücüler	5
1.1.5. Eşit ve Düşürücü T Boru Bağlantı Parçaları	6
1.1.6. Başlıklar	7
1.2. Boru Bükme ve Dirsek Şekil Verme Yöntemleri	7
1.2.1. Kalıp İçerisinde İterek Soğuk Bükme Yöntemi	7
1.2.2. Sıcak Şekillendirme Yöntemi ile Boru Bükme Yöntemi	9
1.2.3. Dönüşsel Çekerek Boru Bükme Yöntemi	10
1.2.4. Su İle Şekil Verme Yöntemi	12
1.2.5. Lazerle Bükme	13
1.3. Boru Bükme Operasyonlarında Meydana Gelen Kusurlar	15
1.3.1. Yassılaşma	15
1.3.2. Et Kalınlığı Değişimi	16
1.3.3. Yırtılma	17
1.3.4. Burkulma	17
1.3.5. Geri Esneme	18
1.4. Konu ile İlgili Gerçekleştirilen Bilimsel Çalışmalar	18
1.5. Tez Çalışmasının Amacı	21

2. SONLU ELEMENLAR YÖNTEMİ	22
2.1. Sonlu Elemanlar Yönteminin Tanımı ve Kapsamı	22
2.2. Sonlu Elemanlar Yöntemi Genel Prosedürü	23
2.2.1. Ön İşlemler	23
2.2.2. Çözüm	23
2.3.3. İleri İşlemler	24
2.4. Sonlu Elemanlar Yönteminin Tarihçesi	24
2.5. Doğrusal Olmayan Analiz	25
2.5.1. Doğrusal Olmayan Yapı Durumu	25
2.5.2. Doğrusal Olmayan Yapı Tipleri	27
2.5.3. Zaman Eğrileri Kavramı	28
2.5.4. Geometrik Açıdan Doğrusal Olmayan Durum	29
2.5.4.1. Büyük Yerdeğiştirme ve Küçük Gerinim Davranışı	29
2.5.5. Artımsal ve Tekrarlı Çözüm Yöntemleri	35
2.5.5.1. Artımsal Yöntem	37
2.5.5.2. Newton – Raphson Yöntemi	38
2.5.5.3. Düzeltilmiş Newton – Raphson Yöntemi	40
2.5.6. Büyük Yerdeğiştirme ve Büyük Gerinim Davranışı	41
2.5.6.1. Toplam Langrange Formülasyonu	41
2.5.6.2. Güncellenmiş Langrange Formülasyonu	42
2.5.7. Malzemeye Bağlı Doğrusal Olmayan Durum	42
2.5.7.1. Giriş	42
2.5.7.2. Doğrusal Olmayan Elastik Model	43
2.5.7.3. Elastoplastik Malzeme Modeli	44
2.5.7.3.1. Akma Kriteri	44
2.5.7.3.2. İleri Akma Davranışı	47
3. CAD MODELİ	50
3.1. Ana Boru	51
3.2. Dişi Kalıp	52
3.3. Erkek Kalıp	53
4. SONLU ELEMENLAR MODELİ	54
4.1. Ön İşlemler	54
4.1.1 CAD Modelinin Transfer Edilmesi ve Sonlu	

Elemanlar Geometrik Modelinin Oluşturulması	54
4.1.2. Analiz Tipi ve Çözüm Yönteminin Seçimi	57
4.1.3. Eleman Tipinin Tanımlanması	57
4.1.4. Katsayı Özelliklerinin Tanımlanması	58
4.1.5. Malzeme Modellerinin Tanımlanması	59
4.1.6. Ağ Yapısının Tanımlanması	63
4.1.7. Bileşenlerin Oluşturulması	68
4.1.8. Düzen Parametreleri	70
4.1.9. Yükleme	71
4.1.10. Temas Tanımlamaları	72
4.2. Çözüm	73
4.3. İleri İşlemler	73
5. SONLU ELEMENLAR ANALİZLERİ	75
6. DEĞERLENDİRMELER	80
7. SONUÇ VE ÖNERİLER	87
KAYNAKLAR DİZİNİ	88
ÖZGEÇMİŞ	91

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

A	: Bükme yarıçapı	ε^P	: Plastik gerinim
D	: Boru dış çapı	ε^e	: Elastik gerinim
t	: Et kalınlığı	E	: Elastiklik modülü
L_1	: Ana boru dış çap uzunluğu	ε_G	: Gren gerinimi
L_2	: Ana boru iç çap uzunluğu		
$\mathbf{K}$	: Direngenlik matrisi		
$\mathbf{d}$	: Düşümsel yerdeğiştirme vektörü		
$\mathbf{F}$	: Düşümsel dış yük vektörü		
λ	: Zamana bağlı yük fonksiyonu		
δ_U	: Virtüel yerdeğiştirme		
$\delta\varepsilon_g$	: Virtüel gerinim		
u, v, w	: Düşümsel yerdeğiştirme vektörleri		
N	: Şekil fonksiyonu		
$\mathbf{B}$	: Eleman gerinim – yerdeğiştirme matrisi		
$\mathbf{K}_T$	: Tanjant direngenlik matrisi		
$\mathbf{K}_0$	: Lineer direngenlik matrisi		
$\mathbf{K}_U$	: Başlangıç yerdeğiştirme direngenlik matrisi		
$\mathbf{K}_\sigma$	: Başlangıç gerilme direngenlik matrisi		
σ_P	: Piola – Kirchhoff gerilme tensörü		
σ_C	: Cauchy gerilme tensörü		
ε_A	: Almansi gerinim tensörü		
E_S	: Secant elastiklik modülü		
U	: Enerji yoğunluğu fonksiyonu		
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	: Asal gerilmeler		

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
1.1. 90° Dirsek.	3
1.2. 45° Dirsek.	4
1.3. 180° Dönüş.	5
1.4. Eşmerkezli ve merkezden kaçık düşürücüler.	5
1.5. Eşit T parçası.	6
1.6. Düşürücü T parçası.	6
1.7. Başlıklar.	7
1.8. Soğuk şekil verme yöntemi ile kalıp içerisinde boru bükme yöntemi.	8
1.9. Dikişsiz dirseklerin şekillendirilmesi esnasında geometride meydana gelen değişimler.	9
1.10. Dirsek şekillendirilmesinde kullanılan fırın ve yardımcı ekipmanlar.	10
1.11. Dönüşsel çekerek boru bükme yönteminin şematik gösterimi	11
1.12. Dönüşsel çekerek boru bükme yöntemi ile bükülen boru parçaları	11
1.13. Çok düzlemli sac yapının hidroforming diyagramı	12
1.14. Su ile şekil verme süresince çokgen kesitte meydana gelen şekil değişimi.	13
1.15. (a) Boruların lazer ışını ile bükümünün şematik gösterimi ve A-A kesitinde uygulanan termal gerilmelerin yönleri. (b) Lazerle bükülmüş boru numuneleri.	14
1.16. Boru bükme operasyonunda yassılaşma kusuru.	16
1.17. Boru bükme operasyonunda et kalınlığı değişimi.	16
1.18. Boru bükme operasyonlarında dış çapta meydana gelen yırtılma.	17
1.19. Boru bükme operasyonlarında iç çapta meydana gelen burkulma.	17
1.20. Bükme operasyonu sonrası meydana gelen geri esneme.	18
2.1. Sonlu elemanlar yapısını oluşturan düğüm ve ağ yapı .	22
2.2. Doğrusal ve doğrusal olmayan davranış.	26

2.3. Zaman eğrisi için örnek yükleme durumu.	28
2.4. Doğrusal olmayan yapıya örnek: Tek elemanlı çubuk yapısı.	29
2.5. Artımsal çözüm yöntemi.	38
2.6. Newton – Raphson yöntemi.	39
2.7. Newton – Raphson yöntemi ile artımsal yöntemin birlikte kullanılması.	40
2.8. Düzeltilmiş Newton – Raphson yöntemi.	41
2.9. Doğrusal olmayan elastik malzeme modeli.	44
2.10. Yumuşak çelik için tipik bir gerilme – gerinim eğrisi.	45
2.11. Doğrusal pekleşen elastoplastik malzeme modeli.	45
2.12. Akma yüzeyi.	47
2.13. Toplam gerinim artırımının ayrıştırılması.	47
2.14. İzotropik pekleşme davranışı.	48
2.15. Kinematik pekleşme davranışı.	49
3.1. Dirsek bağlantı parçasının 3D ve kesit görünüşü.	50
3.2. Boru bükme operasyonunun gerçekleştirildiği kalıp montaj görüntüsü.	51
3.3. Ana boru geometrisi.	51
3.4. Dişi kalıp geometrisi.	52
3.5. Erkek kalıp geometrisi.	53
4. 1. Sonlu elemanlar modelleri hazırlanırken izlenen yol.	50
4.2. CAD geometrik modelinin Pro/Engineer programından transfer edilmesi.	54
4.3. ANSYS yazılımına transfer edilen CAD modeli.	55
4.4. Sonlu elemanlar geometrik modelinin son hali.	56
4.5. Analiz tipi ve çözüm yönteminin seçimi.	57
4.6. Eleman tipinin tanımlanması.	58
4.7. Katsayı özelliklerinin tanımlanması.	59
4.8. Plastik bölgenin eğrisel (a) ve doğrusal (b) olma durumu.	60
4.9. Dişi ve erkek kalıp için rijit malzeme özelliklerinin tanımlanması.	61
4.10. Ana boru malzemesi için Elasto – plastik malzeme özelliklerinin tanımlanması.	62
4.11. Ağ yapı özelliklerinin belirlenmesi.	63

4.12. Dişı kalıba ait düz kısmın ağ yapı görüntüsü.	64
4.13. Dişı kalıba ait kavis kısmının ağ yapı görüntüsü.	65
4.14. Dişı kalıba ait ağ yapı görüntüsü.	65
4.15. Ana boru için ağ yapı özelliklerinin girilmesi.	66
4.16. Ana boru içi ağ yapı görüntüsü.	66
4.17. Erkek kalıp için ağ yapı özelliklerinin tanımlanması.	67
4.18. Erkek kalıp için ağ yapı görüntüsü.	67
4.19. Parçaların oluşturulması.	69
4.20. Oluşturulan parçaların özellikleri.	69
4.21. Bileşenleri oluşturulan parçalar.	70
4.22. Düzen parametrelerinin tanımlanması.	70
4.23. Yük parametrelerinin tanımlanması.	71
4.24. Temas özelliklerinin tanımlanması.	72
4.25. Düğüm sonuçlarının alınması.	74
5.1. Ana boru üzerinde yük uygulama görüntüsü.	78
6.1. Sonuçların karşılaştırıldığı kesit noktaları.	81
6.2. İşlem süresinin 5s/10s durumlarında maksimum gerilmelerin meydana geldiği düğüm noktaları A1 ve B1 için gerilme – zaman dağılımları.	82
6.3. 5s ve 10s işlem süreleri için A1 düğüm noktasında meydana gelen gerilme – zaman dağılımı.	83
6.4. Maksimum deformasyonların saptandığı Analiz – 9 ve 10 için A1 düğüm noktasında deformasyon – zaman dağılımları.	84
6.5. Analiz – 9 ve 10 için Von – Mises gerilme dağılımları.	85
6.6. Analiz – 9 ve 10 için Von – Mises deformasyon dağılımları.	86

TABLOLAR DİZİNİ

<u>Tablo</u>	<u>Sayfa</u>
1.1. Sıcak ve soğuk şekil verme yöntemlerinin karşılaştırılması.	8
4.1. Sonlu elemanlar geometrik modeli alan ve çizgi sayıları.	56
4.2. Katsayı özellikleri.	59
4.3. Dişi ve erkek kalıp için rijit malzeme özellikleri.	61
4.4. Ana boru malzemesi için elasto – plastik malzeme özellikleri	62
4.5. Eleman tipi, malzeme ve katsayı özellikleri özeti.	63
4.6. Ağ yapısı tanımlanması sonrasında eleman ve düğüm noktası miktarları.	68
5.1. Ana boruya ait geometrik boyutlar.	75
5.2. Sonlu elemanlar geometrik modelleri.	76
5.3. Katsayı Özellikleri.	77
5.4. Ana boru malzemesi için elasto – plastik malzeme özellikleri.	77
5.5. Dişi ve erkek kalıp için rijit malzeme özellikleri.	77
5.6. Ağ yapı özellikleri.	78
5.7. Simülasyonlar ve parametre özellikleri.	79
6.1. Sonuçların alındığı düğüm noktaları.	81

1. GİRİŞ

Boru bağlantı parçaları petrol, kimya, doğal gaz, su ve elektrik, makina imalat sanayi, mimari, gemi inşa sanayi, basınçlı kaplar, uzay ve havacılık, tüp ve boru mühendisliği gibi alanlarda boru sistemlerinin birer anahtar parçası olarak görev görürler. Farklı yönlerde iki borunun birbirine olan bağlantılarını sağlarlar. Bükülen boru parçaları yalnızca gaz ve sıvı gibi akışkanların taşınması için kullanılmakla beraber metal yapılarda da kullanılır [Zeng and Li, 2002]. Metal boruların uzay ve havacılık, enerji sistemleri, otomotiv gibi mühendislik alanlarında çok fazla kullanıldıkları göz önünde bulundurulduğunda boru bükme operasyonunu daha da önemli hale getirmiştir. Boruların soğuk bükülmesi yöntemi çok eski bir yöntem olmasına rağmen hassas metal işleme prosesine dönüşmektedir ve yüksek kalite güvencesi gerektirmektedir [Jina and Lio, 2001].

Boru bağlantı parçalarının üretim yöntemleri plastik şekil verme esasına dayalıdır. Üretim sonucunda son ürün şeklinin ve özelliklerinin talepleri karşılaması gereksinimi duyulur. Üretimin şekli yüksek/düşük sıcaklık yada mekanik gerilmelere maruz kalacak bu ürünler için önemlidir [Rodrı'gueza et al, 2002]. Bükme işlemi süresince; boru malzemesi, izafi bükme yarıçapı R/D , izafi kalınlık t/D ve arzu edilen hassasiyet gibi kriterlere dikkat edilerek uygun operasyon seçilmelidir. Son ürün şeklini ve özelliklerini etkileyen faktörler: iç basınç, sürtünme koşulları, kalıp çalışma yüzeyleri, boru boyut ve malzeme özellikleri, şekil verme hızı gibi faktörlerdir. Üretimde uygun kriterlerin seçilmesi çok önemlidir [Zeng and Li, 2002].

Günümüzde boru dirsek bağlantı parçalarının imalat yöntemleri: (a) Kalıpta bükme (wind – bending) – bir bükme kalıbı kullanılarak dikişli ya da dikişsiz boru kalıp içerisinde bükülür; (b) İterek bükme (push bending) - sıcak yada soğuk bükme yöntemi; (c) Kaynaklı birleştirme – simetrik iki boru parçasının hidrolik preste bükülüp daha sonra kaynakla birleştirilerek dirsek şekline getirilmesi; (d) Hidroforming – Toroidal kesit oluşturacak şekilde kaynaklı birleştirilmiş bir yapı içerisine yüksek basınçta sıvı verilmesi, yapı kesitinin dairesel hale getirilmesi ve istenilen açılarda kesilerek dirsek parçalarının elde edilmesi; (e) Uç kısımları

birbirine paralel olmayan düz boru parçalarının kaynakla birleştirilerek dirsek imal edilmesi yöntemleri olarak sıralanabilir [Shan-Ling et al, 2005].

Düz boruyu bükme için yukarıda bahsi geçen çeşitli yöntemler olmasına rağmen bu yöntemlerin bazı dezavantajları vardır. Yapılan bu çalışmada; son ürün geometrisine uygun şekilde kesilen boru parçası metal kalıptan geçirilerek bükme işlemi gerçekleştirilmektedir.

Şekil verme esnasında boru parçasında meydana gelen deformasyon mekanizmasını anlamak ve boru yapısındaki gerilme/gerinim dağılımlarını belirlemek için bir sonlu elemanlar simülasyonu geliştirildi. Simülasyonların gerçekleştirilebilmesi için doğrusal olmayan açık (explicit) sonlu elemanlar analizi yazılımı ANSYS/LS-DYNA kullanıldı [Baudin et al, 2004].

Son yıllarda boru şekillendirme işlemlerinin sonlu elemanlar yöntemi ile analizi iyi bir şekilde belgelendirilmiştir. Yang bir otomobil aksamının hidroforming yöntemi ile bükme işlemini sonlu elemanlar analizi ile simüle etmiştir [Yang et al, 2001]. Thiruvardchelvan ve Travis; üretilen çubuk kalıp kullanarak gerçekleştirilen bir boru şişirme yöntemini analiz etmiştir [Thiruvardchelvan and Travis, 1990]. Üretilen çubuk ile hidrolik akışkan kullanımı arasındaki farklar Mac Donald ve Hashmi tarafından araştırılmış ve sonlu elemanlar analiz simülasyonu yapılmıştır [Mac Donald and Hashmi, 2001].

1.1. Alın Kaynaklı Boru Bağlantı Sistemleri

Bir boru bağlantı elemanı; bir borulama sisteminde yön yada fonksiyon değişimi amacıyla kullanılan ve sisteme mekanik olarak montaj edilen bir parçadır. Bunu başarmanın en kolay yolu gereksinim duyulan yöne doğru borunun bükülmesi olacaktır. Ancak bu işlem dış yarıçap et kalınlığını inceltirken iç yarıçap et kalınlığını kalınlaştırarak burkulmasına neden olacaktır. Bu akış direncinin ve et kalınlığı erozyonunun hızlanmasıyla sonuçlanacaktır. Bazen kullanılan ikinci bir yöntem ise boru parçalarının gereksinim duyulan açılara kesilerek kaynaklı birleştirilmesidir. Kesit alanı ve et kalınlığı değişmezken sürtünme ve türbülans kayıplarından dolayı

büyük bir verim düşüklüğü olur. Bu nedenledir ki; çoğu borulama sistemlerinde özellikle iç basınç, akış ve korozyon etkenlerinden dolayı kalıptan geçirilmiş boru bağlantı parçaları tercihen kullanılır.

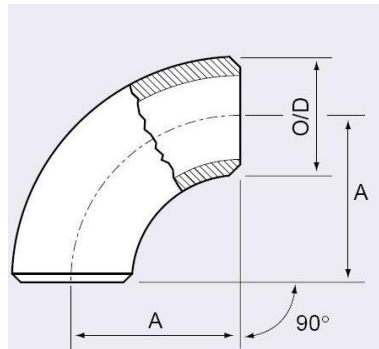
Alın kaynaklı boru bağlantı parçalarının kullanıldığı bir borulama sistemi kendine has bir çok avantaja sahiptir :

- Bir boru bağlantı parçasının boruya kaynak edilmesi kalıcı sızdırmazlık anlamına gelir.
- Boru ve bağlantı parçaları arasındaki şekillendirilen sürekli yapı sistemin tümüne mukavemet sağlar.
- Pürüzsüz iç yüzey ve kademeli yön değişimleri sayesinde basınç düşüklükleri ve türbülans azaltılır, korozyon ve erozyon etkisi en düşük seviyeye getirilir.
- Kaynaklı birleştirilmiş bir sistem minimum alanı kullanır.

Alın kaynaklı boru bağlantı sistemlerinin en çok kullanılan elemanları aşağıdaki şekilde sıralanabilir:

1.1.1. 90° Dirsekler

90° dirsek parçasının görevi bir borulama sisteminde akışın yönünü değiştirmektir. Dirsekler; yön değiştirme mesafelerine, karşılıklı yüzeylerin merkez çizgileri arasındaki mesafe, göre üç gruba ayrılırlar. Bu mesafe merkezden yüzeye olan mesafe olarak bilinir ve dirseğin bükme yarıçapına eşit olan mesafedir.

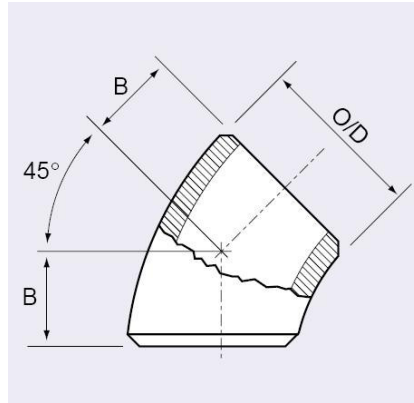


Şekil 1.1. 90° Dirsek.

Merkezden yüzeye mesafenin her zaman dirseğin anma çapına oranla 1,5 kat olan ve en yaygın kullanılan dirsek tiplerine geniş dönüşlü dirsek olarak tanımlanır. Merkezden yüzeye olan mesafe ile dirseğin anma çapının aynı olduğu dirseklere kısa dönüşlü dirsekler denir. Merkezden yüzeye olan mesafe normal geniş dönüş dirseklere kıyasla çok daha büyük olan dirsekler ekstra geniş dönüşlü dirseklerdir.. En yaygın olan durum merkezden yüzeye olan mesafenin dirseğin anma çapına oranının 3 kat olması durumudur.

1.1.2. 45° Dirsekler

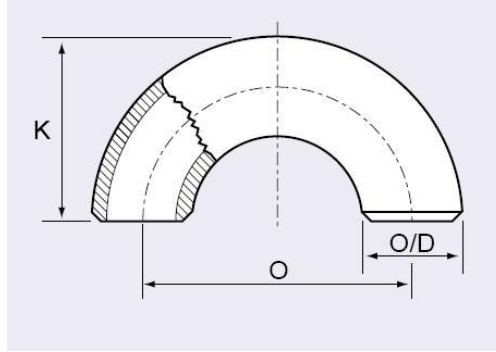
45° Dirseğin işlevi 90° olan bir dirseğin işlevi ile aynıdır. Ancak boyutu 90° ye kıyasla farklıdır. Bir 45° dirseğin dönüş yarıçapı bir geniş dönüş 90° dirseğinki ile aynıdır. Ancak merkezden yüzeye olan mesafe farklıdır. Bu mesafe her bir yüzeyin normallerinin kesiştiği noktadan yüzeylerin paraleline olan mesafedir.



Şekil 1.2. 45° Dirsek.

1.1.3. 180° Dönüşler

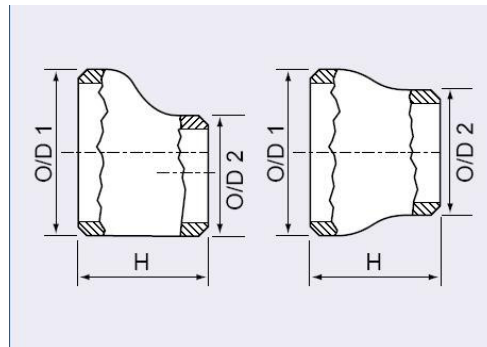
180° Dönüş boru bağlantı parçasının işlevi akışın yönünü 180° değiştirmektir. Kısa ve geniş dönüşlü olmak üzere iki tipi vardır. Her iki tipin de merkezler arası mesafeleri 90° dirsekler ile aynıdır. Bu tip bağlantı parçalarının öncelikli kullanıldıkları yerler ısıtıcı plakaları, ısı değiştiricileri ve kazanlardır.



Şekil 1.3. 180° Dönüş.

1.1.4. Eşmerkezli ve Merkezden Kaçık Düşürücüler

Eşmerkezli ve merkezden kaçık düşürücülerin amacı boru hattını büyük çaptan küçük çapa düşürmektir. Bunun sonucunda hat içerisinde basıncın yükseleceği açıktır. Merkezden kaçık düşürücüler için şekilden de görüleceği üzere; büyük çap ile küçük çap merkez çizgilerinin arasında bir kaçıklık vardır.

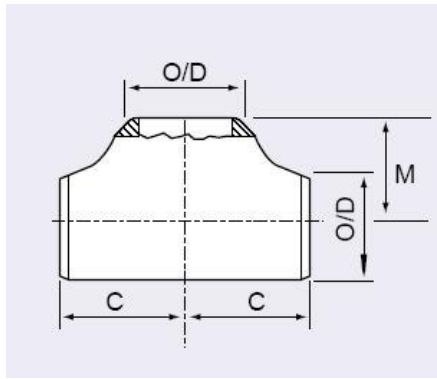


Şekil 1.4. Eşmerkezli ve merkezden kaçık düşürücüler.

Eşmerkezli düşürücülerde ise büyük çap ve küçük çap merkez çizgileri aynıdır. Eşmerkezli düşürücüler daha kolay imal edilebilir olmasına rağmen merkezden kaçık düşürücüler kadar çok fonksiyonlu değildir.

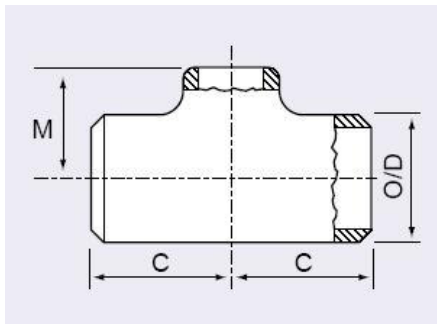
1.1.5. Eşit ve Düşürücü T Boru Bağlantı Parçaları

Bir T boru bağlantı parçasının işlevi ana akışa 90° yönünde bir kol açmaktır. Eşit T parçasının tüm çapları aynıdır.



Şekil 1.5. Eşit T parçası.

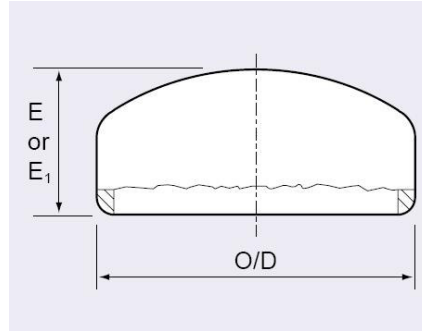
Düşürücü T parçalarında açılan kol çapı ana çaptan daha küçüktür.



Şekil 1.6. Düşürücü T parçası.

1.1.6. Başlıklar

Başlıkların boru hattındaki görevi hattın kapatılmasıdır. Bu başlığın açık boru ucuna kaynaklı montajı ile sağlanır.



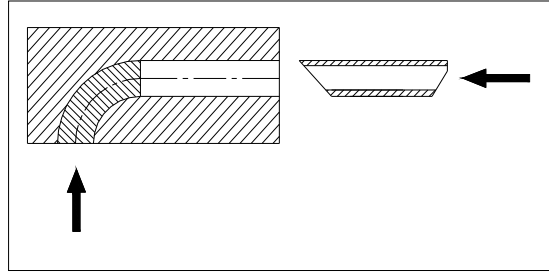
Şekil 1.7. Başlıklar

1.2. Boru Bükme ve Dirsek Şekil Verme Yöntemleri

1.2.1. Kalıp İçerisinde İterek Soğuk Bükme Yöntemi

Kalıp içerisinde iterek şekil verme yönteminde boru malzemesi oda sıcaklığında şekillendirilerek dirsek formu verilir. Borunun soğuk olarak şekil verilmesinin en önemli nedenlerinden birisi malzemedir. Borular standart boyutlarla kullanılır. Boru bağlantı parçalarının sıcak şekillendirilmesi çoğunlukla standart boyutta olmayan boru malzemesi gerektirir ve bu da zaman kaybına neden olur.

Gerilme hesaplamalarından; gerilmenin en çok bükülme yaşanan yerde olduğu belirlenmektedir. Bu yüzden bu bölgenin güçlendirilmesi önemli hale gelmektedir. İç yarıçaptaki et kalınlığı dış yarıçapa nazaran her zaman daha kalındır. Sıcak şekil verme yöntemi ile et kalınlığı dirseğin tüm bölgelerinde eşit kalabilir. Sonuçta dirsek daha kalın et kalınlığında üretilmek zorundadır. Bu da maliyetlerin artması manasına gelir .



Şekil 1.8. Soğuk şekil verme yöntemi ile kalıp içerisinde iterek boru bükme yöntemi.

Şekilden de görüleceği üzere; son ürün dirsek boyutuna uygun olacak uzunlukta kesilen boru parçası kalıp içersine itilmektedir. Kalıp içersine yerleştirilen bir erkek malafa sayesinde borunun bükülmesi sağlanır. Soğuk şekil verme yöntemi bir sonraki kısımda bahsedilecek olan sıcak şekil verme yöntemine kıyasla aşağıda bahsi geçen avantajlara sahiptir.

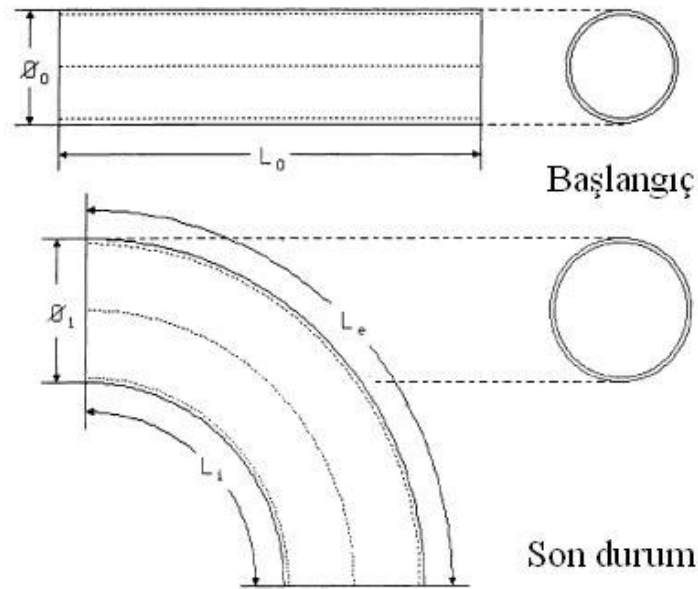
- ✓ 10 kat enerji tasarrufu
- ✓ 4 kat verimlilik
- ✓ Mükemmel boyut ve yüzey hassasiyeti
- ✓ Çevreye ve insan sağlığına zararsız

Tablo 1.1. Sıcak ve soğuk şekil verme yöntemlerinin karşılaştırılması.

Proses Tipi	Soğuk	Sıcak
Gerekli işçi sayısı	1 – 2 kişi	7 – 8 kişi
Tekrarlı işlemler	Gerekmiyor	Gerekliyor
Elektrik tüketimi	11 – 50 kw	300 – 500 kw
Şekil verme hızı	0.2 – 4 dk/adet	1 – 10 dk/adet
Çalışma ortamı	Rahat, temiz ve güvenli	Yüksek sıcaklık ve güçlü manyetik alan etkisi, duman tufal v.d

1.2.2. Sıcak Şekillendirme Yöntemi ile Boru Bükme Yöntemi

Modern sıcak şekil verme yöntemleri; son ürünün şekil ve özelliklerini sağlamada gerekli olan iki temel husus: plastik şekil verme ve ısısal dönüşüm ilkelerinin kombinasyonu üzerine temellendirilmiştir. Bu tip bir işletim; yüksek ısısal yada mekanik gerilmelere maruz kalacak parçalar için tasarlanmış ürünlerde kritik özellik taşır. Dikişsiz dirseklerin özel bir durumu için; yüksek basınç boru hatlarında kullanılıyor olmalarından dolayı fiziksel ve mekanik özellikleri çalışma şartlarının gereksinimlerini karşılıyor olmalarıdır.



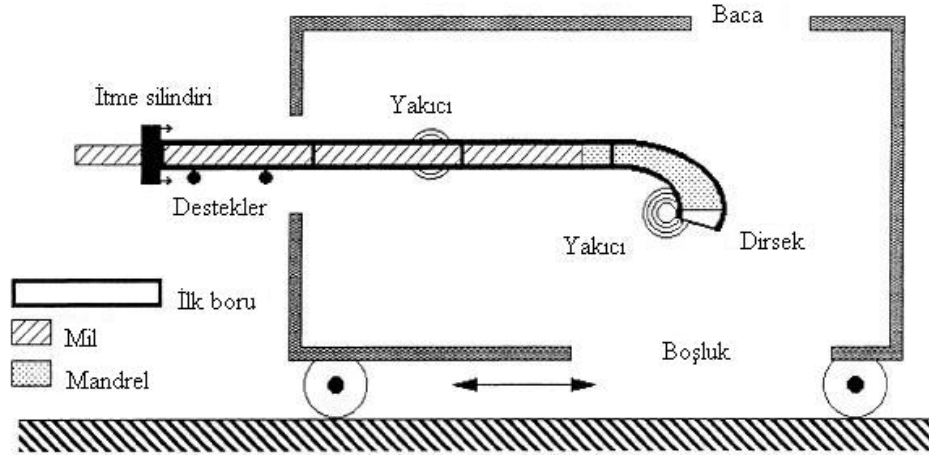
Şekil 1.9. Dikişsiz dirseklerin şekillendirilmesi esnasında geometride meydana gelen değişimler [Rodrı'gueza, 2002].

İşlem tamamıyla bitirildiğinde dirsek parçasının dış uzunluğu (L_e) ; ilk boru parçası uzunluğu (L_0) ile yaklaşık olarak aynı değere sahiptir. Ancak iç çap işlem sırasında basma yönünde gerilmelere maruz kaldığından iç çap uzunluğunda (L_i) kısalma meydana gelecektir. Et kalınlığı büyük oranda değişime uğramamaktadır. Dirsek parçasının dış çapı ($\varnothing_1$) ilk borunun dış çapının genişlemesi ile elde edilir.

Dirseklerin şekillendirilmesinde yatay bir pres kullanılır. Dirsek şekli uzatma milinin ucuna konumlandırılmış bir malafa vasıtası ile sağlanır. Malafa yüksek

sıcaklığa mukavim bir malzemeden ve son ürün dirsek parçalarının geometrisinin elde edilmesine yönelik olarak şekil verilmiş özelliktedir [Rodrı'gueza et al, 2002].

Şekil 1.10. dirsek şekil verme operasyonunun gerçekleştirildiği sisteme ait diyagramı göstermektedir.



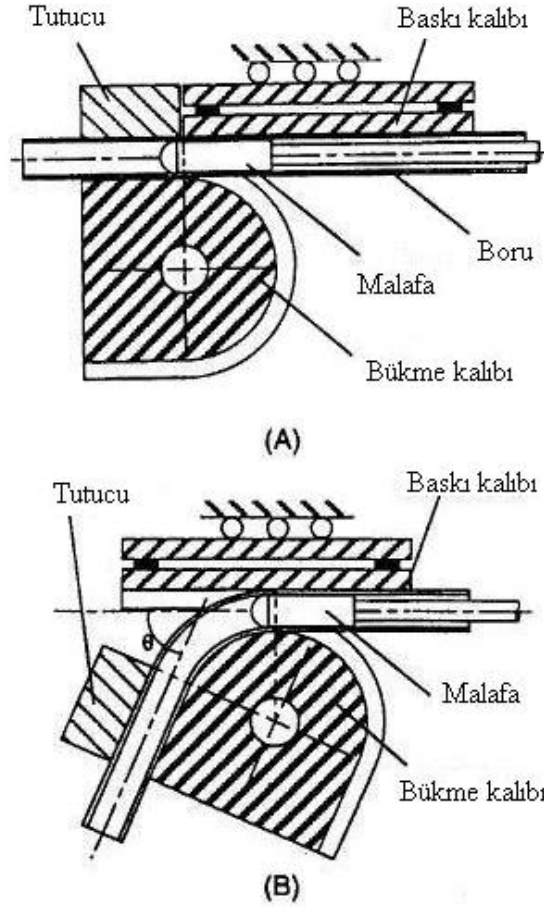
Şekil 1.10. Dirsek şekillendirilmesinde kullanılan fırın ve yardımcı ekipmanlar [Rodrı'gueza, 2002].

Ana boru dirsek geometrisine uygun olmalıdır. Fırın içi düşük karbonlu çelikler için 1000 °C de tutulmaktadır. Bu yöntemle üretilen dirsek parçaları için optimum kalite; fiziksel ve mekanik özelliklerin mikroyapıya olan bağımlılıklarından dolayı mikroyapı kontrolüdür. Bu kontrol; kritik proses değişkenlerinin sistematik ölçümü ve kayıt altına alınması ile yapılabilir. Sıcak şekil vermede meydana gelen proses değişkenlerinin hepsinin içinde sıcaklık en büyük öneme sahip olanıdır. Bunun nedeni ısısal evrelerin dirsek parçalarının mikroyapılarını değiştiriyor olmalarıdır.

1.2.3. Dönüşel Çekerek Boru Bükme Yöntemi

Dönüşel çekerek boru bükme yöntemi; kalıplama kolaylığı ve düşük maliyetinden ötürü endüstride en çok kullanılan ve en esnek olan boru bükme yöntemlerinden birisidir. Bu yöntemde minimum kalıp gereksinimi bükme kalıbı (boru bu kalıbın etrafında dönerek bükülür) ve kelepçe kalıptır (boruyu bükme kalıbı etrafında döndüren). Kalın etli boruların geniş yarıçapta bükülme işlemi bu kalıplarla

sağlanabilir. Ancak ince etli borularda büküm esnasında oluşabilecek hataların engellenmesi için erkek malafa da kullanılır.



Şekil 1.11. Dönüştürücü çekerek boru bükme yönteminin şematik gösterimi [Wang, 2001].

Dönüştürücü çekerek boru bükme yönteminde göz önünde bulundurulması gereken bir diğer nokta; kalıplamanın önemli olması kadar makina/tezgah, kalıplama – makine uyumu ve yağlamadır.



Şekil 1.12. Dönüştürücü çekerek boru bükme yöntemi ile bükülen boru parçaları.

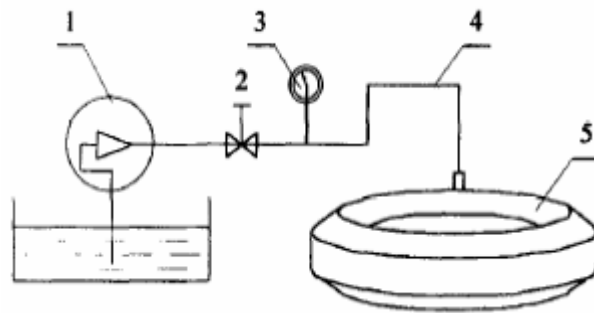
1.2.4. Su ile Şekil Verme Yöntemi

Mekanik olarak boru bükme yöntemlerinde iç yarıçaptaki burkulma ve dış yarıçaptaki incelmenin meydana gelmemesi neredeyse kaçınılmazdır. Modern endüstrinin gelişmesi ile boru hatlarının çapları gittikçe büyümeye başlamıştır ve bu nedenle büyük çaplı dirsekler için yeni imalat yöntemleri geliştirmeye gereksinim duyulmuştur [Yuan et al, 1998]. Küresel basınçlı kaplar için kalıpsız hidroforming yöntemi 1982 yılında uygulandığından bu yana teorik analiz ve mühendislik uygulamalarında bir çok çalışma yapılmış ve başarıyla sonuçlandırılmıştır [Wang et al, 1989]. Bu yöntemle üretilen dirseklerin maksimum dış çapı 9.4 metre ve et kalınlığı 24 mm dir.

Bu yöntemin safhalarını aşağıdaki şekilde sıralayabiliriz :

1. Çok düzlemli dairesel kesitli bir sacın montajı ve kaynak edilmesi
2. Kaynakla birleştirilen bu yapının sıvıyla doldurulması ve iç basıncının arttırılması
3. İç basınç artışı ile çokgen kesitin plastik deformasyon etkisi ile dairesel kesit haline gelmesi
4. İhtiyaca göre bu yapının 30 – 60 – 90 °C de kesilerek dirsek parçalarının elde edilmesi

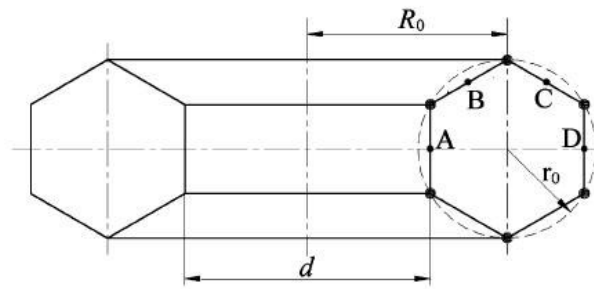
Şekil 1 de bahsi geçen hidroforming yönteminin diyagramı gösterilmiştir.



Şekil 1.13. Çok düzlemli sac yapının su ile şekil verme diyagramı [Yuan, 1998].

Geleneksel teknolojik yöntemlere kıyasla hidroforming yönteminin avantajları :

- ✓ Hammadde olarak boruya ihtiyaç yoktur. Bu sebeple maliyetler azalır, kalıp – ekipman ihtiyacı ortadan kaldırılır ve büyük çaplı küçük bükme yarıçaplı dirsekler imal edilebilir.
- ✓ Hammadde sac olduğundan kesme işlemi basittir. Toleranslar kolaylıkla sağlanır. Montaj ve kaynak edilebilirlik zor değildir.
- ✓ Üretim döngüsü kısa, maliyetler düşüktür.
- ✓ Hidroforming üretim teknolojisi ile kalıntı gerilmeler azalır.

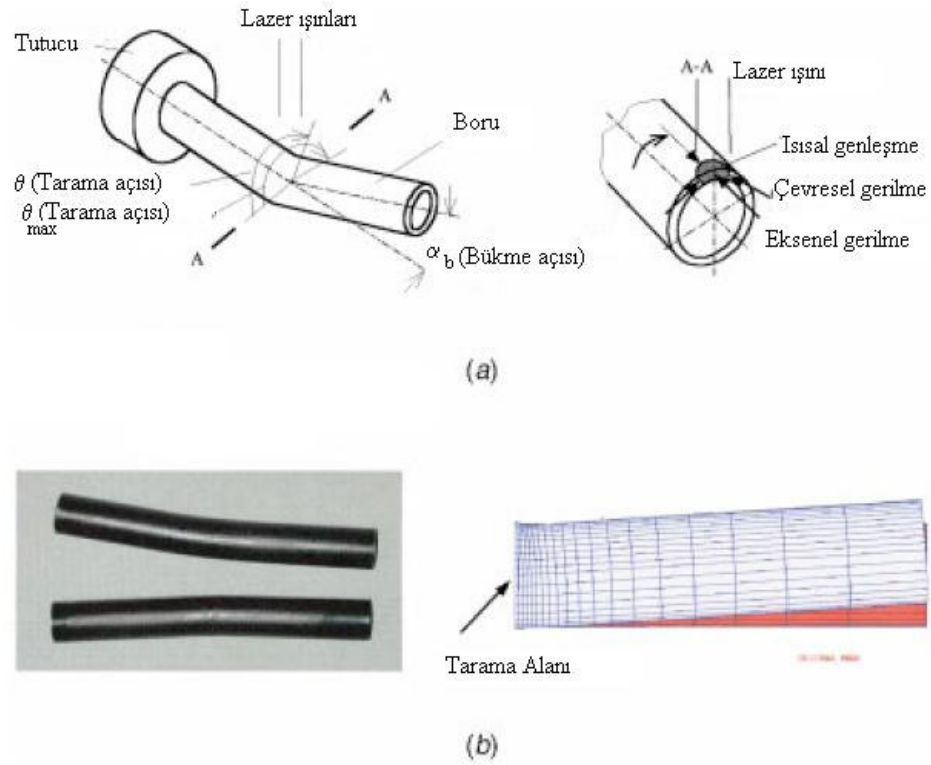


Şekil 1.14. Su ile şekil verme işlem süresince çokgen kesitte meydana gelen şekil değişimi [Yuan, 1998].

1.2.5. Lazerle Bükme Yöntemi

Boruların lazerle bükülmesinin mekanik yöntemlerle bükme işlemlerine göre avantajlı yanları vardır. Sert bükme kalıplarına yada dış kuvvetlere gereksinim yoktur. Böylece az miktarda ve prototip üretimler için boru bükme maliyeti çok büyük oranda düşürülmektedir. Et kalınlığındaki azalma ihmal edilebilir ve daha az yassılaşma meydana gelir. Lazer ışınının iletimindeki esneklik ve sayısal kontrol sistemleri ile prosesin otomasyonu daha da kolaylaştırılabilir. Bükümüne müteakip ara tavlama işlemleri gereken malzemeler için çok uygun bir yöntemdir [Li and Yao, 2001].

Boruların lazer ışını ile bükümünün genellikle yığma mekanizması (upsetting mechanism) ile yapıldığı bilinmektedir. Şekil.1.15' de gösterilen dairesel tüpü göze alınız.



Şekil 1.15. (a) Boruların lazer ışını ile bükümünün şematik gösterimi (solda) ve A-A kesitinde uygulanan termal gerilmelerin yönleri. (sağda) (b) Lazerle bükülmüş boru numuneleri [Li, 2001].

Boru parçası dış çapı lazer ışınının etkisi ile ısıtıldığında 180 °C yada daha fazla miktarda döner. Lazer ışınının kalınlığının boru et kalınlığından fazla olacak şekilde seçilmesi gerekir. Sonuç olarak; borunun lazer ışını ile taranan bölgesi kalınlık yönünde tamamiyle ısıtılır ve bu bölge plastik deformasyona uğrar. Malzemenin çevrenmesiyle oluşan ısısal genleşmeye bağlı olarak et kalınlığı artar. Taranan bölgedeki kısılma (borunun eksenel yönü) adım adım lazer ışınına doğru bükülmesine neden olur .

Boruların lazerle bükümü büyük oranda iç çaptaki eksenel plastik kısılma ile mümkün olduğundan dış çaptaki çekme deformasyonu mekanik bükme işlemlerine nazaran çok daha küçüktür. Proses parametrelerinin de uygun şekilde düzenlenmesi ile de dış çaptaki et kalınlığının incilmesi büyük oranda azalacak yada neredeyse ihmal edilecek boyutta olacaktır. Lazerle bükmede

yassılaşıma sorunu mekanik bükmeye nazaran daha düşüktür. Bunun nedeni lazerli bükmede kalıp kullanılmaması ve boru dış çapında çekme gerilmesinin büyük oranda düşürülmesidir [Steen and Podschies, 1998] .

1.3. Boru Bükme Operasyonlarında Meydana Gelen Kusurlar

Metallerin bükülmesi metal işleme endüstrisinde en çok kullanılan işlemlerden biridir. Açıkça bilinmektedir ki; bükme işlemi metalin dış kısmında çekme ve iç kısmında basma yönünde etki yaratır. Malzeme genellikle anizotropik yapı göstermekte ve sonuç olarak nötr eksen metal kesitinin tam orta noktasından geçmemektedir. Nötr eksenin konumu bükme operasyonu geometrisine ve malzemenin mekanik özelliklerine bağlıdır. Buna ilave olarak borunun sıklıkla belirli bir geometriye bükülmesi arzu edilir [Al-Qureshi and Russo, 2002].

Bükme işlemi boyunca boru üzerinde dikkate değer düzlem kaçıklıkları ve hatalar meydana gelir. Boru bükme operasyonlarındaki kısıtlayıcı durumlar: kesit alanı kaçıklığı, burkulma, et kalınlığı farklılığı, geri esneme ve yırtılma [Agarwal, 2000]. Kusurların analiz edilmesi ve düzeltici önlemlerin alınması; iyi bir gözlem yeteneğine ve operasyondaki tüm değişkenlerin (tezgah, takım, malzeme ve yağlama) bilinmesine dayanır [Granelli, 2006].

1.3.1. Yassılaşıma

Dairesel boruların bükülmesinde kesitin yassılaşması ve neredeyse oval bir hal alması çok iyi bilinir. Dış çapta meydana gelen çekme gerilmesi boru kesitinin dairesel halde kalmasını engelleyecek noktaya gelmesi durumunda yassılaşıma olur [Granelli, 2006]. Boru kesitinin yassılaşmasına özellikle gerinim pekleşme üsteli ve plastik anizotropi malzeme özellikleri etki eder [Stachowicz, 2000]. Bükme yarıçapının artırılması, et kalınlığı artırılması yada dış çapın düşürülmesi ile yassılaşıma engellenebilir. Ancak bu parametreler çoğunlukla tasarım aşamasında

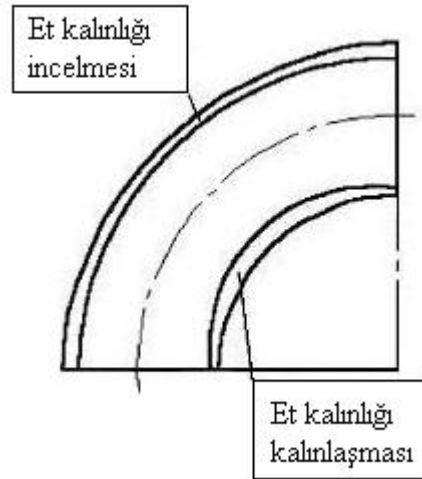
kesinleştüğinden operasyonda ekstra bir takım yada malafa kullanılması tek alternatif çözümdür.



Şekil 1.16. Boru bükme operasyonunda yassılaşıma kusuru [Granelli, 2006].

1.3.2. Et Kalınlığı Değişimi

Bükme momenti operasyon boyunca iç ve dış yarıçapta eksenel kuvvetler oluşturur. Bu kuvvetlerin etkisinde basma ve çekme gerilmeleri meydana gelir ve dış yarıçapta incelme iç yarıçapta kalınlaşma olur [Agarwal, 2000].



Şekil 1.17. Boru bükme operasyonunda et kalınlığı değişimi [Jina, 2001].

1.3.3. Yırtılma

Boru dış çapında meydana gelen çekme gerilmesi boru malzemesinin akma çekme gerilmesini aşması durumunda yırtılma meydana gelir [Agarwal, 2000]. Başka bir deyişle yırtılma; boru malzemesinin esneme sınırının üzerine çıkılması durumunda oluşur. Malzeme, kalıplama, kurulum şartları ve yağlama gibi etmenler değerlendirmede ilk gözden geçirilmelidir [Granelli, 2006].



Şekil 1.18. Boru bükme operasyonlarında dış çapta meydana gelen yırtılma [Granelli, 2006].

1.3.4. Burkulma

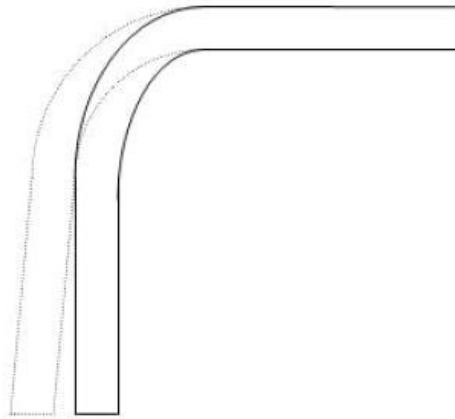
Operasyon süresince boru iç çapında meydana gelen dalgalanma şeklindeki kusurdur. Şekil 1.4’ ten görüleceği üzere çoğunlukla büyük boru çapları ve düşük et kalınlıklarında meydana gelir [Yang and Lin, 2004]. Yağlama, itme basıncı ve hızı, malzeme özellikleri, kalıplama gibi sistem parametreleri gözden geçirilmelidir [Agarwal, 2000].



Şekil 1.19. Boru bükme operasyonlarında iç çapta meydana gelen burkulma [Yang, 2004].

1.3.5. Geri Esneme

Bükme operasyonunun bitirilmesi ve malafanın boru içerisinden çıkarılmasından sonra boru malzemesinin kendi elastiklik özelliğinden dolayı geri esneme yapması yada başka bir deyişle toparlanması durumudur. Bükme işlemi boyunca meydana gelen iç gerilmeler yük boşaltıldıktan sonra kaybolmaz. Dış çap kalıntı çekme gerilmesine ve iç çap kalıntı basma gerilmesine maruz kalmaya devam eder. Sonuç olarak bu kalıntı gerilmeler bükülen boruda geri esnemeye neden olacak geri bükme momentini oluşturur. Boru; iç bükme momenti sıfırlanıncaya kadar geri esnemeye devam eder. Geri esneme açısı; bükme açısı, boru malzemesi, boru geometrisi, malafa, tezgah ve takıma bağlı olarak değişim gösterir. Pratikte geri esneme açısı hesaplanır ve bu miktarda hesaba katılarak boru bükme operasyonu gerçekleştirilir [Agarwal, 2000].



Şekil 1.20. Bükme operasyonu sonrası meydana gelen geri esneme.

1.4. Konu ile İlgili Gerçekleştirilen Bilimsel Çalışmalar

Günümüze kadar yapılan bilimsel çalışmalar daha çok dirsek parçalarının imalat yöntemleri ve boru/tüp bükme analizleri üzerine olmuştur. Analizler analitik yada sonlu elemanlar yöntemleri ile gerçekleştirilmiştir.

Andres Rodriguez ve arkadaşlarının yaptığı bir çalışmada sıcak şekil verme yöntemi ile üretilen dikişsiz dirsek parçaları ile alakalı olarak; K tipi termokupullar

şekillendirilecek her bir boru parçasının farklı bölgelerine yapıştırılmış ve elde edilen veriler bilgisayara aktarılmıştır. Yapılan bu çalışmada ısıtmanın yapıldığı fırın bacasının kapatılması ve ısıtıcıların yerlerinin değiştirilmesi ile ısıtma işlemi değiştirilmiştir. Bu değişiklikler ile dirsek parçalarındaki ısısal düzensizlikler giderilmiş, ısıtma işlemi daha homojen ve hızlı hale getirilmiş, ve bunun sonucunda dirsek parçalarının mikroyapı, et kalınlığı daha kararlı hale getirilerek verimlilik arttırılmıştır [Rodrigueza, 2002].

Salas Zamarripa ve Guerrero Mata ise dirseklerin sıcak şekil verme yöntemi ile imalatının sonlu elemanlar modellemesini gerçekleştirmişlerdir. Gerilme dağılımları ve bu dağılımların büyüklükleri, et kalınlığı homojenliği ve son ürün şekli gibi ana parametreler göz önünde bulundurularak birden fazla kalıp modellemesi yapmışlardır [Zamarripa et al, 2003].

Shijian Yuan ve arkadaşlarının yaptığı bir çalışmada; büyük çaplı dirsek parçalarının konvensiyonel yöntemlerle imalatları sırasında oluşan zorlukların su ile şekil verme yöntemi ile üstesinden gelmişlerdir. Halka yapı analiz edilmiş ve final basınç miktarı belirlenmiştir. Yerdeğiştirme, deformasyon dağılımı, kesitin burkulması ve değişim varyasyonları tartışılmıştır. Sonuç olarak, büyük çaplı dirsek parçalarının hidroforming yöntemi ile üretilebilirliği ve bu üretim yöntemi için özel ekipman ve kalıp malzemelerine ihtiyaç duyulmayacağı deneysel olarak da kanıtlanmıştır [Yuan et al, 2001].

Eksenel kuvvetler ve iç basıncın bileşiminden oluşan bir tüp bükme operasyonunu inceleyen Yuansong Zeng ve Zhiqiang Li; tüp dış yüzeyine etkiyen eksenel kuvvetler ve iç basınç ile sürtünme ve itme mesafesinin tüp deformasyonu üzerindeki etkilerini mekanik yollarla ve deneylerle analiz etmişlerdir. İncelenen bu yöntemde alüminyum tüpün dış çapına eşit bükme yarıçapı ile iterek bükme operasyonu başarıyla gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışma sonucunda; (a) Bükülme bölgesinin iç kısmında oluşacak yassılaşma ve burkulma problemi iç basıncın düşük olduğu durumda meydana geldiği; artan iç basınç miktarına bağlı olarak burkulma ve yassılaşmanın da düşüş gösterdiği; (b) tüp dış yarıçapında meydana gelebilecek çatlak oluşumundan dolayı sadece düşük

bükme yarıçaplı işlemlerin yapılabileceği; (c) Tüp çapı ile bükme yarıçapının eşit olması durumunda iterek bükme işleminin daha uygun olduğu deneylerle kanıtlanmıştır [Zeng and Li, 2002].

S.Baudin ve arkadaşlarının yaptığı bir çalışmada düz bir boru parçasından dirsek şeklinde bir kesitin elde edilmesi için yeni bir şekil verme yöntemi geliştirilmiştir. İşlemden boru parçası kalıp içerisine bir koç tarafından itilmekte ve boru parçasının kalıp içerisinde şekil verme sırasında oluşacak burkulma ve buruşmasının önlenmesi amacıyla da üretilen dolu malzeme (rot) kullanılmıştır. İşlem sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak simülasyonu yapılmıştır.

İç basınç oluşturulmasının karşılaştırılması amacı ile üretilen dolu malzeme kullanımı ve boru içerisinde hidrolik akışkan ile basınç oluşturulmuş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Bu çalışma sonucunda; yeni şekil verme işleminin, özellikle üretilen malzemenin yüksek oranda doğrusal olmayan davranış göstermesine bağlı olarak, sonlu elemanlar modelinin simüle edilmesinde büyük zorluklarla karşılaşmıştır. Karşılaşılan bu zorlukların ana kaynağı kontak algoritmalarının doğru şekilde oluşturulabilmesidir. Bu zorlukların aşılabilmesi için daha gelişmiş temas algoritmaları ve üretilen dolu malzemelerinin kullanılması gerekmektedir. Bu problemler aşıldığında; simülasyonlar problemi daha iyi temsil edecek ve bahsi geçen bu şekil verme işleminin daha iyi tasarlanacağı düşünülmektedir [Baudin et al, 2004].

Tüp ve boru bükme işlemi esnasında meydana gelen plastik deformasyon analizi N.C. Tang' ın yapmış olduğu bir çalışmada ele alınmıştır. Bükme işlemindeki 7 yaygın problem; (a) Bükme gerilmeleri; (b) Et kalınlığı değişimi; (c) Tüp kesitindeki büzülme oranı; (d) Tarafsız eksenin sapma miktarı; (e) Boru besleme miktarı; (f) Bükme momenti ve (g) Yassılaşıma üzerine bazı pratik formüller geliştirilmiştir. Geliştirilen bu formüllerin deneysel sonuçlara benzer olacağını göstermek için bir deneysel çalışma da yapılmıştır. Tüp bükme işlemi esnasında meydana gelen olayların plastik akış teorisi kullanılarak açıklanması gerekliliği belirtilmiştir [Tang, 2000].

1.5. Tez Çalışmasının Amacı

Yapılan bu çalışma borulama sistemlerinde kullanılan paslanmaz çelik dirsek parçaları ile ilgilidir. Bu çalışmanın 3 temel amacı vardır:

1. Dirsek boru bağlantı parçalarının metal şekillendirme işlemi ile imalatı boyunca boru parçasında meydana gelecek gerilme ve deformasyonların sonlu elemanlar yöntemi ile analizini yaparak simülasyonunu gerçekleştirmek.
2. Metal şekillendirme işlemi boyunca prosesi etkileyen parametrelerini irdelemek (işlem süresi, sürtünme, kalıp toleransları v.d.)
3. Ayrıca bu çalışma ile, dirsek bağlantı parçalarının soğuk şekillendirilmesi işleminde proses boyunca ana boru yapısının davranışı, proses parametrelerinin boru yapısı ve gerilme/gerinim dağılımlarının üzerindeki etkileri üzerine bilgi sahibi olmaktır.

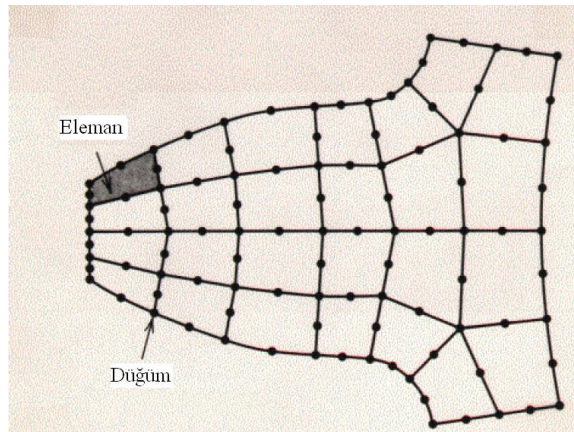
2. SONLU ELEMENLAR YÖNTEMİ

2.1. Sonlu Elemanlar Yönteminin Tanımı ve Kapsamı

Sonlu elemanlar yöntemi (SEY); karmaşık olan problemlerin sonlu sayıda davranımı bilinen parçaya bölünerek, çözümün bulunduğu bir çözüm şeklidir. Sayısal bir yöntem olup özellikle katı cisimlerin mekaniği, akışkanlar mekaniği, ısı transferi ve titreşim gibi karmaşık mühendislik problemlerinin çözümünde bilgisayar ortamında kullanılan gelişmiş bir yöntemdir [Yıldız ve Karlı, 2003].

Analitik çözüm yöntemlerinin mümkün olamadığı karmaşık geometri, yük ve malzeme problemlerinin çözümünde sayısal bir çözüm olarak SEY kullanılır. Başka bir ifade ile SEY; bir tasarım üzerindeki yük koşullarını simüle etmek ve tasarımın bu koşullara olan tepkisini belirtmektir [Liu, 2003].

SEY; “düğüm” olarak adlandırılan noktaların oluşturduğu kompleks yapıda olan “ağ yapısını” kullanır. Ağ yapı belirli yükleme koşullarına karşı nasıl bir davranış göstereceğini belirleyen malzeme ve yapı özelliklerine sahiptir. Düğümler yapı üzerindeki gerilme seviyelerine uygun yoğunlukta yerleştirilir. Büyük gerilmelerin meydana geleceği bölgeler daha az gerilme meydana gelecek olan bölgelere göre daha fazla düğüm içermelidir. Yapı itibari ile kırık, çatlak, köşe, kavis bulunan malzemelerde yük sonucu yüksek gerilme oluşma olasılığı vardır [Ivanco, 1997].



Şekil 2.1. Sonlu elemanlar yapısını oluşturan düğüm ve ağ yapısı [Liu, 2003].

SEY' nin kullanımındaki temel amaçlar aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Prototip test miktarlarının azaltılması
- Prototip testlerin yapılmasının uygun olmadığı tasarım analizlerinin simülasyonu
- Maliyetlerin düşürülmesi ve zamandan tasarruf sağlanması
- Daha güvenilir ve daha kaliteli tasarımların yapılabilmesi

2.2. Sonlu Elemanlar Yöntemi Genel Prosedürü

Fiziksel bir problem SEY ile formülasyonundaki temel adımlar tüm analizler için (yapısal, ısı transferi, akış analizi, elektromanyetik, biyomekanik v.d.) aynıdır. Bu adımlar ticari sonlu elemanlar yazılım paketlerinde somutlaştırılmıştır.

2.2.1. Ön İşlemler

Ön işlemler adımı genellikle modelin tanımlanmasını ve aşağıdaki süreçleri kapsar :

- Problemin geometrik modelinin tanımlanması
- Kullanılacak eleman tipinin belirlenmesi
- Elemanların malzeme özelliklerinin belirlenmesi
- Elemanların geometrik özelliklerinin belirlenmesi (uzunluk, alan gibi)
- Ağ modelinin oluşturulması
- Sınır şartlarının belirlenmesi
- Yüklerin belirlenmesi

2.2.2. Çözüm

Çözüm adımı boyunca sonlu elemanlar yazılımı matris formundaki cebri denklemleri bir araya getirir ve bilinmeyen değerleri hesaplar. Hesaplanan değerler

reaksiyon kuvvetleri, gerilmeler, deformasyon miktarlarının hesaplanmasında kullanılır. Bir sonlu elemanlar modelinin onbinlerce denklem ile temsil edilmesi sıradışı olmadığından hesap süresi ve bilgi depolama ihtiyacının karşılanabilmesi için özel çözüm teknikleri kullanılır.

2.2.3. İleri İşlemler

Çözüm sonuçlarının analizi ve değerlendirilmesi ileri işlemler olarak adlandırılır. İleri işlem yazılımı bir SE çözümünden seçili sonuçları sınıflandırma, yazma ve boyama gibi özellikleri kapsar. Buna ilave olarak aşağıdaki süreçler de ileri işlemler adımıyla yapılabilmektedir [Hutton, 2004] :

- Büyüklüğüne göre eleman gerilme değerlerinin sınıflandırılması
- Denklik kontrolü
- Emniyet katsayılarının kontrolü
- Deformasyona uğramış yapının resmedilmesi
- Model davranışının animasyonu
- Renk kodlarına göre sonuçların dökümü

2.4. Sonlu Elemanlar Yönteminin Tarihçesi

SEY' nin matematiksel kökleri yarım asırlık bir tarihe uzanır. Lord Rayleigh ve Ritz diferansiyel denklemlerin çözümlerini genelleştirmek için enterpolasyon fonksiyonlarını kullandı. Galerkin de çözüm iyi aynı konsepti kullanmıştır. Galerkin yöntemi SE için güçlü bir temel sunarken 1940'lı yıllarda Courant “parçalı – süreklilik” fonksiyonlarını bulmuş ve bu sayede SE gerçek bir başlangıca sahip olmuştur.

1940' lı yılların sonunda uçak mühendisleri jet motorlarını keşfetmekle meşgullerdi ve uçak gövde yapılarının daha yüksek hızlarda daha fazla yük taşıyabilmeleri için araştırmalar içerisindeydiler. Modern bilgisayarların faydası olmaksızın esneklik yöntemi olarak da bilinen ve kuvvetlerin analizlerinin yapılabildiği matrix yöntemlerini gerçekleştirebilmişlerdir. En çok kullanıldığı hali

ile sonlu elemanlar (yerdeřiřtirme yöntemi olarak da bilinir) sistemin tüm yerdeřiřtirme değerlerinin bilinmedięi ve uygulanan kuvvetlere bir yanıt olarak doęduęu yöntemdir.

Sonlu elemanlar terimi ilk olarak 1960'lı yıllarda Clough tarafından düzlem gerilme analizlerinde kullanılmıştır. 1960 ve 1970'li yıllar süresince plaka sac bükümü, basınçlı kaplar ve elastik yapısal analizlerdeki üç boyutlu problemlerin yanı sıra ısı transferi ve akış analizleri için de kullanılmıştır. Aynı yıllarda ilk ticari yazılım olan ve Birleşik Devletler'in uzay araştırmaları ile bağlantılı NASTRAN ticari yazılımı geliştirilmiştir. Daha sonraki yıllarda ANSYS, ALGOR, COSMOS v.d. gibi ticari yazılımlar da piyasaya sürülmüştür [Hutton, 2004].

2.5. Doğrusal Olmayan Analiz

2.5.1. Doğrusal Olmayan Yapı Durumu

Çok sayıda mühendislik problemi doğrusal yaklaşım ile çözülebilir. SEY' de yapısal davranış:

$$Kd = F$$

Lineer olarak tanımlanabilir. Bu matris formatında:

- K : Yapının direngenlik matrisi
- d : Düzümsel (nodal) yerdeřiřtirme vektörü
- F : Düzümsel dış yük vektörü

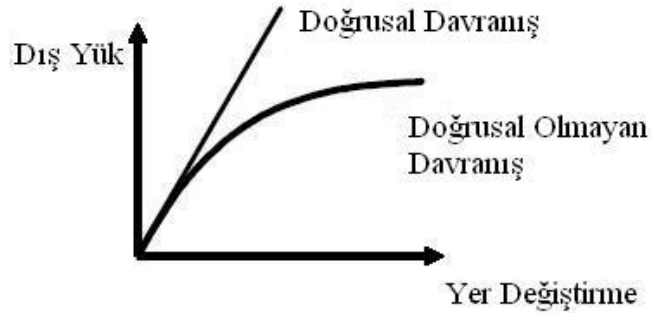
Lineer problemlerin karakteristikleri

- Yerdeřiřtirmeler yük ile orantılıdır.
- Yapının direngenliği yük seviyesinden bağımsızdır.

Her ne kadar gerçekte yapıların davranışı doğrusal olmasa da yer değiştirmeler ile yükler arasında bir orantı yoktur. Doğrusal olmayan yapı durumu genellikle çoğu pratik problemde ihmal edilebilir. Cebri lineer denklem takımları aşağıdaki kriterler sağlandığında oluşur. Bu kriterler:

- Yer değiştirmelerin küçük değerde olması ve denge denklemlerinde ihmal edilebilir olması
- Gerilme – gerilme değerleri arasında orantı olması
- Yük; yer değiştirmeden bağımsız ve yapının kalıcı olarak deformasyonuna neden olmaması

Çok sayıda problemin çözümü yukarıdaki yaklaşımlardan dolayı terkedilmiştir. Yerdeğiştirmeler yapının şeklini değiştirecek kadar büyük olabilir ve bu nedenle ihmal edilemez. Çok sayıda malzeme doğrusal olmayan davranış gösterir yada doğrusal malzeme modeli gerilme değeri belirli bir değeri aştıktan sonra kullanılamaz. Bununla birlikte yükler yerdeğiştirmelere bağlı olarak yönelimlerini değiştirebilir. Sonuç olarak yapı doğrusal olmayan davranış gösterir ve bu kavram bir sonlu elemanlar analizinde varsa denge denklemleri doğrusal olmayan hale gelir.



Şekil 2.2. Doğrusal ve doğrusal olmayan davranış.

2.5.2. Doğrusal Olmayan Yapı Tipleri

Doğrusal olmayan yapı aşağıdaki gibi belirtilebilir:

- **Geometrik açıdan doğrusal olmayan durum** : Yapının tüm geometrik biçimi üzerinde büyük yerdeğiştirmelerin etkisi
- **Malzemeye bağlı doğrusal olmayan durum** : Malzeme davranışı doğrusal değildir. Muhtemel modeller aşağıdaki gibi olabilir
 - Doğrusal olmayan elastik
 - Elastoplastik
 - Viskoelastik
 - Viskoplastik
- **Sınır şartlarına bağlı doğrusal olmayan durum** : Yerdeğiştirmeler sınır koşullarına bağlıdır. En sık sınır nonlinearitesine temas problemlerinde rastlanır.

Doğrusal olmayan yapısal davranışın sonuçları aşağıdaki gibi tanınmak zorundadır:

- Süper pozisyon prensibi uygulanamaz. Örneğin; birkaç yük durumu birleştirilemez. Doğrusal olmayan analiz sonuçları belirli bir ölçeğe uydurulamaz.
- Belirli bir zaman anına karşılık gelen yük ele alınabilir.
- Yüklerin uygulanma sırası önemli olabilir. Özellikle plastik deformasyon yük davranışına bağlıdır. Bundan ötürü doğrusal olmayan sonlu elemanlar analizinde yükler ufak artışlar halinde bölünür.
- Yapısal davranış uygulanan yükle orantılı değildir.
- Yapıda var olabilecek ilk gerilmeler (kaynak yada ısıl işleminden dolayı var olabilecek kalıntı gerilmeler) önemli olabilir.

2.5.3. Zaman Eğrileri Kavramı

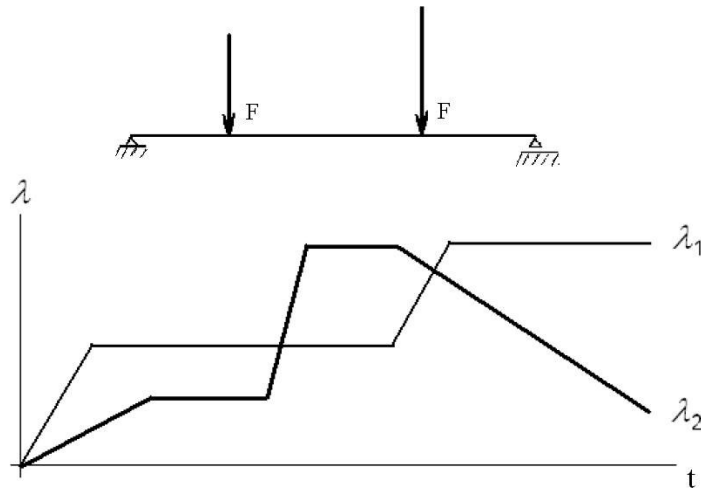
Doğrusal olmayan statik analizlerde yükler zaman eğrileri kullanılarak ardışık olarak uygulanır. Burada “zaman” değişkeni sözde bir zamanı temsil eder ve belirli bir adımda izafi olarak uygulanan yüklerin yoğunluğunu sembolize eder.

Doğrusal olmayan dinamik analizlerde ve doğrusal olmayan statik analizlerde zamana bağlı malzeme modelinde “zaman” kavramı gerçek zamanı temsil eder. Örnek olması açısından F_1 ve F_2 yüklü olan basit kiriş yapısı Şekil de gösterilmiştir.

$$F_1 = \lambda_1(t)f_1 \quad \text{ve} \quad F_2 = \lambda_2(t)f_2 \quad (2.1)$$

F_1 ve F_2 : Nominal (giriş) kuvvet değerleri

λ_1 ve λ_2 : Zamana bağlı yük fonksiyonları



Şekil 2.3. Zaman eğrisi için örnek yükleme durumu.

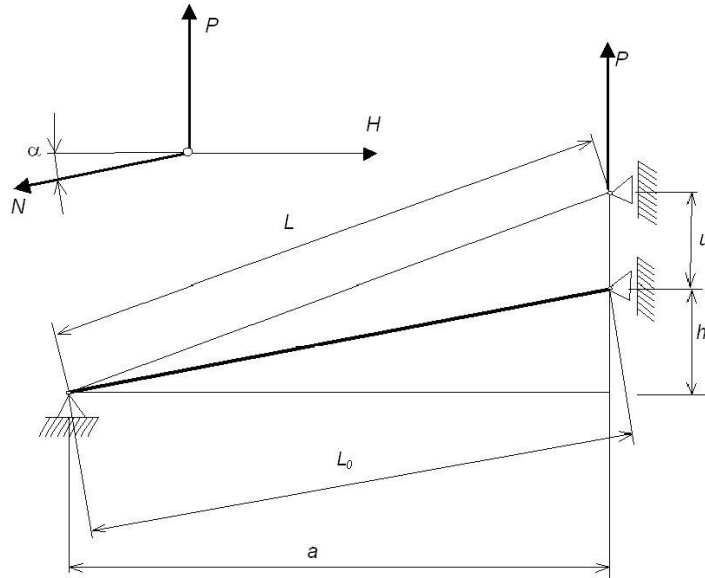
Zaman adımının seçimi problemin doğrusal olmayan seviyesi ve çözüm prosedürü gibi birkaç faktöre dayalıdır. Genellikle tatmin edici hassasiyetteki bir doğrusal olmayan yapının simüle edilmesi için küçük adımlar gerekli olacaktır. Diğer taraftan çok sayıdaki küçük zaman adımı CPU kullanım zamanı tüketimini artırır.

Bilgisayar yazılımları genellikle çözüm sürecinin kısaltılması için uygun otomatik adım algoritmaları ile donatılmıştır.

2.5.4. Geometrik Açıdan Doğrusal Olmayan Durum

2.5.4.1. Büyük Yerdeğiştirme ve Küçük Gerinim Davranışı

Geometrik açıdan doğrusal olmayan durumu incelemek için basit bir örnekle başlanılabilir. Yapı oldukça basittir ve Şekil 2.4' de görüldüğü üzere bir çubuk elemandan oluşmaktadır. Başlangıçta P kuvveti ve N eksenel kuvveti sıfırdır ve çubuğun ilk boyu L_0 dır.



Şekil 2.4. Doğrusal olmayan yapıya örnek: Tek elemanlı çubuk yapısı.

Şekil 2.4' de gösterilen serbest cisim diyagramı kullanıldığında

$$N \sin \alpha - P = 0 \quad \text{yada} \quad N \frac{h+u}{L} - P = 0 \quad (2.2)$$

Malzemenin lineer olarak elastik olduğunu ve E elastiklik modülüne sahip olduğu düşünüldü. Çubuk elemanın A kesitindeki küçük değerlerde olacak deformasyonlar ihmal edildi.

Bu durumda çubuktaki aksenal kuvvet:

$$N = EA_0 \varepsilon \quad (2.3)$$

A_0 : İlk kesit

$$\varepsilon : \text{Mühendislik gerinimi} \quad \varepsilon = \frac{L - L_0}{L_0} \quad (2.4)$$

E : Elastiklik Modülü

L_0 : İlk boy

L : Son boy

Şekilden de görüleceği üzere uzunluklar aşağıdaki gibidir:

$$L_0 = \sqrt{a^2 + h^2} \quad \text{ve} \quad L = \sqrt{a^2 + (h + u)^2} \quad (2.5)$$

Bu durumda ε değeri karmaşık hale gelecektir ve bu problemin üstesinden gelebilmek için Green gerinim ifadesi aşağıdaki gibi tanımlanmıştır:

$$\varepsilon_G = \frac{L^2 - L_0^2}{2L_0^2} \quad (2.6)$$

Örnek durum için Green gerinim ifadesi

$$\varepsilon_G = \frac{h}{L_0} \frac{u}{L_0} + \frac{1}{2} \left(\frac{u}{L_0} \right)^2 \quad \text{haline gelecektir.} \quad (2.7)$$

2.4 ve 2.4 denklemlerinden

$$\varepsilon_G = \frac{L^2 - L_0^2}{2L_0^2} = \frac{L - L_0}{2L_0} \frac{L + L_0}{L_0} = \frac{1}{2} \varepsilon \frac{L + L_0}{L_0} = \frac{1}{2} \varepsilon \left(\frac{L + L_0}{L_0} + 1 - 1 \right) = \frac{1}{2} \varepsilon \left(\frac{L - L_0}{L_0} + \frac{2L_0}{L_0} \right)$$

yada
$$\varepsilon_G = \varepsilon + \frac{1}{2} \varepsilon^2 \quad (2.8)$$

Temel denklemin aşağıdaki gibi elde edildiği göz önünde bulundurulursa

$$\sigma = \frac{N}{A_0} = E\varepsilon \quad (2.9)$$

aynı temel denklem Green gerinimi kullanılarak aşağıdaki şekli alır:

$$\sigma = E \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \varepsilon_G = E \frac{\varepsilon}{\varepsilon + \frac{1}{2} \varepsilon^2} \varepsilon_G = \frac{E}{1 + \frac{1}{2} \varepsilon} \varepsilon_G \quad (2.10)$$

Bu temel denklemde E yerine $E^* = E/[1 + (1/2)\varepsilon]$ değerini kullanmamız gerektiği anlamına gelir. Ancak küçük olan mühendislik gerinimi Green gerinimi ve mühendislik gerinimi arasındaki farka eşittir ve ihmal edilebilir. Örneğin orta sertlikli bir çelik malzemesi için $\varepsilon = 0,002$ dir. $\varepsilon_G = 0,02 + 0,5(0,002)^2 = 0,002002$. Gerinimin küçük olduğu varsayımı ile $\sigma \approx E\varepsilon_G$ olarak yazılabilir ve 2.7 denkleminde göre

$$N = \frac{EA_0}{L_0^2} \left(hu + \frac{1}{2} u^2 \right) \quad (2.11)$$

2.11 denkleminin 2.2 denklemi yerine koyulması ve $L \approx L_0$ olduğu varsayımı ile

$$\frac{EA_0}{2L_0^3} (u^3 + 3hu^2 + 2h^2u) = P \quad (2.12)$$

denklemi elde edilir.

Açıkça görüldüğü üzere denklem u yerdeğiştirme ifadesinin doğrusal olmayan bir denklemi haline gelmiştir. Bu da P ile u yerdeğiştirme arasındaki ilişkinin doğrusal olmadığını göstermektedir.

2.2 ve 2.12 denklemlerini elde etmenin başka bir yolu da mevcuttur. Virtüel yerdeğiştirme prensibinden yapı dengede halinde iken iç ve dış kuvvetlerin virtüel işi kinematik olarak virtüel yerdeğiştirmelere eşittir. Tek serbest dereceli bu yapı için sadece tek bir yerdeğiştirme δu mümkündür ve virtüel yerdeğiştirme prensibi aşağıdaki şekle sahiptir:

$$\int_V \sigma \delta \epsilon_g dV = P \delta u \quad (2.13)$$

Burada $\delta \epsilon_g$ virtüel yerdeğiştirmeye karşılık gelen virtüel gerinimdir. 2.7 denkleminde virtüel gerinim aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$\delta \epsilon_g = \frac{d\epsilon_g}{du} \delta u = \frac{d}{du} \left[\frac{h}{L_0} \frac{u}{L_0} + \frac{1}{2} \left(\frac{u}{L_0} \right)^2 \right] \delta u = \frac{h+u}{L_0^2} \delta u \quad (2.14)$$

Virtüel yerdeğiştirmeler prensibinde virtüel yerdeğiştirme sonsuz küçüklikte varsayılır ve gerilme $\sigma = (N/A)$ değişime uğramaz. σ ve $\delta \epsilon_g$ bu örnekte tüm hacim için sabit olduğuna dikkat edilirse hacim değişimi küçük gerinimlerden ötürü ihmal edilebilir $V \approx V_0 = A_0 L_0$ ve 2.13 denklemi aşağıdaki hali alır:

$$N \frac{h+u}{L_0^2} \delta u A L_0 = P \delta u$$

Denklemin son hali

$$N \frac{h+u}{L_0} = P$$

Virtüel yerdeğiştirme prensibi kullanımı karmaşık yapıların denge koşullarını elde etmek için uygundur. Genel üç boyutlu bir durum için üç yerdeğiştirme u v w ve Green geriniminin altı bileşeni vardır.

$$\begin{aligned}\varepsilon_x &= \frac{\delta u}{\delta x} + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\delta u}{\delta x} \right)^2 + \left(\frac{\delta v}{\delta x} \right)^2 + \left(\frac{\delta w}{\delta x} \right)^2 \right], & \gamma_{xy} &= \frac{\delta u}{\delta y} + \frac{\delta v}{\delta x} + \frac{\delta u}{\delta x} \frac{\delta u}{\delta y} + \frac{\delta v}{\delta x} \frac{\delta v}{\delta y} + \frac{\delta w}{\delta x} \frac{\delta w}{\delta y} \\ \varepsilon_y &= \frac{\delta v}{\delta y} + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\delta u}{\delta y} \right)^2 + \left(\frac{\delta v}{\delta y} \right)^2 + \left(\frac{\delta w}{\delta y} \right)^2 \right], & \gamma_{xz} &= \frac{\delta u}{\delta z} + \frac{\delta w}{\delta x} + \frac{\delta u}{\delta x} \frac{\delta u}{\delta z} + \frac{\delta v}{\delta x} \frac{\delta v}{\delta z} + \frac{\delta w}{\delta x} \frac{\delta w}{\delta z} \\ \varepsilon_z &= \frac{\delta w}{\delta z} + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\delta u}{\delta z} \right)^2 + \left(\frac{\delta v}{\delta z} \right)^2 + \left(\frac{\delta w}{\delta z} \right)^2 \right], & \gamma_{yz} &= \frac{\delta v}{\delta z} + \frac{\delta w}{\delta y} + \frac{\delta u}{\delta y} \frac{\delta u}{\delta z} + \frac{\delta v}{\delta y} \frac{\delta v}{\delta z} + \frac{\delta w}{\delta y} \frac{\delta w}{\delta z}\end{aligned}\quad (2.15)$$

u_i, v_i, w_i düğümsel yerdeğiştirme ve N_i şekil fonksiyonu aşağıdaki şekilde belirtilebilir:

$$u = \sum_i N_i u_i, \quad v = \sum_i N_i v_i, \quad w = \sum_i N_i w_i \quad (2.16)$$

Bu denklemlerin Green gerinimi ifadesi ile yorumlanması sonucunda;

$$\varepsilon = \left(B_L + \frac{1}{2} B_N \right) d \quad (2.17)$$

denklemini elde edilir. Bu denklemin matriks formu aşağıdaki gibidir:

$$\varepsilon = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{xz} \\ \gamma_{yz} \end{Bmatrix} \quad (2.18)$$

d düğüm yerdeğiştirme matrisidir. B_L bu küçük değere sahip yerdeğiştirme matrisi, B_N ise Green gerinim değerinin yerdeğiştirmelerin doğrusal olmayan bir fonksiyonu olduğunu yansıtan matristir. Bu matrisin elemanları d düğümsel yerdeğiştirmelerinin doğrusal fonksiyonudur.

Virtüel gerinimin virtüel düğümsel yerdeğiştirmelere karşılık geldiği gösterilmelidir.

$$\delta \varepsilon = (B_L + B_N) \delta d = B \delta d \quad (2.19)$$

Virtüel yerdeğiştirme prensibine göre; sistem dengede ise iç kuvvetlerin virtüel iş değeri dış kuvvetlerin virtüel iş değerine eşit olmalıdır ve bu prensip aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$\int_V \delta \varepsilon^T \sigma dV = \delta d^T F \quad (2.20)$$

Bu denklemde F düğümsel kuvvetler matrisidir.

Gerilme ve gerinim arasındaki doğrusal ilişki $\sigma = D \varepsilon$, şeklindedir ve burada D malzeme elastiklik katsayısıdır.

2.19 denkleminin 2.20 da yerine koyulması ile

$$\delta d^T \int_V B^T \sigma dV = \delta d^T F \quad \text{elde edilir.} \quad (2.21)$$

$$\int_V B^T \sigma dV = F \quad (2.22)$$

Yukarıda son belirtilen denklem; bilinmeyen düğümsel yerdeğiştirmeler için matris formunda doğrusal olmayan denklem takımıdır.

$$R(d) = F \quad (2.23)$$

2.5.5. Artımsal ve Tekrarlı Çözüm Yöntemleri

Basit çubuk yapı örneğinden de görüleceği üzere büyük yer değiştirmeler doğrusal olmayan denge denklemleri (2.2 yada 2.12) vermektedir. Sonlu elemanlar analizinde genellikle doğrusal olmayan denklem takımları vardır (2.23). Basit çubuk yapı ile başlanacak olunursa (2.2) ve (2.12) denklemi aşağıdaki şekilde yazılabilir:

$$R(u) = P \quad (2.24)$$

Burada;

$$R(u) = N \frac{h+u}{L_0} = \frac{EA}{2L_0^3} (u^3 + 3hu^2 + 2h^2u) \quad (2.25)$$

Yukarıdaki doğrusal olmayan denklemi çözmenin temel adımı doğrusallaştırma yaklaşımıdır. Bu da kuvvetteki küçük artışın ve bu artışa karşılık gelen yer değiştirmedeki artış ile sağlanır. P kuvveti ve u yerdeğiştirme değeri için $R(u+du)$, $P_I = P+dP$ ve ilgili yerdeğiştirme $u_I = u+du$ ifadeleri lineer fonksiyon ile yaklaşım yapılabilir.

$$R(u+du) = R(u) + \left(\frac{dR}{du} \right)_u du \quad \text{ve denklemin yaklaşık durumu}$$

$$R(u) + \left(\frac{dR}{du} \right)_u du = P + dP$$

(2.23) denklemi varsayımı ile;

$$\left(\frac{dR}{du} \right)_u du = dP \quad (2.26)$$

yada

$$K_T(u)du = dP \quad (2.27)$$

$$K_T = \left(\frac{dR}{du} \right)_u \quad (2.28)$$

K_T tanjant direngenliği olarak adlandırılır. Çubuk yapısının özel bir durumu için tanjant direngenliği aşağıdaki şekilde kolaylıkla bulunur:

$$K_T = \frac{d}{du} \left(\frac{u+h}{L_0} \right) N + \left(\frac{u+h}{L_0} \right) \frac{dN}{du}$$

(2.10) denkleminin kullanılması ile;

$$\begin{aligned} \frac{dN}{du} &= \frac{EA}{L_0} \frac{u+h}{L_0} \\ K_T &= K_0 + K_u + K_\sigma \end{aligned} \quad (2.29)$$

Burada;

$$K_0 = \frac{EA}{L_0} \left(\frac{h}{L_0} \right)^2 \quad \text{Doğrusal direngenliktir.}$$

$$K_u = \frac{EA}{L_0} \left[2 \frac{u}{h} + \left(\frac{u}{h} \right)^2 \right] \left(\frac{h}{L_0} \right)^2 \quad \text{Başlangıç yerdeğiştirme direngenliğidir.}$$

$$K_\sigma = \frac{N}{L_0} \quad \text{Başlangıç gerilme direngenliğidir.}$$

Yerdeğiştirmeden bağımsız olan doğrusal direngenlik küçük deplasman analizlerinden tanınır. Başlangıç yerdeğiştirme direngenliği; yerdeğiştirmenin direngenlik üzerine olan etkisini yansıtır. Başlangıç gerilme direngenliği; yük artırımından önce çubuk yapıda eksenel kuvvet olduğunu gösterir.

2.21 ve 2.22 denklemlerince tanıtılan genel durum;

$$\begin{aligned} R(d + dd) &= R(d) + K_T dd \\ K_T &= dd = dF \end{aligned} \quad (2.30)$$

$K_T = \frac{\partial R}{\partial d}$ ifadesine tanjant direngenlik matrisi denir.

$$K_T = K_0 + K_u + K_\sigma \quad (2.31)$$

Burada;

K_T : Doğrusal direngenlik matrisi

K_u : Başlangıç deplasman direngenlik matrisi

K_σ : Başlangıç gerilme direngenlik matrisi

Tanjant direngenlik matrisinin tanıtılması çok önemlidir. Sonraki bölümlerde en çok kullanılan çözüm yöntemlerinden kısaca bahsedilecektir.

2.5.5.1. Artımsal Yöntem

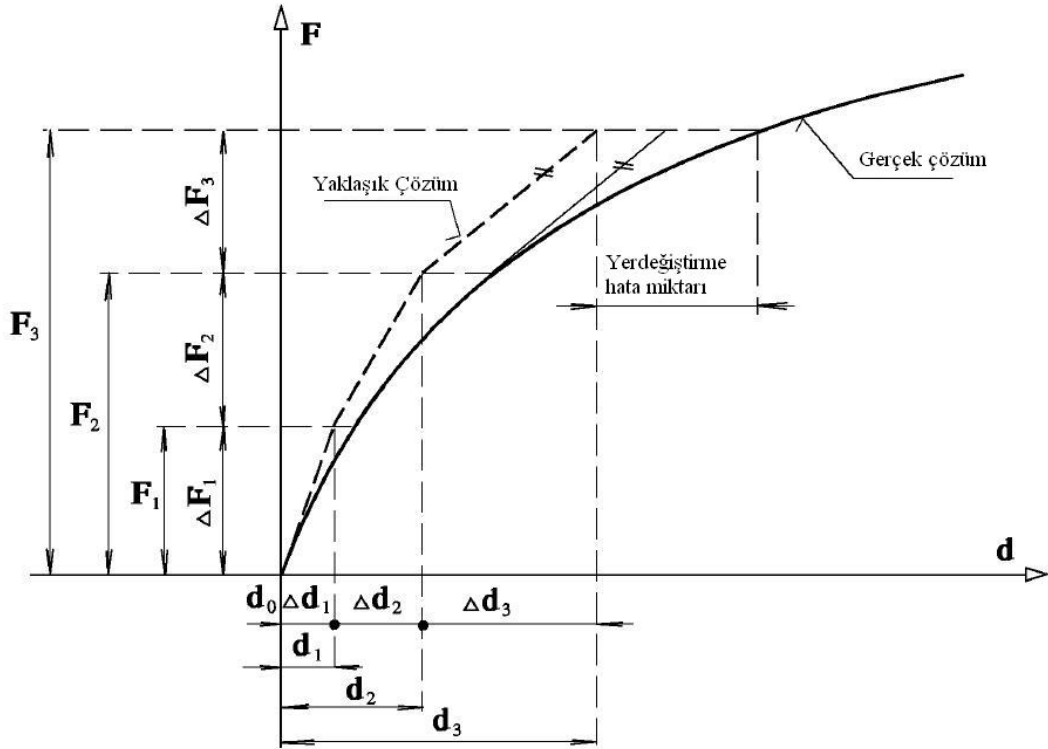
Yük ΔF_i değerindeki çok küçük artışlara bölünür. Deplasman artışları Δd_i eş zamanlı lineer denklem takımlarından hesaplanır.

$$K_{T(i-1)} \Delta d_i = \Delta F_i \quad (2.32)$$

ve güncelleştirilmiş çözüm aşağıdaki gibi elde edilir:

$$d_i = d_{i-1} + \Delta d_i \quad (2.33)$$

Prosedür Şekil 2.5'de gösterilmiştir. Açıkça görüleceği üzere bu yöntem etkisizdir ve hata birikiminden dolayı güvenilir değildir.



Şekil 2.5. Artımsal çözüm yöntemi.

2.5.5.2. Newton – Raphson Yöntemi

İlk deplasman değeri d_0 'ın bilindiği varsayılınsın. İlk yerdeğiştirmeye karşılık gelen F kuvveti aşağıdaki lineer denklemin çözülmesi ile hesaplanır:

$$K_{T(0)}d_1 = F \quad (2.34)$$

Burada $K_{T(0)} = K_T(d_0)$ ifadesi ilk deplasmanlar için hesaplanan tanjant direngenlik matrisidir. d_1 deplasmanı bilinmediğinden (2.23) denklemi bulunamaz ve;

$$R(d_1) \neq F$$

Bunun anlamı gerilme kuvvetlerinin olduğudur.

$$r_1 = R(d_1) - F \quad (2.35)$$

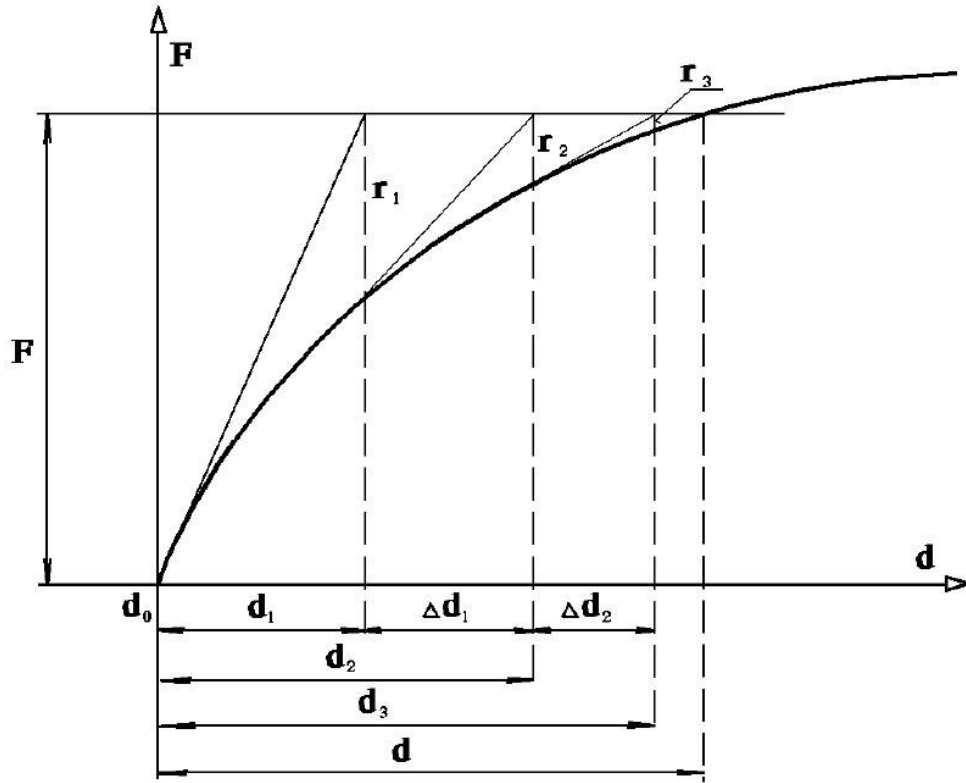
Yeni tanjant direngenlik matrisinin hesaplanmasıyla $K_{T(l)} = K_T(d_1)$ ve yeni cebri lineer denklem takımlarının çözülmesi ile;

$$K_{T(l)} \Delta d_1 = r_1 \quad (2.36)$$

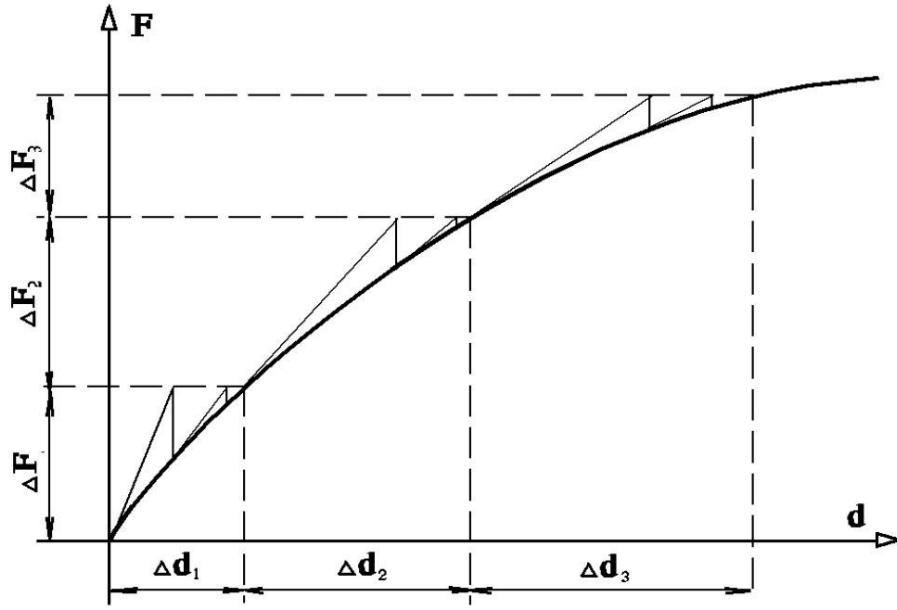
geliştirilmesi ile geliştirilmiş bir çözüm elde edilir:

$$d_2 = d_1 + \Delta d_1 \quad (2.37)$$

Eğer $r_2 = R(d_2) - F \neq 0$ ise prosedür doğru çözümün elde edilmesine dek tekrarlanır. Artımlar Şekil 2.6'da gösterilmiştir. Bu yöntem Newton – Raphson yöntemi (NR) olarak bilinir ve Şekil 2.7' da gösterildiği üzere çoğunlukla artımsal yöntemle birleştirilir.



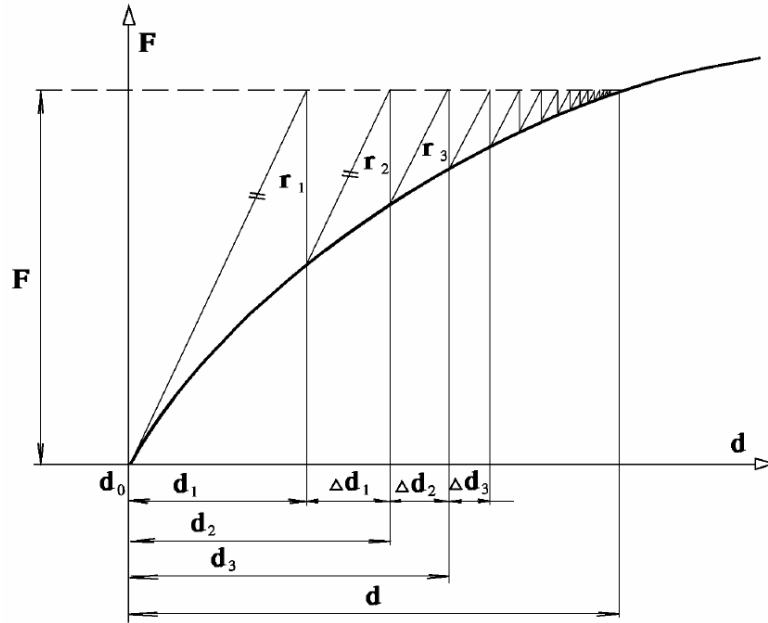
Şekil 2.6. Newton – Raphson yöntemi.



Şekil 2.7. Newton – Raphson yöntemi ile artımsal yöntemin birlikte kullanılması.

2.5.5.3. Düzeltilmiş Newton – Raphson Yöntemi

Standart olan NR yöntemi bir çok durumda etkin olmasına rağmen büyük sistemler için lineer denklem takımlarının çözümünde yetersiz kalabilir. Düzeltilmiş NR yöntemi standart yöntemden farklıdır ve direngenlik matrisinin güncellenmiş halidir. Şekil 2.8'den görüleceği üzere tanjant direngenlik matrisi şekillenmiştir ve başlangıçta artımlar ile bileşenlerine ayrılmıştır. Bu yöntemin avantajı hesap süresini korumaktadır. Çünkü tanjant direngenlik matrisinin çarpanlarına ayrılması sadece kuvvet artırımından dolayı gerçekleşir. Diğer taraftan artımların sayısı genellikle daha çoktur.



Şekil 2.8. Düzeltilmiş Newton – Raphson yöntemi.

2.5.6. Büyük Yerdeğiştirme ve Büyük Gerinim Davranışı

Gerinim büyük olduğunda yapının şekil ve hacim değişimini ihmal etmek kabul edilemez. Basit çubuk yapı için örneklendirilecek olunursa; (2.11) ve (2.12) denklemlerindeki A_0 çubuk kesit alanı için anlık kesit alanı A ve L_0 çubuk boyu için anlık çubuk boyu L 'nin bilinmesi gerekir.

Buna uygun olarak; virtüel yerdeğiştirme prensibinin vurgulandığı (2.20) denklemindeki integrasyon anlık hacme göre ele alınmalıdır. Anlık hacim bilinmediğinden, ki anlık hacme yerdeğiştirmelere bağlıdır ve yerdeğiştirmeler de bilinmemektedir, yerdeğiştirmeler ilk hesaplanması gereken değerlerdir. Bu problemi çözmek için integrallerin bilinen bir hacmi ele alacağı transformasyon ifadesi gereklidir.

2.5.6.1. Toplam Langrange Formülasyonu

Toplam langrange formülasyonunda tüm integraller yapının deforme olmamış haline göre hesaplanır.

$$\int_{V_0} \delta \varepsilon_G^T \sigma_P dV = \delta d^T F \quad (2.40)$$

Transformasyondan dolayı yeni gerilme ifadesi Piola – Kirchhoff gerilme tensörü σ_P olarak adlandırılır ve Green gerilme tensörü ε_G ile ilişkilendirilmelidir.

2.5.6.2. Güncellenmiş Langrange Formülasyonu

Güncellenmiş langrange formülasyonunda; bilinen deforme olmuş “i” biçimi başlangıç olarak kabul edilir ve sonraki biçimi (i+1) devamlı olarak güncellenir.

$$\int_{V_0} \delta \left({}^{i+1} \varepsilon_A^T \right)^{i+1} \sigma_C dV = \delta d^T F \quad (2.41)$$

(2.40) denkleminin sol tarafında σ_C Cauchy gerilme tensörüdür ve ε_A Almansi gerinim tensörüdür. ${}^{i+1} \varepsilon_A$ ve ${}^{i+1} \sigma_C$ notasyonu gerilme ve gerinimin (i+1) konfügrasyonunda olduğu anlamına gelir. i anlık durumu için integrasyon V_i hacmi üzerinden yapılır. Toplam langrange ve güncellenmiş langrange formülasyonlarında gerilme ve gerinimin farklı ölçülerinin kullanımı; iç kuvvetler virtüel işinin integrasyonu yapılan hacim üzerinde dikkate alınmayacağı koşulunu izler.

2.5.7. Malzemeye Bağlı Doğrusal Olmayan Durum

2.5.7.1. Giriş

Doğrusal elastik sonlu elemanlar analizi; doğrusal temel gerilme – gerinim denklem eşitliği üzerine kuruludur:

$$\sigma = D \varepsilon \quad (2.42)$$

Burada D malzeme matrisi; elastiklik modülü ve poisson oranı gibi sabit değerlerin bir fonksiyonudur. Sabit D malzeme matrisi gerinim – yerdeğiştirme ilişkisiyle bağlantılı olan sabit K matrisini verir.

$$\varepsilon = Bd \quad (2.43)$$

$$K = \int_V B^T DB dV \quad (2.44)$$

Lineer elastisiteden hareketle elastik temel denklemin (2.42) doğrusal olmadığı durumda malzeme matrisi de (D) sabit değildir. Sabit olmayan D malzeme matrisi doğrusal olmayan yapı denklemleri verir. Sonuç olarak; Yerdeğiştirme virtüel iş prensibinden türetilen denge denklemleri doğrusal olmayan özellik gösterir. Bu denklemlerin çözümü geometrik açıdan doğrusal olmayan durumdaki yöntemlerle aynı temelde yapılır. Genellikle yük küçük artımlara bölünür ve her bir artım için tekrarlamalar yapılır (Düzeltilmiş NR ve NR yöntemi). Bununla ötesinde her bir yük artırımı için gerilme tekrarlamaları da yapılmalıdır. Malzemeye bağlı doğrusal olmayan durumlar sıklıkla geometrik ve/veya sınır şartlarına bağlı doğrusal olmayan durumlar ile birleştirilir.

2.5.7.2. Doğrusal Olmayan Elastik Model

Malzemelerin doğrusal olmayan davranışı birkaç yol ile formüle edilebilir. Bunlardan en basit olanı *toplam format* yöntemidir. Şekil 2.9'dan da görüleceği üzere gerilme ve gerinimler E_s sekant elastiklik modülü açısından tanımlanır.

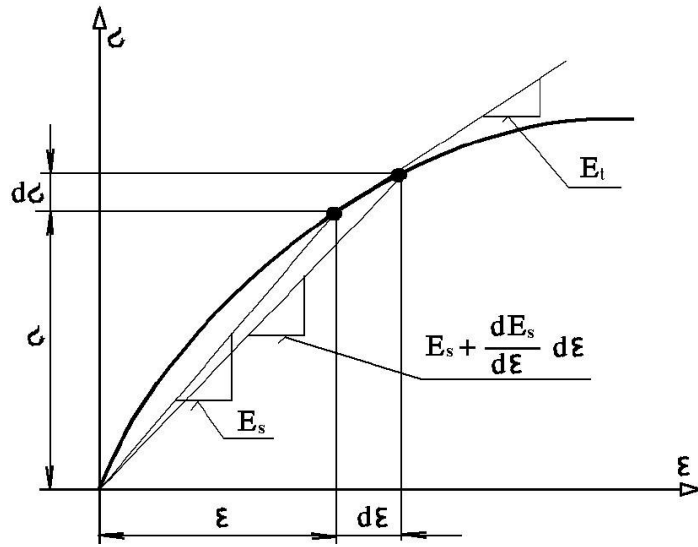
$$\sigma = E_s(\varepsilon)\varepsilon \quad (2.45)$$

Hipo – elastik biçimde gerilme ve gerinim artımları arasındaki ilişki E_t tanjant elastiklik modülü açısından tanımlanır.

$$d\varepsilon = E_t(\varepsilon)d\sigma \quad (2.46)$$

Doğrusal olmayan elastik malzeme *hiperelastik* formatta da formüle edilebilir. Bu formatta deformasyon enerji yoğunluğu fonksiyonu U ve buna karşılık gelen tamamlayıcı enerji yoğunluğu fonksiyonunun U^* varlığı varsayılır.

$$\sigma = \frac{dU}{d\varepsilon} \quad \text{ve} \quad \varepsilon = \frac{dU^*}{d\sigma} \quad (2.47)$$



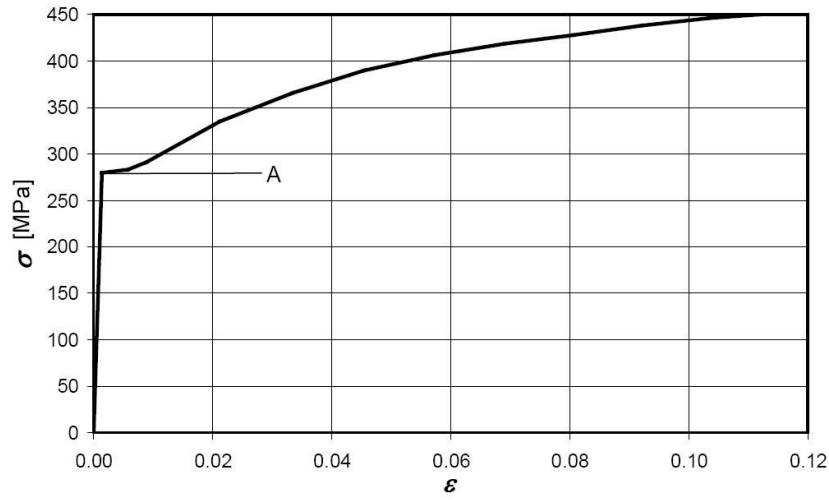
Şekil 2.9. Doğrusal olmayan elastik malzeme modeli.

2.5.7.3. Elastoplastik Malzeme Modeli

2.5.7.3.1. Akma Kriteri

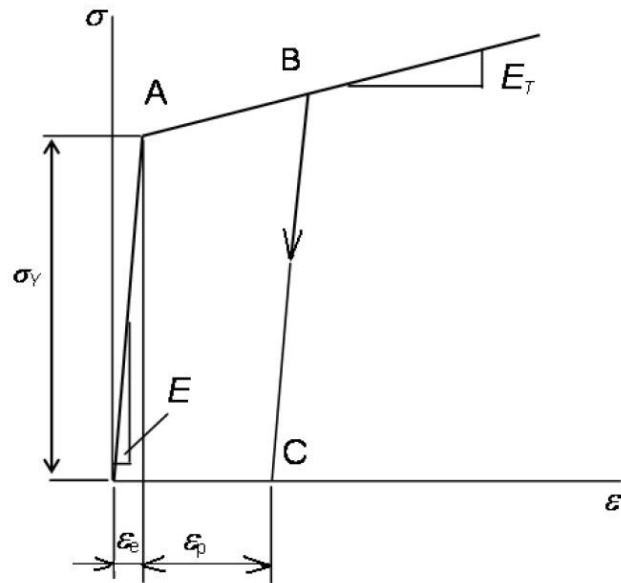
Deneyler doğrusal elastik modelin sınırlı gerilme aralıklarında kabul edilebilir olduğunu göstermektedir. Örnek olarak Şekil 2.10' dan de görüleceği üzere yumuşak çelik bir malzemenin gerilme – gerinim eğrisi verilmiştir. A noktası ile temsil edilen akma değerine kadar deformasyonlar elastiktir ve gerilme – gerinim ilişkisi $\sigma = E\varepsilon$

olarak belirtilebilir. Gerilme akma noktasını aştığında bir elastoplastik kanun gerilme ve gerinim arasındaki ilişkiyi belirlemektedir.



Şekil 2.10. Yumuşak çelik için tipik bir gerilme – gerinim eğrisi

Şekil 2.11’ de akma gerilmesi, elastiklik modülü ve tanjant modülü ile tanımlı iki çizgili yaklaşım gösterilmiştir. $E_t = 0$ olduğunda malzeme modeli tam plastik davranış gösterir. $E_t \neq 0$ ise malzemede pekleşme meydana gelir.



Şekil 2.11. Doğrusal pekleşen elastoplastik malzeme modeli.

Matematiksel bir açıklamada, akma olayı *akma fonksiyonu* ile tanımlanarak sayısal bir fonksiyon ile temsil edilebilir. Akma fonksiyonu aşağıdaki durumlara çıkan bir formatta yazılabilir:

$$F < 0 \text{ elastik davranış}, \quad F = 0 \text{ plastik davranış} \quad (2.48)$$

Mühendislik uygulamalarında aşağıda bahsedilen iki kriter malzemelerin akma kriteri olarak en sık kullanılır:

Von – Mises Akma Kriteri

$$F = (\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 - 2\sigma_Y = 0 \quad (2.49)$$

Burada $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ asal gerilmelerdir. Yani; eşdeğer gerilme σ_{eff} akma gerilmesine σ_y ulaştığında akma meydana gelir.

$$\sigma_{eff} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} = \sigma_y \quad (2.50)$$

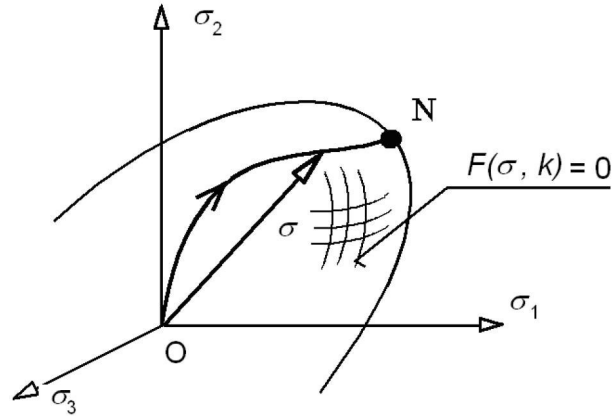
Tresca Akma Kriteri

$$F = [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 - \sigma_y^2][(\sigma_2 - \sigma_3)^2 - \sigma_y^2][(\sigma_3 - \sigma_1)^2 - \sigma_y^2] = 0 \quad (2.51)$$

İki akma kriteri arasındaki en büyük fark yaklaşık %15 olan kayma gerilmesi durumudur. Diğer gerilmeler için bu fark azdır. Bu nedenle her iki kriterin de mühendislik uygulamaları için uygun olduğu düşünülmektedir.

$$F(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3) = 0 \quad (2.52)$$

denklemin Şekil 2.12'den de görüleceği üzere asal gerilmeler uzayında akma yüzeyi tanımlar. Yüzeyin içindeki gerilmeler elastik gerilmeleri ve yüzeydeki gerilmeler plastik gerilmeleri göstermektedir. Bu yüzeyin dışında gerilme olamaz.



Şekil 2.12. Akma yüzeyi.

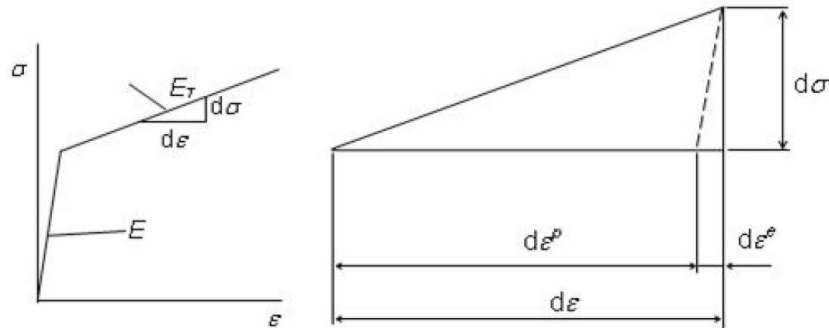
2.5.7.3.2. İleri Akma Davranışı

İleri akma davranışının temel varsayımı toplam gerininin elastik (geri dönüştürülebilir) ve plastik (geri dönüştürülemeyen) kısımlara ayırmaktır. Şekil 2.13'e göre tek eksenli gerilme hali için:

$$\frac{d\sigma}{d\varepsilon} = E_T \quad , \quad \frac{d\sigma}{d\varepsilon^e} = E_T \quad (2.53)$$

ve bu durumda plastik gerinim artırımını aşağıdaki hali alır:

$$d\varepsilon^p = d\varepsilon - d\varepsilon^e = \frac{E - E_T}{EE_T} d\sigma \quad (2.54)$$



Şekil 2.13. Toplam gerinim artırımının ayrıştırılması.

Benzer şekilde çok eksenli yükleme durumlarında da toplam gerinim elastik ve plastik kısımlara ayrıştırılabilir.

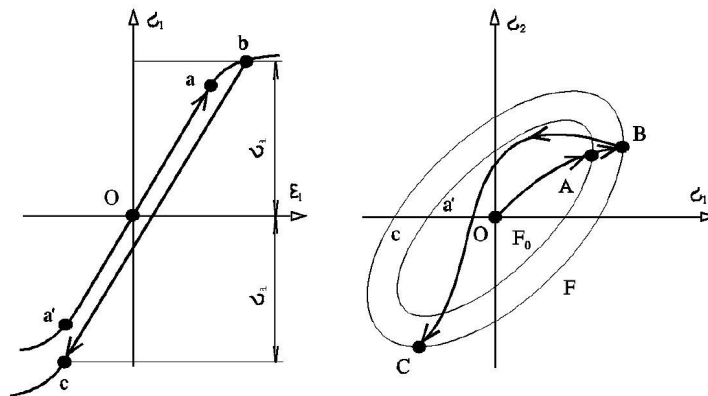
$$\varepsilon = \varepsilon^e + \varepsilon^p \quad (2.55)$$

Tam plastik davranış gösteren bir malzeme için; plastik deformasyon boyunca akma yüzeyinde değişim meydana gelmez. Pekleşen bir malzeme için plastik deformasyon akma yüzeyinde değişime sebep olur. İlk akma yüzeyi bir sonraki ile yer değiştirir. Aşağıdaki şekle sahip düzeltilmiş bir akma fonksiyonu uyarlanır:

$$F(\sigma, \varepsilon^p, K) = 0 \quad (2.56)$$

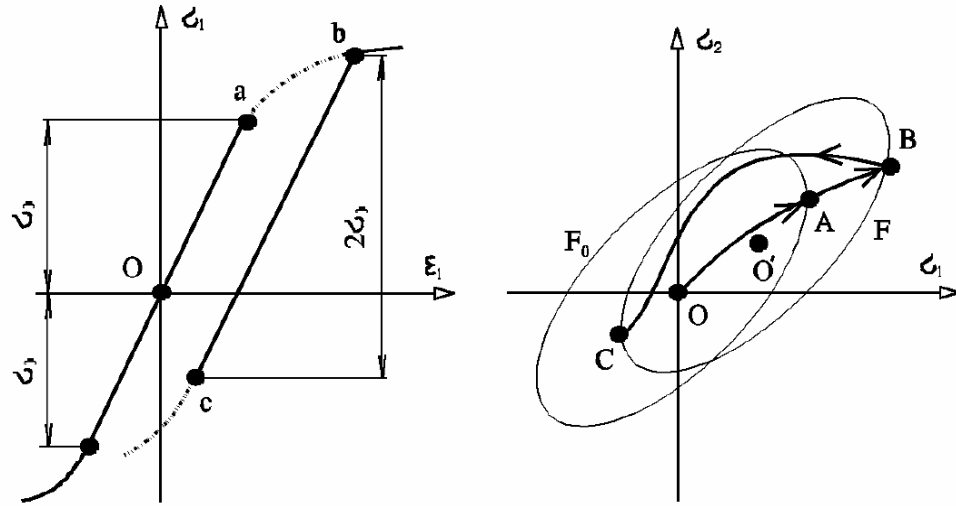
Bu akma fonksiyonu gerilmelere aynı zamanda plastik gerinimlere ve pekleşme katsayısına bağlıdır. Plastik gerinimlerin akma fonksiyonunun düzeltilmesi pekleşme kuralları ile sağlanır.

Eşyönlü (izotropik) pekleşme kuralında; akma yüzeyi boyut olarak artar ancak orijinal şeklinde bir değişiklik meydana gelmez. Çok eksenli ve tek eksenli yüklemeler için izotropik pekleşme durumunun şematik gösterimi Şekil 2.14' de verilmiştir.



Şekil 2.14. Eşyönlü (izotropik) pekleşme davranışı.

Kinematik pekleşme kuralında; orijinal akma yüzeyi gerilme alanlarında yeni konuma sahiptir ancak boyutunda ve şeklinde bir değişim söz konusu değildir. Kinematik pekleşme döngüsel davranış olan modellemelerde çok büyük öneme sahiptir.

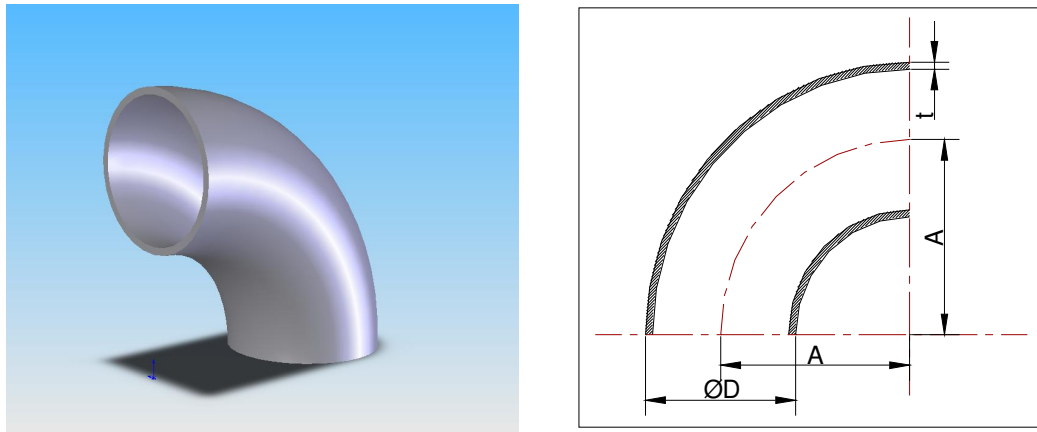


Şekil 2.15. Kinematik pekleşme davranışı.

3. CAD MODELİ

CAD modelinin tamamı ProEngineer Wildfire2.0 yazılımında hazırlandı ve ANSYS 10.0 programına transfer edildi. Geometrik modelin ProEngineer programından transfer edilmesinin nedeni; diğer ticari yazılımlarla transfer gerçekleştirildikten sonra sonlu elemanlar geometri modelinde aynı hat üzerinde çoklu alan yada çizgilerin oluşmasıdır. Oluşan bu çoklu bileşenler üzerinden sonlu elemanların ileriki aşamalarında işlem yapılması oldukça zordur ve hata riski oluşturmaktadır.

Geometrik model oluşturulurken ANSI B16.9 boyut standardına uygun büküm geometrisi hedeflendi. ANSI B16.9 standardına göre dirsek parçası geometri özellikleri aşağıdaki gibi belirtilmiştir:

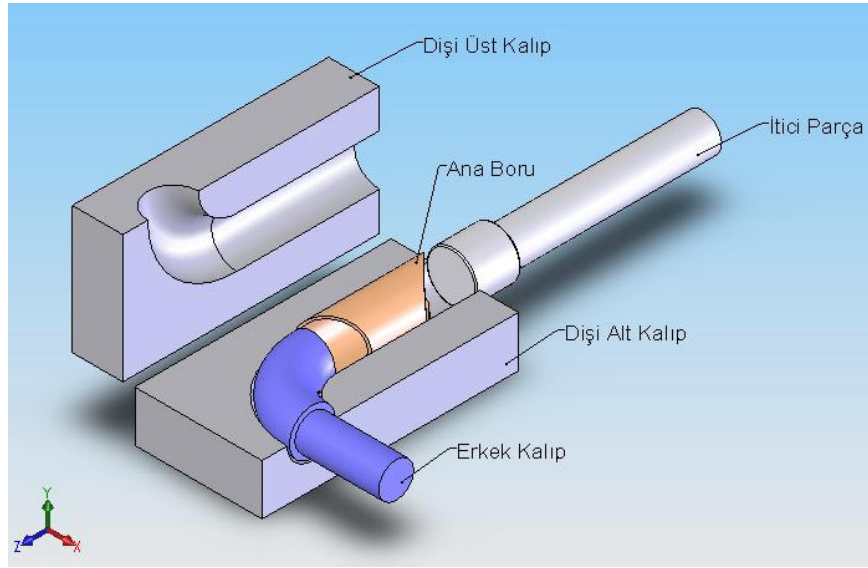


Şekil 3.1. Dirsek bağlantı parçasının 3D ve kesit görünüşü.

Tablo 3.1. ANSI/ASME B16.9 Standardına göre dirsek parçası boyutları.

ØD – Dış Çap	t – Et kalınlığı	A – Dönme yarıçapı
60.33mm	2.77mm	76mm

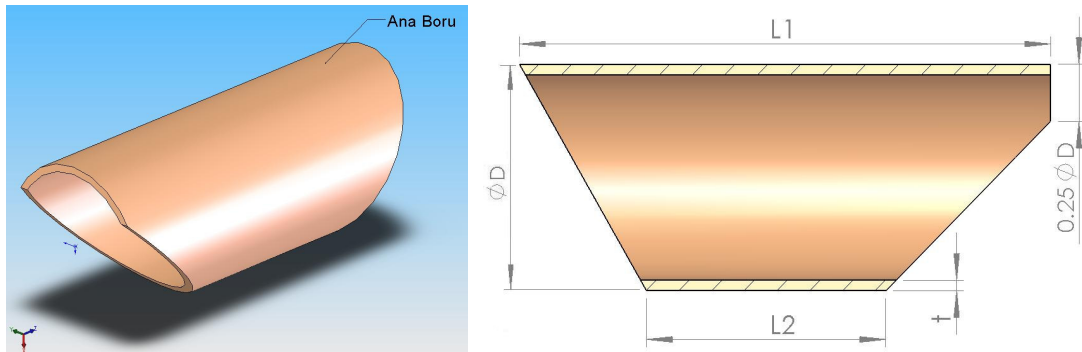
Boru bükme işlemi boyunca sürece katılan elemanların CAD modelleri aşağıdaki şekilde belirtilmiştir:



Şekil 3.2. Boru bükme operasyonunun gerçekleştirildiği kalıp montaj görüntüsü.

3.1. Ana Boru

90° bükümün gerçekleştirileceği ana boru geometrisi Şekil ' de verilmiştir.

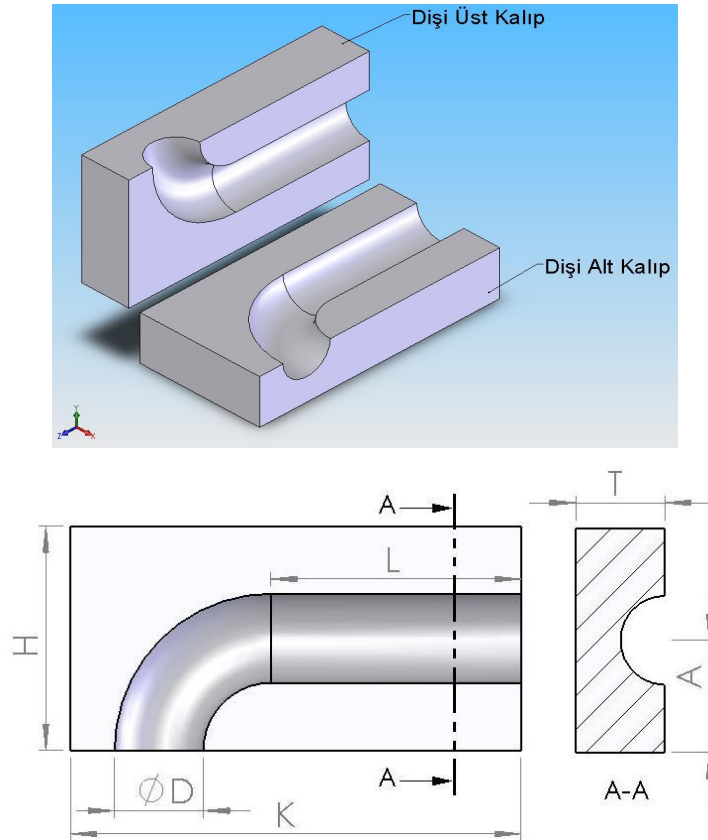


Şekil 3.3. Ana boru geometrisi.

ANSI/ASME B36.19 Standardına uygun olarak; boru dış çapı $\varphi = 60.33mm$ ve et kalınlığı $t = 2.77mm$ dir. L_1 ve L_2 farklı ölçüler için analizlerde kullanılmıştır.

3.2. Dişi Kalıp

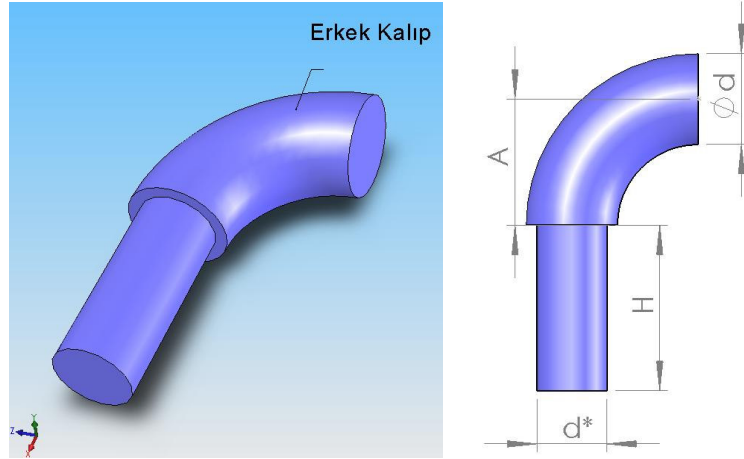
Ana borunun şekil verilmesi esnasında dış kısmından kapatılmasını ve bu sayede şekil verme süreci boyunca boru dış yüzeyinde oluşabilecek deformasyonu engelleyen bileşendir. Proses boyunca alt ve üst kalıbın kapalı kalması ve ana boru ile arasındaki yağlama koşulları çıkacak son ürünün geometrisini etkilemektedir.



Şekil 3.4. Dişi kalıp geometrisi.

3.3. Erkek Kalıp

Ana borunun şekil verilmesi süresince iç kısma doğru muhtemel olabilecek şekil bozukluklarını engelleyen bileşendir.

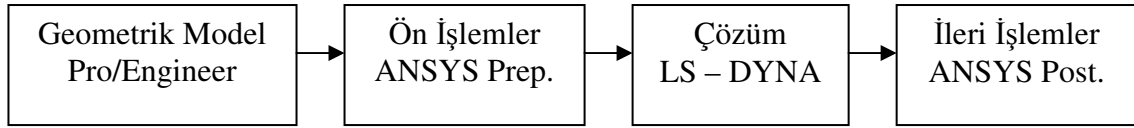


Şekil 3.5. Erkek kalıp geometrisi

4. SONLU ELEMANLAR MODELİ

Şekil verme esnasında boru parçasında meydana gelen deformasyon mekanizmasını anlamak ve boru yapısındaki gerilme/gerinim dağılımlarını belirlemek için bir sonlu elemanlar simülasyonu geliştirildi. Simülasyonların gerçekleştirilebilmesi için doğrusal olmayan açık (explicit) sonlu elemanlar analizi yazılımı ANSYS/LS – DYNA kullanıldı.

LS –DYNA 3D tarafından kullanılan açık çözüm yöntemi büyük deformasyonlar ve karmaşık temas problemlerine hızlı çözüm getirebilmektedir. Tümleşik program paketinin (ANSYS Multiphysics/LS – DYNA) kullanımı ile sorunun ön işlemleri (pre – processing) ANSYS yazılımı ile yapıldı. Daha sonra standart ANSYS ileri işlemler (post – processing) araçları kullanılarak sonuçlar ile oynandı. Çalışmada izlenen yol Şekil ‘4.1 de verilmiştir.

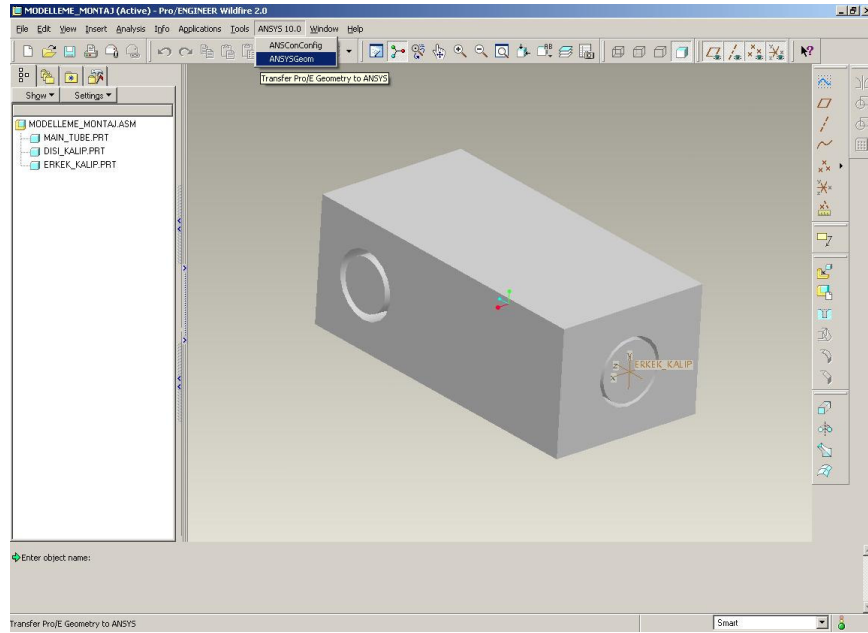


Şekil 4. 1. Sonlu elemanlar modelleri hazırlanırken izlenen yol.

4.1. Ön İşlemler

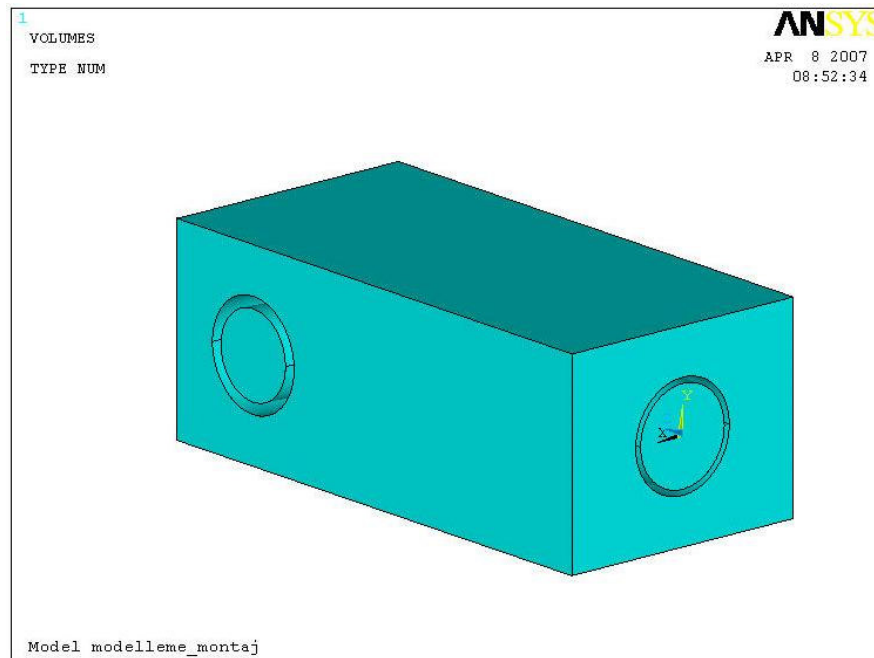
4.1.1. CAD Modelinin Transfer Edilmesi ve Sonlu Elemanlar Geometrik Modelinin Oluşturulması

Pro/Engineer Wildfire 2.0 programında hazırlanan CAD modeli ANSYS 10.0 programına transfer edildi.



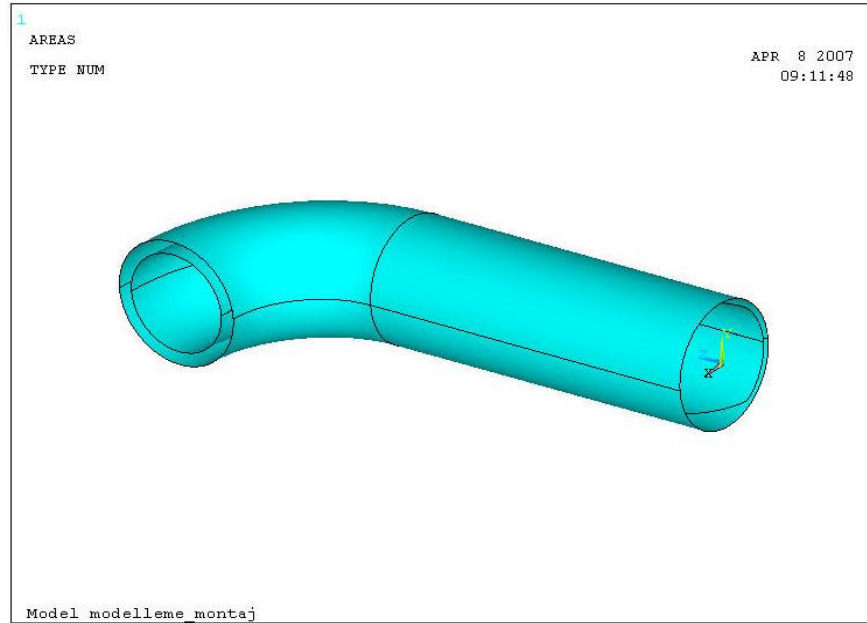
Şekil 4.2. CAD geometrik modelinin Pro/Engineer programından transfer edilmesi.

Pro/Engineer Main Menu > ANSYS 10.0 > ANSYSGeom komutu ile açılan pencereden CAD geometrik modeli ANSYS yazılımına transfer edilir.



Şekil 4.3. ANSYS yazılımına transfer edilen CAD modeli.

Transfer edilen CAD modeli, analize uygun şekilde sonlu elemanlar geometrik modeline düzenlemesi yapıldı. Bu işlem her bir hacim için öncelikle hacimlerin daha sonrada modelde ihtiyaç duyulmayan alanların silinmesi ile gerçekleştirildi. Sonlu elemanlar analizi için düzenlenen geometrik model Şekil 'de verilmiştir.



Şekil 4.4. Sonlu elemanlar geometrik modelinin son hali.

Sonlu elemanlar geometrik modelinde elde edilen alan ve çizgi sayıları aşağıdaki gibi verilmiştir.

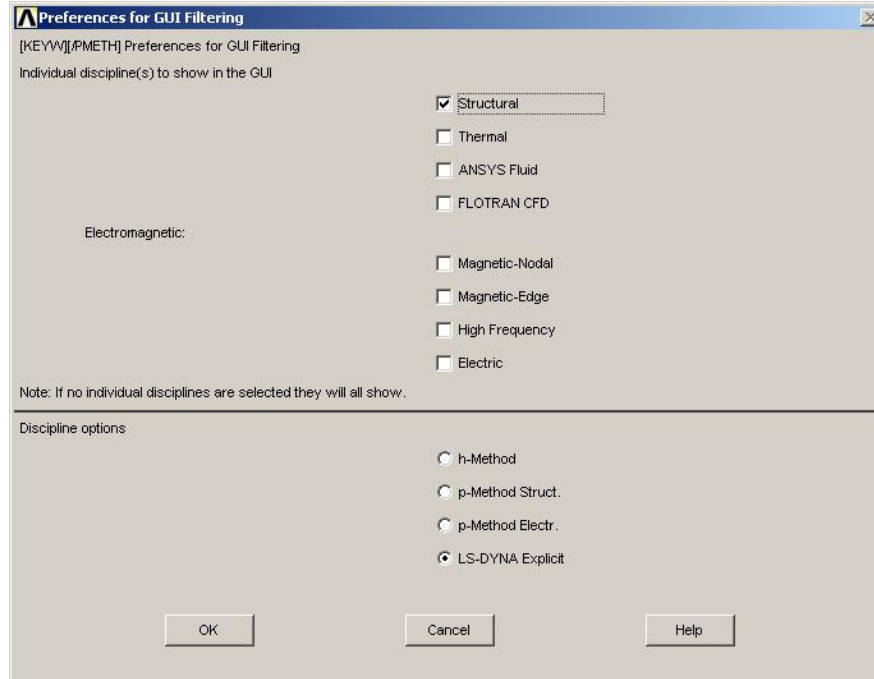
Tablo 4.1. Sonlu elemanlar geometrik modeli alan ve çizgi sayıları.

	Alan Sayısı	Alan Numaraları	Çizgi Sayısı	Çizgi Numaraları
Dişi Kalıp	4	A10 / A11 A18 / A19	10	L16 / L17 / L18 / L19 / L20 L21 / L22 / L27 / L36 / L37
Ana Boru	2	A1 / A2	8	L1 / L2 / L3 / L4 L5 / L6 / L7 / L8
Erkek Kalıp	2	A6 / A7	6	L10 / L11 / L12 L13 / L14 / L15

4.1.2. Analiz Tipi ve Çözüm Yönteminin Seçimi

Yapılan çalışmada analiz tipi ve çözüm yöntemi aşağıda belirtildiği gibi seçilmiştir:

Analiz Tipi	Yapısal
Çözümleme	LS – DYNA Açık



Şekil 4.5. Analiz tipi ve çözüm yönteminin seçimi.

4.1.3. Eleman Tipinin Tanımlanması

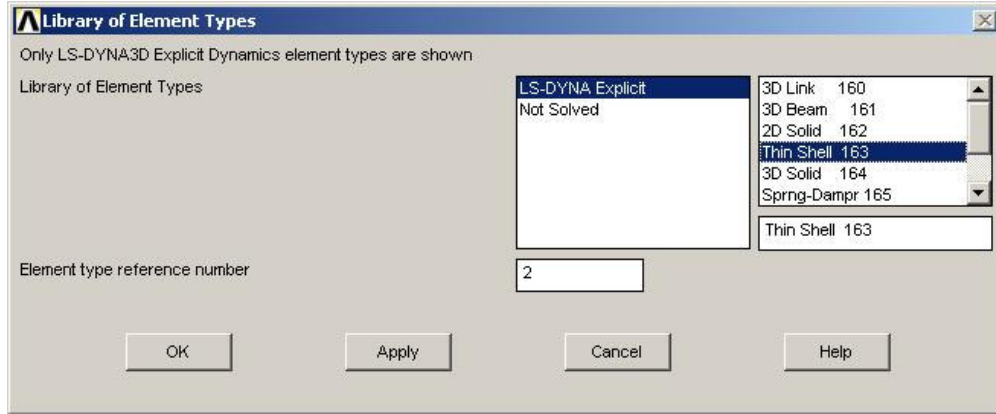
Şekillendirme işlemi bir boru malzemesi üzerinden olacağı için uzunluk ve çap boyutları kalınlığa göre çok büyüktür.

$$\frac{L}{t} = \frac{175}{2,77} \approx 64 \quad \text{ve} \quad \frac{D}{t} = \frac{60,33}{2,77} \approx 22 \quad \text{olduğundan dolayı kabuk (shell)}$$

eleman seçildi. Bilineceği üzere kabuk elemanlar yapının iki yöndeki uzunluğunun

diğer yöne göre $\frac{1}{10}$ 'dan daha fazla olduğu durumlarda seçilir.

Preprocessor > Element Type > Add/Edit/Delete komutu ile çıkan pencereden “Thin Shell 163” elemanı seçildi.



Şekil 4.6. Eleman tipinin tanımlanması.

4.1.4. Katsayı Özelliklerinin Tanımlanması

Kabuk elemanlar bir yada iki yöndeki uzunlukları diğer yöne göre çok büyük olan yüzey temsil elemanlarıdır. Geometrik olarak üç veya dört kenarlı yüzeylerle tanımlanırlar ve temsil ettikleri yapının orta düzlem boşluklarına göre konumlanırlar. Dolayısıyla analiz için kabuk elemanlara ait kalınlık değerlerinin tanımlanması gerekir. Bir diğer malzeme katsayı özelliği olan kesme faktörü; ANSYS Kabuk Eleman 163 bülteninde tavsiye edildiği üzere 5/6 değeri kabul edildi.

Preprocessor > Real Constants > Add komutu ile açılan pencereye (Şekil 4.7.) katsayı özellikleri Tablo 4.2 ‘de gösterilen değerler üzerinden tanımlandı.

Property	Parameter	Input Box
Shear Factor	SHRF	
No. of integration pts.	NIP	
Thickness at node 1	T1	
Thickness at node 2	T2	
Thickness at node 3	T3	
Thickness at node 4	T4	

Şekil 4.7. Katsayı özelliklerinin tanımlanması.

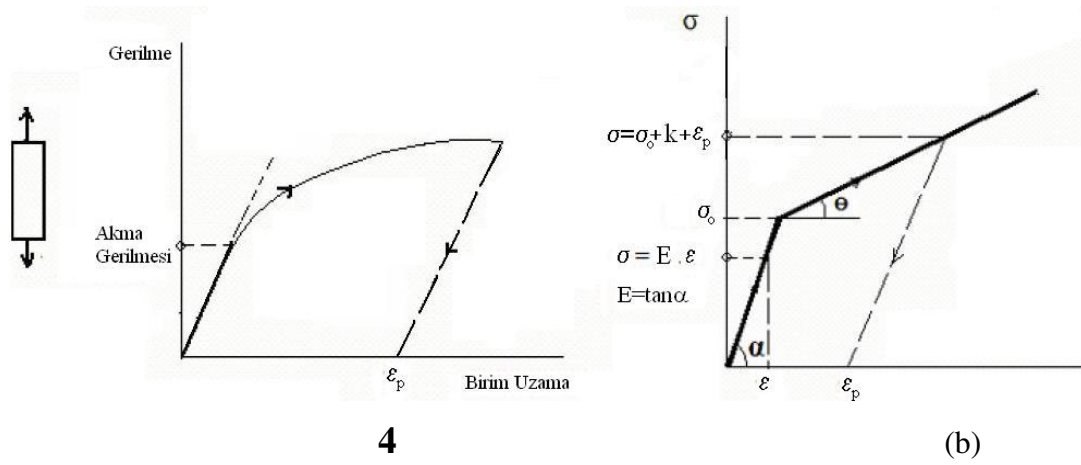
Tablo 4.2. Katsayı özellikleri.

	Malzeme Özelliği Katsayı Seti [REAL]	Kesme Faktörü (SHRF)	Kalınlık (T ₁)
Dişi Kalıp	1	5/6	4mm
Ana Boru	2	5/6	2.77mm
Erkek Kalıp	3	5/6	4mm

4.1.5. Malzeme Modellerinin Tanımlanması

Boru malzemesi proses boyunca kalıcı şekil değişimine uğratıldığından başka bir deyişle boru malzemesine plastik şekil verildiğinden doğrusal olmayan elasto – plastik malzeme modeli boru davranışını en iyi şekilde temsil eden model olarak kabul edildi. Malzeme özellikleri girilmeden önce bahsi geçen terimler aşağıdaki gibi tanımlanabilir:

- **Eşyönlü (İzotropik) Malzeme** : Tüm doğrultuda özellikleri aynı olan malzemelere eşyönlü malzeme denir.
- **Elastoplastik Malzeme** : Elastik bölgenin yanı sıra kalıcı deformasyonun olduğu plastik bölgede mevcuttur. Yükleme sırasında bir noktadaki gerilme akma gerilmesini aşarsa bu nokta plastik gerilmeye girmiştir ve kalıcı deformasyon oluşur. Yük plastik bölgede iken kaldırılırsa ilk şekline geri dönmez. Eğer plastik bölge bir eğri şeklinde yada doğru şeklinde olabilir.



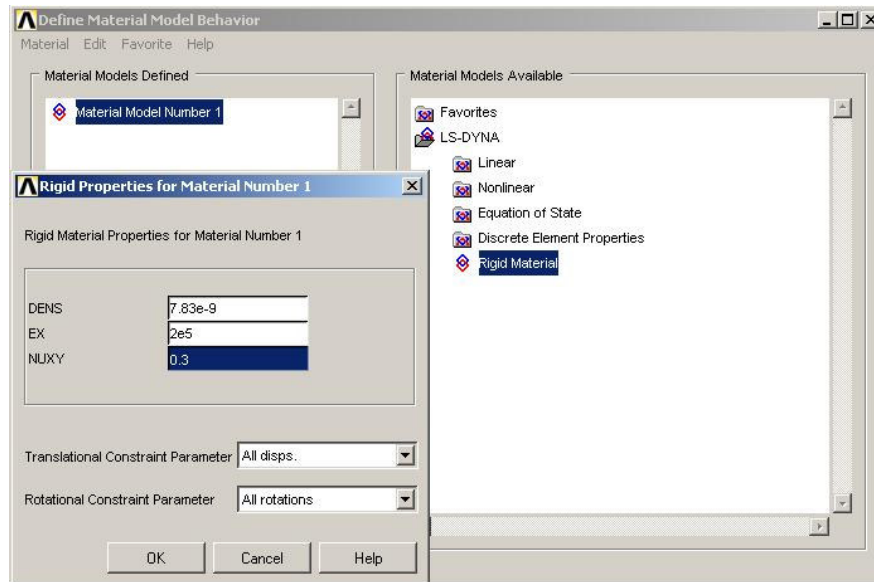
Şekil 4.8. Plastik bölgenin eğrisel (a) ve doğrusal (b) olma durumu.

Şekil verme süreci boyunca erkek ve dişi kalıpta herhangi bir deformasyon meydana gelmeyeceği, tüm yönlerde yerdeğiştirme ve dönme oluşmayacağı kabulü ile malzeme özelliği “rijit” kabul edildi.

Preprocessor > Materials Models > LS – DYNA > Rigid Material komutu ile açılan pencereye aşağıda belirtilen değerler girildi:

Tablo 4.3. Dişi ve erkek kalıp için rijit malzeme özellikleri.

Dens	Yoğunluk	$7.83e^{-9}$ ton/mm ³
EX	Elastiklik Modülü	$2e^5$ Mpa
NUXY	Poisson Oranı	0.3
Translational Constraint Parameter	Yerdeğiştirme parametresi	Tüm yerdeğiştirmeler
Rotational Constraint Parameter	Dönme parametresi	Tüm dönüşler



Şekil 4.9. Dişi ve erkek kalıp için rijit malzeme özelliklerinin tanımlanması

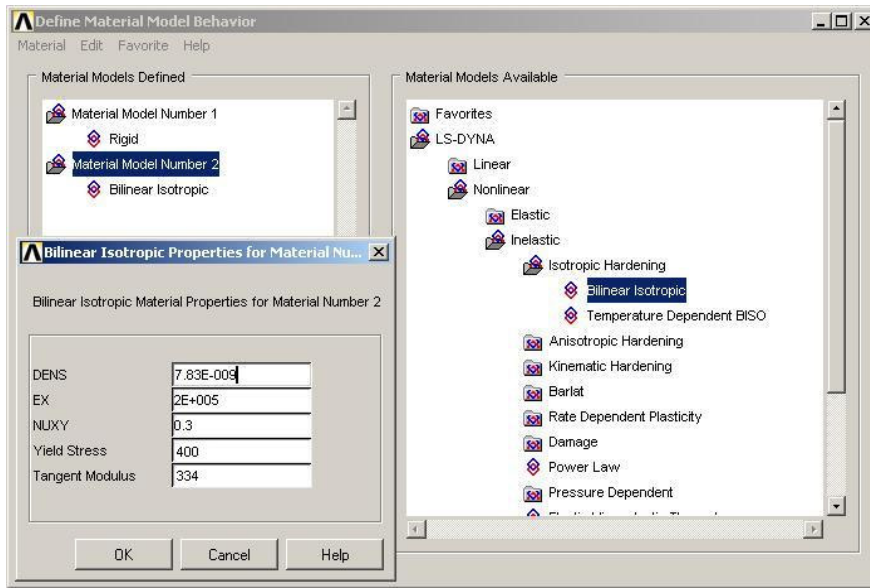
Proses boyunca boru malzemesinde meydana gelen plastik şekil değişimi için malzeme özelliklerinin tanımlanması aşağıdaki gibidir:

Preprocessor > Materials Models > LS – DYNA > Nonlinear > Inelastic > Isotropic Hardening > Bilinear Isotropic komutu ile açılan pencereye aşağıda belirtilen değerler girildi.

Tablo 4.4. Ana boru malzemesi için elastoplastik malzeme özellikleri [Rasmussen, 2001].

ASTM A312 TP304 Paslanmaz Çelik Boru

Dens	Yoğunluk	$7.83e^{-9}$ ton/mm ³
EX	Elastiklik Modülü	$2e^5$ Mpa
NUXY	Poisson Oranı	0.3
Yield Stres	Akma Gerilmesi	400 Mpa
Tangent Modulus	Tanjant Modülü	334 Mpa



Şekil 4.10. Ana boru malzemesi için elastoplastik malzeme özelliklerinin tanımlanması.

Eleman tipi, katsayı ve malzeme özellikleri tanımlanan dişi ve erkek kalıp ile ana boru malzemesine ait tanımlamalar aşağıdaki şekilde özetlenebilir:

Tablo 4.5. Eleman tipi, malzeme ve katsayı özellikleri özeti.

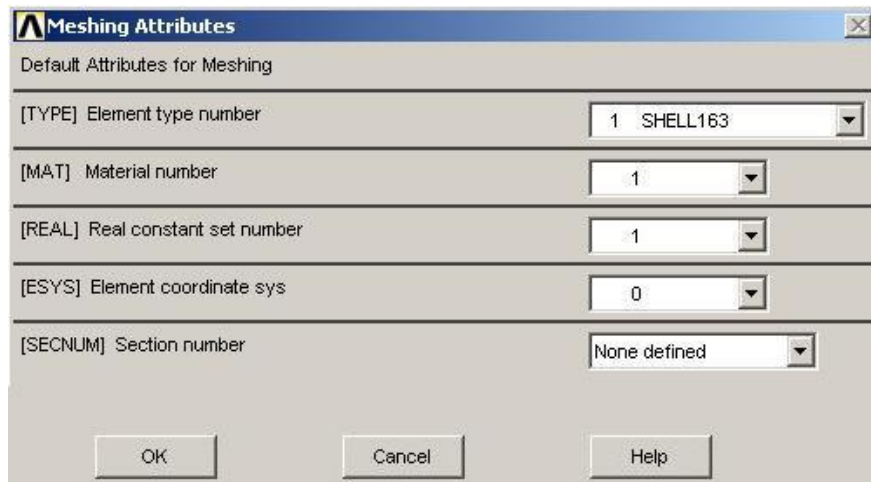
	Eleman Tipi	Malzeme Özelliği Katsayısı	Malzeme Modeli
Dişi Kalıp	1	1	1
Ana Boru	1	2	2
Erkek Kalıp	1	3	1

4.1.6. Ağ Yapısının Tanımlanması

Modellemesi bitirilen, eleman tipi ve malzeme modelleri belirlenen parçaların sonlu elemanlar analizinin yapılabilmesi için ağ yapılarının da tanımlanması gerekir. Her bir parça için ağ yapı aşağıdaki şekilde tanımlandı:

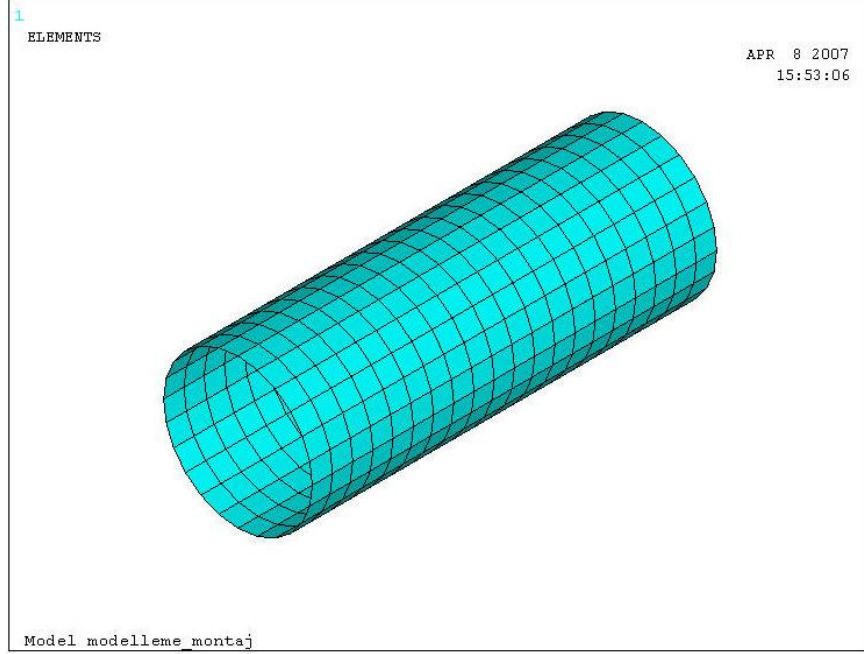
- **Dişi Kalıp** : Düz ve kavisli kısımdan oluşan dişi kalıp için iki ayrı ağ yapı tanımlandı.

Preprocessor > Mesh Tool > Global > Set > Meshing Attributes komutu ile açılan pencereye dişi kalıp için eleman tipi, malzeme modeli ve malzeme özelliği katsayısı girildi.



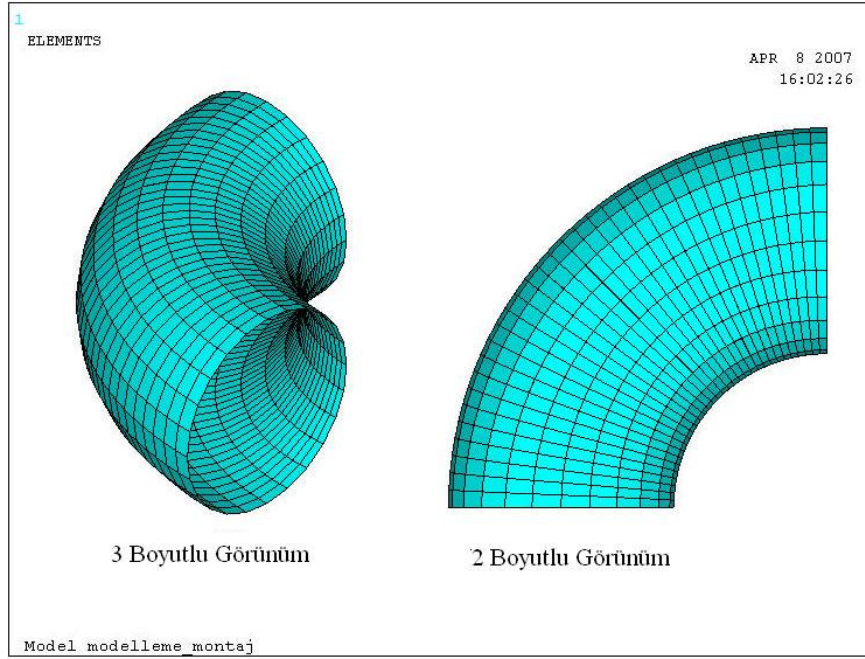
Şekil 4.11. Ağ yapı özelliklerinin belirlenmesi.

Dişi kalıbın düz ve kavisli kısmı için ayrı ayrı ağ yapı aracı (Mesh Tool) üzerinden girilen eleman büyüklüklerine göre elemanlara bölünmüş yapı Şekil 'de gösterilmiştir.

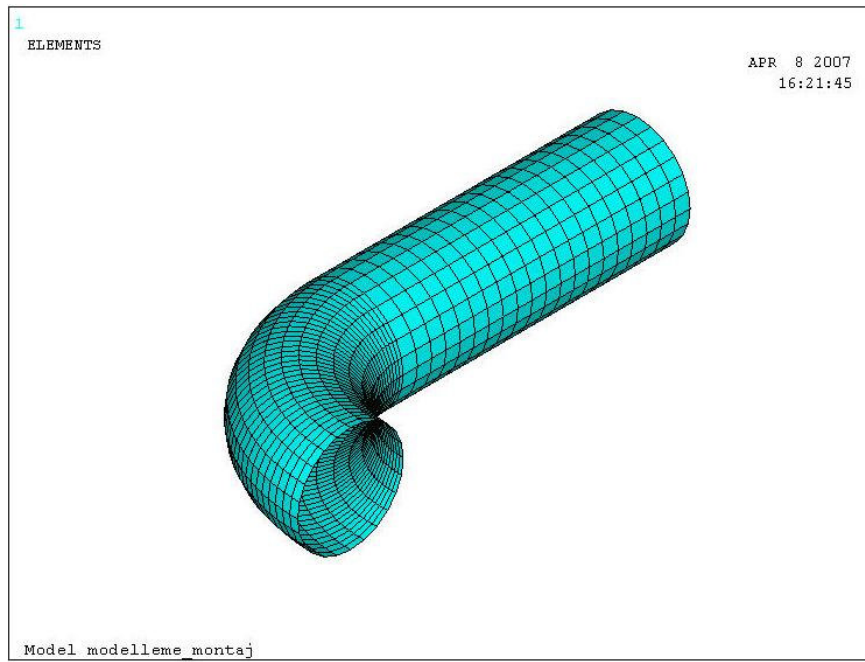


Şekil 4.12. Dişi kalıba ait düz kısmın ağ yapı görüntüsü.

Bükme operasyonunun gerçekleştiği dişi kalıbın kavisli kısmı şekillendirme açısından daha önemli olduğundan burada eleman boyutları daha küçük tutuldu. Kavisli kısma ait ağ yapı Şekil 4.13 'te de verilmiştir.



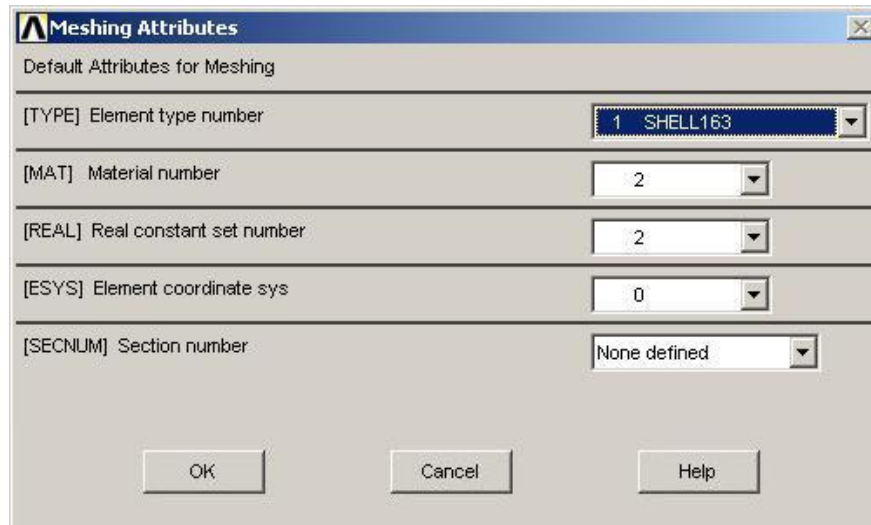
Şekil 4.13. Dişi kalıba ait kavis kısmının ağ yapı görüntüsü.



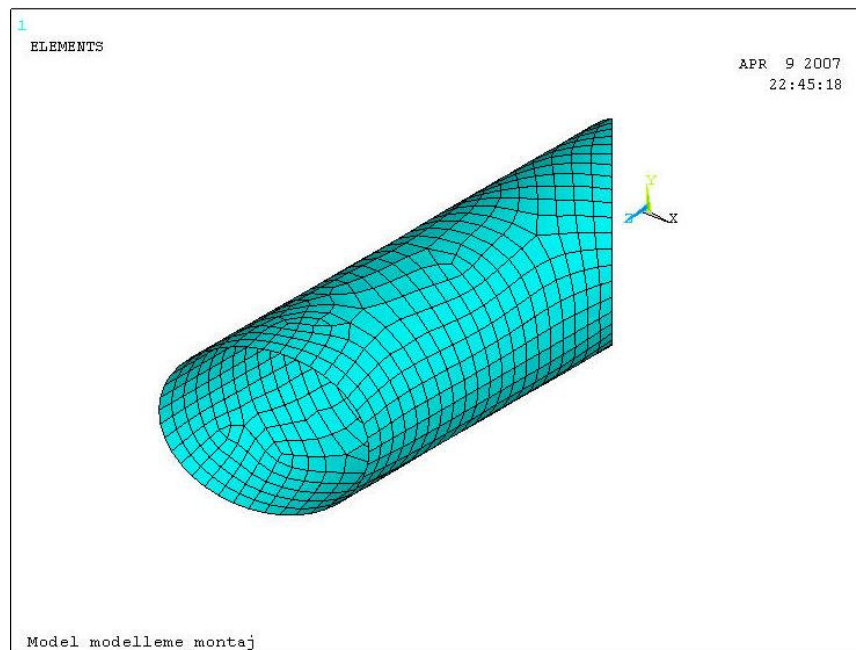
Şekil 4.14. Dişi kalıba ait ağ yapı görüntüsü.

Düz ve kavisli kısım için düzgün bir geometriye sahip olduğundan ağ yapısı da “Mapped” yapıldı.

- **Ana Boru** : Düzgün bir geometriye sahip olmayan ana boru için ağ yapısı serbest şekilde (free) yapıldı.

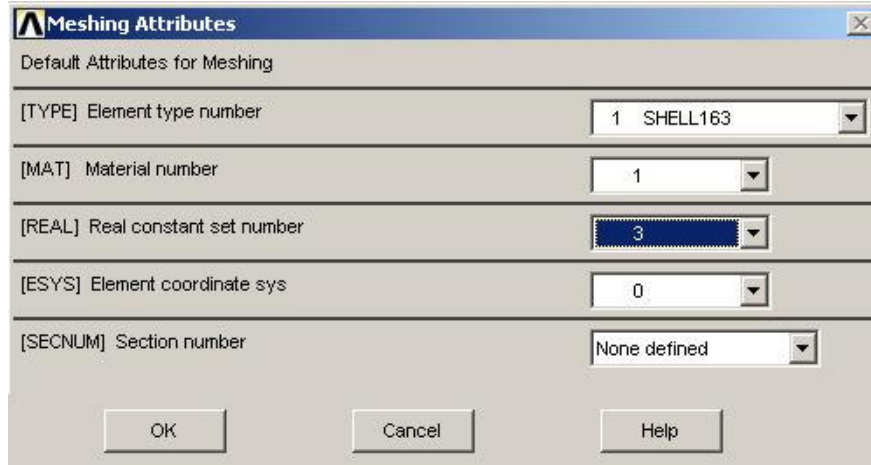


Şekil 4.15. Ana boru için ağ yapı özelliklerinin girilmesi.

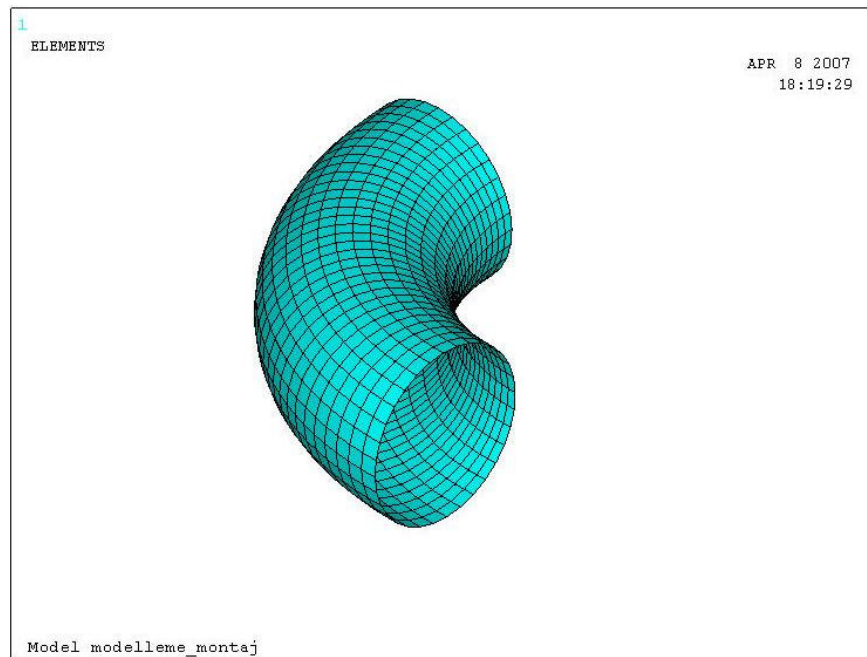


Şekil 4.16. Ana boru içi ağ yapı görüntüsü.

- **Erkek Kalıp** : Sadece kavis kısımdan oluşan erkek kalıp düzgün bir geometriye sahip olduğundan ağ yapısı “mapped” yapıldı.



Şekil 4.17. Erkek kalıp için ağ yapı özelliklerinin tanımlanması.



Şekil 4.18. Erkek kalıp için ağ yapı görüntüsü.

Ağ yapısı tanımlanan parçaların toplam eleman ve düğüm nokta sayıları Tablo 4.6 ‘da verilmiştir.

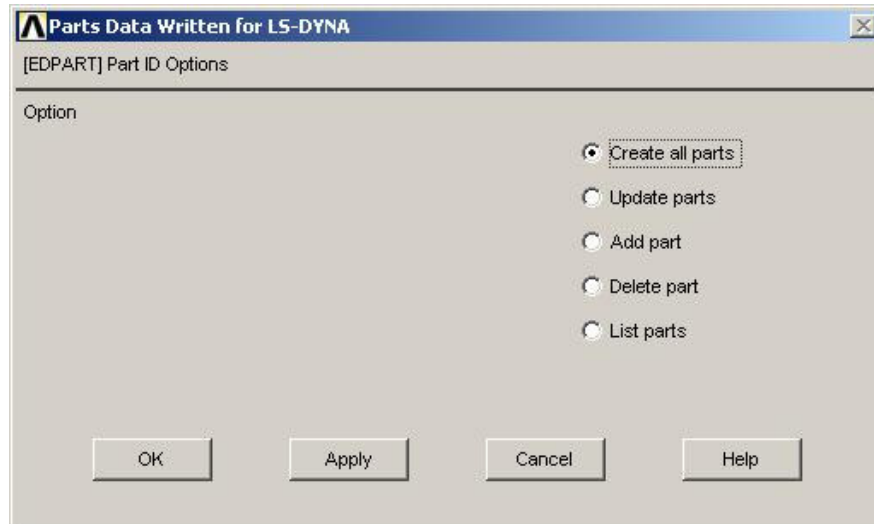
Tablo 4.6. Ağ yapısı tanımlanması sonrasında eleman ve düğüm noktası miktarları.

	Eleman Sayısı	Düğüm Noktası Sayısı
Dişi Kalıp	1296	1320
Ana Boru	891	933
Erkek Kalıp	1024	1056
Toplam	3211	3309

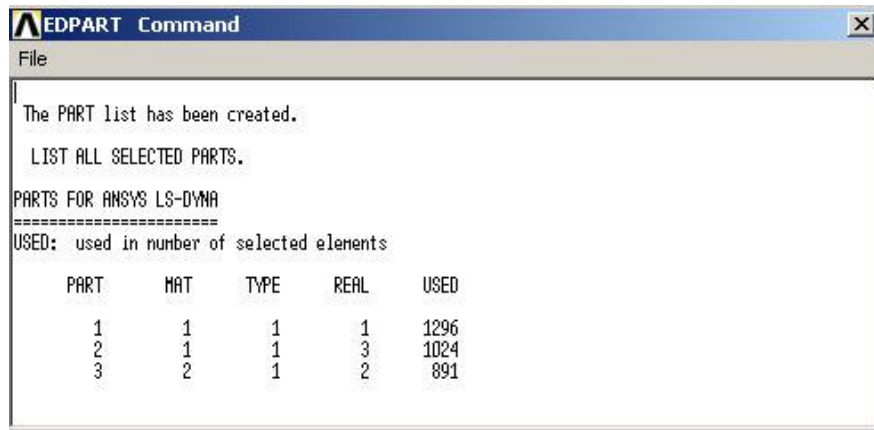
4.1.7. Bileşenlerin Oluşturulması

Belirli özelliklere göre seçilmiş öğelerin bir arada depolanmasına bileşen adı verilir. Seçilmiş bir komut için bileşenin kullanılması o grup içerisindeki tüm öğelerin seçilmesi ve bu komut için kullanılacağı anlamına gelir. Bir bileşen kolaylıkla seçilebilen/seçilmeyen benzer geometrik özelliklere sahip öğeler topluluğudur. Hacim, alan, çizgi, anahtar noktaları, elemanlar, düğüm noktalarından oluşan gruplar bileşenleri oluşturabilir. Analiz sürecini hızlandırmak amacıyla dişi kalıp, erkek kalıp, ana boru ve ana boru üzerinde ivme hareketi kazandırılacak bölge için aşağıda belirtilen şekilde bileşenler oluşturuldu.

Preprocessor > LS – DYNA Options > Part Options komutu ile açılan pencereye Şekil 4.19 ‘dan de görüleceği üzer “Create All Parts” tanımlandı.



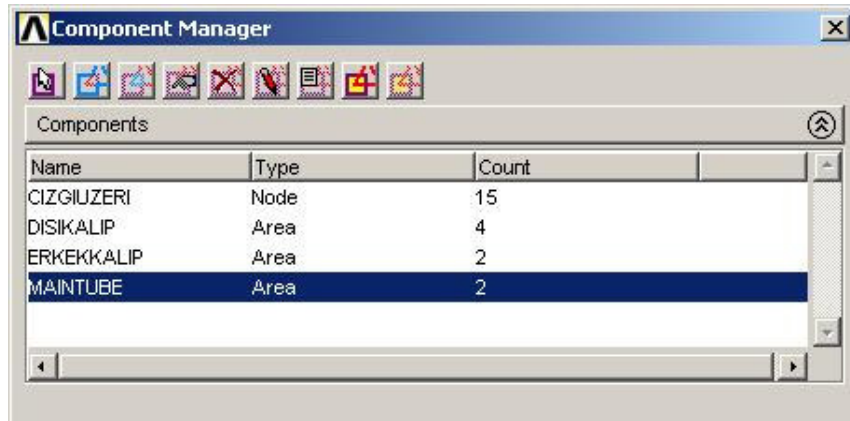
Şekil 4.19. Parçaların oluşturulması.



Şekil 4.20. Oluşturulan parçaların özellikleri.

Bileşenlerin oluşturulması aşağıda belirtildiği gibi yapıldı:

Utility Menu > Select > Component Manager komutu ile açılan pencere için ayrı ayrı seçilen parçalar (dişi kalıp, erkek kalıp, ana boru ve ana boru ivmelendirme bölgesi) için bileşenler oluşturuldu.



Şekil 4.21. Bileşenleri oluşturulan parçalar.

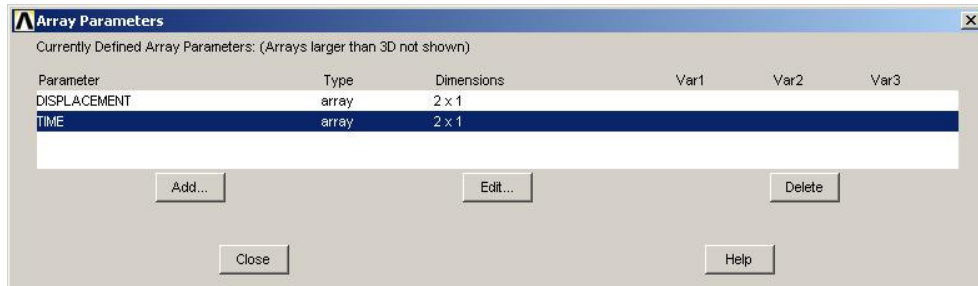
Şekil 4.21 ‘den de görüleceği üzere dişi kalıp, erkek kalıp ve ana boru parçaları için alanlar üzerinden bileşen oluşturulurken ana boruya yük uygulanan bölge için düğüm noktaları üzerinden bileşen oluşturuldu.

4.1.8. Düzen Parametreleri

Ana borunun proses boyunca bir yük tarafından ivmelendirildiğini modellemek için yerdeğiştirme ve zamanda bağlı yükleme eğrisi ana borunun bir ucuna uygulandı.

Açık dinamik analizlerde unutulmamalıdır ki; yapıya gelen yük belirli zaman aralığına göre uygulanır. Bu; yapının yüke karşı gösterdiği geçici davranışından gözlemlenebilir. Zaman aralıkları ve karşılık gelen düzen parametreleri olarak tanımlanır.

Utility Menu > Parameters > Array Parameters > Define/Edit komutu ile açılan pencereye işlem süresi ve işlem mesafeleri tanımlanır.



Şekil 4.22. Düzen parametrelerinin tanımlanması.

4.1.9. Yükleme

Bileşenlerin ve düzen parametrelerinin tanımlanmasına müteakip sonlu elemanlar modeline yükleme şartları uygulandı.

Main Menu > Solution > Loading Options > Specify Loads komutu ile açılan pencereye yük yönü (UZ), yükün uygulanacağı bileşen (ana boru serbest ucu), zaman değer parametresi ve yerdeğiştirme değer parametresi tanımlandı.

Şekil 4.23. Yük parametrelerinin tanımlanması.

4.1.10. Temas Tanımlamaları

Dişi kalıp – ana boru ve erkek kalıp – ana boru arasında tek yüzeyli temas algoritması işlenmiştir. Tek yüzeyli temas algoritması bir yapının dış yüzeyinin kendisi ile yada başka bir yapının dış yüzeyi ile temas etmesi prensibi üzerine kurulmuştur. Tek yüzey temas algoritması en genel temas algoritmasıdır. Bunun nedeni LS – DYNA yazılımı bir nüfuziyet olduğunu belirleyebilmesi için bir modelin tüm dış yüzeylerini taramasıdır. Tüm dış yüzeyler söz konusu olduğundan “temas” yada “hedef” yüzey tanımlamalarına gerek yoktur. Tek yüzey temas algoritması temasın ne şekilde meydana geleceği öngörülemeyen büyük deformasyonların meydana geldiği problemler için çok güçlü bir araç olabilir.

Main Menu > Preprocessor > LS – DYNA Options > Contact > Define Contact komutu ile temas özellikleri tanımlandı. Statik ve dinamik sürtünme katsayıları şekillendirme işleminin yağlayıcı kullanılarak ve kullanılmadığı durumlar için ayrı ayrı analiz edildi.

Contact Parameter Definitions	
[EDCGEN] LS-DYNA Explicit Contact Parameter Definitions	
Contact Type	Single Surface Nodes to Surface Surface to Surf Auto Gen'l (AG) Automatic (ASSC) Auto 2-D (ASS2D) Single Surf (SS) Eroding (ESS) Edge (SE)
Static Friction Coefficient	0
Dynamic Friction Coefficient	0
Exponential Decay Coefficient	0
Viscous Friction Coefficient	0
Viscous Damping Coefficient	0
Birth time for contact	0
Death time for contact	10000000
BOXID1 Contact box	0
BOXID2 Target box	0
OK Apply Cancel Help	

Şekil 4.24. Temas özelliklerinin tanımlanması.

4.2. Çözüm

Modeli ve malzeme özellikleri girilen parçaların sonlu elemanlar ile çözümü için kullanılan LS – DYNA yazılımının çalışma sisteminin kavranması gerekir. Bunun için sonlu elemanlar yönteminin bilinmesi gerekir. Modelleme için gerekli olan elemanların sayısının artması gerçek sonuçlara daha yakın ulaşmayı sağlamaktadır. Yazılım her bir elemanın el ile yapılması çok güç olan şekil fonksiyonlarını ve deplasman fonksiyonlarını oluşturmaktadır. Tanımlanan sınır şartlarına ve uygulanan yük durumuna göre modelin matrislerini oluşturur ve gerçeğe en yakın çözümü elde eder. Ön işlemleri bitirilen sonlu elemanlar modeline aşağıdaki komut izlenerek çözüm yaptırıldı:

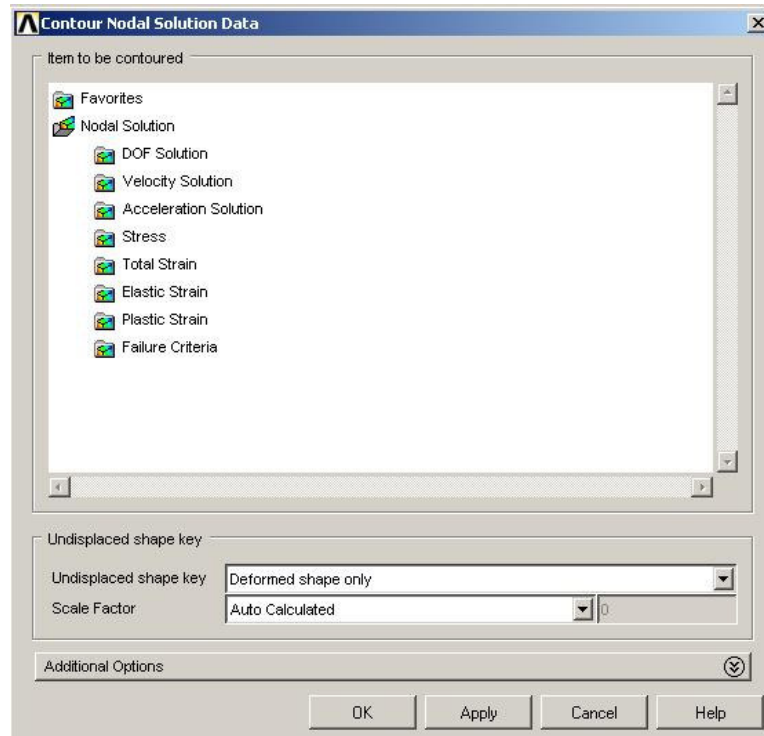
Main Menu > Solution > Solve

4.3. İleri İşlemler

Çözümü yaptırılan analiz sonuçları bu bölümde ekranda gözlenebilmektedir. Gerilmelerin büyüklüklerine göre sıralanması, denkliğin kontrolü, deforme olan yapının görüntülenmesi, modelin animasyonu gibi operasyonlar her bir analiz için ileriki bölümde verilmiştir. İleri işlemler aşağıdaki komut izlenerek yapıldı:

Main Menu > General Postproc > Read Results > Last Set komutu ile sonuçlar alınır.

Main Menu > General Postproc > Plot Results > Contour Plot > Nodal Solution



Şekil 4.25. Düğüm sonuçlarının alınması.

5. SONLU ELEMENLAR ANALİZLERİ

Sonlu elemanlar analizleri ana boruda bükme işlemi sonrası et kalınlığı değişimini ölçmek, boru kesiti boyunca gerilme dağılımını ve boru kesitinin değişimini incelemek amacıyla kullanıldı. Simülasyonlar ANSYS/LS – DYNA yazılımı ile gerçekleştirildi. Analizlerde izlenen yol 4.bölüm’de verildi.

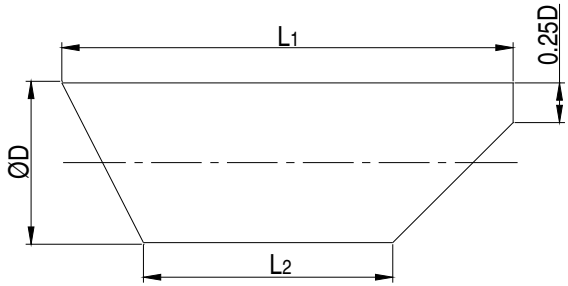
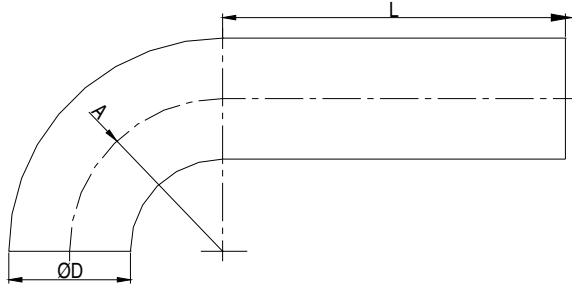
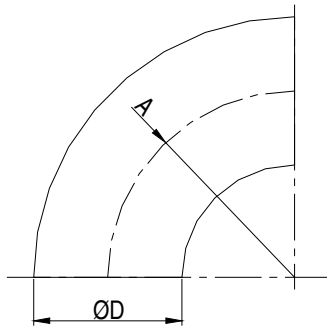
Şekil verme süresi, sürtünme koşulları ve kalıp mesafesi değişkenleri temel alınarak simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Simülasyonlar boyunca kullanılan ana boruya ait geometri özellikleri Tablo 5.1’ de verilmiştir.

Tablo 5.1. Ana boruya ait geometrik boyutlar.

Birim	Değer
Ana boru dış çapı	60.33mm
Ana boru et kalınlığı	2.77mm
Bükme Radyüsü	76mm

Dişi kalıp – ana boru ve ana boru – erkek kalıp arasındaki boşluk mesafesi birinci tip modelde 0.1mm, ikinci tip modelde 0.01mm kabul edildi. Sonlu elemanlar geometrik modellerine ait özellikler Tablo 5.2 ’de belirtilmiştir.

Tablo 5.2. Sonlu elemanlar geometrik modelleri.

Ana Boru 	<table><tr><th>Sembol</th><th>1.Tip Model</th><th>2.Tip Model</th></tr><tr><td>L_1</td><td>170mm</td><td>170mm</td></tr><tr><td>L_2</td><td>94mm</td><td>94mm</td></tr><tr><td>ϕD</td><td>57,56mm</td><td>57,56mm</td></tr><tr><td>t</td><td>2,77mm</td><td>2,77mm</td></tr></table>	Sembol	1.Tip Model	2.Tip Model	L_1	170mm	170mm	L_2	94mm	94mm	ϕD	57,56mm	57,56mm	t	2,77mm	2,77mm
Sembol	1.Tip Model	2.Tip Model														
L_1	170mm	170mm														
L_2	94mm	94mm														
ϕD	57,56mm	57,56mm														
t	2,77mm	2,77mm														
Dişi Kalıp 	<table><tr><th>Sembol</th><th>1.Tip Model</th><th>2.Tip Model</th></tr><tr><td>L</td><td>175mm</td><td>175mm</td></tr><tr><td>A</td><td>76mm</td><td>76mm</td></tr><tr><td>ϕD</td><td>64,43mm</td><td>64,34mm</td></tr><tr><td>t</td><td>4mm</td><td>4mm</td></tr></table>	Sembol	1.Tip Model	2.Tip Model	L	175mm	175mm	A	76mm	76mm	ϕD	64,43mm	64,34mm	t	4mm	4mm
Sembol	1.Tip Model	2.Tip Model														
L	175mm	175mm														
A	76mm	76mm														
ϕD	64,43mm	64,34mm														
t	4mm	4mm														
Erkek Kalıp 	<table><tr><th>Sembol</th><th>1.Tip Model</th><th>2.Tip Model</th></tr><tr><td>A</td><td>76mm</td><td>76mm</td></tr><tr><td>ϕD</td><td>50,69mm</td><td>50,78mm</td></tr><tr><td>t</td><td>4mm</td><td>4mm</td></tr></table>	Sembol	1.Tip Model	2.Tip Model	A	76mm	76mm	ϕD	50,69mm	50,78mm	t	4mm	4mm			
Sembol	1.Tip Model	2.Tip Model														
A	76mm	76mm														
ϕD	50,69mm	50,78mm														
t	4mm	4mm														

Analiz tipi “Yapısal” ve çözümleme “LS – DYNA Açık” seçildi. Eleman tipi “Thin Shell 163” belirlendi ve katsayı özellikleri Tablo 5.3’de gösterildi.

Tablo 5.3. Katsayı Özellikleri

	Malzeme Özelliği Katsayı Seti [REAL]	Kesme Faktörü (SHRF)	Kalınlık (T₁)
Dişi Kalıp	1	5/6	4mm
Ana Boru	2	5/6	2.77mm
Erkek Kalıp	3	5/6	4mm

Ana boru, dişi ve erkek kalıp için malzeme özellikleri Tablo 5.4 ve Tablo 5.5 'de verilmiştir.

Tablo 5.4. Ana boru malzemesi için elasto – plastik malzeme özellikleri [Rasmussen, 2001].

ASTM A312 TP304 Paslanmaz Çelik Boru

Dens	Yoğunluk	$7.83e^{-9}$ ton/mm ³
EX	Elastiklik Modülü	$2e^5$ Mpa
NUXY	Poisson Oranı	0.3
Yield Stres	Akma Gerilmesi	400 Mpa
Tangent Modulus	Tanjant Modülü	334 Mpa
Ultimate Strength	Kopma Gerilmesi	675 Mpa

Tablo 5.5. Dişi ve erkek kalıp için rijit malzeme özellikleri.

Dens	Yoğunluk	$7.83e^{-9}$ ton/mm ³
EX	Elastiklik Modülü	$2e^5$ Mpa
NUXY	Poisson Oranı	0.3
Translational Constraint Parameter	Yerdeğiştirme parametresi	Tüm yerdeğiştirmeler
Rotational Constraint Parameter	Dönme parametresi	Tüm dönüşler

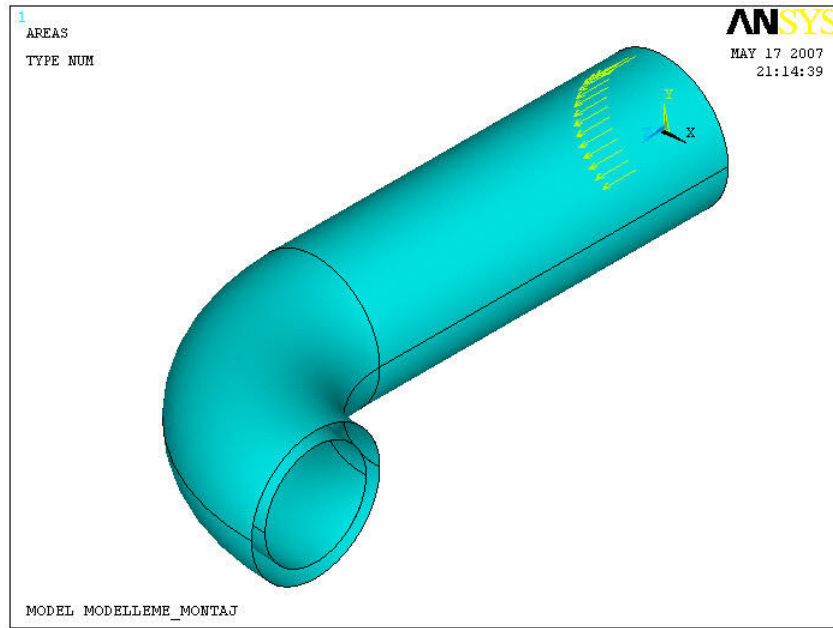
Ağ yapının belirlenmesinde her bir ağ boyutu; ağın atılacağı bölgenin büyüklüğü ile orantılı olması gereklidir. Ana boru, dişi ve erkek kalıp için ağ yapıya ait boyut özellikleri Tablo 5.6 'da verilmiştir.

Tablo 5.6. Ağ yapı özellikleri.

	Ana Boru	Dişi Kalıp	Erkek Kalıp
Ağ yapı genişliği	5mm	Düz kısım – 8.75mm	Dış radyüs – 5mm
		Kavisli kısım – 5mm	İç radyüs – 5mm
Eleman sayısı	891	1296	1024

Bileşenler (components) dişi kalıp, erkek kalıp, ana boru ve ana boru üzerinde yükün uygulandığı kısım için oluşturuldu.

Ana borunun proses boyunca bir yük tarafından ivmelendirildiğini modellemek için yerdeğiştirme ve zamanda bağlı yükleme eğrisi ana borunun bir ucuna uygulandı. $t = 5s/10s/15s$ işlem süreleri ve yerdeğiştirme (*displacement*) 175mm için UZ yönünde yüklenen ana boru modelleme görüntüsü Şekil 5.1 'de verilmiştir.



Şekil 5.1. Ana boru üzerinde yük uygulama görüntüsü.

Kalıp ve ana boru arasındaki mesafe, sürtünme koşulları ve işlem sürelerine göre yapılan her bir simülasyona ait detay Tablo 5.7 'de verilmiştir.

Tablo 5.7. Simülasyonlar ve parametre özellikleri.

	Dişi Kalıp – Ana Boru Ana Boru – Erkek Kalıp Arası boşluk	Sürtünme Katsayısı	Şekil Verme Süresi
Analiz – 1	0.1mm	Statik 0.060	5s
Analiz – 2		Dinamik 0.056	10s
Analiz – 3	0.1mm	Statik 0.120	5s
Analiz – 4		Dinamik 0.080	10s
Analiz – 5	0.1mm	Statik 0.039	5s
Analiz – 6		Dinamik 0.030	10s
Analiz – 7	0.01mm	Statik 0.060	5s
Analiz – 8		Dinamik 0.056	10s
Analiz – 9	0.01mm	Statik 0.120	5s
Analiz – 10		Dinamik 0.080	10s
Analiz – 11	0.01mm	Statik 0.039	5s
Analiz – 12		Dinamik 0.030	10s

6. DEĞERLENDİRMELER

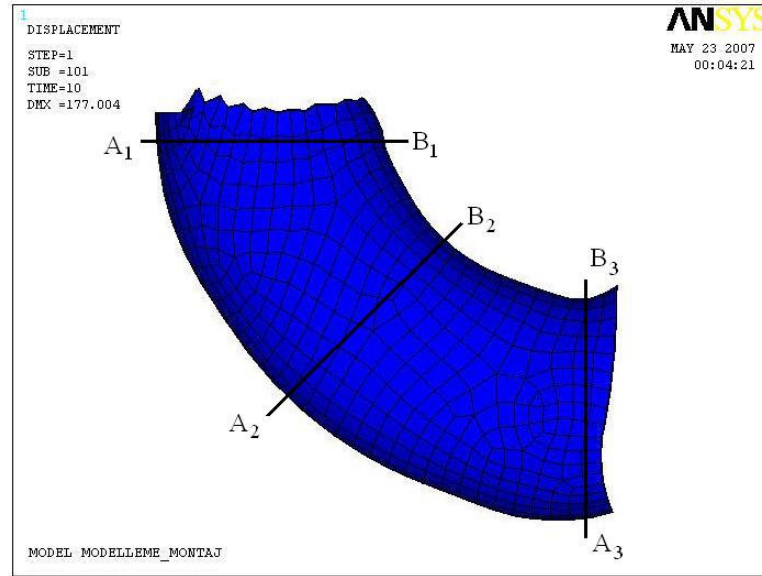
Yapılan tez çalışmasında boru dirsek parçalarının sonlu elemanlar yöntemi ile şekillendirilmesi, işlem parametreleri (şekil verme süresi, kalıp boşluk toleransları ve sürtünme koşulları) ve işlem parametrelerinin boru yapısındaki gerilme ve gerinim dağılımları üzerine olan etkileri incelenmiştir. Simülasyonların katı modellemesi ProEngineer Wildfire2.0 Bilgisayar Destekli Tasarım yazılımında hazırlanmıştır. Simülasyonlar ANSYS/LS – DYNA sonlu elemanlar analizi yazılımında gerçekleştirilmiştir.

Ana boru, dişi ve erkek kalıp gibi üç adet bileşenden oluşan analizlerde “ThinShell 163” elemanı kullanılmıştır. Tüm analizler için bileşenlerin ağ yapı boyutları kendi içerisinde aynı seçilmiştir. Sonlu elemanlar modeli 3211 elemandan ve 3309 düğüm noktasından oluşmaktadır. Ana boru malzemesi ASTM A312 TP304 kalite dikişli boru ve malzeme modeli doğrusal olmayan elastoplastik eş yönlü malzeme modeli olarak seçilmiştir. Gerilme ve gerinim dağılımlarının incelenmediği dişi ve erkek kalıplar için rijit malzeme modeli tanımlanmıştır.

Tüm analizler; kalıplar ve ana borunun tek bir geometrisi üzerinden yapılmıştır. Ana borunun proses boyunca eksenel bir itme yükü tarafından kalıp içerisine itilerek bükümü gerçekleştirilmiştir. Eksenel itme yükünün modellenmesi için bir yerdeğiştirme – zaman yük eğrisi ana boru serbest ucundaki düğüm noktalarına uygulanmıştır.

İşlem süresi, kalıp mesafe toleransları ve sürtünme koşullarının farklı varyasyonları için toplam 12 adet analiz gerçekleştirilmiştir. Simülasyonlar ile boru parçasında soğuk şekil verilmesi işlemi boyunca meydana gelen gerilme ve gerinim dağılımları elde edilmiştir. Bu sayede şekil verme süreci boyunca boru yapısının değişimi üzerindeki etkileri araştırılarak sonuçları ortaya çıkarılmıştır.

Bükme operasyonu gerçekleştirilen ana boru parçası üzerinde sonuçların karşılaştırıldığı altı kritik nokta seçilmiştir. Bu noktalar iç ve dış yarıçapta baş,orta ve son kesit üzerinde belirlenen düğüm noktalarıdır. Şekillendirilen ana boru parçasının proses sonrasında sonuçların karşılaştırıldığı iç ve dış yarıçaptaki noktalar Şekil 6.1’ de verilmiştir.



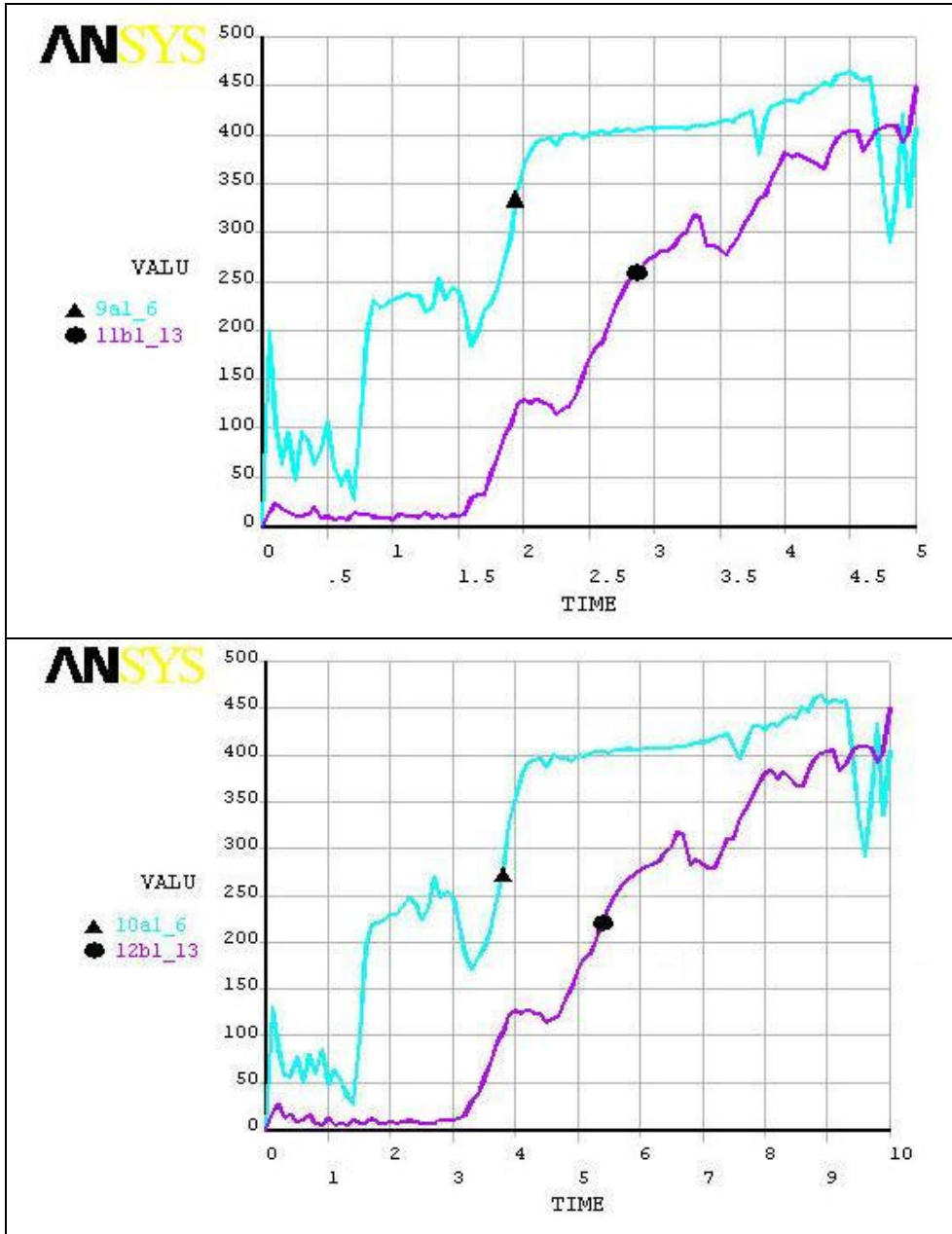
Şekil 6.1. Sonuçların karşılaştırıldığı kesit noktaları.

İç ve dış yarıçapta seçilen kritik düğüm noktalarının düğüm numaraları ve düğüm numaraları Tablo 6.1’ de gösterilmiştir.

Tablo 6.1. Sonuçların alındığı düğüm noktaları.

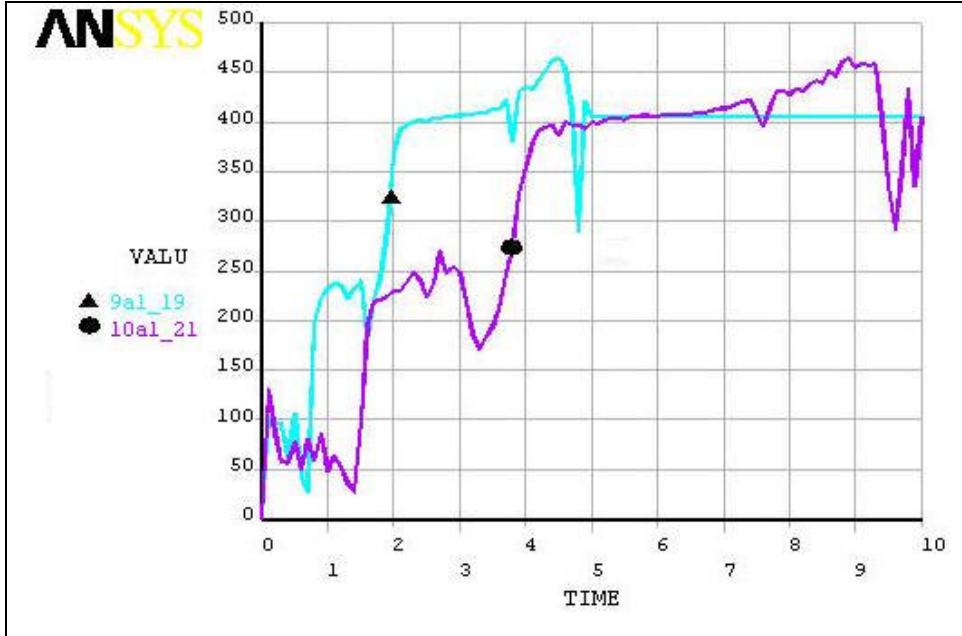
Düğüm Noktası	Düğüm Numarası	Düğüm Noktası	Düğüm Numarası
A1	2399	B1	2456
A2	2415	B2	2464
A3	2431	B3	2472

Yapılan tüm analizler içerisinde meydana gelen en yüksek gerilmeler eksenel yönde ana boru malzemesinin itildiği bölgeye en yakın olan A1 ve B1 düğüm noktalarında meydana gelmiştir. Eksenel itme kuvvetinin bükme işlemi boyunca etki etmesinin bir sonucu olarak bahsi geçen her iki düğüm noktasında da gerilmeler diğer düğüm noktaları ile karşılaştırıldığında işlem sonuna kadar artmaktadır. Tüm analizlerde en yüksek gerilmelerin elde edildiği analizlerin Gerilme – Zaman grafikleri Şekil 6.2’de gösterilmiştir.



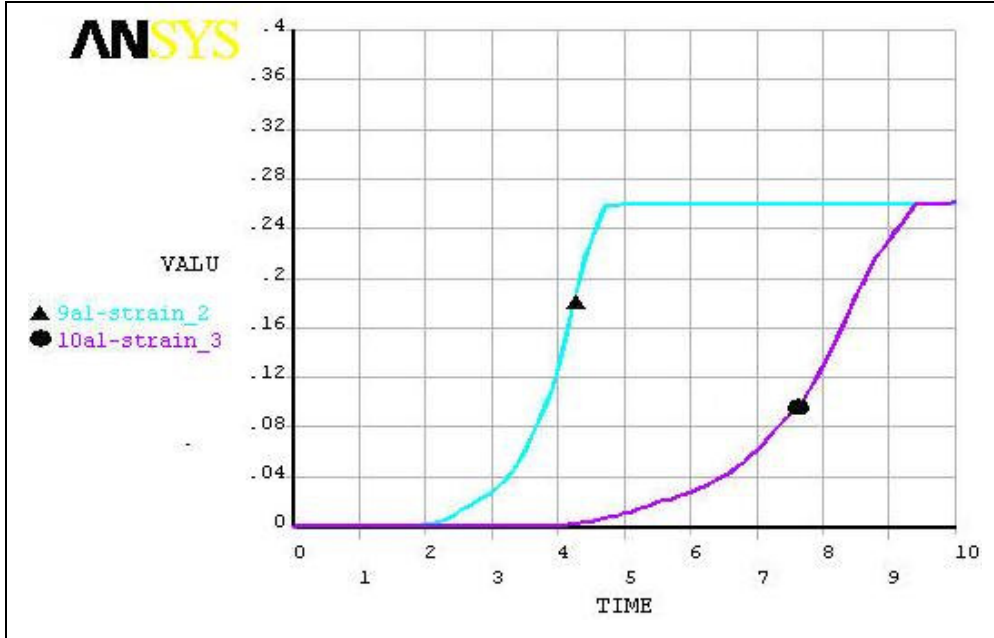
Şekil 6.2. İşlem süresinin 5s/10s durumlarında maksimum gerilmelerin meydana geldiği düğüm noktaları A1 ve B1 için gerilme – zaman dağılımları.

İşlem sürelerinin 5s ve 10s olma durumlarına göre gerçekleştirilen analizlerde, seçilen kritik noktalardaki maksimum gerilme değerlerinin birbirine çok yakın sonuçlar verdiği görülmüştür. Tüm noktalarda en yüksek gerilmelerin elde edildiği A1 düğüm noktası için gerilmenin zamana bağlı değişimi Şekil 6.3’de gösterilmiştir.



Şekil 6.3. 5s ve 10s işlem süreleri için A1 düğüm noktasında meydana gelen gerilme – zaman dağılımı

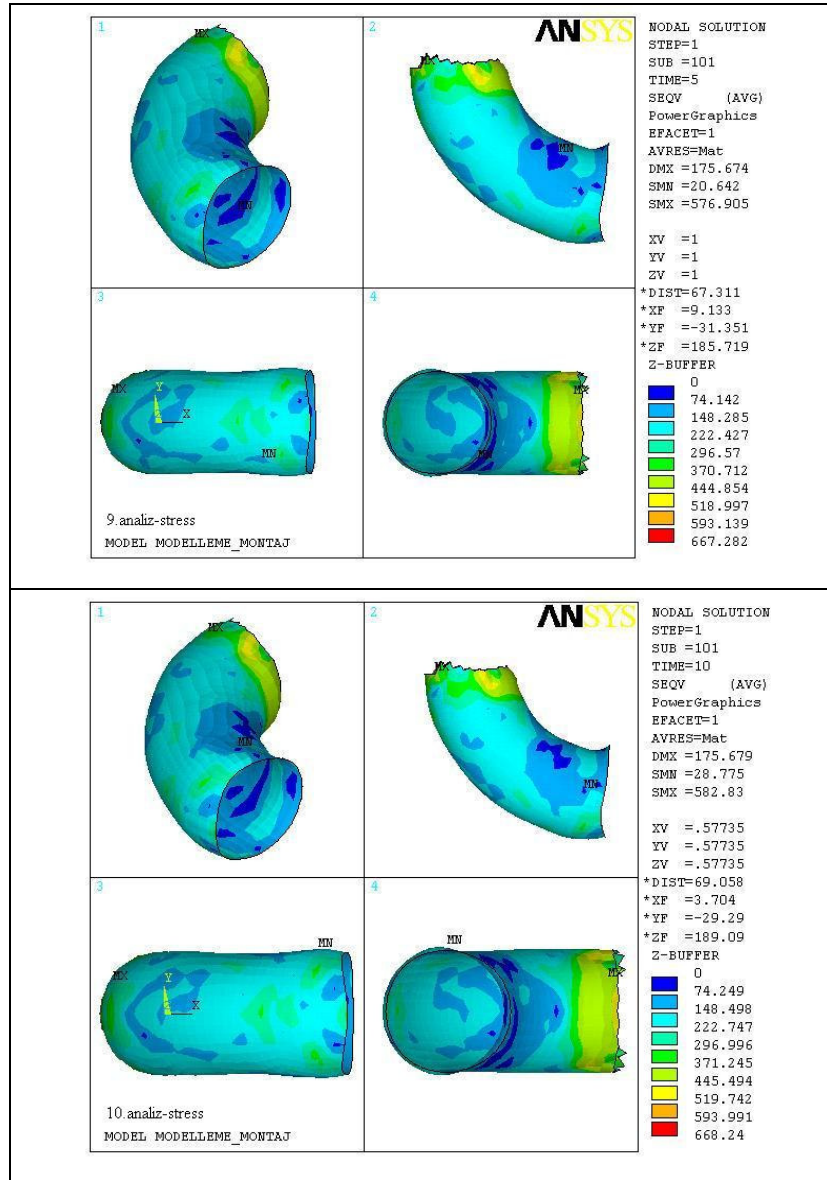
Sürtünme katsayılarının yüksek ve kalıp boşluk toleranslarının dar alındığı analizlerde deformasyon değerleri de yüksektir. En yüksek deformasyonlar Analiz-9 ve Analiz – 10 da A1 düğüm noktalarında elde edilmiştir. Deformasyonların zamana bağlı olan değişimleri Şekil 6.4’de gösterilmiştir.



Şekil 6.4. Maksimum deformasyonların saptandığı Analiz – 9 ve 10 için A1 düğüm noktasında deformasyon – zaman dağılımları.

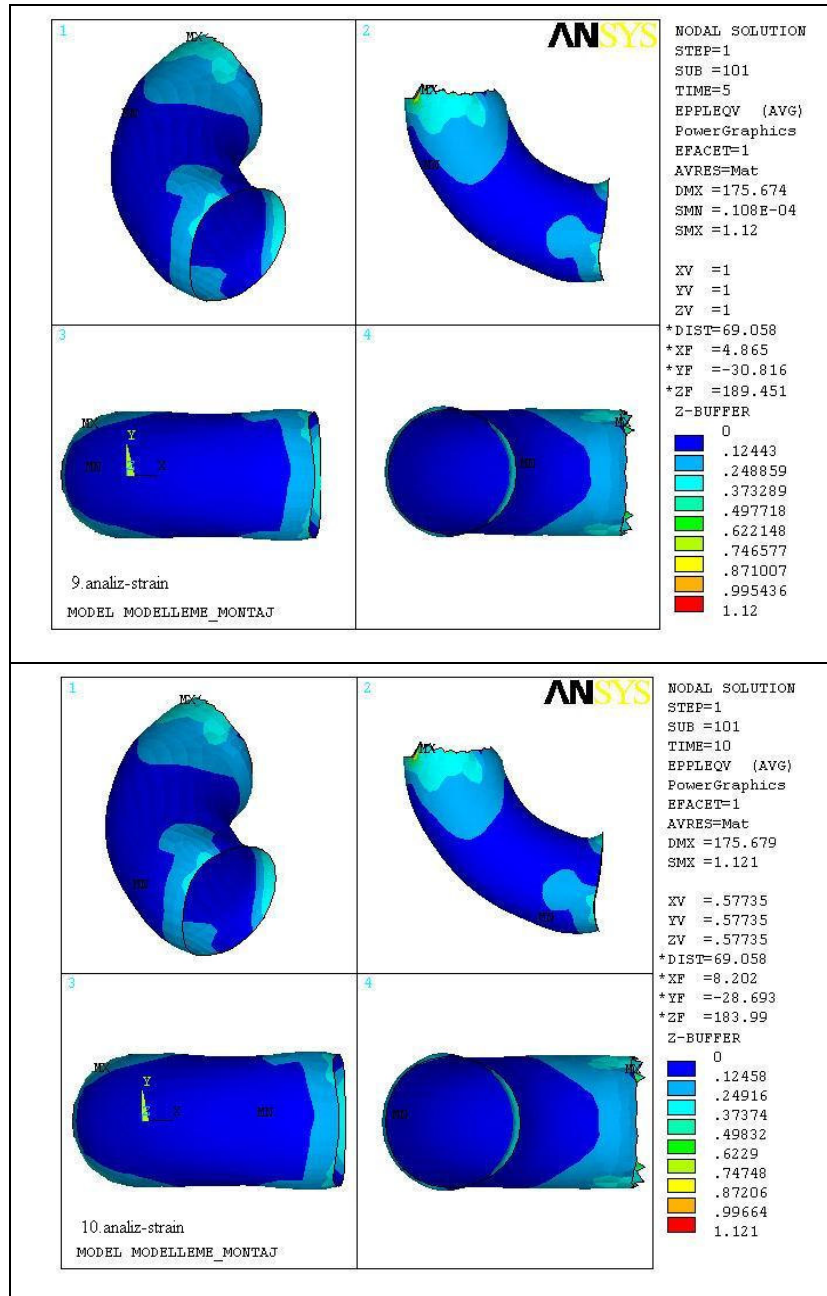
Eksenel itme kuvvetinin etkisi ile eksene dik yönde bükülmeye çalışan ve diğer düğüm noktalarına kıyasla erkek kalıp ile temasa daha erken geçen A3 ve B3 düğümlerinde deformasyonlar daha hızlı başlamıştır. Bu da deformasyon hızının bahsi geçen düğümlerde diğer düğüm noktalarına kıyasla daha yüksek olduğunu göstermektedir.

Yapılan analizler içerisinde en yüksek gerilmeler *Analiz – 9* ve *Analiz – 10*'da meydana gelmiştir. Her iki analiz kalıp mesafe toleranslarının en dar (0.01mm) ve sürtünme katsayılarının (Statik 0.120, Dinamik 0.080) en yüksek dikkate alındığı analizlerdir. Her iki analiz için Von – Mises gerilme dağılımları Şekil 6.5'de gösterilmiştir. Kalıp mesafe boşluklarının daralması ve bükme işleminin az kaydırıcı ortamda gerçekleşmesi (sürtünme katsayılarının yüksek olması) durumunda gerilmelerin yükselmesi sonucunda deformasyonlar da yükselmektedir.



Şekil 6.5. Analiz – 9 ve 10 için Von – Mises gerilme dağılımları.

Analiz – 9 ve *Analiz – 10* için Von – Mises deformasyon dağılımları Şekil 6.6’da gösterilmiştir. Tüm ana boru yapısı üzerinde maksimum gerilmelerin elde edildiği *Analiz – 9* ve *Analiz – 10*’ da en yüksek deformasyonlar da elde edilmiştir. Kalıp boşluklarının daralması ve sürtünme koşullarının artması gerilme değerlerini yükseltmesi sonucu deformasyon miktarlarını da arttırmaktadır.



Şekil 6.6. Analiz – 9 ve 10 için Von – Mises deformasyon dağılımları.

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

SONUÇ :

Yapılan tez çalışmasında boru dirsek parçaları sonlu elemanlar yöntemi ile şekillendirilmiştir. Şekil verme işlemi süresince ana boru malzemesinde meydana gelen gerilme ve gerinim dağılımları incelenmiştir. Şekil verme süresi, kalıp boşluk mesafeleri ve sürtünme koşulları gibi işlem parametrelerinin ana boru üzerindeki kritik noktalara olan etkileri elde edilmiştir. Boru dirsek parçalarının bükülerek şekillendirilmesi operasyonunda en yüksek gerilmelerin ve deformasyonların, kalıp mesafe toleranslarının en dar ve sürtünme katsayılarının en yüksek olduğu bükme yönteminde olduğu elde edilmiştir.

ÖNERİLER :

İleride yapılacak olan benzer çalışmalarda kullanılan yöntem ve teknikler örnek alınabilir.

Ana boru ve kalıp geometrileri, sonlu elemanlar ağ yapısı, farklı şekil verme hızları gibi işlem parametrelerinin şekil verme sürecine olan etkileri araştırılabilir.

İşlem parametrelerinin bükme işlemi sonrasında dirsek parçasının geometrik yapısı üzerine olan etkileri incelenebilir.

Analizler süper bilgisayarlarda gerçekleştirilerek sonuçlar daha kısa sürede elde edilebilir.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- [1] Yuansong Zeng, Zhiqiang Li . Experimental research on the tube push-bending process , Journal of Materials Processing Technology 122 (2002) 237–240
- [2] Z. Jina, S. Luo, KBS-aided design of tube bending processes, Engineering Applications of Artificial Intelligence 14 (2001) 599–606
- [3] Andre´s Rodrı´guez, Margarita Mezzettib,1, Peter Fodorc, Rafael Cola´s, , Forming of seamless pipe fittings , Journal of Materials Processing Technology 120 (2002) 432–437
- [4] Han Shan-Ling, Lin Zhong-Qin, Lu Xiao-Yang, Process of Push Bending Elbows and Its Parameters CAD System , JOURNAL OF SHANGHAI JIAOTONG UNIVERSITY , 2005 Vol.E-10 No.4 P.373-376
- [5] S. Baudin , P. Ray, B.J. Mac Donald ,, M.S.J. Hashmi . Development of a novel method of tube bending using finite element simulation , Journal of Materials Processing Technology 153–154 (2004) 128–133
- [6] J.B. Yang, B.H. Jeon, S.I. Oh, The tube bending technology of a hydroforming process for an automotive part, J. Mater. Process. Technol. 111 (2001) 175–181.
- [7] S. Thiruvardchelvan, F.W. Travis, Tube bulging with a urethane rod,J. Mater. Process. Technol. 23 (1990) 195–209.
- [8] B.J. Mac Donald, M.S.J. Hashmi, Three dimensional finite element simulation of bulge forming using a solid bulging medium, Finite Elem. Anal. Des. 37 (2001) 107–116.

- [9] B.J. Mac Donald, M.S.J. Hashmi, Near net shape manufacture of engineering components using bulge forming processes: a review, *J.Mater. Process. Technol.* 120 (2002) 341–347.
- [10] E. Salas-Zamarripa¹, M.P. Guerrero Mata¹, R. Colás, J. Martínez , Improvement in Tooling Design for Hot Forging of Seamless Elbow Fittings, 2003 ABAQUS Users' Conference Releases
- [11] Shijian Yuan, Bugang Teng, Z.R. Wang , A new hydroforming process for large elbow pipes , *Journal of Materials Processing Technology* 117 (2001) 28 – 31
- [12] N.C. Tang , Plastic-deformation analysis in tube bending, *International Journal of Pressure Vessels and Piping* 77 (2000) 751±759
- [13] Horn Machine Tools, “Basic guide to rotary draw tube bending”.
- [14] Wang X., Cao J., 2001, “Wrinkling limit in tube bending” , *Transactions of the ASME Journal of Engineering Materials Materials and Technology* Vol.123/435.
- [15] S. J. Yuan, Z. Xu, Z. R. Wang*, Wang Hai . The integrally hydro-forming process of pipe elbows . *International Jomall of Pressure Vessels and Piping* 75 (1998) 7-9
- [16] Wang ZR, Wang T, Kang DC. The technology of the hydro-bulging of whole spherical vessels and experimental analysis. *J. Me& Work. Tech.*, 1989;18:85-94.
- [17] Wenchuan Li, Y.Lawrence Yao, 2001 , “Laser Bending of Tubes : Mechanism, Analysis, and Prediction” , *ASME J.*, Vol.123, pp.674 – 681
- [18] Silve, S., Steen, W. M., and Podschies, B., 1998, “Laser Forming Tubes: A Discussion of Principles,” *Proceedings of ICALEO*, Section E, pp. 151–160.

- [19] H.A. Al-Qureshi, A. Russo, Spring-back and residual stresses in bending of thin-walled, *Materials and Design* 23 (2002) 217 – 222.
- [20] R.Agarwal, Tube bending with axial pull and internal pressure, Master of Science Thesis, Texas A&M University, USA 2000.
- [21] T.Granelli, When a good tube bends bad Part I, *The Tube and Pipe Journal*, 2006.
- [22] T.Granelli, When a good tube bends bad Part II, *The Tube and Pipe Journal*, 2006.
- [23] F. Stachowicz, Bending with upsetting of copper tube elbows, *Journal of Materials Processing Technology* 100 (2000) 236 – 240.
- [24] H. Yang, Y. Lin, Wrinkling analysis for forming limit of tube bending processes, *Journal of Materials Processing Technology* 152 (2004) 363 – 369.
- [25] H. Yıldız, O.Kırlı, Derin çekme işleminin doğrusal olmayan sonlu elemanlar metodu yardımıyla modellenmesi, *Mühendislik Bilimleri Dergisi*, Kasım 2003, Pamukkale Üniversitesi.
- [26] Yijun Liu, Finite element method lecture notes, January 2003, Mechanical Engineering Dept., University of Cincinnati.
- [27] V.Ivanco, Finite element method course notes, April 1997, Faculty of Mechanical Engineering, Technical University of Košice, Slovakia.
- [28] David Hutton, Fundamentals of finite element analysis, 2004 New – York , McGraw – Hill Companies Inc.
- [29] Kim JR Rasmussen, Full – range Stress – strain curves for stainless steel alloys, Research report No R811, November 2001, The University of Sydney.

ÖZGEÇMİŞ

Hakan Karabulut 01.05.1982 yılında Ardahan’da doğmuştur. Selçuk Üniversitesi Mühendislik – Mimarlık Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü’nden 2003 yılında mezun olmuştur. Aynı yıl Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Tasarım ve İmalat Mühendisliği yüksek lisans eğitimine başlamıştır ve devam etmektedir. İngilizce bilmektedir. Halen Metal Servis Danışmanlık San.ve Tic.Ltd.Şti’ nde satış temsilcisi olarak görev yapmaktadır.