

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**HİDROLİK AKIŞKAN BASINCIYLA (HYDROFORMING) TESİSAT
BAĞLANTI ELEMANLARININ ŞEKİLLENDİRİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS

Mesut ÖZER

Anabilim Dalı: Makina Eğitimi

Danışman: Yard. Doç. Dr. Yasin KIŞIOĞLU

KOCAELİ, 2007

ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR

Ülkemizde metal şekillendirme işlemleri üzerine deneysel ve teorik olarak bir çok çalışma sunulmuştur. Bu çalışmaların bazı sonuçlar endüstriye yenilik olarak dönebilirken, bazıları sadece bilgi olarak kalmıştır. Türkiye'nin en büyük otomotiv sanayisinin bulunduğu Kocaeli bölgesinde hydroforming yöntemi ile düşük maliyetli, dayanıklı parçaların üretilmesi için zemin olabilecek bu tez çalışması, Türkiye'de bir ilki temsil edebilecek nitelikte hazırlanmıştır. Bu alanda Türkiye'deki sanayi sektörü en iyi biçimde tetkik edilmiş, ancak boru hydroforming tekniğinin bir kaç sektör haricinde hiç kullanılmadığı tespit edilmiştir. Sadece analitik ve nümerik çalışmalarla sınırlı kalan bu tez çalışması için deneme testleri, bir sonraki çalışma safhası olan, prototip hydroforming pres imalatı sonrasına bırakılmış olup, otomotiv ve tesisat sektörünün dikkatini en yoğun bir biçimde çekileceği kanaatine varılmıştır.

Bu çalışma esnasında, proje hazırlama, çeşitli konferans ve sempozyumlara makale yazma, sunum hazırlama ve tez aşamasında, beni bu analitik ve nümerik çalışmalara yönlendiren, yeni bir ufuk gösteren sayın hocam, Yard. Doç. Dr. Yasin KİŞİOĞLU'na, bu çalışmaya desteklerini her safhada hissettiren ve hissettirecek olan, DENGE TESİSAT A.Ş. ve ASLI TEKNİK MAKİNA A.Ş. ye, beni hayata hazırlayan babam Ali ÖZER'e, her anımda desteklerini hissettiğim eşim Hilal ve kızım Rana'ya sonsuz şükranlarımı sunarım.

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR.....	ii
İÇİNDEKİLER	iii
ŞEKİLLER DİZİNİ	v
TABLolar DİZİNİ	vii
SİMGELER	viii
ÖZET	ix
İNGİLİZCE ÖZET	x
1. GİRİŞ.....	1
2. HİDROLİK AKIŞKAN BASINCIYLA ŞEKİLLENDİRME (HYDROFORMING).....	5
2.1 Literatür Taraması.....	5
2.2 Hydroforming Şekillendirme İşlemleri.....	6
2.2.1 Sac metal şekillendirme işlemi.....	7
2.2.2 Klasik derin çekme işlemi.....	8
2.2.3 Sıvı yardımcı sac tutucu ile derin çekme işlemi.....	9
2.2.4 Hydroforming derin çekme işlemi.....	10
2.2.5 Hidromekanik derin çekme işlemi.....	11
2.2.6 Hidrodinamik derin çekme işlemi.....	12
2.2.7 Hidro-kenar derin çekme işlemi.....	13
2.2.8 Süper plastik sac metal şekillendirme işlemi.....	13
2.2.9 Viskos basınçlı şekillendirme işlemi.....	14
2.2.10 Derin çekme ve hidrolik basınç kombinasyonu ile şekillendirme işlemi... 15	
2.2.11 Çift sac parçaların hydroforming işlemi.....	16
2.2.12 Birleşik hydrobulk şekillendirme işlemi.....	17
2.3 Boru Hydroforming.....	18
2.3.1 İç basınçlı hydroforming.....	18
2.3.2 Dış basınçla hydroforming.....	22
2.3.3 İç ve Dış Basınçla Hydroforming.....	23
2.4 Boru Hydroforming İşleminde İşlem Arızaları.....	23
2.4.1 Yırtılma.....	25
2.4.2 Belverme.....	26
2.4.3 Buruşma	27
2.4.4 Geri katlanma.....	27
2.5 Hydroforming işleminin Analitik Hesaplama Yöntemi.....	28
2.5.1 Gerçek doğrulama.....	29
2.5.2 Sonlu Elemanlar Yöntemi.....	32
2.5.2.1 Plastisite teorisi.....	32
2.5.2.2 Doğrusal olmayan(non-lineer) sonlu elemanlar.....	33
2.5.2.3 Dinamik sonlu elemanlar formülasyonu.....	40
2.5.2.4 İmplicit (kapalı) Hesaplama.....	42
2.5.2.5 Eksplisit (açık) Hesaplama.....	43
2.5.2.6 Zamanlama Kavramı.....	44

2.5.2.7 Temas Analiz.....	45
2.6 Hydroforming İşleminde Kullanılan Ekipmanlar.....	46
2.6.1 Hidrolik sistem.....	47
2.6.2 Hidrolik tahrik sistemi.....	48
2.6.3 Şekillendirme İşleminde Kullanılan Akışkan.....	48
2.6.4 Basınç yükseltici.....	49
2.6.5 Dekompresyon.....	51
3. TESİSAT BAĞLANTI ELEMANLARININ BİLGİSAYARDA MODELLENMESİ.....	52
3.1 Hydroforming İşleminin Modellenmesi.....	55
3.2 Sonlu Elemanlar Modeli.....	56
3.3 Hydroforming İşleminin Bilgisayar Destekli Simülasyonu.....	56
3.3.1 Standart “T” bağlantı elemanının analiz sonuçlarının değerlendirilmesi....	57
3.3.2 Standart “Y” bağlantı elemanının analiz sonuçlarının değerlendirilmesi....	71
3.4 SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	76
KAYNAKLAR	78
ÖZGEÇMİŞ	82

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1: Hydroforming işleminin otomotiv uygulamaları	2
Şekil 2.1: Hidrolik basınçlı akışkanla şekillendirme işlemleri.....	7
Şekil 2.2: Çift yönlü derin çekme işlemi	8
Şekil 2.3: Tek yönlü derin çekme işlemi	9
Şekil 2.4: Sıvı yardımcı derin çekme işlemi	9
Şekil 2.5: Silindirik fincanın şekillendirilmesi.....	10
Şekil 2.6: Silindirik fincanın şekillendirilmesi.....	10
Şekil 2.7: Tek yönlü hidromekanik derin çekme presi ile derin çekme işlemi....	11
Şekil 2.8: Çift yönlü hidromekanik derin çekme derin çekme işlemi.....	2
Şekil 2.9: Hidrodinamik derin çekme işlemi.....	12
Şekil 2.10: Hidro-kenar derin çekme işlemi	13
Şekil 2.11: Süper plastik sac metal şekillendirme	14
Şekil 2.12: Viskos basınçlı şekillendirme.....	15
Şekil 2.13: Derin çekme ve hidrolik basınç kombinasyonu ile şekillendirme.....	16
Şekil 2.14: Çift sac parçaların hydroforming işlemi.....	17
Şekil 2.15: Özel yapılı poli-hedron,	17
Şekil 2.16: Boru hydroforming işlemi ve işlem basamakları	19
Şekil 2.17: Hydroforming işleminde parametrelerin uygulanması.....	19
Şekil 2.18: Hydroforming işleminde iç basınç ve aksel kuvvetlerin uygulanması	20
Şekil 2.19: a) Hydroforming işleminde T bağlantı elemanının şekillendirilmesi..	21
Şekil 2.20: Dış basınçla hydroforming işlemi.....	22
Şekil 2.21: İç ve dış basınçla hydroforming.....	23
Şekil 2.22: Hydroforming işleminde işlem arızaları.....	24
Şekil 2.23: Dış basınçla hydroforming işlemi.....	26
Şekil 2.24: İşlem penceresi.....	28
Şekil 2.25: Gerçek doğrulama safhaları.....	30
Şekil 2.26: İnkremental çözüm algoritması.....	31
Şekil 2.27: (a) Doğrusal ve (b) doğrusal olmayan tepki.....	33
Şekil 2.28: Newton-Raphson algoritmasında yükün uygulanması.....	34
Şekil 2.29: İç içe geçmiş yüklemeler.....	34
Şekil 2.30: Yük ve zaman ilişkisi.....	35
Şekil 2.31: Yük ve zaman arttırımı.....	35
Şekil 2.32: Temas yüzeyler.....	45
Şekil 2.33: Hydroforming işleminde ekipman görünümü.....	46
Şekil 2.34: Akışkanların sıkıştırılabilirlik durumları.....	48
Şekil 2.35: Pompa kapasitelerinin yorumlanması.....	49
Şekil 2.36: Basınç yükseltici.....	50
Şekil 3.1: Hydroforming yöntemiyle üretimi tasarlanan “T” bağlantı elemanı...	52
Şekil 3.2: Uygun yükleme eğrileri.....	54
Şekil 3.3: Simülasyon tasarımı.....	56

Şekil 3.4: Boru profilinin sonlu elemanlar modeli.....	57
Şekil 3.5: Alt ve üst kalıp geometrileri.....	58
Şekil 3.6: Strok mesafelerinde zımbaların yükleme miktarı.	59
Şekil 3.7: Farklı basınçlarda elde edilen “T” profilleri.....	60
Şekil 3.8: 200 Mpa basınçta görünen çökme.....	62
Şekil 3.9: T boru standartları.....	63
Şekil 3.10: Çeşitli basınçlarda elde edilen“T” bağlantı elemanlarının kesit görünümleri ve gerilim dağılımı.....	64
Şekil 3.11: 60 Mpa basınçta yerdeğiştirme- zaman grafiği.....	66
Şekil 3.12: 60 Mpa basınçta yer değiştirme miktarı dağılımı.....	67
Şekil 3.13: 60 Mpa basınçta Gerinim-Zaman ilişkisi.....	68
Şekil 3.14: 60 Mpa basınçta T bağlantı elemanında gerilim dağılımı.....	69
Şekil 3.15: 60 Mpa basınçta T bağlantı elemanında gerilim diyagramı.....	70
Şekil 3.16: 60 Mpa basınçta T bağlantı elemanında gerilim dağılımı.....	71
Şekil 3.17: Deformasyon sonunda kalıp, zımba ve iş parçasının yerleşimi.....	72
Şekil 3.18: Farklı basınçlarda kesitleri.....	73
Şekil 3.19: Rijit zımbalara uygulanan kuvvet.....	74
Şekil 3.20: Malzeme yer değiştirme hızı.....	75

TABLolar DİZİNİ

Tablo 2.1: İşlem safhaları yüzde zamanı.....	30
Tablo 2.2: Sonlu elemanlar yazılımları ve yöntemleri.....	38
Tablo3.1: SAE/AISI 304 paslanmaz çelik malzemenin kimyasal özellikleri	53
Tablo3.2: SAE/AISI 304 paslanmaz çelik malzemenin mekanik özellikleri	53
Tablo 3.3: Farklı basınçlarda maksimum ve minimum et kalınlıkları.....	65
Tablo 3.4: Y bağlantı elemanının maksimum ve minimum kalınlık değerleri...	75

SİMGELER

σ_{ij}	:Cauchy gerilmesi
ρ	:Yoğunluk
a_i	:İvme
b_i	:Gövde kuvvet yoğunluğu
n_j	:Sınır yüzey normali
t_i	:Yüzey çekmesi
u_i	:Yer değiştirme sınır şartı
F^{ext}	:Yüzeyin çekilmesi sonucu oluşan düğüm kuvvet vektörü
F^{int}	:Gerilme ıraksaklığından kaynaklanan düğümsel kuvvet vektörü
M	:Küme düğüm kütle matrisi
K	:Katılık matrisi
C	:Sönümlenme matrisi
Δt_a	:Kritik zaman adımı,
L	:Uzunluk
C_d	:Dalga hızı
ε_{ij}	:Toplam şekil değiştirme hızı
ε_{ij}^e	:Elastik birim şekil değiştirme hızı

HİDROLİK BASINÇLI AKIŞKAN(HYDROFORMING) İLE TESİSAT BAĞLANTI ELEMANLARININ ŞEKİLLENDİRİLMESİ

Mesut ÖZER

Anahtar Kelimeler: Tesisat bağlantı elemanları, Hydroforming tekniği, Metal şekillendirme, Bilgisayar yardımı ile simülasyon, Sonlu elemanlar metodu.

Özet: Bu tez çalışmasında, modern imalat metotlarından biri olan hidrolik basınçlı akışkan (Hydroforming) gücü kullanılarak yapılan metal şekillendirme işlemi, bilgisayarda simüle edilmiştir. Bilgisayar simülasyonu için DEFORM-3D bilgisayar paket programı kullanılmıştır. Hydroforming tekniğiyle, standart boru profillerden istenilen şekilde kompleks makine elemanları şekillendirilerek imal edilebilirliği simüle edilmiştir. Bilgisayar programında, malzemesi SAE/AISI 304 paslanmaz çelik olan iki ucu açık yuvarlak profilli boru kullanılarak, dikişsiz “T” bağlantı elemanının şekillendirilmesi yapılmıştır. Bunun için, boru ve kalıp malzemelerinin katı modelleri, malzeme özellikleri, sınır, kontak yüzey ve sürtünme şartları, zimbaların strok mesafeleri ve yönleri, ve hidrolik sıvı basıncının karakteristikleri bilgisayarda tanımlanmıştır. Sonlu elemanlar tekniği ile simülasyon sonucunda elde edilen parçanın; gerilme ve zorlanma dağılımları, “T”nin et kalınlığı değişimi analiz edilmiştir Hydroforming metodu yardımıyla dikişsiz “T” bağlantı elemanlarının özel amaçlı pres tezgahlarında imal edilebilirliği için simülasyondan optimal tasarım parametreleri elde edilmiştir.

THE FORMING PLUMBING ELEMENTS WITH HYDRAULIC PRESSURIZED FLUID (HYDROFORMING)

Mesut ÖZER

Key Words: Elements of piping joints, Hydroforming technique, Metal forming, Computer aided simulation, Finite element method

Abstract: In this study, computer aided metal forming process is simulated using the tube hydroforming process which is one of the most important modern manufacturing processes. For the computer simulation, a computer code, DEFORM-3D, is utilized. Using tube hydroforming technique, the manufacturability of complex machine components as in desired form from the standard tubes are simulated using the computer code. In the computer simulation, the forming process of a seamless straight T and Y fittings are carried out from the standard circular tube made out of SAE/AISI 304 stainless steel. In order to do this, the solid models and material properties of the tubes and relevant die elements, boundary and contact surface conditions, characteristics of the hydraulic fluid, and punch strokes are specified in the computer program. Therefore, stress and strain deformation diagrams for each region and change in the thickness of the formed straight T and Y are obtained and analyzed using the computer simulations along with the well known technique, Finite Element Method. Some optimal design and process parameters are obtained from the tube hydroforming process simulations in order to manufacture the seamless fittings components.

1. GİRİŞ

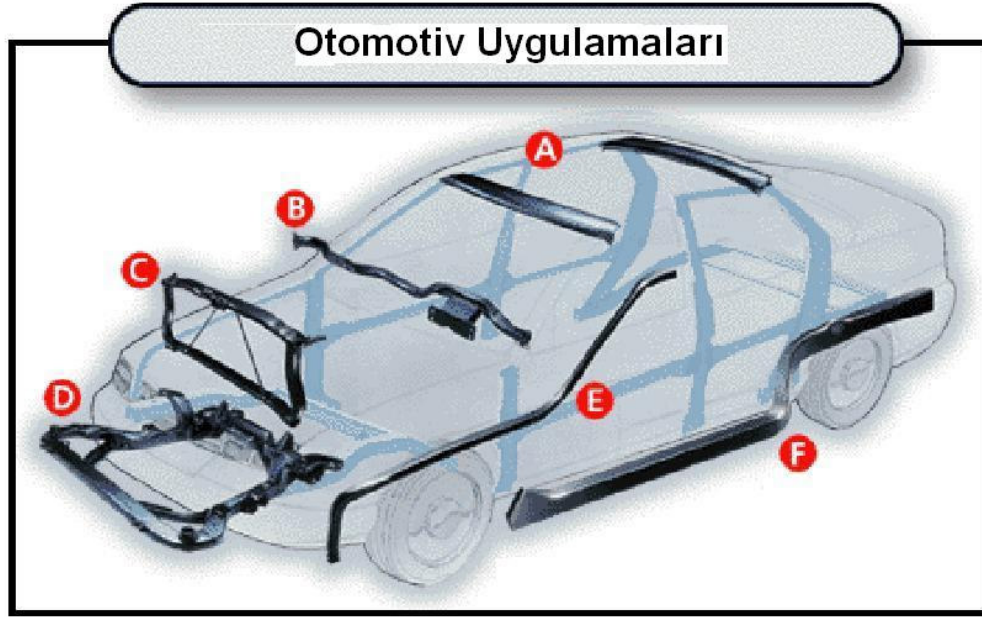
Örsten gelen ilk demir dövme seslerinden güçlü preslerin kullanımına kadar, çelik veya diğer malzemelerin şekillendirilmesi artık teknik olarak sınırlı konuma gelmiştir. Onun yerine metal şekillendirmede “hydroforming” gibi yeni mekaniksel teknikler kullanılmaya başlanmıştır.

Hydroforming tekniği, 17. yüzyılda Pascal tarafından formüle edilen “Kapalı hacimlerde sıvılara uygulanan basınç, hacmin bütün yönüne eşit etki eder.” prensibinden yararlanılarak günümüze taşınmış bir uygulamadır. Hydroforming tekniği hakkındaki çalışmalar, ilk 1939’da J.E. Grey tarafından başlatılmış, sağlık alanında kullanılan dikişsiz bakır soketlerin yapımına çalışılmıştır (Grey, 1939). Birçok teorik ve deneysel çalışmadan sonra bu teknik genel imalat metotlarında kullanılmaya başlanmıştır. Hidrostatik basınç kullanımındaki ilk sayılabilecek araştırmalar “Malzemelerin Basınç Yardımıyla Daha İyi Esnetilebileceği” hakkında olmuştur. Fuchs (1966), 20. yüzyılın başlarında çeşitli metaller üzerinde hidrostatik basınç uygulayıp, elde ettiği gerilme sonuçlarını incelemiş, bu deneylerin sonucunda, malzemelerdeki süneklik önemli oranda arttığında, gerilme dayanımı büyük artışlar göstermediğini gözlemlemiştir.

1970’li yıllarda otomotiv endüstrisi, hydroforming tekniğinin otomotiv parçalarının imalatında kullanılabileceği konusunda geniş araştırmalara girmiştir. On yıl içerisinde sac hydroforming ve boru hydroforming tekniğinde büyük çapta üretimler gerçekleştirilmiştir.

Hidrostatik basınç yardımıyla metallerin şekillendirilebilirliği artırılır. Hidrostatik basıncın metal şekillendirmede çok avantajlı olmasına rağmen, endüstride 20. yüzyılın ortalarında kullanılmaya başlanmıştır ve gittikçe yaygınlaşmaktadır. Bunun nedeni 1940’larda yüksek basınç elde etmede pahalı ekipmanların kullanılması ve maliyetin artması, günümüzde ise o zamana göre bu maliyetin azalmasıdır.

Boru hydroforming, hidrostatik basınç uygulamalarından birisidir, ve Şekil 1.1’de görülen kompleks otomotiv parçalarının imalatında, en yüksek düzeyde yinelenebilirlik, ucuz sarf malzeme maliyeti, esnekliği ve bir çok işlemi (kaynaklama, presleme gibi) tek adımda toplayan mükemmel bir uygulamadır. Boru hydroforming parçalarının klasik preslenmiş veya kaynakla birleştirilmiş parçalara göre; daha mukavemetli parça imalatı, ölçülerde daha sınırlı toleranslar ve kütle tasarrufu gibi birçok avantaja sahiptir. Fakat yavaş çevrim süresi, pahalı ekipman, geniş bilgi ve tecrübe gereksinimi açısından da dezavantajlara sahiptir. Boru hydroforming işlemi; eksoz parçaları, kam milleri, radyatör çerçeveleri, arka akslar, motor beşiği, koltuk çerçeveleri, şasi gövde parçaları, karoseri gibi makine ve otomotiv parçalarının yekpare şekillendirme işlemidir.



Hidroforming işleminin otomotiv uygulamaları:
A. Tavan rayları B. Panel destekleri C. Radyatör Destekleri
D. Motor Beşiği E. Yan raylar F. Şasi konstrüksiyon

Şekil 1.1: Hydroforming işleminin otomotiv uygulamaları (Koc ve Altan, 2000)

Hydroforming, bir derin çekme veya presle sıcak-soğuk dövme işleminden daha fazla metaller üzerinde deformasyon yapabilir. Hydroforming işlemi, 1990’larda otomotiv imalat sektöründe uygulanabilir şekillendirme işlemi haline geldi. Bu işleme odaklanılması sonucu, hydroforming işlemi gelişti ve gelişimine devam

etmektedir. Birçok ülkelerde araştırmalar daha çok sac metal şekillendirme teknolojisine dair olmaktadır. Üniversitelerdeki araştırma merkezleri, daha çok araba şirketleriyle, sac-metal ve boru imalatçılarıyla yakından bağlılık kurup bu teknolojiye öncülük etmektedirler.

19. yüzyılın başlangıcında insanlar makineler ile matematiksel problemlerin çözülebileceği bilgisine sahip olmuşlardır. Yarım yüzyıl sonra bu gerçekleşmiş ve basit problemler mekanik makineler sayesinde çözülebilmıştır. Bu 1948 yılında ilk elektronik bilgisayarın yapılmasına kadar sürmüştür.

Bilgisayarın bu evrimsel gelişiminin bir safhası da matematiksel problemlerin sayısal olarak çözümlenmesidir. Matematik dilini bilgisayar diline uyarlayabilmek mekanik veya termo-mekanik gibi yapılarda kompleks problemlerin çözümü için gereklidir. Sayısal metotlardan birisi bu problemlerin çözümünde yetenekli olan sonlu elemanlar metodudur. İlk sonlu elemanlar sayesinde modellemeler 1960'lı yıllarda yapılmıştır. Elbette sonlu elemanlar kavramından önce çok ülkede sonlu elemanlara dair bir takım içerikler vardı. Fakat son 10 yılda sonlu elemanlar kavramına akıl almaz katkılar yapıldı. Özellikle hesaplama maliyetlerinin ve zamanını düşmesi ve bilgisayar hızların artması bu katkıları tetikledi. Mühendislik pratiklerinde temel tasarım hesaplarının ve pahalı deneylerinin yerini aldı.

Sonlu elemanlar metodu (SEM) destekli simülasyonlar, boru hydroforming işlemleri için başarılı bir biçimde kullanılmaktadır. Endüstriyel uygulamalarda SEM modellerinde hızlılık ve hassasiyet çok önemli bir faktördür. Etkili çözümler bazı teorik varsayımlara dayanan elemanlar kullanılarak başarılabilir. Eleman formülasyonunda daha az serbestlik derecesi, daha hızlı hesaplamalara sebep olmaktadır. Formülasyonlardaki basitlik ise hassas sonuçların elde edilememesini sonucuna ulaştırır.

Bugün eksplisit (açık) SEM , boru hydroforming işleminin gerçel doğrulaması için en temel araçtır. İmplicit (kapalı) veya ters çözüm gibi diğer metotlarda bazı problemleri çözebilir, ancak eksplisit metotlar daha etkilidir. Ekspilisit SEM'in en önemli karakteristiği simülasyonlardaki hızıdır.

Bu tez çalışması genel olarak , üç bölümden oluşmaktadır. Bölüm 1’de hydroforming işlemine geniş bir tanımlama yapılarak, hydroforming işleminin kısa tarihçesi, uygulama alanları ve endüstriye sağladığı katkılar açıklanmıştır. Bölüm 2’de bir literatür taraması ile hydroforming alanındaki çalışmalar sunulmuş, sac ve boru hydroforming işlemleri birer birer tanıtıldıktan sonra boru hydroforming işlemi ve bu işlemde karşılaşılabilecek arızalar, boru hydroforming işleminde analitik hesaplama yöntemleri, boru hydroforming işleminde kullanılan ekipmanlar ve kullanılan akışkanlar tanıtılmıştır. Bölüm 3’te Tesisat bağlantı elemanlarından “T” ve “Y” eleman için AISI 304 paslanmaz çelik malzemenin kimyasal ve mekanik özellikleri tanıtılmıştır. Sonlu elemanlar modeli oluşturularak analizleri yapılmış, belirlenen iç basınç sayesinde malzemedeki yer değiştirme, gerilme ve gerinim gibi farklı deformasyon davranışları incelenmiş, “T” ve “Y” eleman için sonuçlar belirtilmiş ve üretime olacak katkıları açıklanmıştır.

2. HİDROLİK AKIŞKAN BASINCIYLA ŞEKİLLENDİRME (HYDROFORMING)

2.1 Literatür Taraması

Hydroforming konuda, çok sayıda yapılmış araştırma çalışmaları vardır. Bunlar; şekillendirme işlemi sırasında oluşabilecek hatalar ve bu hataların giderilmesi, otomotiv parçalarının üretimi, işlem parametrelerinin ve kullanılan akışkanların (yağ veya su) tanımlanması, kalıp tasarımı, pres işlemlerinin karşılaştırılması ve sürtünmenin iş parçası üzerindeki etkileri diye sınıflandırılabilir.

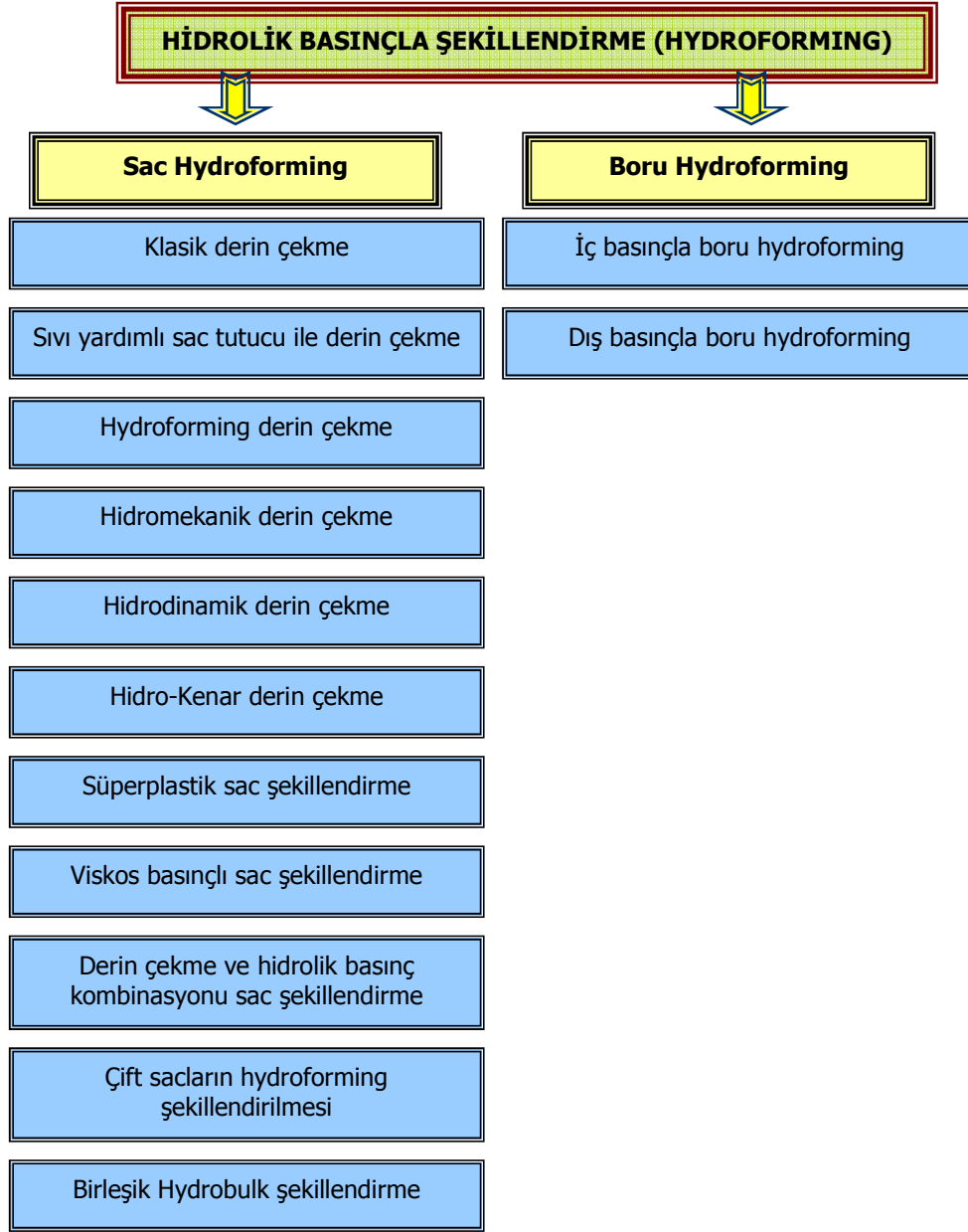
Boru hydroforming ile ilgili ilk çalışma 1939'da yayınlandı ve bu konuda ilk patent alınmıştır (Grey, Devereaux, ve Parker, 1939). Patent; bir tezgahta bakır T bağlantı elamanının iç basınç ve aksenal kuvvetleri sayesinde imal edilmesi ile ilgili olarak Grey (1939) tarafından alınmıştır. Davis (1945), orta karbonlu çelik borular üzerinde aksenal kuvvet ve iç basınç kullanarak çeşitli deneyler yapmıştır. Bu araştırma Faupel (1956) ve Crossland (1959) ile devam etmiştir. Fuchizawa (1984 ve 1987), iç basınç altındaki boruların malzeme özelliklerini incelemiş, Bulk (belverme) limitlerinde gerinim etkilerini sunmuştur. Analitik çalışmada deformasyon davranışlarında plastik anisotropi etkilerini incelemiştir. Analizi plastik deformasyonda, Hill ve Deformasyon Teorisine dayanmaktadır. 1990'lardan sonra Fuchizawa, Membran ve Plastisite teorilerini kullanarak gerilme-gerinim ilişkilerini tespit ederek çalışmalarını genişletmiştir. Bu doğrultuda deneylerle alüminyum, bakır, pirinç ve titanyum borularını birbirleriyle karşılaştırmıştır. Sheng ve Tonghai (1995), 'T' bağlantı elemanını şekillendirmiş ve bunun için poliüretan basınç ve aksenal baskı yükü kullanmışlardır. Şekillendirme yüklerini belirlemek için üst sınır metodunu kullanmışlardır. Ayrıca 'T' şekli için kalıp içerisine karşılık (counter) kuvveti kullanmışlardır. Hsu (2003) deneylerinde 2 CCD kamera kullanarak borunun deformasyon miktarını ölçebilmiştir. Kridli (2003) ABAQUS/Standard kullanarak 2D simülasyonlarla boru şekillendirme işleminde köşe doldurma üzerine simülasyon

ve deneyler yapmıştır. Kwan ve Lin (2003) sonlu elemanlar programından Deform-3D yazılımını kullanarak 'T' şeklinin parametrelerinin belirlenmesini deneylerle göstermişlerdir. Brunet (2004), iç basınç ve aksel kuvvet parametreleri arasında, analiz ve deneysel çalışmalar sunarak, boru şekillendirmedeki hata durumlarını incelemiştir. Kim, Lei, ve Hwang, (2002) çalışmasında, hidrolik akışkan yardımıyla otomotiv şasi parçalarından olan alt salıncak kolunu imal etmiştir. Tasarım aşamasında sayısal analiz konusunda HydroFORM-3D programı yardımıyla rijit plastik model oluşturulmuştur. Imaninejad, Subhash ve Loukus (2005), T bağlama elemanının hidrolik basınçlı şekillendirme yöntemiyle optimum aksel yükleme parametrelerini belirlemek için çeşitli optimizasyon metotlarıyla birlikte sonlu elemanlar simülasyonlarını kullanarak çalışmalarını sunmuşlardır. Vollertsen ve Plancak (2002), hydroforming işleminde, kalıp ile iş parçası arasındaki sürtünme katsayısının hesaplanmasında farklı bir yöntem sunmuştur. Burada sürtünme katsayısının hesaplanmasında borunun almış olduğu son şekil ve ilk şekil arasındaki farklardan analitik formül çıkarılmış ve bu formülasyon kullanılarak sürtünme katsayılarının hesabı yapılmıştır. Sonuçlar sonlu eleman yöntemiyle PAM-STAMP programı kullanılarak karşılaştırılmıştır.

2.2 Hydroforming Şekillendirme İşlemleri

Hidrolik şekillendirme, bir tür değişken biçimli takım (Soft Tool) veya diğer bir deyişle esnek şekillendirme (Flexible Forming) teknolojisidir. Değişken biçimli donanımlarla şekillendirme teknolojilerinin basit ekipmanlar gerektirmeleri, mevcut donanıma uyum sağlayabilmeleri, düşük enerji tüketimleri, yüksek ürün kaliteleri ve fayda/maliyet oranlarının yüksek olmasından dolayı yaygın olarak kullanılmaktadırlar (Lundqvist, 2004).

Hydroforming şekillendirme yöntemiyle gerek sac gerekse boru malzemeler, kompleks ve son şekillendirme (kesme, kaynak vb.) olmadan kolay bir şekilde imal edilebilirler. Hydroforming işlemi Şekil 2.1'deki diyagramda görüldüğü gibi sınıflandırılabilir.



Şekil 2.1: Hidrolik basınçlı akışkanla şekillendirme işlemleri

2.2.1 Sac metal şekillendirme işlemi

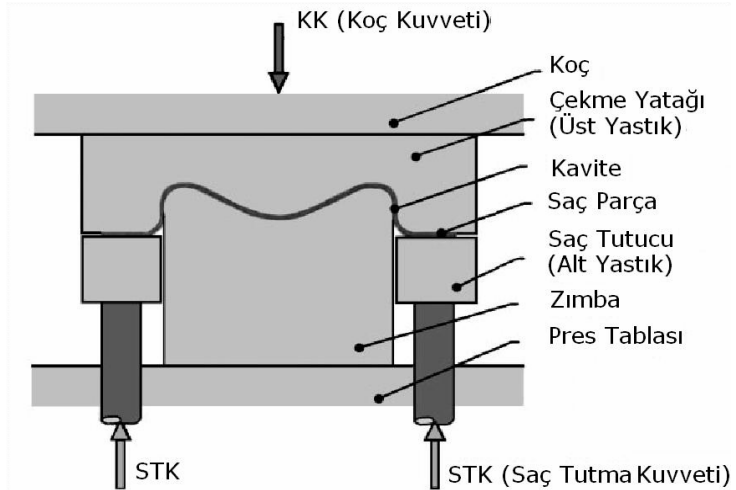
Sac metal şekillendirme işlemi veya derin çekme, ince metal parçaların şekillendirilmesinde çok geniş olarak kullanılan bir tekniktir. Derin çekme konusundaki araştırmalar, daha etkili bir işlem ve yeni bir teknoloji olan hydroforming tekniğinin sac metal şekillendirilmesinde kullanımına olanak

sağlamıştır. Bu işlemin en göze çarpan özelliği erkek veya dişi kalıptan vazgeçilebilir olmasıdır. Şekillendirme akışkan basıncının sonucunda gerçekleşmektedir. Elde edilecek parça özelliklerine bağlı olarak hidroforming tekniğinin farklı yöntemlerine başvurulabilir. Kang (2004) çalışmasında, klasik derin çekme ile sac metal hidroforming tekniğinin kıyaslamasını yapmıştır.

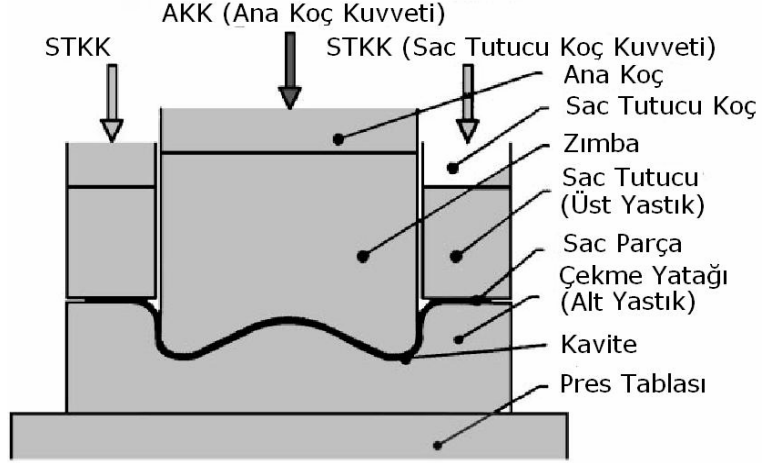
2.2.2 Klasik derin çekme işlemi

Klasik derin çekme işlemi Şekil 2.2’de gösterilmiştir. Bu işlem için tek veya çift hareketli pres kullanılabilir. Elde edilecek parçalar geniş bir kullanıma sahiptir. Örneğin; pişirme kapları (pot), motor kapağı, yağ karteri ve çamurluk gibi otomotiv parçaları gibi simetrik parçalar kolay bir şekilde çekilebilir. Fakat derin çekme işlem kombinasyonları daha çok simetrik olmayan parçalar için tasarlanmaktadır.

Derin çekme işleminde metal akışı iki bağlayıcı yastık arasında gerçekleşmektedir. Şekil 2.2’de, zımba sabit ve pres tablası üzerinde, sac tutucular ve koç hareketli ve farklı yönlerde derin çekme işlemini gerçekleştirirken, Şekil 2.3’te sac tutucular sabitken, zımba ve koç hareketli ve aynı yönlü olarak derin çekme işlemini gerçekleştirmektedirler.



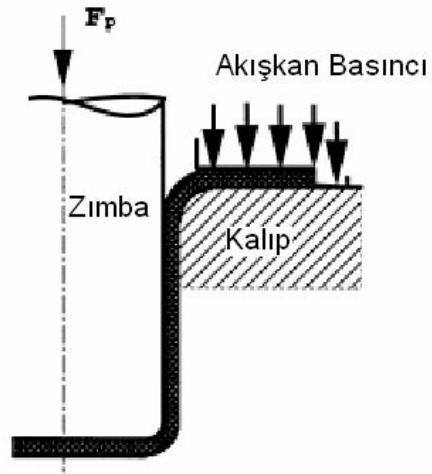
Şekil 2.2: Çift yönlü derin çekme işlemi (Lundquvist, 2004)



Şekil 2.3: Tek yönlü derin çekme işlemi (Lundqvist, 2004)

2.2.3 Sıvı yardımcı sac tutucu ile derin çekme işlemi

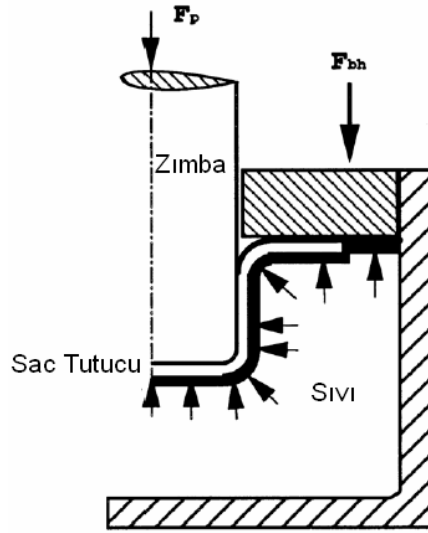
Şekil 2.4'te görülen bu işlemde sac tutucu yerine akışkan basıncı kullanılmıştır. Sıvı arasına kaçakları önlemek için kauçuk diyafram yerleştirilen kalıp yardımıyla sac üzerinde hasar olmaksızın şekillendirme gerçekleştirilebilir. Sac tutucu bölgesindeki sürtünmenin sebep olduğu deformasyonlar bu teknikle azaltılmıştır. Bu konuda Shirizly (1994), kalıp kenarındaki radius değerlerinin belirlenmesi konusunda çalışmalar sunmuştur.



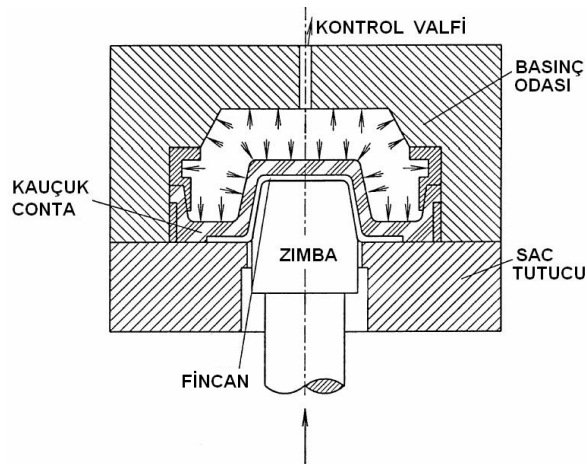
Şekil 2.4: Sıvı yardımcı derin çekme işlemi (Lundqvist, 2004)

2.2.4 Hydroforming derin çekme işlemi

Hydroforming derin çekme işlemi Şekil 2.5 ve 2.6'de görülmektedir. Klasik derin çekme işlemindeki dışı kalıbın yerini, kapalı ortamdaki akışkandan gelen karşılık basıncı almıştır. Şekil 2.6'de kapalı bir pot içerisinde kontrol valfinden sıvı doldurulur, daha önce ön şekillendirmeye uğramış kompleks sac parçası zımbanın ortamda oluşturacağı basınç sayesinde pot duvarlarına yapışarak şekillendirilir.



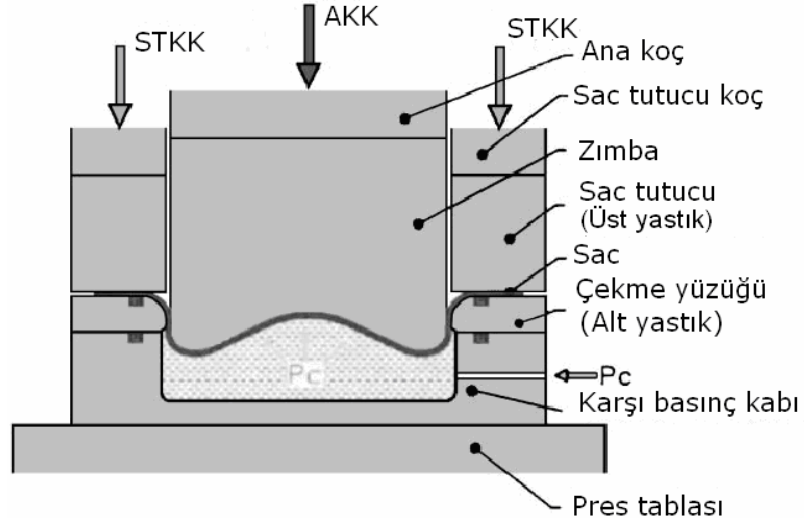
Şekil 2.5: Silindirik fincanın şekillendirilmesi; (Zhang, 1999)



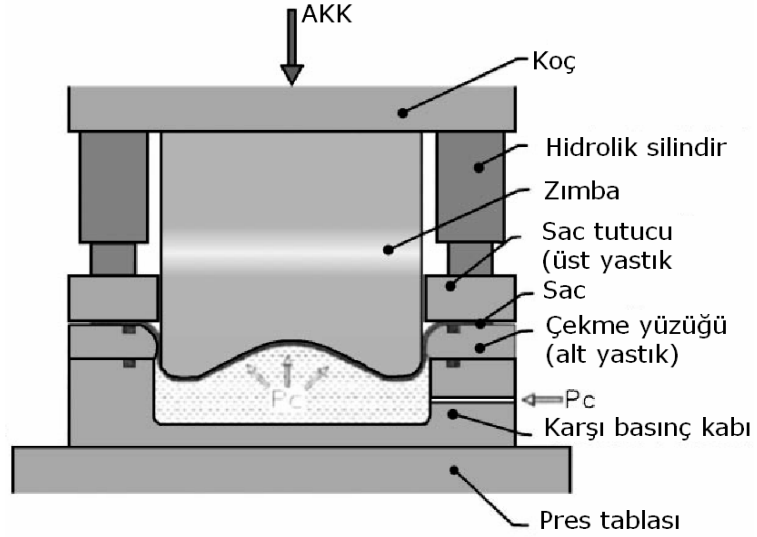
Şekil 2.6: Silindirik fincanın şekillendirilmesi (Thirumarudchelvan ve Travis, 2003)

2.2.5 Hidromekanik derin çekme işlemi

Şekil 2.7’de ve 2.8’da görüldüğü gibi, hydroforming derin çekme ile hidromekanik derin çekme arasındaki fark mekanik sac tutucudur. Burada klasik derin çekme gibi tek ve çift hareketli presler kullanılır. Bu tezgahlarda işlemin başında ön şekillendirme amacıyla akışkana basınç vermek mümkündür. Bu ön şekillendirme parçayı daha sağlam ve hatalara daha az duyarlı yapacaktır. Ayrıca bu basınç derin çekilen parçanın tüm yüzeylerini malzeme yönünden besleyecek ve homojen et kalınlığını sağlayacaktır. Hsu ve Hsieh (1996) hidromekanik derin çekme işleminde yarım küre zımba ile teorik ve deneysel çalışmalar yapılmıştır.



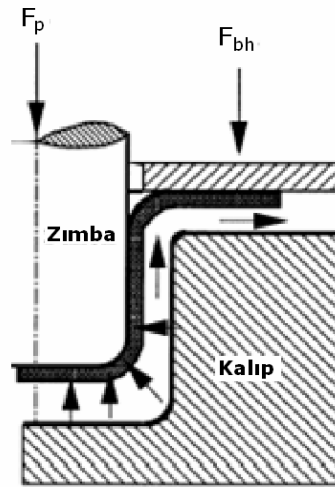
Şekil 2.7: Tek yönlü hidromekanik derin çekme presini ile derin çekme işlemi (Lundqvist, 2004)



Şekil 2.8: Çift yönlü hidromekanik derin çekme presi ile derin çekme işlemi (Lundqvist, 2004)

2.2.6 Hidrodinamik derin çekme işlemi

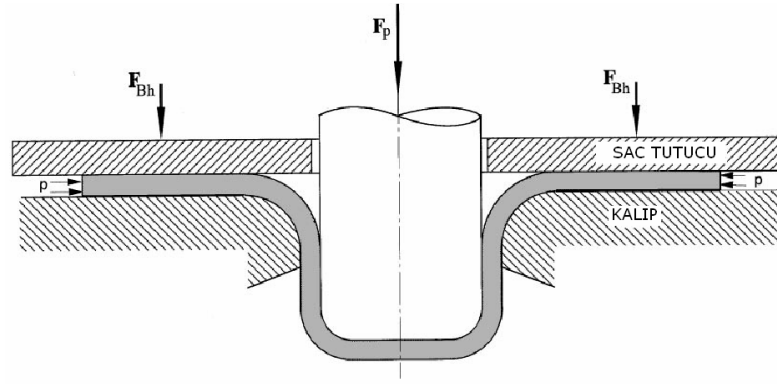
Şekil 2.9’da gösterilen hidrodinamik derin çekme işleminde pres zımbası, stroku ve ilerlemesi süresince, akışkan basıncının arttığı bir zamanda, akışkana kalıp ve iş parçası arasından yol verilerek dışarı çıkması sağlanır. Akışkan basıncının kontrolü çok önemli olmadığı gibi, parçayla kalıp arasındaki kauçuk sızdırmazlık elemanlarına da gerek kalmaz. Bu işlem ilk olarak basınç yağlamalı derin çekme adı altında Hill, P., (1958) tarafından sunuldu ve bu isimle anıldı.



Şekil 2.9: Hidrodinamik derin çekme işlemi (Lundqvist, 2004)

2.2.7 Hidro-kenar derin çekme işlemi

Hidro-kenar derin çekme işlemi Şekil 2.10'da görülmektedir. Akışkan basıncı iş parçasının kenarları üzerine; çekme gerilmesinin indirgenmesi, et kalınlığının azalan bölgelere malzeme beslenmesi ve erken bir yırtılmanın önlenmesi için malzemenin kenar yüzeyleri üzerine etki eder. Bu yöntem hem klasik derin çekmede, hemde hydroforming işleminde uygulanabilir. Thiruvarudchelvan (1997) kupa şeklinde parça elde etmede bu yöntemi kullanmış ve derin çekme limitlerini biraz daha arttırmıştır. Thiruvarudchelvan ve Wang (1998) hidrolik basınç destekli yeni bir teknik sunmuştur. Bu çalışmaya göre akışkan basıncı sadece sac kenarına basınç uygulamakla kalmaz, sac tutucu zımba ve diğer mekanik parçalar için kuvvet temin eder.

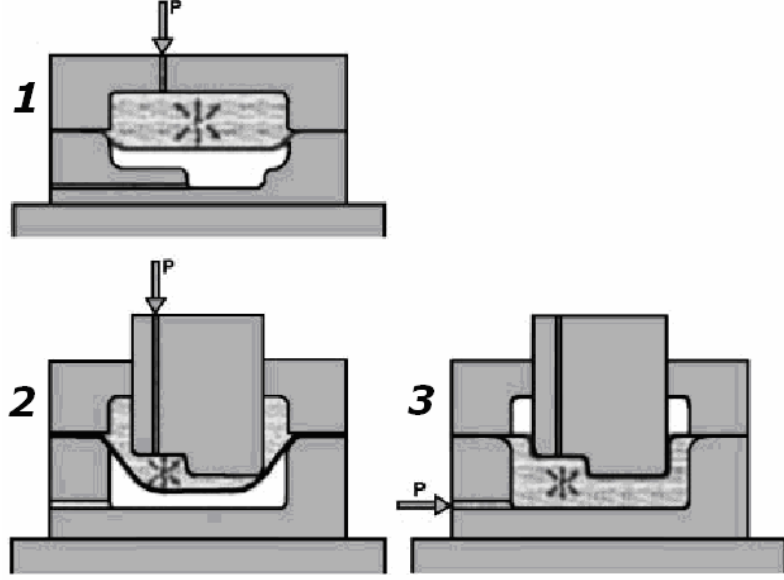


Şekil 2.10: Hidro-kenar derin çekme işlemi

2.2.8 Süper plastik sac metal şekillendirme işlemi

Süper plastik sac şekillendirme işleminde, sac metal tamamen bağlayıcılar tarafından kenetlenir ve sızdırmazlık sağlanır. Şekil 2.11' görülen bu işlemde basınç kaynağı olarak pnömatik gaz basıncı kullanılır ve işlem sıcak şekillendirme olarak da tanımlanabilir. Bu yöntem iş parçası üzerinde kusursuz ve pürüzsüz yüzey kalitesi istenildiğinde kullanılabilir. Şekil 2. 11'de görülen işlem safhaları şu şekilde sıralanabilir; ön şekillendirme için sac malzeme üzerine basınçlı sıcak gaz verilir, daha sonra zımba sac tarafına hareket ederek kavitedeki gaz basıncını artırır.

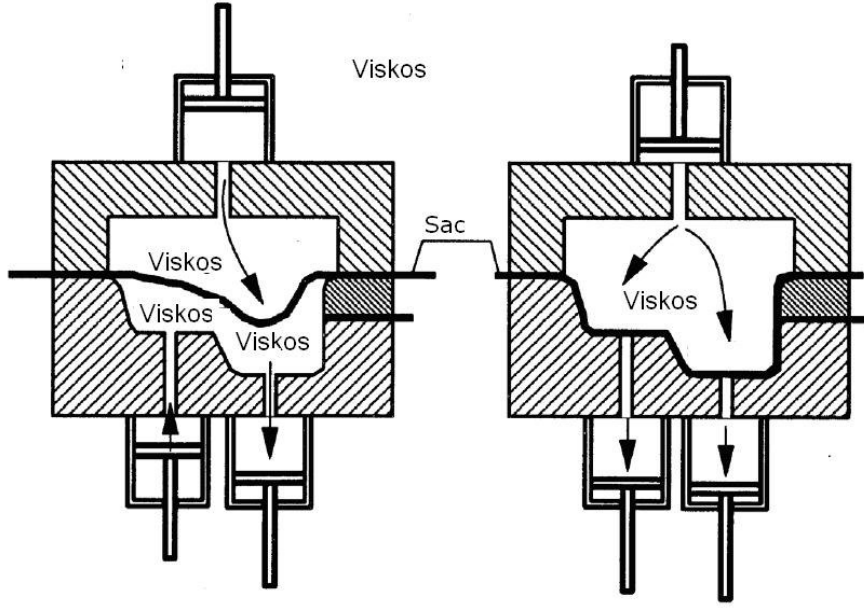
Sonunda zımba durur, içerideki gaz boşaltılır. Son aşamada ise kalıp tarafından gaz basıncı verilerek sac parça zımba üzerine yapıştırılır. Neutzh (2002) derin çekme işleminde kullanılabilir gaz basınç potansiyelini çalışmasında göstermiştir. Bu yöntemin işlem süreci hidroforming işleminden daha kısadır.



Şekil 2.11: Süper plastik sac metal şekillendirme

2.2.9 Viskos basınçlı şekillendirme işlemi

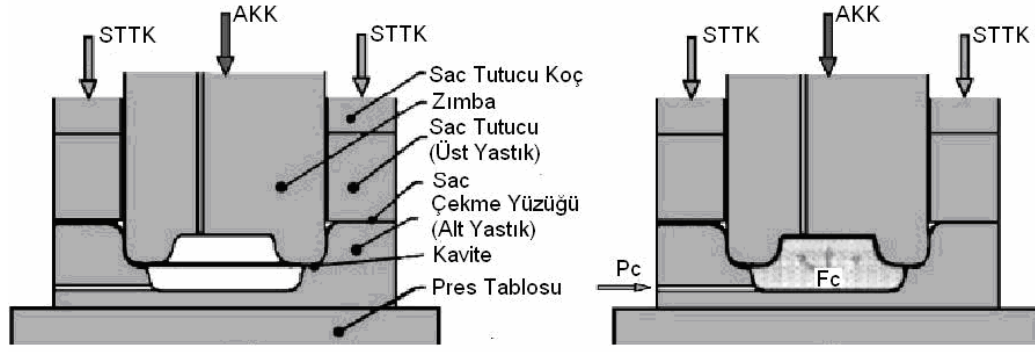
Akışkan yerine kullanılan jel viskos, şekillendirmede daha hassastır. Şekil 2.12’de görülen bu işlem, sac malzeme boyunca değişken basınçlar elde etmeye elverişlidir. Bu işlem küçük hacimli sac metal alaşımları şekillendirmede kullanılabilir. Liu (2000), çalışmalarında zımbalı şekillendirme ile bu işlemi deneysel olarak karşılaştırmıştır. Ayrıca şekillendirme işlemini sonlu elemanlar simülasyonları ile gerçekleştirmiştir. Bu işlem için sac tutucuda meydana gelen kuvvet dağılımını shulkin (2000) incelemiştir.



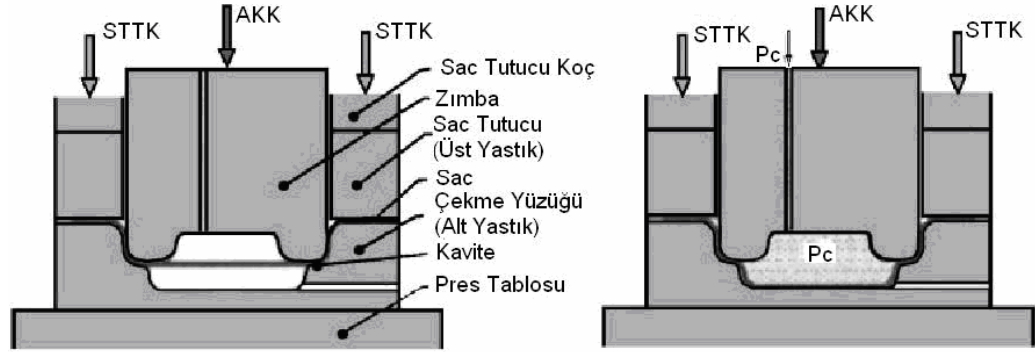
Şekil 2.12: Viskos basınçlı şekillendirme (Zhang, 1999)

2.2.10 Derin çekme ve hidrolik basınç kombinasyonu ile şekillendirme işlemi

Şekil 2.13'te görülen bu şekillendirme işlemin en önemli özelliği, hidrolik basınç ve derin çekme işlemlerinin kombinasyonlarını kullanarak kalıp kavitelesinin içersine malzeme akışı kontrol edilebilir olmasıdır. Şekil 2.13 (a) ve (b) de akışkan zımba veya kalıp boşluğundan verilerek sac şekillendirmede farklı yöntemler uygulanabilir.



(a)

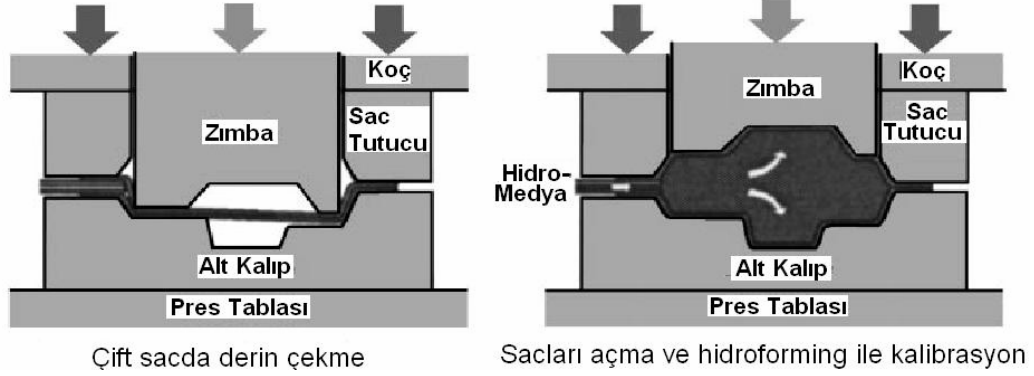


(b)

Şekil 2.13: Derin çekme ve hidrolik basınç kombinasyonu ile sac şekillendirme
(Lundqvist, 2004)

2.2.11 Çift sac parçaların hidroforming işlemi

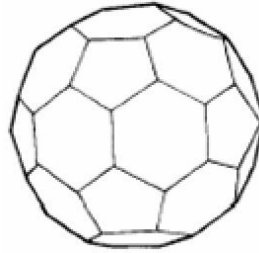
Çift sacların hidroforming ile şekillendirilmesinde dar gövdelerin şekillendirilmesinde kullanılır. Hidrolik akışkan iki sac arasına pompalanır. İçi basınç kuvvetleri farklı yönlerde sac parçaları kalıp duvarlarına yapıştırır. Şekil 2.14'te gösterildiği gibi bu işlemle ön şekillendirme işlemi olarak derin çekme işlemi uygulanabilir. Hein ve Vollertsen (1999), yükleme ve basınç koşulları gibi uygun işlem parametrelerini elde etmişlerdir. Novotny ve Geiger (2003) farklı sıcaklarda işlemin performansını incelemişlerdir.



Şekil 2.14: Çift sac parçaların hidroforming işlemi (Lundquist, 2004)

2.2.12 Birleşik hidrobulk şekillendirme işlemi

Birleşik hidrobulk şekillendirme serbest bir hidroforming işlemidir. Akışkan zimba gibi kullanılır ve işlemde dışı kalıp yoktur. Bu teknik özel yapılı küresel veya geoidal geometrilerin şekillendirilmesinde kullanılır. Wang (1999) kaynakla çok yüzeyli bir geometriden küresel parçalar elde etmiştir (Şekil 2.15). Zhang (1996) çok yüzeyli parça yerine iki daireli sac parçayı birleştirerek ondan küresel parça elde etmiştir. Zhang (1998 ve 1999) çift katmanlı küresel parçaların şekillendirilmesi incelenmiştir.



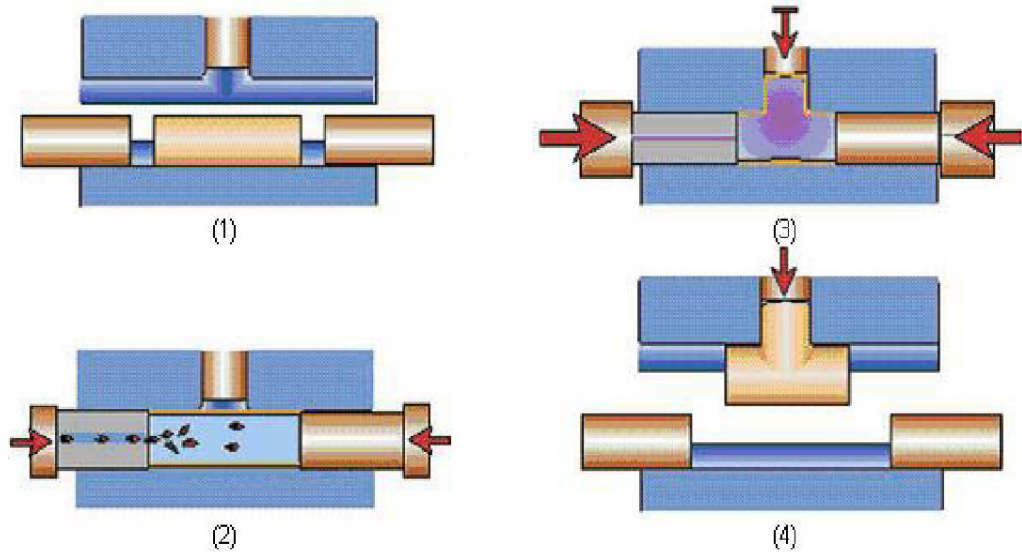
Şekil 2.15: Özel yapılı poli-hedron, (Wang, 1999)

2.3 Boru Hydroforming

Boru Hydroforming tekniğinde basıncın uygulandığı bölge açısından iki grupta toplanabilir. İç basınçlı Hydroforming, Dış basınçlı hydroforming

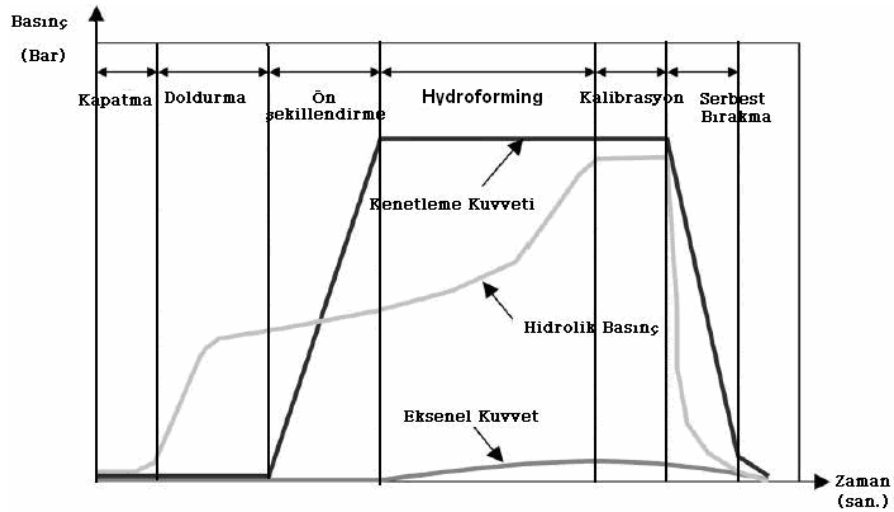
2.3.1 İç basınçlı hydroforming

Boru Hydroforming tekniğinde en çok kullanılan bir teknik olup boru malzemelere plastik şekil vermek için hidrolik akışkanın boruya iç basınç uygulanmasıyla gerçekleştirilen bir yöntemdir. Şekil 2.16'da gösterilen bu tekniğin işlem basamakları şu şekilde sıralanabilir; İş parçası olarak, uygun boyda ve ağızları düzgün kesilmiş bir boru malzemesiyle boru hydroforming işlemi başlar. İş parçası, Şekil 2.16'da görüldüğü gibi iki parçalı kalıp içerisine yerleştirilir ve kalıplar kapanır. Bazı iş parçaları kalıp kapama kuvveti ve kalıp geometrisi sayesinde, bükme ve ezme gibi bir ön şekillendirmeye maruz bırakılır. Daha sonra boru hidrolik akışkanla, bu mineral yağ olabilir veya su olabilir, doldurulur ve iki aksenal silindir borunun uç kısımlarını kapatarak boru eksenini boyunca boruya kuvvet uygulanır. Bu kuvvetle eş zamanlı olarak akışkan basıncı da artırılır. Boru malzemesi kalıp boşluğu içine akar ve parça şekillendirilir. Bu işlem gerçek zaman olarak sadece birkaç saniye alır. Daha fazla basınç plastik deformasyondaki geri çekmeyi azaltır. Boru istenilen geometriye daha yakın şekillendirilir.



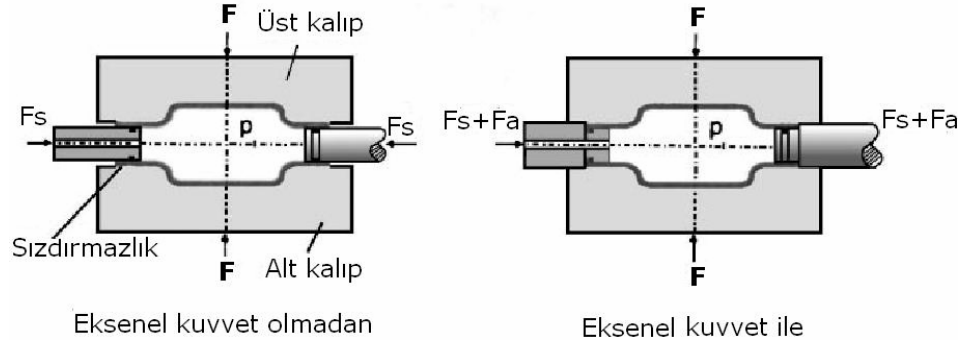
Şekil 2.16: Boru hydroforming işlemi ve işlem basamakları (Lundqvist, 2004)

Başarılı bir hydroforming işlemi, kalıp kapama, sızdırmazlığı sağlama veya çevrim süresi gibi şekillendirme davranışlarını tam kontrol altına almakla sağlanabilir. Bu davranışları dengeleyen iki faktör vardır. Şekil 2.17’te gösterilen bu önemli faktörler iç basınç ve aksel beslemedir. Elbette malzeme verileri ve sürtünme şartları gibi diğer parametrelerde önemlidir ve bütün bu parametreleri doğru tanımlamak işlemde önemli rol oynar.



Şekil 2.17: Hydroforming işleminde parametrelerin uygulanması (Kim, 2002)

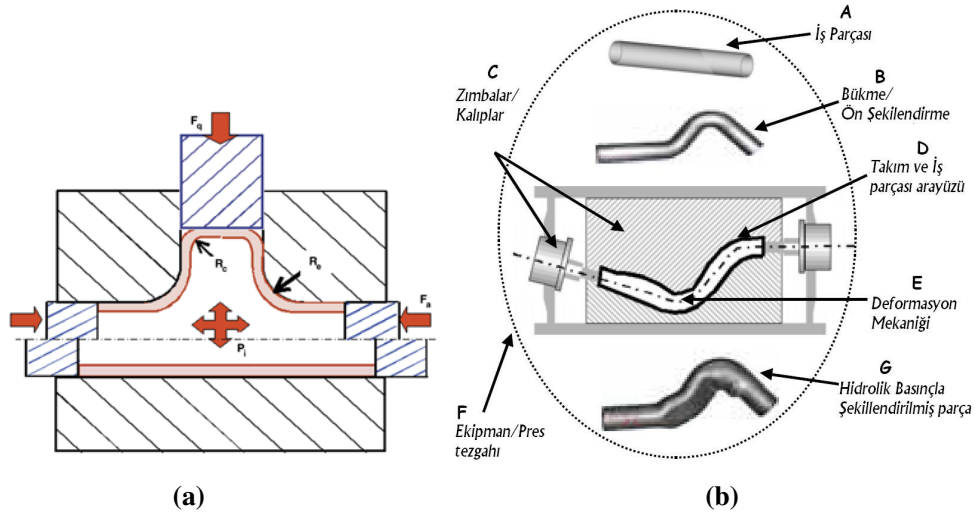
Hydroforming işleminde hidrolik gücün yanında, yağ, jel, kauçuk veya poliüretan malzemeler kullanılabilir. Hidrolik basınçlı gücün yanında eş zamanlı aksenal karşılıklı kuvvetlerde uygulanabilir (Şekil 2.18). Bu iç basınç ve aksenal kuvvetlerin sayesinde boru profillerine kompleks bir şekil verilebilir.



Şekil 2.18: Hydroforming işleminde iç basınç ve aksenal kuvvetlerin uygulanması
(Sigert, 2000)

Boru hydroforming teknolojisi, 20.yüzyılın son 10 yılında sanayide yoğun olarak kullanılmaya başlanmıştır. Tezgâhların, yüksek basınçlı hidrolik sistemlerin, sızdırmazlığın, malzeme bilgisinin, yağlama ve bilgisayar kontrollü işlemlerin gelişmesi, sac metal şekillendirme tekniklerinin ve kütle üretiminin ayaklarını oluşturmuştur. Sürtünmesiz ve türbülanssız bir akışa yardımcı olacak Şekil 2.19 (a)'da görülen dikişsiz T- tesisat bağlantı elamanı gibi ilk hydroforming ürünler hassas tesisatçılıkta ve sağlık hizmetlerinde kullanılmıştır.

Bugün boru hydroforming parçaları; Şekil 2.19 (b)'de görülen parça örneği gibi eksoz sistemi parçaları, şasi ve gövde elamanları ve motor parçaları gibi çok geniş alanlarda kullanılmaktadır. Hydroforming parçalar, günümüzde gaz ve sıvı maddelerin emniyetli iletiminde, dikişsiz yataklar yardımıyla emniyetli yük iletiminde (motor beşiği ve bisiklet çatalı gibi) kullanılır. Hydroforming işleminin avantajlarının bilinmesiyle özellikle otomotiv sektöründe oldukça hızlı yayılmaktadır.



Şekil 2.19: a) Hydroforming işleminde T bağlantı elemanının şekillendirilmesi ve kuvvet dağılımı (Koc ve Altan, 2001) b) Kompleks parçaların şekillendirilmesi (Strano, Jirathearanat ve Shr, 2004)

Tesisat bağlantı elemanlarının şekillendirilmesinde kullanılan boru hydroforming işleminin avantajlarını şu şekilde sıralanabilir; iki veya daha fazla parçaların sadece tek operasyonla yapılabilmesi, imalatta kütle azalması, parçaların yapısal mukavemetinin ve rijitliğinin üstün olması, imalatta daha az tezgah ve takım maliyetinin olması, daha az ikincil operasyon (kaynak yapma, delik delme gibi) olması, daha az ölçüsel sapma ve daha az atık malzeme elde edilmesi olarak sayılabilir. Öte yandan bu işlemin mahzurlu tarafları ise; yavaş çevrim süresi, pahalı ekipman, işlem ve tezgah tasarımında bilgi gereksinimi olarak tanımlanabilir. (Çelikayar, 2002)

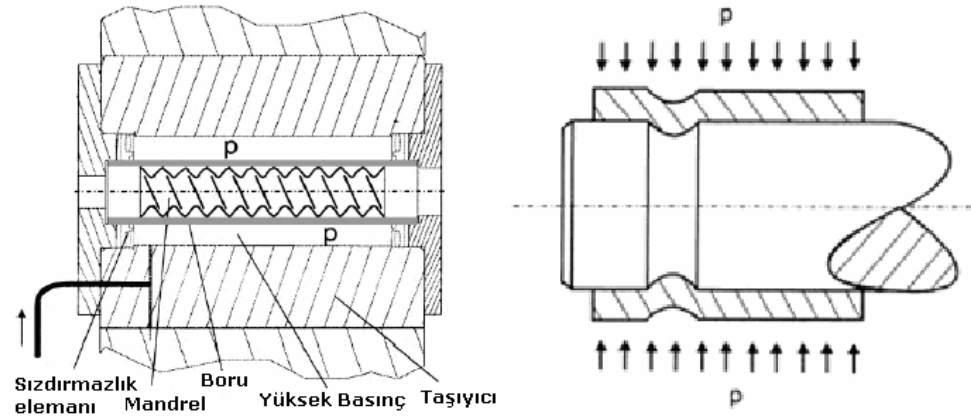
Kullanılan presin kapasitesi imal edilecek iş parçalarına bağlıdır. Et kalınlığı fazla olan büyük parçalar ve küçük köşe radüsleri olan parçalar için yüksek kalıp kapama kuvvetleri gerekir. Boruların imalatında; haddeleme, kaynaklama ve kesme operasyonlarıyla gerçekleşir. Sac metaller, mekanik ve mikro yapısal özellikler bakımından boru malzemelere göre farklı olduğu için, karakteristik özellikleri de farklıdır. Bu nedenle sac metal üzerinde ölçülen veriler, boru malzemeleri için kullanılmaz.

Bilinen ve geniş olarak kullanılan, akma gerilmesi (flow stress), anisotropi, gerilme mukavemeti gibi malzeme özellikleri, borular ve sac metallere için aynı değildir. Boru hydroforming işlemini doğru analiz edebilmek için borunun doğrudan ölçülen malzeme özellikleri kullanılmalıdır. Örneğin hidrolik bulk (belverme) testi akma gerinimini belirlemek için kullanılır. (Lundquist, J., 2004)

Bugün ön şekillendirme ve hydroforming işlemlerinin birleşimi sonucu çok kompleks parçalar imal edilebilmektedir. Ön şekillendirme; bükme veya ezme işlemlerinden oluşabilir. Bükme operasyonunda boru kalıp içerisine yerleştirilir. Daha sonra kalıp kapanarak borunun çeşitli yerleri bükülür ve ezilir. Bu işlem hydroforming esnasında üniform et kalınlığının oluşmasında avantaj sağlar. Borunun ezilmesinin diğer bir avantajı, daha küçük iç basınç gerekmesi ve daha küçük kalıp kapama kuvvetine gereksinim duyulmasına neden olmasıdır. Ön şekillendirmeli hydroforming tekniğinde aksel besleme kullanılmaz veya aksel kuvvetler minimum seviyede tutulur.

2.3.2 Dış basınçla hydroforming

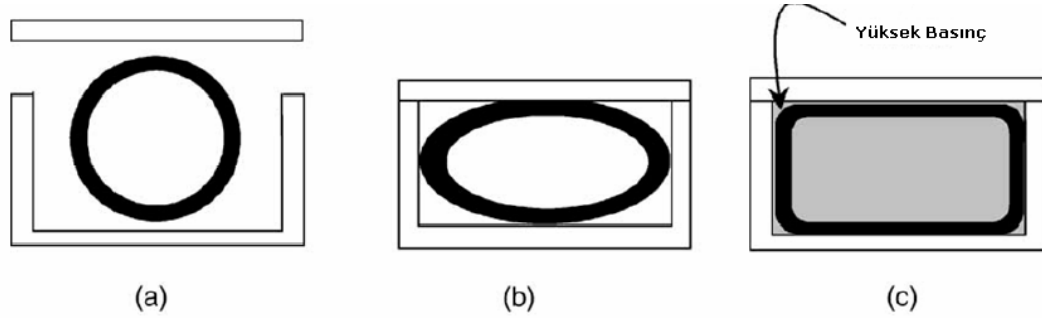
Borunun dış basınçla şekillendirilmesi iki tip işlemle olur. Bunlardan birincisi; bir mandrel üzerine borunun yerleştirilmesi ile ve boruya dış kısımdan basınç uygulanması ile borunun mandrel üzerinde şekillenmesi, ikincisi ise; iki parçayı sökülemez bir biçimde erkek ve dişi iki parçayı birleştirilmesi şeklinde olur (Şekil 2.20).



Şekil 2.20: Dış basınçla hydroforming işlemi (Lundquist, 2004)

2.3.3 İç ve Dış Basınçla Hydroforming

İş parçasının şekillendirilebilirliğinin artırılması için yeni olan bu teknik, boruya içten ve dıştan basınç uygulamakla gerçekleşmektedir. Jain (2004), bu işlemi sonlu elemanlar simülasyonlarına taşıyarak simetrik paçaları simüle etmiştir. Smith (2000), Şekil 2.21’de görüldüğü gibi bu işlemle ön şekillendirme ve ezme işlemi birleştirmiştir.



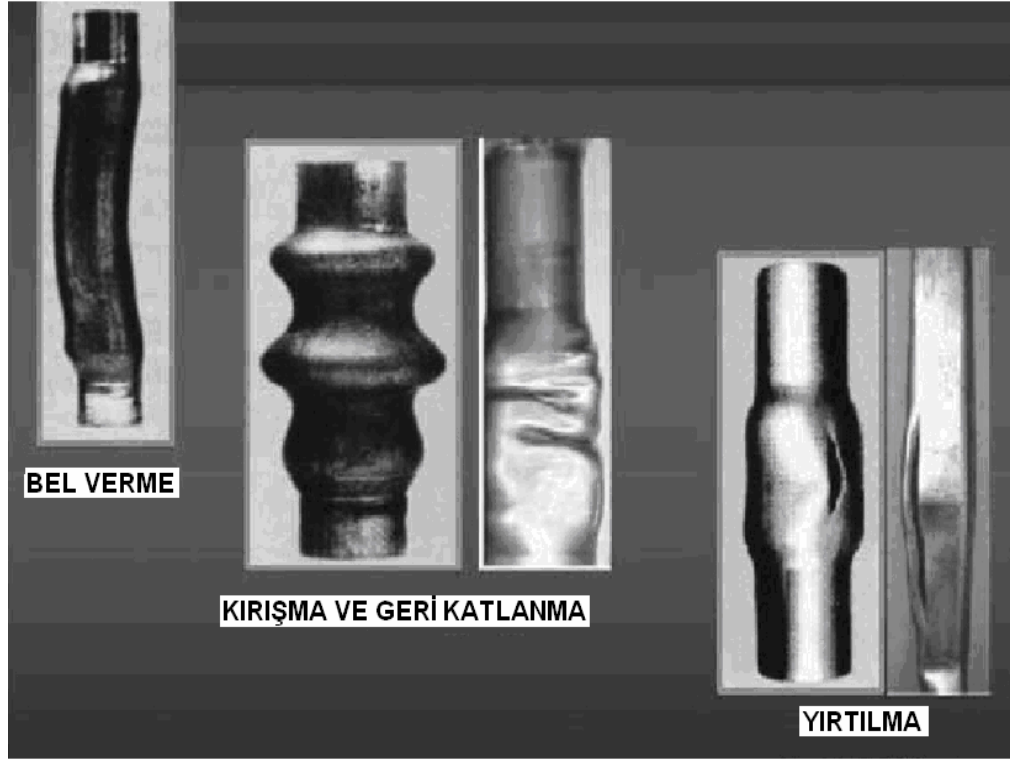
Şekil 2.21: İç ve dış basınçla hydroforming (Lundqvist, 2004)

Farklı modellemeler yapılarak şekillendirme işlemi sonlu elemanlar yazılımlarında simülasyon yapılabilir.

2.4 Boru Hydroforming İşleminde İşlem Arızaları

Boru hydroforming işlemi yardımı ile tesisat bağlantı elemanlarının şekillendirilmesi esnasında, iş parçası üzerinde bazı hatalar (arızalar) meydana gelir. Bu hatalar; yırtılma, burkulma, bel verme, kırışma ve geriye katlanma olarak tanımlanır. Şekil 2.22’de gösterilen bu arızaların hepsi katı mekaniğindeki plastik kararsızlıklardan meydana gelmektedir. Bu kararsızlıklar, katılık özelliklerinin azaldığı bölgelerdeki değerlerin sapmasından kaynaklanır. Bunun sonucunda bölgesel çökmeler başlayarak, ilerleyip arızaya sebep olacaktır. Malzemelerin ve yapının dayanımını anlamada, bu çökmenin büyümesini tahmin etmede bazı faktörlere başvurmak zoruridir. Bu arıza tipleri boru hydroforming işleminde sık sık meydana gelen yırtılma ve kırışmadır.

Deformasyon küçük olduğu sürece, elastik-plastik sınır değer problemlerinin çözüm yolu vardır. Deformasyon ciddi değerlere ulaşırsa, örneğin yırtılma görölürse, çözüm de zorlaşır. Bu yırtılma noktasında, Hill genel teorisi ve elastik-plastik katı teoremi kullanılabilir.



Şekil 2.22: Hydroforming işleminde işlem arızaları (Koc ve Altan, 2001)

Fiziksel hydroforming işleminde arıza tipleri, iş parçasının değişen niteliklerinden kaynaklanır. Geometrik özelliklerin yanı sıra malzeme özellikleri de etkilidir. Simülasyonlarda temel varsayımlar, ideal ve kusursuz malzeme özellikleridir ve iş parçasın yine ideal geometrisidir. Bu fiziksel çalışma ile tamamen bağdaşmayabilir. Bu kusurların bulunması hydroforming arızalara sebep olmaya yeter. Sonlu elemanlar metodunda, bitişik düğümlerdeki (node) sayısal şartlar aynı olmayacaktır ve sayısal hata çok küçük, fakat büyük arızalara kaynak olacaktır.

2.4.1 Yırılma

Yırılma geniş gerilme kuvvetlerinin etkisi altındaki lokal kararsızlık şartlarında oluşan bir arızadır. Yırılmaya sebep olan ilk adım malzeme içerisindeki mikro kaviteler ve mikro kırıklardır. Yırılma olayı işlem parametrelerine bağlıdır. Bunlar gerilme, gerinim, sürtünme ve çalışma sıcaklığı vb. gibi parametrelerdir. Yırılma oluşumunda işlem yeniden tasarlanır ve parametreler yeniden tespit edilir.

Plastik kararsızlıklar konusunda analitik çalışmalar, Swift (1952), Hill (1958), Hillier (1963), Yamada ve Aoki (1966), Chakrabarty (1969), Tverguard (1990), Hill (1991) ve Xing ve Makinouchi (2001) tarafından yapılmıştır. İç basınç altında uzun, yumuşak ve silindirik boruların stabilitesi çok araştırmancının konusu olmuştur. Storakers (1971), rijit-plastik boruları konu almıştır. Bütün bu çalışmalarda ince ve kalın duvarlı borular düşünülmüştür. Çatallaşma noktalarının maksimum basınçlarda gerçekleştiği, eğer iç basınç boru içerisinde maksimum değerde ise boru ideal bir silindirik yapıya dönüştüğü tespit edilmiştir. Eğer uygun iç basınç parametreleri, boru gibi kapalı bir hacme uygulanırsa, silindirik deformasyonlar maksimum basıncın kararlı bir şekilde yükselmesinden sonra- çatallaşma noktasına ulaşmaya kadar devam edebilir.

Düzlemsel gerinimde, rijit-plastik malzemeler için kullanılan basit metotlar boru hydroforming için de geçerlidir. Hill (1958)'in eşitsizlik prensibinde en iyi bilinen kırılma yayılması kriterine kadar, boru hydroforming problemleri çözülebilir. Muhtelif yırılma kriterinin bir çok sınır şartı vardır, ve sınır şartları metal şekillendirme için genellenemez. Yırılma uygulamaları Oyane (1980) tarafından implisit rijit plastik sonlu elemanlar programı kullanılarak sunulmuştur. Basınç değerleri için yükleme kriterleri belirtilmiştir. Bu tip arızalar için çok fazla simülasyon yapmıştır.

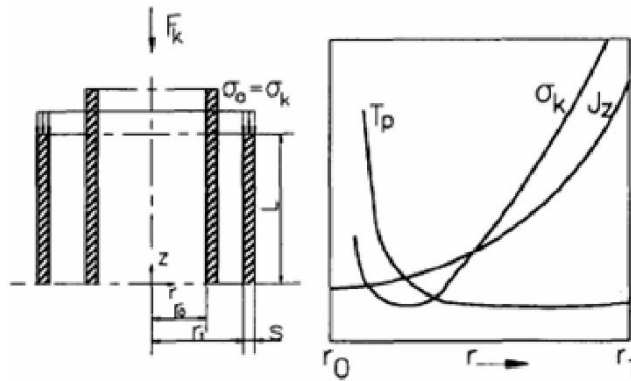
Boudeau ve Gelin (1996), derin çekme işleminde lokal kırılmaları sonlu elemanlar simülasyonu ile tahmin etmek için lineer perturbasyon (sarsım) metodu tekniğine dayanan bir metot sunmuştur. Boudeau (2002) bu tekniği kullanarak hydroforming simülasyonlarında 3 boyutlu gerilmeyi hesaplamıştır.

2.4.2 Belverme

Boruların bel vermesi lokal ve global olmak üzere iki grupta analiz edilir. Global bel verme bir kolon şeklinde, lokal belverme ise buruşma olarak tanımlanır. Belverme bir denge probleminden kaynaklanır. Sabit bir geometri üzerindeki aksenal yükler matematiksel olarak dengededir. Kuvvetin artırılmasıyla denge durumu korunur, bozulmaz. Fakat maksimum kuvvet artımından sonra denge kararlılığını yitirir. Bu kritik noktada, kuvvetin uygulama noktasındaki çok küçük bir sapma, veya borudaki hassasiyetsizlik kararsızlığa neden olmuştur.

Boru hydroforming işleminde, işlem boyunca küçük kırışmalara izin verilebilir. Bu buruşmalar iç basınç uygulandığında kalibrasyon boyunca bastırılarak görünmez duruma gelir.

Belverme tehlikesi operasyon başlangıcında yüksek aksenal kuvvetin boru üzerinde uygulanması sonucu oluşur. İşlem başında izin verilen bel verme kuvveti, teorik şartlarda belirlenebilir. Borunun bel vermesini incelemek için Euler prensipleri uygulanabilir. Euler elastik bölgeler için geçerlidir. Fakat Elastik modülünün (E) yerine tanjant modülü (E_T) kullanılmasıyla plastik bölge içinde geçerli hale getirilir. Bununla birlikte belverme tehlikesi operasyon başından itibaren engellenmelidir. İşlem kontrolünde borunun uzunluğu azaltılırken, kesitinde genişleme sağlandığı takdirde operasyon başarılı sayılmış olur. (Şekil 2.23). (Dohmann ve Hartl, 1996)



Şekil 2.23: Dış basınçla hydroforming işlemi, borunun genişlemesiyle ilgili olan, σ_z = Burkulma gerilmesi, T_p =Tanjant modülü, J_z = Kesme modülü,

2.4.3 Buruşma

Buruşma düzlem deformasyonlarının dışında kısa dalgalı kırışma olarak tanımlanabilir. Bir sac malzeme düzleme paralel baskıya maruz kaldığında kırışma riski potansiyeline sahiptir. Hill'in çatallaşma ve benzersizlik teorisi, buruşma üzerine çalışan araştırmacılara oldukça yardımcı olmuştur.

Xing ve Makinouchi (2001), boru hydroforming işleminde plastik kararsızlıklara etki eden farklı parametreleri incelemek için sınır değer problemlerinde Hill'in genel benzersizlik teorisini kullanmışlardır. Bu çalışmanın sonucunda şekillendirme safhalarının başlangıcında oluşan buruşmalar giderilebileceği, üstelik bu buruşmalar malzemenin incelmesini önleyeceği yargısına varılmıştır.

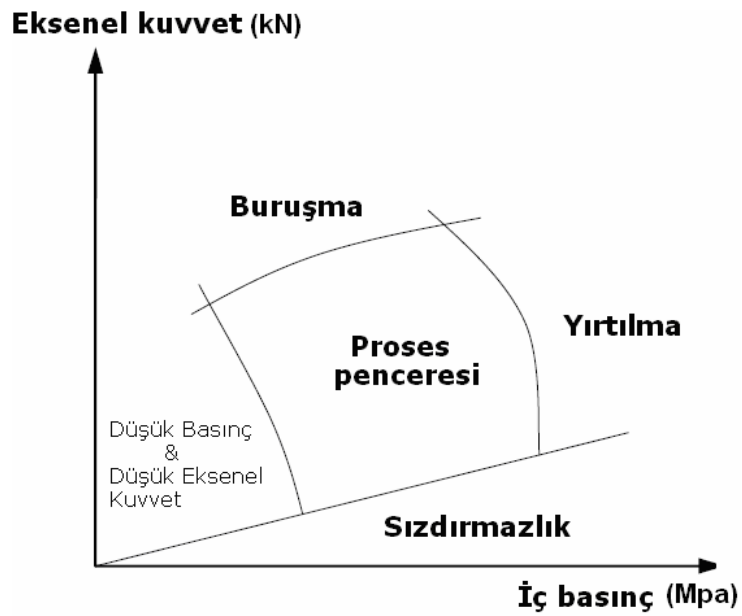
2.4.4 Geri katlanma

Geri katlanma buruşmadan sonraki safhadır denilebilir. Eksenel yüklemenin artmasından ve iç basıncın yetersiz kalmasından kaynaklanır. Ayrıca geometrinin çok kompleks olduğu durumlarda sıkça görülür. Geri katlanma buruşma gibi bir arızanın aksine önemsenebilecek ve geri tamiri olamayan nitelikte bir arıza türüdür.

Hydroforming işleminde yırtılma, kırışma, bel verme, geri katlanma gibi bazı ürün hataları da olabilir. Yırtılma aşırı iç basınçtan kaynaklanır. Kırışma, bel verme, geri katlanma hataları ise aşırı eksenel yüklemekten kaynaklanır. Bütün bu arıza halleri Şekil 1.4'te görüldüğü gibi bir işlem penceresinde tanımlanabilir. İşlem penceresi iç basınç ve eksenel kuvvetlerin diyagram oluşturmasıyla elde edilir. Eksenel kuvvet ve iç basınç için alt sınır boru içerisindeki sıvının sızmamaması için gereken kuvvet ve basınç değeridir. Sol sınır ise iç basınç ve eksenel kuvvetin parçayı şekillendirebileceği değerler sınırındır. Üst sınır buruşma sınırındır. Burada bel verme ve geri katlanma gerçekleşebilir. Sağ sınır ise yırtılma sınırındır.

İç basınç ve eksenel kuvvetleri için yükleme yolları, klasik olarak iteratif deneme-yanılma prosedürüyle belirlenir. Deneyler ve basit denklemler bu yükleme yollarının kurulması için faydalı olabilir. Özel bir parça için, hacimdeki sabitlik ve parça et kalınlığı ele alınarak eksenel besleme değişkenleri kurulabilir. Gerçekte parçanın her

yerindeki et kalınlığı sabit değildir, bunun nedeni parça ve kalıplar arasındaki sürtünme gerilimleridir. Bu gerilimler deformasyon bölgesine malzeme akışında engel olacakları için elbette şekillenmiş bir parçadaki et kalınlığı da homojen olmayacaktır. İç basınç yükleme yolu, birbiriyle ilgili 3 değişken sayesinde kurabilir; malzemenin esneme basıncı, yırtılma basıncı ve kalibrasyon basıncı. Her malzeme ve geometri için Şekil 2.24'te görüldüğü gibi bir işlem penceresi belirlenmelidir. Bu işlem penceresinde basınç ve yükleme koşullarının optimal ilişkisi arıza istenmeyen işlemlerde kullanılabilir.



Şekil 2.24: İşlem penceresi (Lundqvist, 2004)

2.5 Hydroforming işleminin Analitik Hesaplama Yöntemleri

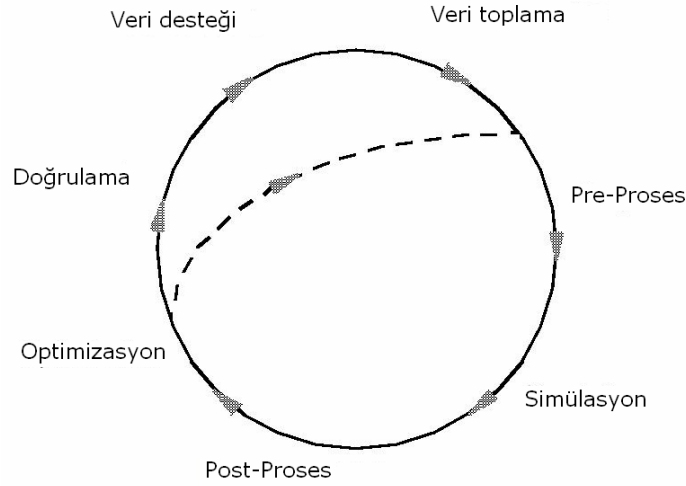
Sac metal şekillendirme işlemi davranışlarını tahmin edebilmek çok zor bir süreçtir. Malzeme özelliklerindeki non-lineerlik, kalıp ve parça yüzeyindeki sürtünme etkileri, simetrik olmayan kalıplar gibi çok faktör bir arada düşünülmelidir. Simetrik ve basit olan şekillendirme işlemleri için analitik prosedür başarılı olabilir. Malzemedeki mekanik komplekslikler, problemleri de kompleks hale getirmektedir. Şekillendirme işlemindeki realistik hesaplar için bilgisayarlar, dolayısıyla sayısal metotlar kullanılır. Bugün en temel nümerik metot sonlu elemanlar metodudur.

Yeni bir yapının veya işlemin tasarımında doğrulamaya gereksinim vardır. Bu doğrulama prosedürü yapılan işin verimi açısından önemlidir. Klasik olarak bu doğrulama deneme-yanılma dediğimiz, yapı veya işlem modellenir, defalarca parametreler değiştirilerek test edilir. Bu süreç, zaman ve mali kayıplara neden olur. Son 10 yıl deneme-yanılma geleneği değişmiştir. Doğrulama, bilgisayardaki nümerik yazılımın çalışmasıyla yapılmaktadır.

2.5.1 Gerçek doğrulama

Deneylerin rolü, tasarım, optimizasyon, parametrik çalışmalar gibi çeşitli simülasyonlar yapılabilmesi ile artık değişmiştir. Bu günlerde deneyler öncelikli olarak şu sebeplerle yapılmaktadır; Malzeme ve sürtünme modellemelerinin yapılması, Bilgisayar simülasyonlarının doğrulanması, Prototip doğrulamaların yapılması, (Eriksson, 2000).

Gerçek doğrulama işlemi Şekil 2.25’de görülen bir çember üzerinde birleştirilebilen farklı safhaları içerir. İşe veri toplamakla başlanır. Bu iş elektronik veya fiziksel yardımlarla olabilir. Pre-Process (ön işlem) işlemi ile devam edilir. CAD/CAM’ den bir dosya (model) giriş olarak kullanılır. Model elemanlara bölünür. Buna mesh yapma denir. Malzeme parametreleri ve temas yüzey, yükleme koşulları gibi önemli kriterler tanımlanır. Model şimdi çözüm ve simülasyon için hazırdır. Simülasyondan sonra sonuçlar post-proses (son işlem) aşamasında dikkatle incelenir. Bu incelemede şekillendirme limit diyagramlar sıklıkla kullanılır. Daha sonra optimizasyon işlemi başlar. Geometri, parça kalınlığı ve işlem parametreleri değiştirilir. Böylece tasarım kriterinde son modelleme biraz daha memnun edici olacaktır. Gerçek doğrulama için son simülasyon inkremental (artırımlı) çözücü kullanarak yapılır. Kalıplar simülasyon sonuçlarına ve şekillendirme deneylerindeki performansa göre imal edilir. Sonuçlar, tasarım işleminden sonra bir veri tabanında saklanır. Yeni analizler için bu veri tabanı tekrar kullanılabilir.



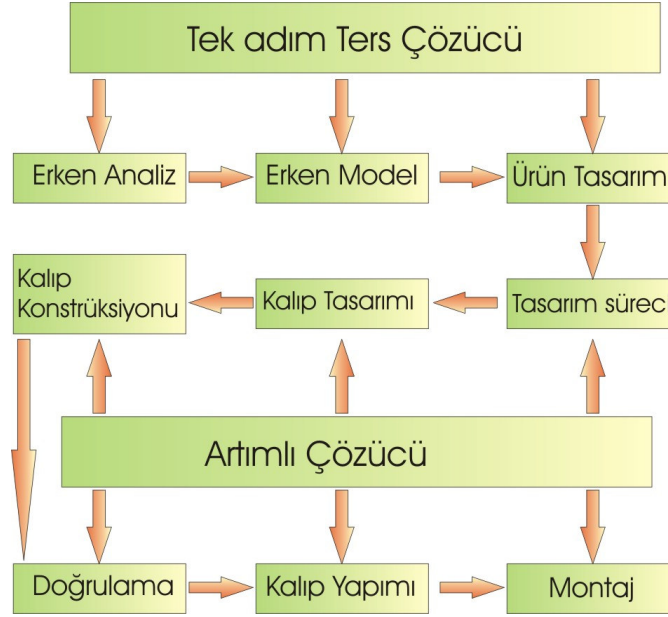
Şekil 2.25: Gerçek doğrulama safhaları (Eriksson, 2000).

Çeşitli gerçek doğrulama safhalarında harcanan zaman yüzdesi hakkında fikir veren bir çalışma Volkswagen’de yapılmıştır. Bu çalışmada son iki adım ele alınmamıştır. Tablo 2.1’ de görüldüğü gibi, ilk üç safha çalışmanın %80’ini oluşturmada ve daha çok veri toplama ve pre-proses işleminden oluşmaktadır. Bu gösterge veri toplamanın ne kadar önemli olduğunu göstermektedir. Elde edilen sonuçların hassasiyeti giriş parametrelerine bağlıdır.

Tablo 2.1: İşlem safhaları yüzde zamanı

İşlem Safhaları	%
Veri Toplama	40
Girişi Hazırlama	20
Modeli Oluşturma	20
Simülasyon	15
Değerlendirme	5

Çeşitli yazılımlar, LS-DYNA 3D, ABAQUS, PAM-STAMP, MARC, AUTOFORM, DE-FORM gibi, simülasyon süreçlerinde kullanılmaktadır. Bazılar bir çok problemi çözmekte yetenekli ve kapsamlıdır. Bazıları ise şekillendirme işleminde spesifik problemlere göre yazılmışlardır. Bir modelleme sürecinde bir mühendis iki farklı türde simülasyon programını kullanabilir. Bunlar; Tek adım ters çözücü, Artımlı (inkremental) çözücüdür. Aşağıda Şekil 2.26’da bir kalıp programında kullanılan spesifik çözücünün işlem dizini görülmektedir.



Şekil 2.26: Adım adım artan çözüm akış diyagramı

Tek adım ters çözücü, bitmiş parçayı giriş verisi olarak kabul eder. Çözücü; şekillendirilmiş parçadan, ham sac parçaya doğru problemi çözmeye başlar. Çözüm algoritmaları, artımlı algoritmalarından daha basittir, bu nedenle hesaplama zamanı kısadır. İşlem ve geometri spesifik şekillendirme işleminde bir çok defa değişebilir. Çözücü parça şekillendirme fizibilitesi hakkında kaba bir tahmin verebilir. Nguyen (2003), ters analiz konusunda boru hydroforming çalışmıştır ve deney sonuçlarını sonlu elemanlar MARC yazılımı ile karşılaştırmıştır.

Artımlı (incremental) çözücü, klasik sonlu elemanlar yazılımıdır. Hem eksplisit hemde impilisit tabanlı çözücü kullanmasına rağmen, eksplisit çözücü şekillendirme simülasyonlarına daha hakimdir.

Gerçek doğrulama veya gerçek işlem simülasyon büyük ölçüde prototip maliyetini ve gelişim zamanını azaltmasına rağmen, boru hydroforming işlem optimizasyonunda deneme yanılma çalışmaları daha çok kullanılmaktadır. Sistematik prosedürler ve optimizasyon tekniklerinin kullanımı, simülasyon yoluyla mühendislik çalışmalarını azaltacaktır. Hala boru hydroforming işlemleri için tasarım

işleminin zamanını kısaltmak için, adaptif teknikler gibi ek simülasyon kodları ve teknikleri geliştirilmiştir. Strano (2004) boru hydroforming’te farklı stratejiler geliştirmiştir.

2.5.2 Sonlu Elemanlar Yöntemi

Sonlu elemanlar metodu; karmaşık olan problemlerin daha basit alt bölgelere (problemlere) ayrılarak, her birinin kendi içinde çözülmesiyle tüm çözümün bulunduğu bir çözüm şeklidir. Bu çalışma içeriğinde, plastik şekillendirmeyi incelemek için sonlu elemanlar yöntemi seçilmiştir. Bu seçiminin nedenleri arasında, bu yöntemin çok farklı malzeme ve çok çeşitli temas tanımlama imkânlarına sunması vardır. Böylece şekillendirme işleminin doğasını oldukça fazla değişken ile benzetim yapma imkânı sağlanmış olur. Sonlu elemanlar yönteminden önce Plastisite teorisinden bir parça bahsetmek daha doğru olacaktır.

2.5.2.1 Plastisite teorisi

Plastisite teorisinde plastik deformasyon şu özelliklere sahiptir:

- Şekil değişim hızına bağlı plastik deformasyon, birim şekil değiştirme değerinde ilave bir bölünme oluştuğunu kabul eder.

$$\boldsymbol{\varepsilon}_{ij} = \boldsymbol{\varepsilon}_{ij}^e + \boldsymbol{\varepsilon}_{ij}^p \quad (2.1)$$

Ve diferansiyel ifadesi aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$d\boldsymbol{\varepsilon}_{ij} = d\boldsymbol{\varepsilon}_{ij}^e + d\boldsymbol{\varepsilon}_{ij}^p \quad (2.2)$$

- Plastik deformasyon yola bağımlıdır. Plastik deformasyon esnasında gerilme ve birim şekil değiştirme arasında doğrusal bir ilişki yoktur. Bu yüzden plastik deformasyonun kurulum ifadeleri diferansiyel denklemlerle veya artırım ifadeleri ile oluşturulmalıdır.

En temel plastisite kurulum denklemi şu şekilde yazılabilir. (Hill, 1950)

$$\sigma_{ij} = D_{ijkl} (\epsilon_{kl} - \epsilon_{kl}^p) \quad (2.3)$$

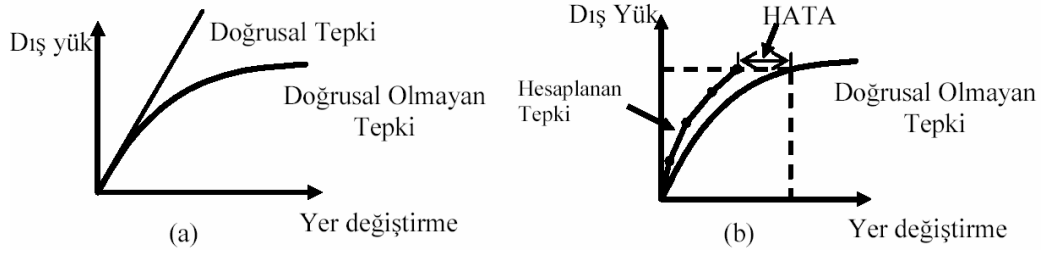
veya diferansiyel ifadesi

$$d\sigma_{ij} = D_{ijkl} (d\epsilon_{kl} - d\epsilon_{kl}^p) \quad (2.4)$$

şeklinde olur.

2.5.2.2 Doğrusal olmayan(non-lineer) sonlu elemanlar

Doğrusal olmayan sonlu elemanlar analizinde, yükleme, katılıkta belirgin etki oluşturunca yük deformasyon eğrisi doğrusal olmayan bir şekil alır. Şekil 2.27’de görülen doğrusal olmayan yer değiştirmenin etkisi, Şekil 2.27 (b)’deki doğrusal denklem sistemleri bir araya getirilerek oluşturulabilir.



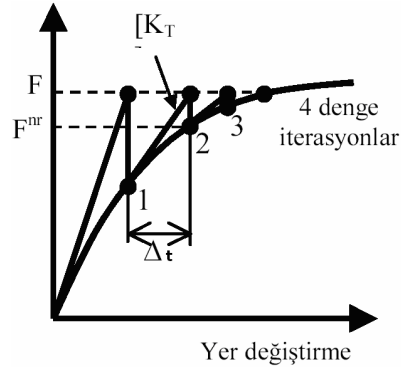
Şekil 2.27: (a) Doğrusal ve (b) doğrusal olmayan tepki

Bir yaklaşım; uygulanan dış yükü artış serilerine bölüp, her artışın sonunda katılık matrisini baştan düzenlemektir. Bu yaklaşımdaki problem; hataların birikmesi sonucunda dengeyi bozacak seviyeye gelmekte bir risk taşır. Newton-Raphson algoritması bu konuda bir çözüm sunar. Şekil 2.28’deki gibi yük kademeli olarak uygulanır. Ayrıca eşitlikteki denge, artış iterasyonlar ile korunmaya çalışılır.

$$[K_T] \{\Delta u\} = \{F\} - \{F^{nr}\} \quad (2.5)$$

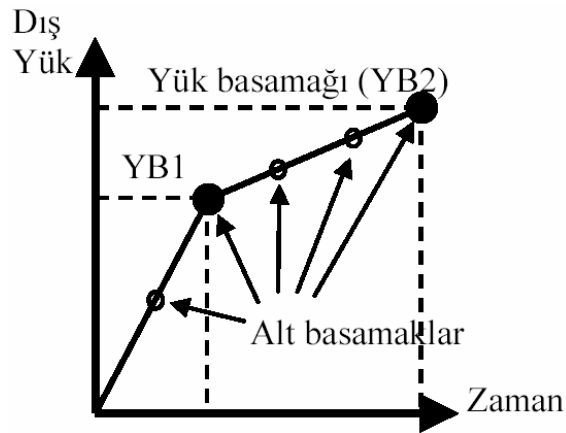
$$\{F\} - \{F^{nr}\} = \varepsilon \quad (2.6)$$

eşitliği sağlanana dek sürer. Burada ε , tolerans değeridir.



Şekil 2.28. Newton-Raphson algoritmasında yükün kademeli olarak uygulanması

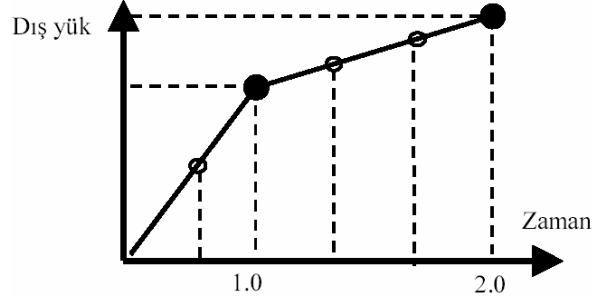
Bu işlem dış yükün tamamı uygulanana kadar sürdürülür. Bir veya daha çok yük basamağı sınır şartı olarak verilebilir. Böylelikle Şekil 2.29'daki gibi çok sayıda alt basamak ve iç içe geçmiş yükleme durumları oluşacaktır.



Şekil 2.29: İç içe geçmiş yüklemeler

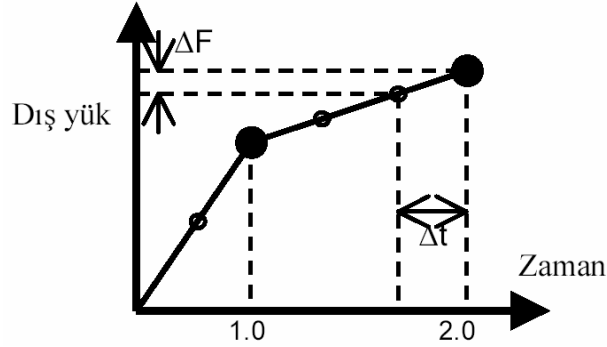
Dengeyi sağlamak için yapılacak iterasyonlar yüklemenin doğrusal olmayan bir şekil almasını her zaman sağlayamayabilir. Her yük ve alt basamak bir zaman basamağı

Şekil 2.30 ile ilişkilidir. Zaman statik analizlerde bir sayacıdır, kronometre değeri değildir. Oran artırımlı analizlerde zaman değeri örneğin; yer değiştirme miktarı olarak verilebilir, böylece yük ve çökme eğrisi elde edilmiş olur.



Şekil 2.30: Yük ve zaman ilişkisi

Her basamak değişimi arasındaki Δt zaman arttırımı; zaman basamağı veya zaman adımı olarak ifade edilebilir. Zamandaki yüksek artış Δt , daha büyük bir yük artışı ΔF doğurur (Şekil 2.31). Böylece zaman adımının değişimi sonuca direkt etki eder. Sonlu elemanlar paket programları zaman artışı Δt değerinin ne olması gerektiğini girdilerden hesaplayan algoritmalar içerir.



Şekil 2.31: Yük ve zaman arttırımı

Zamana bağlı genel sonlu elemanlar genel hareket denklemi aşağıdaki gibi yazılır.

$$(M + \alpha \Delta t K) v_{n+1} = F_{n+1} - K d_{n+1} \quad (2.7)$$

Eğer bu ifadeye $\alpha = 0$ alınır, yani M kütle matrisi “topaklanmış” formda kullanılırsa, eşitliğin çözümü için matris işlemlerine gerek kalmayacaktır. Bu durumda ifadenin çözüm metodu ekspilisit olarak adlandırılır. Metal şekillendirme, sonlu elmanlar yönteminin bir alt başlığı sayılabilecek ekspilisit yöntemi ile gerçekleştirilebilmektedir. Ekspilisit iterasyon birçok sonlu elemanlar çözüm yönteminden çok daha hızlı çözüme ulaşır. Bu yüzden çok eleman içeren ve zaman basamağı sık doğrusal olmayan problemlerde tercih edilir. Sonuçların tutarlılığı yapılan kabullere bağlı olmasına rağmen, genelde gerilmeden ziyade, yer değiştirme sonuçları istenen problemlerde tercih edilir. Bu metot doğrusal değişen yer değiştirme kabulüne dayanır. Temel hareket denklemi zamana göre ilerletilirse, t_n anında bu denklem şöyle oluşur:

$$[M]\{\ddot{u}_n\} + [C]\{\dot{u}_n\} + [K]\{u_n\} = \{F_n^a\} \quad (2.8)$$

İvme ve hızın zamana bağlı denklemleri aşağıdaki gibidir.

$$\ddot{u}_n = \frac{1}{\Delta t^2} (u_{n+1} - 2u_n + u_{n-1}) \quad (2.9)$$

$$\dot{u}_n = \frac{1}{2\Delta t} (u_{n+1} - u_{n-1}) \quad (2.10)$$

Böylece, t_{n+1} anında bilinmeyen yer değiştirmelerin çözülebileceği denklem sistemi alttaki gibidir.

$$\left(\frac{1}{\Delta t^2} [M] + \frac{2}{\Delta t} [C] \right) \{u_{n+1}\} = \{F_n^a\} - \left([K] - \frac{2}{\Delta t^2} [M] \right) \{u_n\} - \left(\frac{1}{\Delta t^2} [M] - \frac{1}{2\Delta t} [C] \right) \{u_{n-1}\} \quad (2.11)$$

Kütle matrisini iki farklı tipte ifade etmek mümkündür; dağılmış (consistent) kütle matrisi ve topaklanmış, yığılmış (lumped) kütle matrisi. Bir yığın kütle matrisi oluşturmak için her elemanın kütlesi hesaplanıp o elemanın düğüm sayısına bölünerek elde edilen sonuçlar bir köşegen matrise yerleştirildiğinde yığın kütle matrisi elde edilmiş olur.

Ekspilisit zaman integrasyon metodunda tutarlı kütle matrisi kullanılmaz. Yerine topaklanmış kütle matrisi kullanılır. Eğer $[M]$ kütle matrisi topaklanmış kütle matrisi ise ve $[C]$ matrisi de kütle matrisinden orantılanarak türetilmiş sönümlenme matrisi olarak alınırsa, ekspilisit zaman integrasyonu oldukça başarılı sonuçlar verecektir. Çünkü denklem sistemi birbirinde bağımsız denklemlerden oluşacaktır.

Ekspilisit yönteminde avantajları şu şekilde sıralanabilir: $[K]$ katılık matrisini değiştirmeye gerek yoktur, çözülmesi gereken denklem sistemleri yoktur, bilgisayar işlemlerinde daha az bellek kullanılır, her zaman basamağı için daha az analizle uğraşılır, doğrusal ve doğrusal olmayan çözüm ayrımı yoktur.

Ekspilisit analiz prosedüründe en çok süreyi ve işlemi elemanların işlenmesi alır. Bu yüzden hızlı eleman formülasyonları gereklidir. Elemanlardaki integrasyon noktalarının miktarı toplam CPU (işlemci) zamanını direk etkiler. Bu yüzden indirgenmiş elemanlar kullanılır. (Kırlı, 2003)

Sac metal işlemlerinde nümerik simülasyonlar için en kabul gören teknik, sonlu elemanlar metodudur. İlk çalışmalar 1960-1970'lerde yapılmıştır. Woo(1968) derin çekilmiş silindirik kupa deneyleri ile sayısal analiz sonuçları karşılaştırmıştır. Sayısal metod rijit-plastik sonlu farklılık membran modeline dayanır. Sayısal çözümler için kullanılacak bazı bilgisayar yazılımları Tablo 2.2'de verilmiştir.

Tablo 2.2: Sonlu elemanlar yazılımları ve yöntemleri

Adı	İmalatçı / Ülke	Tipi	Uygulama
ABAQUS	HKS, USA	İmplicit	Genel non-lineer
MARC	MARC, USA/NL, D	İmplicit	Genel non-lineer
NIKE3D	LSTC, USA	İmplicit	Genel non-lineer
ANSYS	USA & Canada	İmplicit	Genel non-lineer
LARSTRAN	LASSO, D	İmplicit	Genel non-lineer
İNDEED	İNPRO, D	İmplicit	Sac Metal Şekillendirme
ITAS3D	Prof. Nakamachi, J	Ekplisit, statik	Sac Metal Şekillendirme
DYNA3D	LSTC, USA/	Ekplisit, dinamik	Ezme, Şişirme, Sac metal
PAM-STAMP	ESI, F/D	Ekplisit, dinamik	Sac Metal Şekillendirme
Optris	Dynamic Software, F	Ekplisit, dinamik	Sac Metal Şekillendirme
MSCDYTRAN	MacNeal-Schwendler	Ekplisit, dinamik	Sac Metal Şekillendirme
ABAQUS-Ekplisit	HKS, USA	Ekplisit, dinamik	Ezme, Şişirme, Sac metal
AUTOFORM	AUTOFORM, CH	Özel Formülasyon İmplicit	Sac Metal Şekillendirme
Autoforge	MARC, USA/NL, D	Elastik-viskoplastik	Şişirme, Dövme
DEFORM	Batelle, USA, D	Rijid-viskoplastik	Şişirme, Dövme
FORGE2/3	CEMEF, F	Rijid-viskoplastik	Dövme
ICEM-STAMP	Control Data, D	Tek Adım Metodu	Sac Metal Şekillendirme
ISO-PUNCH	Sollac, F	Tek Adım Metodu	Sac Metal Şekillendirme
AUTOFORM Tek Adım	AUTOFORM, CH	Tek Adım Metodu	Sac Metal Şekillendirme
FASTFORM	FTI, Canada	Tek Adım Metodu	Sac Metal Şekillendirme
SIMEX2	SimTech, F	Tek Adım Metodu	Sac Metal Şekillendirme

Sonlu elemanlar metodu temel olarak nümerik hesaplara dayandığı için doğrudan bilgisayar kapasitesi ön plana çıkmaktadır. Sac metal simülasyonlarında çok basitleştirmeler yapılmasına rağmen, simülasyon zamanı yine uzundur. Simüle edilmiş işlemler çoğunlukla simetrik veya 2 boyutludur. Koc ve Altan (2002) 2D sonlu elemanlar analizini kullanarak işlem tasarımı yapmışlardır. DEFORM-2D kullanmışlar ve sonuçları LS-DYNA 3D ile karşılaştırmışlardır. Her iki analizin yaklaşık sonuçlarına rağmen DEFORM'un boru hidroforming işleminin başlangıç safhasında daha kullanışlı olduğu görülmüştür.

Rama, Ma ve Smith (2003) hidroforming işleminde 2 boyutlu nümerik metod sunmuştur. Ayrıca iç basınç yükleme koşulları hakkında yeni bir yaklaşım

elastik-plastik implisit sonlu elemanlar membran modeli ile sac metal şekillendirme işlemini analizlerle geliştirmişlerdir.

Bugün bilgisayar teknolojisinin gelişmesiyle 3 boyutlu modeller eskisi kadar düşündürmemektedir. Önceki analizle bilgisayar teknolojisinin yetersiz olmasının sonucu olarak 3 boyutlu yapıların basitleştirilmesi gerekirdi. Bu şekilde 3 boyutlu simülasyonlar ancak tercih edilebilirdi. Kabuk (shell) eleman teorisi zaten bunun sebebi olarak ortaya çıkmıştır. Kabuk elemanlar bilgisayar kapasitesini zorlamadığı gibi eleman sayısının arttırılabilmesi sebebiyle çözüm hassasiyeti de artar. Menezes ve Teodosiu (2000) 3 boyutlu elastik-plastik elemanlar ile implisit sonlu elemanlar metodu sunmuşlardır. Lei (2000), HYDROFORM-3D sonlu elemanlar programı kullanarak 3 boyutlu rijit-plastik elemanları kullanarak otomobil arka aks kovanını hidroforming işlemi ile simüle etmiştir.

Güçlü bilgisayarlar sayesinde nümerik çalışmalar için kolay algoritmalar ve teoriler kolay elde edilmektedir. Kabuk (shell) elemanların yerine katı elemanların kullanılması ile serbestlik derecesi biraz daha azalmıştır. Son 10 yıl içerisinde eksplisit formülasyon, zamanla entegrasyonu sayesinde daha popüler olmuştur. İmplicit yolları tercih eden araştırmacılarda çoktur.

2.5.2.3 Dinamik sonlu elemanlar formülasyonu

Malzemenin hareket noktasını yöneten diferansiyel denklem;

$$\sigma_{ij,j} + \rho b_i = \rho a_i \quad (2.12)$$

$$\sigma_{ij} n_j = t_i \quad (2.13)$$

$$u_i = \bar{u}_i \quad (2.14)$$

Burada;

Denklem aşağıdaki gibidir;

$$\int_V \rho a_i \delta u_i dV + \int_V \sigma a_{ij} \delta u_{i,j} dV - \int_V \rho b_i \delta u_i dV - \int_{S_1} t_i \delta u_i dS = 0 \quad (2.15)$$

Burada; δu_i , sınır şartları ile uyumlu yer değiştirme alanının gelişi güzel bir değişkendir. Uzaysal ayırım n elemanı ile geręekleřir ve daha sonra sonlu elemanlar denklemi aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\sum_{m=1}^n \left\{ \int_{V_m} \rho N^t N^t dV + \int_{V_m} B^t \sigma dV - \int_{V_m} \rho N^t b dV - \int_{S_1} N^t t dS \right\} = 0 \quad (2.16)$$

Burada N , enterpolasyon matrisi ve B , gerinim (strain) yerdeğiştirme matrisidir. Dinamik sonlu eleman hesapları için iki teknik yani eksplisit ve implisit denklemler kullanılır. İmplicit metotta $t + \Delta t$, zamanında $F = m.a$, denklemi kullanılarak $t + \Delta t$, anındaki konfigürasyon t zamanında $F = m.a$ kullanılmasıyla bulunur. Eksplisit entegrasyonda küçük Δt gereksinimi olabilir. Fakat çözümü daha kolaydır. İmplicit entegrasyonda ise büyük Δt 'lere izin verilir, çözüm zor ve uzun sürebilir.

İmplicit sonlu elemanlar metodu, deformasyonun her adımında denge olduğundan güvenilir sonuçlar verebilir. İmplicit formülasyonunda en büyük engel yakınsama çözümleri, temas ve sürtünme şartlarının değişmesinden kaynaklanan başarısızlıktır. Ayrıca temas şartında ve büyük denklem sisteminin çözümünde harcanan zaman çok fazladır. Eksplisit formülasyonun avantajı kompleks kalıp yüzeylerin sınır şartlarının hızlı değişimi çok iyidir. Eksplisit zaman entegrasyonu kolay temas şartlarında ve düşük hafıza gereksinimi nümerik açıdan avantajlıdır.

Mattiasson (1971) DYNA-3D'deki eksplisit kotlarla ABAQUS'taki implisit kodları karşılaştırdı ve sac metal şekillendirme işlemlerinde deneysel doğrulamalar yapmıştır. Yang (1995), sac metal şekillendirme işlemleri simülasyonunda, implisit, eksplisit ve iteratif implisit/eksplisit durumlarında karşılaştırmalı araştırma yapmıştır. Onate (1995) quasistatik visko-plastik akış ve elastik-plastik katı modelleri karşılaştırmış ve sac metal şekillendirme simülasyonu için eksplisit dinamik modeller kurmuştur. Kim (2000), otomobil motor beşiğinin boru hydroforming işlemleri için LS-DYNA 3D'de implisit modeller geliştirmiştir. Cao (1994), derin çekme simülasyonları için yarı implisit bir model tanımlamıştır. Her zaman artımında

tanjant formülü kullanarak yeni bir çözüm elde etmiş ve bu çözümü bir sonraki adımda kullanarak diğer çözümleri elde etmiştir. Yükleme parametrelerinin artımlı (incremental) olarak seçiminden sonra konfigürasyon ve sac durumu eksplisit olarak güncellenmiştir. Daha sonra implisit algoritması, yükleme parametre değerleri ve temas düğümler sabit statüsü altında kurulmuştur. Son olarak sınır şartları yeni temas kuvvet değerleri ve yeni düğüm pozisyonları ayarlanmıştır. Finn (1995), sac metal şekillendirmede geriye yaylanma miktarını etkili olarak tahmin etmek için eksplisit LS-DYNA 3D ile implisit LS-DYNA 3D-NİKE 3D yi birleştirmiştir. Eksplisit program şekillendirme işlemler için uygun, implisit program ise modelin yaylanmasını hesap etmek için daha uygun programdır. Cherouat (2002) boru hydroforming işleminde dinamik denge problemini eksplisit yöntem kullanılırken, implisit metot ise denklemlerde lokal zaman entegrasyonunda kullanılmıştır.

2.5.2.4 İmplicit (Kapalı) Hesaplama

Sonlu elemanlar metodunda implisit hesaplama, belirli zaman artımlarında verilen hesaplarla elde edilen yapısal dengedir. “ t ” anındaki bilinen konfigürasyon, $t + \Delta t$ durumuna transfer edilir ve denge problemi çözülür. Statik yapısal denge, $t + \Delta t$ anındaki ulaşılan iteratif konfigürasyon ile sağlanır. Algoritmalar eksplisit metoda göre detaylı ve daha büyük zaman artımlarına müsaade ediyor. İmplicit zaman entegrasyonları kayıtsız kararlıdır, bu Δt nin boyutları kararlılıktan (stability) daha fazla hassasiyet ölçüleriyle yönetilir demektir. Diğer yandan eksplisit metotlarla karşılaştırıldığında bazı dezavantajlara sahiptir. İmplicit algoritmalar, iterasyon işlemi boyunca gerçekleşebilecek sayısal kararsızlıklara ve ıraksamalara karşı bir korumaya sahip değildir. Genelde bu sınır şartlarında veya artım süresince geçirdiği evrimlerde geçirdiği şiddetli değişiklikler ile ilişkilendirilir.

İmplicit metotta, denge denklemleri ve uyumluluk şartları $t + \Delta t$ anında konfigürasyon üzerine yüklenir, fakat bu uyumluluk ve denge bilinmez. Bu konfigürasyon ardışık yaklaşımlarla belirlenmek zorundadır. Çözümün doğrulanması iteratif Newton-Raphson ve direk iterasyon metodundan gelir. Direk iterasyon metodu çözümün başlangıcında iyi bir tahmin üretmekte kullanılır. Bu tahmini Newton-Raphson metodu, hızlı bir şekilde sona ulaşmak için kullanır. Esche (1997)

çalışmalarında, implisit sonlu elemanlar programında, yakınsamadaki nümerik zorlukları yenmekte kullanılabilir tekniklere odaklanmıştır.

2.5.2.5 Eksplisit (Açık) Hesaplama

Hareketin denklemi zaman aralıklarında (Δt) gerçekleştiği için, Eksplisit sonlu elemanlar simülasyonunda deformasyon davranışı quasi-statiktir. Ayırık zaman aralıklarında, prensipte, statik denge elde edilir ve statik analiz aparatları yeni konfigürasyon hesaplamakta kullanılabilir. Eksplisit prosedür iterasyona ve tanjant rijitlik (stiffness) matriksine gereksinim duymaz. Küme (lump) kütle matrisi gibi Diagonal eleman kütle matrisi kullanıldığında daha verimli olabilir. Denklem 2.17'deki birinci terimin kütle kümesinde, ayrılmamış bir sonlu eleman elde edilir;

$$Ma = F^{ext} - F^{int} \quad (2.17)$$

M = Küme düğüm kütle matrisi. Küme terimi, diagonal olarak elemanların yoğunlaşması anlamını taşır.

Merkezi fark metodu, hareket denklemlerini birleştirmek için kullanılır.

$$a_n = M_n^{-1} (F_n^{ext} - F_n^{int}) \quad (2.18)$$

$$v_{n+1/2} = v_{n-1/2} + a_n \Delta t_n \quad (2.19)$$

$$u_{n+1} = u_n + v_{n+1/2} \Delta t_{n+1/2} \quad (2.20)$$

$$\Delta t_{n+1/2} = \frac{1}{2} (\Delta t_n + \Delta t_{n+1}) \quad (2.21)$$

Burada v ve u sırasıyla global düğümsel hız ve yer değiştirme vektörleridir. Geometri çözüm başlangıç geometrisine yer değiştirme artımlarının eklenmesiyle güncellenir. Eksplisit zaman entegrasyonu şartsız kararlıdır. Zaman adımları için yaklaşık kararlılık limiti;

$$\Delta t < \Delta t_a \cong \frac{L}{C_d} \quad (2.22)$$

Hallquist (1995), eksplisit sonlu elemanlar için LS-DYNA 3D programı, paralel bilgisayarlar ve sac metal şekillendirme uygulamaları için uygunluğunu genel bir değerlendirme ile sunmuştur. Eksplisit sonlu elemanlar programlarının yapısı ile diagonal kütle matrisleri paralellik ve vektörellik yönünden onları daha uyumlu olduğunu saptamıştır.

2.5.2.6 Zamanlama Kavramı

Sac metal şekillendirme operasyonlarını eksplisit sonlu elemanlar simülasyonları ile bağlanmakta 3 farklı zaman kavramı kullanılır; İşlem zamanı, simülasyon zamanı ve hesaplama zamanı. İşlem zamanı, bir parçanın üretimi için geçen gerçek zamandır. Simülasyon zamanı, bilgisayar simülasyonlarında sınır şartları ve kuvvetlerin uygulanması için kullanılan hayali zamandır. Hesaplama zamanı, bilgisayar simülasyonlarında kullanılan gerçek zamandır. İşlem zamanı genellikle 0.5-10 saniye arasında, simülasyon zamanı 10 milisaniye (ms) ile 300 ms aralığında, ve hesaplama zamanı ise 1 saatten 1 haftaya kadar bilgisayar ve model boyutlarına bağlı olarak değişir.

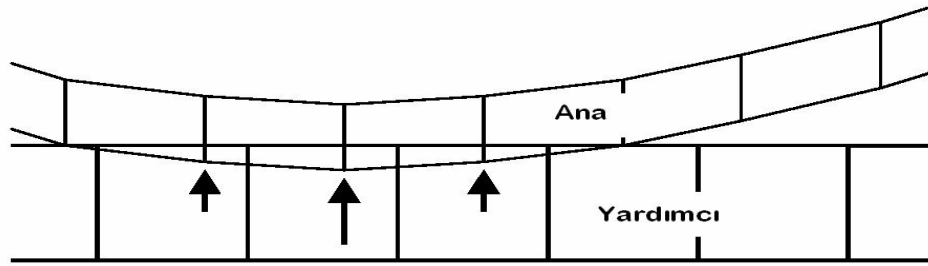
Tipik sac metal operasyonları için, bir zaman adımı sadece bir mikrosaniyeden oluşur. İşlem zamanı 1 saniye'de gerçekleştiğine göre, bir simülasyon için milyonlarca zaman adımı gereklidir. Hesaplama zamanını azaltmak için standart olan yaklaşım, şekillendirme işlemi çok kısa bir zamanda gerçekleşiyor gibi kabul etmektir. Diğer yol ise şekillendirme işleminde hareketli parçaların kütlelerini değiştirerek işlemi hızlandırmayı başarmaktır. Bir x faktörü ile malzeme yoğunluğunun artması, denklem 2.22'deki C_d ' yi azaltacaktır, böylece x 'in kareköküyle zaman adımı artacaktır.

Hızlanma için bir limit vardır. Deformasyonun kinetik enerjisi kesin bir seviyenin altında tutulmalıdır, bundan dolayı simülasyonun dinamik etkisi ihmal edilebilir.

Uygun, dikkatli ve hassas çözümler, sac metal işlemleri için mümkün olmalıdır. Chung (1998), sac metal simülasyonunda, dinamik etkilerden kaynaklanan hatalara benzer bir statik işlem için enerji hata tahmini önermiştir. Simülasyon zamanının seçimi için yararlı girdiler elde edilebilmiştir. Kutt (1998), derin çekme işleminin hızlanmasının etkilerini incelemiştir. Ayrıca farklı zımba yük eğrilerinin şekillerini çalışmış ve 2 boyutlu simülasyonları NIKE2D ve DYNA 2D’de yapmıştır.

2.5.2.7 Temas Analiz

LS-DYNA 3D’de temas arayüzü, bir ana ve bir yardımcı yüzeyden oluşur. Temas algoritması, ana yüzeyin içine yardımcı düğümlerin girmesini kontrol eden algoritma olarak tanımlanır. (Şekil 2.32)

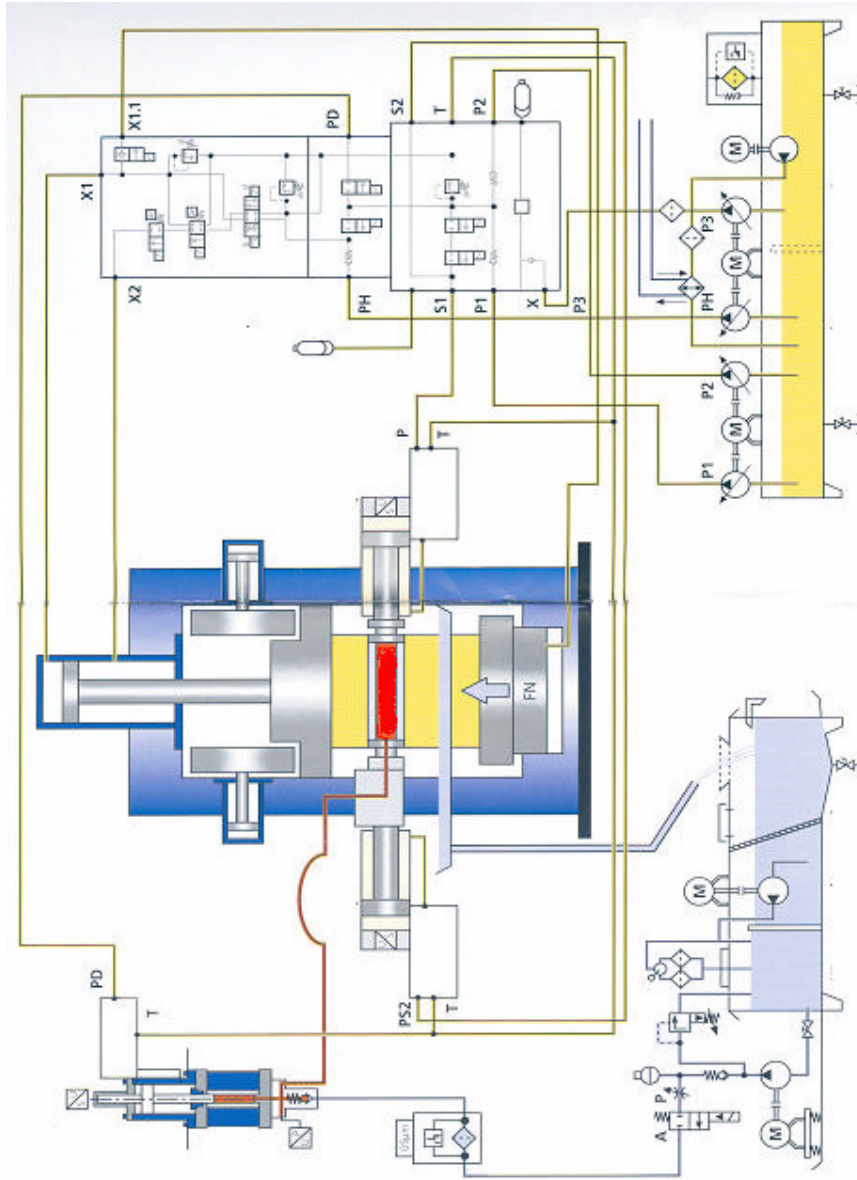


Şekil 2.32: Temas yüzeyler

Yardımcı düğümler ve ona karşılık gelen ana segmentler tanımlandığında, temas algoritması birkaç farklı düzene göre ilerler. En geniş kullanılan metod penaltı prosedürüdür. Prizsiz başlangıç etkisini ve mesh deki en az dağılmayı verir. Düğümlerin girmesi, yardımcı düğümler ve onları karşılayan ana segmentler arasındaki girme yapay yaylarla önlenir. Bir yardımcı düğümdeki arayüz kuvveti varsayılan girme uzunluğu, bulk modülüne ve elemanın ölçüsüne dayanarak hesaplanır. Giren Yardımcı düğüm ana yüzey üzerinde yeniden konumlanmıştır.

2.6 Hydroforming İşleminde Kullanılan Ekipmanlar

Soğuk ekstrüzyon diyebileceğimiz hydroforming işleminde özel amaçlı presler tasarlanmıştır. Bu preslerde; alt kalıp, üst kalıp, sağ ve sol eksenel silindirler, basınç güçlendirme ünitesi ve işlem kontrol ünitesinden oluşur. Şekil 2.33’de bu presin ana kısımları görülmektedir.



Şekil 2.33: Hydroforming işleminde ekipman görünümü (Çelikayar, 2002)

Hydroforming şekillendirme yönteminde iki farklı akışkan kullanıldığı için 2 farklı hidrolik sistem kullanılmaktadır; Hidrolik sistem ve Hidrolik tahrik sistemi.

2.6.1 Hidrolik sistem

Birinci sistem diğer preslerdeki tahrik ve kontrol sistemiyle benzer bir sistemdir. Alt ve üst kalıp hareketleri, aksenal silindirlerin hareketleri ve basınç yükselticinin hareketleri gibi ana hareketlerin meydana getirilmesi için oluşturulan mineral yağın kullanıldığı hidrolik güç ünitesi. Burada kullanılan pompalar değişken debili aksenal pistonlu pompalardır. Pres kontrol bloğu da güç ünitesi üzerine monte edilmiştir ve kullanılan yağı kirliliğe karşı korumak için ünite üzerinde filtrasyon ve soğutma sistemi monte edilmiştir. Aksenal silindirler kapalı devre kontrol sistemine sahip olduğu için oransal kontrol blokları silindirin üzerine monte edilmiştir, aynı şekilde basınç yükselticinin kontrol bloğu ve basınç sensörleri de basınç yükseltici silindirin üzerine monte edilmiştir.

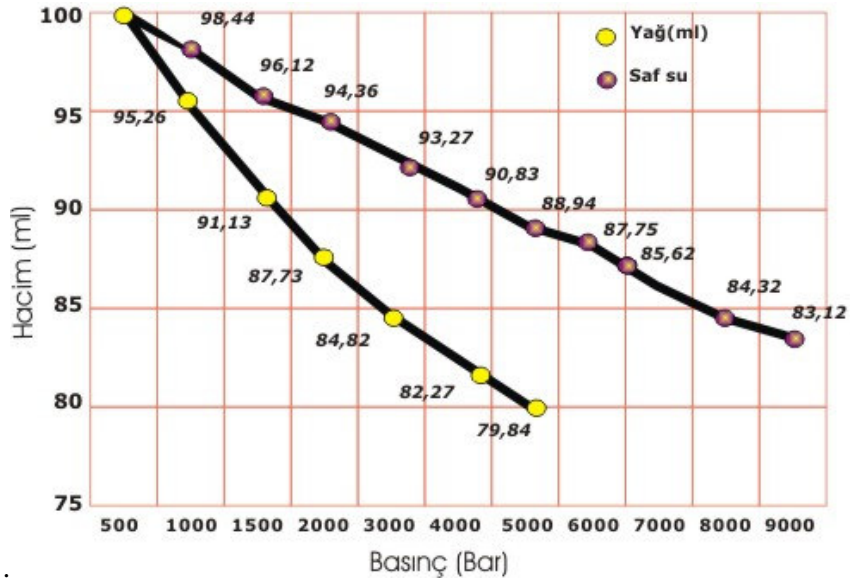
2.6.2 Hidrolik tahrik sistemi

İkinci hidrolik tahrik sisteminde HFA tipi su esaslı akışkan kullanılmakta ve bu akışkan sabit debili bir pompa vasıtasıyla yüksek basınç hattına gönderilmektedir. Şekillendirme işlemi bittikten sonra kullanılan su esaslı akışkan depoya geri dönmekte ve burada bekledikten sonra filtreden geçirilerek pompanın emiş hattına basılmaktadır. Yüksek basınç hattına tekrar basılırken de 5 mikronluk filtrelerden geçerek iş parçasının içine gönderilmektedir. İkinci sistemde kullanılan akışkan su esaslı olduğu için burada kullanılan borular, flanşlar ve diğer bağlantı elemanları paslanmaz çeliktir.

İki hidrolik sistemin sızıntı hatları birbirine karışmadan hidrolik ünitelerine dönmelidir. Ayrıca yüksek basınç hattı ile düşük basınç hattı arasında herhangi bir kaçak olmaması için yükselticideki piston ve millerin sızdırmazlığının iyi yapılması gerekmektedir.

2.6.3 Şekillendirme İşleminde Kullanılan Akışkan

Mineral yağın yanma özelliğinden dolayı yüksek basınç altında sıkıştırma işleminde su esaslı akışkanların kullanılması daha uygun olmaktadır. Sıkıştırılabilirlik özelliği açısından mineral yağ ile su esaslı akışkanları mukayese edecek olursak şekilde görüldüğü gibi belirli bir basınç altında mineral yağlar daha fazla sıkıştırılmakta dolayısı ile su esaslı akışkanlar daha az sıkıştırılabildiğinden dolayı bu işlem için daha uygun olmaktadır. Saf su ve yağa ait sıkıştırılabilirlik diagramı Şekil 2.34’de gösterilmiştir (Çelikayar, 2002). Boru hydroforming işleminde kullanılan su esaslı akışkanlar genel olarak üç gruba ayrılır. Bunlar; A= su esaslı, HFA-S sentetik katkı, HFA-E mineral yağ katkı akışkanlardır.



Şekil 2.34: Akışkanların sıkıştırılabilirlik durumları

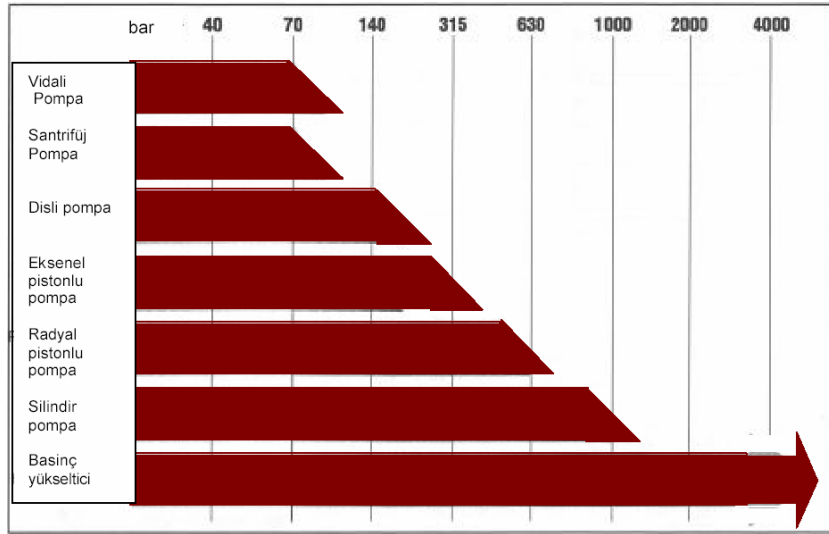
Su esaslı akışkanların; yağlama karakteristiği iyi olmalı, aşınmaya ve korozyona karşı sistemi korumalı, viton ve nitril keçelerle çalışmaya uygun olmalı, hidrolik sistemde kullanılan elemanların malzeme yapısı ile uyumlu olmalı, yüksek filtrasyon kabiliyetine sahip olmalı (1-3 mikron), mikrop üremesine engel olacak yapıda olmalı, yanmaz olmalı, karıştırma oranı 95:5 olmalı katkı oranı % 5'in altına düşmemeli, kullanılan su kalitesi iyi olmalı, çevre ile dost olmalı, üretim esnasında

kullanılan diğerk akışkanlara karışma durumunda yapısı uyumlu özelliklerde olmalıdır (Çelikayar, 2002).

2.6.4 Basınç yükseltici

Yüksek basınç altında şekillendirme işlemini yapabilmek için ihtiyaç duyulan yaklaşık 4000 bar'lık basıncı sağlayabilmek için uygun bir basınç pompası seçilmesi gerekmektedir.

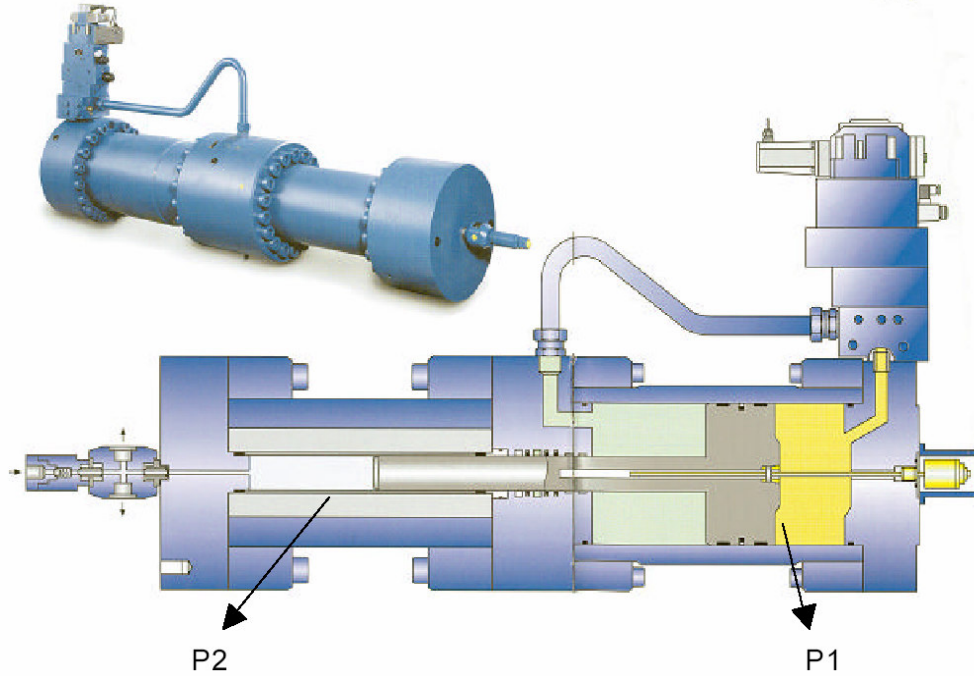
Bu işlem için kullanacak uygun pompayı seçebilmek için Şekil 10'daki tabloyu incelendiği zaman aksenal pistonlu pompa ile en fazla 400 bar'ı elde edebilir. Radyal pistonlu pompa ile de ancak 650 -700 bar'a ulaşılabilir. İhtiyaç duyulan 2000-4000 bar basınç ancak basınç yükseltici vasıtasıyla elde edilebilmektedir. Basınçlarına göre bu donanımlar, Şekil 2.35'te görülmektedir. (Çelikayar, 2002)



Şekil 2.35: Pompa kapasitelerinin yorumlanması (Çelikayar, 2002)

Yüksek basınç altında şekillendirme sisteminin kalbi Şekil 2.36'da görülen basınç yükselticidir. Makine üzerindeki konstrüksiyona göre aksenal olarak veya ayrı olarak monte edilebilmektedir. Eğer ayrı olarak monte edilmişse esnek, yüksek basınç bağlantı elemanına ihtiyaç vardır. Basınç yükseltici vasıtasıyla 2000 bardan 4000

bar'a kadar hatta bazı özel uygulamalarda 6000 bar'a kadar basınç meydana getirilir. Basınç yükselticinin deplasmanı 0.08-15.3 dm³ aralığında olabilir.



Şekil 2.36: Basınç yükseltici (Çelikayar, 2002)

Birinci sistemdeki çalışma basıncı P1 in artmasıyla ikinci sistemdeki P2 yüksek basıncı artmaktadır. Birinci ve ikinci kısımdaki alan oranı basınç yükseltme faktörünü verir

$$P2=(A1/A2) \times P1 \quad (3.1)$$

A1/A2: basınç yükseltme faktörü

Basınç yükselticide kullanılan basınca göre 2 farklı tasarım mevcuttur. Yaklaşık olarak 2000 bar'a kadar kullanılan sistemlerde tek tabakalı tasarım denilen piston milinin içinde hareket ettiği yüksek mukavemetli esnek malzemeden yapılmış kalın etli bir boru kullanılır. Basınç yaklaşık olarak 2000 bar'dan yüksek ise iki tabakalı tasarım denilen aynı malzemeden yapılmış gerilme altında birbirinin içine geçirilmiş iki borudan oluşmaktadır.

Basınç yükselticinin kontrol bloğu üzerindeki elemanlar şunlardır; Oransal valf ve emniyet valfleri, Silindirin içine takılmış pozisyon transdüseri, Akışkan besleme çek valf.

Kullanılan sızdırmazlık sistemi aşınmaya karşı dayanıklı olmalıdır,basınç altında kalan elemanların ömürlerinin uzun olması için yüksek basıncın kontrol edilebiliyor olması gerekir. Basınç yükseltici dizayn edilirken uygulama tipine göre aşağıdaki kriterler göz önüne alınmalıdır; Maksimum kalibrasyon basıncı, strok hacmi, yüksek basınçlı yağın debisi, silindirin hiza ve cevap verme süresi.

2.6.5 Dekompresyon

Yüksek basınç altında şekillendirme yönteminde önce iş parçasının içine akışkan yaklaşık 40 bar'da doldurulmakta sonra 2000 barda genişleme olmakta 4000 bar a gelindiğinde de kalibrasyon işlemi yapılmakta ve işlem bitmekte, işlem bittiği zaman meydana getirilen yüksek basıncın emniyetli bir şekilde düşürülmesi gerekmektedir bu işleme dekompresyon işlemi diyoruz. Bu işlem iki şekilde yapılabilir;

1- Su esaslı akışkanın bulunduğu hattan tanka sızdırılması: bu işlem esnasında kullanılan kısma valfinde aşırı ısınma meydana gelebilir ve kısma valfinin ömrü basınca ve debiye bağlı olarak azalabilmektedir.

2- Basınç yükselticinin mineral yağın bulunduğu kısımdaki silindirden yağın atılması yolu ile: burada silindir kapalı devre ile kontrol edildiği için dekompresyon işleminin buradan yapılması daha doğru olmaktadır.

Dekompresyon işleminde 4000 bar'da sıkışmış olan belirli bir hacimdeki yağ miktarı dışarı atılmaktadır. Basınç yükselticileri tek etkili ve çift etkili olabilirler. Basınç yükselticinin boyutlarının belirlenmesi için uygulama tipi kalibrasyon basıncı, basma hacmi, ve cevap verme süresi dikkate alınmalıdır.

3. TESİSAT BAĞLANTI ELEMANLARININ BİLGİSAYARDA MODELLENMESİ

Genel olarak doğalgaz vb. tesisatlarda kullanılan T ve Y bağlantı elemanlarının geometrik ve yapısal özellikleri önemlidir. Doğalgaz tesisatlarında dikişsiz bağlantı elemanları daha verimli ve güvenli olduğundan tercih edilmektedirler. Hayati önem ve risk taşıyan bu tür akışkan tesisatlarında yaygın olarak kullanılan dikişsiz bağlantı elemanları ise ancak hydroforming yöntemiyle üretilmektedir. Şekil 3.1’de düz borudan imal edilmiş olan T bağlantı elemanı görülmektedir.



Şekil 3.1: Hydroforming yöntemiyle üretimi tasarlanan “T” bağlantı elemanı

Bu nedenle, bu çalışmada, üretilmesi istenen dikişsiz T ve Y tesisat bağlantı elemanlarının şekillendirilmesi simüle edilmiştir. Bunun için de, normal standart boru malzemesinden elde edilecek T ve Y bağlantı elemanı bilgisayarda modellenerek ve kalıcı deformasyona tabi tutularak şekillendirilme işlemi gerçekleştirilmiştir. Şekillendirme işlemi kalıpla birlikte tasarlanarak bilgisayarda modellenmesi gerçekleştirilmiştir. Bu işlemde kullanılan iki ucu açık standart yuvarlak boru profili, SAE/AISI 304 paslanmaz çelik malzemenin olup bu malzemenin metalürjik, mekanik ve geometrik özellikleri detaylı olarak Tablo 3.1 ve 3.2’de verilmiştir.

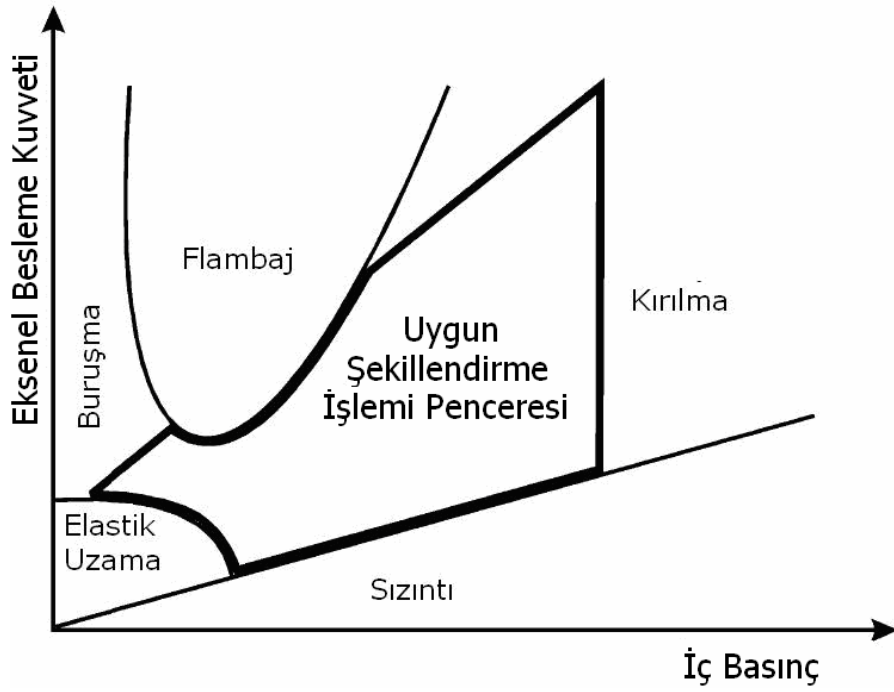
Tablo3.1: SAE/AISI 304 paslanmaz çelik malzemenin kimyasal özellikleri
<http://www.sergenc.com>, (08 Mayıs 2007)

ASTM	EN.NO	% C	% Mn	% Si	% P	% S	% Cr	% Ni
304	1.4301	0.08	2.0	1.00	0.045	0.03	18.0-20.0	8.0-10.5

Tablo3.2: SAE/AISI 304 paslanmaz çelik malzemenin geometrik özellikleri

Sertlik, Brinell	201 HB
Akma Mukavemeti, (Yield Stress)	205 MPa
Elastik modülü	193 GPa
Yoğunluk	8000 kg/m ³
Poisson's Oranı	0.30
Dış çap	33.4 mm
Et kalınlığı	2.80 mm
Boru Uzunluğu	190 mm

Detaylı şekillendirme tekniği ve uygulama esasları bölüm 2.2’de açıklandığı gibi, Hydroforming işleminde aksenal besleme ve iç basınç yükleme koşulları parça kalitesini etkiler. Uygun olmayan yüklemeler yapılırsa, şekillendirilecek parça üzerinde bölüm 2.3’de detaylı açıklanan ve istenmeyen şekillendirme arızaları meydana gelir. Şekil 3.2, hydroforming işleminde iyi bir şekillendirme elde edilebilmesi için boru malzemesine uygulanacak aksenal besleme kuvvetini, boru içindeki akışkan basıncına bağlı olarak vermektedir.



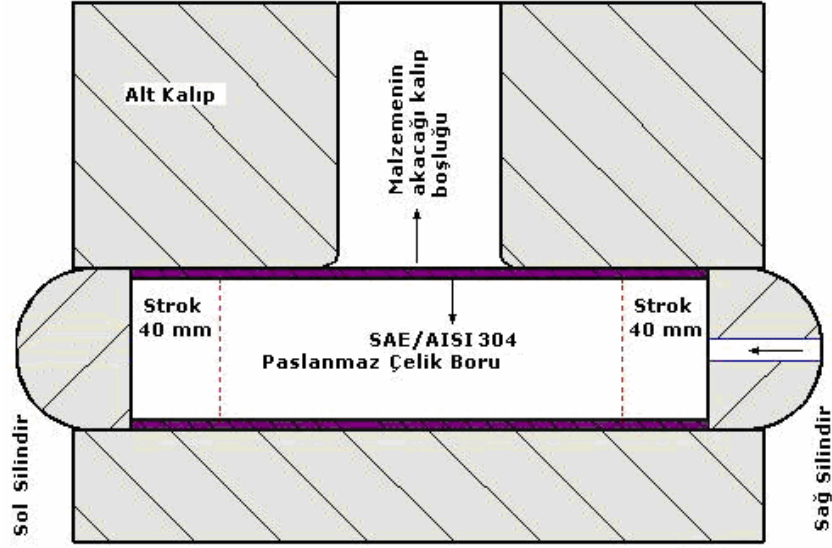
Şekil 3.2: Uygun yükleme eğrileri (Fann ve Hsiao ,2003)

Hydroforming işlemi Şekil 3.2’de görüldüğü gibi 4 safhada incelenmiştir. Her safhada aksenal besleme kuvveti ve iç basınç lineer ilişki içerisinde, bu nedenle her safhadaki iç basınç ve aksenal besleme sınırlarından uygun şekillendirme işlemi penceresi elde edilebilir. Şekillendirme penceresi haricinde üretilen parça et kalınlığındaki homojenlik ve geometrik hataları için optimizasyon yapılması gerekir. Bu çalışma için iki tip optimizasyon stratejisi geliştirilebilir. Toplu optimizasyon veya sıralı optimizasyon uygulanabilir.

3.1 Hydroforming İşleminin Modellenmesi

Hydroforming tekniğinin tasarımında en önemli aşama, işlem parametrelerinin belirlenmesidir. İşlem parametreleri genellikle üç grupta toplanabilir. Bu parametreler; boru malzemesi, boru geometrisi ve şekillendirilecek boruya uygulanan kuvvetlerle ilgili tanımlamalardır. Uzunluk, çap, et kalınlığı ve şekillendirmede kullanılacak silindir strokunu tanımlayacak değerler boru geometrisine ait parametrelerdir. Şekillendirilmesi uygulanacak T ve Y bağlantı elemanları için yaklaşık 1 inc (25,4 mm) çapında standart boru kullanılması tasarlanmıştır. 1 inc standartlarında düşünülmüştür. Öte yandan, boru malzemesini şekillendirilmesinde kullanılacak kuvvetlerle ilgili olarak, kalıpları kenetleme kuvveti, şekillendirmede kullanılan akışkan basıncı, boruların uçlarına etki eden silindir kuvveti, kuvvetlerin zamanlanması, boru malzemesi ile kalıplar arasındaki yağlama ve sürtünme durumlarını tanımlayan parametrelerdir. Parametrelerin hepsi hydroforming işlemini etkileyen faktörlerdir. Bu nedenle, istenilen şekillendirme işleminin gerçekleştirilebilmesi için yukarıda bahsedilen parametrelerin uygun bir şekilde seçilmesi zorunludur. Bu parametrelerin en uygun koşullarda seçilebilmesi ve uygulanabilmesi için yukarıda bahsedilen sonlu elemanlar tabanlı ticari bilgisayar yazılımı DEFORM-3D kullanılmıştır.

Yukarıda tanımlanan işlem parametrelerinin uygun seçiminden sonra kalıp alt ve üst plakaları modellenir ve seçilen ve uygun ebatla kesilen standart yuvarlak boru Şekil 3.3'te görüldüğü gibi kalıpların içerisine yerleştirilir. Kalıp alt plakası üzerinde, borunun şişmesi ve dolayısı ile şekillendirilmesi için gerekli boşluk dizayn edilmiştir. Sağdan ve soldan sıkıştırma yapacak silindirler tasarlanmış olup aynı zamanda sağdan ve soldan akışkan malzeme boru içerisine doldurulur. Silindirler seçilen strok mesafelerine göre sıvı akışkanın basıncı ile birlikte eş zamanlı olarak hareket ederek boru malzemesini kalıbın şeklini alacak şekilde şekillendirmeye zorlar.



Şekil 3.3: Simülasyon tasarımı

3.2 Sonlu Elemanlar Modeli

Bu çalışmada, SAE/AISI 304 paslanmaz çelikten yapılmış standart yuvarlak boru malzemesinden “T” ve “Y” tesisat bağlantı elemanlarının Hydroforming yöntemiyle şekillendirilmesi bilgisayar yardımı ile simüle edilmiştir. Bilgisayar simülasyonunda sonlu elemanlar ekspilisit formülasyon tabanlı program, DEFORM-3D, kullanılmıştır. Hydroforming şekillendirme işleminde kullanılan kalıplar, boru malzemesi ve pres ekipmanları modellenerek DEFORM-3D yazılımına aktararak yükleme, basınç ve diğer sınır şartları tanımlanmıştır. Bu modellemeler ve tanımlamalar sonucunda, standart boru deforme edilerek “T” ve “Y” şeklinde biçimlendirilmesi gerçekleştirilmiştir. Oda sıcaklığında gerçekleştirilen bu çalışmaların sonucunda elde edilen gerilme, gerinim, zımbalara gelen yük durumu, ürün et kalınlık ve en uygun iç basınç değerleri belirlenmiştir.

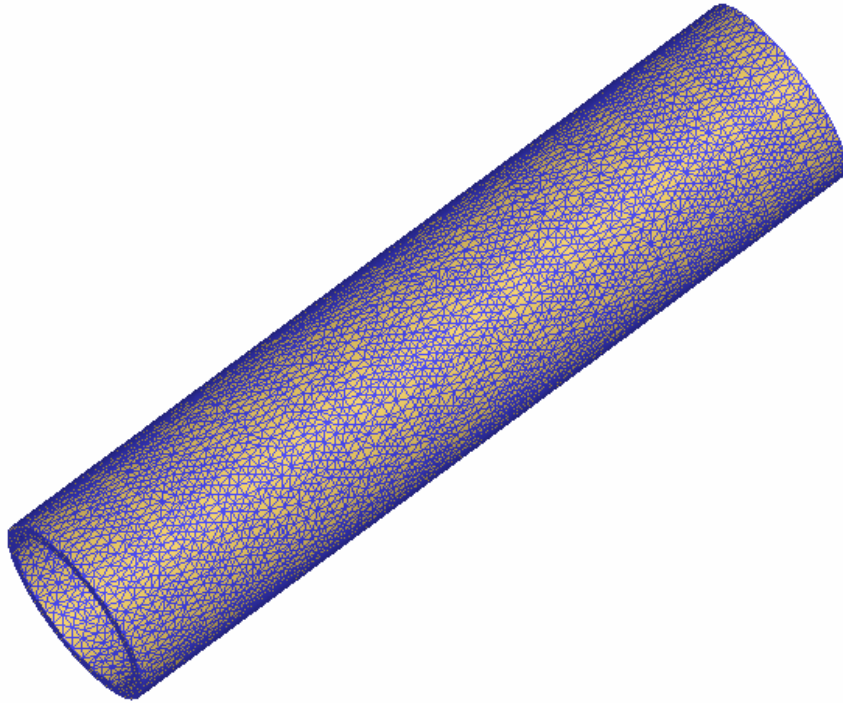
3.3 Hydroforming İşleminin Bilgisayar Destekli Simülasyonu

“T” ve “Y” tesisat bağlantı elemanlarının Hydroforming yöntemiyle şekillendirilmesi bilgisayar yardımı ile analiz edilmiştir. Bu iki analizin işlem basamaklarında

çoğunlukla aynı olduğu gibi farklı uygulamalarda vardır. Bu nedenle iki bağlantı elemanı ayrı ayrı incelenecektir.

3.3.1 Standart “T” bağlantı elemanının analiz sonuçlarının değerlendirilmesi

Yukarıda bahsedilen şekillendirme işlemini bilgisayarda simüle edebilmek için işlem parametreleri bilgisayarda tanımlanmıştır. Standard paslanmaz çelik AISI 304 boru malzemesinin özellikleri, sınır şartları, temas yüzey şartları, sürtünme şartları, zimbaların strok mesafeleri ve yönleri programda tanımlanmıştır. Sonlu elemanlar tabanlı program, DEFORM-3D, yardımı ile boru profili yaklaşık 60.000 katı eleman kullanılarak mesh edilmiş olup dolayısı ile Şekil 3.4’te görüldüğü gibi sonlu elemanlar modeli oluşturulmuştur.



Şekil 3.4: Boru profilinin sonlu elemanlar modeli

Sayısal analizin işlem safhaları sırasıyla şu şekilde gerçekleşti; Geometrisi oluşturulan zimbalar, kalıplar ve boru .STL formatında DEFORM yazılımına çağrıldı ve ekipmanların pozisyonları düzenlendi, eleman boyutları 2.8 ve 3.1 mm arasında yaklaşık 60.000 katı elemanla meshleme yapıldı, zimbaların hareket yönleri ve strok

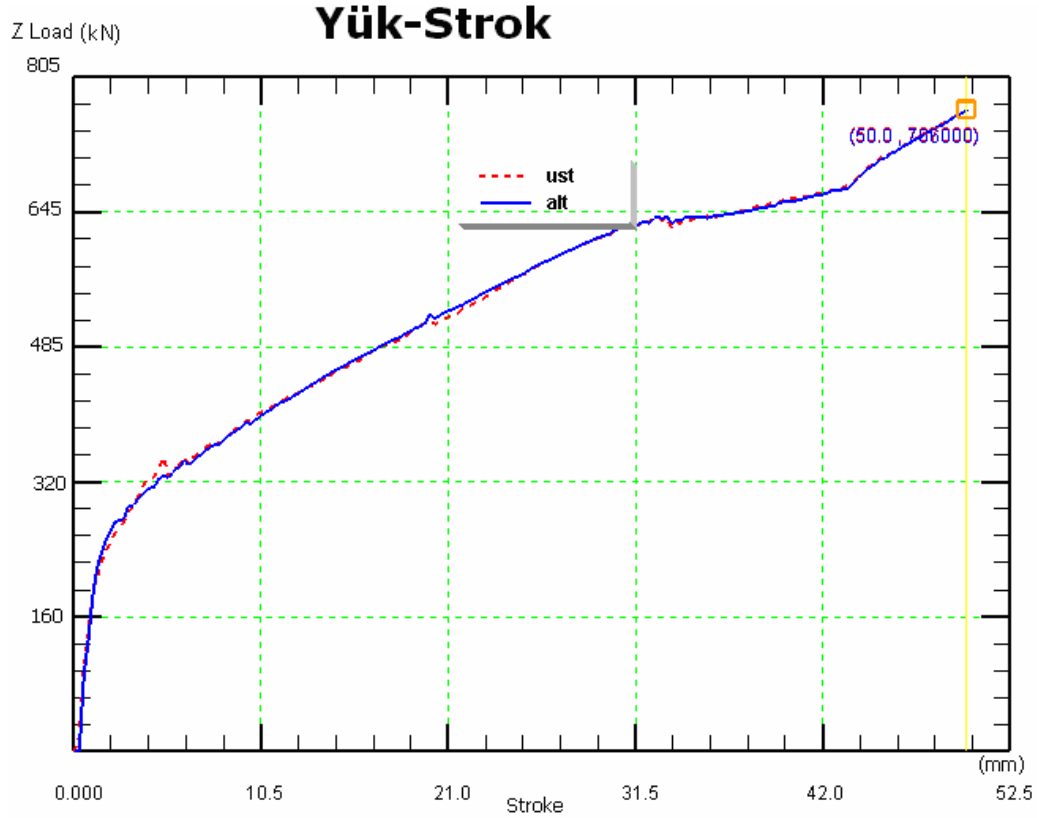
mesafeleri, temas tolerans değeri 10^{-4} , sürtünme değeri 0.08 olarak tanımlandı, işlem süreci 10 ar adımlar halinde 200 adımdan olması belirlendi, malzeme olarak standart AISI 304 seçildi, zımba strok mesafeleri, zımba hızı ve boru sınır şartları tanımlandı.

Eğer deneysel koşullar elde edilirse aşağıdaki adımlar takip edilebilir; kılık kıyafet ve ekipmanla ilgili güvenlik tedbirleri tekrar gözden geçirilmelidir, hydroforming pres kontrolü ve bilgisayar data toplama programı başlatılmalıdır, maksimum basınç için kontrol panelinden gereken ayarlama yapılmalıdır, yine aynı şekilde zımbaların strok mesafeleri de ayarlanmalıdır, boru profili kalıp içine yerleştirilmeli, kalıbın yağlı olmasına ve boru dikişli ise dikişin iki kalıp kapanma çizgisine paralel olduğuna dikkat edilmelidir, kalıplar kapatılır, zımbalar parçayı eksenel yönde kenetler ve parça üzerine hidrolik basınç uygulanır. Alt ve üst kalıp Şekil 3.5'te görülmektedir. Pompa kapatılır. Kalıplar açılır, parça çıkartılır ve üzeri etiketlenir, bu adımlar tekrar edilir ve her defasında boru dikiş çizgisi farklı pozisyonlarda yerleştirilir, her deneyin sonuçları yazılır, eksenel beslemenin farklı kombinasyonları denenir, sonuçlara göre eksenel besleme ve basınç grafikleri çizilip güvenli bölge ve hata bölge çizelgesi elde edilir.



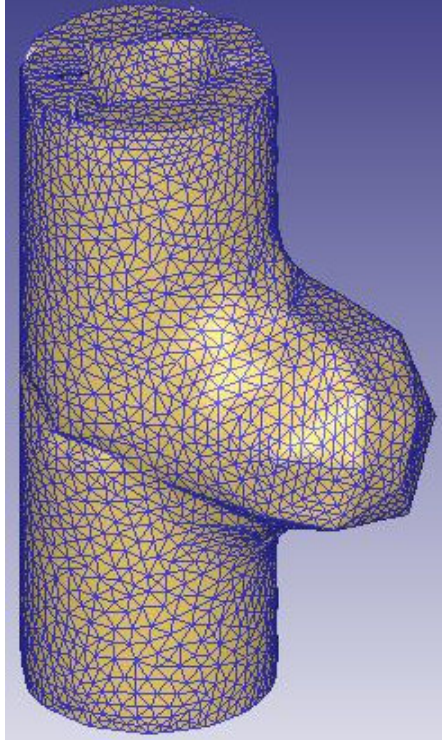
Şekil 3.5: Alt ve üst kalıp geometrileri

Şekillendirme işlemi için, karşılıklı aksenal silindirler sabit hızlı olup, hızı 250 mm/sn' dir. Yükleme eğrileri Şekil 3.6'te görüldüğü gibi, simetrik karşılıklı bir yükleme tercih edilmiştir. Toplam yükleme 800 kN'a ulaşmıştır. Simülasyon tamamen oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir.

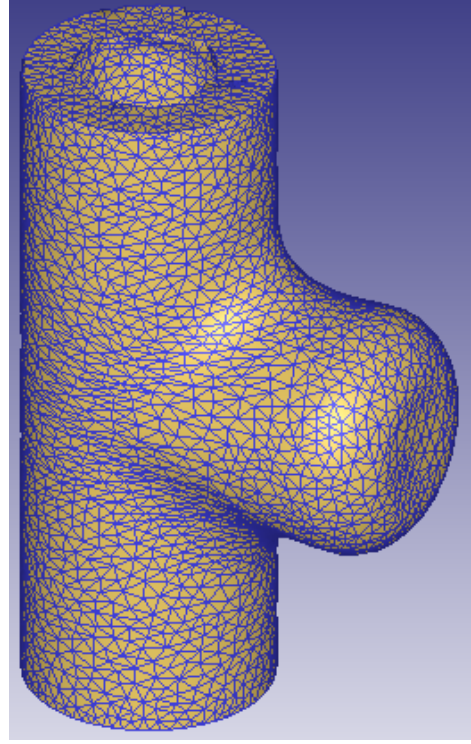


Şekil 3.6: Strok mesafelerinde zımbaların yükleme miktarı.

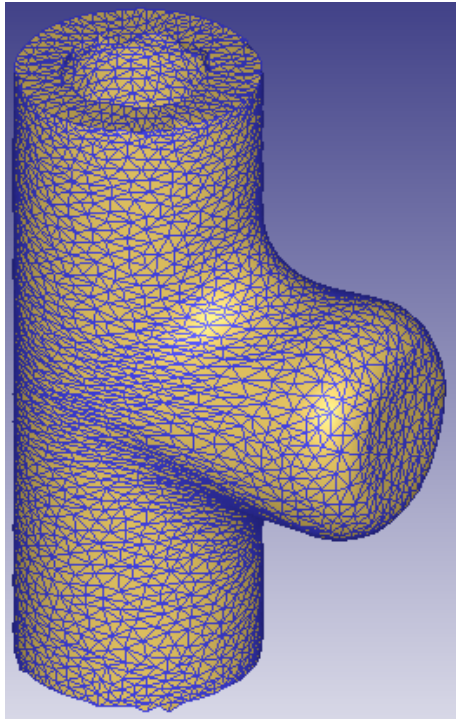
Bilgisayar simülasyonunda doğrusal olmayan problemlerin sayısal çözümü için Direkt İterasyon Metodu kullanılmıştır. Zımba strokları karşılıklı olarak 40 mm kararlaştırılmıştır. Şekillendirme içerisinde kullanılan sıvı akışkana, şekillendirme işlemi için boru içerisinde 7 farklı basınçta (P) uygulanmıştır. Boru içinde kullanılan hidrolik sıvısının uyguladığı iç basınç (P) 7 farklı değerlerde, P=40, 60, 80, 100, 120, 140 ve 200 Mpa, maksimum basınçta ayrı ayrı şekillendirme denemeleri yapılmıştır. Bu denemeler sonucu elde edilen simülasyon sonuçları Şekil 3.7'de görülmektedir.



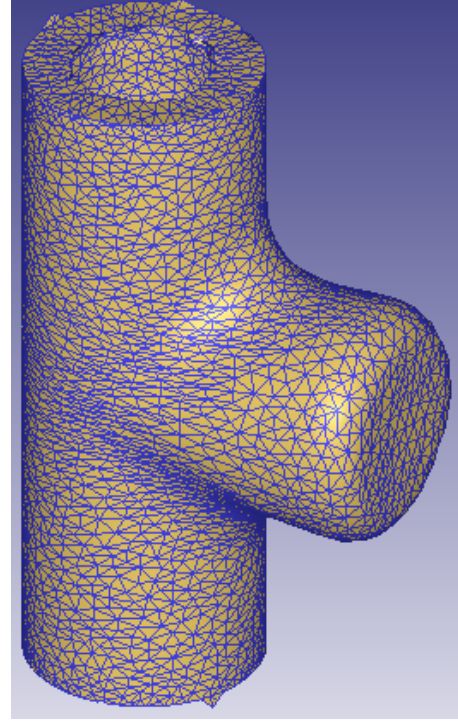
(a) 40 Mpa



(b) 60 Mpa

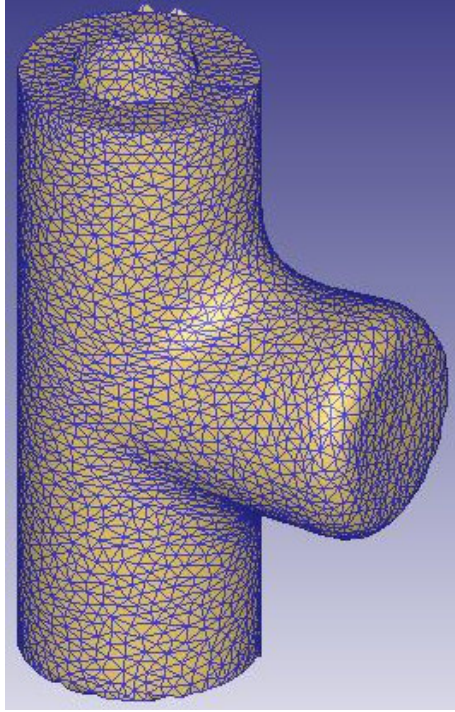


(c) 80 Mpa

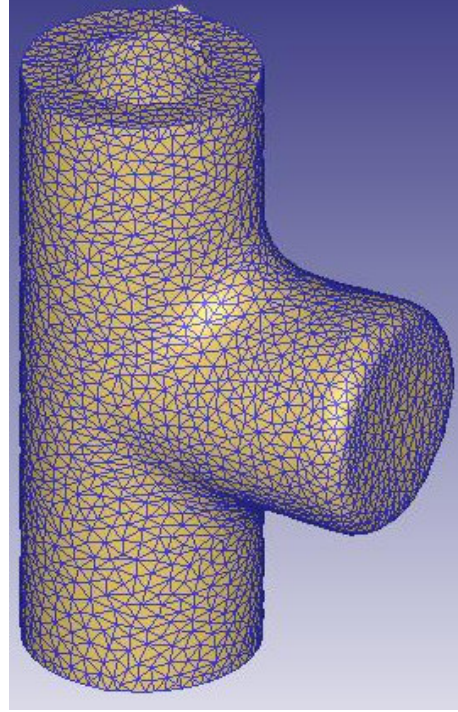


(d) 100 Mpa

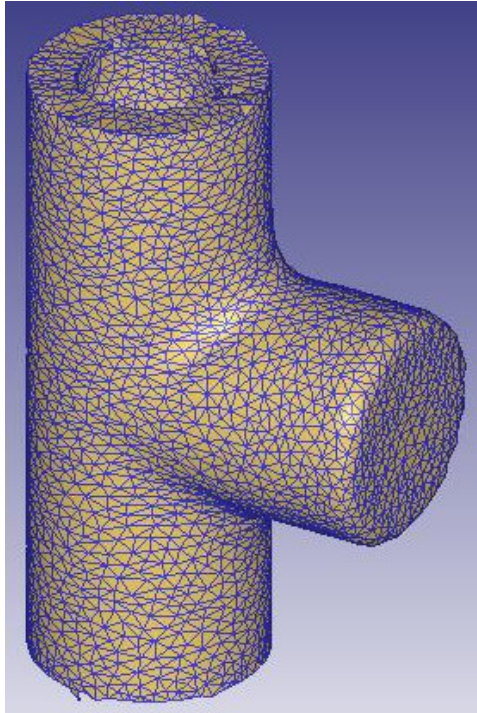
Şekil 3.7: Farklı basınçlarda elde edilen "T" profilleri



(c) 120 Mpa



(d) 140 Mpa

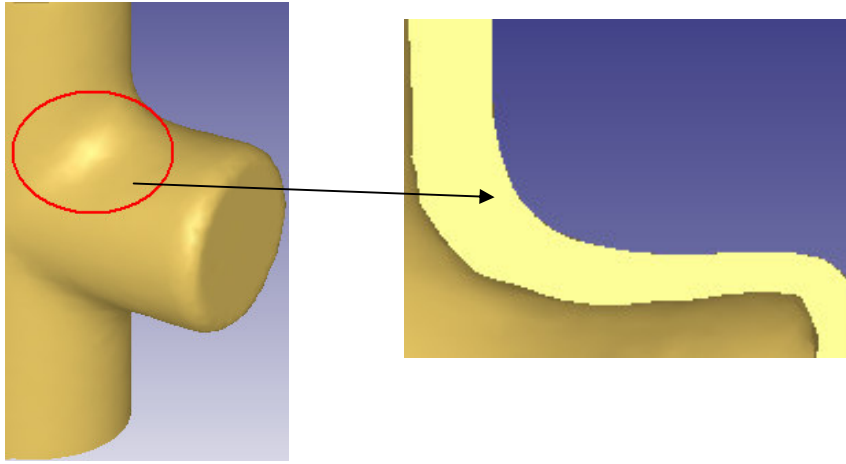


(e) 200 Mpa

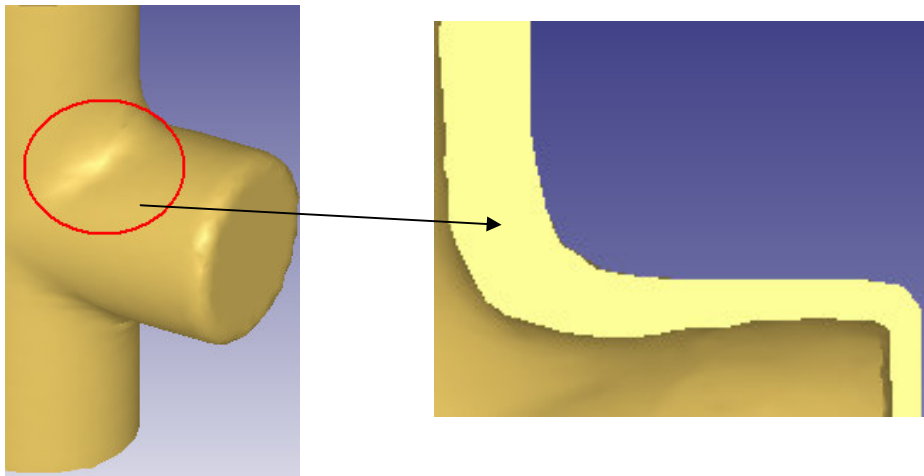
Şekil 3.7: Farklı basınçlarda elde edilen “T” profilleri (devamı)

Yukarıdaki şekillerde analiz sonucunda oluşan T profillerde görüldüğü gibi, 40 Mpa basınçta T elemanın buruşma hatası gösterdiği gözlenmiştir. Bu aksel kuvvetlerin yüklenmesi ve iç basıncın yetersiz kalması sonucu oluşmuş bir arızadır.

Şekil 3.8 (a) ve (b)' ele alındığında 200 Mpa basınçta yapılan parçada yüksek basınçla birlikte aksel kuvvetin verilmesi ve parçanın karşılık zımbası yönüne akışının azalmasından kaynaklanan sebeple yerel çökmenin olduğu tespit edilmiştir.



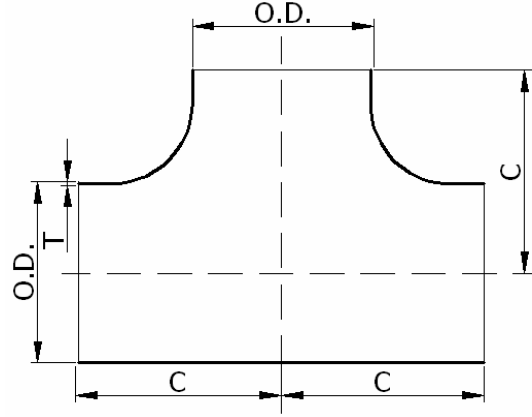
(a) 140 Mpa



(b) 200 Mpa

Şekil 3.8: 140 ve 200 Mpa basınçta görünen çökmenin karşılaştırılması

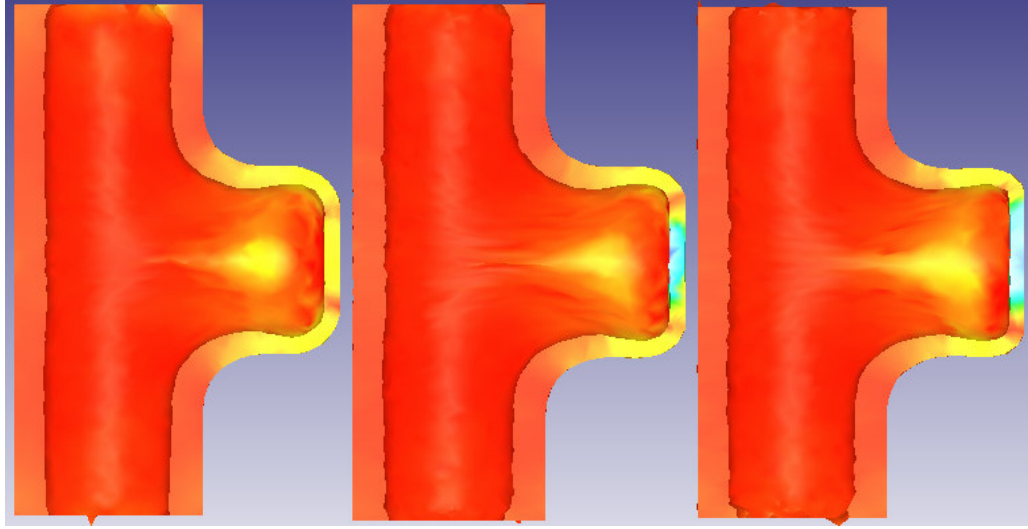
Bu deneyleri incelenirken 40 Mpa da yapılan deney hariç tutulmuş ve diğer deneyler üzerinde çalışılmıştır. İçlerinde en ideal T bağlantı elemanı profilini belirlemek için; T analizinde aksenal kuvvet ve basınç dengesizliğinden kaynaklanan buruşma, geriye katlanma ve çatlama gibi işlem arızaları olmaması, T bağlantı elemanında homojen kalınlık veya homojene yakın et kalınlığı takip edilmesi, en az basınçla en ideal işlemin gerçekleştirilmesi kıstasları takip edilmiştir. Bu nedenle Şekil 3.9 'da standart T bağlantı elemanı ölçüleri çıkarılmış ve bu ölçülere göre diğer deneyler yorumlanmıştır.



N.P:S	O.D.		C		T	AĞIRLIK
	inch	mm	inch	mm	mm	kg
1/2"	0.84	21.34	1	25	2.11	0.1
					2.77	0.1
3/4"	1.05	26.67	1 1/8	29	2.11	0.1
					2.87	0.2
1"	1.315	33.4	1 1/2	38	2.77	0.3
					3.38	0.3
1 1/4"	1.66	42.16	1 7/8	48	2.77	0.5
					3.56	0.6
1 1/2"	1.9	48.3	2 1/4	57	3.77	0.7
					3.68	0.9
2"	2.375	60.3	2 1/2	64	2.77	0.8
					3.91	1.2

Şekil 3.9: T boru standartları (<http://www.teknikcelik.com.tr>, 08 Mayıs 2007)

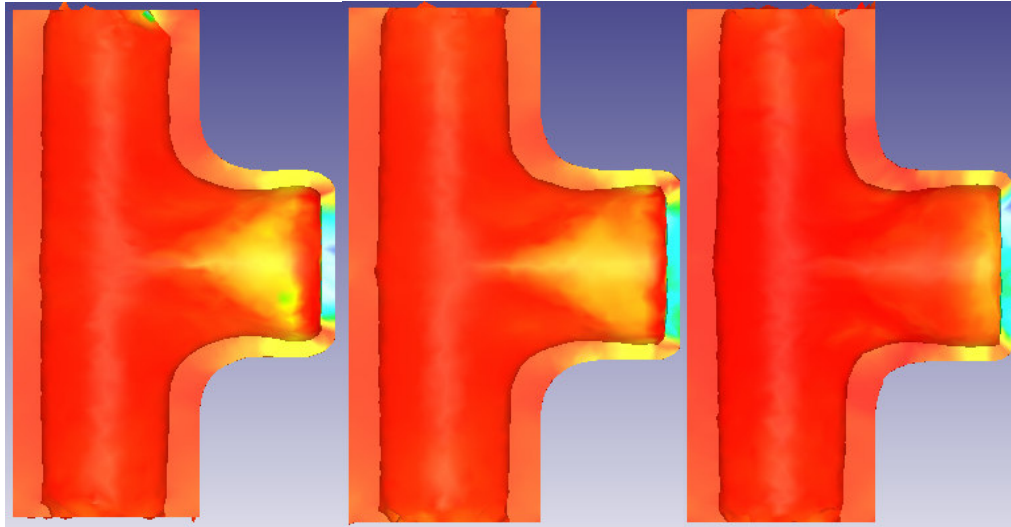
Şekil 3.10’da boruların gerilme dağılımı ve kesilmiş resimleri görülmektedir. Bu kesitlere göre et kalınlıkları ölçülmüş ve Tablo 3.3’te verilmiştir.



(a) 60 Mpa

(b) 80 Mpa

(c) 100 Mpa



(d)120 Mpa

(e) 140 Mpa

(f) 200 Mpa

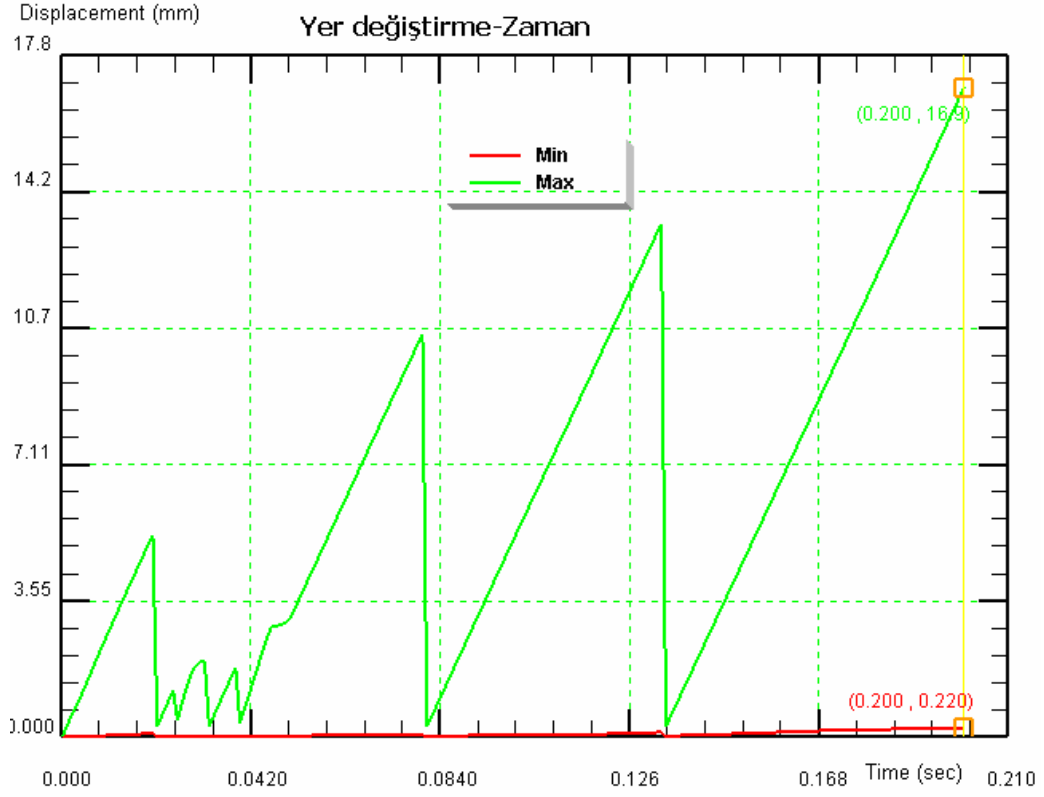
Şekil 3.10: Çeşitli basınçlarda elde edilen“T” bağlantı elemanlarının kesit görünümleri ve gerilme dağılımı

En ideal T bağlantı elemanı, en homojen et kalınlığına sahip olan elemandır. Bu nedenle Tablo 3.3'te T bağlantı elemanlarının en fazla ve en az et kalınlıkları ölçülmüş ve standartlara uygun en ideal deney tespit edilmiştir. Bütün bu noktalar nazara alındığında 60 Mpa maksimum basınçta gerçekleşen işlem diğer işlemlere nazaran daha ideal bir işlem olduğu sonucuna varılmıştır.

60 Mpa basınçla T bağlantı elemanının analizinde şu verilere ulaşılmıştır. Zamana göre malzeme akışı grafiksel olarak şekil 3.11'de görülmektedir. Bu şekle göre grafikte maksimum malzeme yer değiştirmesinin bu kadar dalgalı olması, malzeme içerisindeki hacim ve basınç değişikliğinden, sürtünmeden ve kullanılan malzemenin elastik modülünün yüksek olmasından kaynaklanabilir. 40, 160 ve 200 Mpa basınçta gerçekleşen deneylerde geometri istenmeyen deformasyona uğradığı için Tablo 3.3'te yer almamıştır.

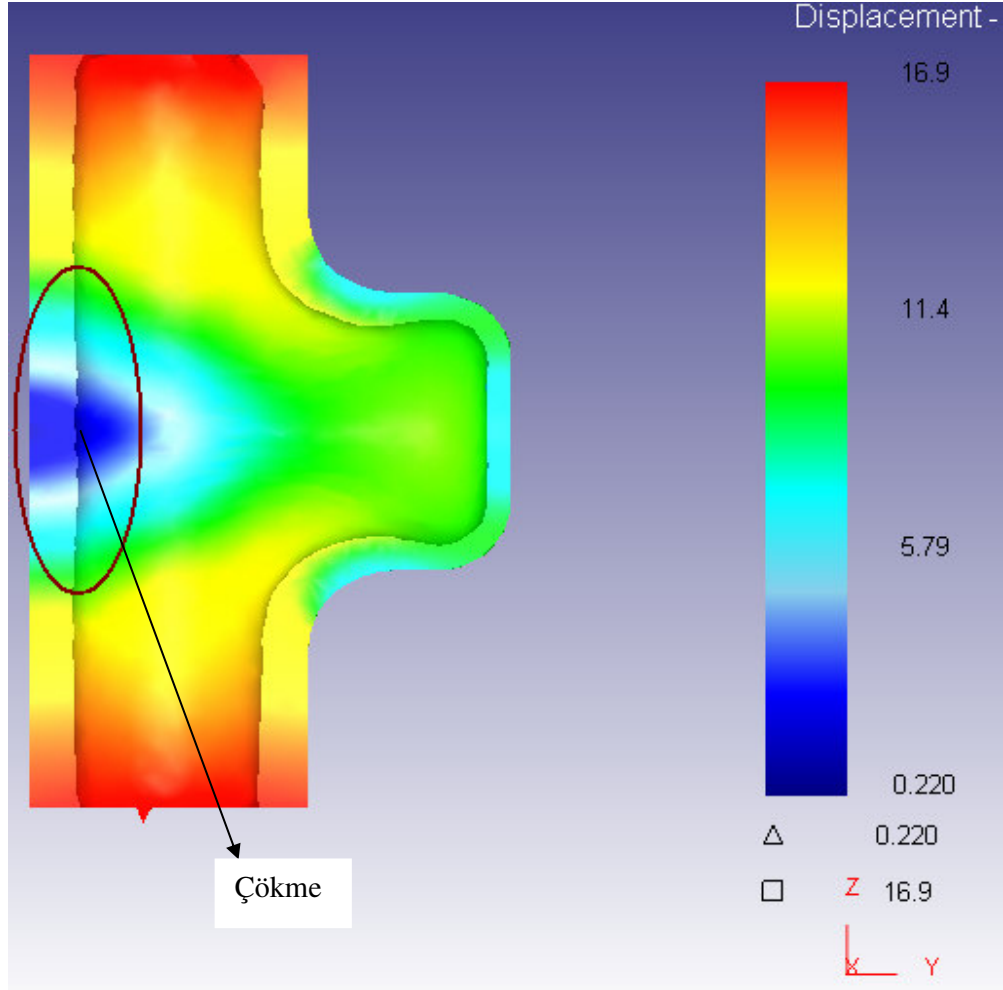
Tablo 3.3: Farklı basınçlarda maksimum ve minimum et kalınlıkları

	60 Mpa	80 Mpa	100 Mpa	120 Mpa	140 Mpa
Minimum kalınlık (mm)	2.83	2.75	2.79	2.76	2.67
Maksimum kalınlık(mm)	5.72	5.83	5.97	5.96	6.23
Et Kalınlığı Farkı(mm)	2.89	3.08	3.18	3.20	3.56



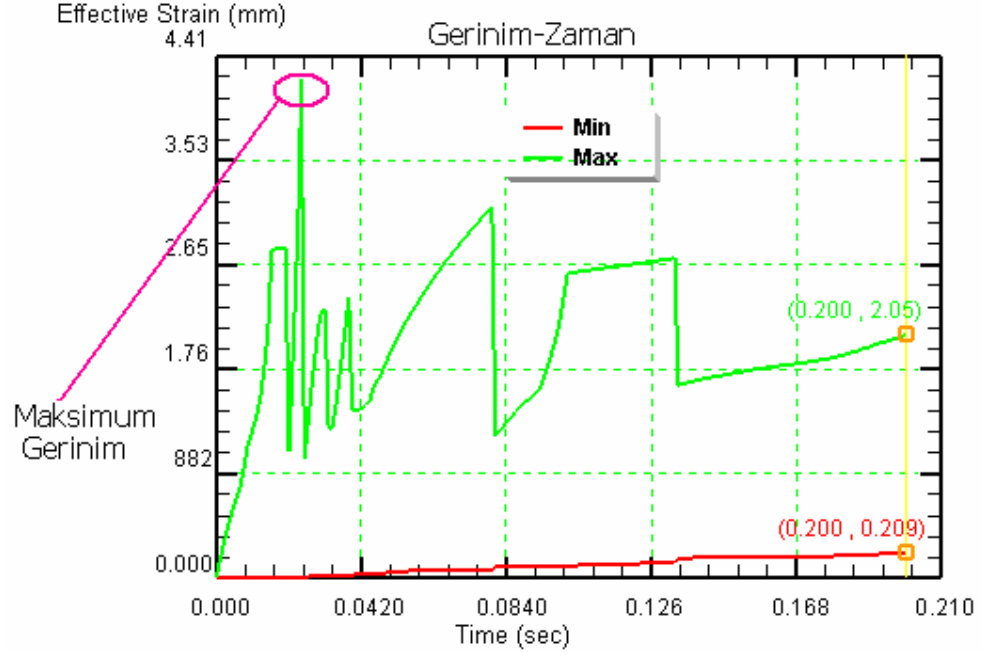
şekil 3.11: 60 Mpa basınçta yerdeğiştirme- zaman grafiği

şekil 3.12'de T bağlantının arka yönünde malzeme akışı azalmakta yada olmamaktadır. Bu probleme hem sayısal hemde deneysel sonuçlarda rastlanmaktadır. Bu problem tolerans değerlerinin dışında ise boru içerisine ikinci bir işlem uygulanabilir. şekil 3.12'de işaretlenen bölgede yer değiştirmenin olamadığı bölgede yerel bir çökme de oluşmaktadır. hydroforming işlemleri için olağan sayılabilir.



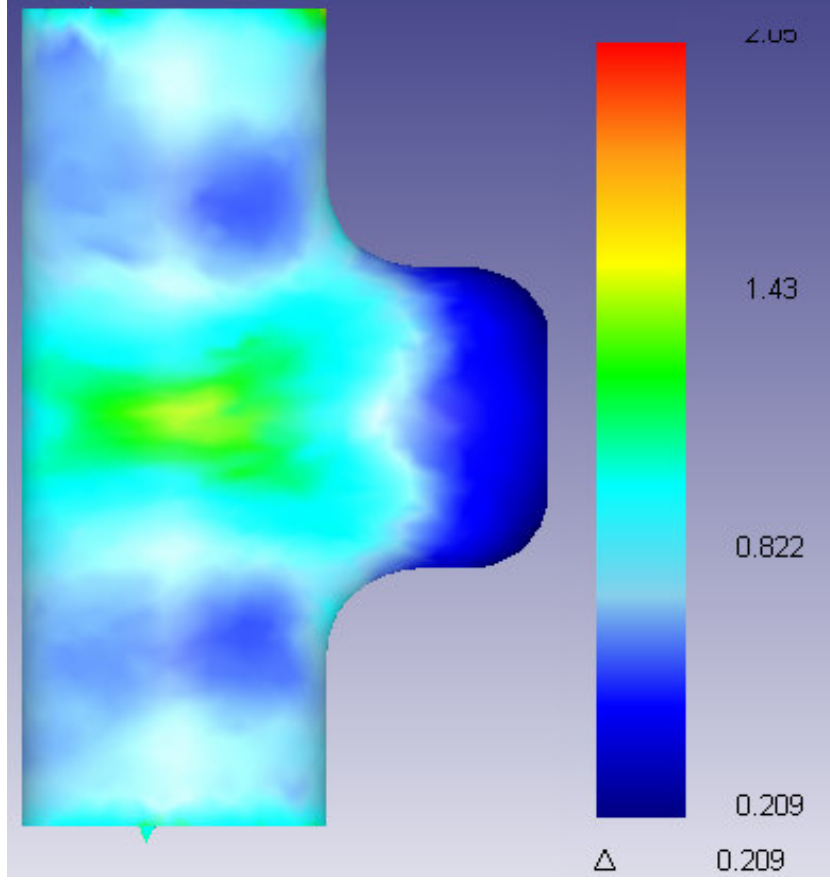
Şekil 3.12: 60 Mpa basınçta yer değıştirme miktarı dağılımı

Şekil 3.13'de gerinim-zaman diyagramında görülen maksimum gerinim noktası malzemenin kalıp boşluğunu doldurmaya başladığı ve plastik deformasyona maruz kaldığı zamanda gerçekleşmiştir. Maksimum gerinim noktası kırılma noktası sayılabilir. Bu değerdan sonra malzeme plastik deformasyona adapte olmuştur.



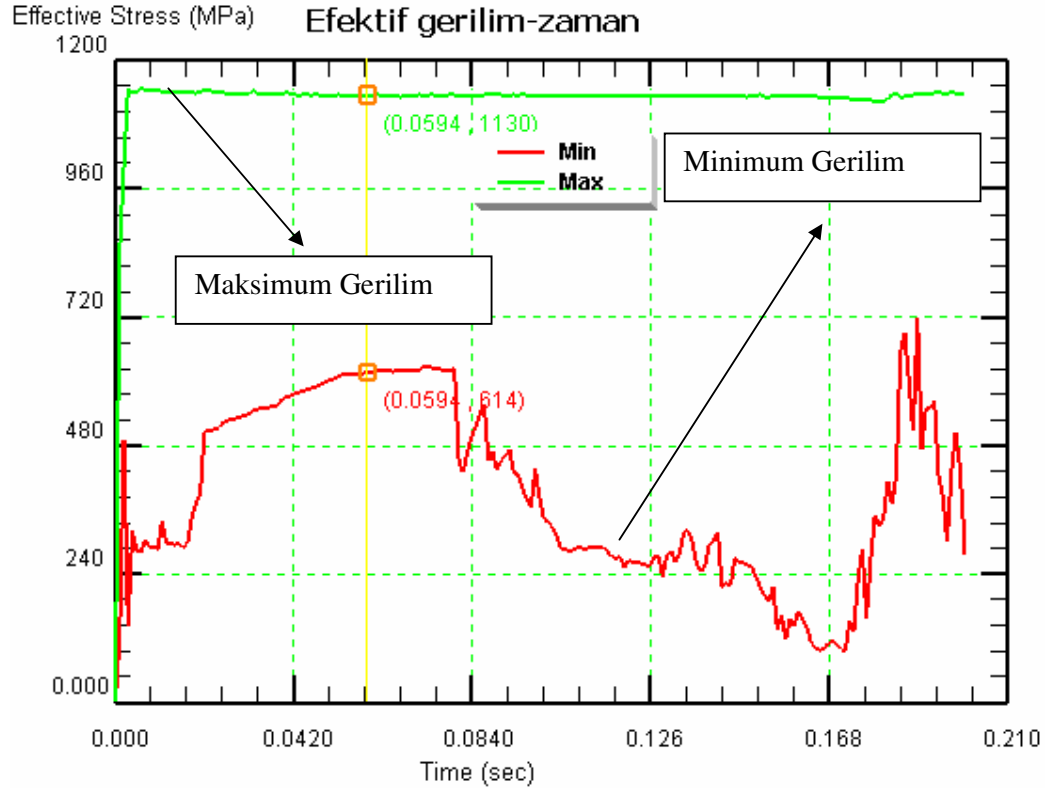
Şekil 3.13: 60 Mpa basınçta Gerininim-Zaman ilişkisi

Şekil 3.14'te T bağlantıdaki gerininim dağılımı görülmektedir. Maksimum gerininim değeri 4. 40 mm'ye kadar yükselmektedir. Eksenel yönde simetrik olan bu gerininim dağılımı deformasyona uğrayan bölgelerde minimum düzeydedir.

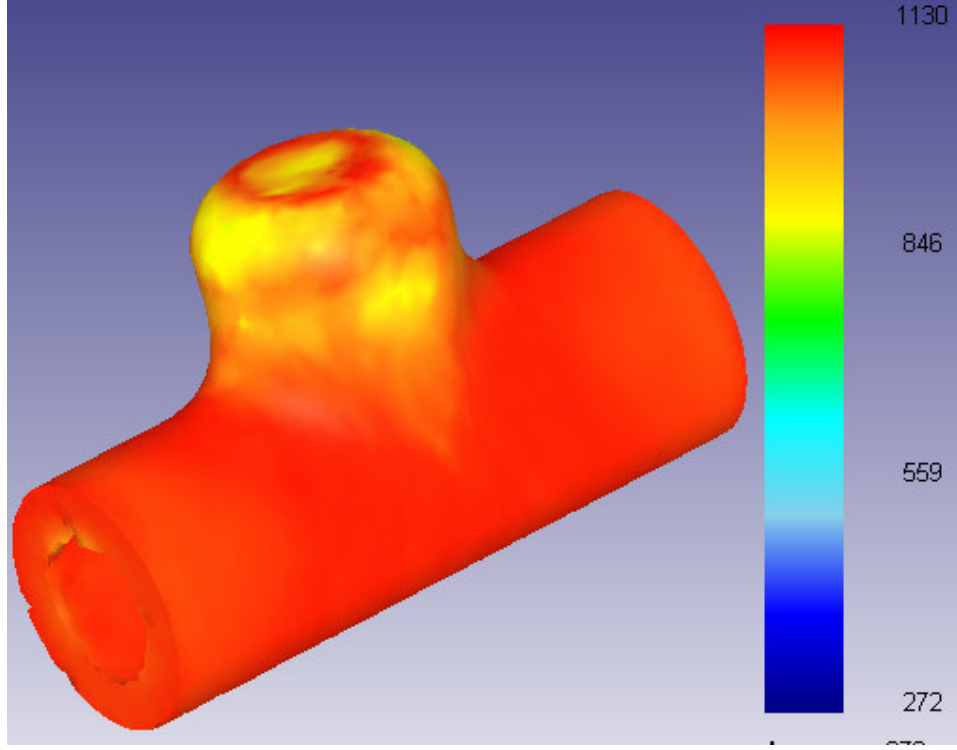


Şekil 3.14: 60 Mpa basınçta T bağlantı elemanında gerinim dağılımı

60 Mpa basınçta gerinim-zaman diyagramında maksimum ve minimum gerinim değerleri şekil 3.15'te görülmektedir. Diyagramda maksimum gerinimin doğrusal olup 1130 Mpa olduğu anlaşılmaktadır. Şekillendirmenin her adımında gerilme değerinin malzeme üzerinde yoğun etkisine rağmen dengeli sınır şartları sayesinde buruşma, kırılma veya çatlama gibi arızalarla karşılaşılmamıştır. Şekil 3.16'da şekillendirme sonunda T elemanın üzerindeki gerilme dağılımı görülmektedir. Bu dağılım T eksenel kesitine göre simetrik ve homojene yakınsamaktadır.



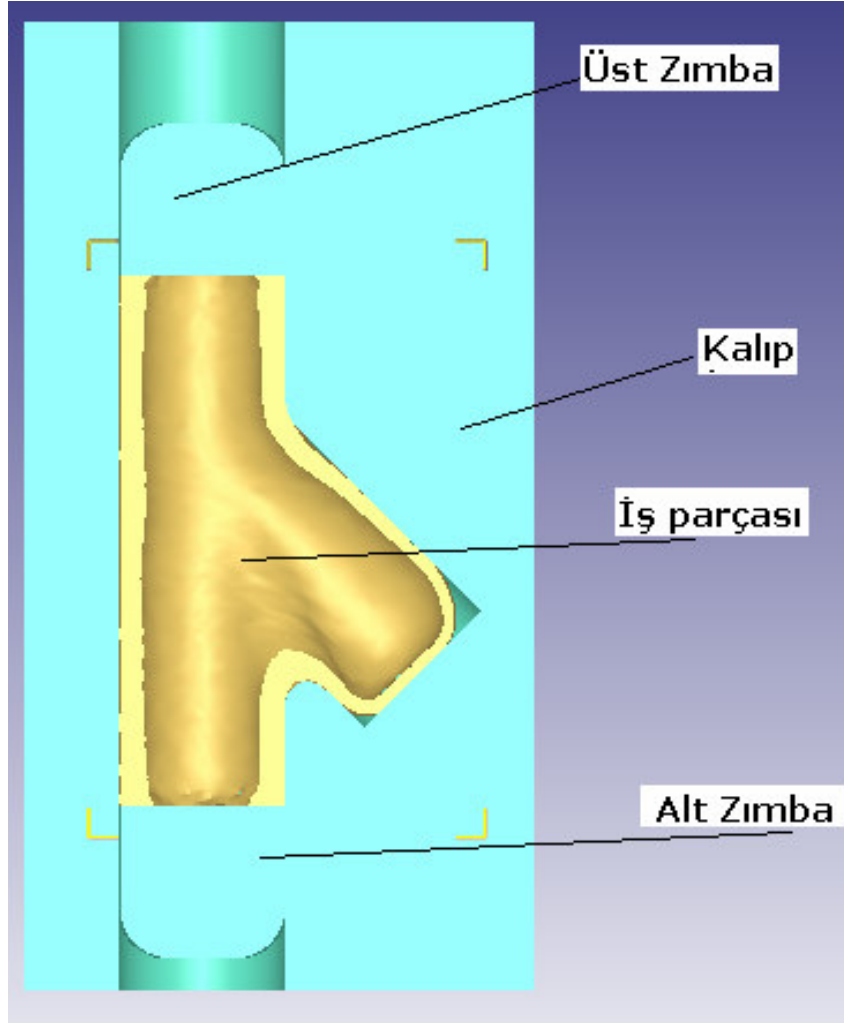
Şekil 3.15: 60 Mpa basınçta T bağlantı elemanında gerilme diyagramı



Şekil 3.16: 60 Mpa basınçta T bağlantı elemanında gerilme dağılımı

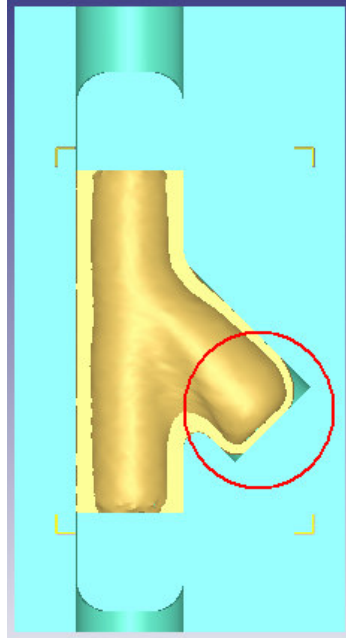
3.3.2 Standart “Y” bağlantı elemanının analiz sonuçlarının değerlendirilmesi

“Y” tesisat bağlantı elemanı aynı yazılım kullanımıyla simüle edildi. Bu simülasyonun işlem safhaları şu şekilde tanımlandı; Y kalıbın, zımbaların ve borunun geometrisi modellendi, ve modeller stl formatında DEFORM yazılımına çağrıldı ve ekipmanların pozisyonları düzenlendi. Eleman boyutları 2.8 ve 3.1 mm arasında yaklaşık 60.000 katı elemanla mesh yapıldı, zımbaların hareket yönleri ve strok mesafeleri, temas tolerans değeri 10^{-4} , sürtünme katsayısı değeri 0.08 olarak, işlem süreci 10’ar adımlar halinde 200 adımdan olması belirlendi ve paslanmaz çelik AISI 304 malzeme, zımba strok mesafeleri, zımba hızı ve boru sınır şartları, zımba hızları “T” bağlantı elemanından farklı tanımlandı; üst zımba 310 mm/sn hızla ilerlerken, alt zımba 225 mm/sn hızla aksenal yönde karşılıklı hareket ettirildi. Hydroforming işlemindeki geometriler Şekil 3.17’de parça deformasyona uğramış bir şekilde gösterilmiştir.

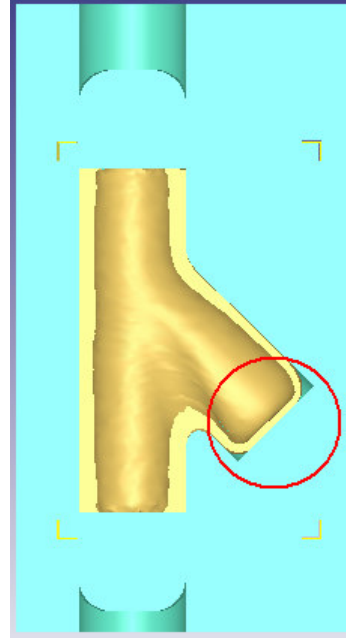


Şekil 3.17: Deformasyon sonunda kalıp, zımba ve iş parçasının yerleşimi

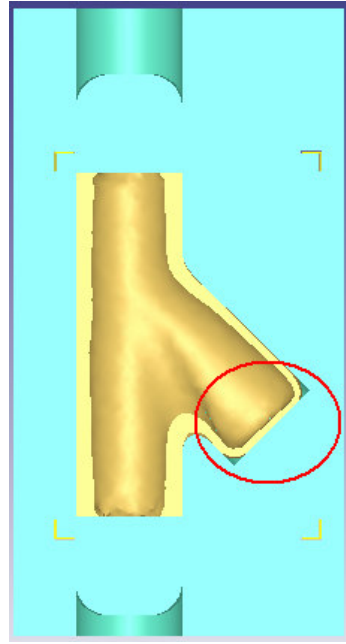
“Y” bağlantı elemanının analiz çalışmalarında 4 farklı deney yapılmıştır. Şekil 3.18’de görülen bu deneyler 170, 180, 190 ve 200 Mpa basınçlarda gerçekleştirilmiştir. Basınç değerlerine göre kalıp boşluğunun doldurulması Şekil 3.18’de gösterilmiştir. Şekil 3.19’de rijit zımbalara ait yükleme miktarları gösterilmiştir. Lineer bir yükleme tespit edilmiştir.



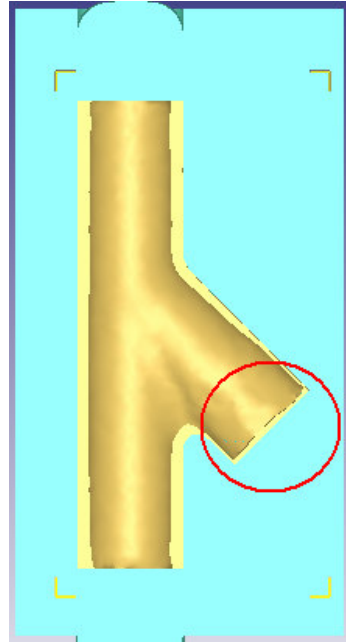
(a) 170 Mpa



(b) 180 Mpa

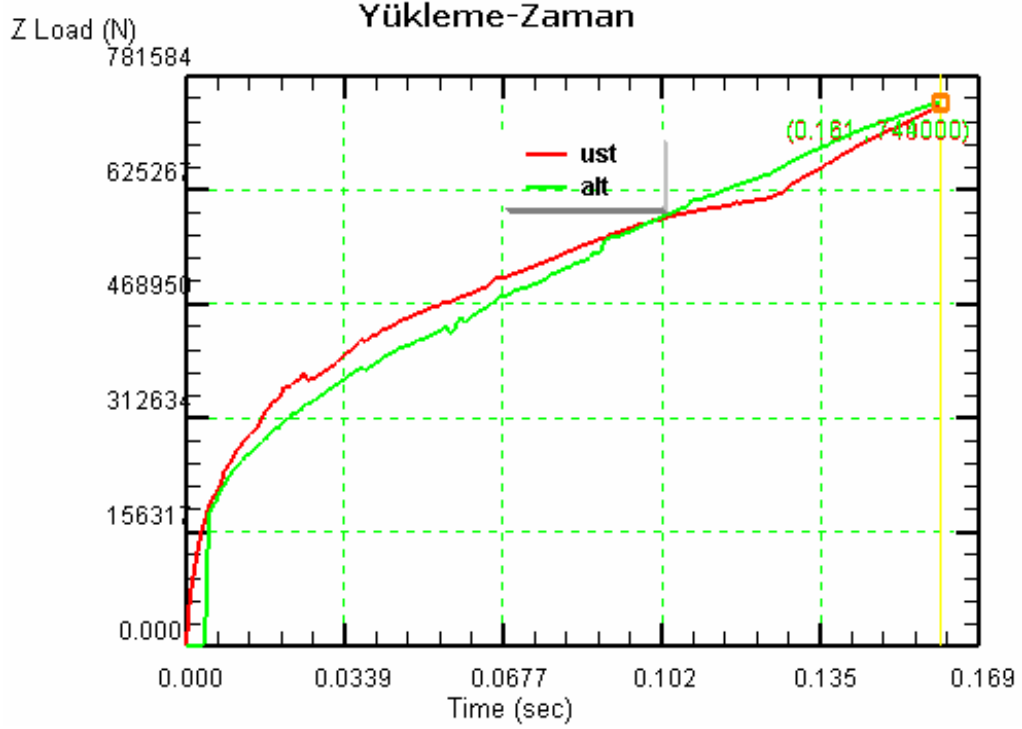


(c) 190 Mpa



(d) 200 Mpa

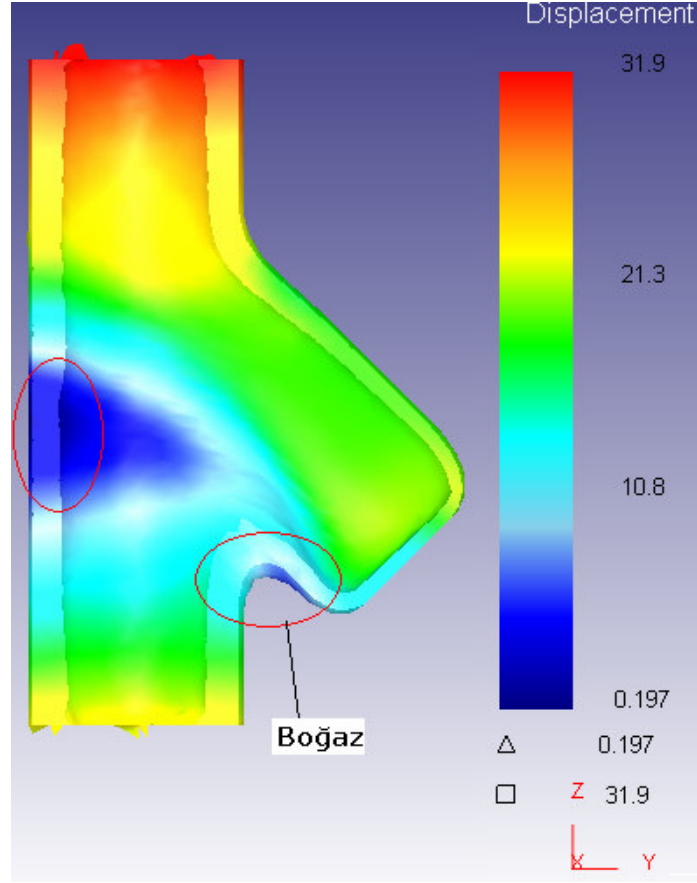
Şekil 3.18: Farklı basınçlarda Y profili şekillendirilmeleri ve ilgili kesitleri



Şekil 3.19: Rijit zımbalara uygulanan kuvvet

200 Mpa ile yapılan deneyde kalıp boşluğunun erken dolması ve analiz esnasında tekrar mesh kriterlerinin zamanı uzatması sonucu erken bitirilmiştir. 170 Mpa basınçta ise kalıp boşluğunun yeterince dolmadığı gözlenmiştir.

Ayrıca Şekil 3.20’de malzeme akışında simetrik bir akış görülmemekle birlikte “Y” profil arkasında ve Y kısmın boğazında bir durgunluk görülmektedir ki; bu durgunluk malzeme et kalınlığına olumsuz etki etmekte ve boğaz kısmında kalınlaşma meydana gelmektedir.



Şekil 3.20: Malzeme yerdeğiştirme hızı

Analiz sonucunda malzeme minimum ve maksimum et kalınlık değerleri Tablo 3.3'te çıkartılmıştır. Buna göre "T" bağlantı elemanında olduğu gibi, kalınlık farkları arasında en az fark olan 170 Mpa yapılan deney olarak tespit edilmiştir.

Tablo 3.3: Y bağlantı elemanının maksimum ve minimum kalınlık değerleri

	170 Mpa	180 Mpa	190 Mpa
Minimum kalınlık (mm)	1.76	1.52	1.48
Maksimum kalınlık(mm)	5.11	5.20	5.29
Et Kalınlığı Farkı(mm)	3.35	3.68	3.81

3.4 Sonuçlar ve neriler

Bu alışmada; Hydroforming metodu ile yapılan ‘‘T’’ ve ‘‘Y’’ tesisat bağlantı elemanlarının şekillendirme işleminin bilgisayar simülasyonu başarı ile yapılmıştır. Bunun için gerekli olan tüm işlem parametreleri, kullanılan DEFORM-3D programında tanımlatılmış olup, boru malzemesi, akışkanın karakteristikleri ve gerekli kalıplama modelleri başarılı bir şekilde bilgisayara adapte edilmiştir. İlaveten, şekillendirmede kullanılacak pres tezgahına ait işlem parametreleri de tanımlanmıştır.

‘‘T’’ bağlantı elemanının şekillendirilmesinde kullanılan bir kalıp ve iki zımba modellenerek DEFORM-3D ticari yazılıma gnderilmış ve rijit olarak tanımlanmıştır. DEFORM-3D programının kullanılmasıyla standart 1 in (25.4 mm) SAE/AISI 304 paslanmaz elik borudan ‘‘T’’ tesisat bağlantı elemanının şekillendirilme işlemi bilgisayar yardımı ile simüle edilmiş, simülasyon esnasında standart yuvarlak boru yedi farklı sabit sıvı basıncı altında şekillendirilmeye tabi tutulmuştur. Yapılan alışmalar sonucunda ‘‘T’’ bağlantı elemanındaki et kalınlıkları ölçülerek, en homojen et kalınlığında; buruşma, çatlama, flambaj ve geriye katlanma nevinden arızalara maruz kalmamış ‘‘T’’ bağlantı elemanın, 60 Mpa basınçta gerçekleştiği tespit edilmiştir. Daha sonra bu elemana ait malzeme yer değiştirme dağılımı ve diyagramı çıkarılmış, malzemedeki maksimum yer değiştirme safhası incelenmiştir. Ayrıca zamana bağlı olarak gerilme ve zorlanma diyagramları elde edildi. Bu diyagramlara göre malzeme davranışları tespit edildi.

İkinci bir çalışmada ‘‘Y’’ bağlantı elemanının şekillendirilmesi incelenmiştir. ‘‘T’’ bağlantı elemanı ile yapılan işlemler benzer şekilde ‘‘Y’’ bağlantı elemanı için de uygulanmıştır. ‘‘Y’’ bağlantı elemanı için bir kalıp ve 2 zımba modellenerek DEFORM-3D programına aktarılmış, ve bunlar rijit malzeme olarak tanımlanmıştır. Boru malzemesi olarak yine AISI 304 paslanmaz elik kullanılmıştır. ‘‘T’’ bağlantı elemanından farklı olarak karşılıklı zımbaların hareket edecekleri kurs boyu VE hızları farklı değerlerde uygulanmıştır. Ayrıca simülasyon süresi ‘‘T’’ bağlantıya göre biraz kısalımmıştır. ‘‘Y’’ bağlantı elemanı için yapılan bilgisayar simülasyonunda 4

farklı basınç uygulanmış, bu denemelerin sonucunda farklı basınçlarda malzemelerin kalıp boşluğunu doldurma davranışları elde edilmiş, arıza olmayan ve maksimum-minimum et kalınlığı değerleri arasında en az fark olan 170 Mpa basınçta gerçekleştirilen deney olduğu tespit edilmiştir.

Yapılan bilgisayar simülasyonu sonucunda, yuvarlak standart borudan elde edilecek “T” ve “Y” elemanın üretilebilmesi için gerekli olan optimal işlem parametrelerinin belirlenmesi daha kolay olacağı anlaşılmaktadır. Bunun en önemli özelliği ve katkısı ise üretim zamanının ve maliyetinin düşürülmesi konusunda üretime katkıda bulunmasıdır.

Bu çalışmada yapılan teorik çalışmaların sonuçlarının gerçekleştirilebilmesi için, bir hydroforming prototip tezgahı imal edilerek hydroforming şekillendirme yapılmalıdır. Özellikle bu çalışmada belirtilen farklı basınç değerleri ve seçilen parametrik değerlerle birlikte bir prototip çalışması yapılabilir. Standart boru malzemesi, geometrik parametreler ve hydroforming tezgahı ile ilgili akışkan ve şekillendirme işlemi için seçilen işlem parametreleri seçilerek hızlı prototip çalışması yapılacaktır.

KAYNAKLAR

Boudeau, N., Gelin, J.C., “Post-processing of finite element results and prediction of the localized necking in sheet metal forming”, *Journal of Materials Processing Technology*, 60(1-4):325-330, (1996)

Brunet, M., Boumaiza, S., Nefussi, G., “Unified failure analysis for tubular hydroforming”, *Journal of Materials Processing Technology*, 149 (2004) 217–225, 2004

Boudeau, N., Lejeune, A., Gelin, J.C., “Influence of material and process parameters on the development of necking and bursting in flange and tube hydroforming” *Journal of Materials Processing Technology*, 125-126: 849-855, (2002)

Cao, H.-L. “Numerical simulation of multi-operation sheet forming processes” *Journal of Materials Processing Technology*, 45(1-4): 237-241., (1994)

Chung, WJ., Cho, J.W., Belytschko, T., “On the dynamic effects of explicit FEM in sheet metal forming analysis”, *Engineering Computations*, (Swansea, Wales), 15(6-7): 750-770, (1998)

Crossland, B., Jorgensen, S.M., Bones, J.A., “The strength of thick-walled Cylinders” *Journal of Engineering for Industry*, 96-114, (May, 1959)

Çelikayar, G., “Yüksek basınç altında metallerin şekillendirilmesi (Hydroforming)”, *III. Ulusal Hidrolik Pnömatik Kongresi Ve Sergisi*, (2002)

Davis, E.A., “Yield and fracture of medium-carbon steel under combined stress” *Journal of Applied Mechanics*, A-13 - A-24, (March, 1945)

Faupel, J.H., “Yield and bursting characteristics of heavy-walled cylinders” *Transactions of die ASME*, 1031-1064, (July, 1956).

Fuckizawa, S., “Influence of Strain-Hardening Exponent on the Deformation of Thin-Walled Tube of Finite Length Subjected to Hydrostatic Internal Pressure” *Advanced Technology of Plasticity*, Vol. 1, Tokyo, Japan, (1984)

Fuckizawa, S., “Influence of Plastic Anisotropy on Deformation of Thin-Walled Tubes in Bulge Forming” *Advanced Technology of Plasticity*, Vol. 2, Stuttgart, FP-G, 24- 28 Aug. 1987, (1987)

Grey, J.E., Devereaux, A.P., Parker, W.N., “Apparatus for making wrought metal Ts.” *US Patent 2203868*, (1939)

Hsu, T.C., Hsieh, S.J., "Theoretical and experimental Analysis of failure for the hemisphere punch hydroforming processes" *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Transactions of the ASME, 118(3): 434-438, (1996)

Kim, J., Lei, P., Hwang, S.M., "Manufacture of an automobile lower arm by hydroforming" *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 42(1): 69-78. (2002).

Imaninejad, M., Subhash, G., Loukus, A., "Loading path optimization of tube hydroforming process", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 45 (2005) 1504–1514, (2005)

Koc, M. and Altan, T., "Overall review of the tube hydroforming (THF) technology" *Journal of Materials Processing Technology*, 108(3): 384-393, (2000)

Koc, M. Altan, T., "Application of two dimensional (2D) FEA for the tube hydroforming process" *International journal of Machine Tools and Manufacture*, 42(11): 1285-1295, (2002)

Kutt, L.M., Pifko, A.B., Nardiello, J.A., "Slow-dynamic finite element simulation of manufacturing processes" *Computers & Structures*, 66(1): 1-17, (1998)

Lee, M.-Y., Sohn, S.-M., Kang, C.-Y., Study on the hydroforming process for Automobile radiator support members, *Journal of Materials Processing Technology*, 130-131: 115-120, (2002)

Lundqvist, J., "Numerical simulation of tube hydroforming" Licentiate Thesis, *Lulea University of technology, department of civil and Environment Engineering, Division of Structural Mechanics*, (2004)

Neutz, J., Ebeling, H., Hill, W., "Gas generators for deep drawing applications" *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 27(3): 173-178, (2002)

Novotny, S., Geiger, M., "Process design for hydroforming of lightweight metal sheets at elevated temperatures", *Journal of Materials Processing Technology*, 138(1-3): 594-599, (2003)

Onate, E., Agelec de Saracibar, C., "Finite element analysis of sheet metal forming problems using a selective viscous bending-membrane formulation", *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Third International Conference on Numerical Methods in Forming Processes - NUMIFORM 89, Jun 1989 30(8): 1577-1593, (1990)

Sheng, S., Tonghai, W., "Research into the bulge forming of a tube under axial-radial compound forces and its application", *Journal of Materials Processing Technology*, 51(1-4): 346-357, (1995)

Shirizly, A., Yossifon, S., Tirosh, J., “The role of die curvature in the performance of deep drawing (hydro-mechanical) processes”, *International Journal of Mechanical Sciences*, 36(2): 121-135, (1994)

Smith, L.M., Ganeshmurthy, S., Alladi, K., “Double-sided high-pressure tubular hydroforming”, *Journal of Materials Processing Technology*, 142(3): 599-608. Sokolowski, (2000)

Sosnowski, W., Onate, E., Agelet de Saracibar, C., “Comparative study on sheet metal forming processes by numerical modelling and experiment” *Journal of Materials Processing Technology*, 34(1-4): 109-116, (1992)

Storakers, B., “Bifurcation and instability modes in thick-walled rigid-plastic cylinders under pressure”, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, (19(6):339-351, (1971)

Strano, M., Jirathearanat, S., Shr, S., “Virtual process development in tube hydroforming” *Journal of Materials Processing Technology*, 146(1): 130-136, (2004)

Thiruvarudchelvan, S., Travis, F.W., “An exploration of the hydraulic-pressure assisted redrawing of cups”, *Journal of Materials Processing Technology*, 72(1): 117-123, (2003)

Thiruvarudchelvan, S., Wang, H.B., Seet, G., “Hydraulic pressure enhancement of via deep-drawing process to yield deeper cups” *Journal of Materials Processing Technology*, 82(1-3): 156-164, (1997)

Tirosh, J., Neuberger, A., Shirizly, A., “On tube expansion by internal fluid pressure with additional compressive stress” *International Journal of Mechanical Sciences*, 38(8-9): 839-851, (1996)

Tvergaard, V., “Bifurcation in elastic-plastic tubes under internal pressure”, *European Journal of Mechanics*, A/Solids 9(1):21-35, (1990)

Vollertsen, F., Plancak, M., “On possibilities for the determination of the coefficient of friction in hydroforming of tubes”, *Journal of Materials Processing Technology*, 125-126 (2002): 412-420, (2002)

Wang, N.M., Budiansky, B., “Analysis of sheet metal stamping by a finite element method” *Journal of Applied Mechanics*, Transactions ASME 45\1J: 73-82. (1998)

Woo, D.M., “On the complete solution of the deep-drawing problem. International” *Journal of Mechanical Sciences*, 10(2): 83-94, (1968)

Xing, H.L., Makinouchi, A., “Failure analysis of tubular hydroforming”, *Journal of Engineering Materials and Technology*, Transactions of the ASME 123(4):423-429, (2001)

Kırlı, O., Derin Çekme ile Soğuk Şekillendirmenin Sonlu Elemanlar Metodu Yardımıyla Non-lineer Analizi, *Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü*, İzmir, (2003)

Zhang, S.H., Danckert, J., Nielsen, K.B., “Integral hydro-bulge forming of pressure vessel heads” *Journal of Materials Processing Technology*, 86(1-3): 184-189, (1999)

Zhang, S.H., Nielsen, K.B., Danckert, J., “Numerical simulation of the integral hydro-bulge forming of non-clearance double-layer spherical vessel: analysis of the stress state” *Journal of Materials Processing Technology*, 75(1-3): 212-221, (1996).

<http://www.teknikcelik.com.tr>, (Ziyaret tarihi: 08 Mayıs 2007)

<http://www.sergenc.com>, (Ziyaret tarihi: 08 Mayıs 2007)

ÖZGEÇMİŞ

1977 Yılında Eskişehir'in Mihalıççık ilçesine bağlı Gökçeayva köyünde doğdu. İlk ve orta öğrenimini Beylikova ilçesinde, lise öğrenimini Bursa Tophane Endüstri Meslek Lisesi, Makine Bölümünde tamamladı. 1995 yılında başladığı, Kocaeli Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Makine Eğitimi Bölümünü, hazırlık sınıfı da okuyarak 2000 yılında bitirdi. Aynı yıl Kocaeli Endüstri Meslek Lisesinde Öğretmenlik hayatına başladı ve halen Köseköy Endüstri Meslek Lisesi, Motorlu Araçlar Teknolojisi Alanında öğretmenlik mesleğine devam etmekte olup, evli ve bir çocuk babasıdır.