

## **HİDROLİK BASINÇLI AKIŞKAN(HİDROFORMİNG) İLE TESİSAT BAĞLANTI ELEMANLARININ ŞEKİLLENDİRİLMESİ**

**Mesut ÖZER<sup>1</sup> ve Yasin KİŞİOĞLU<sup>2</sup>**

Makine Eğitimi Bölümü, Kocaeli Üniversitesi, Eski İstanbul Yolu 10.km.

Umuttepe Yerleşkesi, 41380, UMUTTEPE, KOCAELİ

<sup>1</sup> [ozermesut@yahoo.com](mailto:ozermesut@yahoo.com), ve <sup>2</sup> [ykisioglu@kou.edu.tr](mailto:ykisioglu@kou.edu.tr)

### **Özet**

Bu çalışmada, modern imalat metotlarından biri olan hidrolik basınçlı akışkan gücü (Hidroforming) kullanılarak yapılan metal şekillendirme işlemi, bilgisayarda simüle edilmiştir. Bilgisayar simülasyonu için DEFORM-3D bilgisayar paket programı kullanılmıştır. Hidroforming tekniğiyle, standart boru profillerden istenilen şekilde kompleks makine elamanları şekillendirilerek imal edilebilirliği simüle edilmiştir. Bilgisayar programında, malzemesi SAE/AISI 1060 olan iki ucu açık yuvarlak profilli boru kullanılarak dikışsiz "T" bağlantı elemanının şekillendirilmesi simüle edilmiştir. Bunun için, boru ve kalıp malzemelerinin katı modelleri, malzeme özellikleri, sınır, kontak yüzey ve sürtünme şartları, zımbaların strok mesafeleri ve yönleri, ve hidrolik sıvı basıncının karakteristikleri bilgisayarda tanımlanmıştır. Sonlu elemanlar tekniği ile simülasyon sonucunda elde edilen parçanın; gerilme, zorlanma, ve deformasyon dağılımları, her bölge için malzemenin kalıp boşluğuna akış hızı, ve "T"nin et kalınlığı değişimi analiz edilmiştir Hidroforming metodu yardımıyla dikışsiz T bağlantı elemanlarının özel amaçlı pres tezgahlarında imal edilebilirliği için simülasyondan optimal tasarım parametreleri elde edilmiştir.

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

### **Abstract**

In this study, computer aided metal forming process is simulated using one of the most important modern manufacturing processes, the tube hydroforming process. For the computer simulation, a computer code, DEFORM-3D, is employed. Using tube hydroforming technique, the manufacturability of complex machine elements 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 TEE is carried out from the standard circular tube made out of SAE/AISI 1060. 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-strain and deformation diagrams for each region, material flow velocity through die cavity, and change in the thickness of the formed straight TEE are obtained and analyzed using the computer simulations along with the well known technique, Finite Element Method. Furthermore, some optimal design and process parameters are obtained from the tube hidroforming process simulations in order to manufacture of the straight TEE in particular presses.

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

## 1. GİRİŞ

Günümüz endüstrisinde, ürün, montaj ve parça maliyetlerini azaltmak için yeni yeni üretim teknikleri geliştirilmektedir. Basıncı akışkan gücü ile şekillendirme (Hidroforming) işlemi de son yıllarda geliştirilen ve kullanılan metotlardan birisidir. Bu teknik, günümüzde özellikle otomotiv ve uçak endüstrisinde gövde, motor ve süspansiyon imalatında kullanılmaya başlanmıştır. Bu imalat yönteminin başarılı bir şekilde uygulanabilmesi bir çok parametreye bağlıdır. Bunlar; sürtünme, malzeme özellikleri, basınç ve pres tezgahına bağlı olan parametrelerdir. Bu işlemin kolaylıkla ve masrafsız bir şekilde geliştirilmesi ve kullanılması önemli araçlardan birisi de bilgisayar yardımı ile simülasyonlardır. Bunun için de araştırmacılar, sonlu elemanlar metodu tabanlı programlar geliştirerek işlem değişkenlerini ele alarak boru tipinde malzemelerin şekillendirme limitlerini saptamışlardır.

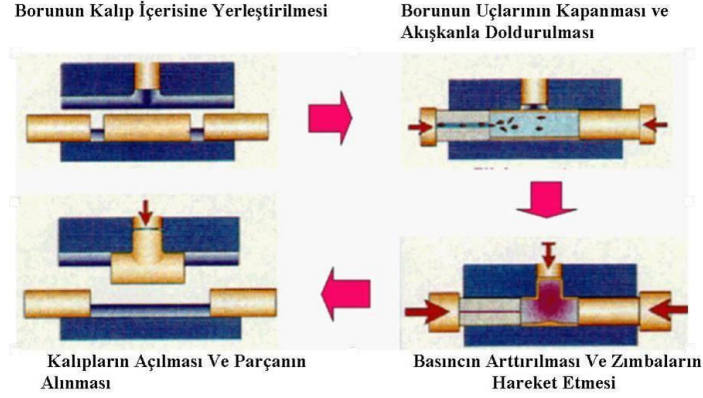
Hidroforming işlemini bilgisayar yardımı ile simüle ederek, işlem sırasında kullanılan malzeme, pres ve ekipmanların özelliklerini ve parametrelerini kullanarak, Koç ve Atlan [1] çalışmalarında simülasyon için ticari yazılım programları geliştirerek incelemişlerdir. Diğer yandan, hidroforming metodu ile şekillendirilen borularda meydana gelen eğilme hataları incelenmiştir [2]. Saç ve boru profillerin hidroforming ile şekillendirme işlemlerinin tasarımını, işlem sırasında hata durumlarını, malzeme üzerine etkileyen basınç ve yüklemeye adaptasyonlarını ayrıca sürtünme koşulları incelenmiş ve ayrıca T bağlantı elemanının nümerik analizi yapılmıştır [3]. Abrantes, Szabo-Ponce A., Batalha G.F. [4] çalışmalarında bakır ve alüminyum boruların şekillendirme esnasında meydana gelen istenmeyen deformasyon çeşitlerini ve oluşma nedenlerini incelemiştir. Buna ilaveten, borunun simülasyonu LS-DYNA yazılımıyla gerçekleştirilerek, bu simülasyonlar deney ortamına da uyarlanmıştır. Öte yandan, Hidroform preslerde kullanılan hidrolik sistemleri ve hidroform işleminde akışkanların yapısını ve kullanımını incelenmiştir [5].

Bu çalışmada, SAE/AISI 1060 çelikten yapılmış standart yuvarlak boru malzemesinden T tesisat bağlantı elemanının Hidroforming yöntemiyle şekillendirilmesi bilgisayar yardımı ile simüle edilmiştir. Bilgisayar simülasyonunda sonlu elemanlar eksplicit formülasyon tabanlı program, DEFORM-3D, kullanılmıştır. Hidroforming şekillendirme işleminde kullanılan kalıplar, boru malzemesi ve pres ekipmanları modellenerek DEFORM-3D yazılımına aktararak yüklemeye, basınç ve diğer sınır şartları tanımlanmıştır. Bu modellemeler ve tanımlamalar sonucunda, standart boru deforme edilerek T şeklinde biçimlendirilmesi gerçekleştirilmiştir. Oda sıcaklığında gerçekleştirilen bu çalışmaların sonucunda elde edilen gerilme, zorlanma, borudaki malzeme akışı, deformasyon ve boru et kalınlıkları değişimleri incelenmiş ve en uygun iç basınç değeri belirlenmiştir.

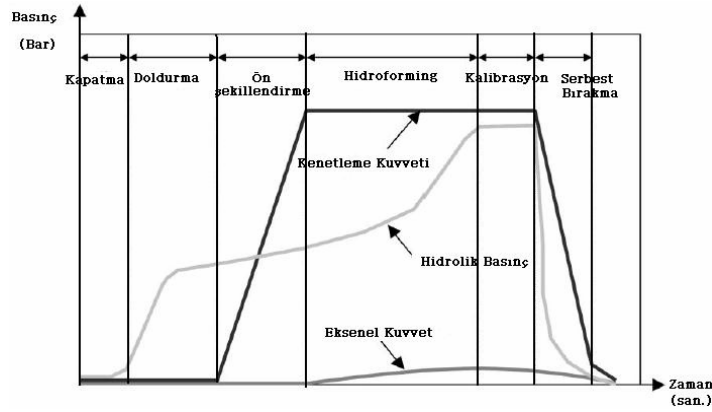
## 2. HİDROLİK BASINÇLA ŞEKİLLENDİRME (HİDROFORMİNG):

### 2.1 Hidroforming Prensipleri:

Yuvarlak standart boru malzemesi uygun uzunlukta kesilir, yapılacak şekillendirme işlemine göre boru ön şekillendirme işleminden sonra alt kalıp içerisine yerleştirilir. Üst kalıp parça üzerine kapatılır. Eksenel silindire borunun uçları kapatılarak su esaslı akışkan ile borunun içerisi doldurur. Daha sonra eksenel silindirler daha yüksek bir kuvvetle, boru kalıp içerisine doğru sıkıştırılarak büzülmeye zorlanır. Eksenel kuvvetle eş zamanlı olarak borunun içerisindeki sıvının hidrolik basıncı 2000 Bar'a kadar uygulanır. Kalıp içerisindeki boru, kalıp geometrisinin şeklini almaya başlar. Sonra basınç 4000 Bar'a kadar artırılır ve kalibrasyon işlemi yapılır. Boru malzemesi kalıbın şeklini tam olarak almış olur. Borunun şişmesi esnasında silindirler baskı yaparak boruyu iterler. Bu sayede parçanın et kalınlığı kontrol edilmiş olur. Basınç değerleri malzeme tipine göre değişiklik gösterebilir. Hidroforming tekniğinde ile yapılan şekillendirme işlemi aşama aşama Şekil 1'de, ve bu işlemin zamana bağlı uygulanan akışkan basınç fonksiyonunu Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 1. Hidroforming tekniğinin işlem basamakları [2].

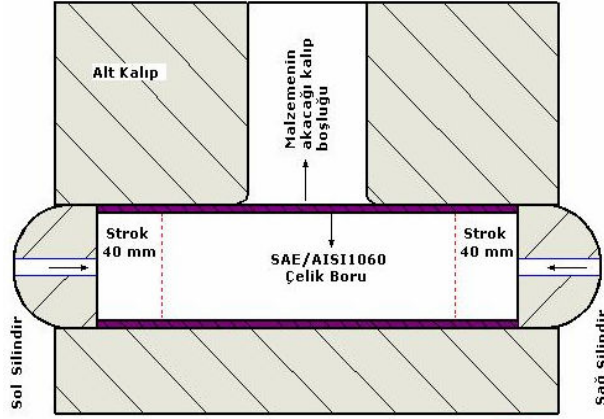


Şekil 2. Tüp Hidroforming işleminin basınç-zaman ilişkisi [3].

## 2.2 Hidroforming İşleminin Tasarımı:

Hidroforming tekniğinin tasarımında en önemli aşama, işlem parametrelerinin belirlenmesidir. İşlem parametrelerini üç grupta toplamak mümkündür. Bu parametreler; boru malzemesi, geometrisi ve şekillendirilecek boruya uygulanan kuvvetlerle ilgili parametrelerdir. Uzunluk, çap, et kalınlığı ve şekillendirmede kullanılacak silindir strokunu tanımlayacak değerler boru geometrisine ait parametrelerdir. Öte yandan, boru malzemesini şekillendirilmesinde kullanılacak kuvvetlerle ilgili olarak ise, kalıpları kenetleme kuvveti, şekillendirmede kullanılan akışkan basıncı, boruların uçlarına etki eden silindir kuvveti ve zamanlaması, ve boru malzemesi ile kalıplar arasındaki yağlama ve sürtünme durumlarını tanımlayan parametrelerdir. Bu parametrelerin hepsi hidroforming işlemini etkileyen fonksiyonlardır. Bu nedenle, istenilen şekillendirme işleminin gerçekleştirilebilmesi için bu parametrelerin uygun bir şekilde seçilmesi zorunludur. Bu parametrelerin optimum koşullarda seçilebilmesi ve uygulanabilmesi için yukarıda bahsedilen sonlu elemanlar tabanlı ticari bilgisayar yazılımı 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'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. Boru malzemesinin kalıp içerisine yerleştirilmesi

### 2.3 Şekillendirme İşlemi Sırasında Oluşabilecek Hatalar:

Hidroforming işlemi sırasında ve işlemin sonucunda, yukarıda bahsedilen parametreler şekillendirme işlemine uygun seçilemediği takdirde istenmeyen hatalı sonuçlar ortaya çıkar. Eğer tasarım parametreleri istenilen şekillendirme işlemine uygun seçilemez ise, genel olarak Şekil 4’te görüldüğü gibi üç tip istenmeyen hatalı deformasyonlar meydana gelir. Bu hatalı deformasyonlar sırası ile bel verme, büzülme ve yırtılma olarak adlandırılırlar.

İstenmeyen hatalı deformasyonlardan bel verme problemi bir flambaj problemi olup hatalı seçilen bazı geometrik parametrelerin yol açtığı bilinen bir gerçektir. Bu parametreler ise, boru geometrisinin yanlış seçiminden, pres tezgahının strok mesafesinin ve presleme zamanının yanlış seçiminden, Hidrolik iç basıncın yetersiz oluşundan ve kalıp kapama kuvvetinin etkin olmamasından kaynaklanır. Büzülme, pres strok mesafesinden, iç basıncın ayarsızlığından, boru et kalınlığının az oluşundan, kalıpla boru arasındaki sürtünmenin fazla oluşundan kaynaklanır. Yırtılma, iç basıncın zamansız ve yüksek değerde oluşundan, yanlış malzeme seçiminden, strok mesafesinin kısa oluşundan ve boru et kalınlığının yetersiz oluşundan kaynaklanır [4].



Şekil 4. İstenmeyen deformasyon şekilleri [4]

### 2.4 Hidroforming İşleminde Kullanılan Akışkan

Hidroforming işleminde yapılan şekillendirmenin uygun olabilmesi ve yukarıda bahsedilen hatalı deformasyonların oluşmaması için, uygun işlem parametrelerinin yanında şekillendirmede

kullanılacak akışkanın da uygun seçilmesi gerekir. İstenilen hidroforming şekillendirmenin yapılabilmesi için kullanılacak yağ mineral yağlardan ziyade, su bazlı akışkanlar tercih edilmelidir. Çünkü, mineral yağların yüksek yanma özelliğinin yanında fazla sıkıştırılabilirliklerinden dolayı tercih edilmemektedirler. Bu yüzden, yüksek basınç altında fazla sıkıştırılmayan su esaslı akışkanların kullanılması daha uygun olmaktadır. Sıkıştırılabilirlik özelliği açısından mineral yağ ile su esaslı akışkanlar mukayese edilecek olursa, belirli bir basınç altında mineral yağlar daha fazla sıkıştırılabilirlikte ve dolayısı ile su esaslı akışkanlar daha az sıkıştırılabilirlikte. Bu nedenle hidroforming şekillendirme işleminde su esaslı akışkanların seçimi ve kullanımı daha uygun olmaktadır. Buna göre, literatürde genel olarak su esaslı bir akışkanın sahip olması gereken üstün özellikler, Çelikayar [5]'in çalışmasında detaylı olarak açıklanmıştır.

## 2.5 'T' Bağlantı Elemanının Modellenmesi

Akışkan tesisatlarında kullanılan T bağlantı elemanın geometrik ve yapısal özellikleri önemlidir. Özellikle doğalgaz tesisatlarında dikişsiz bağlantı elemanları daha verimli ve güvenli olduğundan tercih edilmektedirler. Akışkan tesisatlarında yaygın olarak kullanılan dikişsiz bağlantı elemanları ise ancak hidroforming yöntemiyle üretilmektedir. Bu nedenle, burada, üretilmesi istenen dikişsiz T bağlantı elemanının şekillendirilmesi simüle edilmiştir. Bunun için de, normal standart boru malzemesinden elde edilecek T bağlantı elemanı bilgisayarda modellenerek ve kalıcı deformasyona tabi tutularak şekillendirilme işlemi gerçekleştirilmiştir. Şekillendirme işlemi Şekil 3'te görüldüğü gibi kalıpla birlikte tasarlanarak bilgisayarda modellenmesi gerçekleştirilmiştir. Bu işlemde kullanılan iki ucu açık standart yuvarlak boru profili, SAE/AISI 1060 çelik malzemesinden olup bu malzemenin mekanik ve geometrik özellikleri detaylı olarak Çizelge 1'de verilmiştir.

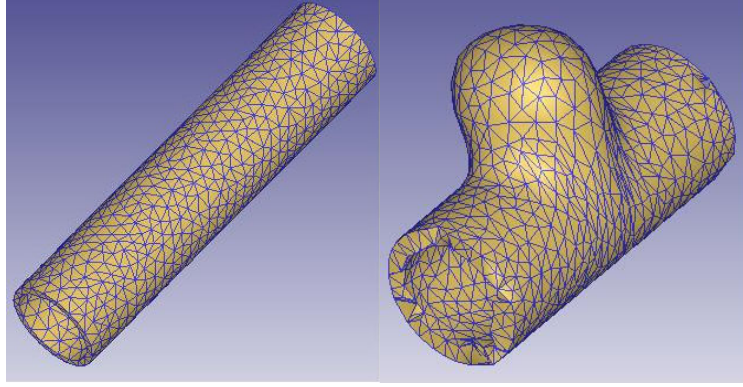
Çizelge 1. SAE/AISI 1060 çelik malzemesinin mekanik özellikleri

Sertlik, Brinell	183 BHD
Gerilme Mukavemeti, (Yield Stres)	485 MPa
Elastik modülü	205 GPa
Bulk Modülü	140 GPa
Poisson's Oranı	0.29
Kesme Modülü	80 GPa
İç çap	37 mm
Dış çap	42.2 mm
Et kalınlığı	2.80 mm
Boru Uzunluğu	180 mm

## 3. BİLGİSAYAR DESTEKLİ SİMÜLASYON

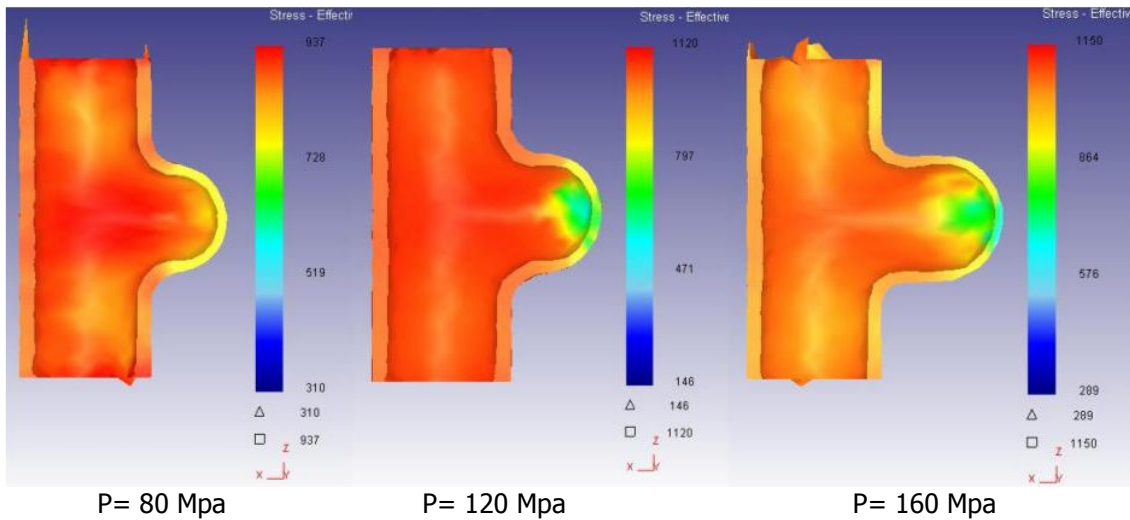
Yukarıda bahsedilen şekillendirme işlemini bilgisayarda simüle edebilmek için işlem parametreleri bilgisayarda tanımlanmıştır. Standart boru malzemesinin özellikleri, sınır şartları, kontak yüzey şartları, sürtünme şartları, zimbaların strok mesafeleri ve yönleri programda tanımlanmıştır. Sonlu elemanlar tabanlı program, DEFORM-3D, yardımı ile boru profili yaklaşık 15000 eleman kullanılarak mesh edilmiş olup dolayısı ile Şekil 5'da görüldüğü gibi sonlu elemanlar modeli oluşturulmuştur. Burada hem standart boru profili ile deforme edilmiş haliyle oluşturulan sonlu elemanlar modeli ayrı ayrı görülmektedir. Şekillendirme işlemi için, karşılıklı aksel silindirik, sabit hızlı olup hızı 250 mm/sn' dir. Kontak yüzey toleransı  $10^{-4}$  olarak

tanımlanmıştır. Simülasyon tamamen oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Bilgisayar simülasyonunda problemin nümerik çözümü için Direkt İterasyon Metodu kullanılmıştır. Zımba strokları karşılıklı olarak 40 mm kararlaştırılmıştır. Şekillendirme içerisinde kullanılan sıvı akışkana, şekillendirme işlemi için boru içerisinde 3 farklı basınç (P) uygulanmıştır. Boru içinde kullanılan hidrolik sıvısının uyguladığı iç basınç (P) üç farklı değerlerde, P=80, 120, ve 160 Mpa, sabit tutularak ayrı ayrı şekillendirme denemeleri yapılmıştır.

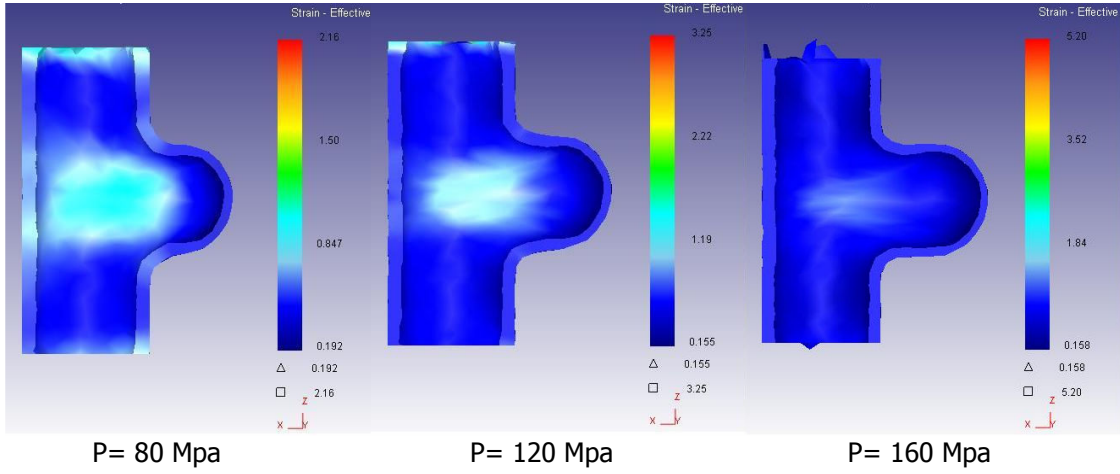


Şekil 5. St. Yuvarlak borunun ve şekillendirilmiş T profilinin sonlu elemanlar modeli.

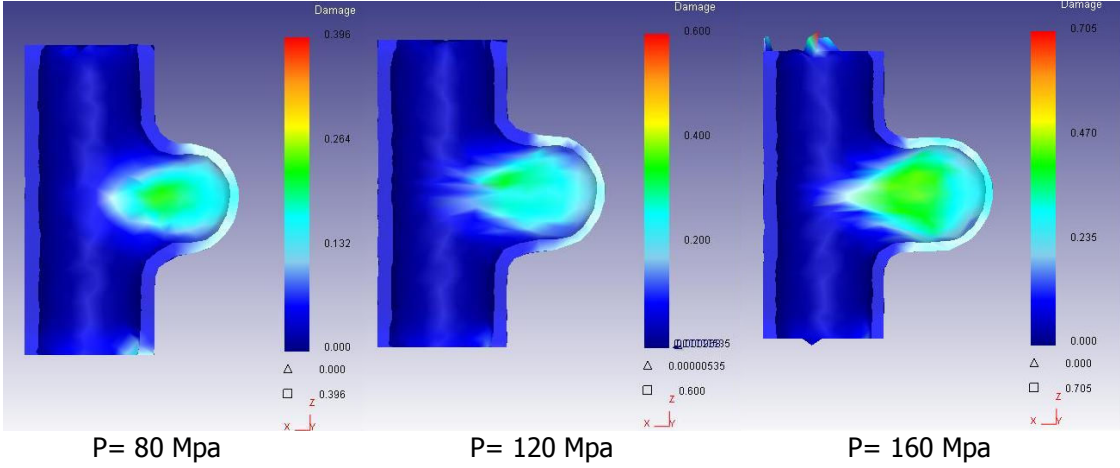
Üç farklı sabit basınç (P) altında yapılan farklı denemeler sonucunda yapılan çalışmalarda elde edilen sonuçlar ve şekiller aşağıda gösterilmiştir. Bu basınçlar altında yapılan simülasyonlar sonucunda elde edilen şekillerde, gerilme-gerinim, deformasyon, T profili et kalınlığının değişimi, malzeme akış hızı, ve T profili geometrik yapısı bakımından karşılaştırmalar ve incelemeler yapılmıştır. Uygulanan üç farklı sabit akışkan basıncı (P) altında şekillendirilen yuvarlak borunun T şeklindeki deformasyonu, kesit yüzeyinde oluşan efektif gerilme ve zorlanma dağılımları sırası ile Şekil 6 ve 7'de buna ilaveten şeklin deformasyonu veya şekillendirme durumu Şekil 8'de görüldüğü gibi elde edilmiştir. Aynı zamanda, parçanın zorlanan bölgeleri ve malzemenin her bölgesinin kalıp boşluğuna doğru zamana bağlı olarak akış hızı, ve parçanın et kalınlığında oluşan farklılıklar Şekil 9'deki gibi bulunmuştur.



Şekil 6. Şekillendirilmiş T parçasının kesitinde oluşan gerilme dağılımı.

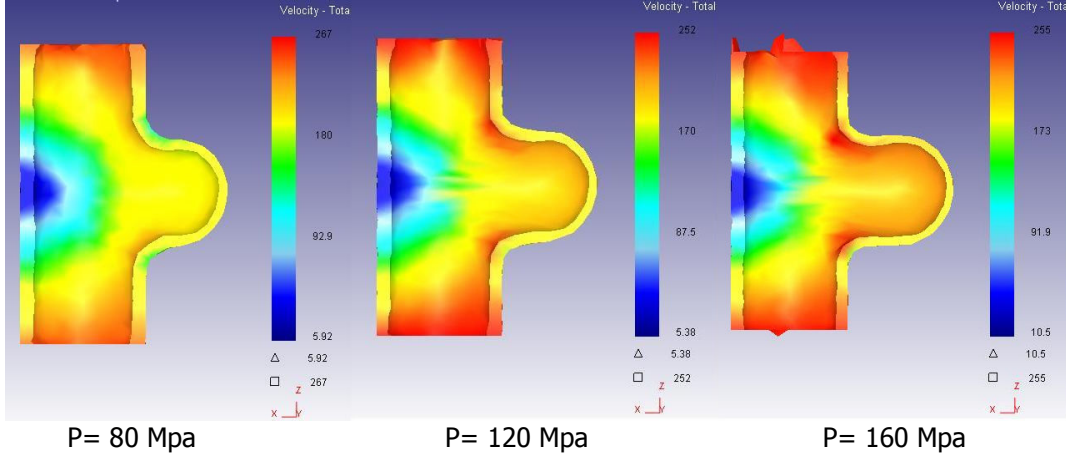


Şekil 7. Şekillendirilmiş T parçasının kesitinde oluşan gerinim dağılımı.

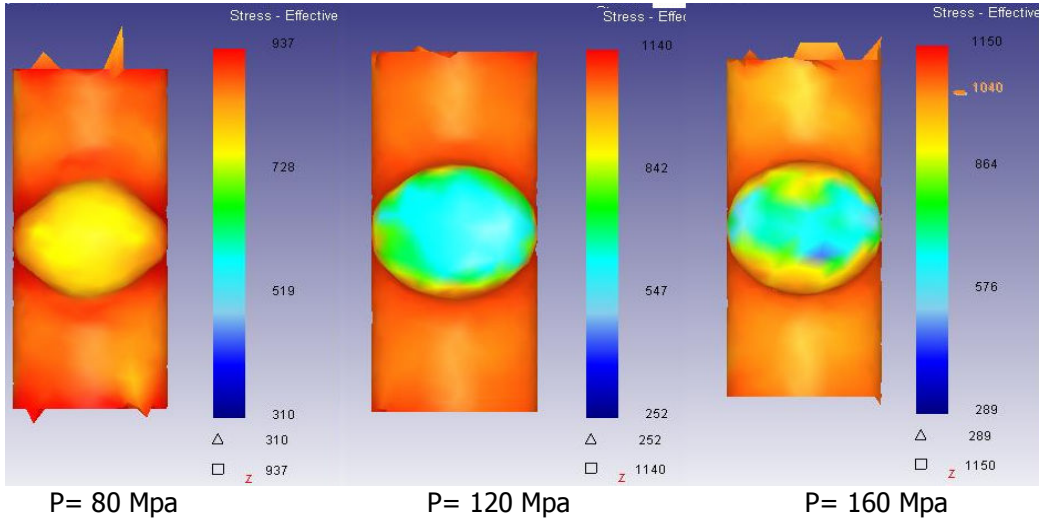


Şekil 8. T parçasının şekillendirme esnasındaki deformasyonu ve et kalınlığındaki değişim.

Burada elde edilen sonuç grafiklerinin ortaya çıkardığı bilgilere göre ve herhangi bir hatanın olamamasının yanında T elemanının et kalınlığının homojen olmasıdır. Aynı zamanda, şekillendirilen T profilinin yuvarlaklığıdır. Buna göre, Şekil 8'de görüldüğü gibi şekillendirme sonucu oluşan deformasyon grafiğinde, T profilinin et kalınlığının homojenliği ile deformasyon dağılımının P=600Mpa basınç altında daha iyi olduğu gözlenmektedir. Buna paralel olarak, Şekil 9'da şekillendirme esnasında kalıp içine doğru malzeme akış grafiğine göre, P=80 Mpa basınç altında malzeme akışı max hız 267m/sn olarak gerçekleşirken P=160Mpa basınç altında max hız 255 m/sn olarak elde edilmiştir. Diğer yandan, şekillendirilen T profilinin yuvarlaklık geometrisi Şekil 10 da görüldüğü gibi elde edilmiştir. Malzeme akış grafiğine benzer şekilde, T profili geometrisi yuvarlık bakımından, P=80 Mpa basınç altında oluşan yuvarlık elipse bezer iken, P=160Mpa basınç altında meydana gelen yuvarlaklık geometrisi daire şekline benzemektedir. Aynı zamanda, T profilinin üst kısmında meydana gelen gerilme dağılımına göre, Şekil 10, P=80 Mpa basınç altında yaklaşık 800Mpa gerilme oluşurken P=160Mpa basınç altında yaklaşık 550Mpa gerilme elde edilmiştir.



Şekil 9. Şekillendirme esnasında boru malzemesinin kalıp içine doğru akış hızı.



Şekil 10. Boru bağlantı elemanı kesitinde deforme olan T ucu geometrisinin karşılaştırılması.

#### 4. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Bu çalışmada, DEFORM-3D ticari yazılım programı kullanılarak standart dorudan "T" bağlantı elemanının şekillendirilme işlemi bilgisayar yardımı ile simüle edilmiştir. Simülasyon esnasında SAE/AISI 1060 düşük karbonlu çelikten yapılan standart yuvarlak boru üç farklı sabit sıvı basıncı altında şekillendirilmeye tabi tutulmuştur. Yapılan çalışmalar sonucunda aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

- Hidroforming metodu ile yapılan şekillendirme işleminin bilgisayarda simülasyonu başarı ile yapılmıştır. Bunun için gerekli olan tüm işlem parametreleri, kullanılan DEFORM-3D programında tanımlanmış olup, boru malzemesi, akışkanın karakteristikleri ve gerekli kalıplama modelleri başarılı bir şekilde bilgisayara adapte edilmiştir. İlâveten, şekillendirilmede kullanılacak pres tezgahına ait işlem parametreleri de tanımlanmıştır.
- Şekillendirme işleminden elde edilen sonuçlara göre yüksek basınçlarda daha uygun sonuçlar elde edilmektedir. Üç farklı basıncı altında yapılan simülasyonlar sonucunda elde edilen şekiller dikkate alındığında, en uygun akışkan uygulama basıncının P=160Mpa



olduğu görülmektedir. Çünkü, zellikle Şekil 6-10 da gösterilen sonuçlar incelendiğinde, T profili için elde edilen en homojen et kalınlığı ve geometrik yapı  $P=160\text{Mpa}$  basıncı altında yapılan Şekillendirme sonucunda olduğu görülmektedir. Buna karŐılık, düşük basıncılarda homojen et kalınlığı ve geometrik yapı elde edilemediği gibi, dengeli bir gerilme-zorlanma dağılımı da elde edilememektedir.

- Yapılan bilgisayar simülasyonu sonucunda, yuvarlak standart borudan elde edilecek T profilinin üretilmesi için gerekli olan optimal işlem parametrelerinin belirlenmesi daha kolay olacağı anlaŐılmaktadır. Bunun en önemli özelliği ve getirisi ise üretim zamanının ve maliyetinin düŐürülmesi konusunda üretime katkıda bulunmasıdır.

## 6. KAYNAKÇA

- [1] Koç M., Altan T., "An overall review of the tube hydroforming (THF) technology", Journal of Materials Processing Technology 108 (2001) 384-393, 2001.
- [2] Shr A., Koç M., Ahmetoglu M., Altan T., "Bending of tubes for hydroforming: a state of the art review and analysis", ERC/NSM Report-99-R-1-THF, The Ohio State University, Columbus, Ohio, USA, 1999.
- [3] Lundqvist J., " Numerical Simulation of Tube Hydroforming", Licentiate Thesis 2004:26, Lulea University of Technology SE-971 87 Lulea Sweden, 2004.
- [4] Abrantes, J.P., Szabo-Ponce, A., Batalha, G.F. "Experimental and numerical simulation of tube hydroforming (THF)", Journal of Materials Processing Technology 164–165 (2005) 1140–1147, 2005.
- [5] elikayar, G., "Yüksek Basıncı Altında Metallerin Şekillendirilmesi (hidroforming)" 3. Ulusal Hidrolik Pnömatik Kongresi ve Sergisi, 2003.