

**T.C.**  
**KIRIKKALE ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MAKİNA ANABİLİM DALI**  
**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**PLASTİK ENJEKSİYON İŞLEMİNDE MALZEME VE KALIP**  
**GEOMETRİSİNİN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİYLE**  
**OPTİMİZASYONU**

**Ferhat TÜRK**

**EKİM 2008**

Fen Bilimleri Enstitüsünce Yüksek Lisans Tezi Olarak Uygun Bulunmuştur.

---

Doc . Dr. Burak BİRGÖREN

Enstitü Müdürü V.

Bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı standartlarına uygun olduğunu onaylarım.

---

Prof. Dr. Veli ÇELİK

Anabilim Dalı Başkanı

Bu tezi okuduğumuzu ve Yüksek Lisans tezi olarak bütün gerekliliklerini yerine getirdiğini onaylarız.

---

Doç. Dr. M. Hüsnü DİRİKOLU

Danışman

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Veli ÇELİK

.....

Doç. Dr. M. Hüsnü DİRİKOLU

.....

Yrd. Doç. Dr. Hakan ARSLAN

.....

## ÖZET

### PLASTİK ENJEKSİYON İŞLEMİNDE MALZEME VE KALIP GEOMETRİSİNİN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİYLE OPTİMİZASYONU

TÜRK, Ferhat

Kırıkkale Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Doç. Dr. M. Hüsnü DİRİKOLU

EKİM 2008, 68 sayfa

Bu çalışmada ilk olarak malzemesi polietilen olarak seçilen ve viskoelastik özellik gösteren Flanşlı T plastik ara bağlantı elemanı Ansys Paket Programında 3 boyutlu olarak modellenmiştir. Uygulanan iç basınç neticesinde çıkan gerilme ve gerinim değerleri polietilen malzemesinin çekme ve kopma mukavemetiyle karşılaştırılmıştır. Daha sonra flanşlı T plastik ara bağlantı elemanının plastik enjeksiyon modellemesi Cadmould ve Mouldflow programları yardımıyla yapılmıştır. Modelin enjeksiyon işleminin istenilen şekilde gerçekleşip gerçekleşmediği, çatlak ve boşlukların durumu, kalıbın ara bağlantı elemanının enjeksiyon işlemine uygunluğu incelenmiştir. Bu işlemler modelin optimizasyonu esnasında geri beslemeler yapılarak tekrarlanmıştır. Bahsedilen değerler şekiller üzerinde gösterilmiş ve çıkan sonuçlar sonuç bölümünde yorumlanmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Polimer, Plastik enjeksiyon, Viskoelastik, Optimizasyon

## **ABSTRACT**

### **FINITE ELEMENT OPTIMISATION OF THE MATERIAL AND MOULD GEOMETRY IN PLASTIC INJECTION PROCESS**

**TÜRK, Ferhat**

Kırıkkale University

Graduate School Of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Engineering, M. Sc. Thesis

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. M. Hüsnü DİRİKOLU

October 2008 , 68 pages

During this study; first of all flanged T plastic element connection equipment whose material is chosen as polyethylene and having viscoelastic features are modeled as 3 –dimensional with the Ansys program package. Stress and stretch values which occur as the result of internal pressure applied are compared with the pull back and tensile strength of the polyethylene material. After that, the plastic injection modeling of flanged T plastic element connection equipment were made with the help of Cadmould and Mouldflow programs. Realization of Model injection process with desired form, the situation of the cracks and spaces, the eligibility of element connection equipment of mold for injection process are examined. These processes are repeated during the model optimization by feedback. Mentioned values are interpreted on the figures and results obtained are commented in the conclusion section.

**Key Words :** Polymer, Plastic injection, Viscoelastic, Optimization

## TEŞEKKÜR

Bu alıőmanın hazırlanması esnasında bilgi ve tecrubesini esirgemeyen, sabırla tezin her aşamasında büyük emek harcamıő olan tez yöneticisi hocam Sayın Do. Dr. M. Hüsnu DİRİKOLU 'na değerli destek ve yardımlarını sakınmayan saygı değer hocam Arő. Gör. Barıő KALAYCIOğLU 'na teőekkürlerimi sunarım.

## İÇİNDEKİLER

ÖZET .....	i
ABSTRACT .....	ii
TEŞEKKÜR .....	iii
İÇİNDEKİLER .....	iv
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	vii
SİMGELER DİZİN .....	x
1. GİRİŞ .....	1
1.1. Polimerler.....	3
1.2. Polimerlerin Sınıflandırılması .....	5
1.2.1. Termoplastikler .....	6
1.2.2. Termosetler .....	6
1.3. Polietilen .....	6
1.4. Amaç ve Kapsam .....	7
2. MATERYAL VE YÖNTEM .....	10
2.1. Plastik Enjeksiyon İşlemi .....	11
2.1.1 Ekstrüzyon Ünitesi .....	11
2.1.1.1. Mengene Ünitesi .....	12
2.1.1.2. Kontrol Ünitesi .....	12
2.2. Plastik Enjeksiyon İşleminde Akış .....	13
2.3. Malzemenin Mekanik Davranışları .....	15
2.3.1. Elastik Davranış.....	15

2.3.2. Viskoelastik davranış .....	16
2.3.2.1.Maxwell modeli .....	17
2.3.2.2.Kelvin-Voigt modeli .....	20
2.3.3. Elastik-Plastik davranış .....	23
2.3.4. Elastik-viskoplastik Davranış .....	24
2.4. Paket Programları .....	31
2.4.1. Ansys® Paket Programı .....	31
2.4.2. Cadmould® ve Mouldflow® Paket Programları .....	32
3. ARAŞTIRMA BULGULARI .....	34
3.1. Modelleme .....	34
3.2. Flanşlı T Ara Bağlantı Elemanının Plastik Enjeksiyon Modeli .....	35
3.2.1. Modelin Malzeme Verileri .....	38
3.2.2. Modelin Plastik Enjeksiyon Analizi .....	39
3.2.3. 3 , 6 ve 9 mm Kalınlıklı Modeller İçin Analiz Sonuçları .....	40
3.3. Flanşlı T Ara Bağlantı Elemanının Mukavemet Analizi .....	46
3.3.1. Ara Bağlantı Elemanının Çalışma Koşulları .....	47
3.3.2. Malzemenin Mekanik ve Fiziksel Verileri .....	47
3.3.3. Bilgisayar Modelinin Oluşturulması .....	48
3.3.4. Çözümün Elde Edilmesi .....	51
3.3.5. Analiz Sonuçları .....	52
3.4. Flanşlı T Ara Bağlantı Elemanın Mukavemetsel Olarak Opt. ....	55
3.5. F.T.A.B. Elemanının Opt. Sonrası Plastik Enjeksiyon.analizleri .....	58
4. TARTIŞMA VE SONUÇ .....	62
KAYNAKLAR .....	65

## ÇİZELGELER DİZİNİ

### ÇİZELGE

1.1. Polimerlerin sınıflandırılması .....	5
---	---



## ŞEKİLLER DİZİNİ

### ŞEKİL

1.1. Polietilenin zincir yapısı .....	3
2.1. Plastik enjeksiyon işlemi .....	11
2.2. Plastik enjeksiyon vidası .....	12
2.3. Helezon vida tipleri .....	12
2.4. Erimiş plastiğin kalıp içindeki akış gösterimi.....	13
2.5. İzotermal profil, soğuma ve ısıtma hız kesitleri .....	14
2.6. Kayma gerilmesi ve viskozitenin kayma oranı ile değişimi .....	15
2.7. Maxwell modeli. ....	17
2.8. Sürünmede gerinim-zaman diyagramı (Maxwell modeli). . . . .	18
2.9. Gevşemede gerilme-zaman diyagramı (Maxwell modeli) .....	19
2.10. Kelvin-Voigt modeli .....	20
2.11. Sürünmede Gerinim-Zaman Diyagramı (Kelvin-Voigt Modeli) ....	21
2.12. Gevşemede Gerilme-Zaman Diyagramı (Kelvin-Voigt Modeli) ....	22
2.13. Mühendislik Çekme Diyagramı .....	23
2.14. Örnek sonlu elemanlar .....	25
3.1. Ara Bağlantı Elemanı modeli .....	34
3.2. Modellemenin Seyri .....	35
3.3. Elemanın katı modeli .....	36
3.4. SolidWorks format değiştirme penceresi .....	37
3.5. Modelin *.Stl formatındaki görünümü .....	37

3.6. Modelin plastik enjeksiyon parametreleri .....	38
3.7. Plastik enjeksiyonun işleminin yollukları .....	39
3.8. 3 mm kalınlıklı parça modeli ve yolluk noktaları .....	40
3.9. 3 mm kalınlıklı modelin enjeksiyon işlemi sonrası dolumu .....	40
3.10. 3 mm kalınlıklı modelin enjeksiyon işlemi basıncı ve dolma zamanı .....	41
3.11. 3 mm kalınlıklı modelin enjeksiyon işlemi sonrası soğuma kalitesi ve yüzey kalitesi .....	41
3.12. Plastik enjeksiyonunun dolum analizi sonucu .....	41
3.13. Dolma zamanı .....	42
3.14. Enjeksiyon basıncı .....	42
3.15. Basınç düşümü .....	43
3.16. Enjeksiyon esnasındaki kayma gerilmesi .....	43
3.17. Soğuma zamanı .....	43
3.18. Sensör verileri .....	44
3.19. Soğuma durumu ve yüzey kalitesi ..	44
3.20. 9 mm parça modelinin plastik enjeksiyon işlemi sonrası dolumu.....	45
3.21. 9 mm parça modelinin plastik enjeksiyon basınç durumları .....	45
3.22. 9 mm enjeksiyon yolluk noktalarının beslediği alanlar .....	45
3.23. SolidWorks format değiştirme penceresi .....	46
3.24. Polietilen malzemesinin çekme deneyi grafiği. ....	47
3.25. SOLID45 SEM elemanı. ....	48
3.26. Elemanın SEM SOLID45 ağı .....	49
3.27. Model düğümleri .....	50
3.28. Model çizgileri .....	50
3.29. Modelin sınır şartları ve yüklemeleri .....	51

3.30. Ansys Çözüm Modülü ve parametreleri .....	52
3.31. Modelde oluşan Von Mises Efektif gerilmeleri .....	53
3.32. Modelde oluşan Von Mises gerinimleri .....	53
3.33. Modelde oluşan toplam deformasyonlar .....	54
3.34. a ve b Modelin Optimizasyon öncesi ve sonrası .....	55
3.35. Yeni modelde oluşan Von Mises Efektif Gerilmeleri .....	56
3.36. Yeni modelde oluşan Von Mises efektif gerinimleri .....	57
3.37. Yeni modelde oluşan toplam deformasyonlar. ....	57
3.38. Yeni modelin dolum kalitesi .....	58
3.39. Yeni modelin dolma zamanı .....	59
3.40. Yeni modelin enjeksiyon basıncı .....	59
3.41. soğuma sonrası yüzey kalitesi ı .....	60
3.42. Optimize sonrası yeni enjekte noktaları .....	60
3.43. Optimizasyon sonrası modeldeki basınç değişimi .....	60
3.44. Yeni modelde oluşan toplam deformasyonlar. ....	61
3.45. Basınç düşümü .....	61
3.46. Dolma zamanı .....	61

## SİMGELER DİZİNİ

$A_0, A_1, \dots, A_5$	Deplasman fonksiyonu katsayıları
$B$	Gerinim-düğüm deplasmanları matrisi
$D$	Gerinim matrisi
$\vec{d}$	Düğüm deplasmanları vektörü
$E$	Elastisite modülü
$E$	Elastik gerilme-gerinim matrisi
$\varepsilon$	Gerinim
$\varepsilon_x, \varepsilon_y$	$X$ ve $Y$ yönlerindeki gerinimler
$\dot{\varepsilon}$	Gerinim hızı
$d\varepsilon$	Sonsus küçük gerinim
$d\bar{\varepsilon}$	Sonsus küçük efektif gerinim
$d\varepsilon^p$	Plastik bölgede sonsuz küçük gerinim
$F$	Kuvvet
$\vec{F}$	Uygulanan dış kuvvetler
$K$	Direngenlik matrisi
$N$	Şekil fonksiyonu matrisi
$\sigma$	Gerilme
$\bar{\sigma}$	Efektif gerilme
$\sigma_N$	Normal gerilme
$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$	$X, Y$ ve $Z$ yönlerindeki gerilmeler
$\gamma_{xy}$	Kayma gerinimi
$u$	$X$ yönündeki deplasman

$\vec{u}$	Deplasman matrisi
$U$	Toplam gerinim enerjisi
$v$	Y yönündeki deplasman
$v$	Y yönündeki deplasman hızı
$\nu$	Poisson oranı
$\tau_{xy}$	Düzlemsel kayma gerilmesi
$\tau_F$	Kayma gerilmesi
$\eta$	Viskozite
$t$	Zaman
$t_r$	Gevşeme zamanı
$W$	İş

## 1. GİRİŞ

Günümüzde plastik sektörü hızla gelişmekte ve hayatın her aşamasında yerini almaktadır. Yoğunluklarının düşük olması, kimyasal maddelere ve korozyona dayanıklı olmaları, kolay şekillendirilebilmeleri plastiklerin birçok alanda kullanımlarını yaygınlaştırmaktadır.(1,2) Son yıllarda mekanik tesisat alanında kullanılan ve tasarımının ve üretiminin giderek arttığı alanlardan birisi de plastik boru sektörü olmuştur. Plastik borular her geçen gün çelik ve pik borulara göre kullanıcılar tarafından daha çok tercih edilmektedir. Mekanik tesisat alanında borular kadar öneme sahip olan diğer bir grup ise ara bağlantı elemanlarıdır. Ara bağlantı elemanları boruların pompa, vana ya da duyar elemanlara bağlanmasını sağlayan parçalardır. Ancak ara bağlantı elemanlarının plastik olarak tasarımı ve üretimi plastik boruların tasarımı ve üretimi kadar kolay değildir. Bundan dolayı günümüzde özellikle büyük çaplarda ara bağlantı elemanları çelik veya pik olarak üretilmekte ve kullanılmaktadır. Mevcut dar boğazın aşılabilmesi için bu çalışmada üç yollu plastik ara bağlantı elemanının tasarımı ve üretimi bilgisayarla modelleme yöntemleri yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Modellemede ara bağlantı elemanının katı modeli SolidWoks® çizim programı ile oluşturulmuştur. Daha sonra modelin maruz kaldığı iç basınç yüklemesi dikkate alınarak viskoelastik Sonlu Eleman Metodu (Finite Element Method, SEM) yardımıyla Ansys® paket programında ara bağlantı elemanının mukavemet analizleri gerçekleştirilerek tasarım parametreleri belirlenmiş ve son olarak bu tasarım parametreleri ışığında, plastik enjeksiyon modellemesi yapan CADMOULD® veya MOULDFLOW® programları yardımıyla plastik ara

bağlantı elemanının kalıp ve üretim parametreleri elde edilmiştir. Bu işlemler modelin optimizasyonu esnasında geri beslemeler yapılarak tekrarlanmıştır.

Tezin konusu, sonlu elemanlar yöntemi ile seçilen ara bağlantı elemanının mukavemet açısından tasarımı ve bu parçanın üretimine yönelik modelleme programları yardımıyla üretim parametrelerinin belirlenmesi üzerinedir. Bu bağlamda literatür araştırması iki farklı konuda yapılmış olup, bu konularla ilgili çalışmalara ait özet bilgiler aşağıda verilmiştir.

Trafford ve arkadaşları (3) düzgün geometriye sahip olmayan bir parçanın hem gerçek deney sonuçlarını hem de bilgisayar yardımı ile bulmaya çalışmışlardır. Deneysel ve teorik analizlerle malzeme hakkındaki parametrik verileri elde edip, akış ve kalıp içindeki davranışları hakkında bilgi vermişlerdir.

Seow ve Lam (4) kalıp boşluklarının dengeli olarak doldurulması ile ilgili yaptıkları çalışmada, parçanın kalınlığında ve şeklinde farklı değişiklikler yaparak ve akış yönlendiriciler kullanarak akış şeklini değiştirip optimum akış şeklini elde edecek kalıp boşluğu dengesini sağlamaya çalışmışlardır.

Hill (5) plastik malzeme akışı ile kalıp duvarları arası etkileşimi görmek için analizler yapmıştır.

Sezer (6) çalışmasında plastik boru üretiminde çok kullanılan polietilen malzemenin viskoelastik özelliklerini karakterize edebilmek için sünme deneysel çalışmaları gerçekleştirmiştir. Sünme deneylerinden elde ettiği verileri, ANSYS programında kullanarak viskoelastik analiz gerçekleştirmiştir.

Bradshaw ve arkadaşları (7) polimer malzemeler ile tel malzemenin optimum viskoelastik malzeme özelliklerine göre SEM ile yalıtım analizlerini çalışmıştır. Malzemede çentik oluşturarak SEM'deki prony serilerini kullanarak bilinmeyen malzeme verilerine ulaşmaya çalışmışlardır. PVC malzemesinin yalıtım noktasında başarılı değerler verdiğini analizi sonuçlarından görmüşlerdir.

Zhang ve arkadaşları (8) bir viskoelastik malzemenin statik ve dinamik etkilerini SEM ile sayısal analizlerini gerçekleştirmiş. Kauçuk elastisitesi için kullanılan Ogden gerinim fonksiyonu ile malzeme modelini oluşturmuştur. Ansys programında gevşeme ve sürünme olayları sayısal örneklerle göstermiştir.

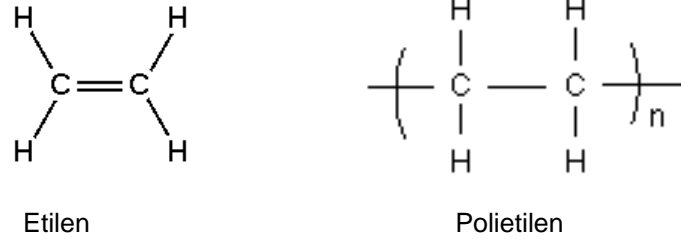
Seltzer ve Mai (9) viskoelastik bir katı model ile çentik etkisini analiz etmişlerdir.

Paul ve arkadaşları (10,11) iki farklı çalışmalarında viskoelastik analizlerin dişçilik sektöründe de hızla gelişmesine yardımcı olmuşlardır. Dişçilik sektörü için malzemenin kullanım şartları veya imali için yüksek sıcaklıklardaki davranışı viskoelastik davranış ile açıklanabildiğinden daha sağlıklı sonuçlar elde edilebilmiştir.

## **1. 1. Polimerler**

Polimerler; çok sayıda molekülün kimyasal bağlarla düzenli bir şekilde bağlanarak oluşturdukları yüksek molekül ağırlıklı bileşiklerdir. “Poli” Latince bir sözcük olup çok sayıda anlamına gelir. Polimerler “monomer” denilen birimlerin bir araya gelmesiyle oluşmaktadır. Örnek olarak Etilen bir monomerdir. Bu monomerdan oluşturulan polimer olan polietilen ise polimerdir.





**Şekil 1.1.** Polietilenin zincir yapısı

Tanımdan anlaşılacağı üzere plastikler doğada hazır bulunmaz, tersine doğadaki elementlere insan tarafından müdahale edilmesi ile elde edilir. Elde edilmesi belli bir sıcaklık ve basınç altında, katalizör kullanılarak monomerlerin reaksiyona sokulması ile olur. Plastik ilk üretildiğinde toz, reçine veya granül halde olabilir. Genelde plastikler petrol rafinerilerinde kullanılan ham petrolün işlenmesi sonucu açığa çıkan ve nafta ismi verilen renksiz sıvı bir maddenin çeşitli kimyasal reaksiyonlardan geçirilmesi sonucu elde edilir.

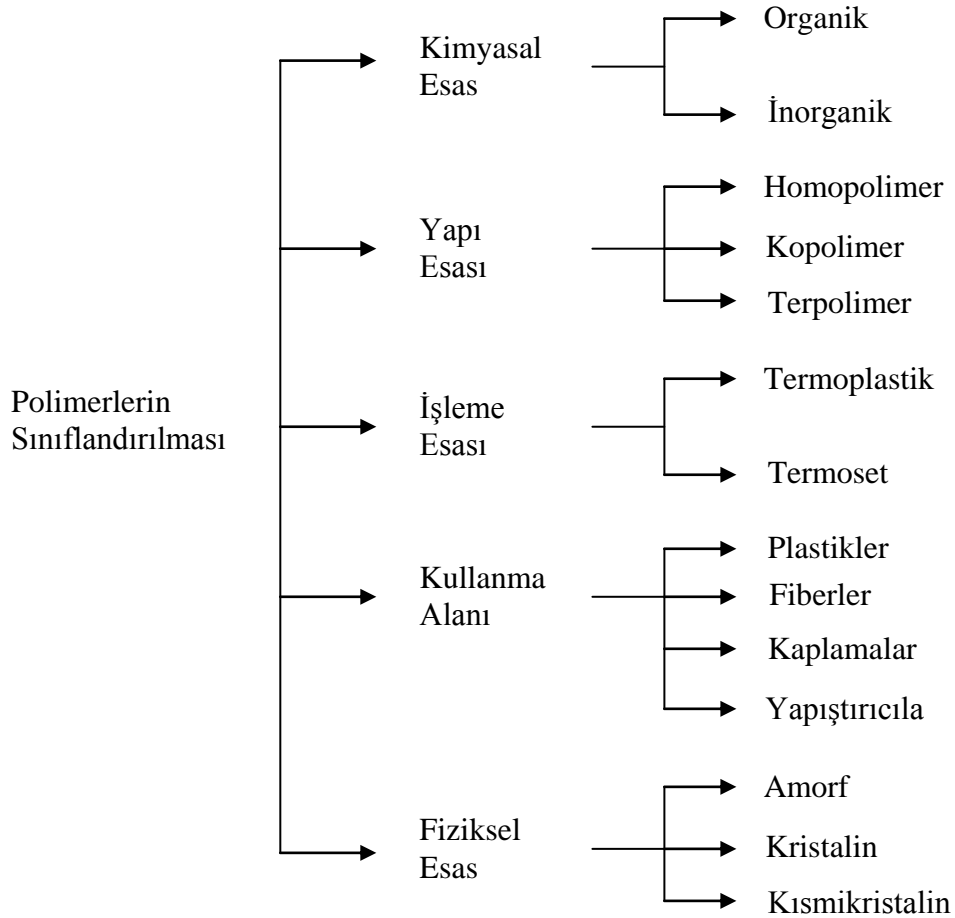
Organik kimyacılar on dokuzuncu yüzyılın ortalarında bazı denemelerinde rastlantısal olarak yüksek molekül ağırlıklı maddeler sentezlediler. Bu yüzyılın ikinci yarısından itibaren polimer konusundaki araştırmalar gelişmiş ve yeni polimer türleri geliştirilmiştir. Bu alanın öncüsü Alman kimyager Herman Stauding'tir. Herman Stauding ilk defa polimerizasyon koşullarının polimer oluşumu üzerine etkisini tanımlamıştır. Stauding kimyanın bu alanında yaptığı çalışmalarla 1953 yılında Nobel ödülü almıştır. Bu alanda ilk kez çalışan araştırmacılar doğal polimerleri taklit ederek işe başlamışlar ve 1930 yılında Wallace Carothers Nylonu sentezlemeyi başarmıştır. İkinci dünya savaşından bu yana birçok polimer laboratuvarlar da üretilmiş ve ayrıca birçok polimer endüstriyel ölçekte üretilmeye başlamıştır.

Endüstriyel organik kimyacılar ise daha çok polimer kimyası alanına kayarak çalışmalarını bu yönde sürdürmeye başlamıştır. Bunun sonucu olarak günümüzde sayısız polimer türü geniş bir uygulama alanında çeşitli amaçlar için kullanılmaktadır.(12)

## 1.2. Polimerlerin Sınıflandırılması

Polimerler çeşitli kriterlere göre sınıflandırılmışlardır. Tablo 1. de bu sınıflandırma detaylı olarak gösterilmiştir.

**Çizelge 1.1.** Polimerlerin sınıflandırılması(14).



Polimer sınıflandırılmasında en çok kullanılan esas işleme yöntemlerine göre yapılan sınıflandırmadır. Buna göre polimerler

a) Termoplastikler

b) Termosetler

olmak üzere iki büyük gruba ayrılırlar.

### **1.2.1. Termoplastikler**

Isı ve basıncın altında polimerik özelliklerini yitirmeden defalarca şekil alabilen ve soğutulduğunda sertleşerek katı halini alabilen plastiklerdir. Bu şekillendirme sırasında hiçbir kimyasal değişikliğe uğramazlar. Bunun yanı sıra uygun çözücülerle çözülebilirler.

Termoplastik grubunu oluşturan en önemli plastikler: akrilikler, naylon, polistren, polietilen, polipropilen, poliüretan, karbonflorür, selülozikler ve vinillerdir.

### **1.2.2. Termosetler**

Isı işlemiyle sadece bir defa istenilen şekli alabilen plastiklerdir; tekrar ısıtılmakla şekillendirilemezler. Ayrıca bu malzemeler çözünmezler.

Termoset plastik grubunu oluşturan en önemli plastikler: polyester, epoksi, fenolik ve aminoplastlardır.(13)

## **1. 3. Polietilen**

Polietilen çok çeşitli ürünlerde kullanılan bir termoplastiktir. İsmi monomer haldeki etilenden alır, etilen kullanılarak polietilen üretilir. Plastik endüstrisinde

genelde ismi kısaca PE olarak kullanılır. Etilen molekülü  $C_2H_4$ , aslında çift bağ ile bağlanmış iki  $CH_2$ 'den oluşur ( $CH_2=CH_2$ ). Polietilenin üretim şekli, etilenin polimerizasyonu ile olur. Polimerizasyon metodu, radikal polimerizasyon, anyonik polimerizasyon, iyon koordinasyon polimerizasyonu ve katyonik polimerizasyon metodları ile olabilir. Bu metodların her biri farklı tipte polietilen üretimi sağlar.

Polietilen malzemelerin özellikleri farklı tiplere göre değişiklik gösterse de; dış ortam koşulları ve neme karşı iyi direnç, esneklik, yüksek darbe dayanımı, düşük yoğunluğu, düşük ısı iletkenliği ve üstün kimyasal direnç genel özellikleri olarak sayılabilir. Kaplar, plastik kutular, mutfak eşyaları, kaplamalar, plastik borular, ara bağlantı elemanları ve tüpler, oyuncaklar, kablolar, paketlenme ve ambalaj filmi gibi çok yaygın bir kullanım alanı bulunmaktadır. Ayrıca düşük maliyete sahip bir ürün özelliği göstermektedir.(13,16)

#### **1.4. Amaç ve Kapsam**

Tez çalışması, akışkan şebekelerde kullanılan flanşlı T plastik ara bağlantı elemanının model, kalıp ve mukavemet optimizasyonunun bilgisayar modelleme programları yardımıyla yapılması ve böylece tasarım ve üretim parametrelerinin elde edilmesidir.

Günümüzde bilgisayar simülasyonları genelde imalat yöntemlerinin, özelde şekillendirme işlemlerinin anlaşılması ve optimize edilmesi konusunda verimli bir araç olarak karşımıza çıkmaktadır. Simülasyon yardımıyla, şekillendirme işleminin herhangi bir anını gözleme ve analiz etme olanağı vardır. Uygulanan kuvvet ve çevre koşullarından dolayı (sürtünme, ortam sıcaklığı vb.)

şekillendirilecek parçanın herhangi bir yerindeki kritik gerilmeler, gerinimler ve sıcaklıklar önceden tespit edilebilmektedir. Bu tür geniş analizlerin deneysel yöntemlerle yapılması mümkün olsa dahi, bu hem vakit hem de ekonomik açıdan elverişsiz olmaktadır. Tez çalışması, bilgisayar uygulamalarında meydana gelen gelişmeler doğrultusunda, bunun imalat sahasında yeni çözümlere ışık tutması çabasında yürütülmüştür.

Bu amaçla, polimer bazlı ürünlerin üretiminde temel teşkil eden kalıp tasarımının oldukça pahalı ve deneme yanılma yöntemiyle yapılamayacak kadar meşakkatli olduğu aşikârdır. Bu bağlamda kalıp tasarımı konusundaki zorlukların plastik ara bağlantı elemanının model ve kalıp optimizasyonunun bilgisayar modelleme programları yardımıyla yapılması sonucu elde edilen veriler ışığında giderilmesine yönelik çalışmalarda bulunulmuştur.

Bu çalışmalar iki aşamada gerçekleştirilmiş olup birinci aşamada tasarıma yönelik optimizasyon, ikinci aşamada ise model ve kalıba yönelik optimizasyonlar yapılmıştır. Birinci aşama olan tasarıma yönelik optimizasyon çalışmalarında Ansys kullanılmıştır. Flanşlı T plastik ara bağlantı elemanın malzemesi akışkan şebekelerde tercih edilen polietilen olarak seçilmiştir. Termoplastik bir polimer olan polietilen diğer plastikler gibi viskoelastik özellik gösteren bir malzemedir. Bu doğrultuda simülasyonda plastik ara bağlantı elemanı viskoelastik olarak zamanla pekleşen sürünme (Time Hardening Implicit Creep) modeli ile modellenmiştir. Yükleme 1 MPa değerinde bir iç basınç uygulanarak yapılmış olup, çıkan etken/efektif gerilme gerinim değerleri polietilen malzemesinin çekme mukavemetiyle karşılaştırılmıştır. İkinci aşamada flanşlı T plastik ara bağlantı elemanının model ve kalıp optimizasyonları Cadmould ve Mouldflow programları

yardımıyla yapılmıştır. Enjeksiyon aşamasında kalıp sıcaklığı, malzemenin erime sıcaklığı, viskozite değeri, yoğunluğu, termal ve mekanik özellikleri girilmiş ve sonuçta modelin enjeksiyon işleminin istenilen şekilde gerçekleşip gerçekleşmediği, çatlak ve boşlukların durumu, kalıbın ara bağlantı elemanının enjeksiyon işlemine uygunluğu incelenmiştir. Bu işlemler modelin optimizasyonu esnasında geri beslemeler yapılarak tekrarlanmıştır.

## 2. MATERYAL VE YÖNTEM

Üretiminin yapılması düşünülen bir ürünün tasarımı, ürüne uygun malzeme seçimi, üretimi için gerekli parametrelerin temini ve temin edilen bilgiler nazarında ön imalat ve ön çalışma koşullarının sergilendiği analizler doğrultusunda gerçekleşir. Plastik parçaların %30 dan fazlası enjeksiyon ile üretilir. Plastik enjeksiyon işleminde erimiş plastik malzemenin sıcaklık, basınç, hız ve akış biçimi parametreleri ürün için oldukça önemlidir.

Erimiş plastik malzeme kalıba dolarken, ideal olmayan (Non-Newtonian) ve özdeş ısıya sahip olmayan (non-isothermal) formda akmaktadır.

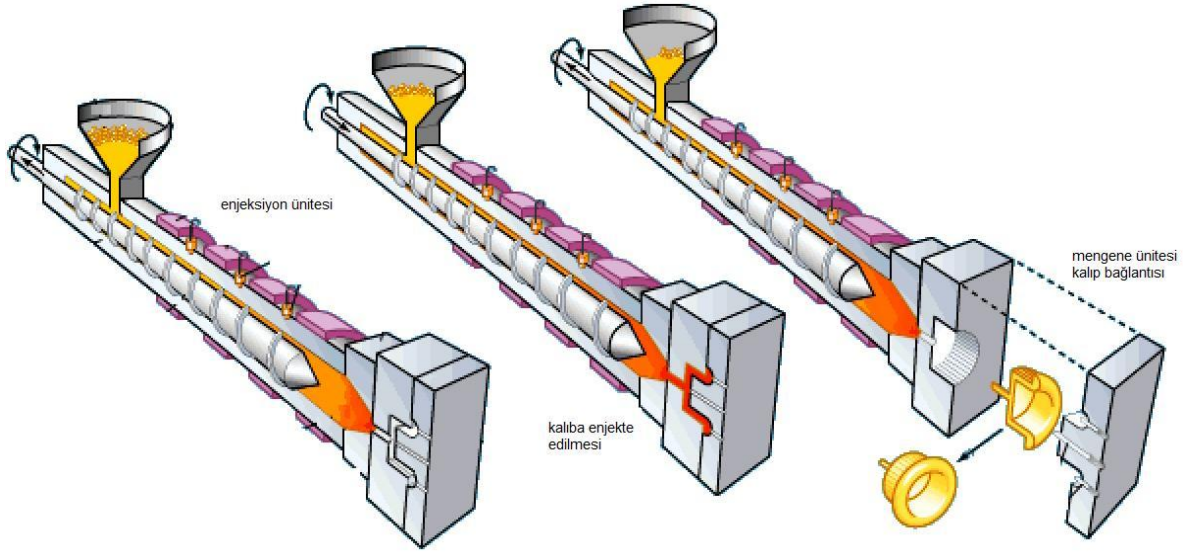
Malzeme kalıp içinde ilerlerken yüzey teması esnasında ek soğutucu sistemleri olan kalıp içinde ısı kaybından dolayı kesit daralması başlar kayma gerilmesi, kayma hızı değişir, yoğunluğu artmaya devam ederken yoğunluğa bağlı olarak da viskozitesi artar. Parametreler iyi ayarlanmadığında üründe ciddi sıkıntılar oluşur.

### 2.1. Plastik Enjeksiyon İşlemi

Enjeksiyon kalıplama işlemi ya da daha yaygın adıyla plastik enjeksiyon işlemi, plastik ürün üretiminde kullanılan, diğer plastik işleme yöntemlerine göre her geçen gün kullanımı artmaktadır. Hazırlanmış hammaddenin tek bir işlemle parametreler doğrultusunda istenilen şekilde kalıplanabilmesini sağlaması ve birçok durumda üretilen ürün için son işlem gerektirmemesi de rağbet görmesini artırmıştır.

Genel olarak enjeksiyon makineleri her biri farklı görevlere sahip 4 üniteden oluşur. Farklı tipleri olsa da genel amaçlar doğrultusunda dört ünite şunlardır.

- Enjeksiyon ünitesi
- Mengene (kalıp bağlama) ünitesi
- Kalıp ve hareket sistemleri
- Otomatik kontrol ünitesi

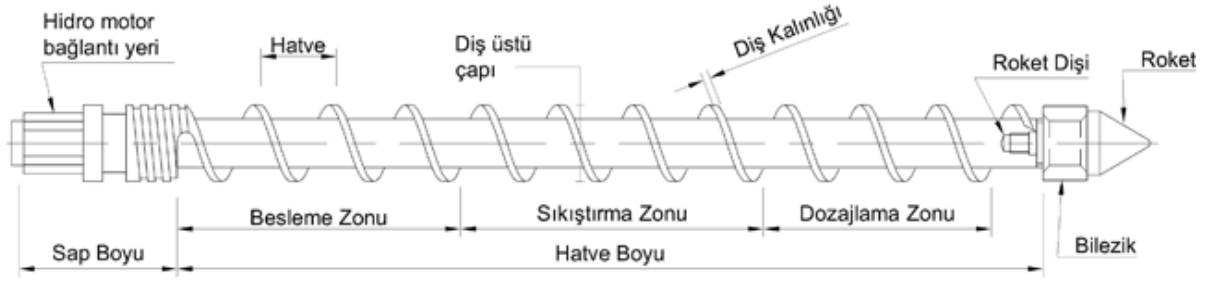


**Şekil 2.1.** Plastik enjeksiyon işlemi

### 2.1.1. Enjeksiyon Ünitesi

Hazırlanmış plastik malzemeyi işleme sıcaklığına getirerek kalıp boşluğuna enjekte eden ünedir. Ürünlerin her zaman aynı özellikte olabilmesi için malzeme miktarı, uygulanan basınç, sıcaklık ve enjeksiyon hızında kalıp boşluğunu doldurması gerekir. Enjeksiyon makinelerinde enjeksiyon ünitesinin ana elemanı **şekil 2.2** de detayı ve **şekil 2.3** te de çeşitleri gösterilmiş olan helezon vidalardır.





Şekil 2.2. Plastik enjeksiyon vidası



Şekil 2.3. Helezon vida tipleri

### 2.1.2 Mengene Ünitesi

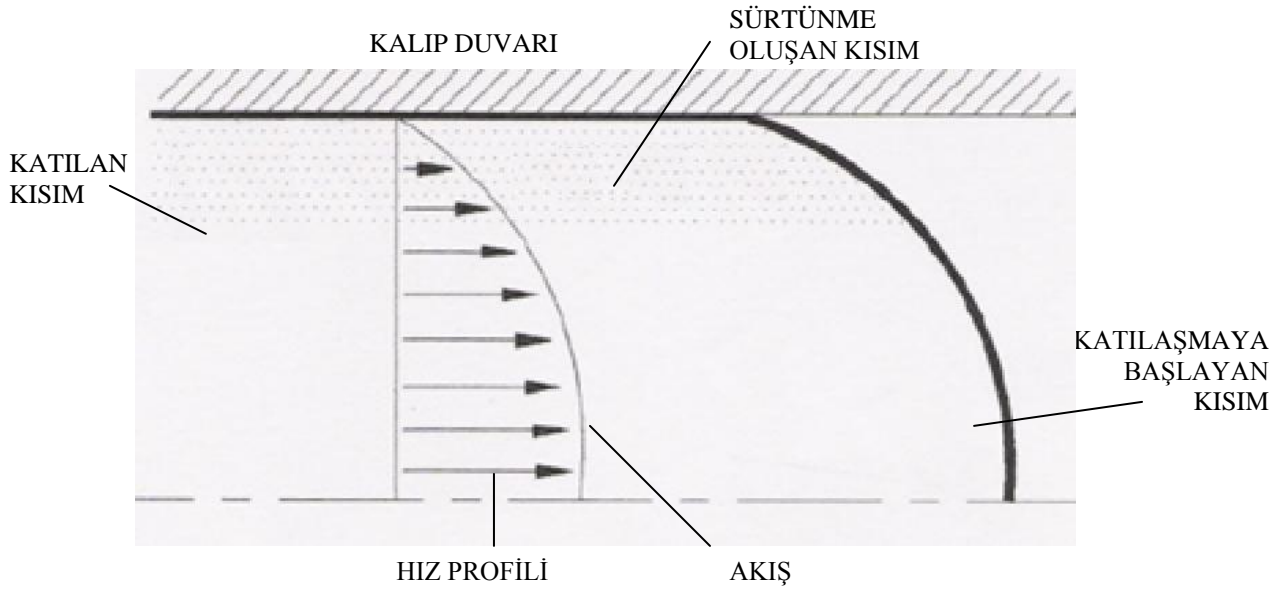
Mengene ünitesi kalıp kapama, açma, ürünü dışarı çıkarma, ve enjeksiyon sırasında oluşan açma kuvvetine karşı koyma gibi fonksiyonları vardır.

### 2.1.3 Kontrol Ünitesi

Enjeksiyon makinesinin bir diğer önemli ünitesi kontrol ünitesidir. Optimizasyon sonucu kullanılacak iç ve dış parametrelerin bazıları direk bu üniteden de yapılmaktadır. Son yıllarda teknolojik gelişmeler değişik kontrol panelleri geliştirmiştir.

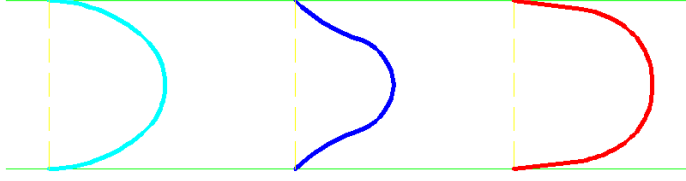
## 2.2. Plastik Enjeksiyon İşleminde Akış

Plastik akışı etkileyen en önemli etkenler yolluk tasarımı, yolluk çapı, kalıba giriş şekil geometrisi, kalıbın soğutma çevrimleri için kalıp etrafında tasarlanan su kanalları ortam şartları modelin geometrik pozisyonu ve ortam koşulları gibi çeşitli enjeksiyon parametreleridir. Erimiş plastik malzemenin kalıp içinde ilerlemesi için hızı, basıncı, sıcaklığı değiştirilerek akış optimize edilebilir.



Şekil 2.4. Erimiş plastiğin kalıp içindeki akış gösterimi

Malzemenin kalıba enjeksiyonu düşük hızda başlar. Kalıp içinde ortalama sıcaklığın sabit tutulması oldukça önemlidir, ani değişimler malzeme istenmeyen durumlar çarpılmalar oluşturulabilir. Enjeksiyon zamanı kısa tutulursa sıcaklık malzeme bitiş noktalarına gelindiğinde sürtünmenin de etkisiyle enjeksiyon sıcaklığını geçebilir. Zaman iyi ayarlanırsa sürtünmeden kaynaklanan bir sıcaklık dalgalanması olmaz.



**Şekil 2.5.** İzotermal profil, soğuma ve ısıtma hız kesitleri

**Şekil 2.5.** teki hız profillerinden de görüldüğü gibi akış için sıcaklıkların dengeli olması gerekmektedir. Akış sıcaklığı ile kalıbın duvar sıcaklıkları arası dalgalanmaya izin vermeyecek değerlerde olmalıdır. Isınma ile soğuma hız profiline farklı yol almasından görülmektedir.

En yüksek hız gradyanı katılaşmaya başlayan bölgede olmaktadır. Bu bölgede viskozite değeri maksimum seviyededir. Hız gradyanının en yüksek olduğu donmuş bölgede eriyik malzeme, moleküllerinin ya da katılmış katkı maddelerinin akış doğrultusunda oryantasyonunu sağlayan büyük sürülme değeriyle karşılaşır. (17)

Viskoelastik akış özelliği gösteren malzeme de kalıp içindeki yapışarak ilerlemesi şeklinde oluşan sürtünme kuvveti kayma gerilmesi meydana getirir. Kayma gerilmesi dinamik viskozite ile hız değişiminin çarpımına eşittir.

Kayma gerilmesi,

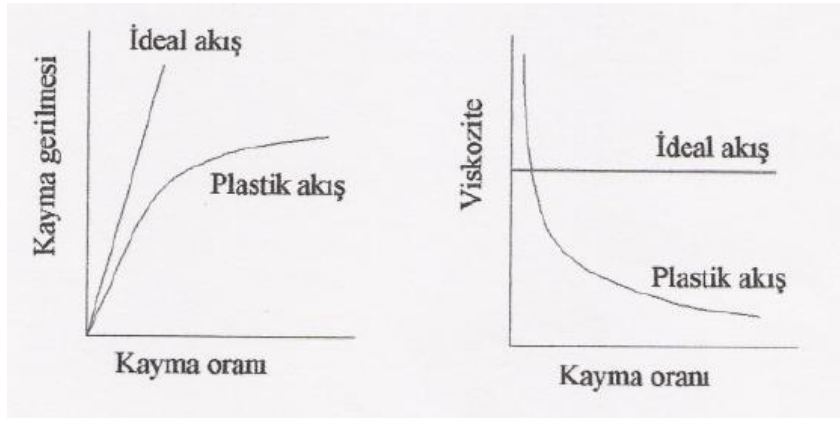
$$\tau = \mu \left( \frac{du}{dy} \right) \quad (2.1)$$

Sürülme hızı ( kayma oranı ) o bölgedeki hız değişiminin birim kalınlığa oranı şeklinde ifade edilebilir.

Sürünme hızı

$$\gamma = \frac{\partial v}{\partial y} = \frac{v}{y} \quad (2.2)$$

Kayma gerilmesi, kayma oranı ve viskozite arasındaki ilişki şekil 2.6. da verilmiştir.



Şekil 2.6. Kayma gerilmesi ve viskozitenin kayma oranı ile değişimi

## 2.3. Malzemelerin Mekanik Davranışları

### 2.3.1. Elastik Davranış

Elastik davranış, bir cisimde yükleme sırasında meydana gelen şekil değiştirmelerin, yük kaldırıldığında tamamen kayboldukları davranış olarak tanımlanır. Elastik davranış küçük (metaller) ve oldukça büyük (polimerler, elastomerler) şekil değiştirmeleri kapsamaktadır. Klasik mekanik biliminde, gerilme( $\sigma$ )-gerinim( $\epsilon$ ) arasındaki bağıntılara konstitütif (malzemelerin

özelliklerini ihtiva eden) bağıntılar denilmektedir. Elastik davranışın en basit konstitütif denklemi lineer olup,

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (2.3)$$

şeklinde ifade edilen Hooke kanunu bağıntısıdır. Denklem 2.3'deki E, malzemelerin katılığının ölçütü diye tanımlanan elastiklik veya Young modülüdür.

### 2.3.2. Viskoelastik Davranış

Viskoelastik malzemelerin en belirgin özellikleri, aynı anda hem elastik hem de zamana bağlı şekil değişimi göstermeleridir. Viskoelastik davranış, sabit gerilme altında gerinimdeki sürünme (creep) ve sabit gerinim altında gerilmadaki gevşeme (relaxation) olmak üzere iki şekilde meydana gelmektedir. Başka bir ifadeyle, *sürünme* sabit bir gerilmenin etkisi altında, malzemenin sürekli olarak şekil değiştirmesi veya gerinim göstermesi; *gevşeme* ise belirli bir şekil değiştirme veya gerinim halinde bulunan malzemedeki gerilmelerin sürekli olarak azalması olarak ifade edilir.

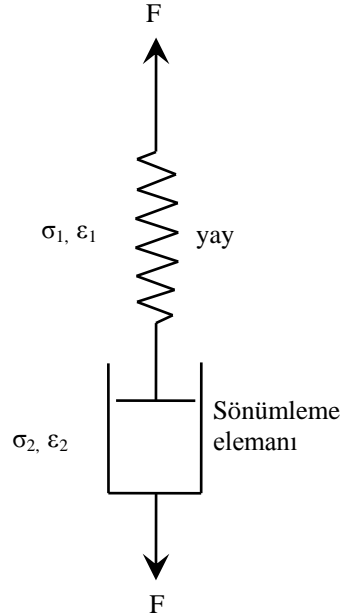
Viskoelastik malzemelerin davranışını tayin etmek için çeşitli modeller teklif edilmiştir. Bunlardan en basiti bir yay ve bir sönümlenme elemanına dayanmaktadır; yay malzemenin elastik özelliğini, sönümlenme elemanı ise akışkan özelliğini yansıtmaktadır. Yay ve sönümlenme elemanının seri şeklinde tertiplenmesi *Maxwell*, paralel şekilde tertiplenmesi *Kelvin-Voigt* modelini oluşturmaktadır.

### 2.3.2.1. Maxwell modeli

Bu model malzemenin gevşeme davranışını deneylere uygun olarak modelleyebilmektedir (Şekil 2.7.) Sisteme bir F kuvveti tatbik edildiği durum da yay,  $\sigma_1 = E \varepsilon_1$  ve sönümlenme elemanı  $\sigma_2 = \eta \cdot \dot{\varepsilon} = \eta \cdot (d\varepsilon/dt)$  bağıntılarına göre bir şekil değıştirme gösterecektir. Benzerliği sağlamak için burada  $\tau = \eta \cdot \gamma$  yerine  $\sigma = \eta \dot{\varepsilon}$  (Newton akış kanunu) konulmuştur. Elemanlar seri halde bulunduğundan gerilmeler her iki elemanda da eşit  $\sigma = \sigma_1 = \sigma_2$ ; ancak sistemin toplam şekil değıştirmesi, elemanların şekil değıştirmelerinin toplamı, yani  $\varepsilon_t = \varepsilon_1 + \varepsilon_2$  olacaktır. Son denklem

$$d\varepsilon_t/dt = d\varepsilon_1/dt + d\varepsilon_2/dt \quad (2.4)$$

ve  $\varepsilon_1 = E/\sigma$  bağıntısı ile  $d\varepsilon_1/dt = (1/E) \cdot d\sigma/dt$  şeklinde yazılırsa,  $d\varepsilon_2/dt = \sigma/\eta$  değeri ile (2.4) denkleminde,



Şekil 2.7. Maxwell modeli.

$$d\varepsilon_t/dt=(1/E).d\sigma/dt+\sigma/\eta \quad (2.5)$$

bulunur. Yukarıdaki denklemlerde  $\eta$  viskoziteyi,  $d\varepsilon_t/dt$  Toplam gerinim hızıdır. Denklem 2.5 bağıntısına Maxwell modeli için gerilme-gerinim denklemi denilmektedir. Bu modelin viskoelastik malzemeyi ne ölçüde ifade ettiğini belirlemek için iki ayrı durumu incelemek gerekir.

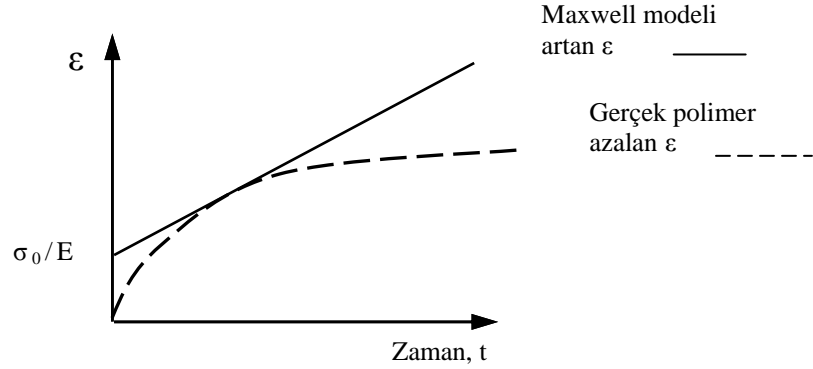
**a) Sürünme (Creep):**

$\sigma=\sigma_0 =$  sabit olduğundan,  $d\sigma/dt=d\sigma_0/dt=0$ 'dır.

$$\varepsilon =(1/E).0+\sigma_0/\eta \quad \text{ve} \quad d\varepsilon_t/dt=\sigma_0/\eta$$

$\varepsilon(t)=(\sigma_0/\eta).t$  bulunur.

Ayrıca  $t=0$ 'da  $\varepsilon_0= \sigma_0/E$ ' dir.



Şekil.2.8. Sürünmede gerinim-zaman diyagramı (Maxwell modeli).

Yukarıdaki grafikten de anlaşılacağı üzere malzemede sürünme durumu yani sabit bir gerilme mevcut iken Maxwell modeli zamanın artması durumunda malzemenin uzama eğrisinden uzaklaşmaktadır. Bu durum Maxwell modelinin

uzun zamanlı sürünme durumunda gerçekten saptığını ve doğru bir yaklaşım vermediğini göstermektedir.

### b) Gevşeme (Relaxation)

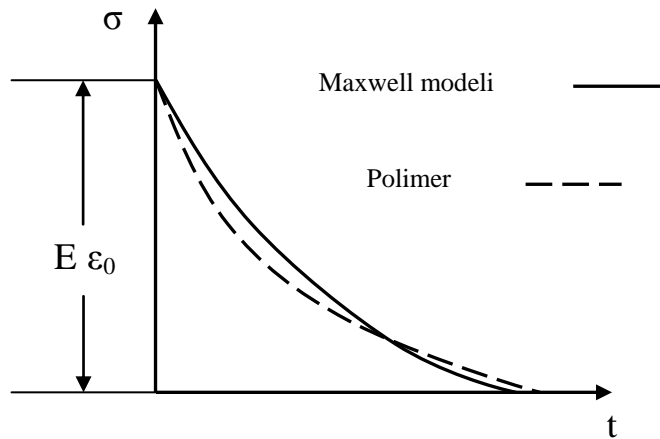
$\varepsilon_t = \varepsilon_0 = \text{sabit}$  yani  $d\varepsilon_0/dt=0$  olduğu dikkate alınırsa, 2.5 denklemini  $(1/E)d\sigma/dt + \sigma/\eta = 0$  halini alır.  $t=0$  için  $\sigma = \sigma_0$  koşulunda integral alındığında,

$$\sigma(t) = \sigma_0 \cdot e^{-(E/\eta)t} \quad (2.6)$$

veya  $t_r = \eta/E$  ifadesi ile

$$\sigma(t) = \sigma_0 \cdot e^{-t/t_r} \quad (2.7)$$

elde edilir. Burada  $\sigma_0$  başlangıçtaki gerilmedir ve  $t_r$  değerine gevşeme zamanı denir.



Şekil 2.9. Gevşemede gerilme-zaman diyagramı (Maxwell modeli)

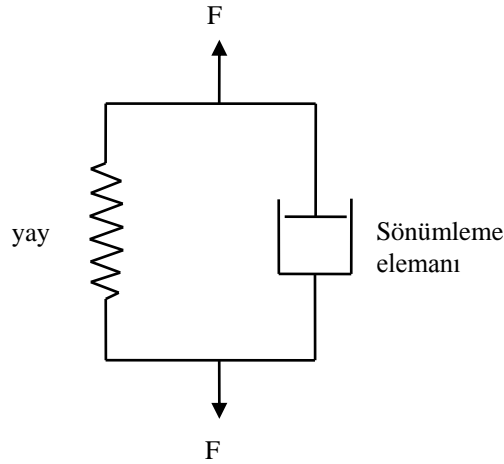


Gerilme zaman diyagramından da anlaşılacağı gibi Maxwell modeli sabit gerinimde malzemenin davranışını oldukça iyi bir şekilde yansıtmaktadır. Bu durumda Maxwell modeli için, viskoelastik bir malzemenin gevşeme halini gerçeğe çok yakın bir şekilde modelleyebilmekte ancak sürünme durumunu zaman arttıkça doğru modelleyememektedir, denebilir.

### 2.3.2.2. Kelvin-Voigt modeli

Bu modelde yay ve sönümlenme elemanları Şekil 2.10'da gösterildiği gibi paralel şekilde tertiplenmektedir. Sisteme bir kuvvet uygulandığında, elemanların şekil değiştirmeleri eşit ( $\epsilon = \epsilon_1 = \epsilon_2$ ) ve sistemin toplam gerilmesi elemanlarda meydana gelen gerilmelerin toplamı, yani  $\sigma = \sigma_1 + \sigma_2$  dir.  $\sigma_1 = E \cdot \epsilon$  ve  $\sigma_2 = \eta \dot{\epsilon} = \eta(d\epsilon/dt)$  ifadeleri ile

$$\sigma = E \cdot \epsilon + \eta(d\epsilon/dt) \quad (2.8)$$



Şekil 2.10. Kelvin-Voigt modeli.

elde edilir. 2.8 denklemini Voigt-Kelvin modelinin gerilme-gerinim denklemdir.

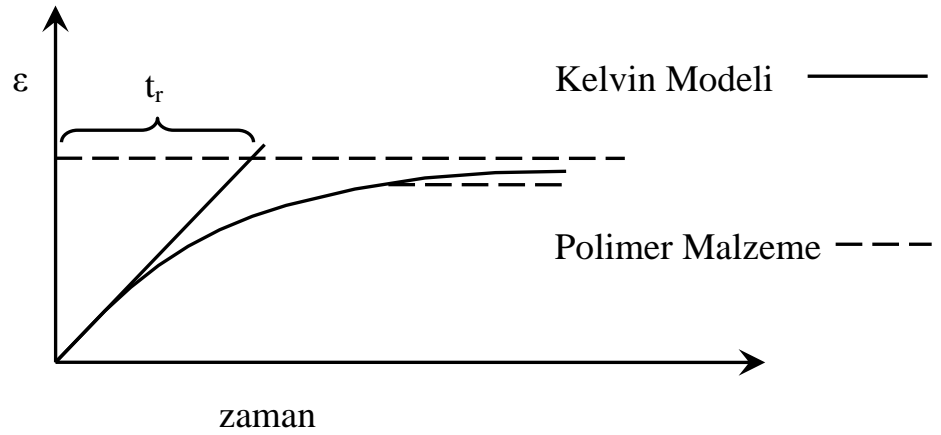
Bu modelin bir viskoelastik malzemeyi ne ölçüde ifade ettiğini belirlemek için aynı şekilde iki ayrı durumu incelemek gerekmektedir.

**a) Sürünme (creep):**

$\sigma = \sigma_0 =$  sabit olduğu dikkate alınır ve (2.8) denklemi  $t=0$ ,  $\varepsilon=0$  koşulunda integrali alınır.

$$\varepsilon(t) = (\sigma_0/E)(1 - e^{-(E/\eta)t}) = (\sigma_0/E) (1 - e^{-t/t_r}) \quad (2.9)$$

(2.9) bağıntısı elde edilir. Burada  $t_r = \eta/E$  gecikme zamanı adını alır. (2.9) bağıntısına göre, sisteme bir  $\sigma_0$  gerilmesi uygulandığında şekil değiştirmeler ani değil de  $t_r = \eta/E$  gecikme zamanına bağlı olarak yavaş yavaş büyümektedir.



**Şekil 2.11.** Sürünmede gerinim-zaman diyagramı (Kelvin-Voigt modeli).

Şekil 2.11'den de görüldüğü üzere Kelvin-Voigt modeli viskoelastik bir malzemenin sürünme davranışını oldukça iyi bir şekilde modelleyebilmektedir. Burada  $t \rightarrow \infty$  olduğunda Kelvin-Voigt modeli  $\varepsilon = \sigma_0/E$  değerini vermektedir.

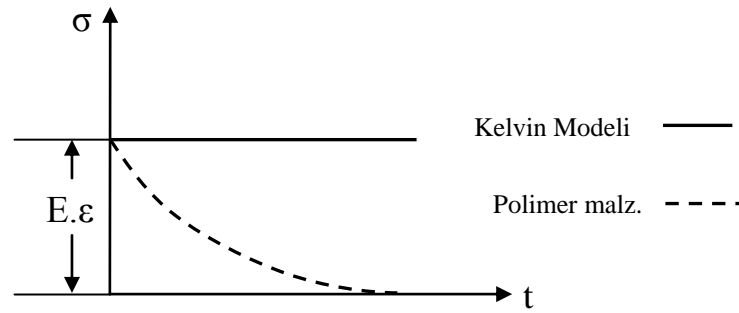
**b) Gevşeme (Relaxation):**

$\varepsilon = \varepsilon_0 = \text{sabit}$  ve  $d\varepsilon / dt = 0$  olacağından bu durumda (2.8) denklemi, (2.3)'deki gibi,

$$\sigma = E.\varepsilon \quad (2.10)$$

(2.10) denklemi haline gelir. (2.10) denklemi aslında elastik bir malzemenin gerilme-gerinim denklemini vermektedir. Ama bu denklemin aynı zamanda viskoelastik bir malzemenin gevşeme halini anlattığı gözden kaçmamalıdır.

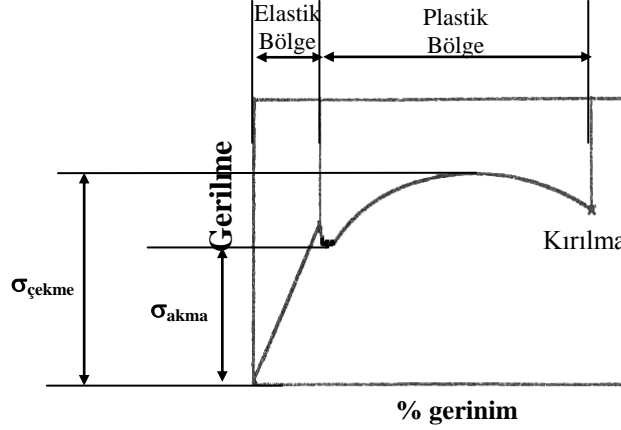
Sonuç olarak, Kelvin-Voigt modelinin sürünme halini gerçeğe yakın modellediği ancak gevşeme olayını gerçekten uzak bir şekilde modellediği söylenebilir.



**Şekil 2.12.** Gevşemede gerilme-zaman diyagramı (Kelvin-Voigt modeli).

### 2.3.3. Elastik-Plastik davranış

Elastik-plastik davranış; bir cisimde yükleme sırasında meydana gelen şekil değiştirmelerin, yük kaldırıldığında kaybolmadıkları davranış olarak tanımlanır. Malzemede elastik bölge aşıldığında plastik şekil değişimi başlar.



Şekil 2.13. Mühendislik çekme diyagramı.

Basit çekmede, plastik alanda, çekme eğrisinin maksimum noktasından önce herhangi bir noktadaki toplam şekil değiştirme, elastik bileşen ile plastik bileşenin toplamından ibarettir. Sonsuz küçük bir gerininin ( $d\varepsilon$ ) plastik bileşeni  $d\varepsilon^P$  ile gösterilirse,  $d\varepsilon^P$  miktarı ile gerilmeler arasındaki bağıntılar akış denklemleri olarak anılır. Bu denklemler aşağıda asal gerilmeler ve asal gerilme doğrultularında oluşan asal plastik gerinim bileşenleri cinsinden verilmiştir.

$$d\varepsilon_1 = d\varepsilon_1^P = \frac{d\bar{\varepsilon}}{\bar{\sigma}} \left[ \sigma_1 - \frac{1}{2}(\sigma_2 + \sigma_3) \right]$$

$$d\varepsilon_2 = d\varepsilon_2^P = \frac{d\bar{\varepsilon}}{\bar{\sigma}} \left[ \sigma_2 - \frac{1}{2}(\sigma_3 + \sigma_1) \right] \quad (2.11)$$

$$d\varepsilon_3 = d\varepsilon_3^P = \frac{d\bar{\varepsilon}}{\bar{\sigma}} \left[ \sigma_3 - \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_2) \right]$$

Denklem 2.11. yardımıyla malzemelerin plastik bölgede maruz kaldığı gerilme veya gerinim adımı yaklaşık olarak hesaplanabilmektedir.

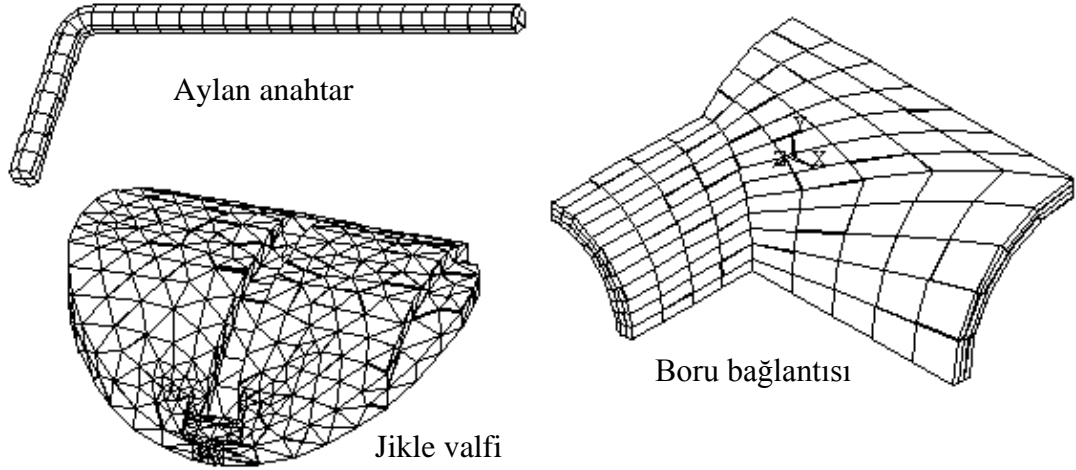
#### 2.3.4. Elastik-viskoplastik davranış

Viskoplastiklik, plastik davranışının zamana veya gerinim hızına bağlı olarak değiştiği malzemeleri modellemede kullanılmaktadır. Perzyna (18), Peirce (19) veya Anand (21) modellerinden, Perzyna ve Pierce modelleri ortam sıcaklıklarındaki viskoplastikliği, Anand modeliye metallerin yüksek sıcaklıklardaki sürünme durumunu modellemekte kullanılmaktadır.

#### 2.4. Bilgisayar Modellemesi

Bilgisayar modelleme aracı olarak SEM yönteminin uygulanacağı, Giriş bölümünde belirtilmiştir. SEM, karmaşık nonlinear problemlerin daha basit lineer duruma indirgenerek çözüldüğü bir sayısal analiz yöntemidir. SEM'in kullanılması ve bilgisayarların sanayiye girmesiyle, bugüne kadar ancak pahalı deneysel yöntemlerle incelenebilen bir çok yapının kolayca incelenebilmesi mümkün olabilmektedir.

SEM’de kompleks yapı, *sonlu eleman* denilen küçük parçalara bölünür. Şekil 2.14’de üç ve dört düğümlü sonlu elemanlara bölünmüş örnek makina elemanları gösterilmektedir.



**Şekil 2.14.** Örnek sonlu elemanlar.

Problemin çözümü bu elemanlar bazında tahmin edilir. Analizin sonucu genellikle yapıdaki gerilme ve deplasman dağılımları şeklindedir. SEM ile problem çözümünde aşağıdaki adımlar takip edilir:

1. Problem tanımlanır. Yapı ve üzerindeki yüklemeler çizilir.
2. Yapının şekli modellenir.
3. Oluşturulan model elemanlara bölünür.
4. Modele sınır koşulları (yük ve deplasmanlar) uygulanır.
5. Elemanlar arası bağıntılardan çıkan denklemler çözülür.
6. Sonuçlar incelenir.

1, 2, 3 ve 4 adımlarına analiz öncesi (preprocessing), 5. adıma analiz (solution) ve 6. adıma da analiz sonrası (postprocessing) aşamalar denir.

Bir çok sonlu eleman (2 boyutlu Üçgen, dörtgen, 3 boyutlu küp, piramit vs.) türü mevcuttur. Elemanların deplasmanları elemanların köşelerinde yer alan düğüm noktalarının deplasmanlarından ve elemanların yüzeyleri için tanımlanan ve deplasman fonksiyonları denilen basit polinomlardan elde edilir.  $u(x, y)$  ve  $v(x, y)$ , düğümün sırasıyla  $x$  ve  $y$  koordinatları cinsinden yatay ve düşey yöndeki deplasmanları olmak kaydıyla, 3 düğümlü ve 2 boyutlu üçgen bir sonlu eleman için deplasman fonksiyonu:

$$\begin{aligned} u(x, y) &= A_0 + A_1 x + A_2 y \\ v(x, y) &= A_3 + A_4 x + A_5 y \end{aligned} \quad (2.12)$$

ve örneğin 4 düğümlü dörtgen bir eleman için ise:

$$\begin{aligned} u(x, y) &= A_0 + A_1 x + A_2 y + A_3 x y \\ v(x, y) &= A_4 + A_5 x + A_6 y + A_7 x y \end{aligned} \quad (2.12)$$

şeklinde verilebilir. 2-B'taki gerinimler;

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{\partial u}{\partial x} \\ \varepsilon_y &= \frac{\partial v}{\partial y} \\ \gamma_{xy} &= \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \end{aligned} \quad (2.14)$$

şeklinde tanımlanır.

Bu denklemler matris;

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \partial/\partial x & 0 \\ 0 & \partial/\partial y \\ \partial/\partial y & \partial/\partial x \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u \\ v \end{Bmatrix} \quad (2.15)$$

veya vektörel;

$$\varepsilon = D \vec{u} \quad (2.16)$$

şeklinde verilebilir.  $u$  ve  $v$  deplasman vektörlerinin,  $u_n(x_n, y_n)$  ve  $v_n(x_n, y_n)$

$n = 1, 2, 3, \dots$ , düğüm deplasmanları cinsinden gösterimi ise,

$$\begin{Bmatrix} u \\ v \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} N_1 & 0 & N_2 & 0 & \dots \\ 0 & N_1 & 0 & N_2 & \dots \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ u_2 \\ v_2 \\ \cdot \end{Bmatrix} \quad (2.17)$$

veya vektörel olarak

$$\vec{u} = N \vec{d} \quad (2.18)$$

şeklinde yazılabilir.  $N$  *şekil fonksiyonu matrisi*,  $\vec{u}$  *deplasman matrisi* ve  $\vec{d}$  *düğüm deplasmanları vektörü* olarak adlandırılır. Bu durumda gerinimler;



$$\varepsilon = D\vec{u} = DN\vec{d} = B\vec{d} \quad (2.19)$$

şekline dönüşür.  $B = DN$  matrisine *gerinim-düğüm deplasmanları matrisi* denir.

Elastik deformasyon söz konusu olduğunda, yapıdaki  $\sigma$  gerilmeleri ile  $\varepsilon$  gerinimleri arasında, 2 boyut ve düzlem gerinim düşünülecek olursa,

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & 0 \\ \nu & 1-\nu & 0 \\ 0 & 0 & (1-2\nu)/2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \quad (2.20)$$

veya denklem 2.3'de verildiği gibi,

$$\sigma = E\varepsilon \quad (2.21)$$

şeklindeki *Hooke Kanunu* bağıntısı vardır.  $E$  matrisine *elastik gerilme-gerinim matrisi* denir. Bu durumda gerilmeleri, bilinmeyen düğüm deplasmanları cinsinden yazabiliriz:

$$\sigma = EB\vec{d} \quad (2.22)$$

Deplasmanlar, *Virtüel İş Prensibinden* (uygulanan sanal dış kuvvetlerin yapı üzerine yaptığı işin, dolayısıyla yapıda depolanan elastik gerinim enerjisine eşit olduğu yaklaşımı) hesaplanır. Elastik gerinim enerjisinin birim hacimdeki değeri, Gerilme-Gerinim diyagramının elastik kısmının altındaki alana eşittir. Böylece, depolanan toplam gerinim enerjisi:

$$\begin{aligned}
U &= \frac{1}{2} \int_V \boldsymbol{\sigma}^T \boldsymbol{\varepsilon} dV = \frac{1}{2} \int_V (\sigma_x \varepsilon_x + \sigma_y \varepsilon_y + \tau_{xy} \gamma_{xy}) dV \\
U &= \frac{1}{2} \int_V (\mathbf{E} \boldsymbol{\varepsilon})^T \boldsymbol{\varepsilon} dV = \frac{1}{2} \int_V \boldsymbol{\varepsilon}^T \mathbf{E} \boldsymbol{\varepsilon} dV = \frac{1}{2} \vec{d}^T \int_V \mathbf{B}^T \mathbf{E} \mathbf{B} dV \vec{d}
\end{aligned} \tag{2.23}$$

bağıntılarından hesaplanabilir. Uygulanan  $\vec{F}$  dış kuvvetlerinin yapı üzerine yaptığı toplam  $W$  işi:

$$W = \frac{1}{2} \vec{F} \vec{d} \tag{2.24}$$

'dir.  $W = U$  bağıntısından:

$$\frac{1}{2} \vec{F} \vec{d} = \frac{1}{2} \vec{d}^T \int_V \mathbf{B}^T \mathbf{E} \mathbf{B} dV \vec{d} \tag{2.25}$$

veya sadeleşmeden sonra

$$\vec{F} = \int_V \mathbf{B}^T \mathbf{E} \mathbf{B} dV \vec{d} \tag{2.26}$$

elde edilir.

$$K = \int_V \mathbf{B}^T \mathbf{E} \mathbf{B} dV \tag{2.27}$$

değerine *direngelik matrisi* denir. Bu durumda

$$\vec{F} = K \vec{d} \quad (2.28)$$

denklemler sistemi elde edilir. Sınır koşullarının uygulanmasından sonra uygun bir nümerik yöntemle denklemler sistemi bilinmeyen deplasmanlar için çözülür. Daha sonra gerinim ve sonra da gerilmeler bulunur.

SEM'in en zor ve zaman alıcı kısmı ön analiz aşamasıdır. Modelin ve sonlu eleman ağının oluşturulması, doğru yük ve sınır koşullarının konması bu aşama için gereken adımlardır. Ağ'ın otomatik oluşturulması, ağ'ın analiz için en uygunu olacağını gerektirmez. Gerçek probleme denk gelecek sınır koşullarını belirleyip bunları modele uygulamak kolay değildir. Bununla birlikte, SEM analiz aşaması otomatik gerçekleştirilir. Analiz sonrası aşama ise güçlü görsel efektlerle desteklenebilir.

SEM'in lineer olmayan problemler için de güçlü bir analiz aracı olduğunu belirtmek gerekir. Şekil bazında nonlinear olabilecek yapılarda, sehimlerin büyük oranlara çıktığı durumlarda ve dolayısıyla sehimlerin küçük olduğu farz edilerek ihmal edilen ikinci dereceden terimlerin de hesaba katılması gerekir. Malzeme bazında nonlinear olabilecek yapılarda ise malzemenin mekanik davranışındaki nonlinear durum ele alınır. Malzemenin akmaya uğradıktan sonraki halinin nonlinear olduğu ve gerilme ve gerinimin doğrusal bir bağıntıyla birbirine bağımlı olmadığı bilinmektedir. Nonlinear problemler uygulanan toplam yükün parçalara bölünüp adımsal olarak uygulanmasıyla çözülür. Bu yaklaşım problemin lineerleştirilmesi anlamına gelmektedir. Her bir yük adımında, malzemenin gerilme-gerinim

diyagramının davranışına ve yapıda meydana gelen gerilme düzeyine bağlı olarak etken elastisite modülü değişir. Her bir adımda ulaşılan gerilme düzeyine bağlı olarak direngenlik matrisi de değişir. Sonlu elemanlar analizinde bu matrisin köşegen elemanlarının negatif veya çok büyük olması engellenir. Aksi takdirde analizde nümerik hatalarla veya salınmalarla karşılaşılabilir.

## **2.4. Paket Programları**

### **2.4.1. Ansys® Paket Programı**

Sonlu elemanlar analizinde problem teşkil eden herhangi bir yapı, eleman denilen küçük kısımlara bölünür ve bir bilgisayar programı aracılığı ile matris hesaplamaları kullanılarak analiz edilir. Ansys® (21) çeşitli uygulama alanlarında, SEM analizi yapan bir paket programıdır. Ansys başka bir çok SEM paket programı gibi, pahalı üretimler ve deneyler olmaksızın bir tasarım mühendisinin, modelinin ısı, mekanik vb. davranışlarını görebilmesine imkan tanır ve bunun neticesinde ürün geliştirme maliyetini azaltır. Bu paket programı, tez çalışmasının yürütüldüğü ortamda kendisine erişebilme imkanının olmasının yanında, kalıp ve şekillendirilecek yakıtın nonlineer mekanik davranışlarını ve kontakt arayüzeylerini modelleyebilecek ve daha sonra animasyonlarını yapabilecek araçları içinde barındırdığından dolayı seçilmiştir.

Herhangi bir problem Ansys paket programında analiz edilirken önemli bir kısım adımlara dikkat etmek gerekmektedir. Bunların başında model boyutları, ısı ve malzeme özellikleri tanımlanırken doğru birim sisteminin kullanılmasıdır. Yanlış birimler, yalnız malzeme davranışını etkilemez, ayrıca elde edilecek sonuçlarda da

hatalara neden olabilir. Bu amaçla boyutlar milimetre (mm) ve kuvvetler Newton (N) olarak alınmış olup, standart olarak kabul edilen diğer bütün birimler bu temel iki birim cinsine dönüştürülmüştür. Bunun yanında sonuçların hassas olması açısından sonlu eleman ağının kritik kabul edilebilecek kesit değişim bölgelerinde daha yoğun olması sağlanmalıdır.

#### **2.4.2. Cadmould® ve Mouldflow® Paket Programları**

Plastik sektörü diğer her geçen gün büyümektedir birçok metal ve alaşımlarının yerini plastik malzemelere bırakmaktadır. Plastik sektörü beraberinde yeni kapılar açmıştır. Üretilen plastik malzemeli ürünlerin kalite, dayanım, yüzey kalitesi, mukavemet, ortam koşullarına dayanım gibi istenilen özellikleri de sağlaması için üretimden önce bilgisayar destekli sanal ön imalat ve sanal ön imalat izlemesine ihtiyaç duyulmuştur.

Plastik malzemedan imal edilecek ürün için iyi bir çalışma yapmak gerekir maliyetleri azaltmak verimi artırmak istenilen özelliklerde mamul almak için kalıp tasarımı yapmak çok önemlidir. Bir plastik enjeksiyon kalıbının tasarlanması bir plastik ürünün meydana gelmesindeki en kritik safhalardan biridir. Bunun için plastik enjeksiyon kalıp tasarımı işlemi çok iyi bilgi, beceri ve tecrübeye sahip olmayı gerektirmektedir. Bu öğrenme zorluğundan dolayı tasarım işlemini profesyonel olarak yapan kişi sayısı çok azdır. Bu zorluğu kolay hale getirecek yöntemler hiç kuşkusuz bilgisayar destekli tasarım programlarından ve plastik enjeksiyon analiz programlarından faydalanmaktır. Şu anda sanayide ve araştırma çalışmalarında en çok kullanılan plastik enjeksiyon analiz programları MOULDFLOW PLASTIC ADVISER(MPA) ve CADMOULD programlarıdır. (21,23)

Bir plastik akış analizi yapmak için plastik malzemenin ve enjeksiyon giriş noktasının belirlenmiş olması gerekmektedir. Sıcaklık ve basınç gibi diğer özellikler malzemenin özelliğine göre otomatik olarak ekrana yansır. Eğer istenirse bu değerleri değiştirmek de mümkündür. Analizlerde dolum güvenliği, dolum süresi, enjeksiyon basıncı, çatlaklar, hava boşlukları gibi parçada oluşabilecek hatalar belirlenebilir. Belirlenen bu hatalara göre üretim şartlarında değişiklikler yapılarak minimum hatalı bir ürün elde etmeye çalışılır. Şüphesiz bu durum hem maliyetten hem de zamandan tasarruf sağlayacaktır. Analizler için işlem basamakları aynıdır.

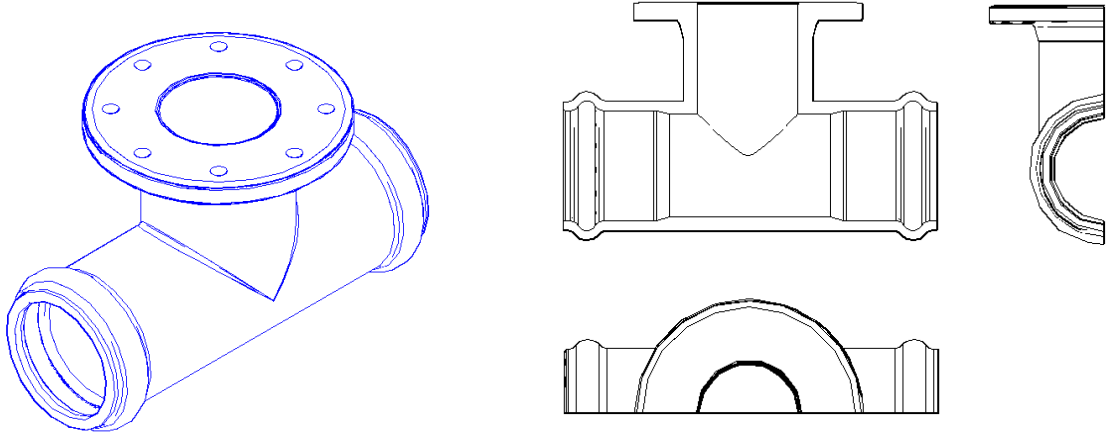
- Parçanın CAD sisteminde modellenmesi ve formatının değiştirilmesi
- Modelin açılması, malzeme seçimi
- Enjeksiyon giriş nokta sayısı ve yerinin belirlenmesi
- Parametrelerin ve malzeme bilgilerinin girilmesi
- Analiz tipinin seçilmesi analizin yapılması ve sonuçların incelenmesi.

Değişik dosya türleri farklı program için farklı sonuçlar verir. Plastik enjeksiyon işlemi için “Stl” dosya formatına sahip uzantılarda MOULDFLOW ve CADMOULD programları daha salıklılı sonuçlar vermektedir.

### 3. ARAŞTIRMA BULGULARI

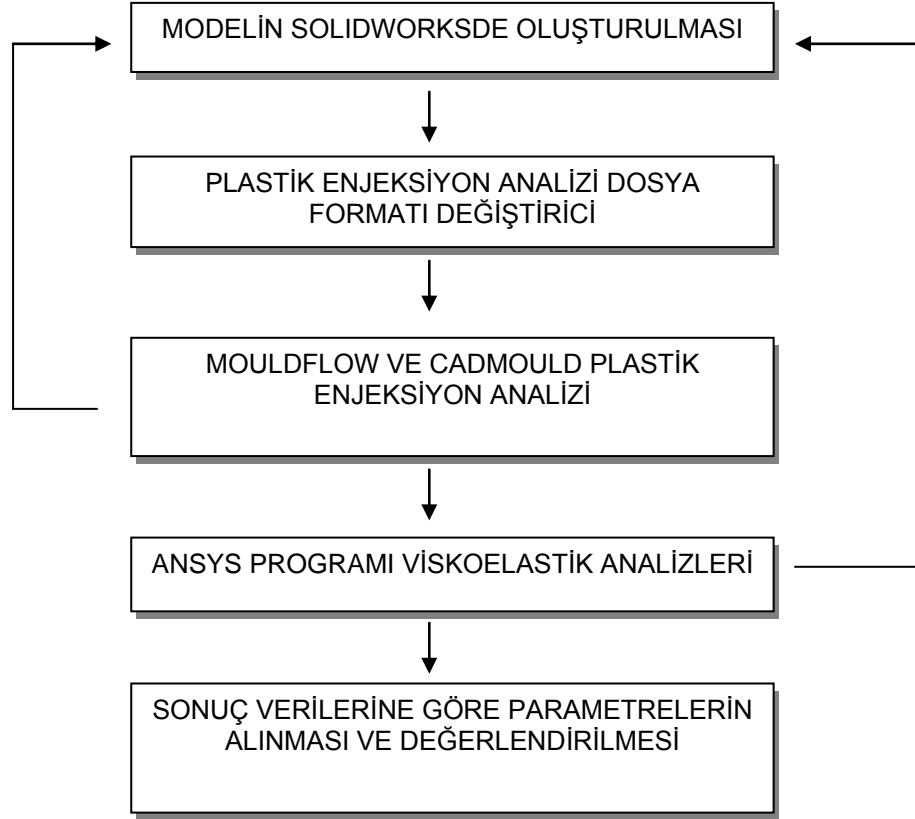
#### 3.1. Modelleme

Mekanik tesisat alt yapı sistemlerinde kullanılan “Flanşlı T” ara bağlantı elemanının geometrisi, TSE tarafından belirlenmiş olan standartlara uygun olacak şekilde yapılmıştır (24).



**Şekil 3.1.** Ara Bağlantı Elemanı modeli

Modelleme seyri, Solidworks Programında katı modelinin oluşturulması ile başlamış, daha sonra Mouldflow ve Cadmould Plastik Enjeksiyon Programlarında enjeksiyon işleminin yapılması ile devam etmiş ve son olarak Ansys Paket Programında modelin basınç dayanımı incelenmiştir. Bu işlemlerden üç kez modelin optimizasyonunun gerçekleşmesi için tekrarlanmıştır. Bu işlemler **şekil 3.2** de dögüsel olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Modellemenin Seyri

### 3.2. Flanşlı T Ara Bağlantı Elemanının Plastik Enjeksiyon Modeli

Tasarımı yapılmış parça modeli ilk olarak farklı programlarda farklı işlemler göreceği için etkileşimin olması için aynı kaynaktan farklı dosya formatlarına dönüştürülmesi gerçekleştirilmiştir. Dosya formatları istenilen türde seçilmezse analiz için tanımlama sorunları yüzünden sağlıklı verilerin alınmaması ile sonuçlanır.

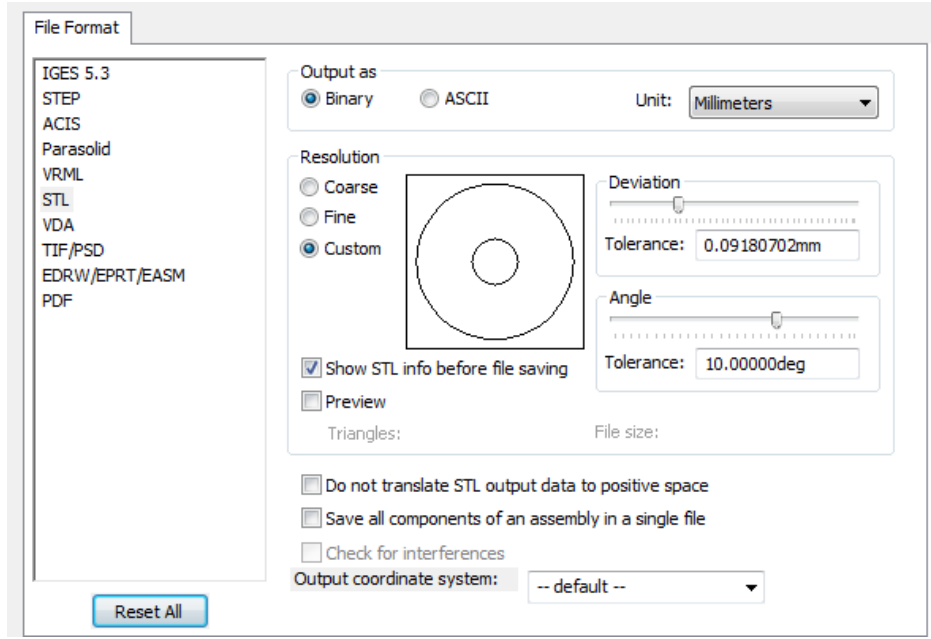


Solidworks programının dosya format dönüştürücü modülü ile istenilen formatlara çevrilmiştir.

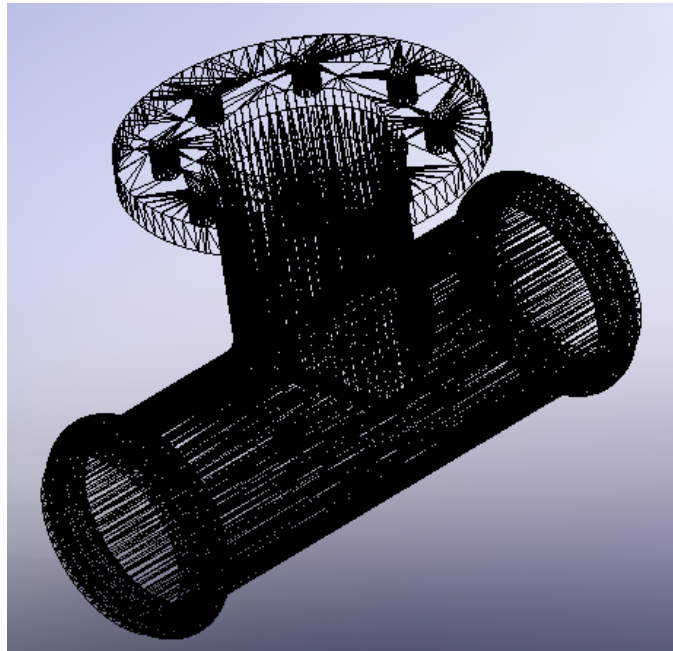


**Şekil 3.3.** Elemanın katı modeli

Şekil 3.3.'de de görülmekte olan SolidWorks programında 3 boyutlu modellenen parça şekil 3.4.'de gösterilen dosya formatı değiştirme ekranından \*.Stl formatına getirilmiş ve bu format ile Cadmould ve Mouldflow programlarından çağrılarak kullanılmıştır.



Şekil 3.4 SolidWorks format değiştirme penceresi.



Şekil 3.5. Modelin \*.Stl formatındaki görünümü

Katı modeli SolidWork programında çizilmiş flanşlı T ara bağlantı elemanının plastik enjeksiyon işlemi için Mouldflow ve Cadmould programlarında plastik enjeksiyon analizleri yapılmıştır.

### 3.2.1. Modelin Malzeme Verileri

Plastik enjeksiyonu modellenecek olan ara bağlantı elemanının malzemesi termoplastik bir polimer olan polietilen olarak seçilmiştir. Polietilenin malzeme özellikleri Mouldflow Plastik Enjeksiyon Programı yardımıyla bulunmuş ve **şekil 3.6.** de gösterilmiştir.

General	Recommended Processing	Rheological	Thermal	PVT	Mech
Melt density	0.73817	g/cm <sup>3</sup>			
Solid density	0.95163	g/cm <sup>3</sup>			
<b>2-domain Tait PVT model coefficients</b>					
b5	414.5	K			
b6	1.543e-007	K/Pa			
b1m	0.001274	m <sup>3</sup> /kg			
b2m	1.026e-006	m <sup>3</sup> /kg-K			
b3m	9.263e+007	Pa			
b4m	0.004941	1/K			
b1s	0.001075	m <sup>3</sup> /kg			
b2s	2.077e-007	m <sup>3</sup> /kg-K			
b3s	3.324e+008	Pa			
b4s	2.46e-006	1/K			
b7	0.0001872	m <sup>3</sup> /kg			
b8	0.05158	1/K			
b9	1.023e-008	1/Pa			
Plot PVT data...					

Thermoplastics material							
General	Recommended Processing	Rheological	Thermal	PVT	Mechanical	Shrinkage	Filler
Mold temperature		38	C				
Melt temperature		240	C				
Mold temperature range (recommended)							
Minimum		20	C				
Maximum		57	C				
Melt temperature range (recommended)							
Minimum		200	C				
Maximum		280	C				
Absolute maximum melt temperature		320	C				
Ejection temperature		63	C				
Maximum shear stress		0.26	MPa				
Maximum shear rate		24000	1/s				

General	Recommended Processing	Rheological	Thermal	PVT	Mechanical	Shrinkage	Filler
<b>Mechanical data</b>							
Modulus of elasticity, flow direction (E1)		2600	MPa				
Modulus of elasticity, transverse to flow (E2)		2600	MPa				
Poissons ratio, flow-to-transverse direction (ν12)		0.4					
Poissons ratio, transverse-to-thickness direction (ν23)		0.4					
Shear modulus (G12)		929	MPa				
<b>Transversely isotropic coefficient of thermal expansion (CTE) data</b>							
Alpha1		0.000152	1/C				
Alpha2		0.000152	1/C				
Tensile stress at yield			MPa				
Strain at break			%				

General	Recommended Processing	Rheological	Thermal	PVT	Mechanical	Shrinkage	Filler
<b>Specific heat data</b>							
Temperature (T)		Specific heat (Cp)	Heating/cooling rate				
C		J/kg-C	C/s				
1	210	3348	-0.3333				
Test information...							
<b>Thermal conductivity data</b>							
Temperature (T)		Thermal conductivity (k)	Heating/cooling rate				
C		W/m-C	C/s				
1	210	0.318	0				

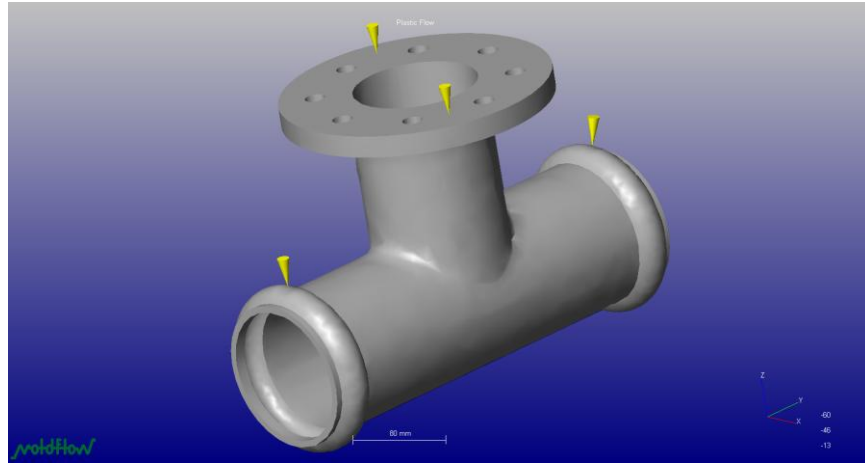
Şekil 3.6. Modelin plastik enjeksiyon parametreleri

### 3.2.2 Modelin Plastik Enjeksiyon Analizi

Plastik enjeksiyonun işlem aşamaları aşağıda sıralanmıştır.

- Malzeme özelliklerinin ve parametrik verilerinin girilmesi
- Enjeksiyon noktalarının sayısının ve yerlerinin tespiti
- Makine ile ilgili ayarların yapılması
- Analizin başlatılması

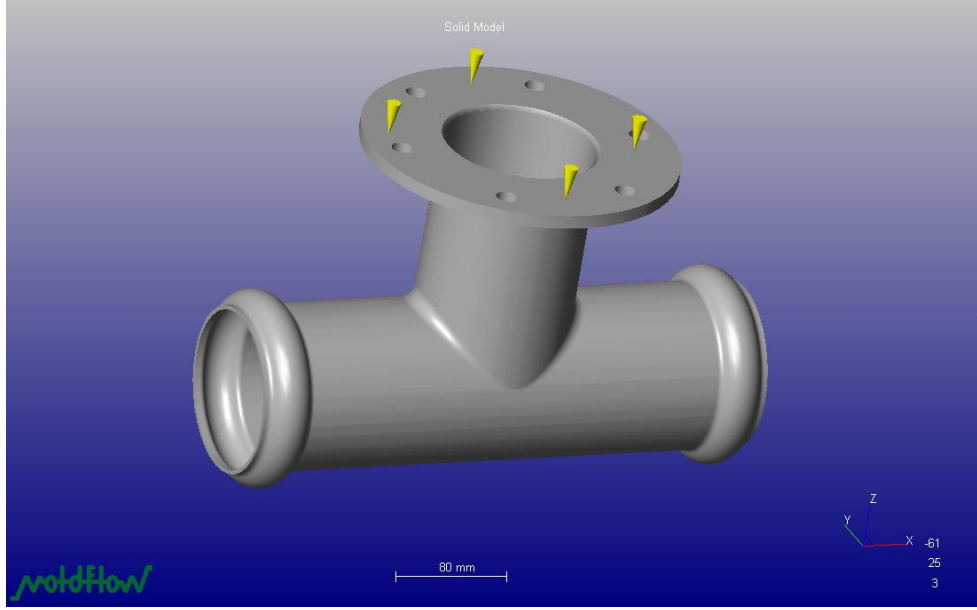
Bu aşamaların işlem sırası değişse de analizlerde ortak aşamalar olarak kullanılır. Analiz işlemimde ilk olarak modelin polietilen olması ve malzeme özelliklerinin de bu malzemeye uygun olarak seçilmesi sağlanmıştır. İkinci aşamada yolluk yeri seçimi yapılmıştır. **Şekil 3.7.**'de enjeksiyon işleminde kullanılacak yollukların yerleri görülmektedir. Yolluk yeri seçimi; akışta bir zorlamanın olmayacağı ve homojen dağılımın sağlanabileceği hususlarına göre tayin edilmelidir. Yolluk sayısı enjeksiyon işleminin zamanı ve homojen bir dağılım için önemlidir. Yapılan bu işlemler ışığında analizler gerçekleştirilmiştir.



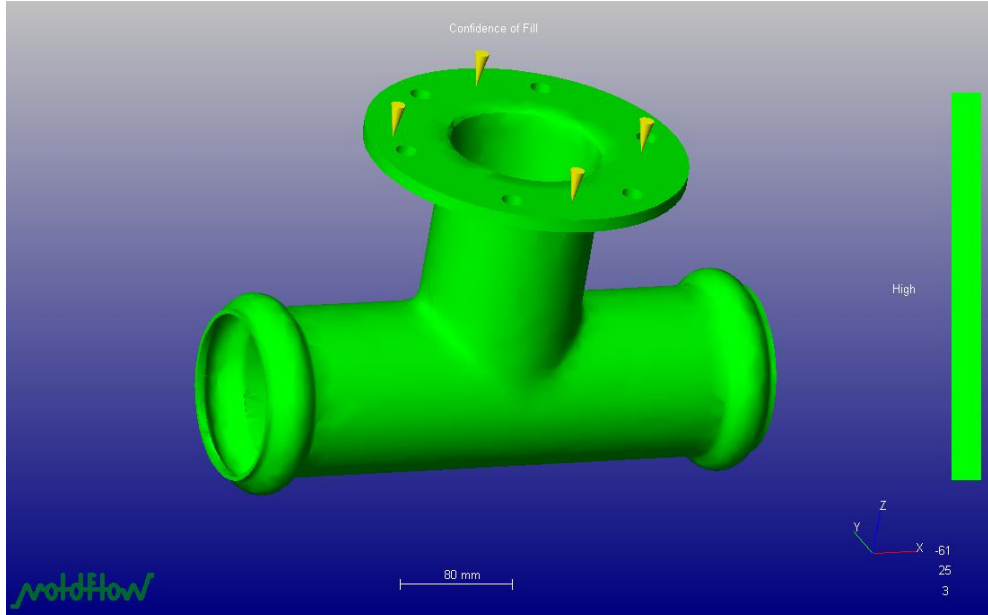
**Şekil 3.7.** Plastik enjeksiyonun işleminin yollukları

### 3.2.3. 3 , 6 ve 9 mm Kalınlıklı Modeller İçin Analiz Sonuçları

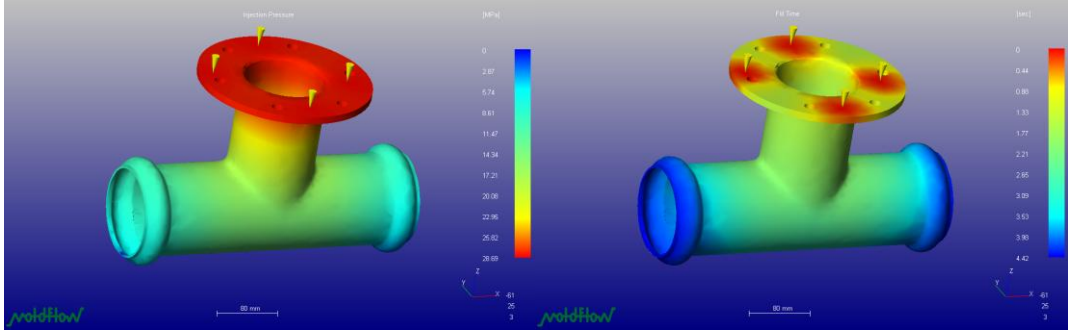
#### a) 3mm Kalınlıklı Parça Modeline Ait Analizler



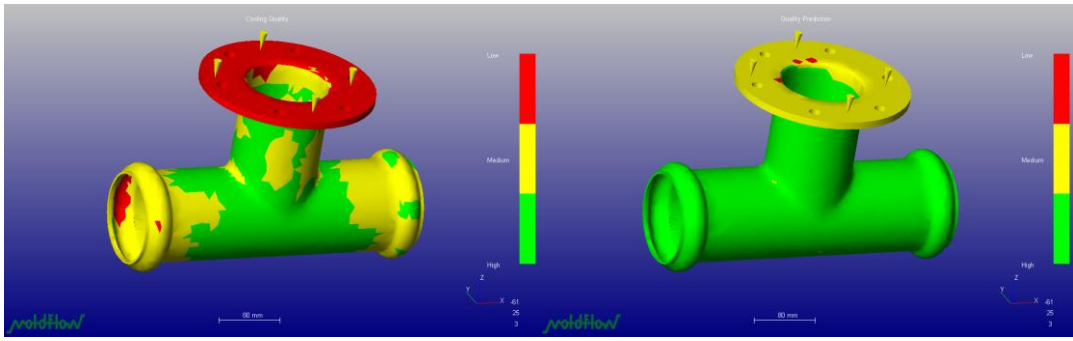
Şekil 3.8. 3 mm kalınlıklı parça modeli ve yolluk noktaları



Şekil 3.9. 3 mm kalınlıklı modelin enjeksiyon işleminin sonrası dolunu görülmektedir

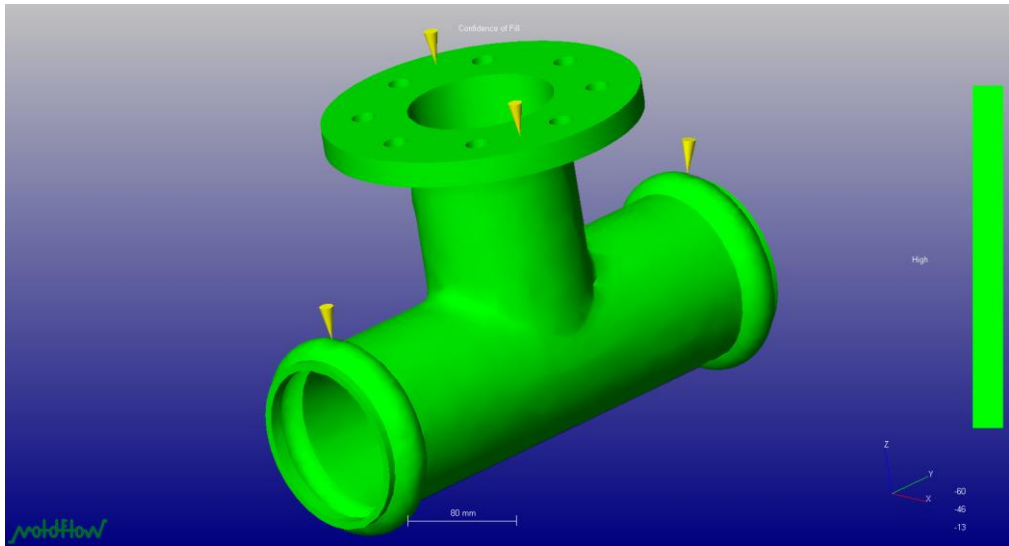


**Şekil 3.10.** 3 mm kalınlıklı modelin enjeksiyon işlemi basıncı ve dolma zamanı



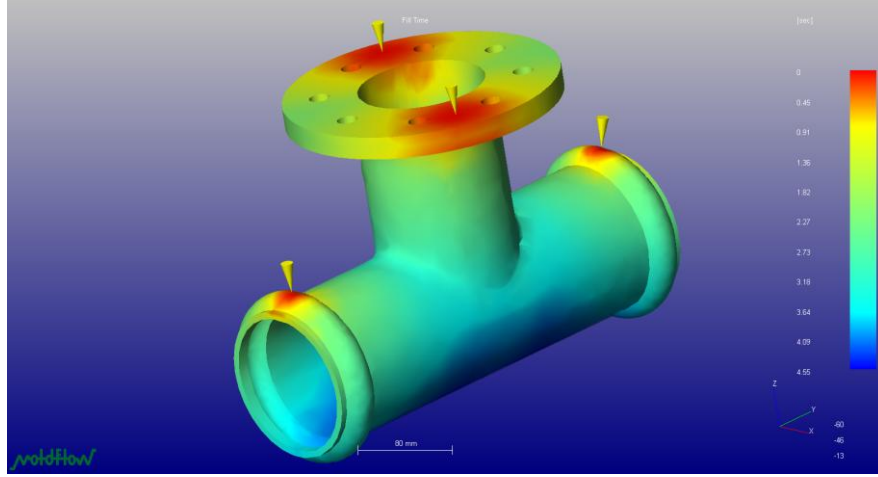
**Şekil 3.11.** 3 mm kalınlıklı modelin enjeksiyon işlemi sonrası soğuma kalitesi ve yüzey kalitesi

**b) 6mm kalınlıklı parça modeline ait analizler**



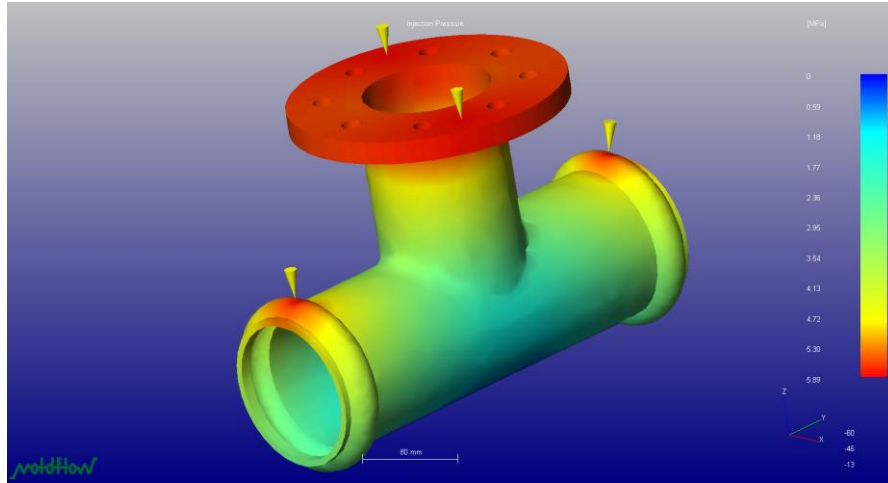
**Şekil 3.12.** Plastik enjeksiyonunun dolum analizi sonucu

Şekil 3.12.'de plastik enjeksiyon işleminde modelin istenilen geometri ve dolum oranında olduğu görülmekte ve enjeksiyonun dolum işlemi tam olarak gerçekleşmektedir.

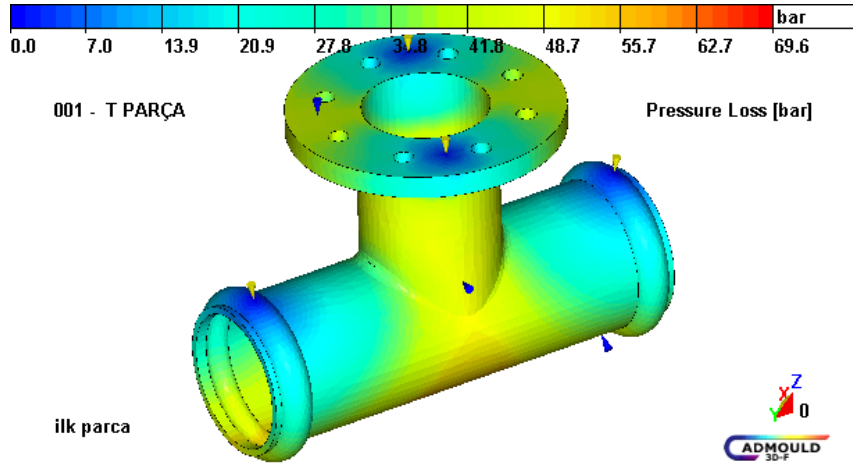


Şekil 3.13. Dolma zamanı

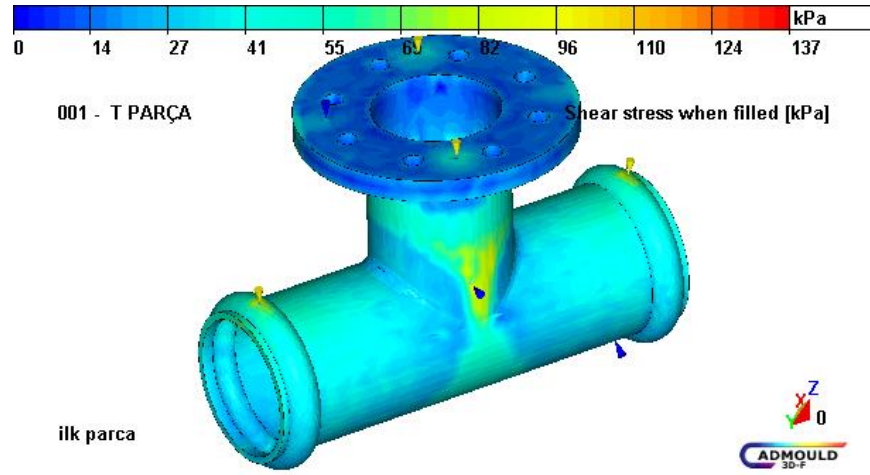
Şekil 3.12. 'de ara bağlantı elemanının enjeksiyon işlem boyunca dolma zamanı görülmektedir.



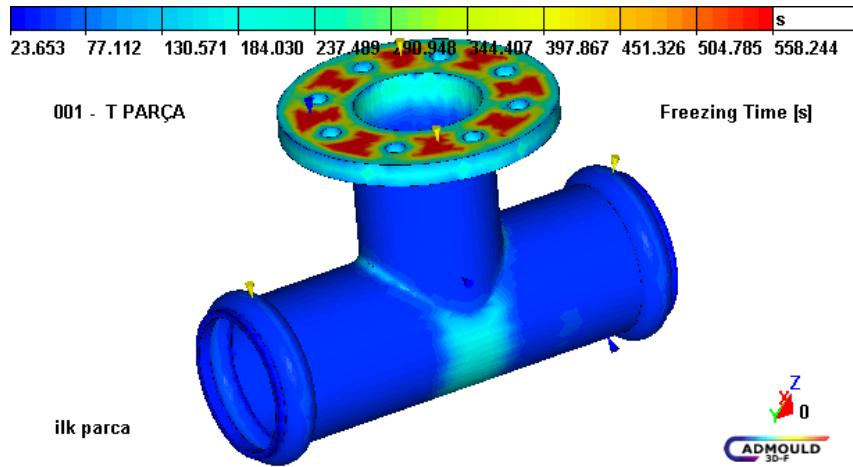
Şekil 3.14. Enjeksiyon basıncı



Şekil 3.15. Basınç düşümü



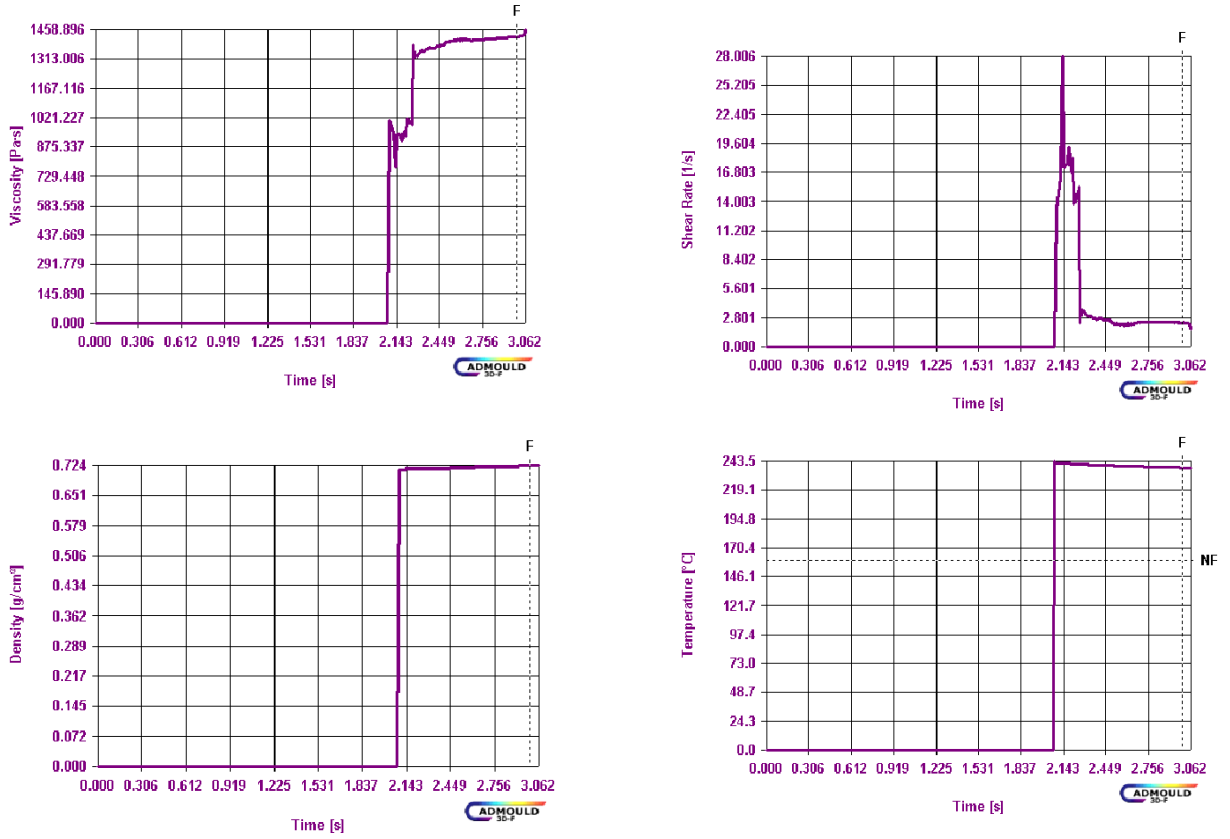
Şekil 3.16. Enjeksiyon esnasındaki kayma gerilmesi



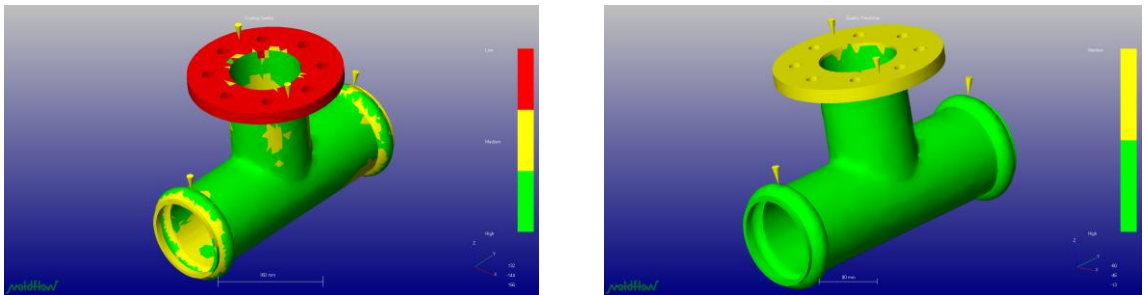
Şekil 3.17. Soğuma zamanı



Cadmould programı işlem esnasında lokal olarak sensörler yerleştirmeye izin vermektedir. Flanş bölgesine yakın bir bölgeye yerleştirilen sensörden elde edilen veriler **şekil 3.14.**'de gösterilmiştir.

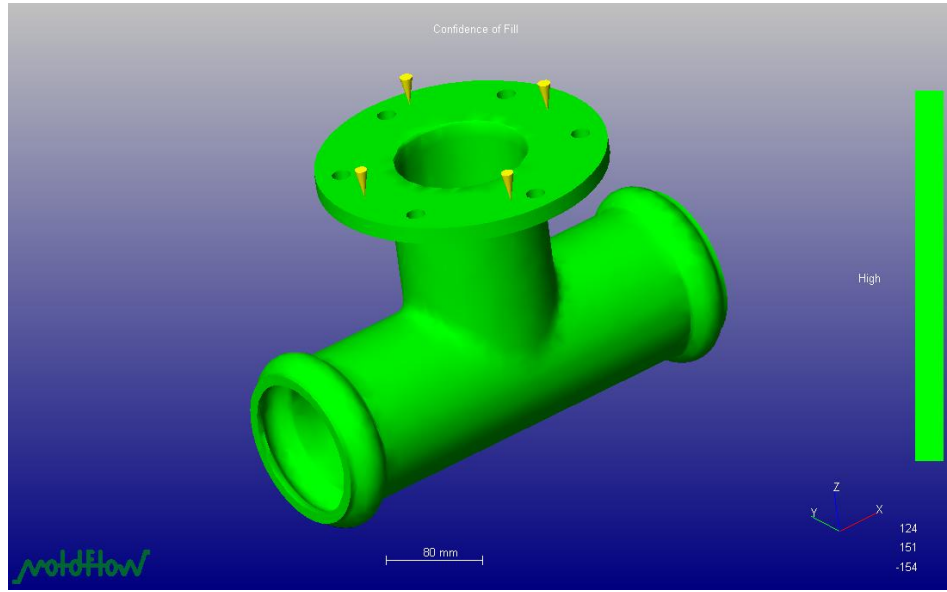


**Şekil 3.18.** Sensör verileri

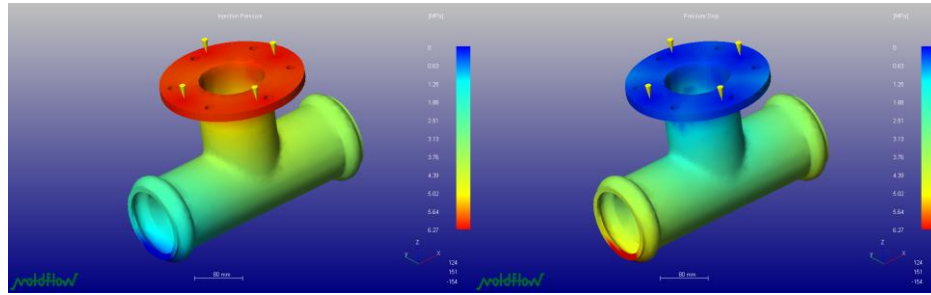


**Şekil 3.19.** Soğuma durumu ve yüzey kalitesi

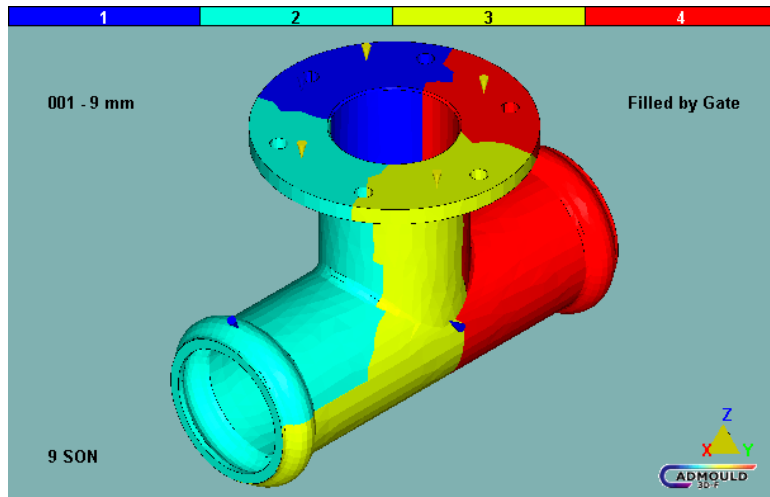
### c) 9 mm parça için plastik enjeksiyon işlemi analizleri



Şekil 3.20. 9 mm parça modelinin plastik enjeksiyon işlemi sonrası dolumu



Şekil 3.21 9 mm parça modelinin plastik enjeksiyon basınç durumları

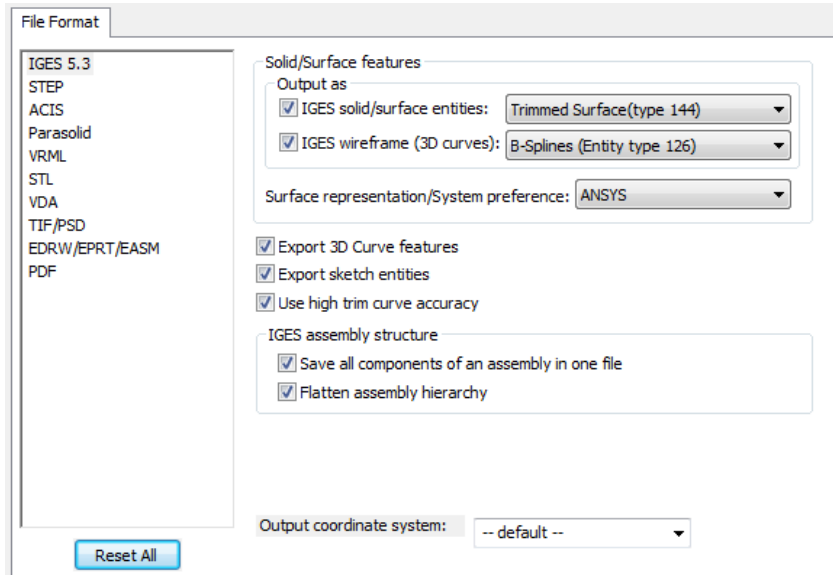


Şekil 3.22. 9 mm enjeksiyon yolluk noktalarının beslediği alanlar

Şekillerde modele ait enjeksiyon sonrası basınç, sıcaklık, deformasyon, soğuma durumu ve yüzey kalitesi görülmektedir. Bu veriler Mouldflow ve Cadmould Plastik Enjeksiyon Programlarından elde edilmiştir. Burada yüzey kalitesinin elemanın flanş bölgesi haricinde son derede düzgün olduğu görülmektedir. Flanş bölgesindeki yüzey durumu ek işlemlerle düzeltilebilir olması nedeniyle sorun teşkil etmemektedir. Ayrıca flanş bölgesi bağlantı elemanının çalışma standardını diğer kısımlar kadar etkilememektedir.

### 3.3. Flanşlı T Ara Bağlantı Elemanının Mukavemet Analizi

Şekil 3.3.'de de görülmekte olan SolidWorks programında 3 boyutlu modellenen parça Şekil 3.23.'da gösterilen dosya formatı değiştirme ekranından \*.Iges formatına getirilmiş ve bu format ile Ansys programından çağrılarak kullanılmıştır.



Şekil 3.23. SolidWorks format değiştirme penceresi.

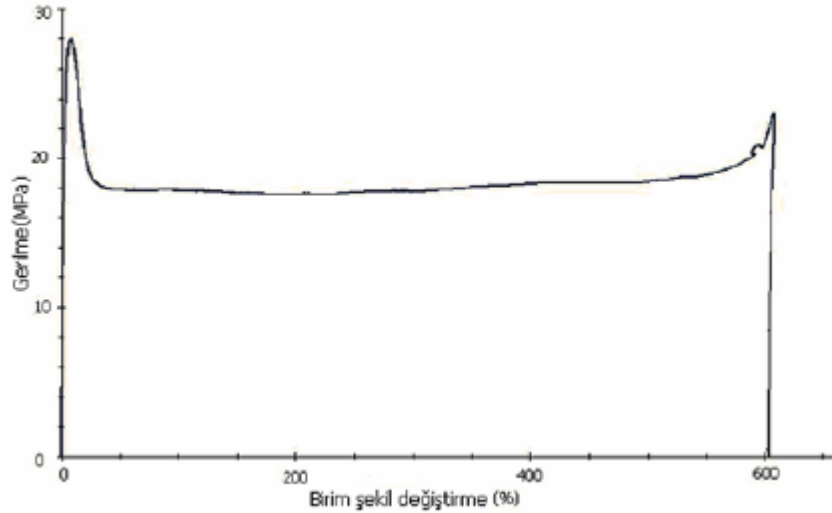
### 3.3.1. Ara Bağlantı Elemanının Çalışma Koşulları

Flanşlı T ara bağlantı elemanının boyutlarına istinaden bağlanacak borunun çapı 110 mm bunun karşılığı olan 4" lik boru için maksimum kullanım basıncı 140 – 150 Psi dir. 1Psi = 0.068 bar dır. Bu durumda çalışma basıncı maksimum 10 bar olarak alınmıştır. Çalışma sıcaklığı 15-20 °C arasında değişmektedir.(24)

### 3.3.2. Malzemenin Mekanik ve Fiziksel Verileri

İç basıncı maruz ara bağlantı elemanı termoplastik bir polimer olan polietilen olarak seçilmiştir. Polimer malzemeler viskoelastik olup, viskoelastik malzeme parametrelerinin bilinmesi gereklidir. Polietilenin elastisite modülü,  $E=2600$  MPa ve Poisson oranı  $\nu=0.40$  olarak kabul edilmiştir.

Şekil 3.24'de, laboratuarda polietilen çekme numunesinin çekme cihazında çekilmesi sonucu elde edilmiş gerilme-gerinim eğrisi gösterilmektedir.



Şekil 3.24. Polietilen malzemesinin çekme deneyi grafiği.

Viskoelastik malzeme modelinde geometrik nonlinear durum için Time Hardening Implicit Creep (Zamanla pekleşen sünme) modeli kullanılmıştır.

Ansyes de sünme birim şekil değiştirmesi fonksiyonu;

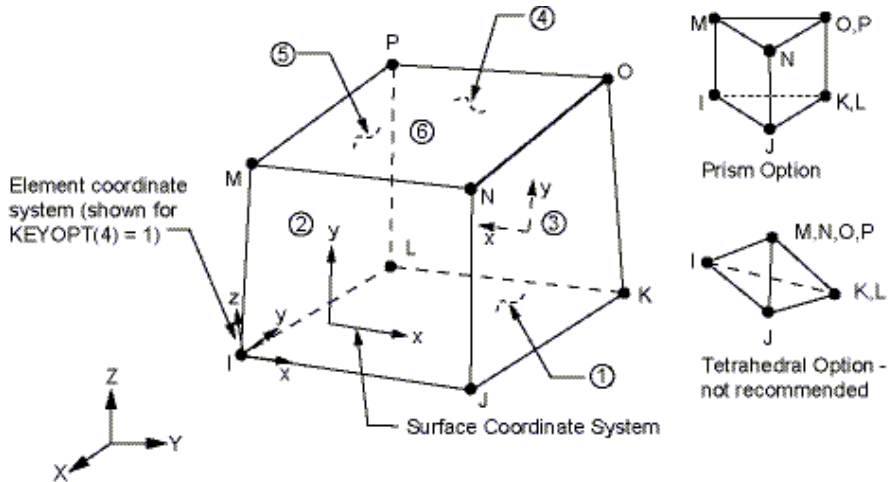
$$\dot{\epsilon}_{cr} = C_1 \sigma^{C_2} t^{C_3} e^{-C_4/T} \quad (3.1)$$

şeklindeyir. Burada  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$ ,  $C_4$  değerleri malzemenin zamana bağlı sünme deneyleri neticesinde elde edilecek olan parametrelerdir. Polietilen malzemesine ait bu parametreler yapılan bir doktora çalışmasından daha önceden elde edilmiştir. Bu çalışmanın viskoelastik modellemesinde daha önceden bulunmuş bu değerlerden yararlanılmıştır.(26)

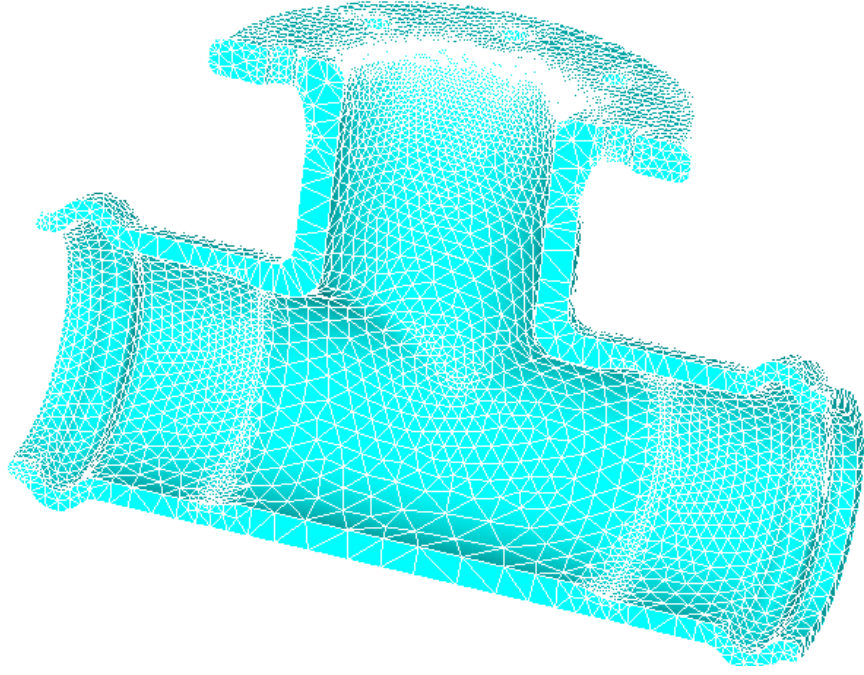
$$C_1=0.0158 \quad C_2=0.372 \quad C_3=1.803 \quad C_4=7479$$

### 3.3.3. Bilgisayar Modelinin Oluşturulması

Bölüm 2.3'te anlatılan analiz öncesi aşamada modelin oluşturulması sırasıyla aşağıda şekillerle gösterilmiştir. Modellerde kullanılan eleman, 3 boyutlu 8 düğümlü termal ve yapı analizi özelliğli SOLID45 olup, geometrisi şekil 3.4'te gösterilmiştir.

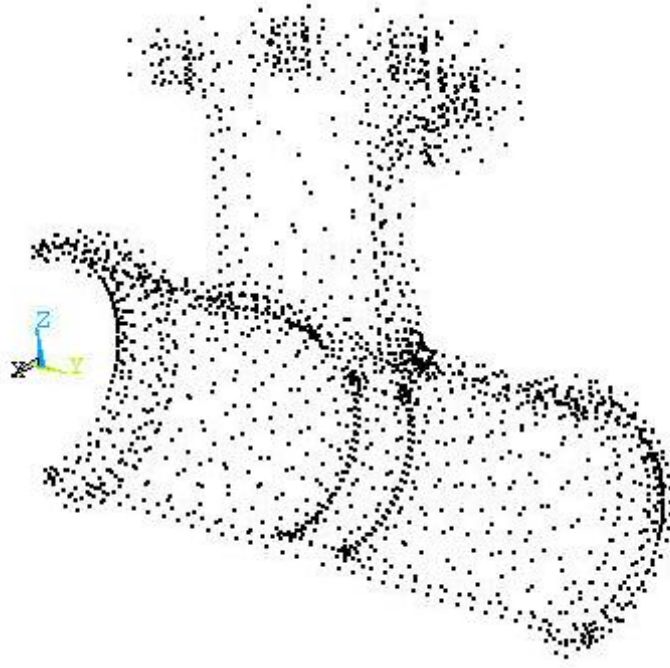


şekil 3.25. SOLID45 SEM elemanı.



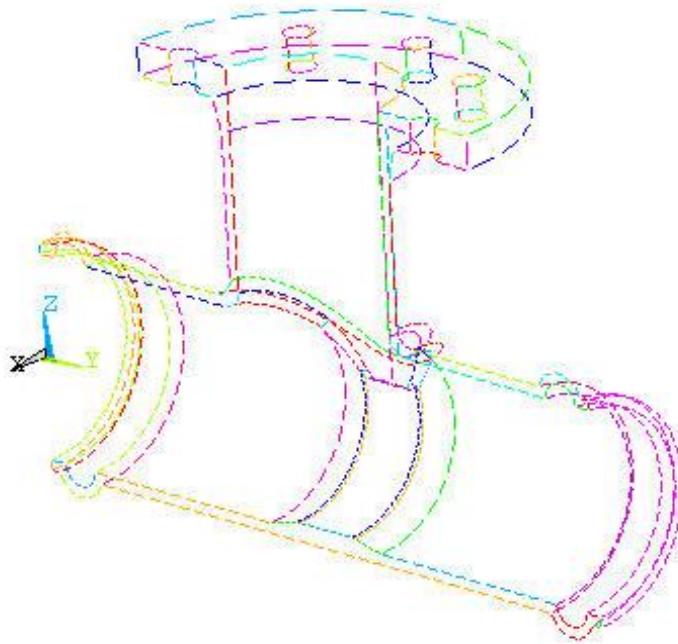
**Şekil 3.26.** Elemanın SEM SOLID45 ağı.

Bu eleman kullanılarak **Şekil 3.26**'te gösterildiği gibi Flanşlı T arabağlantı elemanının modeli oluşturulmuştur. Ara bağlantı elemanının dış çapı önceden belirtildiği gibi 110mm ve et kalınlığı 6mm olarak modellenmiştir. Ara bağlantı elemanının tam modeli, 5358 adet SOLID45 elemanından ve 2038 düğümden oluşmaktadır.



**Şekil 3.27.** Model düğümleri

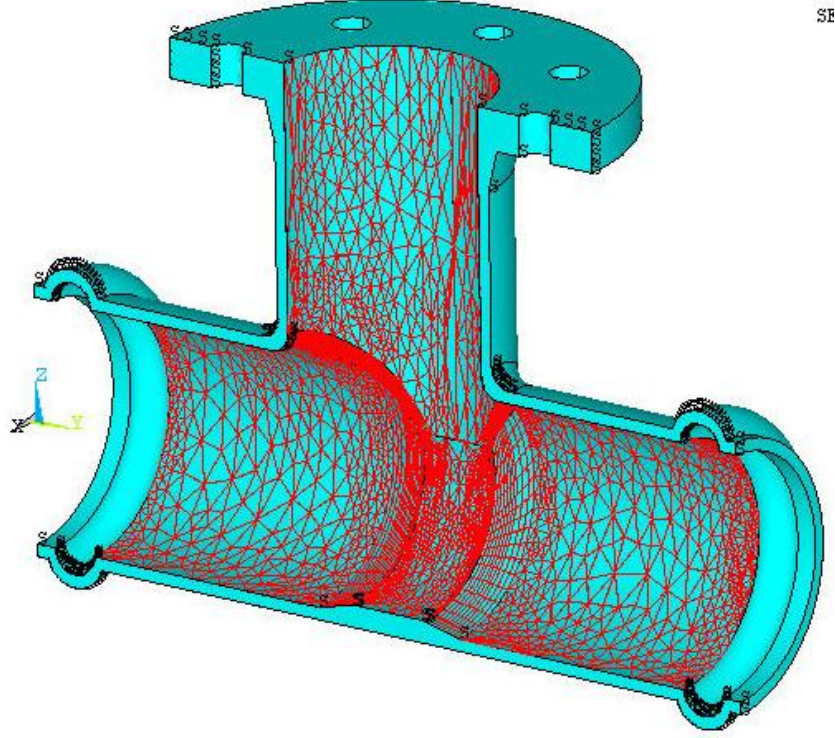
**Şekil 3.28** 'de daha sonra yüzey alanlarını oluşturmada kullanılacak model çizgileri gösterilmiştir. Analiz edilecek problem simetrik olduğundan, işlemci hızı açısından sadece yarısı analiz edilecektir. Çizgiler istenilen eleman boyutuna bağlı olarak Şekil'den görülebileceği gibi parçalara ayrılmıştır.



**Şekil 3.28.** Model çizgileri



Sınır şartları ve yüklemelerin uygulanma biçimi **Şekil 3.29**'de verilmiştir. Şekilde S harfiyle gösterilen yüzeyler yarıya bölünmüşlükten dolayı simetrisi ifade etmektedir. Kırmızı ile gösterilen alanlara 1MPa değerinde iç basınç uygulanmıştır.

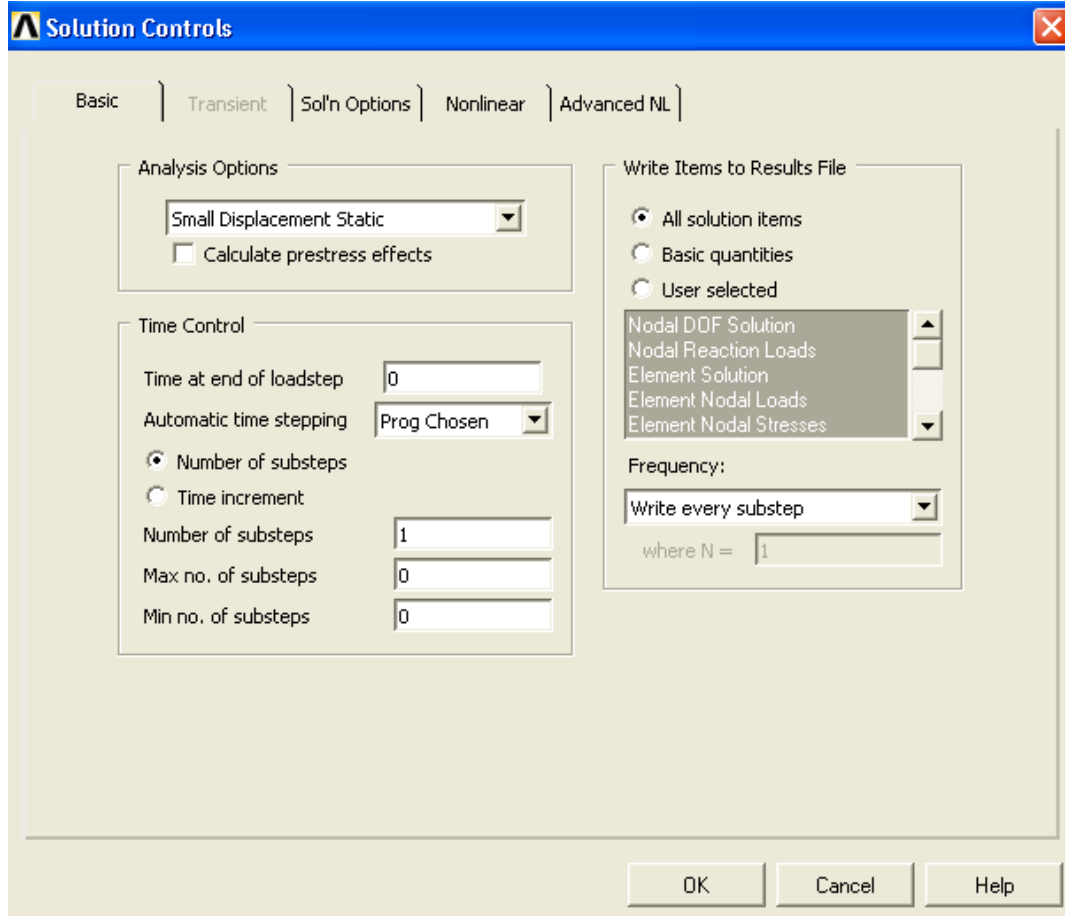


**Şekil 3.29.** Modelin sınır şartları ve yüklemeleri.

#### 3.3.4. Çözümün Elde Edilmesi

Yukarıdaki bölümlerde anlatıldığı üzere analiz öncesi (preprocessing) işlemleri tamamlanan SEM modelinin nonlinear çözümünü elde etmek için Şekil 3.30'te verilen modül devreye alınır. Analiz seçeneklerinden nonlinearlığı ifade etmek üzere statığe yakın ve küçük deplasman “*small displacement static*” seçeneği alınmıştır. Nonlinear çözüm için yük adımının program tarafından belirlenmesi seçilmiştir. Her bir yük adımının sonuçlarının sabit diskte kaydedilmesi için “*write every substep*” seçeneği kullanılmıştır. Geriye kalan, çözüm yöntemi, yakınsama kriterleri ve program bitimi ile ilgili analiz parametreleri, Ansys'in tavsiye ettiği değerler olarak alınmıştır.

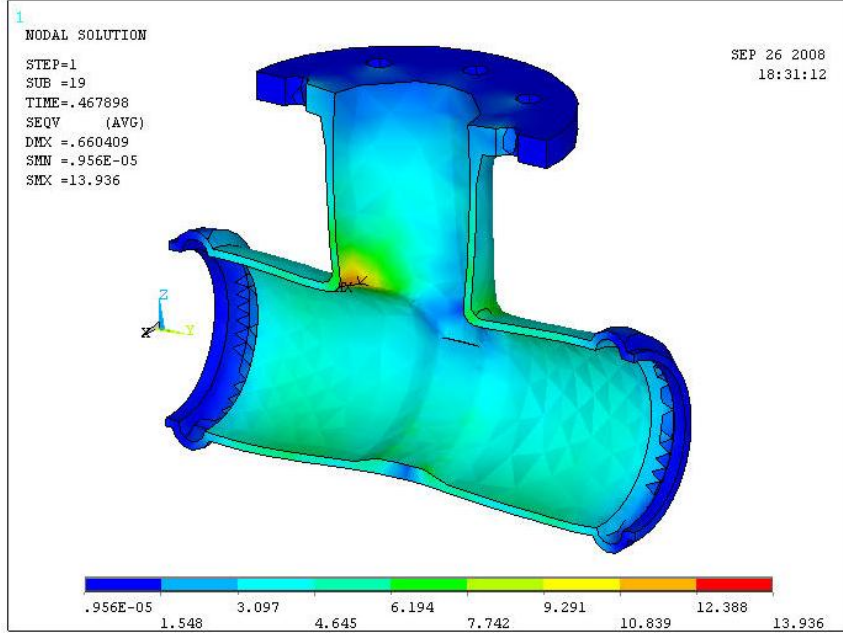




**Şekil 3.30.** Ansys Çözüm Modülü ve parametreleri.

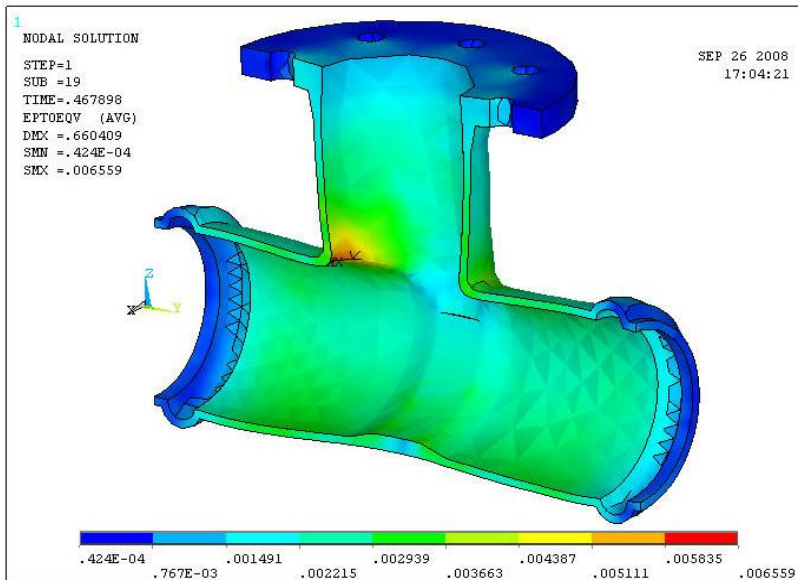
### 3.3.5. Analiz Sonuçları

Çözümün elde edilme süresi, programın seçtiği yük adımı ve Pentium Core Due 3.01GHz işlemci, 1 GB DDR-800MHz RAM ile 120GB harddisk'e sahip bir kişisel bilgisayar için 10800 saniye olmuştur. Çalışma zamanı adım sayısına bağımlı olarak değişmektedir.

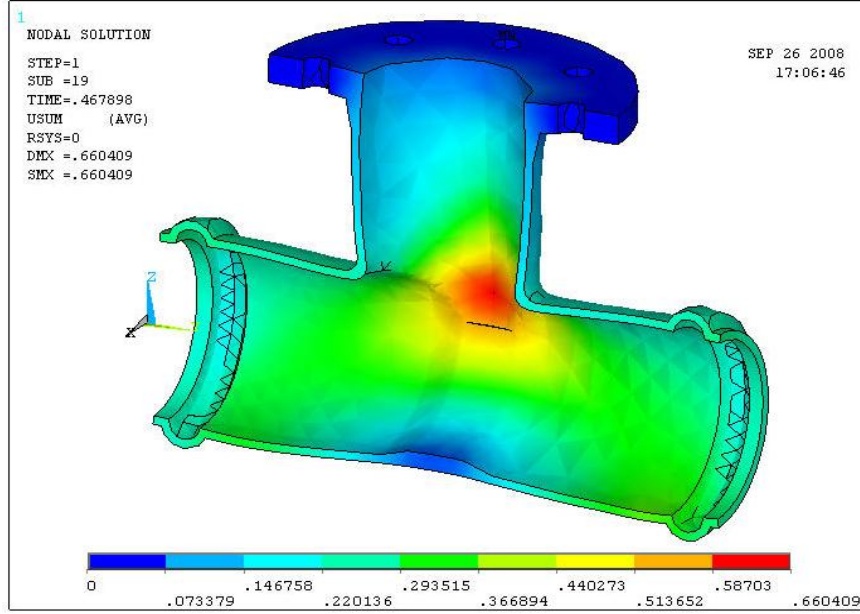


**Şekil 3.31.** Modelde oluşan Von Mises Efektif gerilmeleri

Flanşlı T ara bağlantı elemanı efektif gerilmeleri **Şekil 3.31**'de gösterilmiştir. Modelin iç cidarında radüsün en düşük olduğu bölgede maksimum 13.936 MPa gerilme değeri hesaplanmıştır. Bu değer polietilen malzemenin çekme ve kopma mukavemet değerlerinin her ikisinde altında olduğundan, flanşlı T ara bağlantı elemanının bu basınç altında güvenli çalışabildiği görülmektedir.



**Şekil 3.32.** Modelde oluşan Von Mises gerinimleri

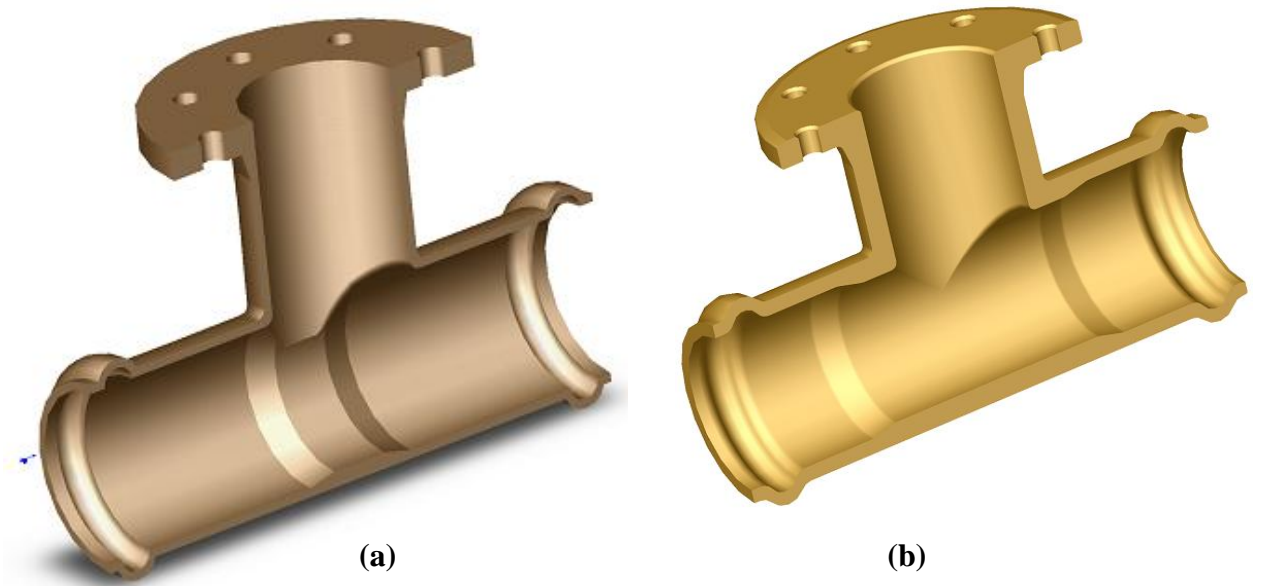


**Şekil 3.33.** Modelde oluşan toplam deformasyonlar

Şekil 3.33'de modelde meydana gelen toplam deformasyon değerleri gösterilmiştir. Analiz sonucunda bulunan x yönünde -0.66mm lik bir deformasyon değeri 1 MPa değerinde bir iç basınç uygulanmış 6 mm et kalınlığına sahip plastik bir malzeme için uygundur.

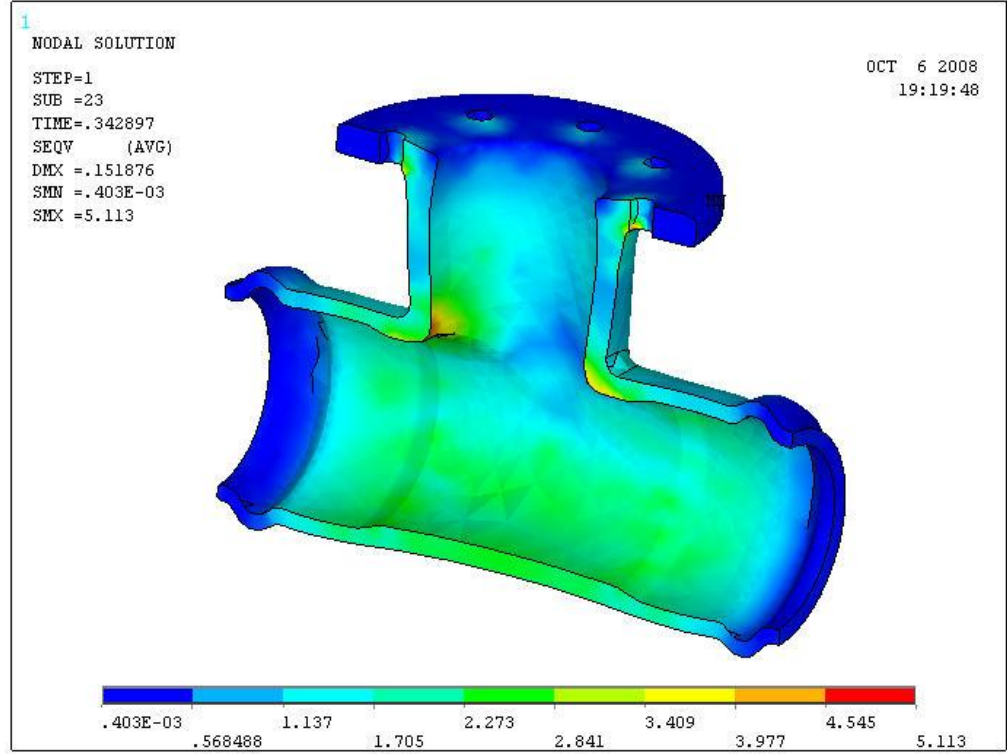
### 3.4. Flanşlı T Ara Bağlantı Elemanın Mukavemetsel Olarak Optimizasyonu

Ara bağlantı elemanının optimizasyon çalışması boyutsal olarak yapılmıştır. Bu değişiklikler Şekil 3.34. a ve b'de de optimizasyon öncesi ve optimizasyon sonrası olarak gösterilmiştir. Optimizasyon çalışması sonrasında modelin modelin et kalınlığı 9mm den 12mm ye çıkartılmış ve iç yüzeydeki mukavemet kademesi genişletilmiştir.



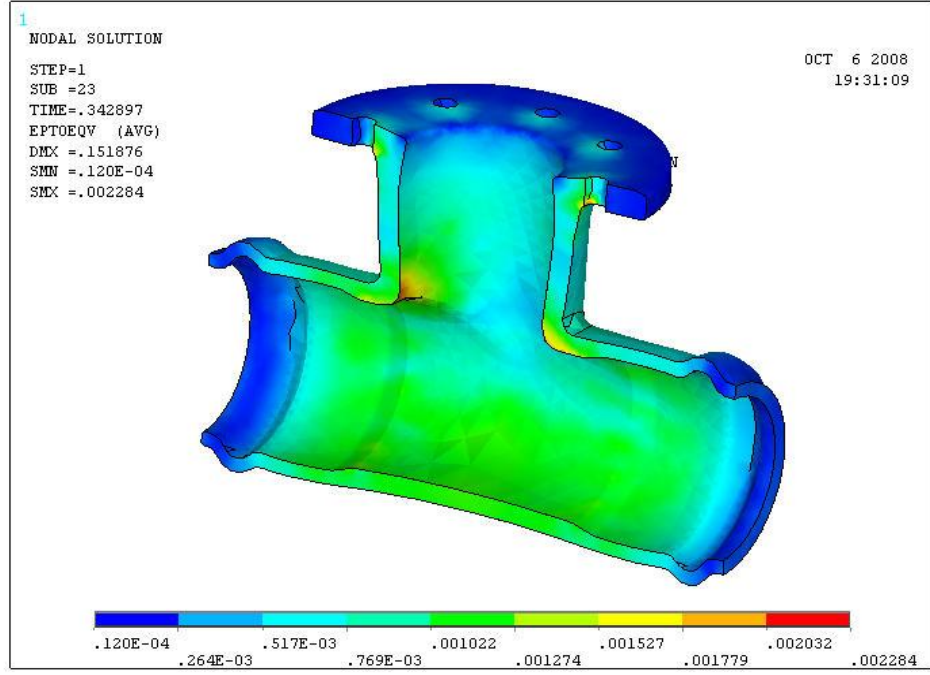
Şekil 3.34. a ve b Modelin Optimizasyon öncesi ve sonrası

Yapılan boyutsal değişiklik sonrasında, modelin Ansys Programında uygulanan 1 MPa değerindeki iç basınç yüklemesi için mukavemet analizi tekrarlanmıştır.

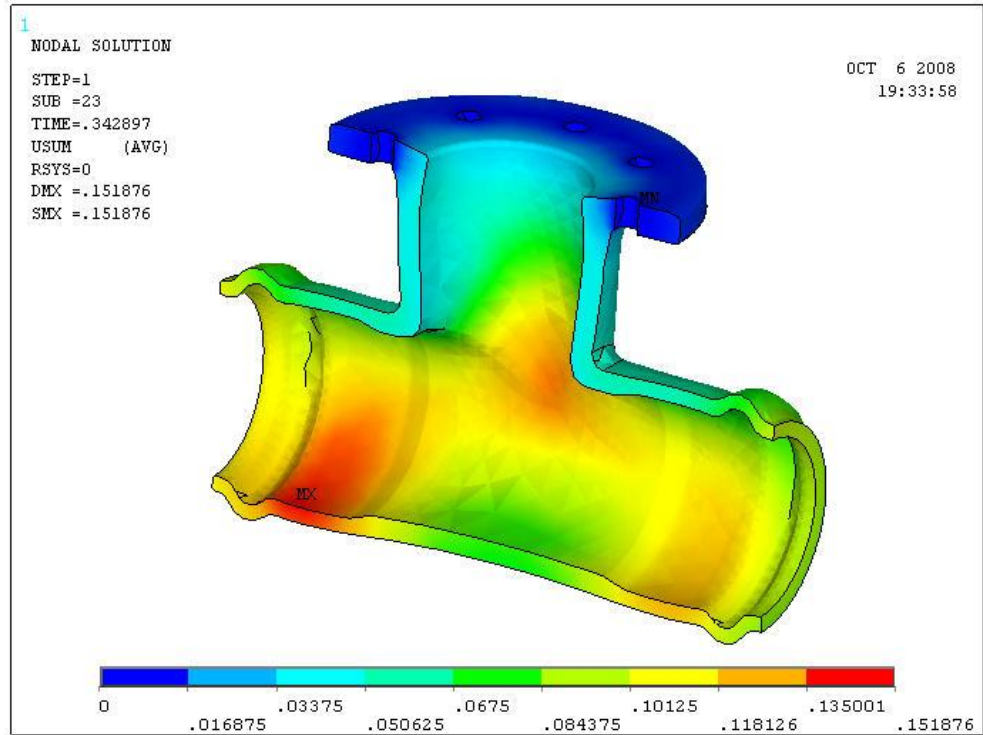


**Şekil 3.35.** Yeni modelde oluşan Von Mises Efektif Gerilmeleri

Optimizasyon sonrası yeni modelde oluşan Von Mises efektif gerilmeleri **Şekil 3.35**'de gösterilmiştir. Modelin iç cidarında radüsün en düşük olduğu bölgede maksimum 5.113 MPa gerilme değeri hesaplanmıştır. Bu değer polietilen malzemenin çekme ve kopma mukavemet değerlerinin her ikisinde altında olduğundan, flanşlı T ara bağlantı elemanının bu basınç altında güvenli çalışabildiği görülmektedir. Ayrıca bulunan yeni modelde bulunan 5.113 MPa lık Von Mises gerilme değeri ince et kalınlığna sahip ilk modeldeki gerilme değerinden (13.936 MPa) oldukça düşüktür. Bu sonuç optimizasyonun gerçekleştiğini göstermektedir.



Şekil 3.36. Yeni modelde oluşan Von Mises efektif gerinimleri

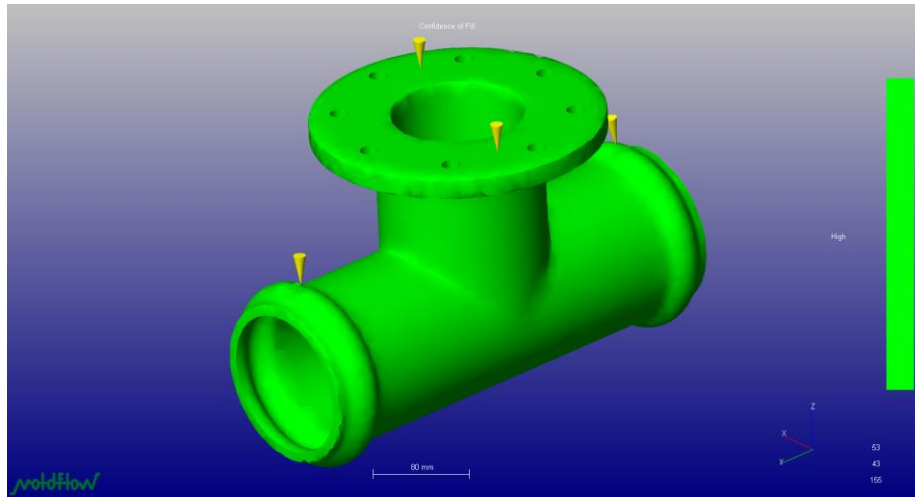


Şekil 3.37. Yeni modelde oluşan toplam deformasyonlar.

**Şekil 3.37.**'da yeni modelde meydana gelen toplam deformasyon değerleri gösterilmiştir. Analiz sonucunda bulunan x yönünde -0.151 mm lik bir deformasyon değeri 1 MPa değerinde bir iç basınç uygulanmış 12 mm et kalınlığına sahip plastik bir eleman için uygundur. Ayrıca yeni modelde bulunan 0.151 mm değerindeki deformasyon miktarı ince et kalınlığına sahip ilk modeldeki deformasyon miktarından (-0.66mm) daha düşüktür.

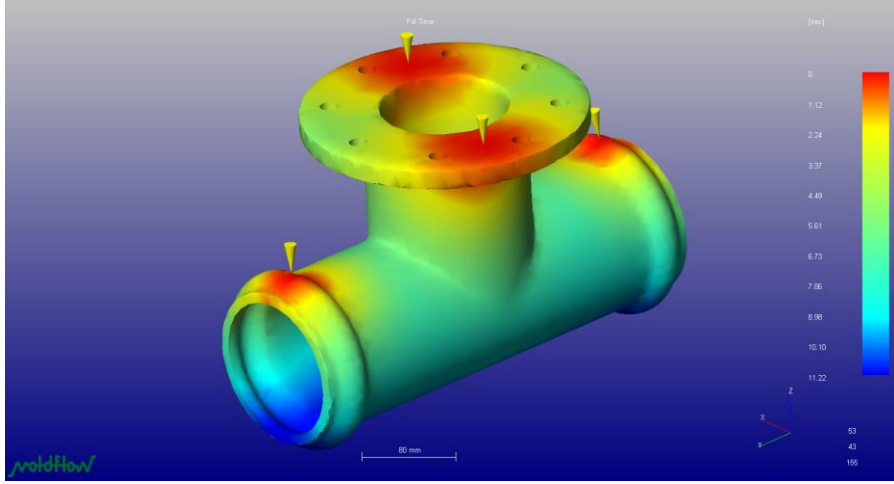
### **3.5. Flanşlı T Ara Bağlantı Elemanının Optimizasyon Sonrası Plastik Enjeksiyon analizleri**

Optimizasyon sonrası yani modelin plastik enjeksiyon verilerinde ki değişme içinde tekrar enjeksiyon analizleri gerçekleştirilmiştir. Önceki analizlerde genel hatlara bri engeli olmayan flanş bölgesi harici görülmemişti. Yeni analizlerden çıkan sonuçlar aşağıda verilmiştir.



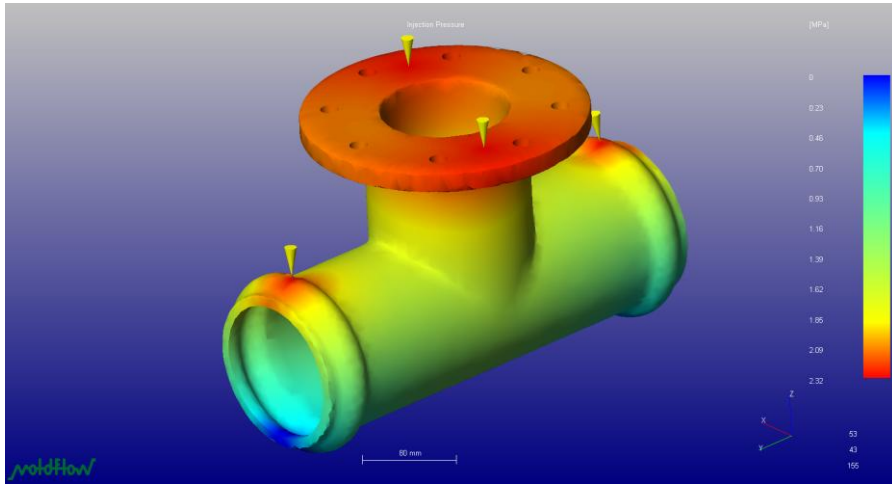
**Şekil 3.38.** Yeni modelin dolum kalitesi





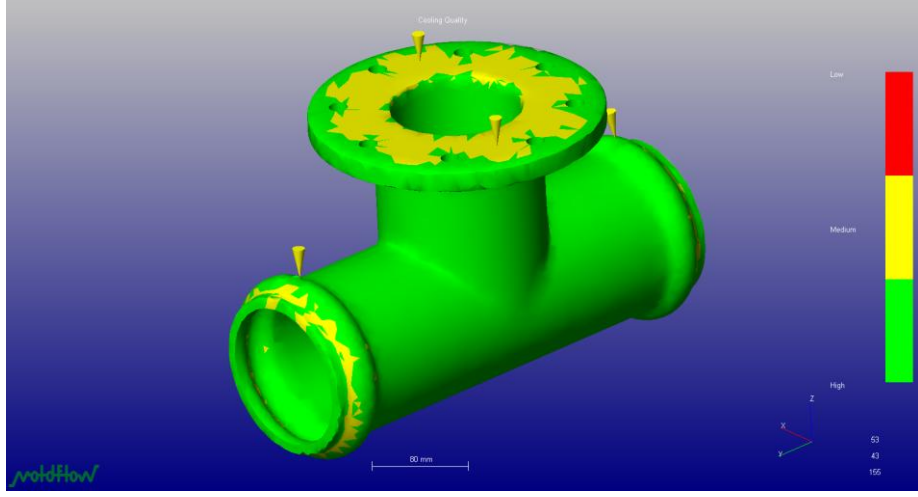
**Şekil 3.39.** Yeni modelin dolma zamanı

Yeni modelin dolumu şekil 3.40 de görüldüğü gibi sorunsuzdur. Optimizasyon öncesi ve sonrası sorunun olması karmaşık bir bölümün olmamasından modelin fiziki şeklindedir. Modelde kaynaklanmamaktadır

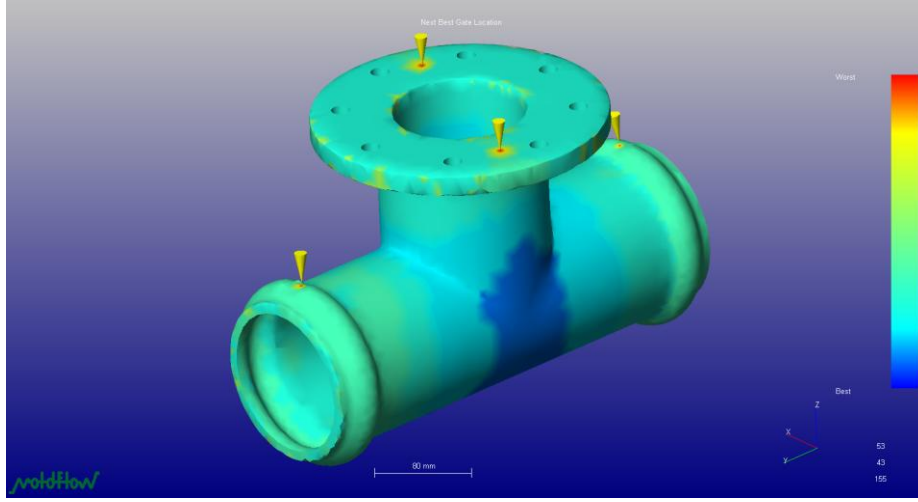


**Şekil 3.40.** Yeni modelin enjeksiyon basıncı

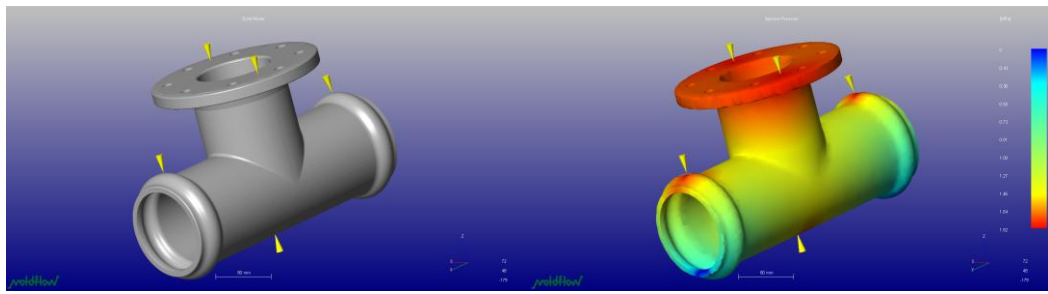




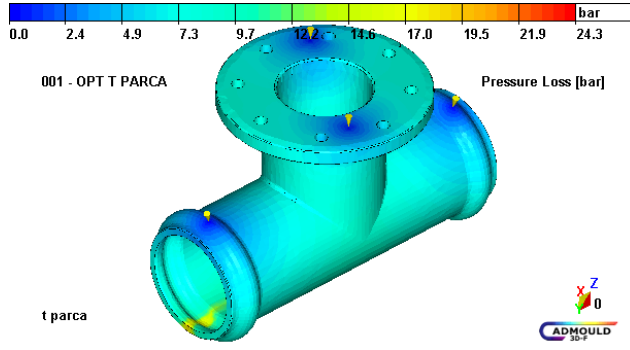
Şekil 3.41 Soğuma sonrası yüzey kalitesi



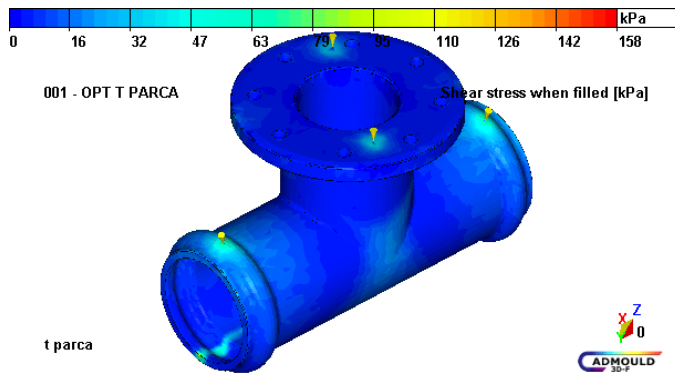
Şekil 3.42 Optimize sonrası yeni enjekte noktaları



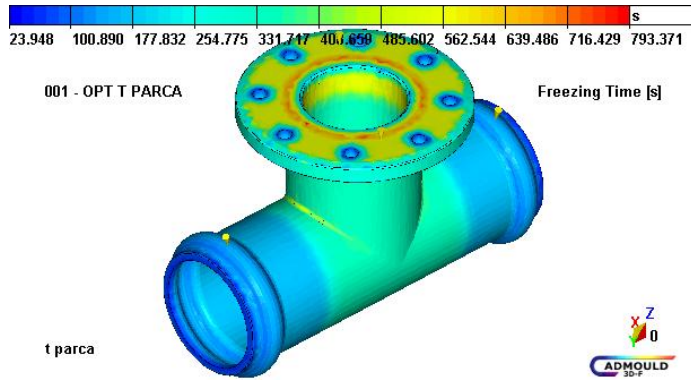
Şekil 3.43. Optimizasyon sonrası modeldeki basınç değişimi



Şekil 3.44. Basınç düşümü



Şekil 3.45. Enjeksiyon esnasındaki kayma gerilmesi



Şekil 3.46. Dolma zamanı

Tartışma ve Sonuç bölümünde, bu bölümde elde edilen bulgular değerlendirilecektir.

#### 4. TARTIŞMA ve SONUÇ

Flanşlı T plastik ara bağlantı elemanın malzemesi akışkan şebekelerde tercih edilen polietilen olarak belirlenmiştir. Termoplastik bir polimer olan polietilen diğer plastikler gibi viskoelastik özellik gösteren bir malzemedir. İlk olarak Ansys Paket Programında plastik ara bağlantı elemanı viskoelastik olarak zamanla pekleşen sürünme (Time Hardening Implicit Creep) modeli ile modellenmiştir. Yükleme 1 MPa değerinde bir iç basınç uygulanarak yapılmış olup, çıkan gerilme gerinim değerleri polietilen malzemesinin çekme ve kopma mukavemetiyle karşılaştırılmıştır. Daha sonra flanşlı T plastik ara bağlantı elemanının plastik enjeksiyon modellemesi Cadmould ve Mouldflow programları yardımıyla yapılmıştır. Enjeksiyon aşamasında kalıp sıcaklığı, malzemenin erime sıcaklığı, viskozite değeri, yoğunluğu, termal ve mekanik özellikleri girilmiş ve sonuçta modelin enjeksiyon işleminin istenilen şekilde gerçekleşip gerçekleşmediği, çatlak ve boşlukların durumu, kalıbın ara bağlantı elemanının enejksiyon işlemine uygunluğu incelenmiştir. Bu işlemler modelin optimizasyonu esnasında geri beslemeler yapılarak tekrarlanmıştır.

Modelin geometrik ölçüleri ve sonlu eleman tipine ait bilgiler modelleme bölümünde verilmiştir. Kullanılan Ansys paket programında yapılan nonlineer çözüm sonucunda Flanşlı T ara bağlantı elemanına ait simülasyon, gerilme, gerinim ve deformasyon değerleri elde edilmiştir. Ayrıca yine kullanılan Cadmould ve Mouldflow Plastik Enjeksiyon Programlarında yapılan analizler sonucunda enjeksiyon zamanı, enjeksiyon hızı, enjeksiyon basıncı, modelin enjeksiyon sonrasındaki yüzey kalitesi gibi değerler elde edilmiştir.

Mukavemet analizlerinin gerçekleştirildiği simülasyonlar sonucunda elde edilen sonuçları aşağıda belirtildiği şekilde sıralayabiliriz:

- İlk modelin simülasyonundan elde edilen gerilme değerleri malzemenin çekme mukavemetinden düşük çıkmıştır. Bu durum geometrinin mukavemet açısından uygunluğunu göstermektedir.
- Optimizasyon sonrası geometrisi değiştirilen modelin simülasyonu sonucu elde edilen gerilme değerleri malzemenin çekme mukavemetinden düşük çıkmıştır.
- İlk model ile optimizasyon sonrası modelin simülasyonlarının sonucunda çıkan gerilme ve deformasyon değerleri beklenen şekilde çıkmış olup, et kalınlığı düşük ilk modelin gerilme ve deformasyon değerleri et kalınlığı büyük modelin gerilme ve deformasyon değerlerinden daha büyük çıkmıştır.

Plastik enjeksiyon işleminin gerçekleştirildiği simülasyonlar sonucunda elde edilen sonuçları aşağıda belirtildiği şekilde sıralayabiliriz:

- Modelin plastik enjeksiyon işleminde girilen malzeme ve kalıp parametreleriyle geometrinin uygun olduğu belirlenmiştir.
- Optimizasyon öncesi ince cidarlı model ile optimizasyon sonrası kalın cidarlı ara bağlantı elamanı arasında en belirgin fark yüzey kalitesi, yolluk sayısı yeri ve soğuma zamanı gibi parametrik değerlerde olmuştur.

- Optimizasyon ile plastik enjeksiyon işlem parametrelerinin (soğuma zamanı, enjeksiyon zamanı) değiştirilerek ve soğutma kanalları tasarımı yapılarak ürün yüzey kalitesi arttırılabilir.

Bu tez çalışmasıyla çok karmaşık bir doğaya sahip viskoelastik ara bağlantı elemanının mukavemet analizinin sonlu eleman yöntemiyle modellenebileceği gösterilmiştir. Ayrıca bu elemanın plastik enjeksiyon simülasyonu bilgisayar modelleme programları yardımıyla yapılmıştır. Çalışma Bilgisayarla modelleme konusunda yol gösterici olabilecek bir bilgi içeriğine sahiptir. Ayrıca Plastik imalat sektörü için önemli bir ihtiyaç olan plastiklerin modellenmesi konusuna da ışık tutacağı düşünülmektedir.

## KAYNAKLAR

- (1) Askeland D.R. “The Science and Engineering of Materials”, hapman&Hall, p.518, China. (1996):
- (2) Callister W.D. “Materials Science and Engineering An Introduction”, John Wiley & Sons, Inc., p.500, United States of America. (2000)
- (3) Subbiah, S., Trafford, D. L., Güçeri, S. I., Non- Isotbennal Flow Of Polymers Into Two - Dimensional, Thin Cavity Molds: A Numerical Grid Generation Approach International Journal Beat Mass Transfer, Vol. 32, No:3, Pp 415-434, Publisbed By Elsevier Science Ine., Great Britam. (1989).
- (4) - Seow, L. W., Lam, Y. C., Optimising Flow in Plastic Injection Molding, Journal Of Materials Processing Technology, No 72, Pp 333341, Published By Elsevier Science Ine., New York. (1997)
- (5) Hill, D., Further Studies Of The Injection Moulding Process, Applied Mathematics Modelling, Vol. 20, Published By Elsevier Science Ine., New York. (1996)
- (6) SEZER S. ” Analysis Of Creep Behavior Of Polyethylen Material Used In Plastic Pipe Manufacturing”,” Yıldız Teknik Üniversitesi, Makina Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Yıldız-İ STANBUL . ( 2004 )
- (7) R.R. Resapu & K.B. Nagendran & R.D. Bradshaw, “A Finite Element Method for the Determination of optimal Viscoelastic Material Properties from Indentation Tests of

Polymer Film and Wire with Polymer Insulation”, “Society for Experimental Mechanics 2007”. (2007)

(8) Xiangming Zhang, Shaohong Yang, and Liwei Chen, “Finite Element Simulation of Viscoelastic Damping Materials” Department of Mechanics, Naval University of Engineering”, Wuhan 430033, china

(9) Rocio Seltzer , Yiu-Wing Mai, “Depth sensing indentation of linear viscoelastic–plastic solids : A simple method to determine creep compliance”, “ Centre for Advanced Materials Technology (CAMT), School of Aerospace, Mechanical and Mechatronic Engineering J07, The University of Sydney, NSW 2006, Australia” (2006)

(10) Paul H. DeHoffa,\_, Kenneth J. Anusaviceb, Nils Go“ tzenc , ”Viscoelastic finite element analysis of an all-ceramic fixed partial denture”,” Journal of Biomechanics 39 (2006) 40–48 “(2006 )

(11) Paul H. DeHoffa,\*, Kenneth J. Anusaviceb , “Shear stress relaxation of dental ceramics determined from creep behavior”, “Dental Materials 20, 717–725” (2004)

(12) Aydın, H. PVC Üretimi ve Katkı Maddeleri. Osmangazi Üniv., Fen Edebiyat Fak., Kimya bölümü, (Bitirme tezi), Eskişehir, 86 s. (2004)

(13) Akkurt S., “Plastik Malzeme Bilgisi” Sena matbaası, p.12-13, İstanbul (1991)

- (14) Schaffer J.P., Saxena A., Antolovich D., Sanders T.H., Warner S.B.,: “The Science and Design of Engineering Materials”, Mc Graw-Hill, p.194, Singapore. (1999)
- (15) Serdaroglu N., “Plastik Maddeler Cilt I”, Kutulmuş Matbaası, s.1-2, İstanbul. (1956)
- (16) Yaşar H., “Plastikler Dünyası”, TMMOB Makina Mühendisleri Odası, s.1, Ankara. (1992)
- (17) Akyüz Ö. F., , “Plastikler Ve Plastik Enjeksiyon Teknolojisine Giriş”, Pagev Yayınları, İstanbul. (1999)
- (18) Perzyna, P. Fundamental problems in viscoplasticity, Advances in Applied Mechanics, Vol. 9, Academic Press, New York, pp. 313-377 (1968).
- (19) Peirce, D., Shih, C.F., and Needleman, A., A tangent modulus method for rate dependent solids, Computers & Structures, Vol. 18, pp. 975–888 (1984).
- (20) Anand, L., "Constitutive Equations for the Rate-Dependent Deformation of Metals at Elevated Temperatures", Journal of Engineering Materials and Technology,, Vol. 104, pp. 12-17 (1982)
- (21) ANSYS theory manual for release 5.6.
- (22) Başol A.” Mouldflow Plastic Advisers (MPA) Programının Kullanımı”, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Teknik Eğitim Fakültesi, Yüksek Lisans Tezi. (2003)



(23) Cadmould Mouldflow Plastic Advisers (MPA) Programının Kullanımı”, Fen Bilimleri Enstitüsü, Teknik Eğitim Fakültesi, Yüksek Lisans Tezi.Cadmould referans

(24) TS 274-3 EN 1452-3 Plastik Boru Sistemleri- İçme ve Kullanma Suyu İçin- Plastikleştirici Katılmamış Polivinil Klorürden (PVC-U)- Bölüm 3: Ekleme Parçalar

(25) Isısan Çalışmaları NO.72 “Sıhhi Tesisat”

(26) Sezer S., “Analysis of Creep Behavior of Polyethylen Material Used in Plastic Pipe Manufacturing”, Journal of Engineering and Natural Sciences, (2004)