



**T.C.  
Uludağ Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü**

**POLİMER MALZEMELERİN EKSTRÜZYON  
PROSESİNİN MODELLENMESİ VE ANALİZİ**

**ÖZLEM KAYA**

**Yüksek Lisans Tezi**



**POLİMER MALZEMELERİN EKSTRÜZYON  
PROSESİNİN MODELLENMESİ VE ANALİZİ**

**ÖZLEM KAYA**



T.C.  
ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**POLİMER MALZEMELERİN EKSTRÜZYON  
PROSESİNİN MODELLENMESİ VE ANALİZİ**

**Özlem KAYA**

Prof. Dr. Necmettin KAYA  
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA-2018

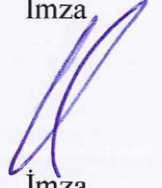
## TEZ ONAYI

Özlem KAYA tarafından hazırlanan "Polimer Malzemelerin Ekstrüzyon Prosesinin Modellenmesi ve Analizi" adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği/oy çokluğu ile Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

**Danışman :** Prof. Dr. Necmettin KAYA

**Başkan :** Prof. Dr. Necmettin KAYA  
Uludağ Üniversitesi  
Mühendislik Fakültesi  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

İmza



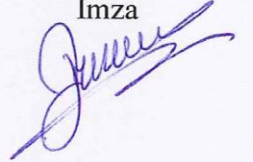
**Üye :** Yrd. Doç. Dr. Erol SOLMAZ  
Uludağ Üniversitesi  
Mühendislik Fakültesi  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

İmza

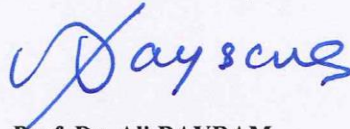


**Üye :** Yrd. Doç. Dr. Erdem UZUNSOY  
Bursa Teknik Üniversitesi  
Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

İmza



Yukarıdaki sonucu onaylarım



Prof. Dr. Ali BAYRAM  
Enstitü Müdürü

16...2018

**U.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;**

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
  - görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
  - başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
  - atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
  - kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
  - ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı
- beyan ederim.**

15.3.2018

**ÖZLEM KAYA**

# ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

## POLİMER MALZEMELERİN EKSTRÜZYON PROSESİNİN MODELLENMESİ VE ANALİZİ

**Özlem KAYA**

Uludağ Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

**Danışman:** Prof. Dr. Necmettin KAYA

Polimer malzemeler günümüz teknolojisinde güçlü mekanik özelliklere sahip olmaları, hızlı şekillendirilebilmeleri, düşük maliyetli olmaları gibi birçok sebeple yaygın olarak kullanılmaktadır. Dolayısıyla bu malzemelerin kullanıma kazandırılmaları amacıyla çok çeşitli üretim yöntemleri geliştirilmiştir ve uygulanmaktadır. Bu yöntemlerden biri de ekstrüzyon yöntemidir.

Çoğu alanda ihtiyaç duyulan plastik profillerin büyük bir kısmının düşük maliyetli ve sürekli bir yöntem olan ekstrüzyon yöntemi ile elde edilebilmesi bu yöntemin yaygın olarak kullanılmasına ve bu teknolojinin büyük oranda gelişmesine olanak sağlamıştır.

Bu tez çalışmasında polimer malzemelerin şekillendirilmesinde kullanılan ekstrüzyon yöntem ve prosesi incelenerek prosese etki eden faktörler analiz edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Ansys Aim, Ekstrüzyon, Polimer, Reoloji, Ekstrüder, Sıcak Kalıp

**2018, viii+ 43 sayfa.**

## **ABSTRACT**

MSc Thesis

### **MODELING AND ANALYSIS OF EXTRUSION PROCESS OF POLYMER MATERIALS**

**Özlem KAYA**

Uludağ University  
Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Department of Mechanical Engineering

**Supervisor:** Prof. Dr. Necmettin KAYA

Polymer materials are widely used in today's technology for many reasons such as having strong mechanical properties, being able to be shaped quickly, and being low cost. Therefore, a wide variety of production methods have been developed and implemented in order to make these materials useful. One of these methods is the extrusion method.

In most areas, a large part of the required plastic profiles can be obtained with the extrusion method, which is a low-cost and continuous method, allowing this method to be used extensively and to develop this technology in large scale.

In this thesis study, the factors effecting the process were analyzed by examining the extrusion method and process used in shaping the polymer materials.

**Key Words:** Ansys Aim, Extrusion, Polymer, Rheology, Extruder, Hot Mold

**2018, viii + 43 pages.**

# İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET .....	i
ABSTRACT .....	ii
İÇİNDEKİLER .....	iii
TEŞEKKÜR.....	iv
SİMGELER ve KISALTMALAR .....	v
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vi
ÇİZELGE DİZİNİ .....	viii
1. GİRİŞ .....	1
2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI .....	2
2.1. Polimerlerin Ekstrüzyonunda Akış Davranışını İnceleyen Çalışmalar.....	2
2.2. Polimerler.....	8
2.2.1 Polimerlerin Genel Özellikleri.....	10
2.2.2. Polimer Türleri .....	10
2.2.3. Polimerlerde Çekme Eğrisi .....	12
2.2.4. Polimer Reolojisi .....	14
2.3. Polimerlerin Ekstrüzyonu .....	15
2.3.1. Ekstrüder .....	16
2.3.2. Kalibratör ve Havuz .....	19
2.3.3. Çektirme (Konveyör) ve Kesme Operasyonu.....	20
2.3.4. Ko-Ekstrüzyon Prosesi .....	21
2.3.5. Çubuk Ekstrüzyon Kalıbı .....	21
2.3.6. Boru Ekstrüzyon Kalıbı .....	22
2.3.7. Levha Ekstrüzyon Kalıpları .....	22
2.3.8. Kompleks Profil Ekstrüzyon Kalıpları .....	23
2.4. Ekstrüzyonda Karşılaşılan Sorunlar .....	23
2.5. Ekstrüzyonda Kalıp Dizayn Esasları .....	29
3 .MATERYAL VE YÖNTEM .....	30
3.1. Materyal .....	30
3.2. Yöntem .....	30
4. BULGULAR .....	31
4.1. Silindirik Çubuk Profil İçin Akış Analizi .....	31
4.2. Kare Profil İçin Akış Analizi .....	35
4.2.1. Tasarım 1 .....	35
4.2.2. Tasarım 2 .....	38
5. TARTIŞMA VE SONUÇ .....	42
KAYNAKLAR .....	43



## TEŞEKKÜR

Tez çalıőmam sırasında manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen sevgili aileme; annem Nesrin KAYA, babam Yalçın KAYA, kardeőlerim Serdar KAYA ve Tuba KAYA'ya gönülden teőekkürlerimi sunuyorum.

Bilgilendirme ve yönlendirmeleriyle çalıőmamda yol gösteren değerli danışman hocam Prof. Dr. Necmettin KAYA'ya teşekkür ediyorum.

Özlem KAYA

15.13.2018



## SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

<b>Simgeler</b>	<b>Açıklama</b>
D	Vida çapı
L	Silindir kovan uzunluğu
Q	Ekstrüzyon makine kapasitesi
N	Vida devri
h	Vida derinliği
w	Özgül ağırlık olmak
v	Kalıp içine giren akışkanın hızı
r	Yarı Çap
ý	Kayma hızı
τ	Kayma gerilmesi
F	Kuvvet
A	Alan
η	Newton tipi akışlarda kayma viskozitesi
t	Zaman
T	Sıcaklık
P	Basınç
ρ	Yoğunluk
α	Isıl Genleşme Katsayısı
k	Isı İletim Katsayısı
cp	Özgül Isı Kapasitesi
V	Hacim
σ	Normal Gerilme
cp	Sabit Basıncıta Özgül Isı Kapasitesi
cv	Sabit Hacimde Özgül Isı Kapasitesi
μ	Viskozite Değeri

<b>Kısaltmalar</b>	<b>Açıklama</b>
PE	Polietilen
HDPE	Yüksek yoğunluklu polietilen
LDPE	Düşük yoğunluklu polietilen
LLDPE	Lineer düşük yoğunluklu polietilen
PP	Polipropilen
PA	Polyamid
PVC	Polivinilklorür

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1. Üretilecek profil (Yılmaz 2007) .....	2
Şekil 2.2. Hedef Profilin Farklı Çaplarla Beslenmesi (Yılmaz 2007) .....	3
Şekil 2.3. Çözüm ağı (Yılmaz 2007) .....	3
Şekil 2.4. Simülasyon 1 'de basınç dağılımı (basınç birimi Pa) (simetri yüzeyi tarafından görünüm) (Yılmaz 2007) .....	4
Şekil 2.5. Simülasyon 2 'de basınç dağılımı (basınç birimi Pa) (simetri yüzeyi tarafından görünüm) (Yılmaz 2007) .....	4
Şekil 2.6. Simülasyon 2 'ye ait m/s cinsinden hız dağılımı (Yılmaz 2007) .....	5
Şekil 2.7. Kalıp Düzlüğü İyileştirilmiş Kalıp Geometri (Yılmaz 2007) .....	5
Şekil 2.8. Akış boyunca farklı kesitlerde hız dağılımları. Sırasıyla kesitlerin girişten uzaklıkları 0, 7, 18, 25, 35 (çıkış kesiti) mm 'dir. (Yılmaz 2007) .....	6
Şekil 2.9. Simülasyonda kullanılan geometri ve çözüm ağı yapısı. Şekilden anlaşılacağı üzere ayrık parçalar çıkıştan 5 mm önce birleşmektedir. (Yılmaz 2007) .....	6
Şekil 2.10. Simülasyon Sonucu Çıkış Kesitinde Hız Dağılımı (Yılmaz 2007) .....	7
Şekil 2.11. Monomerlerin Oluşturduğu Polimer Yapı (Aran 2008) .....	8
Şekil 2.12. Polimer yapısı (Aran 2008) .....	9
Şekil 2.13. Sıcaklığın yapı ve özelliklere etkisi (Aran 2008) .....	9
Şekil 2.14. Termoplastik Bağ Yapısı (Aran 2008) .....	10
Şekil 2.15. Termoset Bağ Yapısı (Aran 2008) .....	11
Şekil 2.16. Elastomer Bağ Yapısı (Aran 2008) .....	11
Şekil 2.17. Farklı Polimerlerin Gerilme-Birim Uzama Davranışları (Aran 2008) .....	12
Şekil 2.18. Polimerler için Tipik Gerilme-Uzama Grafikleri (Megep 2006a) .....	13
Şekil 2.19. Sıcaklığa Bağlı Gerilme-Uzama Eğrisi (Aran 2008) .....	13
Şekil 2.20. Malzeme davranışına göre Gerilme, Birim uzama- Zaman Grafikleri (Ün 2007) .....	14
Şekil 2.21. Ekstrüzyon Proses Şeması (Anonim 2017) .....	15
Şekil 2.22. Ekstrüder Proses Şeması (Anonim 2018) .....	16
Şekil 2.23. Ekstrüzyon Vidası (Megep 2008a) .....	17
Şekil 2.24. İki Vidalı Ekstrüder (Eker 2009) .....	18
Şekil 2.25. Ekstrüder Uç Kalıbı (Elek) (Eker 2009) .....	19
Şekil 2.26. Ekstrüzyon Kalibre Seti (Megep 2013) .....	20
Şekil 2.27. Ekstrüzyon Proses Şeması (Anonim 2017) .....	20
Şekil 2.28. Ko-ekstrüzyon Prosesi (Eker 2009) .....	21
Şekil 2.29. Çubuk Ekstrüzyon Kalıp Prosesi (Eker 2009) .....	21
Şekil 2.30. Boru Profil Kalıbı (Eker 2009) .....	22
Şekil 2.31. Levha Profil Kalıbı (Yılmaz 2007) .....	22
Şekil 2.32. Kompleks Kalıp ve Proses Örneği (Eker 2009) .....	23
Şekil 2.33. Kalıp Çıkışında Eriyik Polimerdeki Şişme (Yılmaz 2007) .....	24
Şekil 2.34. Kalıp Çıkışında Eriyik Polimerdeki Şişme Süreci (Rauwendaal 1987, Nart 2011) .....	24
Şekil 2.35. Farklı Kafa Şekillerine Göre Kalıp Şişmesi ve Viskozite-Ekstrüzyon Hızı- Kafa Şişmesi İlişkisi (Eker 2009) .....	25
Şekil 2.36. LLDPE (linear low density polyethylene) 160 0C' de yüzey bozulmasının mikroskop ile yakından görünüşü (Zehev ve Costas 2006, Atasoy 2013) .....	25

Şekil 2.37. Kafa Şişmesi-Eriyik Kırılması İlişkisi (Eker 2009) .....	26
Şekil 2.38. Sıcak Kalıp Dizaynında Dikkat Edilmesi Gereken Noktalar (Eker 2009) ..	29
Şekil 2.39. Kalıp Çıkışında Hız Dengesinin Bozulması ile Parçada Oluşan Bozunma (Yılmaz 2007) .....	29
Şekil 3.1. Ansys Aim Polimer Malzeme Datası .....	30
Şekil 4.1. Konik Girişli Silindirik Çubuk Profil Akış Modeli ve Sonlu Elemanlar Ağ Yapısı (Mesh) .....	31
Şekil 4.2. İç Bükey Girişli Silindirik Çubuk Profil Akış Modeli ve Sonlu Elemanlar Ağ Yapısı .....	31
Şekil 4.3. Konik giriş: 0,001624m .....	32
Şekil 4.4. İç bükey giriş: 0,001914m .....	32
Şekil 4.5. Konik Giriş Shear Rate Değerleri ve İç Bükey Giriş Shear Rate Değerleri ..	33
Şekil 4.6. Konik Giriş ve İç Bükey Giri Hız Dağılımı .....	34
Şekil 4.7. Tasarım 1 Model ve Sonlu Elemanlar Ağ Yapısı .....	35
Şekil 4.8. Tasarım 1 için Deplasman Modeli ve Değerleri .....	36
Şekil 4.9. Tasarım 1 için Shear Rate .....	36
Şekil 4.10. Tasarım 1 için Hız Büyüklüğü .....	37
Şekil 4.11. Tasarım 2 Model ve Sonlu Elemanlar Ağ Yapısı .....	38
Şekil 4.12. Tasarım 2 için Deplasman Modeli ve Değerleri .....	39
Şekil 4.13. Tasarım 2 için Shear Rate .....	40
Şekil 4.14. Hız Büyüklüğü .....	40

## ÇİZELGE DİZİNİ

	<b>Sayfa</b>
Çizelge 2.1. Ekstrüzyonda Karşılaşılan Problemler 1 (Eker 2009) .....	27
Çizelge 2.2. Ekstrüzyonda Karşılaşılan Problemler 2 (Eker 2009) .....	28



## 1. GİRİŞ

Polimer ekstrüzyon prosesinde karşılaşılan en önemli problemlerden biri kalıp çıkışındaki profil modelinin iç ve çevresel etkilerle değişme eğilimidir.

Bu tez çalışmasında çubuk ve kare plastik profillerin ekstrüzyon kalıpları modellenerek kalıp çıkışındaki davranışları incelenmiştir.

Çubuk profilde iki tür kalıp girişi modellenmiş ve şişme davranışı incelenmiştir. Kare profilde ise profil ile birebir boyutlarda dizyn edilen ekstrüder kalıbdan çıkan parçadaki problemler analiz edilerek, dizayn iyileştirmesi yapılmıştır.

Tez kapsamında akış geometrilerinin dizaynında SolidWork 2017 yazılımı kullanılmıştır. Akış modelleri analiz edilmek üzere Ansys Aim programına aktarılmıştır. Profillere uygun sonlu elemanlar ağ yapısı oluşturulmuş, ortam şartları belirlenmiştir. Analiz tamamlandıktan sonra çıkan sonuçlar yorumlanarak iyileştirme önerileri sunulmuştur.

## 2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI

Polimer malzemelerin ekstrüzyon proseslerine dair literatürdeki çalışmalar daha çok polimer akışkanın ekstrüder içindeki ve çıkışındaki hareket davranışları üzerinedir. Ekstrüzyon kalıbı tasarımında kalıp çıkışında dengelenemeyen hız dağılımı ve şişme veya geometri bozulması olmak üzere iki ana problem bulunmaktadır. Polimerlerin bu davranışının giderilmesi polimere uygun proses ile çalışılması ve eriyik malzemenin davranış özelliklerinin analiz edilmesi, bilinmesi durumunda giderilebilir.

### 2.1. Polimerlerin Ekstrüzyonunda Akış Davranışını İnceleyen Çalışmalar

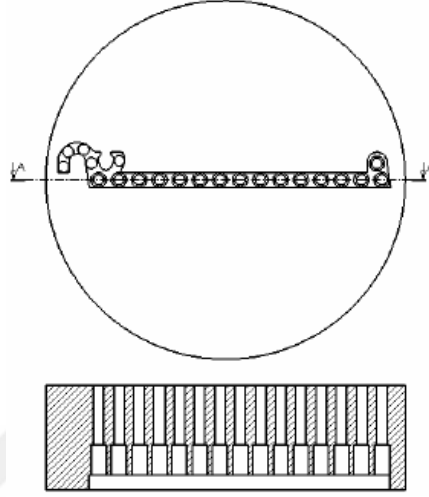
Yılmaz (2007), çalışmasında polimer akışkanın kalıp giriş ve kalıp çıkışındaki davranışını incelemiş ve kalıp çıkışında karşılaşılan geometri bozulmasına farklı çözüm yöntemleri üzerine çalışmıştır.

Yılmaz (2007), çalışmalarında Şekil 2.1'deki hedef geometrinin kalıp çıkışında sağlanması üzerine yoğunlaşmıştır. Bu amaçla kalıp çıkışında dengeli bir akış sağlayabilmek için 3 farklı yaklaşımda bulunulmuştur. Yöntemler sırasıyla profilin kalıptaki farklı çaplı deliklerle beslenmesi çalışması, kalıp içi düzlüğünün geometrisinin değiştirilerek üniform akış sağlanması çalışması ve farklı et kalınlıklarına sahip kısımların yüzeylerini ayırma yöntemiyle üniform akış sağlanması çalışmalarıdır.

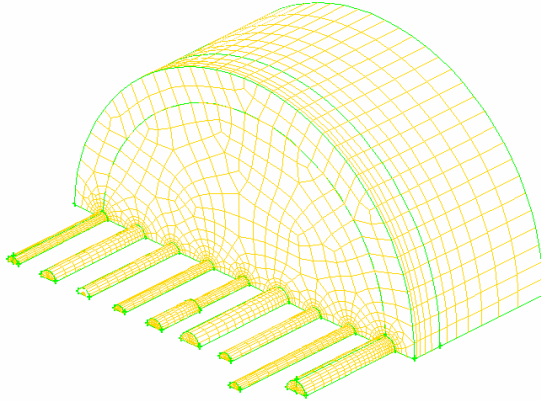


**Şekil 2.1.** Üretilecek profil (Yılmaz 2007)

İlk yaklaşımda profilin deliklerle beslenmesi yöntemine başvurularak Şekil 2.2'deki kalıp geometrisi ile deneysel ve sayısal simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Simülasyonlar iki farklı HDPE için gerçekleştirilmiş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Çözüm ağı Şekil 2.3'te gösterilmiştir.



**Şekil 2.2.** Hedef Profilin Farklı Çaplarla Beslenmesi (Yılmaz 2007)

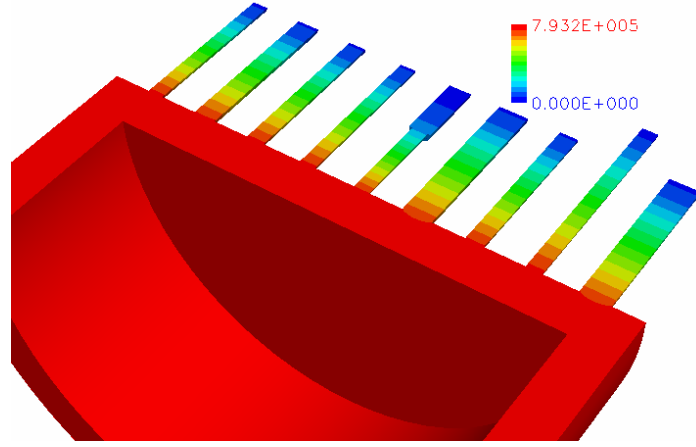


**Şekil 2.3.** Çözüm ağı (Yılmaz 2007)

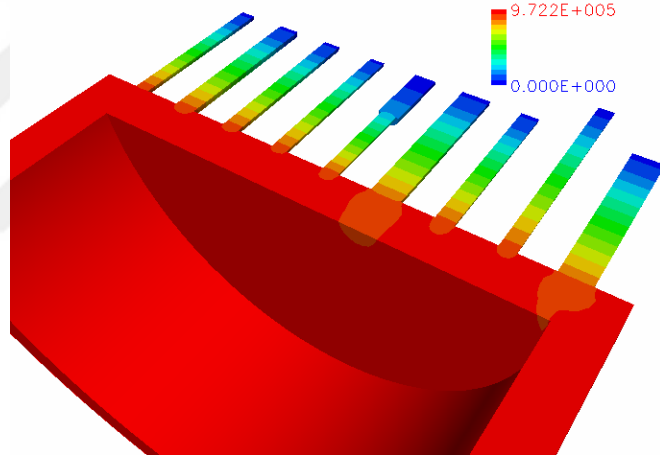
Deney ve simülasyonlar sırasında merkezden dışa doğru debinin arttığı, basınç farkından dolayı aynı çaplı deliklerde farklı debiler gözlenmiştir.

İki farklı HDPE kullanılması sonucu basınç değerleri farklılık gösterse de değerlerin birbirine yakın olduğu, büyük çaplı deliklerdeki basınç dağılımının küçük çaplı deliklere göre daha düşük olduğu, delik boyu arttıkça giriş basınç kaybı yüzdesinin azaldığı gözlenmiştir. (Şekil 2.4, Şekil 2.5)



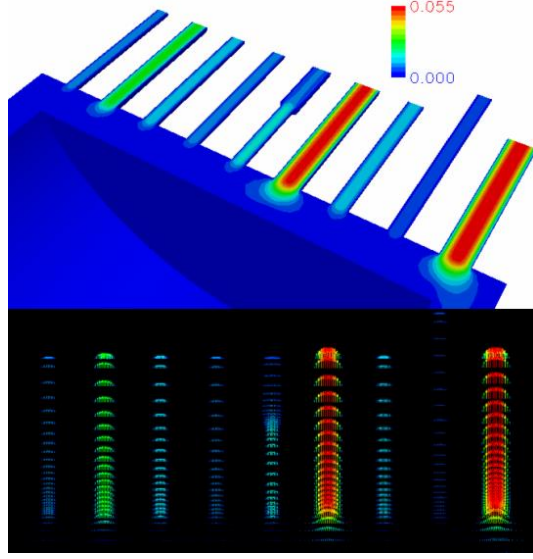


**Şekil 2.4.** Simülasyon 1 'de basınç dağılımı (basınç birimi Pa) (simetri yüzeyi tarafından görünüm) (Yılmaz 2007)



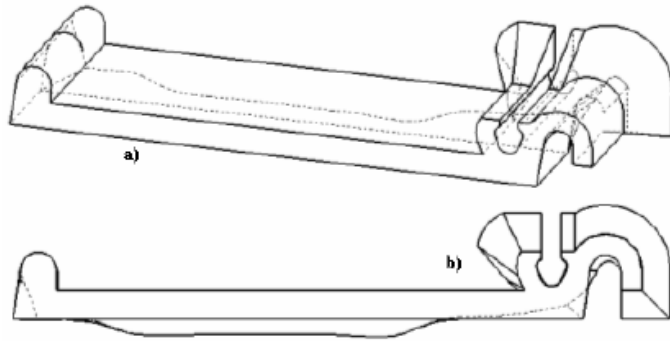
**Şekil 2.5.** Simülasyon 2 'de basınç dağılımı (basınç birimi Pa) (simetri yüzeyi tarafından görünüm) (Yılmaz 2007)

Büyük çaplı deliklerde akışa karşı direnç düşük olduğundan dolayı küçük deliklere göre daha fazla debi akışı gerçekleşmiş ve küçük deliklere göre hız değerlerinin daha yüksek görülmüştür. (Şekil 2.6)



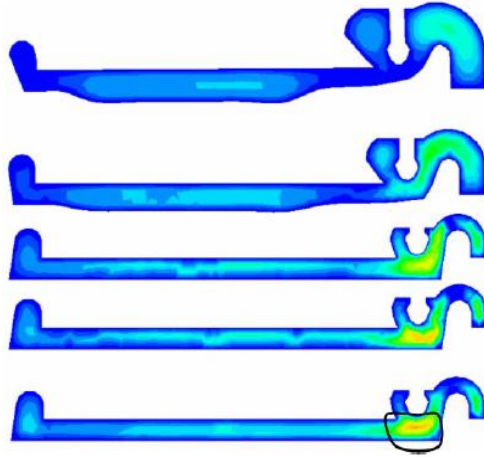
**Şekil 2.6.** Simülasyon 2 'ye ait m/s cinsinden hız dağılımı (Yılmaz 2007)

Yılmaz (2007), çalışmasında üniform akış elde etmek amacıyla ikincil bir yöntem olarak kalıp düzlüğü geometrisini değiştirme yöntemi üzerine çalışmıştır. Şekil 2.1.'deki geometride et kalınlığı değişkenlik göstermektedir. Bu durum kalıp çıkışında dengeli bir akış eldesini zorlaştırmaktadır. Bu nedenle kesitin dar olduğu gölgelerde giriş kesiti genişletilerek bu kesitlere konik giriş sağlanmıştır. Şekil 2.7'de iyileştirilmiş kalıp geometrisi görülmektedir.



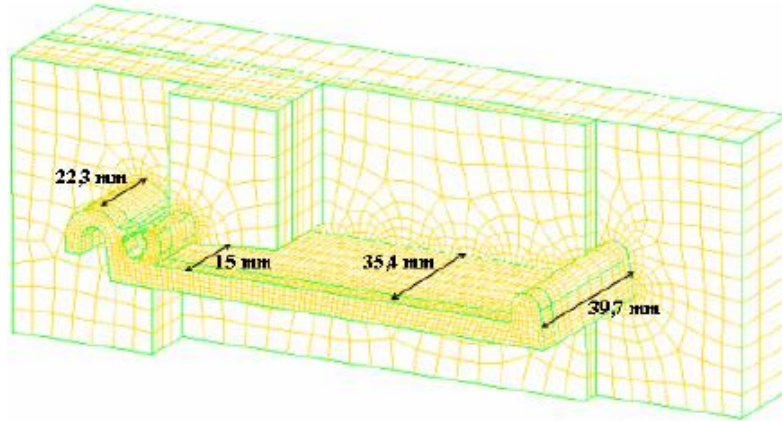
**Şekil 2.7.** Kalıp Düzlüğü İyileştirilmiş Kalıp Geometri (Yılmaz 2007)

Simülasyonlar sonucu, iyileştirme yapılan genişletilmiş dar kısımlarda akışa karşı direnç azaltılmıştır. Bu sayede dar kısımlardaki akışkanın geniş kısımlara yönelmesinin önüne geçilmiştir. Tasarımda profil kesit kalınlığında ani değişimlerden kaçınılması gerektiği, geçişlerin yumuşak olması gerektiği görülmüştür. (Şekil 2.8)



**Şekil 2.8.** Akış boyunca farklı kesitlerde hız dağılımları. Sırasıyla kesitlerin girişten uzaklıkları 0, 7, 18, 25, 35 (çıkış kesiti) mm 'dir. (Yılmaz 2007)

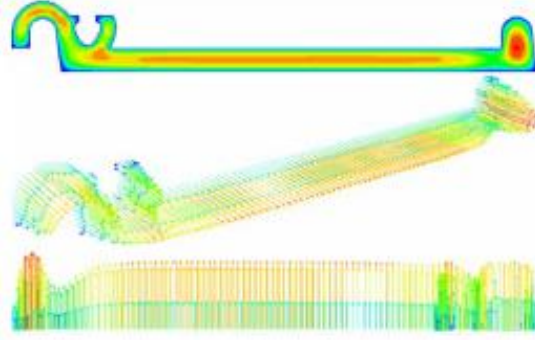
Yılmaz (2007), çalışmasında dengeli akış dağılımı sağlamak üzere farklı et kalınlığı olan bölgeleri birbirlerinden ayırarak kademeli akış yöntemini de incelemiştir. Bu yöntemle benzer et kalınlıkları aynı yüzeyler içinde tutulmuştur. 4 bölgeye ayrılmış kalıp içindeki akışkanların çıkışa yakın bölgede birleşmeleri sağlanmıştır. Kalıp formu Şekil 2.9'da gösterilmiştir.



**Şekil 2.9.** Simülasyonda kullanılan geometri ve çözüm ağı yapısı. Şekilden anlaşılacağı üzere ayırık parçalar çıkıştan 5 mm önce birleşmektedir. (Yılmaz 2007)

Bu yöntemde eşit ortalama hız elde edilmesi için parça uzunlukları farklı tutulmuş, akış dengeleme probleminin büyük ölçüde giderilebildiği görülmüştür. Profildeki hız dağılımı Şekil 2.10'da gösterilmiştir. Yöntemin eksi yanı imal edilen profil

mukavemetinin olumsuz yönde etkilenebilmesidir, ayrıca kalıp imalatında da zorlanılabilir.

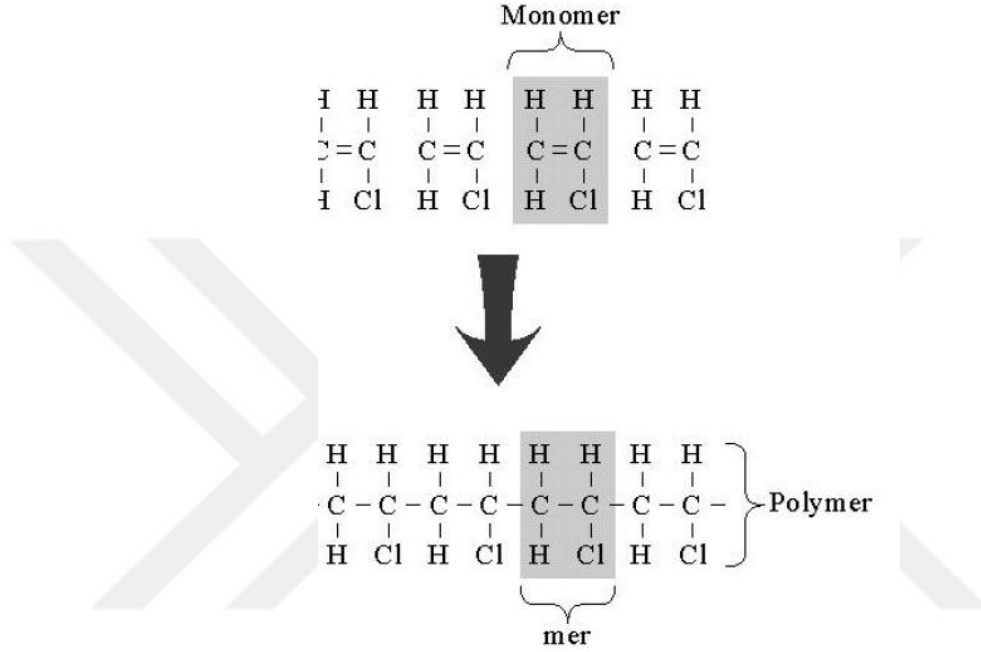


**Şekil 2.10.** Simülasyon Sonucu Çıkış Kesitinde Hız Dağılımı (Yılmaz 2007)

## 2.2. Polimerler

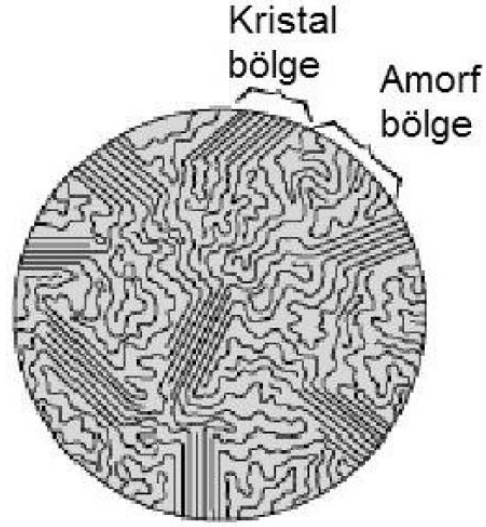
Küçük molekül birimlerinin (mer) ve gruplarının birleşerek oluşturduğu uzun ikincil (zayıf Van der waals bağları 'yalnızca moleküller arasında') veya çapraz bağlar polimer olarak adlandırılır. (Aran 2008)

Şekil 2.11'de monomerlerin oluşturduğu polimer yapı gösterilmiştir.



Şekil 2.11. Monomerlerin Oluşturduğu Polimer Yapı (Aran 2008)

Malzemedeki 'mer' sayısı polimerizasyon derecesini ifade eder. Mer sayısı veya polimerizasyon derecesi arttıkça zincir hareketi zorlaşır, bu sayede malzemenin ısı dayanımı ve rijitliği artar. Moleküllerin birbirlerine zayıf bağlarla bağlandığı durumda molekül yapısı amorf'tur ve kararlı bir yapıya sahip değildir. Kristal yapıda, malzeme daha düzenli bir geometriye sahiptir ve kararlılığı, rijitliği yüksektir. Polimerlerin yapısı Şekil 2.12'de gösterilmiştir. Şekil 2.13'te verildiği üzere kristallik arttıkça malzeme ergime sıcaklığı artar, daha zor işlenir. (Aran 2008)

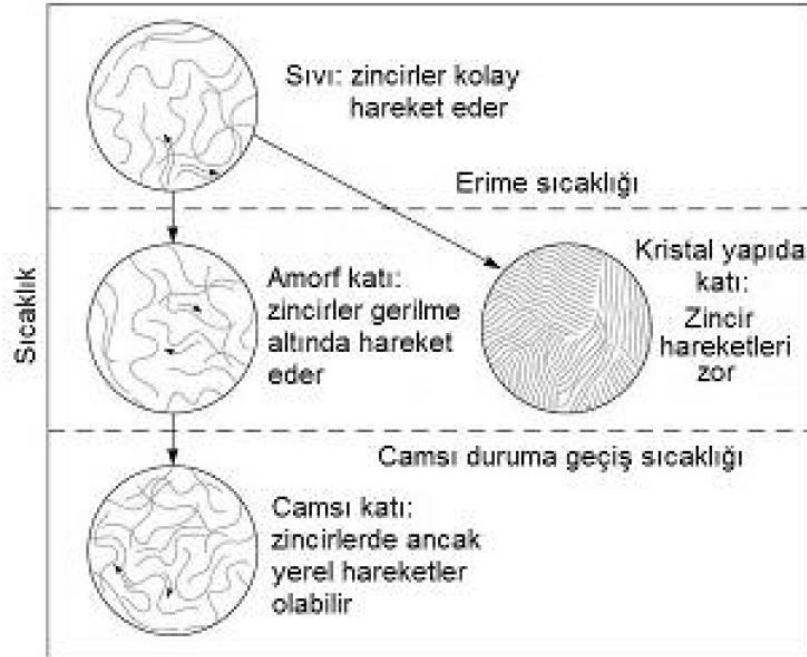


Şekil 2.12. Polimer yapısı (Aran 2008)

Amorf: Soğuma hızlıdır.

Kristalin yapı: Soğuma yavaştır.

Camsı yapı: Soğuma orta hızlıdır.



Şekil 2.13. Sıcaklığın yapı ve özelliklere etkisi (Aran 2008)

### 2.2.1 Polimerlerin Genel Özellikleri

Polimer Malzemelerin genel özellikleri aşağıda özetlenmiştir:

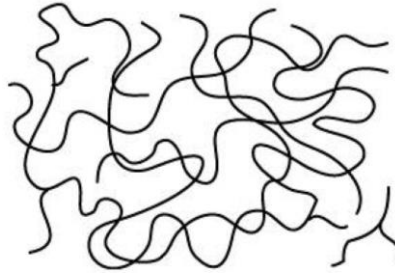
- Isı ve elektrik iletkenlikleri düşüktür.
- Kolay şekillendirilebilirler.
- Korozyona ve kimyasal etkilere karşı dayanımları yüksektir.
- Tekrar işlenebilirler, geri kazandırılabilirler.
- Hafiftir, özgül ağırlıkları düşüktür.
- Düşük yoğunlukları sayesinde düşük sıcaklıklarda şekillendirilebilirler.
- Yüksek mekanik mukavemete sahiptirler.
- Çeşitli katkı maddeleriyle özellikleri, kullanılmak istenildiği yere göre değiştirilebilir.
- İşleme ve elde edilme maliyetleri düşüktür. (Nart 2011)

### 2.2.2. Polimer Türleri

İşlem şekillerine göre polimerler; Termoplastikler, Termosetler, Elastomerler'dir.

Termoplastikler, ikincil bağlarla (Van der Waals) birbirine bağlı olan lineer polimerlerdir. Şekil 2.14'te termoplastik bağ yapısı gösterilmiştir. Van der Waals bağları yaklaşık 100°'de zayıflar ve malzeme bu sıcaklıkta yumuşamaya başlar. Bu tür bağlara sahip polimerlere şekil verilmesi kolay olmakla birlikte geri dönüştürülerek yeniden kullanılabilirler. (Aran 2008)

Kullanım alanını genişletmek adına çeşitli katkı maddeleriyle deformasyon sıcaklıkları yükseltilebilmektedir.



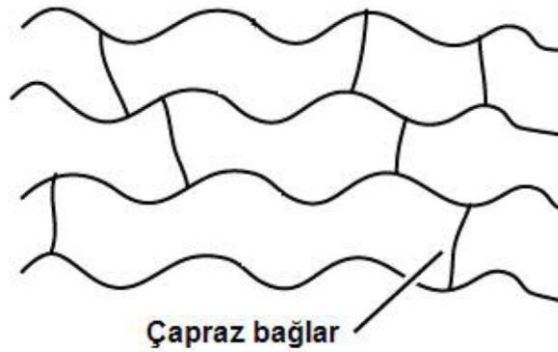
Şekil 2.14. Termoplastik Bağ Yapısı (Aran 2008)

Termosetler; molekül zincirlerinin birbirlerine çapraz bağlarla bağlanarak 3 boyutlu bir yapı meydana getirmesiyle oluşur. Şekil 2.15'te bağ yapısı verilen termosetlerde çapraz bağlanma süreci tamamlandıktan sonra malzeme rijit hale gelir, bu işlem geri çevrilemez. Yüksek sıcaklıklarda erime ve yumuşama olmadığından malzeme yanar. Bu nedenle termoset malzemelerin geri kazanımı çok zordur. (Aran 2008)



**Şekil 2.15.** Termoset Bağ Yapısı (Aran 2008)

Elastomerler malzemeler de termosetler gibi birbirlerine çapraz bağlarla bağlanırlar ancak yapılar rijit değildir. Şekil 2.16'da bağ yapısı verilen elastomerlerde polimer zincirleri kuvvet uygulandığında birbirleri üzerinden kayma eğilim göstermeseler de çapraz bağlar sayesinde esneyebilir ve kuvvet uygulaması sona erdiğinde eski hallerine geri dönebilirler. (Aran 2008)



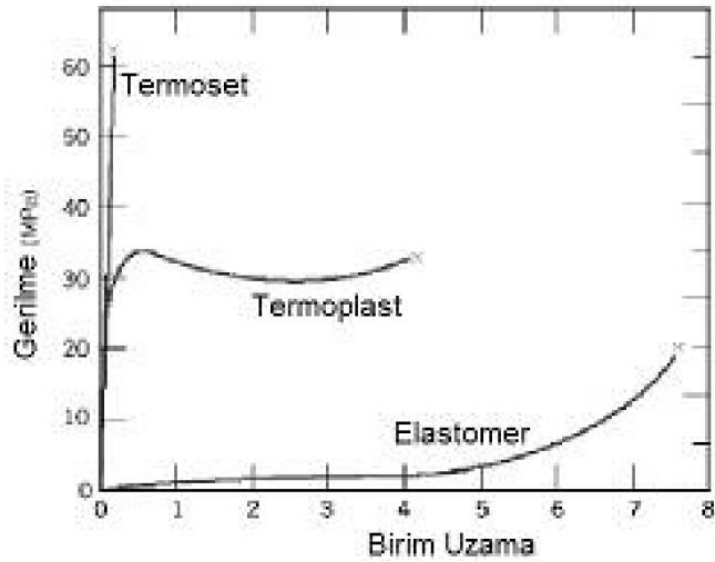
**Şekil 2.16.** Elastomer Bağ Yapısı (Aran 2008)



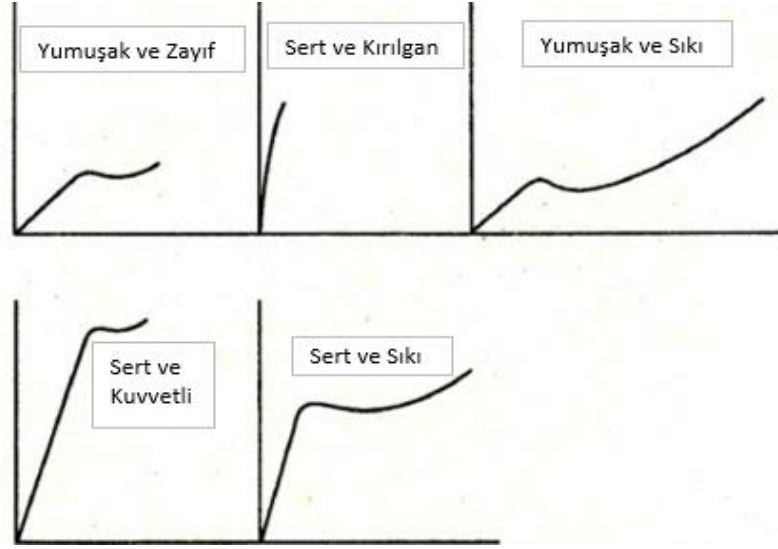
### 2.2.3. Polimerlerde Çekme Eğrisi

Polimerlerin gerilme uzama davranışları molekül-diziliş yapısına göre değişkenlik gösterir. Aşağıdaki grafikte Termoset, termoplastik ve elastomerlerin çekme davranışı gösterilmiştir. Yapısında çapraz bağlar bulunan termosetler, rijit-kararlı ağ yapısıyla çekmeye karşı dayanımı yüksektir. Zayıf bağlara sahip olan termoplastikler akma sınırına kadar elastik deformasyona uğrar ve sonrasında zincirler birbiri üzerinde kayar ve plastik şekil değişime uğrar. Elastomerler rijit olmayan yapısı ile kolay deformasyona uğrar ve çapraz bağlar sayesinde eski haline geri dönebilir. (Aran 2008, Megep 2006a)

Şekil 2.17’de farklı polimerlerin gerilme-birim uzama davranışları gösterilmiştir.



Şekil 2.17. Farklı Polimerlerin Gerilme-Birim Uzama Davranışları (Aran 2008)

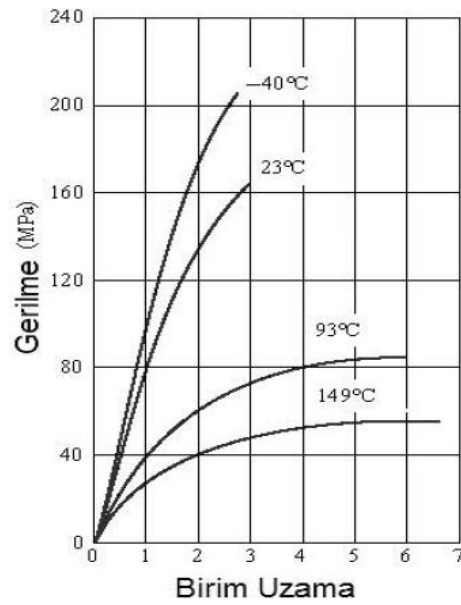


Şekil 2.18. Polimerler için Tipik Gerilme-Uzama Grafikleri (Megep 2006a)

Sıcaklık arttıkça van der Waals bağları zayıflar ve

- Elastiklik modülü düşer.
- Çekme dayanımı düşer.
- Süneklik artar. (Aran 2008)

Şekil 2.19'da sıcaklığa bağlı gerilme-uzama eğrisi verilmiştir.

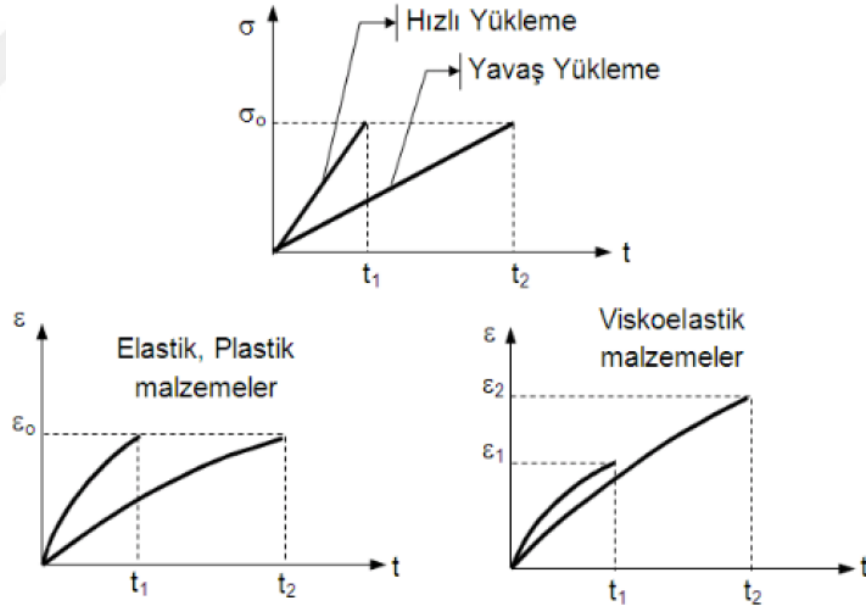


Şekil 2.19. Sıcaklığa Bağlı Gerilme-Uzama Eğrisi (Aran 2008)

#### 2.2.4. Polimer Reolojisi

Reoloji, malzemelerin yük altında zamana bağlı olarak şekil değiştirme davranışlarını incelemektedir ve katı malzemelerde deformasyonu, sıvılarda ise akış özelliklerini belirlemek için kullanılır. Viskozite, malzemenin akmaya karşı gösterdiği dirençtir, viskozitesi yüksek olan malzemeler daha yavaş akar. Çoğu malzeme kuvvet altında hem viskoz hem de elastik davranış gösterirler ve özellik Viskoelastisite olarak adlandırılır. Elastik davranış özelliği ile malzeme, üzerine uygulanan kuvvet kaldırıldığında eski konumuna geri döner, viskoz davranış özelliğinde ise malzeme, kuvvet kaldırıldığında gecikmeli olarak eski haline döner. (Yılmaz 2007)

Polimer malzemelerin reolojik davranışının bilinmesi malzemenin şekillendirme aşamalarının kontrolü ve doğru uygulanabilmesi için önem arz etmektedir. Şekil 2.20'de malzeme davranışına göre gerilme, birim uzama- zaman grafikleri verilmiştir.



Şekil 2.20. Malzeme davranışına göre Gerilme, Birim uzama- Zaman Grafikleri (Ün 2007)

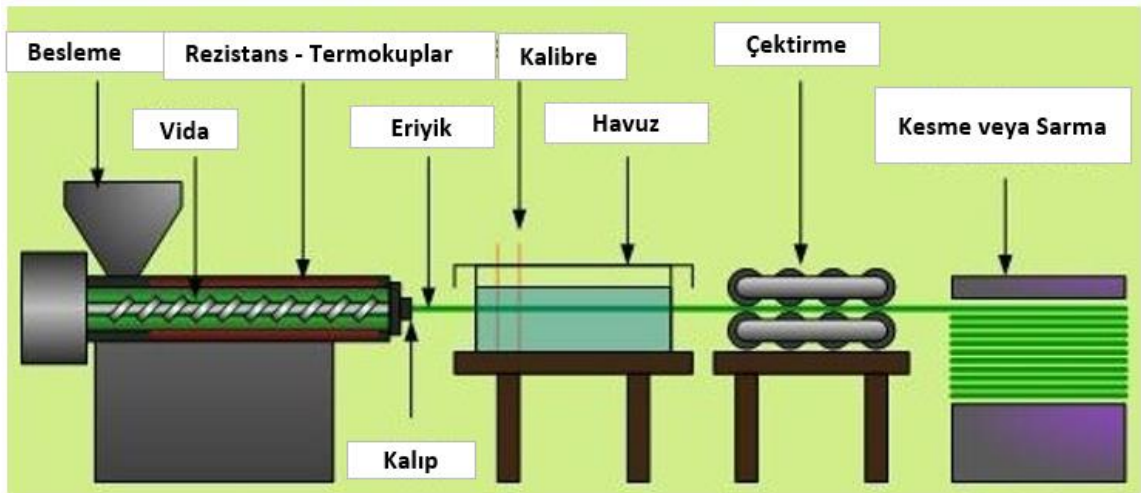
### 2.3. Polimerlerin Ekstrüzyonu

Polimer malzemenin, içerisinde ısıtıcı ve basınçlı vida bulunan ekstrüderde ergitilip vida vasıtasıyla ekstrüder çıkışında bulunan formlu kalıp içerisinde geçirilerek şekillendirilmesini sağlayan sürekli bir akış yöntemidir.

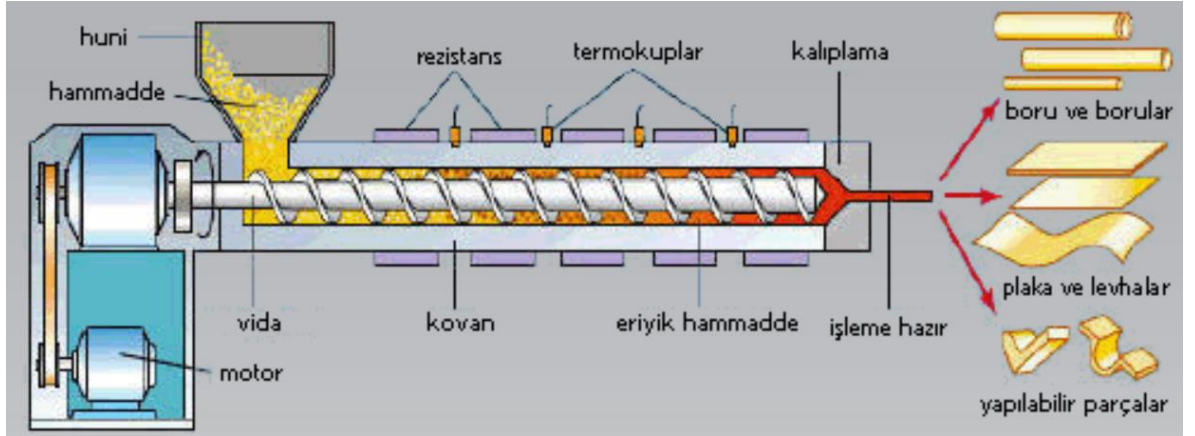
Malzeme bir sonraki aşamada soğutulma işlemine maruz bırakılarak son şeklini alması sağlanır. Soğutma işlemi için ekstrüde edilen polimer, soğutma havuzu içinde bulunan formlu kalibratörlerden geçirilerek havuz boyunca ilerletilir. Sonraki aşamada polimer, kesme işlemine tabi tutularak nihai ürün şeklini alır.

Şekil 2.21’de gösterildiği üzere ekstrüzyon prosesi temel olarak aşağıdaki ekipmanlardan oluşmaktadır:

1. Ekstrüder
  - Besleme hunisi
  - Ekstrüzyon vidası-Isıtıcılar
  - Ekstrüder Uç kalıbı (elek)
  - Sıcak kalıp (ekstrüzyon kalıbı)
2. Kalibratör-Havuz
3. Çektirme (Konveyör)- Kesme operasyonu



Şekil 2.21. Ekstrüzyon Proses Şeması (Anonim 2017)



Şekil 2.22. Ekstrüder Proses Şeması (Anonim 2018)

### 2.3.1. Ekstrüder

#### Besleme Hunisi

Ekstrüdere hammadde girişi besleme hunisinden yapılır.

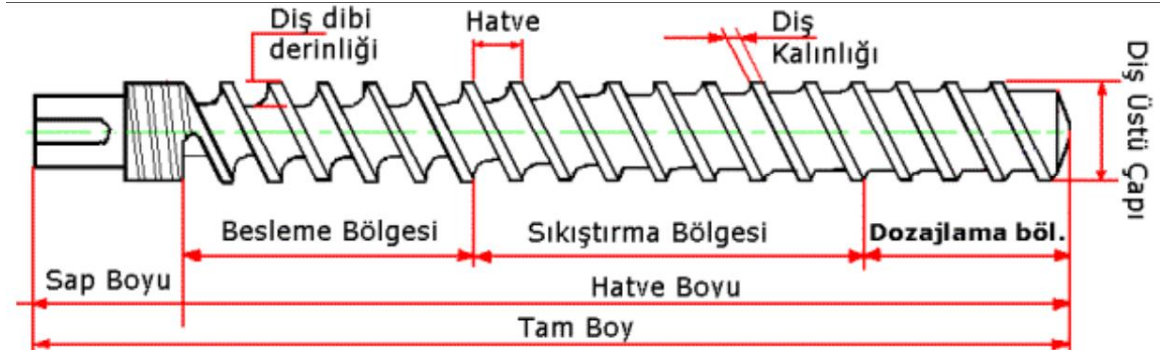
#### Ekstrüzyon Vidası ve Isıtıcılar

Polimer hammaddenin akışını sağlayan vida, Şekil 2.23'te gösterildiği üzere 3 bölümden oluşur.

Kovan içerisinde bulunan besleme, sıkıştırma ve dozajlama bölgelerinde (eriyik şekillendirme-pompalama bölgesi), kovan etrafındaki ısıtıcılarla hammaddenin eriyik hale gelmesi sağlanır.

Besleme hunisinden gelen hammadde besleme bölgesi vasıtasıyla sıkıştırma bölgesine, oradan da pompalama bölgesine alınır.

Bu üç bölüme ait dış dibi derinliği veya vida kalınlığı ve uzunluğu kullanılan hammaddenin cinsine bağlı olarak değişkenlik göstermektedir.



**Şekil 2.23.** Ekstrüzyon Vidası (Megep 2008a)

Ekstrüzyon vida hatvesi, helis açısı ve şekli makine performansını etkileyen unsurlardır. Vida çapını  $D$ , silindir kovan uzunluğu  $L$  olarak kabul edilirse  $L/D$ 'nin etkisi aşağıdaki gibi özetlenebilir; (Eker 2009)

- $L/D > 24$  olduğu vidalarda yüksek kalitede eriyik sağlanır.
- $L/D > 30$  oranı katkı maddelerinin ilave edildiği durumlarda kullanılır.
- $L/D > 20$  oranı kauçuk malzemelerin ekstrüzyonu için uygundur.
- Termoplastiklerde,  $L/D$  oranı 20/1-24/1 olarak seçilir.
- PE için, besleme, sıkıştırma ve dozajlama bölgesi eşit olan vidalar seçilir.
- PP, PA, poliasetal gibi yarı kristalin malzemeler için ani sıkıştırma vidaları kullanılır. Bu tür vidalarda sıkıştırma bölgesi kısadır.
- PVC gibi değişken sürtünme özelliği gösteren ve ekstrüzyonu zor olan malzemeler için vida boyunca sıkıştırma bölgesi olan vidalar tercih edilir.
- Besleme diş derinliği/Taşıma diş derinliği besleme oranını ifade eder ve genellikle 1: 2,4 ile 1: 3,2'dir.
- Taşıma bölgesi kısa olan vidalarda yüksek viskoziteli malzemeler aşırı ısınır,
- Besleme bölgesi kısa olan vidalarda ise düşük viskoziteli malzemelerin ekstrüzyonunda çıkışta yeterli basınç oluşmaz.
- Vida helis açısı ürün alma hızını etkiler ve 10 ile 30° nominaldir.

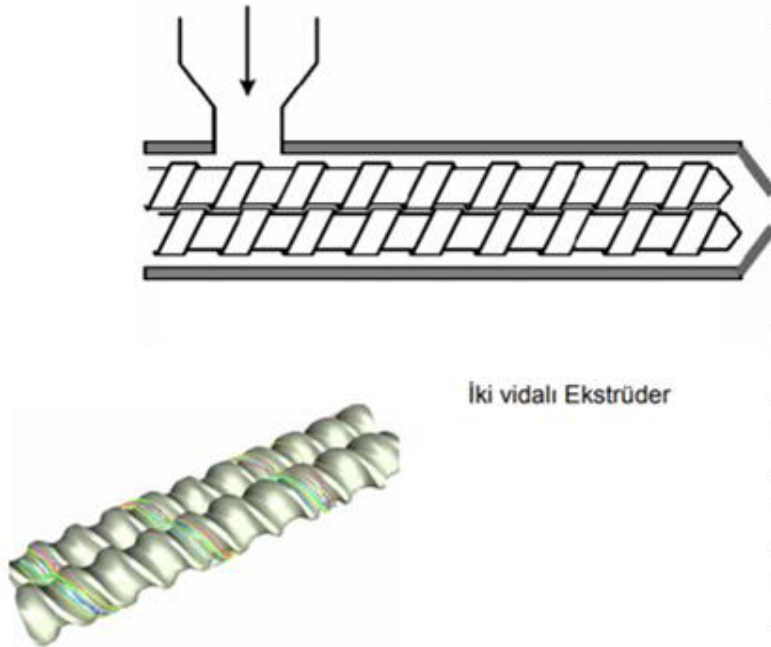
Ekstrüzyon makinelerinde kapasite aşağıdaki formül ile hesaplanır;

- Q: Ekstrüzyon makine kapasitesi, kg/h
- D: Vida çapı, cm
- N: Vida devri, devir/dakika
- h: Vida derinliği, cm
- w: Özgül ağırlık olmak
- $Q=2,3 D^2 N h w 0,8$

(2.1)

Şekil 2.24'te şekli verilen iki veya daha fazla vidanın kullanıldığı durumlar;

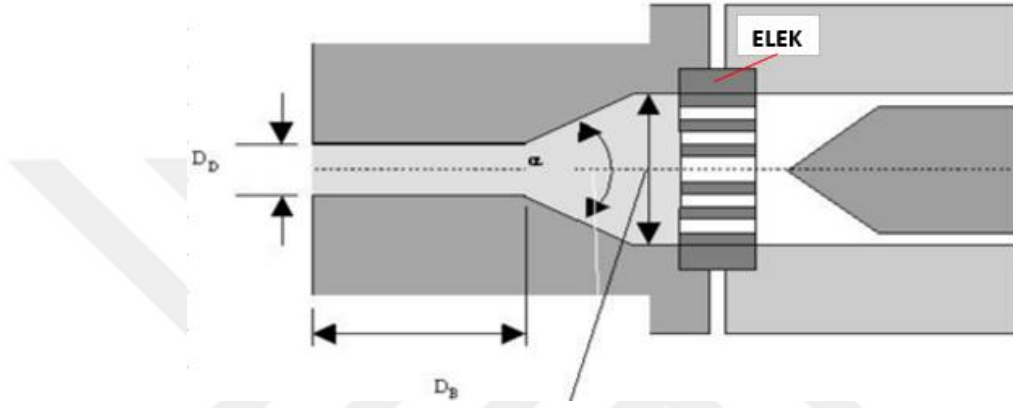
1. Kalıp basıncını artırmak ve daha iyi karışım elde etmek için kullanılır.
2. Polimer için yağ, yumuşatıcı gibi katkıları karıştırma işlemi üst vidada, ısıtma ve basma işlemleri alt vidada yapılır.
3. Ürün kalitesini etkileyen nem faktörünün daha az masrafla alınması için özel vida sistemleri kullanılır ve açılan havalandırma deliğinden su buharı olarak atılır. (Eker 2009)



Şekil 2.24. İki Vidalı Ekstrüder (Eker 2009)

### Ekstrüder Uç kalıbı (Elek)

Eriyik polimer ekstrüder içinde sıcak kalıba doğru itilir, ekstrüderle kalıp arasında bulunan eleme takımından (elek) geçer. Şekil 2.25'te modeli verilen elek, polimer akışını (basıncı) eşitler, eriyikteki katışkı ve sert malzemeleri filtre eder. Ayrıca vida boyunca hareket eden polimerin dönme davranışını hatırlama eğilimini giderir. (Karanfil 2014)



Şekil 2.25. Ekstrüder Uç Kalıbı (Elek) (Eker 2009)

### Sıcak Kalıp (Ekstrüzyon Kalıbı)

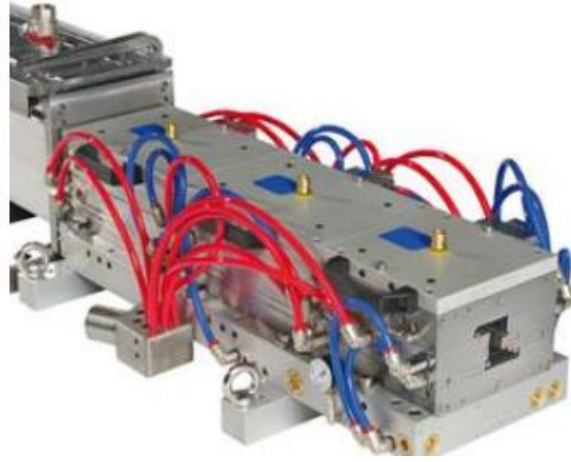
Elekten geçen eriyik polimer şekillendirilmek üzere vida basıncı ile sıcak kalıba itilir. Sıcak kalıp ürün kesit formuna göre her ürün gamı için özel olarak imal edilirler. Çubuk, boru, düz (levha) ve daha kompleks profiller vs.

#### 2.3.2. Kalibratör ve Havuz

Ekstrüzyon kalıbında şekillenen ve hala yumuşak olan polimere son şekli verilme üzere soğutma havuzuna alınır.

Soğutma suyunun parça üzerinde yaratacağı çarpılmaların önlenmesi amacıyla polimer havuz girişinde bulunan ve içerisinden soğutucu geçirilen parça formundaki kalibratörlerden geçirilerek havuza alınır. (Şekil 2.26)



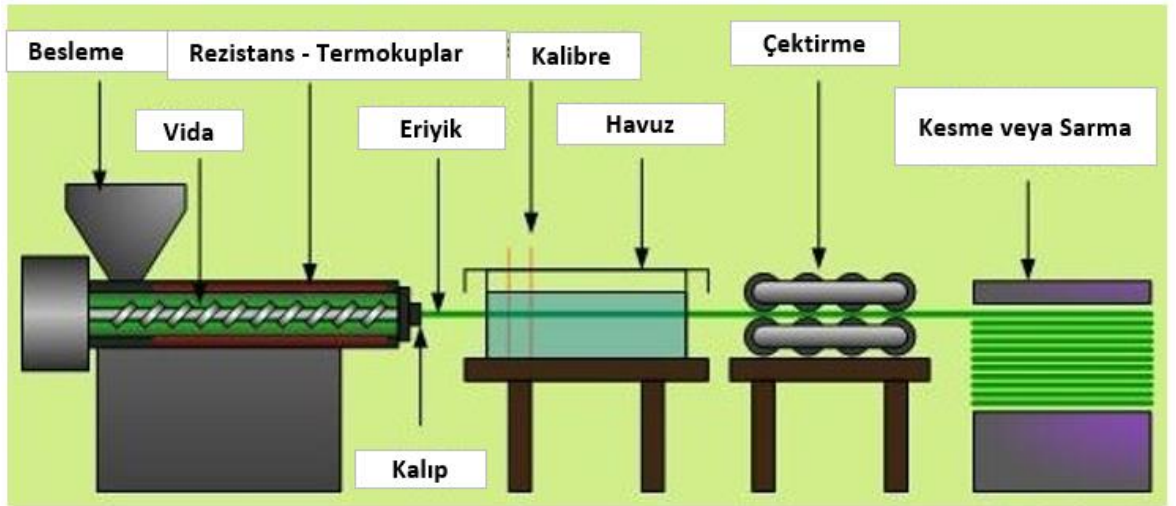


Şekil 2.26. Ekstrüzyon Kalibre Seti (Megep 2013)

### 2.3.3. Çektirme (Konveyör) ve Kesme Operasyonu

Havuzda nihai kesit şeklini alan polimer, prosesin akışının sağlanması ve kesme operasyonu için havuz sonunda bulunan bir konveyör vasıtasıyla uzaklaştırılır.

Parça, hat sonunda kesme presinde boyuna veya formlu kalıplarla belirli bölgelerden şekillendirilerek kesilir. (Şekil 2.27)

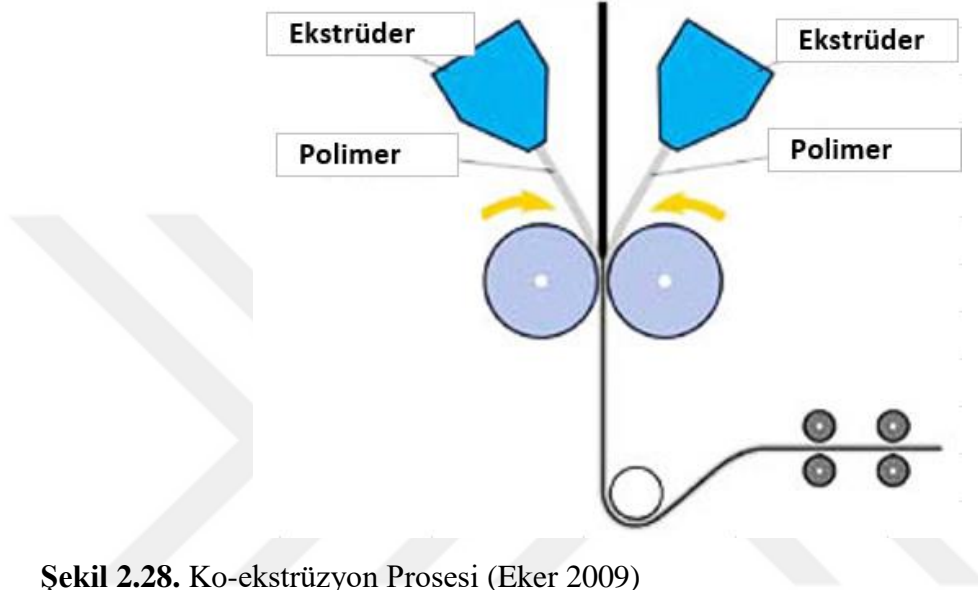


Şekil 2.27. Ekstrüzyon Proses Şeması (Anonim 2017)

### 2.3.4. Ko-Ekstrüzyon Prosesi

Birden fazla ekstrüder kullanılan bu proseste, farklı hammaddelere sahip profiller üretilebilir.

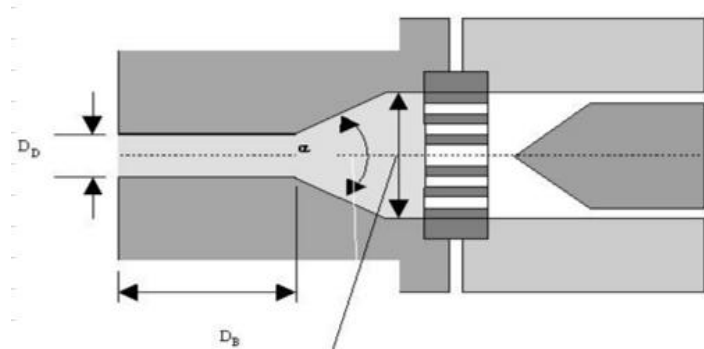
Ekstrüderlerin, bünyesindeki hammaddeyi ekstrüde edeceği kendi sıcak kalıpları bulunur ve bu farklı sıcak kalıplardan çıkan hammaddeler istenilen kısımda kaynaşır, karışım oluşturmaz. (Şekil 2.28)



Şekil 2.28. Ko-ekstrüzyon Prosesi (Eker 2009)

### 2.3.5. Çubuk Ekstrüzyon Kalıbı

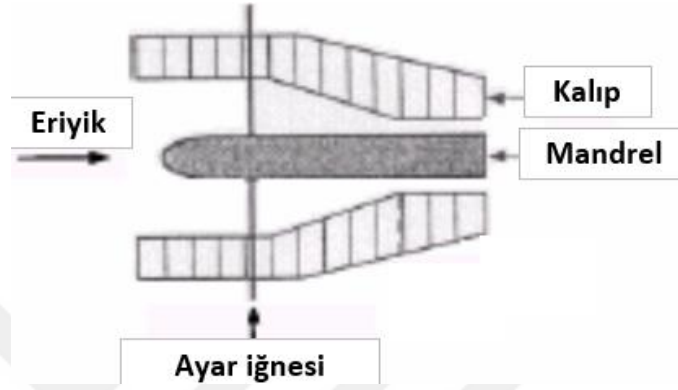
Bu tarz profil kalıplarında, kalıp çıkışındaki eriyik polimer geometrisi çap büyümesi şeklinde karşımıza çıkar. Şekil 2.29'da çubuk ekstrüzyon kalıp prosesi gösterilmiştir.



Şekil 2.29. Çubuk Ekstrüzyon Kalıp Prosesi (Eker 2009)

### 2.3.6. Boru Ekstrüzyon Kalıbı

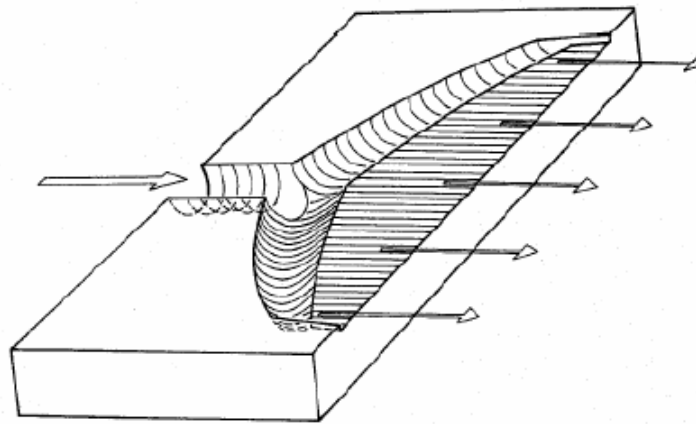
Silindirik çubuk ekstrüzyon kalıbına benzeyen boru profil kalıplarında sıcak kalıbın ortasında boru deliğini oluşturacak pim bulunur. Hammadde bu pimin etrafından akar ve polimerin içinden geçirilen hava boru deliğinin kapanmasını engeller. (Şekil 2.30)



Şekil 2.30. Boru Profil Kalıbı (Eker 2009)

### 2.3.7. Levha Ekstrüzyon Kalıpları

Bu tarz kalıplar, şekil 2.31’de verildiği gibi ekstrüder çıkışında bulunan yassı ve içerisinde kademeli açıklıklar bulunan ve bu açıklıklardan hammadde akışı sağlanan kalıplardır. Çıkan parça kalendere edilerek soğutulur, çalışma hızı genelde düşüktür.

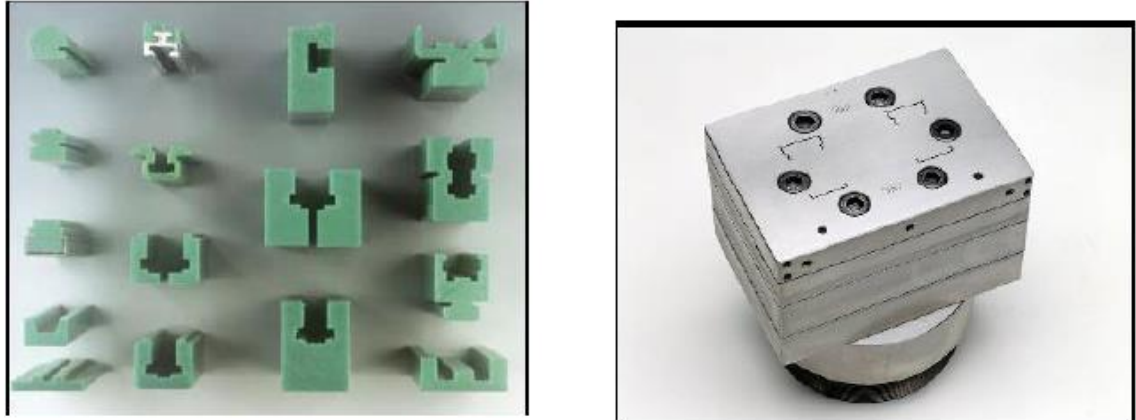


Şekil 2.31. Levha Profil Kalıbı (Yılmaz 2007)

### 2.3.8. Kompleks Profil Ekstrüzyon Kalıpları

Boru, silindirik çubuk ve levha gibi nispeten basit profiller dışında ekstrüde edildiğinde sıcak kalıp çıkışında form değişikliğine uğrayan profiller bulunmaktadır. Bu tarz profillerin akış görüntüsü, parçanın gerçek formundan farklılık gösterebilir. Örnek parçalar ve kalp modelleri Şekil 2.32’de gösterilmiştir.

Dengeli bir hız akışı ve kalıp üzerinde yapılacak iyileştirmelerle istenilen profil elde edilebilir. Prensipte diğer kalıplarda olduğu gibi, ekstrüder çıkışında bulunan kalıptan çıkan profil kalibratör ve havuz vasıtasıyla soğutulur.



Şekil 2.32. Kompleks Kalıp ve Proses Örneği (Eker 2009)

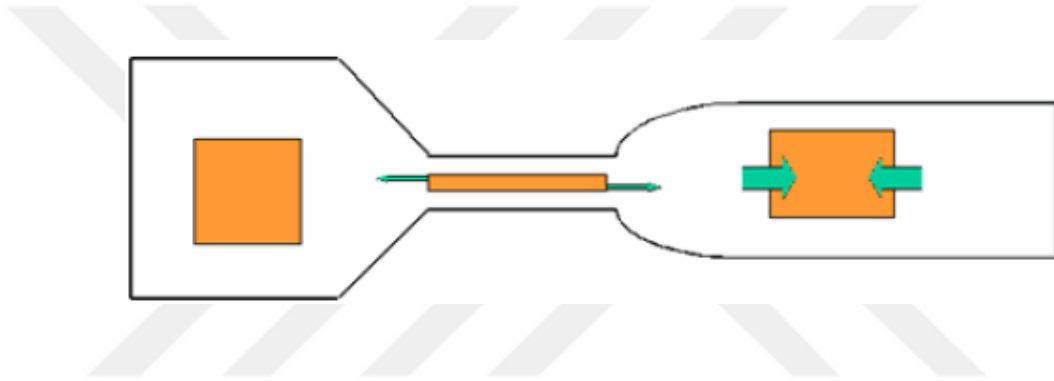
### 2.4. Ekstrüzyonda Karşılaşılan Sorunlar

Ekstrüzyon prosesinde, uygulanan yüksek basınçlar nedeniyle, eriyik polimer çok yönlü gerilmeleri içinde saklar, kalıp çıkışında bu gerilmeler dikey yönde gerilmelere dönüşür ve Şekil 2.33 ve Şekil 2.34’te gösterildiği üzere içinden geçtiği kalıbın formundan farklı bir formda çıkar, şişer.

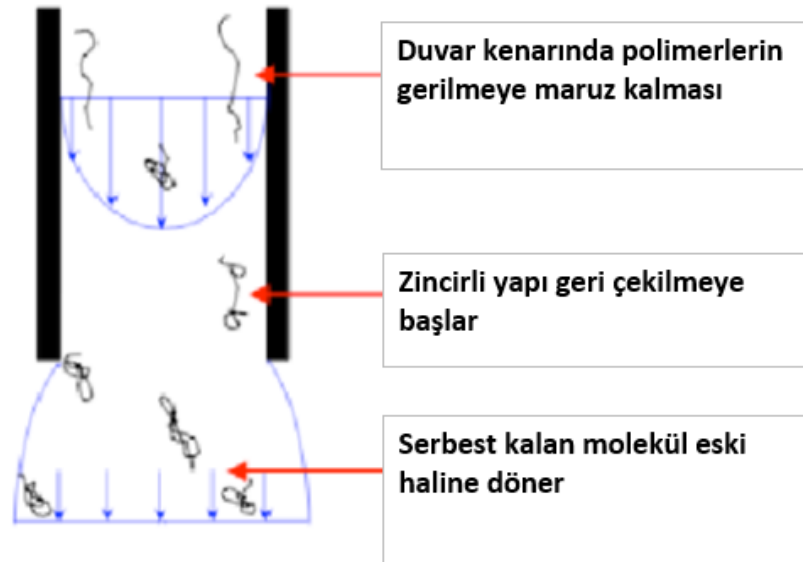
Dairesel profillerde bu durum, çap büyümesi şeklinde gerçekleşir. Yalnızca çap büyümesi oluşacağından kalıp çıkışındaki profil tahmin edilebilir ve kontrolü diğer profillere göre daha kolaydır.

Kalıbın içinde sıkışan eriyikte moleküller çekme eğilimi gösterir. Kalıp çıkışında serbest kalan moleküller eski yapısına döner ve şişer. Tüm bunlar polimerlerin elastik özelliğinden kaynaklanmaktadır. Şişmeye neden olan diğer bir unsur da polimer ve kalıp arasındaki sürtünmedir. Akış sırasında polimerin kalıba sürtünen kısımları yavaş hareket ederken, serbest kısımlar daha rahat hareket eder ve çıkışta şişer, tomurcuklanır ve çatlar. (Şekil 2.35)

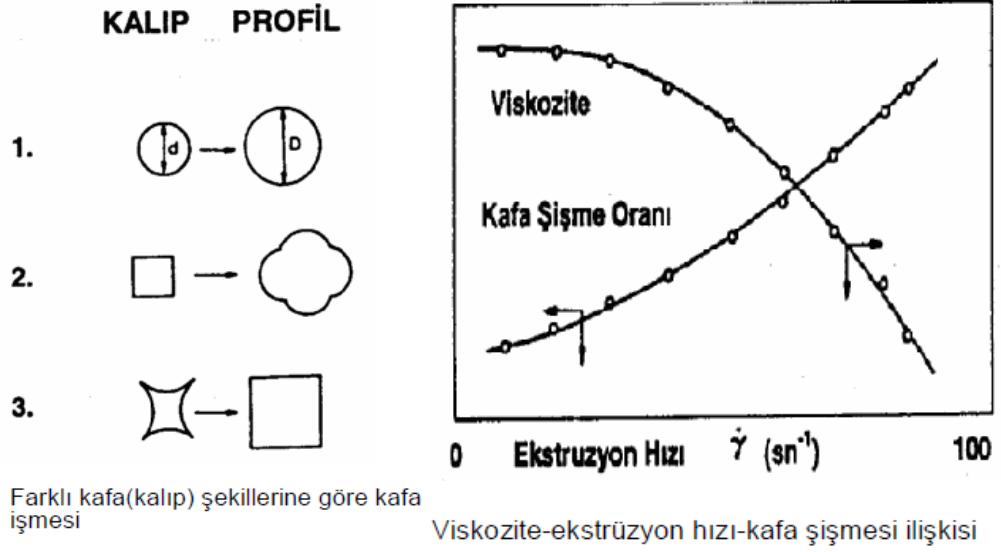
Kafa şişmesi; eriyik polimerdeki kaydırıcı oranının doğru belirlenmesi, kafa çıkış ağzı uzunluğunun ve giriş açısının değiştirilmesi, kafa çıkış ağzının özel malzemelerle kaplanması ile azaltılabilir. (Eker 2009)



Şekil 2.33. Kalıp Çıkışında Eriyik Polimerdeki Şişme (Yılmaz 2007)



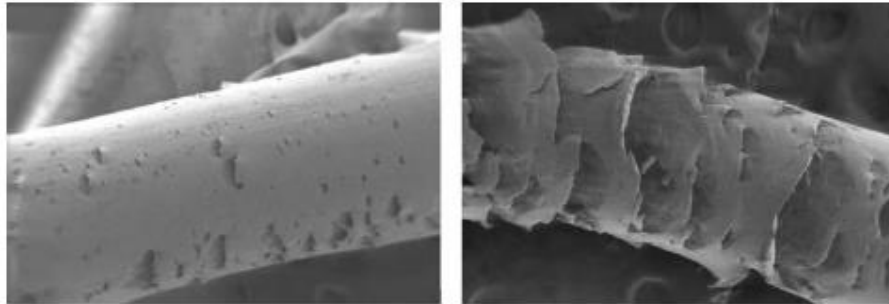
Şekil 2.34. Kalıp Çıkışında Eriyik Polimerdeki Şişme Süreci (Rauwendaal 1987, Nart 2011)



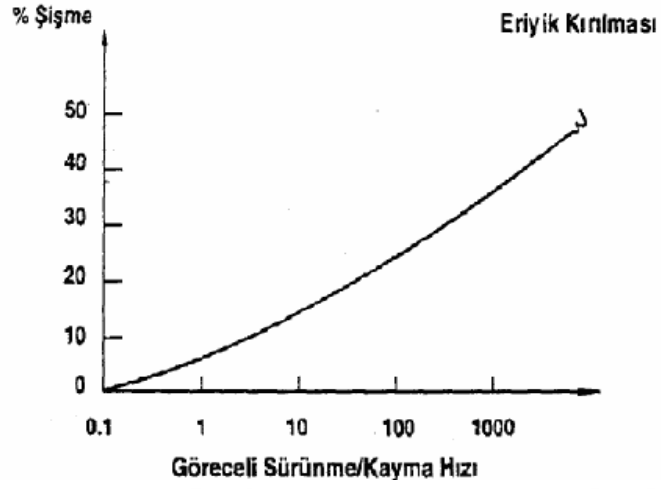
**Şekil 2.35.** Farklı Kafa Şekillerine Göre Kalıp Şişmesi ve Viskozite-Estrüzyon Hızı-Kafa Şişmesi İlişkisi (Eker 2009)

Kalıp girişinin keskin bir şekilde daralması, yüksek sürünme hızları, uygun olmayan ekstrüzyon sıcaklığı, kaydırıcı miktarı, kafa çıkış uzunluğu, kafa giriş açısı ve kafa çıkış yüzey kalitesi eriyik kırılmasına, lineer akışın bozulmasına, yüzey kalitesizliğine ve düzensiz akış profili nedeniyle kalıp çıkışında profil bozulması neden olur. (Şekil 2.36, Şekil 2.37)

Eriyik kırılması, sıcaklığın da belli ölçüde yükseltilmesi ile giderilebilir ancak bu kez de ısıl bozunma durumu ortaya çıkabilir.



**Şekil 2.36.** LLDPE (linear low density polyethylene) 160 oC' de yüzey bozulmasının mikroskop ile yakından görünüşü (Zehev ve Costas 2006, Atasoy 2013)



**Şekil 2.37.** Kafa Şişmesi-Eriyik Kırılması İlişkisi (Eker 2009)

Keskin köşeler yuvarlatılmadığında kalıplarda durma noktalarının ve ölü noktaların oluşması akış formunun bozulmasına neden olur.

Ani kesit değişikliğinin yol açtığı elastik deformasyonlar formun bozulmasına neden olur.

Ekstrüzyon prosesinde karşılaşılan problemler, olası nedenleri ve önerilen çözümler Çizelge 2.1 ve Çizelge 2.2’de genel olarak belirtilmiştir.

**Çizelge 2.1.** Ekstrüzyonda Karşılaşılan Problemler 1 (Eker 2009)

<b>Problem</b>	<b>Olası Neden</b>	<b>Uygun Çözüm</b>
<b>Pürüzlü Yüzey</b>	Eriyik ya da kalıp sıcaklığı düşük	1. Ekstrüder ısılarını artırın. 2. Kalıp sıcaklığını artırın. 3. Isıtıcı/termokuplenin kalibrasyonunu kontrol edin.
	Malzemenin erimesi homojen değil/tamamlanmamış	1. Burgu hızını artırın (yüksek sıkıştırma oranlı veya karıştırıcıli burgu kullanın) 2. Daha dar filtre kullanın.
	Nem	1. Malzemenin ön kurutmasını doğru yapın.
	Kalıp merkezlenmemiş	1. Kalıp dizaynını kontrol edin ya da çekici hızını düşürün.
	Gerdirme oranı çok yüksek	1. Kalıp dizaynını kontrol edin ya da çekici hızını düşürün.
	Kalıp Dizaynı Hatalı	1. Kalıpta konik sonrası düz alanı azaltın. 2. Sürtünmeyi azaltacak şekilde akan malzemenin hızını ve kalıp konik açısını düşürün. 3. Kalıp boyunu kısaltın. 4. Kalıbı parlatın. 5. Kalıptaki aşınmaları kontrol edin.
	Uygun olmayan burgu kullanılıyor	1. Kalıp dizaynını kontrol edin ya da çekici hızını düşürün.
<b>Akış yönündeki boyutsal ölçülerde sorun</b>	Malzemede dalgalanma	1. Malzeme çıkış hızını düşürün. 2. Besleme bölgesi ya da ölçme bölgesi uzun burgu kullanın 3. Arka basıncı artırmak için dar aralıklı filtre kullanın. 4. Burgudaki aşınmayı kontrol edin. 5. Kalıp ve eriyik sıcaklığını kontrol edin. 6. Kalıp alanını düşürün.
	Çekicinin hız dalgalanması	1. Çekicinin hız kontrolünü kontrol edin.
<b>Profil iç kısmında boşluklar ve gözenekler</b>	Malzemede nem çok yüksek	1. Malzemeyi uygun olan süre ve sıcaklıkta kurutun, malzeme alın, haznesinin boğazında yoğuşma olup olmadığını kontrol edin.
	Eriyik sıcaklığı çok yüksek/soğutma homojen değil.	1. Kovan ısılarını düşürün. 2. Soğutma şartlarını ayarlayın (havada kalma süresi, su sıcaklığı)
	Aşırı sürtünme/sıkıştırma	1. Daha yüksek hat ve derinliği olan burgu kullanın/sıkıştırma oranını düşürün.
	Besleme bölgesinde hava kalıyor	1. Burgu hızını düşürün, besleme kısmındaki kovan sıcaklıklarını düşürün, boğazı soğutma suyunu artırın.

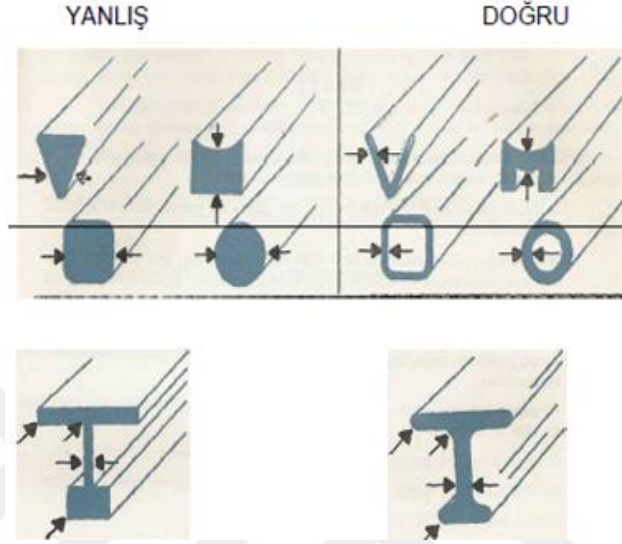


**Çizelge 2.2.** Ekstrüzyonda Karşılaşılan Problemler 2 (Eker 2009)

<b>Problem</b>	<b>Olası Neden</b>	<b>Uygun Çözüm</b>
<b>Siyah noktacıklar/yabancı parçalar</b>	Kirlilik	1. Düşük akışkanlıklı PP ya da HDPE geçirerek makineyi temizleyin. 2. Renk konsantresinin uyumluluğunu kontrol edin. 3. Kir ve yabancı parçacık bulaşmasını kontrol edin.
<b>Koku veya Sararma</b>	Aşırı yüksek eriyik sıcaklığı/bozunma	1. Kovan sıcaklıklarını düşürün. 2. Kalıp sıcaklıklarını düşürün. 3. Isıtıcı/termokupl doğru çalışmasını kontrol edin. 4. Sürtünmeyi düşürün (burgu hızını düşürün, geri basıncı azaltmak için geniş aralıklı filtre kullanın) 5. Sıkıştırma oranı düşük burgu kullanın. 6. Malzeme akış yolunun merkezlenmesini kontrol edin.
<b>Profil boyunca kenarlarda yırtılma</b>	Kalıp sıcaklığı çok düşük	1. Kalıp sıcaklığını artırın. 2. Isıtıcılarda ve termokupllarda hata olup olmadığını kontrol edin.
	Eriyik akışkanlığı çok düşük	1. Malzeme akışkanlığını, burgu hızını artırın ya da kovan ısını artırın.
	Kalıptan malzeme akışı dengesiz	1. Sıkıştırma oranını/basıncı artırarak malzemenin kenarları tam doldurmasını garanti altına alın.
<b>Profil üzerindeki akış yönündeki kalıp izleri</b>	Kalıp ısısı çok yüksek, çok düşük ya da değişken	1. Kalıp ısıtıcı ünitesi kontrol edin, ısı değerini sabitleyin.
	Nem oranı yüksek	1. Malzemeyi iyice kurutun, kurutucunun düzenli çalışmasını kontrol edin.
	Eriyik ısısı çok düşük	1. Eriyik ısını artırın.
	Kalıpta birikme	1. Kalıbı temizleyin ve parlatın.
<b>Radyal ölçülerde değişkenlik</b>	Kalıp aşınmış	1. Kalıbı değiştirin.
	Profil, değişken/yetersiz soğutma nedeniyle formunu kaybediyor.	1. Eriyik sıcaklığını düşürün. 2. Soğutmayı artırın (hava ile temas süresini ve soğutma havuzunun sıcaklıklarını düşürün) 3. Kapasiteyi düşürün.
<b>Yüksek basınç/ ekstrüderlerden az malzeme çıkışı</b>	Eriyik çok soğuk	1. Ekstrüder ısını artırın. 2. Kalıp ısını artırın.
	Filtrede tıkanma	1. Filtreyi temizleyin ya da değiştirin.

## 2.5. Ekstrüzyonda Kalıp Dizayn Esasları

Kalın profillerin olgunlaşma ve soğuma süreleri uzundur, soğuma işlemi sırasında çeker ve büzülürler. Bu nedenle dizayn da profil kalın olmamalı ve cidarlar ince olmalıdır. (Şekil 2.38)

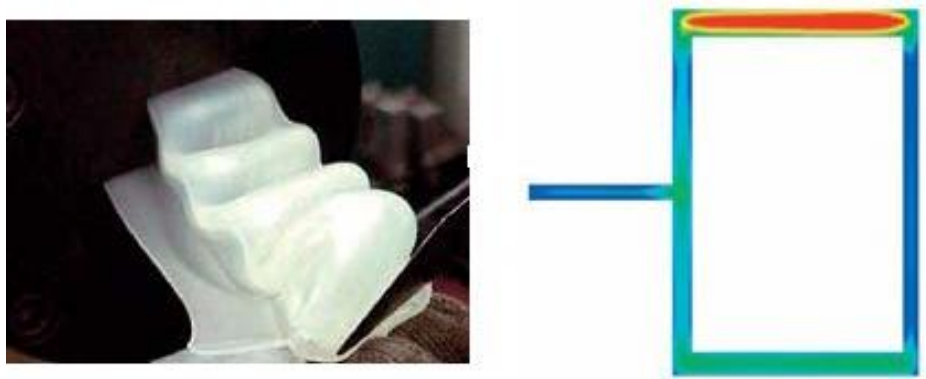


Şekil 2.38. Sıcak Kalıp Dizaynında Dikkat Edilmesi Gereken Noktalar (Eker 2009)

Dizaynda keskin ve köşelerden, dengesiz kalıp girişlerinden, dengesiz boşluklardan ve ani değişen kesit kalınlıklarından kaçınılmalıdır.

Kalıpta uzun süre kalan profilin sıcaklığa uzun süre maruz kalması sonucu form bozulur.

Kalıp içinde ve çıkışında hız dengesinin bozulması durumunda parça formu bozulur.



Şekil 2.39. Kalıp Çıkışında Hız Dengesinin Bozulması ile Parçada Oluşan Bozunma (Yılmaz 2007)

### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

#### 3.1. Materyal

Ekstrüzyon prosesinde, eriyik polimer uygulanan yüksek basınçlar nedeniyle çok yönlü gerilmeleri içinde saklar, kalıp çıkışında bu gerilmeler dikey yönde gerilmelere dönüşür ve içinden geçtiği kalıbın formundan farklı bir formda çıkar.

Bu çalışmada silindirik çubuk ve kare bir profilin kalıp içinde ve çıkışındaki davranışı incelenmiştir.

#### 3.2. Yöntem

Akış SolidWorks 2017 programında modellenerek sonlu elemanlar yöntemiyle analiz edilmek üzere Ansys Aim programına aktarılmıştır. Polimer datası olarak Ansys Aim programında bulunan ve Şekil 3.1'de de gösterilen aşağıdaki teknik özelliklere sahip polimer kullanılmıştır;

$\rho$ : yoğunluk değeri  $1000 \text{ kg m}^{-3}$

$c_p$ : özgül ısı kapasitesi değeri  $2000 \text{ J/kgC}$

$\mu$ : viskozite değeri  $2500 \text{ Pas}$

$k$ : ısı iletim katsayısı değeri  $0,5 \text{ W/mC}$

#### Liquid Properties

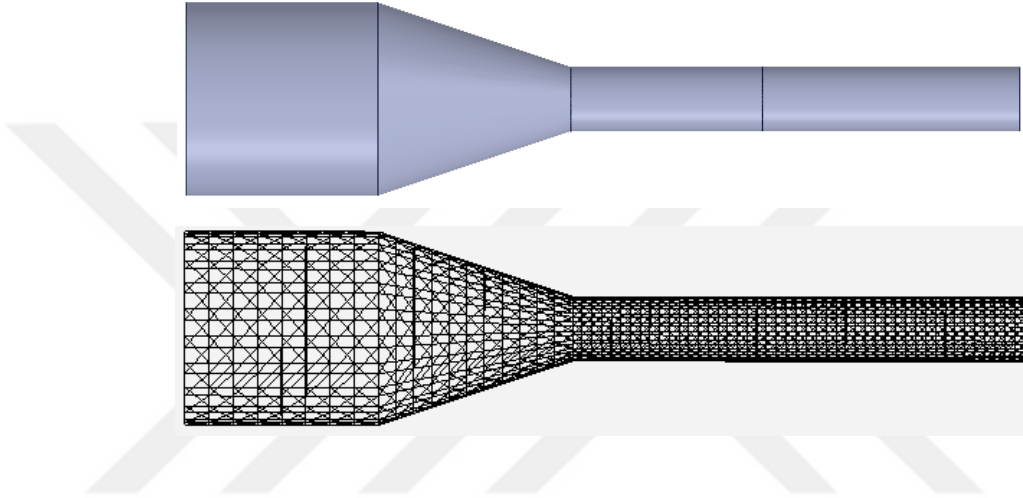
Density, $\rho$	1000 kg m <sup>-3</sup>
Specific heat, $c_p$	2000 J kg <sup>-1</sup> C <sup>-1</sup>
Viscosity, $\mu$	2500 Pa s
Isotropic thermal conductivity, $k$	0,5 W m <sup>-1</sup> C <sup>-1</sup>

Şekil 3.1. Ansys Aim Polimer Malzeme Datası

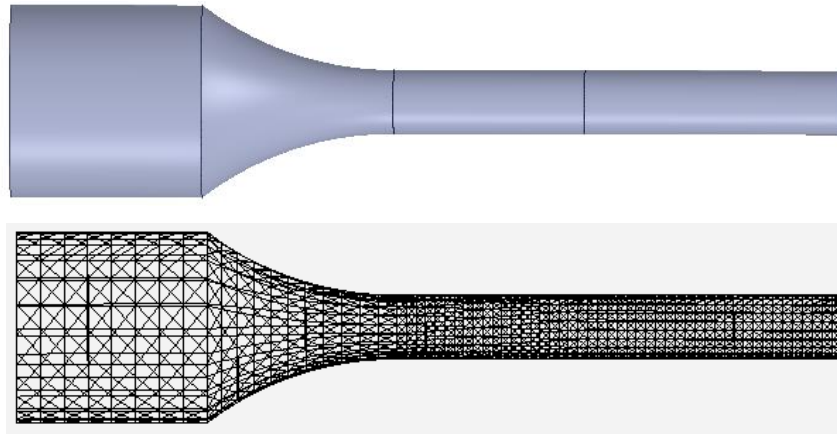
## 4. BULGULAR

### 4.1. Silindirik Çubuk Profil İçin Akış Analizi

Silindirik çubuk profillerde karşılaşılan kalıp çıkışındaki ‘Şişme’ durumu incelenmiştir. Tasarımda konik (Şekil 4.1) ve iç bükey (Şekil 4.2) kalıp girişleri modellenerek tasarımın akış üzerindeki etkisi incelenmiştir. Giriş hızı  $V=0,15$  m/sn olarak kabul edilmiş ve akış geometrisi ve kalıp girişleri aşağıdaki şekillerde gösterilmiştir:



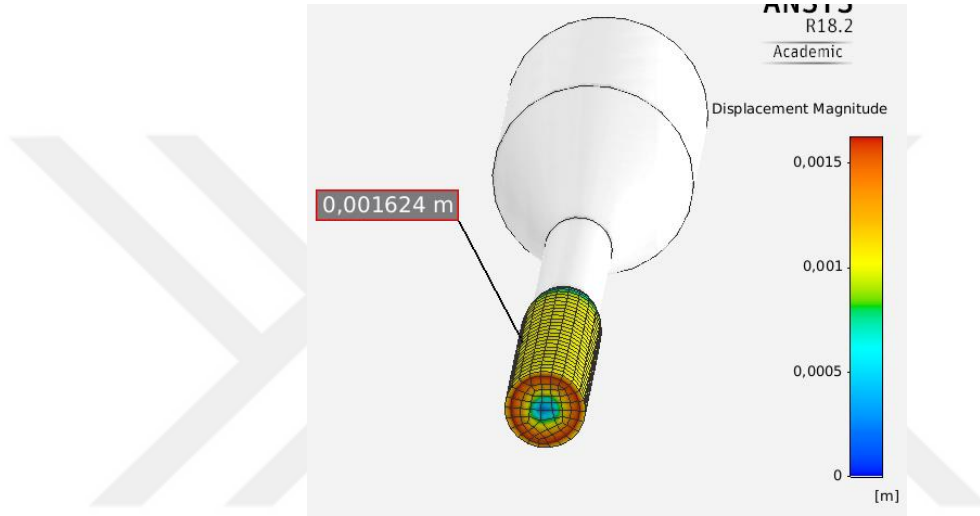
Şekil 4.1. Konik Girişli Silindirik Çubuk Profil Akış Modeli ve Sonlu Elemanlar Ağ Yapısı (Mesh)



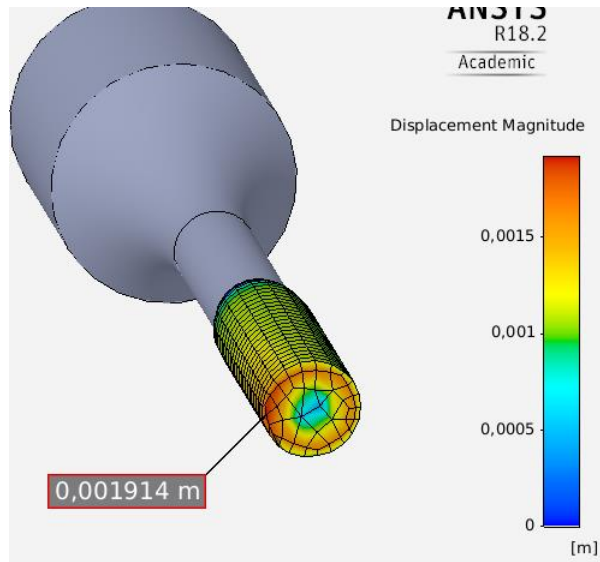
Şekil 4.2. İç Bükey Girişli Silindirik Çubuk Profil Akış Modeli ve Sonlu Elemanlar Ağ Yapısı

## Deplasman Büyüklüklerinin Karşılaştırılması

Analiz sonucunda, iki farklı girişli kalıptan çıkan polimerin ‘Şişme’ olarak da değerlendirilebilecek deplasman değerlerinin birbirinden farklı olduğu görülmektedir. Maksimum deplasman değerleri konik girişte 1,624 mm iken iç bükey girişte 1,914 mm’dir. İç bükey girişte deplasman konik girişten daha fazladır veya deformasyon daha büyüktür. (Şekil 4.3, Şekil 4.4)



Şekil 4.3. Konik giriş: 0,001624m



Şekil 4.4. İç bükey giriş: 0,001914m

## Kayma Oranlarının Karşılaştırılması

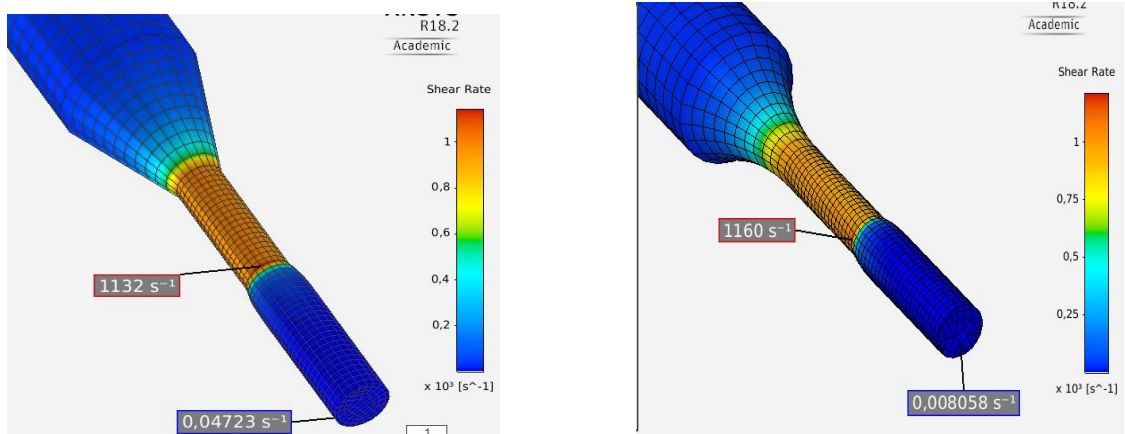
Kayma oranı, plastik tabakalarının birbirini nasıl sürüklediğinin bir ölçüsüdür. Bu oran, en basit ifadeyle kayma kaynaklı dengesizlik olarak da ifade edilebilir.

Kayma oranı çok hızlı gerçekleşirse, polimer zincirleri kopar ve malzeme düşer. Yüksek kayma oranları, besleme sisteminde (en büyük hızların bulunduğu yerde) oluşma eğilimi gösterir.

Şekil 4.5'te görüldüğü üzere konik giriş ve iç bükey girişlerin analizi sonucunda kalıp içerisindeki akışkanların kesme oranlarının kalıbın daraldığı kısımlarda maksimum değerlere ulaşmıştır ve iki kalıba ait değerlerin birbirlerinden farklılık gösterdiği görülmektedir.

Konik girişte maksimum Shear Rate değeri  $1132 \text{ s}^{-1}$  iken iç bükey girişte maksimum Shear Rate değeri  $1160 \text{ s}^{-1}$ 'dir ve dengeli bir akış için konik giriş daha uygun olduğu görülmektedir.

Kesme oranını azaltmak için kesit alanını artırmak veya akışkan oranını azaltmak gerekmektedir.

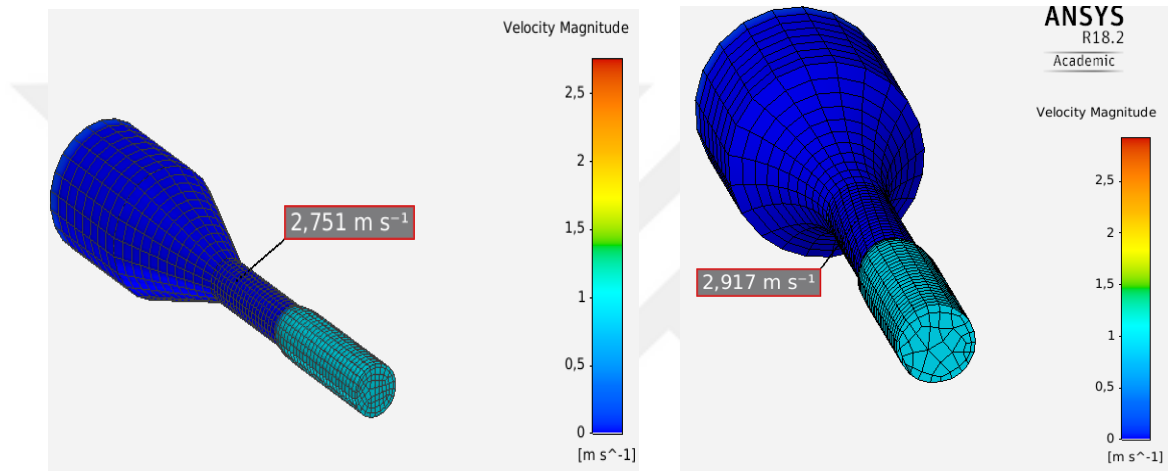


Şekil 4.5. Konik Giriş Shear Rate Değerleri ve İç Bükey Giriş Shear Rate Değerleri

## Hız Büyüklüklerinin Karşılaştırılması

Polimer akışlarda şişme durumunun kontrol altına alınabilmesi ve dengeli bir akışın sağlanması için hız farklarının mümkün mertebe azaltılması faydalı olacaktır.

Analiz sonuçlarında konik giriş maksimum hız değeri  $2,751 \text{ m/s}$  iken, iç bükey giriş maksimum hız değeri  $2,917 \text{ m/s}$ 'dir ve konik girişli kalıbın hız dengesi iç bükeye göre daha fazladır. (Şekil 4.6, Şekil 4.7)



Şekil 4.6. Konik Giriş ve İç Bükey Giri Hız Dağılımı

## Değerlendirme

Yapılan analizde silindirik profillerde kalıp çıkışında şişme olayı gerçekleşmiştir. Bu tarz profillerde şişme olayının çap büyümesi şeklinde gerçekleştiği görülmüştür.

Kalıp girişlerinin deplasman, kayma oranı, hız değişimi değerleri karşılaştırıldığında, kalıp giriş tasarımının akış değerlerini etkilediği, konik girişin iç bükeye kıyasla daha dengeli bir akış sağladığı görülmüştür.

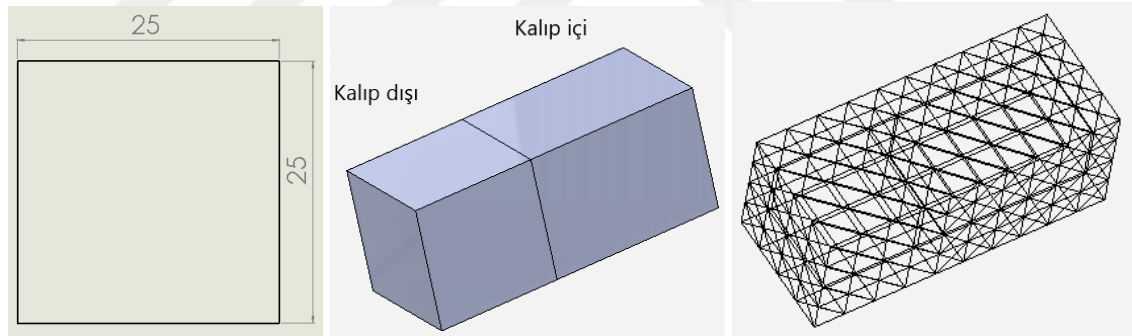
## 4.2. Kare Profil İçin Akış Analizi

### 4.2.1. Tasarım 1

Silindirik profillerde kalıp çıkışındaki profil modeli çap büyümesi şeklinde gerçekleşmektedir. Bu nedenle akış modelinin tahmin edilmesi kolaydır. Ancak daha farklı profillerde kalıp çıkışındaki akışın tahmini daha kompleksdir.

Bu uygulamada kare bir profil modellenerek akış davranışı incelenmiştir. Akış Solidworks programında çizilmiş ve analiz edilmek üzere Ansys Aim programına import edilmiştir.

İlk uygulamada olduğu gibi bu analizde de Ansys Aim programında bulunan jenerik polimer kullanılmıştır. Profil Şekil 4.7’de modellenmiş ve giriş hızı  $V=0.15$  m/sn alınmıştır.



Şekil 4.7. Tasarım 1 Model ve Sonlu Elemanlar Ağ Yapısı

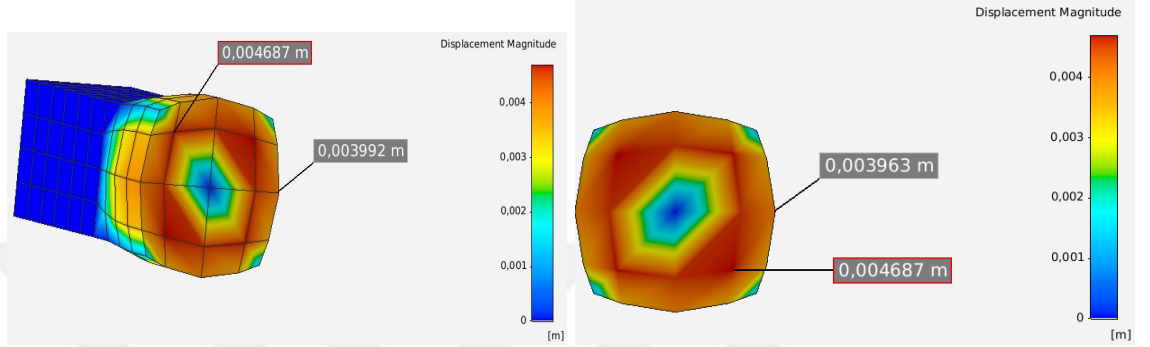
### Deplasman Büyüklüğü ve Kalıp Çıkışındaki Profil Modeli

Analiz sonucunda, kare profilin kalıp çıkışında profilde ‘Şişme’ olayı gerçekleşmiştir. Kalıp girişinde çok yönlü gerilmeleri içinde saklayan polimer, kalıp çıkışında bu gerilmelerin dikey yönde gerilmelere dönüşmesiyle içinden geçtiği kalıbın formundan farklı bir formda çıkarak şişmiştir.



Şişme durumu Şekil 4.8’de görüldüğü gibi sürtünme yüzeylerinden polimerin iç kısımlarına gidildikçe artmaktadır.

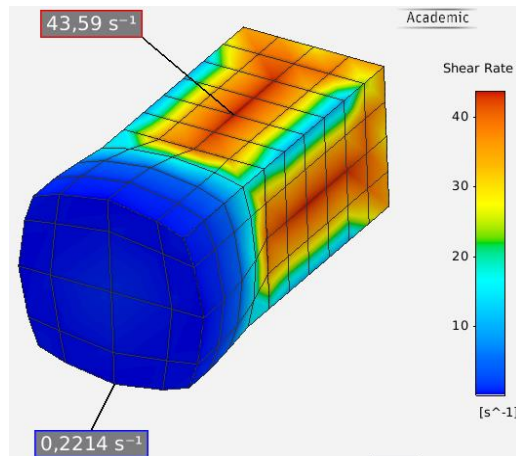
Polimerin yüzey kısmında meydana gelen maksimum deplasman 3,992 mm iken iç kısımlarında maksimum 4,687 mm’dir.



Şekil 4.8. Tasarım 1 için Deplasman Modeli ve Değerleri

### Kayma Oranı

Şekil 4.9’da görüldüğü üzere polimerin kesme oranı kalıbın daraldığı kısımlarda maksimum değerlere ulaşmıştır. Kalıp içerisindeki Shear Rate değeri yüzeyden iç kısımlara ilerledikçe artar ve maksimum değer  $43,59 \text{ s}^{-1}$  olur iken kalıp çıkışında serbest kalan polimerin Shear Rate değeri düşer ve min  $0,2214 \text{ s}^{-1}$  olur.

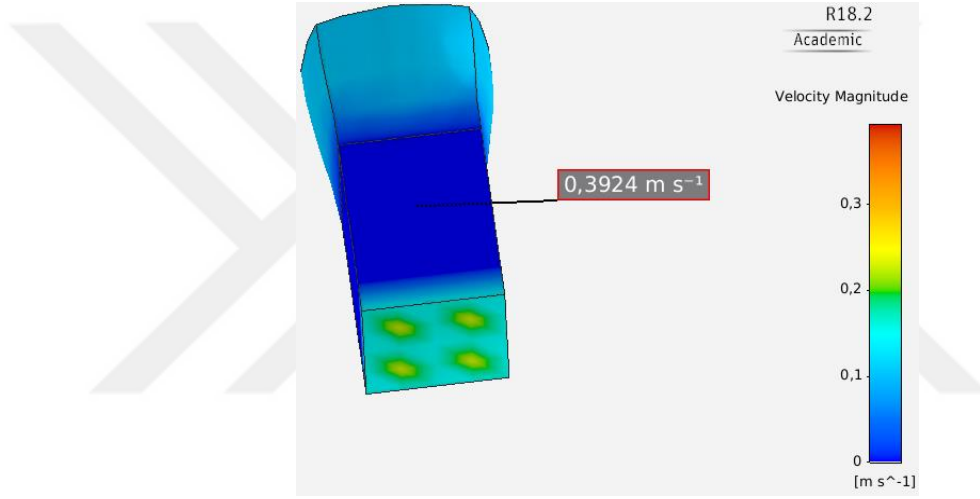


Şekil 4.9. Tasarım 1 için Shear Rate

## Hız Büyüklüğü

Bu profilde de görüldüğü üzere polimer akışlarda şişme durumunun kontrol altına alınabilmesi ve dengeli bir akışın sağlanması için hız farklarının mümkün mertebe azaltılması ve sürtünme faktörünün en aza indirilmesi gerekecektir.

Analiz sonuçlarında polimerin kalıp dış ve iç kısımlarında hız farklılıkları olduğu görülmektedir. Kalıp içerisinde sıkışan polimerin maksimum hız değeri  $0,3924 \text{ m/s}$ 'dir ve giriş değeri olan  $0,15 \text{ m/s}$ 'den büyüktür. (Şekil 4.10)



Şekil 4.10. Tasarım 1 için Hız Büyüklüğü

## Değerlendirme

Ekstrüzyonda kısa periyotlarda yüksek miktarda ürün elde etmek, hızın yüksek olması önem arz etmektedir. Yüksek hızlarda çalışmanın meydana getirdiği en önemli problemlerden birisi geometrideki deplasmanlardır.

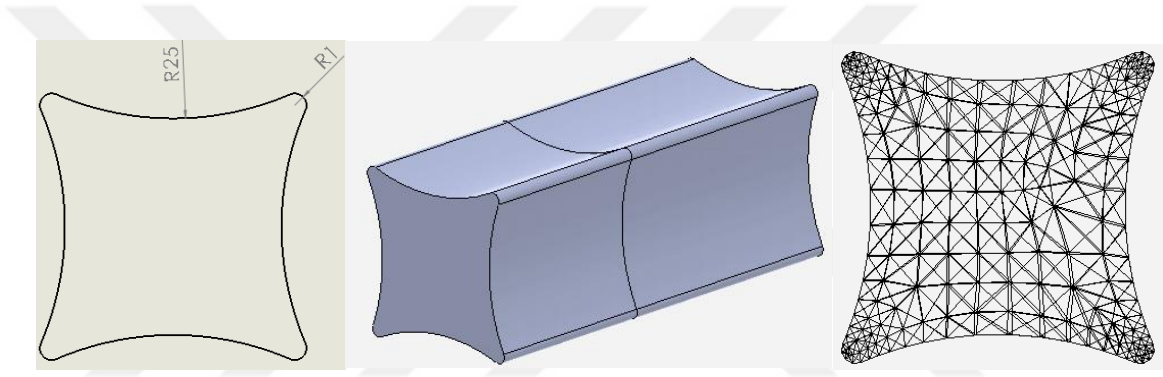
Dengeli bir akışın yakalanması hızın ve sürtünmenin artması ile zorlaşır. Kare bir profil için oluşturulan Tasarım 1 profili ile yüksek hızda analiz gerçekleştirilmiş ve geometrinin deplasmana maruz kaldığı görülmüştür. Deplasman görüntüsü ve değerleri baz alınarak kalıp geometrisi iyileştirilebilir durumu bir sonraki uygulamada incelenmiştir.

#### 4.2.2. Tasarım 2

Tasarım 1'in analiz sonucunda çıkan uygunsuzlukların giderilmesi adına kalıpta bazı değişiklikler yapılarak analiz tekrar edilmiştir.

Taşmaların ve daralmaların yaşandığı kısımların aksi yönünde yapılan değişikliklerle akış yeniden modellenerek analiz tekrar edilmiştir.

Kenar yüzeyler 3,4 mm içeri alınmıştır. Köşelerin keskinliği alınarak R1 olarak yuvarlaklaştırılmıştır. (Şekil 4.11)



**Şekil 4.11.** Tasarım 2 Model ve Sonlu Elemanlar Ağ Yapısı

#### **Deplasman Büyüklüğü ve Kalıp Çıkışındaki Profil Modeli**

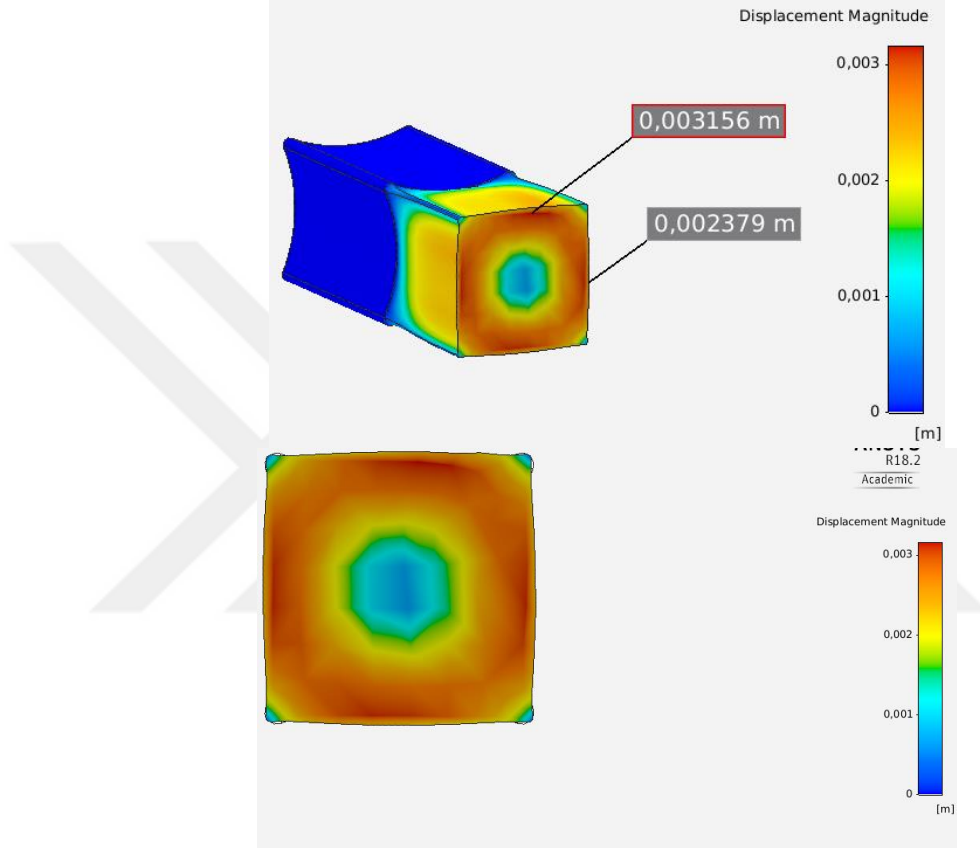
Analiz sonucunda, kalıp içerisinde akan eriyik kalıp formundan farklı bir formda çıkmıştır, polimerde şişme gerçekleştirilmiştir.

Şişme durumu Şekil 5.13'te görüldüğü gibi sürtünme yüzeylerinden polimerin iç kısımlarına gidildikçe artmaktadır.

Kenarlarda yapılan iyileştirmelerle köşelerde yaşanan çekme ve kenarlardaki şişme olayı tekrar etmiştir ve bu sayede amaçlanan kare profil kalıp çıkışında yakalanabilmiştir.

En dış yüzeylerde 3,156 mm'lik dışa dönük deplasman oluşmuştur. Bu değer Tasarım 1'e ait yüzeylerin 3,4 mm içe dönüklüğünü yüksek ölçüde giderebilmiştir.

Köşelerin kenarlarla birleştiği noktalar çökme eğilimi göstermektedir. Bu nedenle 2.nci tasarımla yumuşatılan köşelerle dengeli bir akış sağlanabilmiştir.



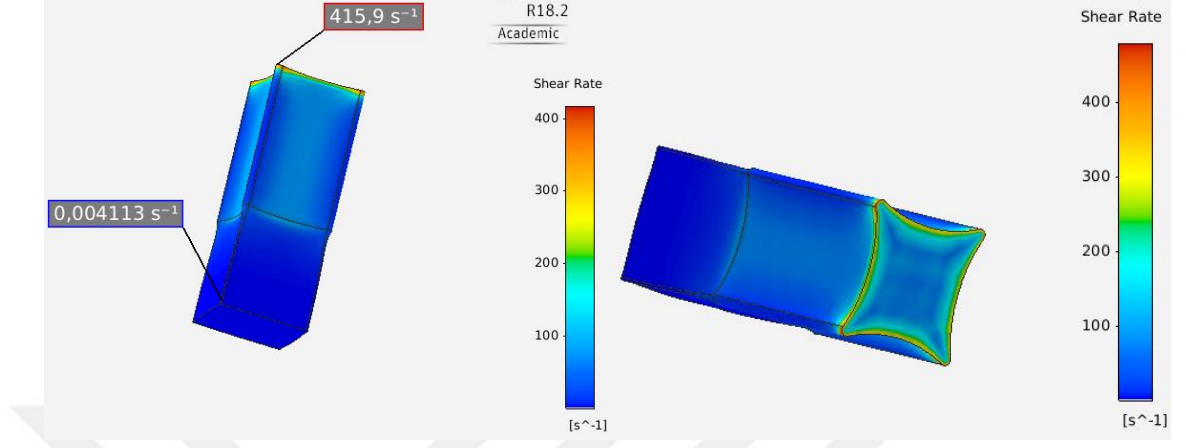
**Şekil 4.12.** Tasarım 2 için Deplasman Modeli ve Değerleri

### **Kayma Oranı ve Hız Büyüklüğü**

Şekil 4.13'te görüldüğü üzere Shear Rate değeri kalıp girişinde yüzey ve özellikle köşelerde yüksek değerlerde görülür.

Dizaynın Tasarım 1'e göre kompleks oluşu polimer akış dalgalanmasında etkisi bulunsa da yüksek hız, sürtünme, iç gerilmeler vs. kaynaklı polimerin kalıp çıkışındaki davranışına, istenilen profilin elde edilmesi yönünde olumlu yönde etki etmiştir.

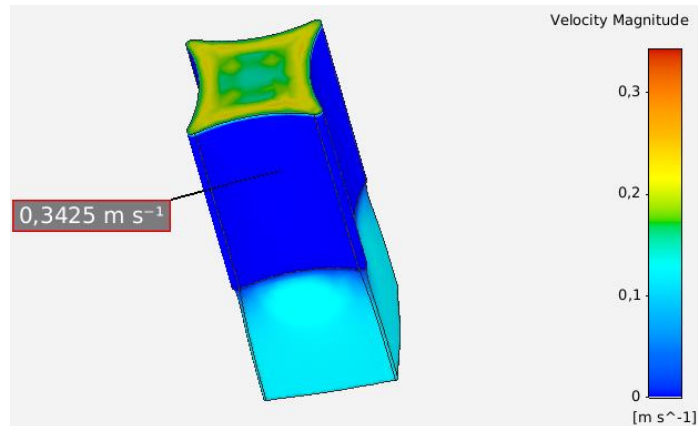
Kalıptan çıkan polimerin kayma oranı çok düşüktür ve hemen her noktada aynı olduğu görülmektedir.



**Şekil 4.13.** Tasarım 2 için Shear Rate

Şekil 4.14'te görüldüğü üzere kalıp içerisindeki akışkan polimer cidarlarda hız değeri sürtünme kaynaklı düşüktür, cidardan içeri doğru hız, profil kompleksliğinden dolayı artarken orta noktada dengeli seyretmeye başlamıştır.

Hızın maksimum olduğu noktada değer  $0,3425 \text{ m/s}$ 'dir ve giriş hız değeri olan  $0,15 \text{ m/s}$  değerinden fazladır.



**Şekil 4.14.** Hız Büyüklüğü

## Değerlendirme

Birebir tasarlanan kare profil akış davranışı incelendiğinde kalıp çıkışında profilin değiştiği, şiştiği görülmektedir. Düzensiz hız profili, kalıp cidarlarına yaklaştıkça eriyik hızının sürtünmeden dolayı azalması ve polimerlerin elastik özelliklerinden dolayı kalıp çıkışında serbest kalarak eski haline dönmesi eriyik profil bozulmasının neden olan faktörlerdir.

Kalıp üzerinde bozulmaların ve keskin köşelerin olduğu kısımlara yapılan müdahalelerle profil bozulması giderilebilmektedir.

İdeal bir kalıp tasarımı sayesinde polimer akış davranışı düzgünleşmekte, ekstrüzyon hataları azaltılabilmektedir. Yüksek hızlarda çalışabilmenin en önemli koşullarında biri bu hız şartlarında çalışabilmeyi sağlayacak uygun kalıp dizaynıdır.

## 5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu tez çalışmasında değişik profillerin sıcak kalıp çıkışındaki geometri değişimi incelenmiş, sebepler değerlendirilerek çözüm önerileri sunulmuştur. Analiz edilmek üzere belirlenen silindirik çubuk ve kare profillerde yapılan analizlerde, yüksek hızlarda çalışıldığında, iç gerilmeler ve sürtünmenin etkisi altındaki polimerin kalıp çıkışında şişme şeklinde gerçekleşen deformasyonları için geometrik çözümler bulunmaya çalışılmıştır.

Silindirik çubuk profillerde deformasyon kalıp çıkışında çap büyümesi şeklinde gerçekleşirken kare profilde geometri bozunması şeklinde gerçekleşmiştir. Silindirik profilin çap büyümesini optimize etmek amacıyla kalıp giriş formları değiştirilerek yapılan analizde konik giriş ve iç bükey giriş kullanıldığında kalıp çıkışındaki profil formunun farklı olduğu, konik girişinde daha dengeli bir akış yakalandığı görülmüştür.

Kare profilde ise kalıp çıkışındaki geometri bozulması silindirik çubuk uygulaması kadar basit değildir. Yılmaz'ın çalışmasında uygulanan yöntemde kalıpta yapılan iyileştirmede kalıbın iç kısmında debinin azaldığı noktalarda hacim genişletilmiş, bu genişleme kalıp çıkışına doğru azalarak devam etmiş, kalıp çıkışı ise geometriyle aynı formda bırakılmıştır. Bu tez çalışmasında kare profil uygulamasında kalıpta yapılan iyileştirme kalıp boyunca gerçekleştirilmiştir, kalıp çıkışı hedef geometriden farklıdır. İçe çöküşe yönelik profil köşeleri için kalıpta sivri köşeler uzatılmıştır, dışa yönelik profil kenarları için kalıp kenarları içe bükümlü olarak düzeltilmiştir. Sivri köşeler ile kenarların birleşim noktalarının içe meyli, kalıpta bu noktalar için yapılan radyal düzeltmelerle giderilmiştir.

## KAYNAKLAR

- Aran, A., 2008.** Malzeme Bilgisi, İTÜ, İstanbul, 94 s.
- Atasoy, U., 2013.** Sonlu Elemanlar Yöntemi Esaslı Modelleme Yazılımı Kullanılarak Boru Ekstrüzyonu Kalıbının Polimer Malzeme Akışı İçin Tasarlanması Ve Optimizasyonu, *Makine Projesi II*, İÜ Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, İstanbul.
- Anonim, 2017.** Plastic Extrusion Process. <https://polymeracademy.com/plastic-extrusion-process/>, (Erişim Tarihi: 21.01.2018)
- Anonim, 2018.** Ekstrüder. [http://www.dizaynvida.com/tr/urun.aspx?urun\\_ID=2](http://www.dizaynvida.com/tr/urun.aspx?urun_ID=2), (Erişim Tarihi: 21.01.2018)
- Eker, A. A., 2009.** Plastiklerin Şekillendirilme Yöntemleri, YTÜ, Türkiye, 144 s.
- Karanfil, T., 2014.** Polimer Proseslerde Ekstrüzyon. <http://tolgakaranfil.webnode.com.tr/products/polimer-proseslerde-ekstruzyon/> (ErişimTarihi:10.10.2017)
- Megep, 2006a.** Polimerlerin Fiziksel Özellikleri 2, Plastik Teknolojisi. T.C. Millî Eğitim Bakanlığı, Ankara, 71 s.
- Megep, 2006b.** Ekstrüzyon Makinelerinde Üretim 1, Plastik Teknolojisi. T.C. Millî Eğitim Bakanlığı, Ankara, 43 s
- Megep, 2008a.** Ekstrüzyon Kalıpcılığı-4, Plastik Teknolojisi. T.C. Millî Eğitim Bakanlığı, Ankara, 68 s.
- Megep, 2008b.** Ekstrüzyon Kalıpcılığı-1, Plastik Teknolojisi. T.C. Millî Eğitim Bakanlığı, Ankara, 132 s.
- Megep, 2013.** Ekstrüzyon Kalıpcılığı-3, Plastik Teknolojisi. T.C. Millî Eğitim Bakanlığı, Ankara, 57 s.
- Nart, Ç. 2011.** Plastik Boru Üretimi için SpiRal Kanallı Radyal Ekstrüzyon Kalıbının Sistematik Tasarımı. *Yüksek Lisans Tezi*, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul.
- Rauwendaal C., 1987,** Flow Distribution in Spiral Mandrel Dies, Polymer Engineering and Science, 27, 3.
- Ün, H. 2007.** Reoloji. Malzeme Bilgisi, PAÜ İnşaat Mühendisliği Bölümü, Pamukkale.
- Yılmaz, O. 2007.** Polimer Malzemelerin Ekstrüzyonunun Deneysel Ve Sayısal Olarak İncelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul.
- Zehev T., Costas G. G., 2006,** Principles of Polymer Processing, John Wiley and Sons, New York,



## ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Özlem KAYA

Doğum Yeri ve Tarihi : Bursa, 10.10.1991

Yabancı Dili : İngilizce

Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise : Bursa Ticaret ve Sanayi Odası Lisesi , 2005-2009

Lisans : Uludağ Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 2009-2013

Yüksek Lisans : Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine  
Mühendisliği Anabilim Dalı, 2015-2018

Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl : Nobel Automotive / Orhan Holding, 2016-...

İletişim (e-posta) : kayaozlem@windowslive.com