İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

POLİMER MALZEMELERİN EKSTRÜZYONUNUN DENEYSEL VE SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Mak. Müh. Oktay YILMAZ
(503041133)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 7 Mayıs 2007
Tezin Savunulduğu Tarih : 11 Haziran 2007

TEZ DANIŞMANI : Prof. Dr. Kadir KIRKKÖPRÜ
Diğer Jüri Üyeleri Yrd. Doç. Dr. Murat ÇAKAN (İ.T.Ü.)
Prof. Dr. İsmail TEKE (Y.T.Ü.)

HAZİRAN 2007

ÖNSÖZ

Yoğun bir çalışma sonunda tez çalışmamı tamamlamış olmaktan dolayı çok mutluyum. Çalışmalarım sırasında yardımcı olan herkese teşekkür ederim, ancak hepsini burada sayamayacağım.

İlk olarak tez danışmanım sayın Prof Dr. Kadir KIRKKÖPRÜ 'ye birlikte çalıştığımız sürece yoğun çalışma programına rağmen gösterdiği anlayıştan, her zaman moral verici bir tutum sergilemesinden ve çalışmamda ince noktaları görmemi sağlayan tavsiyelerinden dolayı teşekkür etmek istiyorum.

Deneysel çalışmaların yürütülmesinde destek olan Dizayn Teknik Plastik Boru ve Elemanları San. Tic. A.Ş. firmasına ve çalışanlarına; özellikle Polyflow yazılımını öğrenmemde ve daha bir çok teknik konuda yardımcı olan Araştırma ve Teknoloji Geliştirme Müdürü Sayın Zafer GEMİCİ 'ye; aynı birimde çalışan ve deneysel çalışmaları birlikte yürüttüğümüz Tamer BİRTANE Bey 'e; esprileriyle her zaman moral kaynağı olan Sayın Saim KENDİİŞLER 'e ve tez çalışması hakkında fikir alış verişinde bulunduğum İsminur GÖKGÖZ arkadaşıma teşekkür ediyorum.

Bu uzun çalışma sürecinde problemlere farklı bakış açılarıyla bakmayı öğrendiğim değerli hocam Sayın Prof. Dr. İsmail TEKE 'yi de unutmam mümkün değil.

Son olarak aileme verdikleri moral desteği ve gösterdikleri sabırdan ötürü teşekkür ederim.

Haziran 2007 Oktay YILMAZ

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ ii
İÇİNDEKİLER iii
KISALTMALAR v
TABLO LİSTESİ vi
ŞEKİL LİSTESİ viii
SEMBOL LİSTESİ xiii
ÖZET xvi
SUMMARY xvii

1. GİRİŞ 1
1.1. Tezin Amacı ve Kullanılan Yöntemler 4

2. PLASTİKLER 8
2.1. Polimer 8
2.1.1. Plastiklerin Özellikleri 8
2.1.2. Plastiklerin Sınıflandırılması 10
2.2. Polimer İşleme Yöntemleri 11
2.2.1. Kalıp Sonrası İşleme 12
2.2.2. Şekillendirme İşlemleri 12
2.2.3. Enjeksiyon Üretim Yöntemi 14
2.2.4. Polimer Ekstrüzyonu 14
2.2.4.1. Ekstrüder Vidası 17
2.2.4.2. Kalıp ve Kalibre 19
2.3. Ekstrüzyonda Karşılaşılan Problemler 22
2.3.1. Akışın Dengelenmesi 22
2.3.2. Şişme (Die swell) 24
2.3.3. Kalıp Çıkışında Düzensiz Eriyik Akışı (Melt Fracture) 28

3. POLİMER ERİYİKLERİN ÖZELLİKLERİ 30
3.1. Polimerlerin Reolojik Özellikleri 30
3.1.1. Reoloji 30
3.1.2. Polimerin Ana Akış Karakteristikleri 33
3.1.3. Kayma Viskozitesi 34
3.1.3.1. Ostwald-de-Waele ‘nin Kuvvet Yasası 36
3.1.3.2. Bird – Carreau Modeli (Polyflow 3.10.0 User Guide) 40
3.1.3.3. Cross Modeli (Polyflow 3.10.0 User Guide) 41
3.1.3.4. Carreau - Yasuda Modeli (Polyflow 3.10.0 User Guide) 42
3.1.4. Kayma Sırasında Oluşan Normal Gerilmeler 42
3.1.5. Uzama Viskozitesi 43
3.1.6. Genelleştirilmiş Newton Tipi Akışkan Modeli 46
3.1.7. Sıcaklık ve Basıncın Viskoziteye Etkisi 50
3.1.7.1. Sıcaklığın etkisi 51
3.1.7.2. Basıncın etkisi 55

3.1.8. Polimer Akışkanların Viskoelastik Özellikleri 57
3.2. Termodinamik Özellikler 62
3.2.1. Yoğunluk 63
3.2.2. Isı İletim Katsayısı 64
3.2.3. Özgül Isı Kapasitesi 65
3.2.4. Isı Yayılım Katsayısı 65

4. KORUNUM DENKLEMLERİ 69
4.1. Süreklilik denklemi 69
4.2. Hareket Denklemleri 70
4.3. Enerji Denklemi 71
4.4. Newton Tipi Olmayan Bir Akışkanın Boru İçerisinden Akışı 72

5. DENEYLER VE SAYISAL SİMÜLASYONLAR 78
5.1. Deney 1 78
5.1.1. Deneyin Amacı 78
5.1.2. Deneyin Yapılışı 78
5.1.3. Deneyin Sonuçları 79
5.1.4. Simülasyonlar 83
5.1.4.1. Kabuller ve Sınır Koşulları 86
5.1.4.2. Simülasyon Sonuçları 89
5.1.5. Şekil 5.7 'deki Delik Girişinden Önceki Geometri Yerine Dikdörtgen Kesitli Bir Hacim Kullanılması (Simülasyon 3) 96
5.1.6. Deney 1 'de 9 Numaralı Delik için Yapılan Simülasyon ve Analitik Yaklaşım 98
5.1.7. Simülasyon 4: Kuvvet Yasası modeli kullanımı 102
5.1.8. Deney 1 'de Çıkış Debilerinin Hesabı için Analitik Yaklaşım 103
5.1.9. Ekstrüzyon Kalıbı Çıkışında Hız Dağılımının Üniform Olmasını Sağlamak İçin Bir Yöntem 106
5.2. Deney 2 109
5.3. Hedef Profil için Sayısal Simülasyonlar 109
5.3.1. Sayısal Simülasyon 5 110
5.3.2. Simülasyon 6: Çıkış kesitinde üniform hız dağılımı sağlamak için kalıp düzlüğü geometrisinde değişikliklere gitme 113
5.3.3. Profilin Parçalara Bölünmesi ile Akışın Dengelenmesi Yöntemi 115

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 122

KAYNAKLAR 125

ÖZGEÇMİŞ 126

KISALTMALAR

PE	: Polietilen
HDPE	: Yüksek yoğunluklu polietilen
LDPE	: Düşük yoğunluklu polietilen
LLDPE	: Lineer düşük yoğunluklu polietilen
PP	: Polipropilen
PVC	: Polivinilklorür
PET	: Polietilen tereftalat
PMMA	: Polimetil metakrilat
CAB	: Selüloz asetat butirat
POM	: Polioksimetilen
PS	: Polistiren
SAD	: Sayısal akışkanlar dinamiği
GNF	: Genelleştirilmiş Newton Tipi Akışkan Modeli

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 2.1: Plastiklerin sınıflandırılması 10
Tablo 3.1: Deneye ait veriler 39
Tablo 3.2: Şekil değiştirme hızı tensörü $\dot{\gamma} = \nabla\vec{v} + (\nabla\vec{v})^T$ 47
Tablo 3.3: Bazı polimerlerin camsı geçiş sıcaklıkları, T_g (Michaeli, 2003) 54
Tablo 3.4: Polimerlerin bazı önemli özellikleri. n: kuvvet yasası indeksi (Rauwendaal, 2001) 66
Tablo 3.5: Bazı polimerlerin 150 °C 'deki termodinamik özellikleri (Baird ve Collias, 1998) 68
Tablo 4.1: Bazı akışkanların yaklaşık viskozite değerleri (Barnes ve diğ., 1989) ... 71
Tablo 4.2: Kuvvet Yasası kullanılarak dikdörtgen kesitli kanal için elde edilen ifadeler (W/H > 20) (Baird ve Collias, 1998) 77
Tablo 5.1: Deney 1 için kütlesel debinin deliklere dağılımı (Delik boyları 35 mm dir.) 80
Tablo 5.2: Sabit kafa sıcaklığında devir sayısının 40 d/d 'dan 80 d/d 'ya arttırılmasıyla kütlesel debideki artış oranı 80
Tablo 5.3: Sabit devir sayısında kafa sıcaklığının 210 °C 'den 230 °C 'ye çıkarılmasıyla kütlesel debideki artış oranı 81
Tablo 5.4: Devir sayısı 40 d/d ve kafa sıcaklığı 210 °C iken hacimsel debi ve ortalama hızın deliklere dağılımı (yoğunluk 0,75 g/cm^3 olarak alındı) 82
Tablo 5.5: Devir sayısı 40 d/d, kafa sıcaklığı 210 °C şartlarında yapılan deney ile simülasyon sonuçlarının karşılaştırılması 90
Tablo 5.6: Simülasyon 1 ile Simülasyon 2 çıkış debileri arasında yüzde sapma değerleri 90
Tablo 5.7: Simülasyon 2 'de delik girişlerindeki basınç değerleri ve birbirlerine göre yüzdesel büyüklükleri 94
Tablo 5.8: Simülasyon 1 ile 3 için debi dağılımının karşılaştırılması 97
Tablo 5.9: Simülasyonda kullanılan akışkana ait viskozite modellerinin sabitleri 102
Tablo 5.10: Simülasyon 2 'deki akışkanın viskozite modeli için Kuvvet Yasası kullanılması durumunda toplam giriş debisinin deliklere dağılımı ve Simülasyon 2 debi dağılımı ile karşılaştırılması 103
Tablo 5.11: Analitik çözüm ile Simülasyon 4 'te hesaplanan çıkış debilerinin karşılaştırılması 106
Tablo 5.12: Deney 2 'ye ait kütlesel debi dağılımı (devir sayısı 40 d/d ve kafa sıcaklığı 190 °C) 109
Tablo 5.13: Simülasyon 5 'de şekilde görülen noktalardaki hız değerleri 111
Tablo 5.14: Parçaların kesit oranları ve debi değerleri 116
Tablo 5.15: Simülasyonlar sonucunda ortalama hızın 5 m/dk olması durumunda her bir parçaya ait birim boyda meydana gelen basınç kaybı 117
Tablo 5.16: 5 m/dk ortalama hızda 11,9 bar basınç kaybını oluşturacak parça uzunlukları 118

Tablo 5.17: Bird – Carreau Modeli ‘nin farklı n değerleri için parçalarda meydana gelen birim boydaki basınç kaybı (ortalama hız 5 m/dk) ve parçalarda eşit basınç kaybı oluşturulabilmesi için 2 no. ‘lu parçaya göre uzunluk oranları. 121

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 1.1: Üretilecek profil 4
Şekil 1.2: Profil kalıplar için ekstrüder kafası 5
Şekil 1.3: Şekil 1.1 'deki profile sahip ürünün kalıptan ilk çıkan kısmının soğuduktan sonra çekilmiş bir fotoğrafı 6
Şekil 2.1: Polimer yapıya bir örnek: Polietilen (PE) (Akyüz, 2001) 8
Şekil 2.2: Plastik moleküllerinin dizilişi (Akyüz, 2001) 11
Şekil 2.3: Yarı kristal (soldaki) ve amorf (sağdaki) termoplastiklerin moleküler yapıları 11
Şekil 2.4: Farklı polietilen tipleri 12
Şekil 2.5: Film şişirme işlemi 13
Şekil 2.6: Düz film ve levha üretimi 13
Şekil 2.7: Lif üretimi 14
Şekil 2.8: Şişirmeyle kalıplama (Baird ve Collias, 1998) 15
Şekil 2.9: Vakumla ısıl şekillendirme (Baird ve Collias, 1998) 15
Şekil 2.10: Basınçla kalıplama işlemi (Baird ve Collias, 1998) 16
Şekil 2.11: Genel enjeksiyon ünitesi (Baird ve Collias, 1998) 16
Şekil 2.12: Profil üretimi için ekstrüzyon hattı 16
Şekil 2.13: Renkli granüller 17
Şekil 2.14: Ekstrüder vidası 18
Şekil 2.15: Ekstrüder vidası, kalıp ve delikli plaka 18
Şekil 2.16: Boru kalıbı (1.Mandrel, 2.Hava deliği, 3.Örümcek ayağı, 4.Merkezleme cıvatası, 5.Kalıp halkası, 6.Gevşeme bölgesi) 19
Şekil 2.17: Mandreli desteklemek için örümcek ayak çeşitleri (Michaeli, 2003) 20
Şekil 2.18: Film ve levha üretimi için askı tip kalıp 20
Şekil 2.19: Kablo kaplama kalıbı (1.Kablo, 2.Torpido, 3.Kalıp gövdesi, 4.Vakum (gerekli olduğu halde)) 21
Şekil 2.20: Kalıp ve kalibrenin işlevsel kısımları (Michaeli, 2003). 21
Şekil 2.21: Akışın dengelenmemiş olduğu kalıptan çıkan malzeme ve kesitteki hız dağılımı (Nóbrega ve diğ., 2004) 22
Şekil 2.22: Şekil 2.21 'deki profilin kalıp geometrisini dolduran eriyik hacmi (Nóbrega ve diğ., 2004) 23
Şekil 2.23: Şekil 2.22 'deki kalıp çıkışında hız dağılımı dengelendikten sonraki çıkan ürün (Nóbrega ve diğ., 2004) 23
Şekil 2.24: Akışın dengelenmiş olduğu kalıp iç geometrisi (Carneiro ve diğ., 2001) 24
Şekil 2.25: Kanal uzunlukları akışı dengelemek için ayarlanmış profil kalıbı (Michaeli, 2003) 25
Şekil 2.26: Profil ekstrüzyonunda kalıp çıkışında şişme (Gifford, 2003) 25
Şekil 2.27: Dairesel kesit çıkışında şişme 26
Şekil 2.28: Polimer molekülleri 26
Şekil 2.29: Kalıptan çıkarken viskoelastik eriyiğin şişmesi 26
Şekil 2.30: Hız profilinin çıkışta yeniden düzenlenmesi (Michaeli, 2003) 27

Şekil 2.31: Çeyrek dikdörtgen kesitte hız alanı (Michaeli, 2003)..... 27
Şekil 2.32: Dikdörtgen kesitten çıkan eriyik geometrisi..... 28
Şekil 2.33: İstenilen ürün geometrisini elde etmek için dizayn edilen kalıp (Gifford, 2003) 28
Şekil 2.34: Kapiler reometrede karşılaşılan gerilme-şekil değiştirme hızı eğrisindeki kararsızlıklar (Michaeli, 2003)..... 29
Şekil 2.35: Farklı $\dot{\gamma}_a$ "görünen şekil değiştirme hızlarında", kapilerden çıkan HDPE eriyikleri. Soldan sağa doğru $\dot{\gamma}_a$ değerleri 75, 75, 2250 s^{-1} ve bunlara karşılık τ_a değerleri 0.20, 0.27, 0.33 MPa 'dır. (Baird ve Collias, 1998) 29
Şekil 3.1: Sonsuz küçük akışkan hacim elemanında viskoz gerilmeler..... 31
Şekil 3.2: Birim hacim elemanı küpün maruz kaldığı deformasyon tipleri (Bird ve diğ., 1987)..... 32
Şekil 3.3: Tek boyutlu daimi rejimde tam gelişmiş akış..... 32
Şekil 3.4: Silindir içinde dönen çubuk. Solda Newton tipi akışkan, gliserin. Sağda gliserin içerisinde polimer çözeltisi. Soldaki çubuk çok hızlı dönmesine rağmen sıvı serbest yüzeyi düz, sağdaki çubukta ise düşük bir hızdaki dönüş polimer çözeltisinin tırmanmasına yeterli oluyor (Bird ve diğ., 1987) 34
Şekil 3.5: Tüpsüz sifon. Solda; sifon, Newton tipi akışkandan ayrılınca akışkan kısa bir mesafe sonra sifondan ayrılıyor. Sağda; sifon polimerik akışkandan ayrılmayacak şekilde birkaç santimetreye kadar çekilebiliyor (Bird ve diğ.,1987)..... 34
Şekil 3.6: Tek boyutlu viskoz akış..... 35
Şekil 3.7: Farklı akışkanlara ait gerilme-şekil değiştirme hızı eğrileri..... 36
Şekil 3.8: Logaritmik ölçekte polimer akışkanların viskozite-kayma şekil değiştirme hızı değişimi..... 36
Şekil 3.9: Kuvvet yasası modeli..... 37
Şekil 3.10: Polimer çözeltisine ait kayma gerilmesi – şekil değiştirme hızı eğrisi. 38
Şekil 3.11: Polimer çözeltisine ait viskozite değişimi..... 39
Şekil 3.12: Polimer çözeltisi için $\dot{\gamma} - \log \tau$ değişimi..... 40
Şekil 3.13: Bird – Carreau modeli..... 41
Şekil 3.14: Kayma sırasında oluşan normal gerilmeler..... 44
Şekil 3.15: Dekalin içerisindeki %1,18 poli izobutilen çözeltisi için kayma gerilmesi..... 44
Şekil 3.16: Bir boyutlu uzama..... 45
Şekil 3.17: Daimi rejim tek eksen uzama akışında akım çizgileri..... 45
Şekil 3.18: 160 °C 'deki polistiren eriyiğin şekil değiştirme hızlarına bağlı olarak kayma ve uzama viskozitelerinin değişimi. Küçük şekil değiştirme hızlarında viskozite oranı yaklaşık 3 'tür. ($\bar{\eta}$: uzama viskozitesi) (Macosko, 1994) 46
Şekil 3.19: Tek boyutlu viskoz akış..... 48
Şekil 3.20: Düşük yoğunluklu bir polimere ait değişik sıcaklıklardaki kayma viskozitesi (Bird ve diğ., 1987)..... 50
Şekil 3.21: Sıcaklık ve basıncın PMMA polimerinin viskozitesine etkisi (Michaeli, 2003) 51
Şekil 3.22: CAB için farklı sıcaklıklardaki viskozite eğrileri (Michaeli, 2003)..... 52
Şekil 3.23: Herhangi bir viskozite fonksiyonu için zaman – sıcaklık süperpozisyon prensibi (Michaeli, 2003)..... 53

Şekil 3.24: Bazı polimerler a_T değerleri (Michaeli, 2003) 55
Şekil 3.25: Viskoelastik akışkanın kısmi elastik deformasyonu 58
Şekil 3.26: Şekil 3.25 'te meydana gelen gerilme gevşemesine yay-damper modeli benzeşimi 58
Şekil 3.27: Kayma şekil değişiminin sabit tutulması 59
Şekil 3.28: Aniden oluşturulan Şekil 2.27 'deki gibi sabit kayma şekil değişimine karşı zamana bağlı gerilme cevabı. a) Kayma şekil değişimi-zaman eğrisinde küçük bir maksimum noktası görülüyor. Kontrol sistemlerinde karşılaşılan sürekli rejime geçme süresidir. b) İdeal Hook cisminde gerilme gevşemesi olmaz. c) Newton tipi akışkanda kayma şekil değişimi sabitlendiği anda gerilme kaybolur. d) Viskoelastik akışkanda zamanla gerilme sıfıra giderken, viskoelastik cisimde artık gerilme kalır. 60
Şekil 3.29: Polidimetilsiloksan için zamana ve kayma şekil değişimine bağlı kayma gerilmesi gevşemesi grafiği. Kayma şekil değişimi aniden sıfırdan sabit bir değere getiriliyor. a) Gerilme aniden yükseliyor, daha sonra üstel olarak gerilme gevşemesi gerçekleşiyor. b) Logaritmik ölçekte gevşeme modülü G 'nin zamanla değişimi çıkarılınca, $\gamma < 1$ için $G(\gamma,t)$ eğrilerinin üst üste düştüğü görülüyor, yani bu polimer için $\gamma_c = 1$ dir (Macosko, 1994). 60
Şekil 3.30: Hidrokarbon yağı içindeki % 7,55 polibutadien çözeltisine ait sabit kayma şekil değiştirme hızında (Şekil 3.31) zamanla kayma viskozitesinin değişimi. Grafikte farklı kayma hızları için eğriler verilmiştir. (Macosko, 1994) 61
Şekil 3.31: Sabit kayma şekil değiştirme hızında kayma viskozitesinin zamanla değişimi. Şekil 3.30 'daki grafikteki deneyi temsilen. 61
Şekil 3.32: Dört farklı eriyiğin farklı uzama hızlarındaki $\dot{\in}$, uzama viskozitelerinin zamana bağlı değişimi. Çarpan kullanılarak eğriler dikey eksende kaydırılmıştır. (Macosko, 1994) 63
Şekil 3.33: Çeşitli polimerlerin özgül hacimlerinin sıcaklıkla değişimi (Michaeli, 2003) 65
Şekil 3.34: Çeşitli polimerlerin ısı iletim katsayılarının sıcaklığa bağlı değişimleri (Michaeli, 2003) 66
Şekil 3.35: Çeşitli polimerlerin sıcaklığa bağlı özgül ısı kapasitesi değişimleri (Michaeli, 2003) 67
Şekil 3.36: Çeşitli polimerlerin sıcaklığa bağlı ısı yayılım katsayıları (Michaeli, 2003) 67
Şekil 4.1: Boru içerisinden akış 72
Şekil 4.2: Farklı Kuvvet Yasası üslerinde hız profilleri 75
Şekil 4.3: Dikdörtgen kesitli kanaldan akış. Kağıt düzlemine dik doğrultudaki genişlik, W. (W/H>20) 76
Şekil 5.1: Profilin farklı çapta deliklerle beslenmesi 79
Şekil 5.2: Deney 1 'de kullanılan parça 81
Şekil 5.3: Deney 1 'de n = 40 d/d ve T_{kafa} = 210 °C şartlarındaki teste ait ortalama hızların birbirine göre büyüklükleri 82
Şekil 5.4: Deney 1 'de kullanılan kalıp düzlüğü 83
Şekil 5.5: Kafa içerisindeki akışkan hacminin bir kısmı 84
Şekil 5.6: Simülasyonda kullanılan akışkan hacmi 85
Şekil 5.7: Deney 1 'e ait simülasyonlar için çözüm ağı 85

Şekil 5.8: Simülasyon 1 ‘de basınç dağılımı (basınç birimi Pa) (simetri yüzeyi tarafından görünüm)..... 91
Şekil 5.9: Simülasyon 2 ‘de basınç dağılımı (basınç birimi Pa) (simetri yüzeyi tarafından görünüm)..... 91
Şekil 5.10: Simülasyon 2 ‘ye ait hız dağılımı. Hızın birimi m/s ‘dir. 92
Şekil 5.11: Simülasyon 2 ‘de viskozite dağılımı. Viskozitenin birimi Pa.s ‘dir. 93
Şekil 5.12: Şekil 5.10 ‘daki simetri yüzeyinde delik girişlerinin bulunduğu hat boyunca basıncın değişimi 94
Şekil 5.13: 5 numaralı deliğin (kademeli delik) girişinden çıkışına kadar ekseni boyunca basıncın (düz çizgi) ve maksimum hızın (kesikli çizgi) değişimi 95
Şekil 5.14: 9 numaralı deliğin girişinden önceki ve sonraki hız profili (z = 50 mm, delik girişi) 95
Şekil 5.15: 9 no ‘lu delikte girişten 20 mm sonra kesitteki viskozite ve şekil değiştirme hızı profilleri. Deliğin tam boyu 35 mm ‘dir. 96
Şekil 5.16: Simülasyon 3 ‘de kullanılan geometri ve çözüm ağı yapısı 97
Şekil 5.17: Simülasyonda kullanılan geometri ve çözüm ağı yapısı..... 98
Şekil 5.18: Delik girişinden itibaren hız profilinin gelişimi 99
Şekil 5.19: Simetri ekseni boyunca basıncın değişimi. (Delik girişi y = 35 mm). 100
Şekil 5.20: Dairesel kesit içerisinden akış 101
Şekil 5.21: Simülasyonda kullanılan akışkanın viskozite-şekil değiştirme hızı eğrisine Kuvvet Yasası modelinin uydurulması. 101
Şekil 5.22: Deney 1 ‘de kullanılan kalıp düzlüğünün kesit görünüşü ve delik çapları 104
Şekil 5.23: 1 ve 2 numaralı deliklerin çıkışında ortalama hızın eşitlenmesi..... 107
Şekil 5.24: Deney 2 ‘de 1 numaralı deliğin pah açısı ve derinliği 109
Şekil 5.25: Hedef profil..... 110
Şekil 5.26: Kalıptan ilk çıkan malzemenin soğuduktan sonra çekilmiş bir fotoğrafı 110
Şekil 5.27: Kalıp düzlüğü içerisindeki akışkan hacmi 110
Şekil 5.28: Profil simülasyonlarında kullanılan çözüm ağı 111
Şekil 5.29: a) Hedef profil için yapılan deneme b) Simülasyonda kalıp çıkış kesitindeki vektörel olarak hız büyüklükleri c) Simülasyonda kesitteki renkli eş hız eğrileri (en yüksek hız 0,203 m/s) d) Çıkış kesitindeki hız vektörlerinin farklı açıdan görünümü 112
Şekil 5.30: Simülasyon 6 ‘da kullanılan geometri 113
Şekil 5.31: Simülasyon 6 ‘daki geometriye ait çözüm ağı..... 114
Şekil 5.32: Akış boyunca farklı kesitlerde hız dağılımları. Sırasıyla kesitlerin girişten uzaklıkları 0, 7, 18, 25, 35 (çıkış kesiti) mm ‘dir..... 114
Şekil 5.33: Simülasyon 6 ‘da giriş ve çıkış kesitinde vektörel hız büyüklükleri ... 115
Şekil 5.34: Profilin 4 parçaya bölünmüş görünüşü 116
Şekil 5.35: 4 parçanın ayrı ayrı simülasyonları sonucunda hız dağılımı ve parçalara ait çözüm ağı 117
Şekil 5.36: Profilin ayırma yüzeyleri 118
Şekil 5.37: Simülasyonda kullanılan geometri ve çözüm ağı yapısı. Şekilden anlaşılacağı üzere ayrık parçalar çıkıştan 5 mm önce birleşmektedir. 119
Şekil 5.38: Simülasyon sonucu çıkış kesitinde hız dağılımı 119
Şekil 5.39: Çıkış kesitinin bazı noktalarında hız değerleri ve bu hız değerlerinin maksimum hıza oranları..... 119
Şekil 5.40: Simülasyon sonucu elde edilen basınç dağılımı 120

Şekil 5.41: Yukarıdan aşağıya doğru n = 0,4 ; 0,496 ; 0,6 için çıkış kesitinde hız dağılımı 120

SEMBOL LİSTESİ

$\mathbf{A}$	: Alan
$\mathbf{A_{profil}}$	: Hedef profilin kesit alanı
$\mathbf{a}$	: İvme
$\mathbf{a}$	: Carreau - Yasuda Modeli sabiti
$\mathbf{a, b}$	: Doğrusal denklem katsayıları
$\mathbf{a_i}$	: Deney 1 için yapılan analitik yaklaşımda i. inci deliğe ait sabit
$\mathbf{a_T}$	: Kaydırma katsayısı
$\mathbf{c_p}$	: Sabit basınçta özgül ısı kapasitesi
$\mathbf{c_v}$	: Sabit hacimde özgül ısı kapasitesi
$\mathbf{C_1, C_2}$	: WLF Denklemi sabitleri
$\mathbf{D}$	: Delik çapı
$\mathbf{E_0}$	: Akış aktivasyon enerjisi
$\mathbf{F}$	: Kuvvet
$\mathbf{G}$	: Gevşeme modülü
$\mathbf{g}$	: Yer çekimi ivmesi
$\mathbf{H}$	: Dikdörtgen kesitli kanalın yüksekliği
$\mathbf{I}$	: Birim tensör
$\mathbf{I_1}$	: Şekil değiştirme hızı tensörünün birinci envaryantı
$\mathbf{I_2}$	: Şekil değiştirme hızı tensörünün ikinci envaryantı
$\mathbf{I_3}$	: Şekil değiştirme hızı tensörünün üçüncü envaryantı
$\mathbf{K}$	: Orantı sabiti
$\mathbf{k}$	: Isı iletim katsayısı
$\mathbf{L}$	: Silindirik deliğin uzunluğu
$\mathbf{l}$	: Uzunluk
$\mathbf{m}$	: Kuvvet Yasası Modeli kıvam faktörü
$\mathbf{m}$	: Cross Viskozite Modeli indeksi (m = 1 – n)
$\dot{m}$	: Kütlesel debi
$\mathbf{N_1}$	: Birincil normal gerilme farkı
$\mathbf{N_2}$	: İkincil normal gerilme farkı
$\mathbf{n}$	: Kuvvet Yasası Modeli indeksi
$\mathbf{n}$	: Ekstrüder vidasının devir sayısı
$\mathbf{P}$	: Basınç
$\mathbf{P_L}$	: Delik girişindeki basınç
$\mathbf{P_0}$	: Delik çıkışındaki basınç
$\mathbf{p_r}$	: Referans basınç
$\mathbf{R}$	: Deliğin yarı çapı
$\mathbf{r, \theta, z}$	: Silindirik koordinatlar
$\mathbf{Q}$	: Hacimsel debi
$\mathbf{Q_i}$	: i. delikten geçen hacimsel debi
$\mathbf{Q_{deney_i}}$	: Deneyde i. delikten geçen hacimsel debi
$\mathbf{Q_{simülasyon_i}}$	: Sayısal simülasyonda i. delikten geçen hacimsel debi
$\mathbf{Q_T}$	: Toplam hacimsel debi
$\mathbf{q_x}$	: x doğrultusunda ısı akısı

$\mathbf{q_y}$: y doğrultusunda ısı akısı
$\mathbf{q_z}$: z doğrultusunda ısı akısı
$\mathbf{R}$: Evrensel gaz sabiti
$\mathbf{T}$: Sıcaklık
$\mathbf{T_g}$: Camsı geçiş sıcaklığı
$\mathbf{T_{kafa}}$: Ekstrüder kafasının sıcaklığı
$\mathbf{T_m}$: Erime sıcaklığı
$\mathbf{T_R}$: Referans sıcaklık
$\mathbf{T_S}$: Standart sıcaklık
$\mathbf{T_0}$: Referans sıcaklık
$\mathbf{T_{ij}}$: Toplam gerilme tensörü
$\mathbf{t}$: Zaman
$\mathbf{V}$: Bileşke hız
$\overline{V}$: Kesitteki ortalama hız
$\mathbf{v_n}$: Normal hız bileşeni
$\mathbf{v_r}$: Hız vektörünün radyal doğrultudaki bileşeni
$\mathbf{v_t}$: Normal hız bileşeni
$\mathbf{v_x}$: Hız vektörünün x doğrultusundaki bileşeni
$\mathbf{v_y}$: Hız vektörünün y doğrultusundaki bileşeni
$\mathbf{v_z}$: Hız vektörünün z doğrultusundaki bileşeni
$\mathbf{v_{z_maks.}}$: z doğrultusundaki en yüksek hız
$\overline{v_z}$: z doğrultusundaki ortalama hız
$\mathbf{v_\theta}$: Hız vektörünün dönel bileşeni
$\mathbf{W}$: Dikdörtgen kesitli kanalın genişliği
$\mathbf{x, y, z}$: Kartezyen koordinatlar
$\mathbf{\Delta P}$: Delik boyunca meydana gelen basınç düşüşü
$\mathbf{\Delta t}$: Zaman adımı
$\mathbf{\Phi}$: Birim hacim başına viskoz ısı üretimi
$\mathbf{Ø}$: Çap işareti
$\boldsymbol{\gamma}$: Şekil değiştirme miktarı
$\boldsymbol{\gamma_c}$: Kritik kayma şekil değiştirme miktarı
$\dot{\gamma}$: Kayma şekil değiştirme hızı
$\dot{\gamma}_a$: Görünen kayma şekil değiştirme hızı
$\dot{\gamma}_{ij}$: Şekil değiştirme hızı tensörü
$\dot{\gamma}_{kri}$: Kritik kayma şekil değiştirme hızı
$\dot{\in}$: Uzama şekil değiştirme hızı
$\boldsymbol{\mu}$: Newton tipi akışkanlar için kullanılan dinamik viskozite
$\boldsymbol{\eta}$: Sanki-plastik akışkanlar için kullanılan kayma viskozitesi
$\boldsymbol{\eta_R}$: Referans sıcaklıktaki kayma viskozitesi
$\boldsymbol{\eta_u}$: Tek eksen uzama viskozitesi
$\boldsymbol{\eta_0}$: Sıfır kayma viskozitesi
$\boldsymbol{\eta_\infty}$: Sonsuz kayma viskozitesi
$\overline{\eta}$: Uzama viskozitesi
$\boldsymbol{\tau_{ij}}$: Viskoz gerilme tensörü
$\boldsymbol{\tau}$: Kayma gerilmesi
$\boldsymbol{\tau_a}$: Görünen kayma gerilmesi
$\boldsymbol{\sigma}$: Normal gerilme

ρ : Yoğunluk
α : Viskozite için sıcaklık katsayısı
α : Isıl genleşme katsayısı
α : Isıl yayılım katsayısı
α_p : Viskozitenin basınca duyarlılığı katsayısı
φ_i : i. parçanın kesit alanının profilin kesit alanına oranı
λ : Doğal zaman

POLİMER MALZEMELERİN EKSTRÜZYONUNUN DENEYSEL VE SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ

ÖZET

Profil ekstrüzyonunda, kalıp çıkış kesitinde akışın dengelenmesi ve kalıptan çıkan malzemenin şişmesi olmak üzere karşılaşılan iki temel problem vardır. Bu çalışmada bu problemlerin ilki deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir.

İlk olarak profil kesitinin farklı çaplardaki deliklere bölünebileceği ve kalıp çıkışında dengeli akış sağlamak için çıkış kesitinin bu deliklerle beslenebileceği düşünülmüştür. Bu amaçla, farklı çaplardaki ve kademeli deliklerdeki polimer eriyiğin akışının incelenmesi için deneyler yapılmıştır. Deney sonuçlarına göre kalıp girişinde basınç dağılımı yaklaşık olarak homojendir.

Çalışmanın devamında akışın dengelenmesi problemi için analitik bir yaklaşım geliştirilmiştir. Analitik sonuçlar sayısal simülasyon sonuçları ile karşılaştırıldığında analitik yaklaşımın kalıp dizaynında yol gösterici olabileceğini göstermiştir. Sayısal sonuçlar ticari bir yazılım olan Polyflow ile elde edilmiştir. Bu yazılım Sonlu Elemanlar Yöntemi 'ni kullanmaktadır ve newton tipi olmayan viskoelastik akışkanların akışını simüle edebilmektedir. Viskoz gerilmeler ile şekil değiştirme hızları arasındaki ilişki, Genelleştirilmiş Newton Tipi Akışkan Modeli 'yle ifade edilmiştir.

Sayısal simülasyon sonuçlarına göre polimer ekstrüzyonunda giriş basınç kayıpları çok düşüktür ve ihmal edilebilirler. Çok düşük Reynolds sayısına sahip bu akışta viskoz kuvvetler basınç kuvvetleriyle dengelenmektedirler. Ayrıca sayısal simülasyon sonuçlarına göre kalıp tasarımı ekstrüde edilen polimerin cinsine kuvvetli bir şekilde bağımlılık gösterir ve kalıp çıkış kesitindeki hız dağılımı üretim hızından etkilenmemektedir.

İmalatı düşünülen bir profil için sayısal simülasyonlar yardımıyla dengeli malzeme çıkışı sağlayacak bir kalıp geometrisi önerilmiştir. Bu yöntem, kalıp girişinde kesitin ayırma yüzeyleri yardımıyla yaklaşık olarak homojen kesite sahip daha küçük parçalara bölünmesine dayanmaktadır. Sayısal simülasyonlarda farklı parçalarda akan eriyiğin kalıp çıkışına az bir mesafe kala bir araya gelmesi sağlanmıştır. Böylece polimer eriyik akışında çapraz akış önlenmektedir. Bu yöntem kullanılarak kalıp çıkış kesitinde nümerik olarak hemen hemen üniform hız dağılımı elde edilmiştir

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL INVESTIGATION OF EXTRUSION OF POLYMERIC MATERIALS

SUMMARY

There are two main problems in profile extrusion, flow balancing at the die exit and the swelling of the extrudate as it leaves the die. In this study, first of these problems has been studied experimentally and numerically.

First, it has been suggested the profile cross-section in the die could be divided into several cylindrical channels with different diameters and could be fed by these channels in order to obtain a balanced flow at the die exit. For this purpose, experiments have been carried out to investigate the characteristics of polymer melt flow through different diameter channels and multiple diameter channels that feed the profile at the die exit. Experimental results have shown that, the pressure distribution at the die inlet is nearly uniform.

Second, an analytical approach is established for flow balancing. Comparison of the analytical results with those of numerical simulations suggests that the analytical approach may be a guide for the die design. Numerical solutions are obtained by using Polyflow, a commercial software. The software uses Finite Element Method and can simulate the flow of nonnewtonian and viscoelastic fluids. The relation between viscous stresses and strain rates are defined by Generalized Newtonian Fluid (GNF) Model.

Numerical simulation results demonstrate that entrance pressure losses in polymer extrusion are very small and can be neglected. In this very low Reynolds number flow, viscous forces are balanced by pressure forces. Numerical simulations have also shown that the die design is strongly dependent on the type of polymer being extruded and the flow velocity distribution in the profile cross-section at the die exit is not affected by the production rate.

For a profile to be produced, a die geometry which provides a balanced flow at the die exit is proposed by use of numerical simulations. This is achieved by using flow separators that divide the cross section into a few smaller cross-sections of near homogenous thickness at the die inlet. The melt flow in different cross-sections is allowed to join each other before a short distance from the die exit in the numerical simulations. This prevents cross flowing in the polymer melt flow. By using this technique, a near uniform velocity distribution at the die exit has been reached numerically.

1. GİRİŞ

Bir polimer olan plastiklerin kullanımı günümüzde oldukça yaygındır. Hafif olmaları, kolay işlenebilir olmaları, demir ve türevlerine göre işleme sıcaklıklarının düşük olması, esnek aynı zamanda çok yüksek sıcaklıklara çıkılmadığı taktirde dayanıklı olmaları üretimde geniş çapta kullanılmalarını sağlamıştır. Ev aletleri, boru, ince film, profil pencere, tıpta kullanılan ekipmanlar gibi sayısı arttırılabilecek çok çeşitli ürünler plastiklerden üretilebilmektedir. Bunun yanında iplik üretiminde kullanıldığından giyim sanayiinde de yine polimerler kullanılmaktadır.

Çeşitli plastik işleme yöntemleri vardır. Bunlardan bazıları enjeksiyonla kalıplama, ekstrüzyon, şişirmeyle kalıplama olup ilerleyen bölümlerde bu yöntemlere değinilecektir.

Polimer ekstrüzyonu sürekli üretimin gerçekleştiği bir prosestir, kalıptan devamlı malzeme çıkışı olur. Kalıp ürüne şekil veren kısımdır. Bu tez kapsamında polimer ekstrüzyonu ele alınmıştır ve kalıp içindeki eriyik akışı incelenmiştir.

Ekstrüzyon yöntemiyle boru, profil, pencere, kablo kılıfı gibi ürünler üretilmektedir. Bunlardan üretimi en yaygın olan borudur. Üretim esnasında ekstrüzyonda karşılaşılan bazı problemler vardır. En önemli ikisi, kalıp çıkış kesitinde hız dağılımının üniform olmaması ve çıkan malzemenin şişmesi problemleridir. Boru, simetrik olduğundan ve et kalınlığı sabit kaldığından bu tür problemlerle karşılaşılmaz. Kalıp çıkışında şişme olayı yine meydana gelir, ancak geometride şekil bozukluğu oluşmaz, sadece ölçüde artma olur. Bu da endüstride tecrübeyle kolayca giderilebilmektedir. Ancak profil üretiminde durum bundan farklıdır. Akış dengelenmesi önemli bir sorundur, çünkü kalıptan düzgün malzeme çıkışı sağlanamaz ve ürün içinde iç gerilmeler oluşur. Şişme neticesinde geometri şekil bozukluğuna uğrar.

Profil üretiminde termoset malzemeler kullanıldığında şişme problemi termoplastik malzemelere oranla daha azdır. Yani termoplastiklerin ekstrüzyonu daha problemlidir.

Şişme olayının büyük oranda sorumlusu polimerin elastik özellikleridir. Polimer moleküllerinin zincirli yapıları polimerin katı gibi elastik özellik göstermesine neden olmaktadır.

Polimerlerin moleküler yapılarından dolayı reolojik özellikleri karmaşıktır. Hava, su gibi Newton tipi akışkanlarda şekil değişimi ile gerilme arasındaki ilişki, tek bir viskozite katsayısı kullanılarak verilebilmektedir. Bu gibi akışkanlarda viskozite sıcaklığa bağlıdır. Ancak polimer akışkanlarda bu ilişki için tek bir viskozite tanımı yeterli olmamaktadır. Polimer akışında akış doğrultusundaki şekil değişimlerine karşı direnç oldukça fazladır. Bu da uzama viskozitesi kavramını kullanmayı gerektirmiştir ve kayma viskozitesi ile uzama viskozitesi arasında herhangi bir ilişki yoktur. Açısal şekil değişimi arttıkça kayma viskozitesi azalırken (sanki-plastik davranış), uzama (çekme) hızı arttıkça uzama viskozitesi artmaktadır. Aynı zamanda polimer eriyiklerin reolojik özellikleri zamana bağlıdır. Bu yüzden akışkanın sayılan tüm reolojik özelliklerini tanımlayabilecek modellere ihtiyaç duyulmuştur. Literatürde birçok reoloji modeli vardır **(Bird ve diğ., 1987)**. Fakat seçilen model akışkanın bütün reolojik özelliklerini temsil edemeyebilir. Hangi modelin seçileceği polimerin cinsine, akış koşullarına ve kalıp iç geometrisine bağlı olarak değişir. Bu yüzden polimer akışkanlar için sabit bir model yoktur. Su, hava gibi akışkanların viskoziteleri ve diğer özellikleri tespit edilmiştir ve literatürden kolayca bu bilgilere ulaşılabilmektedir. Ancak polimer akışkanların kendi cinsleri içinde dahi reolojik özellikleri değişmektedir. Çünkü malzemenin reolojik özelliklerini etkileyen bir çok etmen vardır. Moleküler yapı, molekül ağırlığı, katkı maddeleri gibi faktörler bu etkiye sebep olmaktadır.

İki ayrı firmanın ürettiği aynı cins polimerin (örneğin HDPE-High Density Polyethyelene) akış özellikleri çok farklı olabilmektedir. Hatta firmanın kendi içinde bile bu farklılıklar görülebilir. Bundan dolayı polimer malzemelerin reolojik özellikleri firmalardan temin edilmelidir. Ancak daha güvenilir bir yol kalıbı tasarlayacak firmanın kendi bünyesinde akış özelliklerini ölçmede kullanılan,

reometre adı verilen cihazlardan bulundurmasıdır. Hatta günümüzde çevrimiçi (on-line) reometreler kullanılmaktadır. Böylece eriyiğin reolojik özellikleri her an ölçülmektedir; buna göre kalıp sıcaklığı, üretim hızı, çekme hızı gibi işlem koşullarının yeni hammadde özelliklerine uyumu sağlanmaktadır.

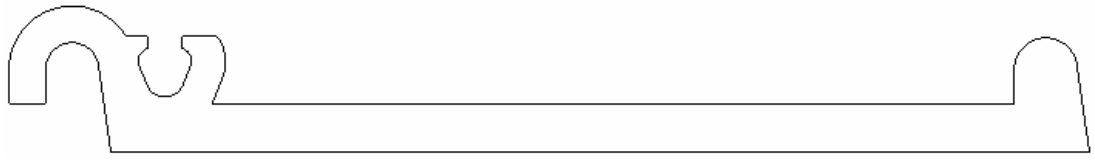
Bu tez çalışmasına konu olan ekstrüzyon kalıp tasarımında hedef, ürünün istenen üretim hızında ve geometride imalini sağlamaktır. Bunun için kalıp içerisindeki akışa hakim olmak gerekir. Reolojik özelliklerin tespiti burada en önemli noktadır, buna karşılık termodinamik özellikler, yukarıda sayılan etmenlerden örneğin katkı maddelerinden çok etkilenmemektedir. Bundan sonraki adım süreklilik, momentum ve enerji denklemlerinin çözümü olacaktır. Eğer problem el veriyorsa bir dizi kabul yapılarak (mesela izotermal akış) analitik çözümlerden faydalanılabilir. Analitik ifadelerle hızlı bir şekilde hesap yapılabilir, ancak bu bize yön gösterici bir çözüm verir. Böylece tasarıma başlangıçta fikir sahibi olunabilir. **(Michaeli, 2003)** ve **(Bird ve diğ., 1987)** kaynaklarında basit geometriler için analitik ifadeler çıkarılmıştır. Kalıp tasarımında diğer bir yöntem akışı karakterize eden denklemlerin nümerik yöntemlerle çözülmesidir. Günümüzde bir çok Newton tipi olmayan akışkanların akışı için kullanılan ticari SAD (Sayısal Akışkanlar Dinamiği) yazılımları vardır. Bu yazılımlarda yeterince reolojik model mevcuttur. Ayrıca kalıptan çıkan malzemenin serbest yüzey akışları bu yazılımlarda simüle edilebilmektedir. Bazılarında ise ters ekstrüzyon (inverse extrusion) adı verilen bir yöntemle yazılıma ürün geometrisini verip olması gereken kalıp geometrisini bulmak da mümkündür. Bu programlar gerçeğe çok yakın sonuç verebilmektedirler. Böylece masraflı ve zaman alıcı olan denemelerin sayısı azaltılmış olmaktadır. Bunun yanında sayısal deney diyebileceğimiz sayısal çözümlemelerle değişik parametrelerin kalıp tasarımına etkileri incelenebilmektedir.

Bu tez çalışmasında kalıp içerisindeki eriyik akışı incelenecektir. Bu maksatla öncelikle tez çalışmasının amacından kısaca bahsedilecek, daha sonra plastiğin, genel özelliklerine ve kullanım alanlarına değinilecektir. Üçüncü bölümde polimerin reolojik ve termodinamik özellikleri özellikle *Genelleştirilmiş Newton Tipi Akışkan Modeli* ayrıntılı bir şekilde ele alınacaktır. Viskoelastik özellikler ana hatları ile ele alınmıştır. Dördüncü bölümde Newton tipi olmayan akışkanlar için momentum ve enerji denklemleri verilerek basit geometriler için analitik ifadeler verilecektir.

Beşinci bölüm ise tez kapsamında yapılan deneylere ayrılmıştır. Analitik ifadelerle deneyler irdelenmiş, Polyflow 3.10.0 ticari yazılımı kullanılarak elde edilen sayısal simülasyon sonuçları deneylerle karşılaştırılmıştır. Son bölümde beşinci bölümdeki incelemeler yardımıyla varılan önemli tespitlere yer verilmiştir.

1.1. Tezin Amacı ve Kullanılan Yöntemler

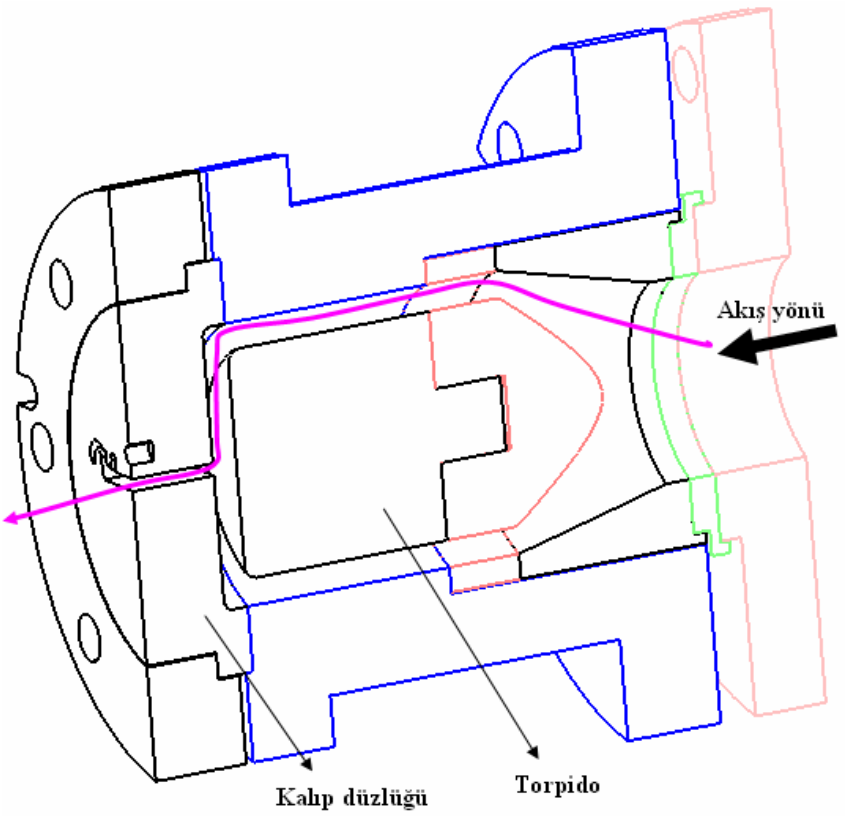
Bu tez çalışması Dizayn Teknik Plastik Boru ve Elemanları San. Tic. A.Ş. firmasıyla birlikte yürütülmüştür. Firmanın hedefi Şekil 1.1 'de görülen profilin üretimini HDPE kullanarak gerçekleştirmektir. Profil özel amaçlı olarak kullanılacaktır. Normalde firmada boru üretimi sürekli olarak gerçekleştirilmektedir. Bu yüzden bu ürünle ilgili yeterli deneyim mevcuttur. Zaten boru geometrik olarak eksenel simetriye sahip olduğundan akışın dengelenmesi gibi bir problemle karşılaşılmamaktadır.



Şekil 1.1: Üretilecek profil

Profil üretimine firmada nadiren ihtiyaç duyulmaktadır. Pratikte profil kalıp tasarımı yapılırken genel deneyimler çerçevesinde kalıpta ufak değişikliklerle deneme üretimi yapılmaktadır. Fakat bu çok zaman alıcı, deneyim gerektiren ve zahmetli bir iştir. Her zaman başarıya ulaşmak da mümkün olmamaktadır.

Firmada profil üretimi için kullanılan kafa resmi Şekil 1.2 'de görülmektedir. Kafa ekstrüder vidasından sonra gelmektedir. Pembe renkli ok akışkanın izlediği yolu göstermektedir. Bu çeşit kafa kullanımı kalıp tasarımını kolaylaştırmaktadır. Çünkü şekilde sadece *kalıp düzlüğü* olarak adlandırılmış plakaya istenen profil geometrisi işlenerek kalıp tasarımı tamamlanmaktadır. Şekil 1.2 'deki kafada torpido kullanımıyla kafa içerisinde ölü noktaların yani akışkanın durgun olduğu bölgelerin meydana gelmesinin engellenmesi amaçlanmıştır.



Şekil 1.2: Profil kalıplar için ekstrüder kafası

Şekil 1.1 'deki profilin kalıp düzlüğü boyunca kesiti değiştirilmeyerek bir kalıp imal edilmiş ve bu kalıptan çıkan üründe hız dağılımının dengeli olmadığı görülmüştür (Şekil 1.3). Sonrasında kalıp düzlüğü girişinde değişikliklere gidilerek akış hızının düşük olduğu bölgelerde kesit genişletilmiştir. Fakat yapılan denemelerde istenen başarıya ulaşılamamıştır.

Yaşanan bu problemlerin çözülebilmesi için kalıp içi akışına hakim olma gerektiği ortaya çıkmaktadır. Bu da akış alanının çözülmesiyle mümkün olacaktır. Yani kalıp içindeki hız, gerilme, basınç; izotermal olmayan akışlarda sıcaklık dağılımının bilinmesi gerekir. Bu da süreklilik, momentum ve enerji denklemlerinin çözülmesiyle mümkün olacaktır. Bu amaç doğrultusunda öncelikle Newton tipi olmayan akışkanlar için geçerli korunum denklemleri tanıtılmıştır. Daha sonra bu denklemlerin çözümü için gerekli olan polimerin reolojik ve termodinamik özellikleri incelenmiştir. Tez çalışmasının devamında, basit bir geometri olan dairesel kesit için Newton tipi olmayan akışkanlara ait bir çok kabulün yapıldığı debi ile basınç arasındaki ilişkiyi veren bir analitik ifade çıkarılmıştır. Bundan sonra farklı çap ve boydaki delikler için deneyler yapılmıştır. Analitik ifadelerle deney

sonuçlarının karşılaştırılması yapılmıştır. Deneylerin anlatıldığı Bölüm 5 ’te ayrıntılı olarak bu konu ele alınmaktadır.



Şekil 1.3: Şekil 1.1 ‘deki profile sahip ürünün kalıptan ilk çıkan kısmının soğuduktan sonra çekilmiş bir fotoğrafı

Momentum denklemlerindeki viskoz kuvvetlerin hesaplanabilmesi için polimerin reolojik özelliklerinin bilinmesi gerekir.

Hareket denklemleri ve enerji denklemi lineer olmayan kısmi diferansiyel denklemlerdir. Gerilme terimleri lineer olmadığı gibi viskoelastik özellikler de hesaba katılınca denklemler çok karmaşık matematiksel yapıda olmaktadır. Ayrıca izotermal olmayan akış söz konusu olduğunda enerji ve momentum denklemleri birbirini etkilediği için (coupled) çözüm analitik olarak iyice içinden çıkılmaz hale gelir. Bu yüzden az sayıdaki basit problem için analitik çözüm vardır **(Bird ve diğ., 1987)**. Sayılan sebeplerden dolayı karmaşık bir geometrideki akışı çözmek için sayısal çözüm yöntemlerine başvurmak kaçınılmaz olmaktadır.

Tez çalışmasında Newton tipi olmayan ve viskoelastik akışkanların akış analizi için tasarlanmış bir SAD programı olan POLYFLOW 3.10.0 kullanılmıştır. Polyflow sonlu elemanlar yöntemini kullanmaktadır. Bu ticari yazılım ile kalıp dışı serbest yüzey akışlarını da çözmek mümkündür. Ters ekstrüzyon yöntemi yardımıyla verilen ürün geometrisini üretebilmek için gerekli kalıp çıkış kesiti bulunabilmektedir, yani şişmeden kaynaklanan problemler bu şekilde çözülebilmektedir.

Deneyler Polyflow yardımıyla simüle edilecek ve sonuçlar karşılaştırılacaktır. Ayrıca hedef profil için simülasyonlar yapılacak ve kalıp çıkışında üniform hız dağılımı

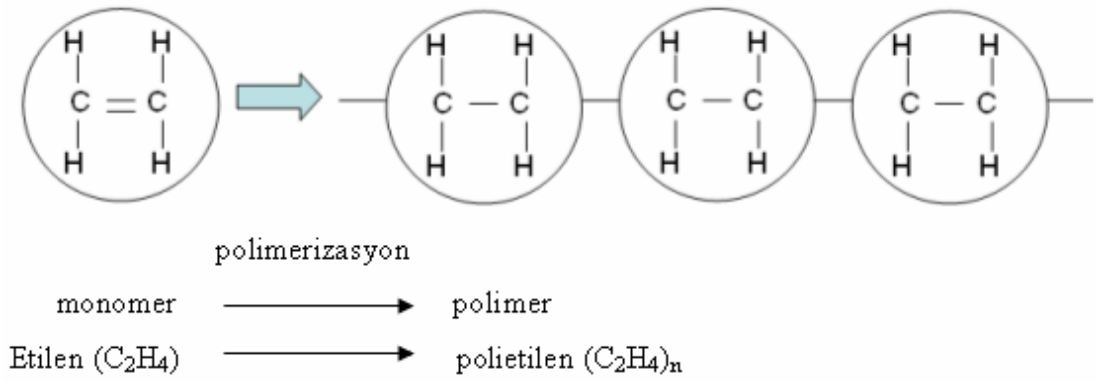
sağlamak için kalıp geometrisinde değişikliklere gidilerek sayısal simülasyonlarla kalıp tasarımı önerisinde bulunulacaktır.

2. PLASTİKLER

Plastikler yapay olarak üretilen polimerlerdir. Yani plastik malzemeler aynı zamanda polimer olarak adlandırılabilmektedirler.

2.1. Polimer

Polimer, en basit tanımıyla monomer denilen küçük moleküllerin birbirlerine eklenmesiyle oluşan uzun zincirli yani büyük molekül ağırlıklı bileşiklerdir. Yunanca mer parça, poli çok anlamına gelen kelimelerin birleşiminden polimer kelimesi türetilmiştir. Genelde polimerler reaktör denilen tesiste polimerizasyon yoluyla elde edilirler. Çoğunlukla yoğunlaşma polimerizasyonu ile elde edilen termoplastiklerin polimerizasyon işlemi reaktörde tamamen bitmiş olur. Merler Şekil 2.1 'deki gibi birbirlerine elektron paylaşımının olduğu kovalent bağla bağlanırlar.



Şekil 2.1: Polimer yapıya bir örnek: Polietilen (PE) **(Akyüz, 2001)**

2.1.1. Plastiklerin Özellikleri

Plastikler sonradan ortaya çıkan malzemeler olmalarına rağmen kullanımları çok yaygındır. Plastikler çok çeşitlidirler ve özellikleri çok geniş bir aralıkta değişebilmektedir. Aşağıda plastiklere ait genel özellikler verilmiştir:

-Yoğunlukları düşüktür,
-Kolay şekil verilebilir ve işlenebilirler,
-Katkı maddeleri ile özellikleri değiştirilebilir,

-Isı ve elektrik iletkenlikleri düşüktür,
-Saydamdırlar,
-Korozyona ve kimyasal maddelere karşı dayanıklıdırlar,
-Yeniden işlenebilirler.

Plastiklerin yoğunlukları 0.8 ile 2.2 g/cm^3 arasında değişebilir, böylelikle metallerden ve seramiklerden hafiftirler. Buna karşın mekanik mukavemetleri yüksektir. Hatta günümüzde çeşitli dolgu maddeleri kullanılarak metallerin bazılarından daha yüksek mukavemete sahip plastikler üretilmiştir **(Akyüz, 2001).**

İşleme sıcaklıkları düşük (genellikle 120 ile 320 °C arasında değişir) olduğundan üretim için harcanan enerji metal malzeme ile üretime göre daha azdır. Ayrıca büyük miktarlarda üretime müsaittirler ve son işleme gerek kalmadan karmaşık parçalar üretilebilir.

Katkı maddeleriyle plastik malzemelerin özellikleri değiştirilebilir. Bu katkı maddeleri :

-Ekonomik nedenlerle ilave edilen kalsit, mineral ve talaş vb. dolgu maddeleri,
-Plastik malzemelerin mekanik özelliklerini (çekme mukavemeti ve Plastiklik modülü gibi) değiştiren dolgu maddeleri,
-Malzemeleri boyamak için renk pigmentleri,
-Çalışma özellikleri ile mekanik özellikleri değiştirmek için katılan yumuşatıcılar,
-Plastiklerin bozunmalarını önlemek için katılan stabilizatörlerdir.

Plastiklerin ısı iletim katsayıları metallerin yaklaşık 300 de 1 'i kadardır. Bu da plastiklerin yalıtım malzemesi olarak kullanılmasını sağlamıştır. Ancak yüksek sıcaklıkta eriyik haldeyken soğuması için uzun sürelere ihtiyaç olması özellikle enjeksiyon kalıplarında önemli bir dezavantajıdır. Ekstrüzyon işleminde kalıp içerisinde polimer malzemeyi homojen sıcaklığa getirme problemi vardır. Bunun sonucu, kalıptan çıkan ürün boyutları etkilenmektedir. Ekstrüzyonda kalıptan çıkan ürünün üniform soğutulamamasından kaynaklanan farklı çekme oranları profilin istenen şekilde elde edilmesini engellemektedir.

Elektrik iletkenlikleri çok düşük olduğu için plastikler elektrik kablolarının kaplanmasında kullanılırlar.

Plastikler kimyasal maddelere karşı yüksek dirence sahiptirler. Atomik yapıları metallerden farklı olduğundan korozyondan onlar kadar etkilenmezler. Kimyasal olaylara olan dirençleri ev aletleri, otomobil parçaları, gıda ve kozmetik sanayiinde kullanılmalarının yolunu açmıştır **(Akyüz, 2001).**

Ayrıca plastik malzeme üretmek için harcanması gereken enerji metallere oranla oldukça azdır, bu % 25 'ten daha az mertebededir.

2.1.2. Plastiklerin Sınıflandırılması

Plastikler kimyasal yapılarına göre çapraz bağlı ve çapraz bağlı olmayan olmak üzere kabaca iki gruba ayrılabilirler (Şekil 2.2 ve Tablo 2.1).

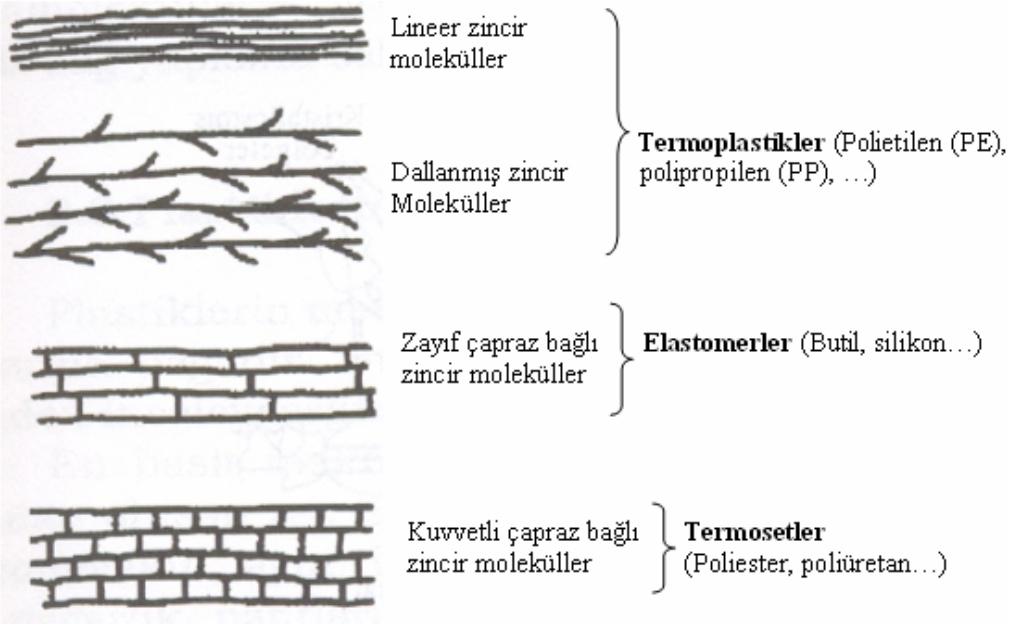
Tablo 2.1: Plastiklerin sınıflandırılması

Plastikler			
Çapraz bağlı olmayanlar		Çapraz bağlılar	
Amorf (şekilsiz)	Yarı kristal	Zayıf çapraz bağlı	Kuvvetli çapraz bağlı

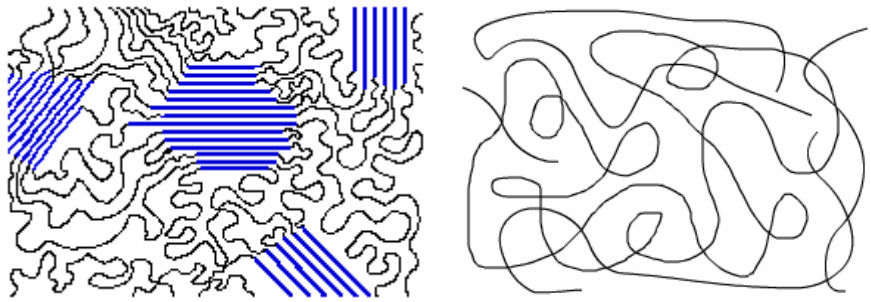
Termoplastikler çapraz bağlı değillerdir, buna karşılık termosetler ve elastomerler ise çapraz bağlıdırlar. Plastikler doğrusal veya dallanmış makromoleküllerden oluşurlar (Şekil 2.3). Termoplastiklerin makromolekülleri arasında kimyasal bağ olmadığından tekrar işlenebilirler.

Termoplastikler makromoleküllerin dizilişine göre amorf ve yarı kristal olarak da sınıflandırılabilirler. Amorf malzemelerde makromoleküllerin dizilişi rastgeledir. Yarı kristal plastiklerde ise bazı bölgelerde moleküller düzgün dizilmişlerdir (Şekil 2.3). Kristalleşmiş bölgeler mavi çizgilerle gösterilmiştir.

Çapraz bağlı plastikler termoplastikler gibi çok defa yeniden kullanılamazlar. Kimyasal reaksiyonlar sonucu makromoleküller arasında kimyasal bağlar oluştuğu için çapraz bağlı ismini almışlardır.



Şekil 2.2: Plastik moleküllerinin dizilişi **(Akyüz, 2001)**



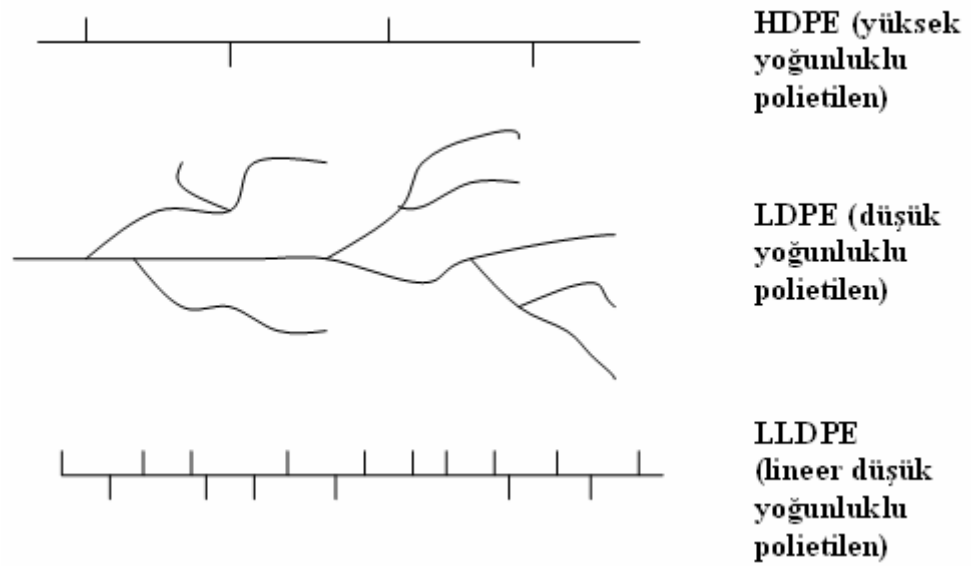
Şekil 2.3: Yarı kristal (soldaki) ve amorf (sağdaki) termoplastiklerin moleküler yapıları

Şekil 2.4 'te bu tez deneylerinde kullanılan polietilen (PE) malzemeye ait farklı molekül yapıları görülmektedir.

Makromoleküller arasındaki çapraz bağ sayısı arttıkça malzeme daha sert ve kırılgan olur, şişme özelliği de azalır. Kuvvetli çapraz bağlı malzemelere termoset denir. **(Akyüz, 2001).**

2.2. Polimer İşleme Yöntemleri

Polimerler işlenirken ihtiyaca göre çok çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Bu tez kapsamında ise yalnızca polimer ekstrüzyonu üzerine çalışılmıştır. Bu yüzden burada yalnızca termoplastiklere (PE, PP, …) uygulanan işleme yöntemlerinden kısaca bahsedilecek ve ekstrüzyon işlemine daha fazla yer ayrılacaktır.



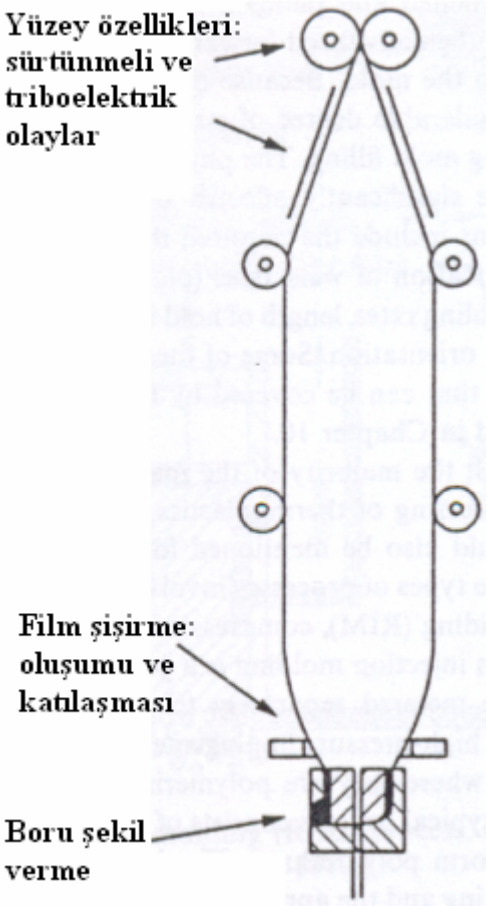
Şekil 2.4: Farklı polietilen tipleri

2.2.1. Kalıp Sonrası İşleme

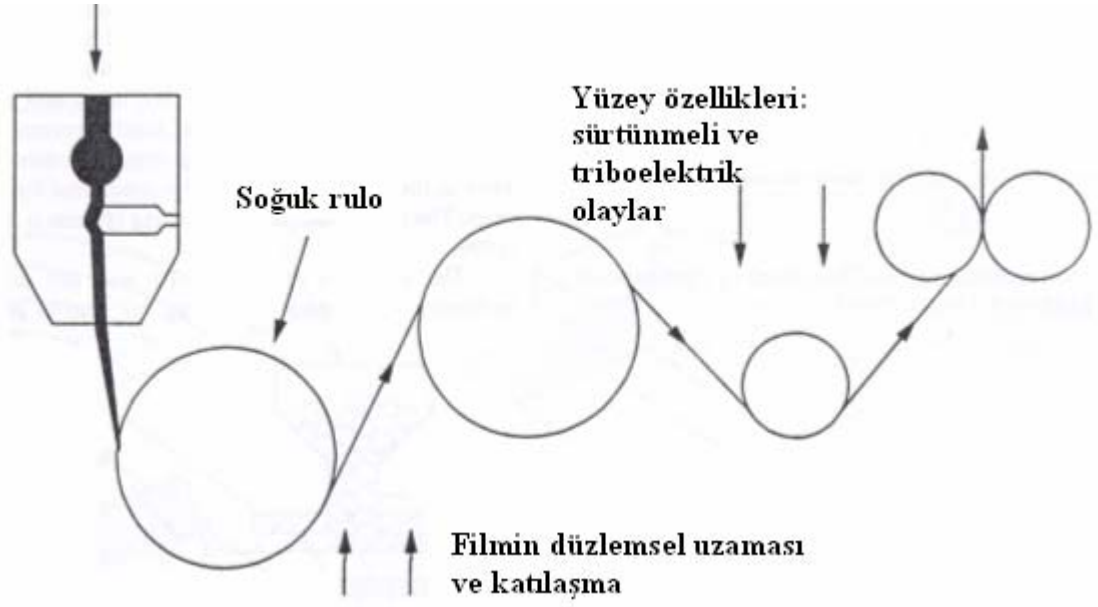
Film şişirme (film blowing) (Şekil 2.5), levha üretimi (sheet forming) (Şekil 2.6) ve lif üretimi (fiber spinning) (Şekil 2.7) bu işleme yöntemi içine girer. Bu işlemlerin ortak yanı serbest yüzeyli işlemler olmalarıdır. Ürünün ölçüsü (kalınlık, çap…) ve şekli eriyiğin reolojik özelliklerinden, kalıp ölçülerinden, soğuma şartlarından, (ekstrüzyon üretim hızına göre) çekme hızından etkilenir. Reolojik özelliklerdeki hafif değişimler bitmiş ürün lif veya filmin özelliklerinde bir çok değişikliklere neden olabilir **(Baird ve Collias, 1998)**.

2.2.2. Şekillendirme İşlemleri

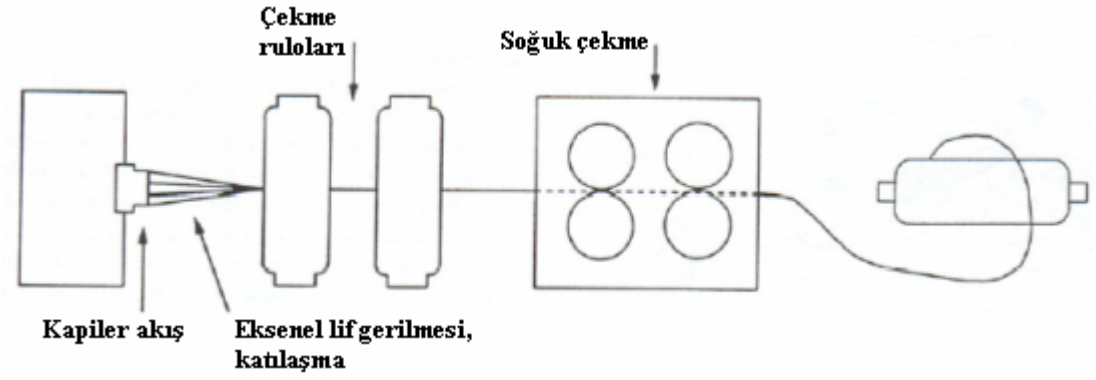
Şişirmeyle kalıplama (blow molding) (Şekil 2.8), ısıl şekillendirme (termoforming) (Şekil 2.9) ve basınçla kalıplama (compression molding) (Şekil 2.10) bu gruba girmektedir. Şişirmeyle kalıplama daha çok sıvıların konulacağı kapların yapımında kullanılır. Bu işlemde HDPE veya polietilen tereftalat (PET) gibi poliolefin grubu da kullanılır. Şişirmeyle kalıplamada: ekstrüderden veya enjeksiyon kalıbından çıkan malzeme hava ile şişirilir, böylece kalıp cidarına yapışması sağlanır ve bir süre sonra soğuk kalıp cidarında katılaşır.



Şekil 2.5: Film şişirme işlemi



Şekil 2.6: Düz film ve levha üretimi



Şekil 2.7: Lif üretimi

Isıl şekillendirmede ise polimer levha radyasyonla veya zorlanmış taşınımla camsı geçiş sıcaklığının veya kristal erime sıcaklığının biraz üzerine kadar ısıtılır, daha sonra erkek kalıpla dişi kalıba basılır veya vakumla dişi kalıba yapışması sağlanır.

Son olarak basınçla kalıplamada kalıp içindeki polimer malzeme ısıtılır, baskıyla kalıp hacminin boş yerlerine yayılması sağlanır. Böylece malzemeye arada kalan hacmin şekli verilmiş olur. **(Baird ve Collias, 1998)**

2.2.3. Enjeksiyon Üretim Yöntemi

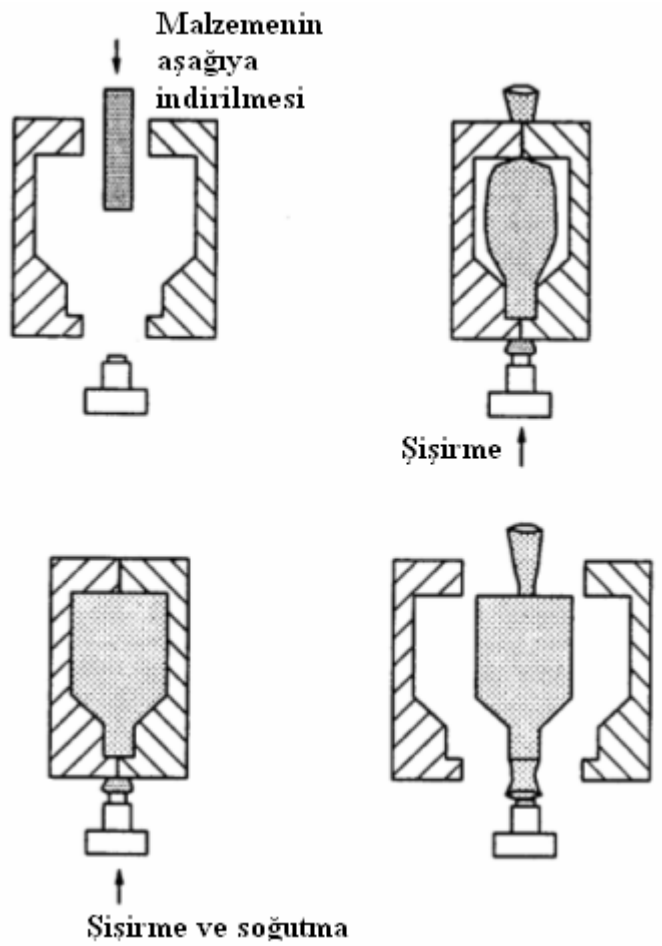
Enjeksiyonla üretimde (Şekil 2.11) polimer vidalı ekstrüderde eritilir ve kalıba basılır. Şekil değiştirmenin fazlaca meydana gelmesinden ve hızlı soğutmadan dolayı polimer eriyik kalıbı doldurana kadar yüksek miktarda moleküler yönlenmeye uğrar. Kalıptaki parçanın fiziksel özellikleri proses şartlarından çok etkilenir **(Baird ve Collias, 1998).**

2.2.4. Polimer Ekstrüzyonu

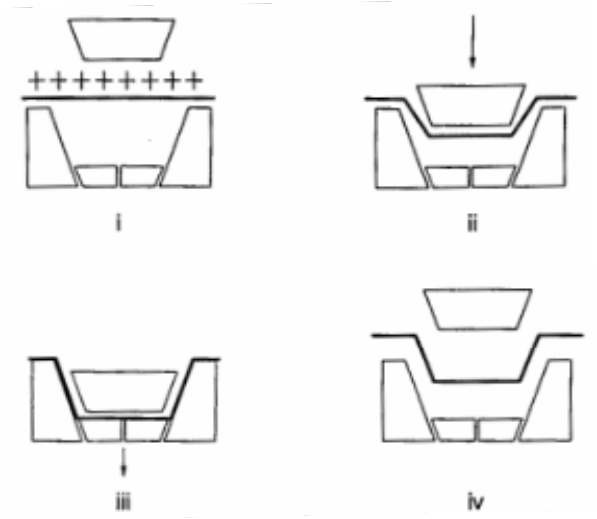
Ekstrüzyon sürekli üretim yöntemidir. Çünkü ekstrüderden malzeme çıkışı hiç durmamaktadır. Ancak arıza, bakım veya hammaddede değişiklik yapılması gibi durumlarda üretim durur. Mesela enjeksiyon yönteminde durum böyle değildir, vidalı ekstrüder enjeksiyon kalıbını doldurana kadar çalışır, sonra ürünün kalıptan alınması için bekleme konumuna geçer.

Ekstrüzyonda film, boru, profil, levha üretimi ile kablo kaplama gibi çok çeşitli işlemler yapılabilmektedir. Şekil 2.12 ‘de profil üretimi için bir ekstrüzyon hattı ve

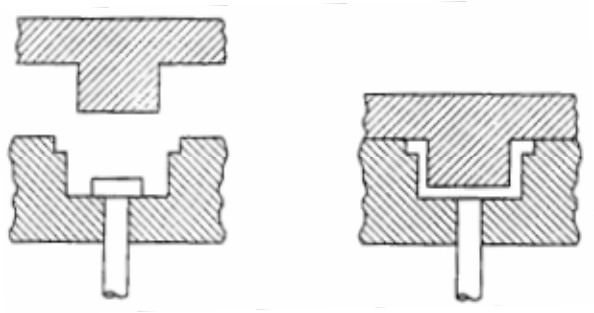
üniteleri görülmektedir. Bu tez çalışmasın da profil ekstrüzyonu üzerinde durulacaktır.



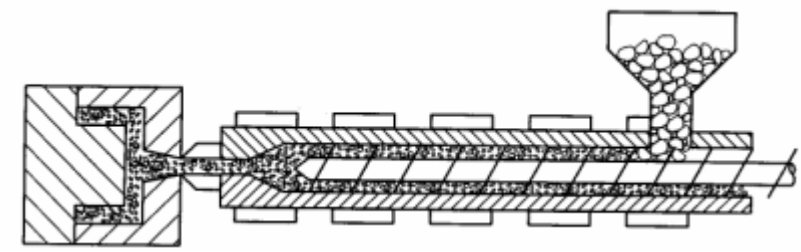
Şekil 2.8: Şişirmeyle kalıplama **(Baird ve Collias, 1998)**



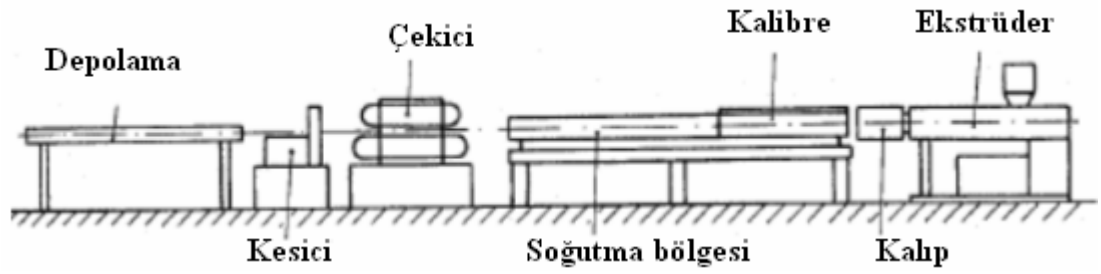
Şekil 2.9: Vakumla ısıl şekillendirme **(Baird ve Collias, 1998)**



Şekil 2.10: Basınçla kalıplama işlemi **(Baird ve Collias, 1998)**



Şekil 2.11: Genel enjeksiyon ünitesi **(Baird ve Collias, 1998)**



Şekil 2.12: Profil üretimi için ekstrüzyon hattı

Genel olarak bir ekstrüzyon hattı şekilde görüldüğü gibi ekstrüderden önce bir besleme ünitesi, ekstrüder, kalıp, kalibre, soğutma ünitesi, çekici, kesici ve depolama ünitesinden oluşur.

Besleme ünitesi granül haldeki polimer hammaddeyi (Şekil 2.13) ekstrüder vidasına iletir.

Ekstrüder vidası granülleri eriterek kalıba doğru basar. Kalıp ürünün şeklini belirleyecek profile sahiptir ve ekstrüderin çıkışına bağlanır. Kalıptan çıkan malzeme kısa bir mesafe havada ilerledikten sonra kalibreye girer. Kalibre hem soğutma görevi görür, hem de yarı bitmiş ürünü dış cidarından vakumla kalibre iç

cidarına çekerek son şeklini almasını sağlar. Ancak bu soğutma yeterli olmadığından kalibreden sonra ürün su püskürtmeli soğutmaya tabi tutulur. Bundan dolayı kalibre



Şekil 2.13: Renkli granüller

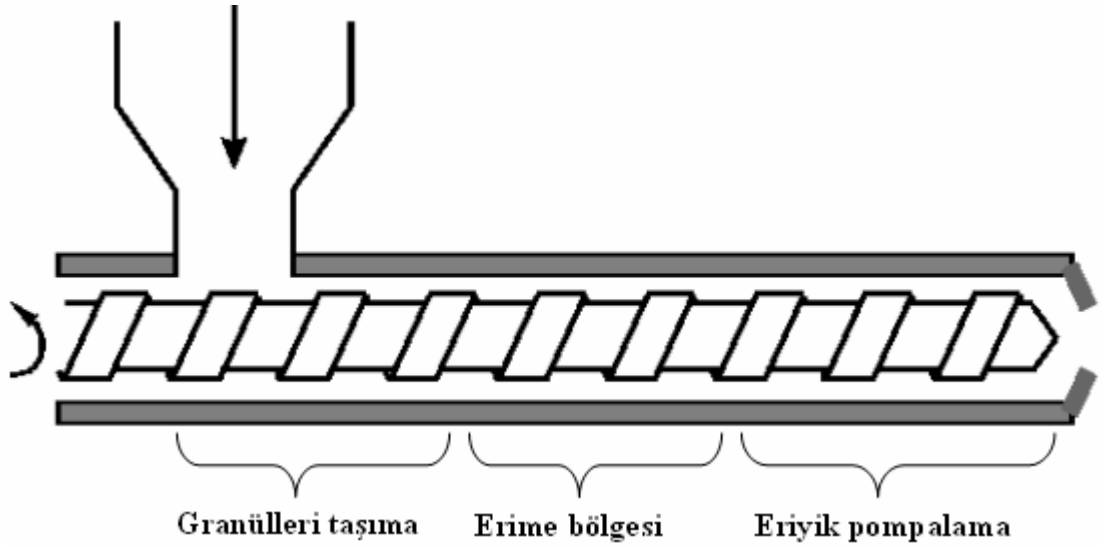
son ürün boyutlarından daha büyük dizayn edilir. Ekstrüzyon hattının devamında gerekliyse soğutmaya ürün, su kanalından geçirilerek devam edilir. Ekstrüderden çıkan polimer malzemenin yığılmasını önlemek için *çekici* ile belli bir hızda çekilir. Bazen ürün ölçülerini düşürmek için çekici, ekstrüzyon hızından biraz daha yüksek hızda çalışabilir. Nihayet oda sıcaklığına yaklaşan profil istenilen uzunlukta kesilir.

2.2.4.1. Ekstrüder Vidası

Ekstrüder vidası üç önemli bölgeye ayrılabilir (Şekil 2.14). Birinci bölgede granüller ileriye doğru taşınır, tanelerin kolay taşınabilmesi için katı kalması gerekir bu yüzden erimemesi gerekir. Halbuki vida çevresel olarak ısıtılmaktadır. Erimeyi önlemek için bu bölge soğutulmaktadır. Daha sonraki bölümde granüller erimeye başlar, bu bölgede vida kanal derinliği giderek küçülür. Son bölümde vida derinliği iyice azalmıştır ve bundan sonra eriyik sıkıştırılarak kalıba doğru pompalanır.

Aynı zamanda vida eriyiği karıştırma görevini de üstlenir. Polimer malzemenin ısı iletim kabiliyeti düşük olduğu için iyi karıştırılması gerekir, böylece sıcaklık dağılımının homojen olması sağlanabilecektir. Bu durum önemlidir, çünkü sıcaklıkla

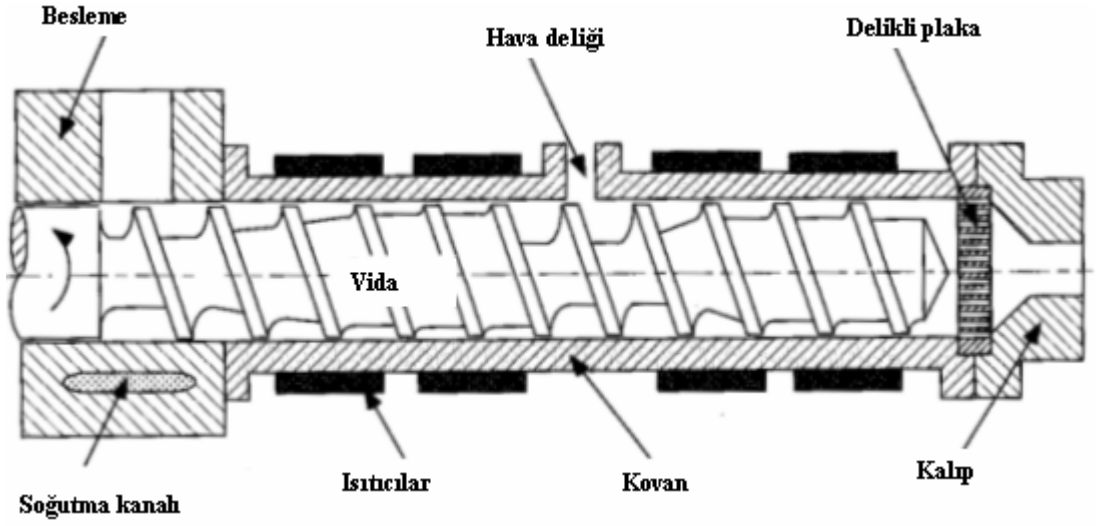
reolojik özellikler değişmektedir. Bu da çıkan ürün kalitesini etkilemektedir. Vidanın granülleri taşıma, polimer malzemeyi eritme, karıştırma ve malzemenin kalıptan çıkması için basınçlandırma şeklinde dört önemli görevi vardır.



Şekil 2.14: Ekstrüder vidası

Vidanın boy çap oranı 20 ile 24 arasında değişir, vida çapı 1,25 cm ile 50 cm arasında olabilir **(Baird ve Collias, 1998).**

Polimer eriyik içinde kalan havanın dışarıya atılması için kovanda hava deliği bulunmaktadır (Şekil 2.15). Şekilde görülen delikli plaka, vida ile arasındaki eriyiğin basıncını arttırarak moleküllerin birbirine iyice kaynamasını sağlar ve vidadan dönel hareket yaparak gelen eriyiğin ekstrüzyon doğrultusunda yönlenmesini sağlar.



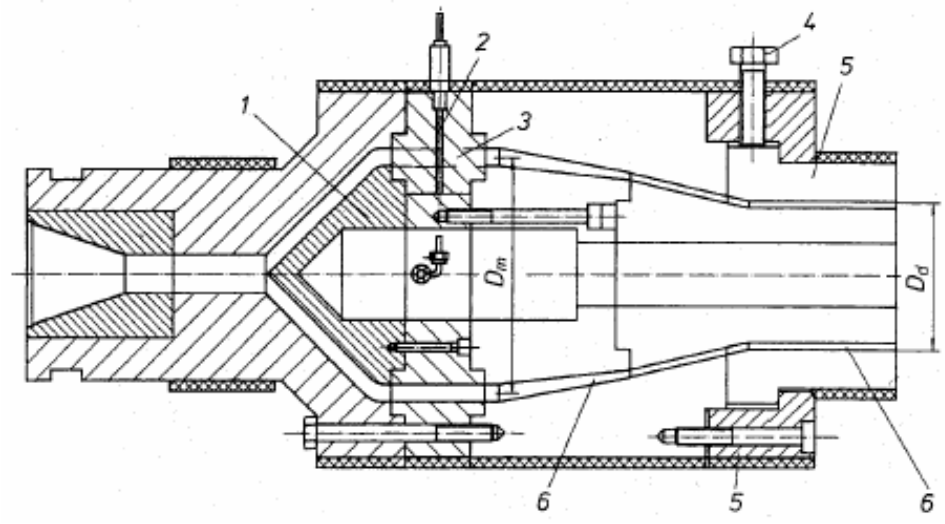
Şekil 2.15: Ekstrüder vidası, kalıp ve delikli plaka

2.2.4.2. Kalıp ve Kalibre

Kalıp, çıkış kesiti vasıtasıyla malzemeye şekil veren kısımdır. Kalıp ürüne göre çeşitlilik göstermektedir. Boru (Şekil 2.16), profil, film, levha ekstrüzyonu gibi işlemler için kalıplar üretilmektedir. Kalıp ölçüleri ürünün nihai ölçülerinde olamaz. Çünkü kalıp çıkışında şişme olur; daha sonraki aşamada eriyik halde çıkan polimer oda sıcaklığına kadar soğur. Çekici tarafından ekstrüzyon hızına göre çoğu zaman daha hızlı çekilen malzemenin ölçülerinde değişmeler olur. Tüm bu etkenler göz önüne alınarak kalıp dizaynı ona göre yapılmalıdır.

Kalıp dizaynında bazı hususlara dikkat etmek gerekir; kalıp içerisinde ölü noktalar oluşmaması için keskin köşelerden kaçınılır. Bunun yerine bu kısımlar yuvarlatılır. Aksi halde yüksek sıcaklıkta uzun süre kalan malzeme özelliklerini kaybeder yani bozulur, siyah bir renk alır

Şekil 2.16 ‘daki merkezleme cıvatası boru et kalınlığının ayarlanması için kullanılır. Buna pratikte sente ayarı denir. Yine aynı şekilde mandreli destekleyen örümcek ayakları Şekil 2.17 ‘de daha net görülmektedir.

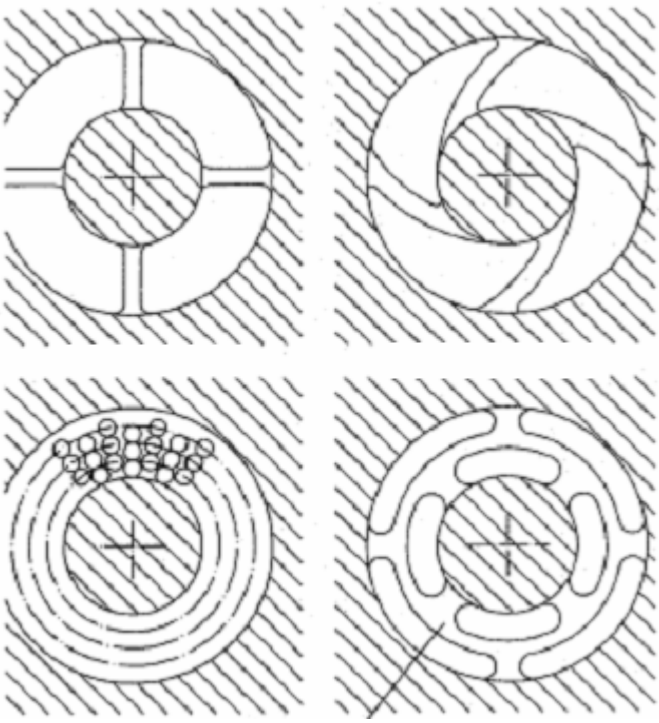


Şekil 2.16: Boru kalıbı (1.Mandrel, 2.Hava deliği, 3.Örümcek ayağı, 4.Merkezleme cıvatası, 5.Kalıp halkası, 6.Gevşeme bölgesi)

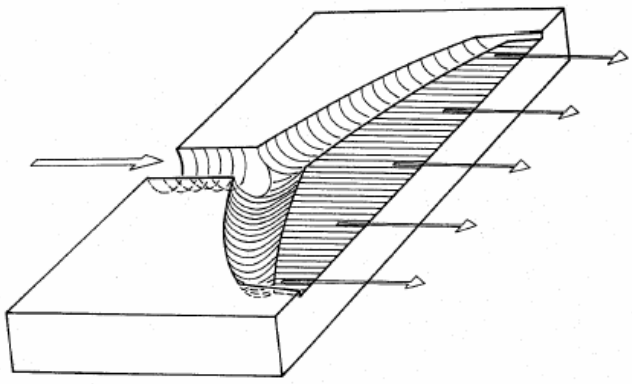
Şekil 2.16 ‘da 2 numaralı hava deliği boru profilinin iç kısmının dışarıyla bağlantısını sağlayarak iç-dış basınç dengesini sağlar, böylece boruda büzülme meydana gelmez.

Şekil 2.18 ‘de film veya levha üretimi için kullanılan bir kalıp çeşidi görülmektedir.

Şekil 2.19 ‘da ise kablo kaplamada kullanılan bir kalıp görülmektedir.

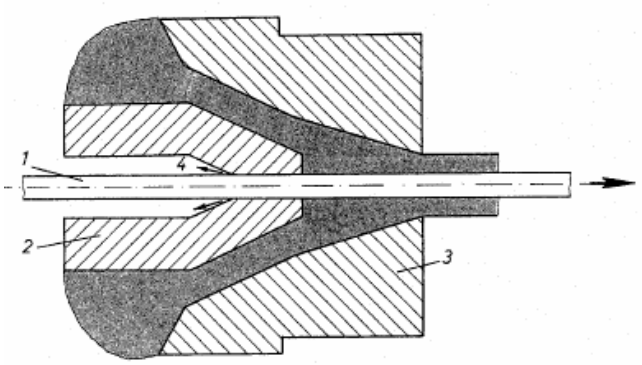


Şekil 2.17: Mandreli desteklemek için örümcek ayak çeşitleri **(Michaeli, 2003).**

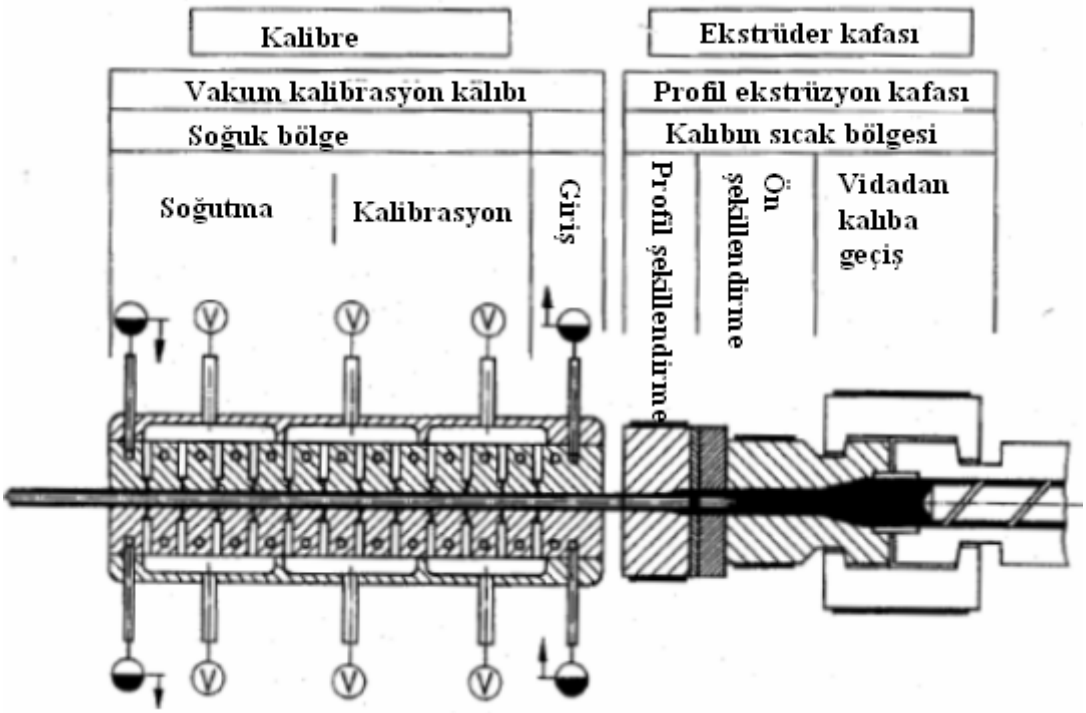


Şekil 2.18: Film ve levha üretimi için askı tip kalıp

Kalibre (ölçülendirme kalıbı) kalıptan eriyik halde gelen malzemeyi soğutarak sıcaklığını erime noktasının altına kadar düşürür ve katılaştırır. Bunun yanı sıra yarı bitmiş ürünün şekilsel rijitliğini de dıştan vakumlama, içten vakumlama, sürtünmeyle vakumlama vb. gibi yöntemlerle sağlar. Uzun kalibreler ürünün ölçülerindeki küçülmeden dolayı konik yapılırlar. Şekil 2.20 ‘de kalıp-kalibre çifti görülüyor.



Şekil 2.19: Kablo kaplama kalıbı (1.Kablo, 2.Torpido, 3.Kalıp gövdesi, 4.Vakum (gerekli olduğu halde))



Şekil 2.20: Kalıp ve kalibrenin işlevsel kısımları **(Michaeli, 2003).**

Yarı bitmiş ürünün boyutlarını kalıp ve kalibre belirlemektedir. Kalıp ve kalibre dizaynında reolojik, termodinamik ve imalat ve hatta çalışma şartları (üretim hızı, kalıp sıcaklığı, çekme hızı v.b.) göz önünde bulundurulmalıdır **(Michaeli, 2003).**

Ekstrüzyon hızı (üretim hızı) kalıp dizaynı ile ekstrüder vidasına bağlıdır. Bunun yanında polimer eriyiğin ısı iletimi düşük olduğu için kalibrenin ve diğer soğutma sistemlerinin soğutma kapasitesi de önemlidir. Ekstrüzyon hızının mümkün olduğunca yüksek olabilmesi için, kalibre en az sürtünmeyle ve en yüksek ısı çekme kapasitesiyle ürünü soğutmalıdır **(Michaeli, 2003).**

2.3. Ekstrüzyonda Karşılaşılan Problemler

Önceki kısımlarda da bahsedildiği gibi,

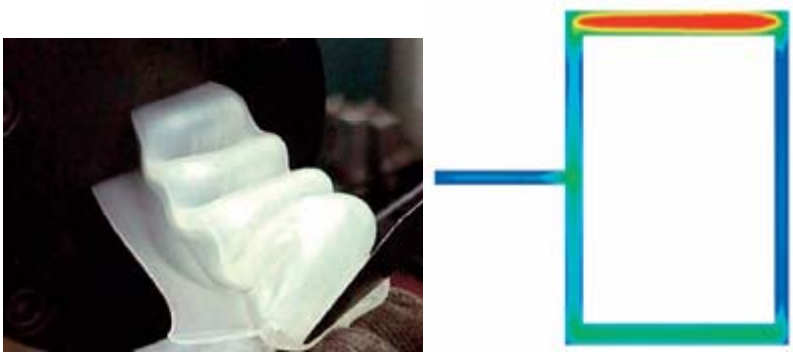
-kalıp dizaynında kalıp içerisinde durma noktalarından kaçınılmalı, bunun yerine köşeler yuvarlatılmış olmalı,
-ani kesit değişimleri yerine açılı bir şekilde kesit değişimleri yapılmalı,
-eriyiğin kalıptan geçme süresi kısa olmalı.

Böylece eriyiğin uzun süre yüksek sıcaklığa maruz kalmasından kaynaklanan degredasyon (bozulma) ortadan kalkar.

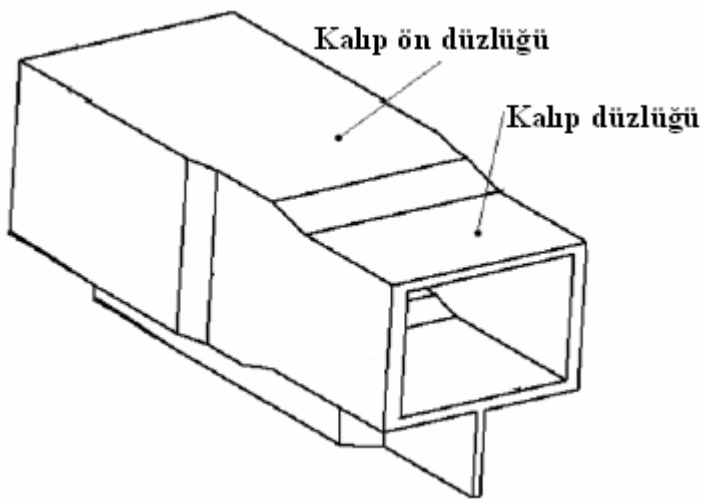
Buna ek olarak tezin konusu olan akışın dengelenmesi ve şişme problemleri ile malzemenin kalıptan düzensiz şekilde çıkması (melt fracture) olayları vardır.

2.3.1. Akışın Dengelenmesi

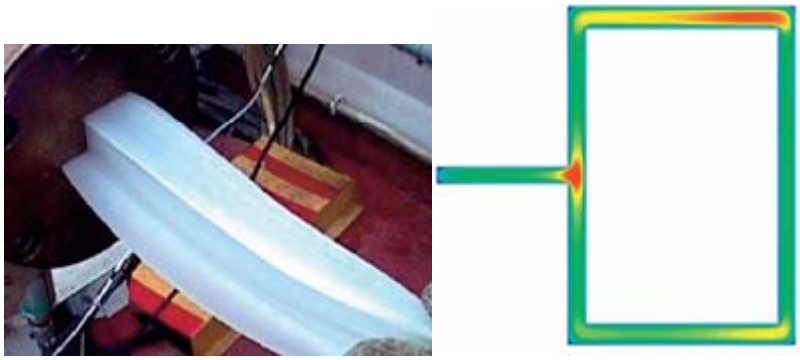
Profil ekstrüzyonunda kalıp çıkış kesitinin her yerinde hızın aynı veya yakın değerlerde olmasını sağlamak çok önemlidir. Buna *akış dengelemesi* adı verilir ve başarılamadığı zaman Şekil 2.21 'de görüldüğü gibi malzeme düzensiz çıkmaktadır. Çünkü kalıp çıkış kesitinden hızlı çıkan malzemeye yavaş çıkan ayak uyduramayınca yüksek hızlı malzeme katlanmaya başlar. Örnek olarak Şekil 2.21 'deki profilin kalıbı dolduran eriyik hacmi Şekil 2.22 'de görülmektedir. Bu problemi ortadan kaldırmak için Şekil 2.22 'de görülen farklı L uzunluklarında, kalıp arka kesitlerinde veya kanal geçiş açılarında değişikliklere gidilir. Bu başarıldığı taktirde Şekil 2.23 'teki gibi düzgün ürün çıkışı sağlanabilir.



Şekil 2.21: Akışın dengelenmemiş olduğu kalıptan çıkan malzeme ve kesitteki hız dağılımı **(Nóbrega ve diğ., 2004)**



Şekil 2.22: Şekil 2.21 'deki profilin kalıp geometrisini dolduran eriyik hacmi **(Nóbrega ve diğ., 2004)**

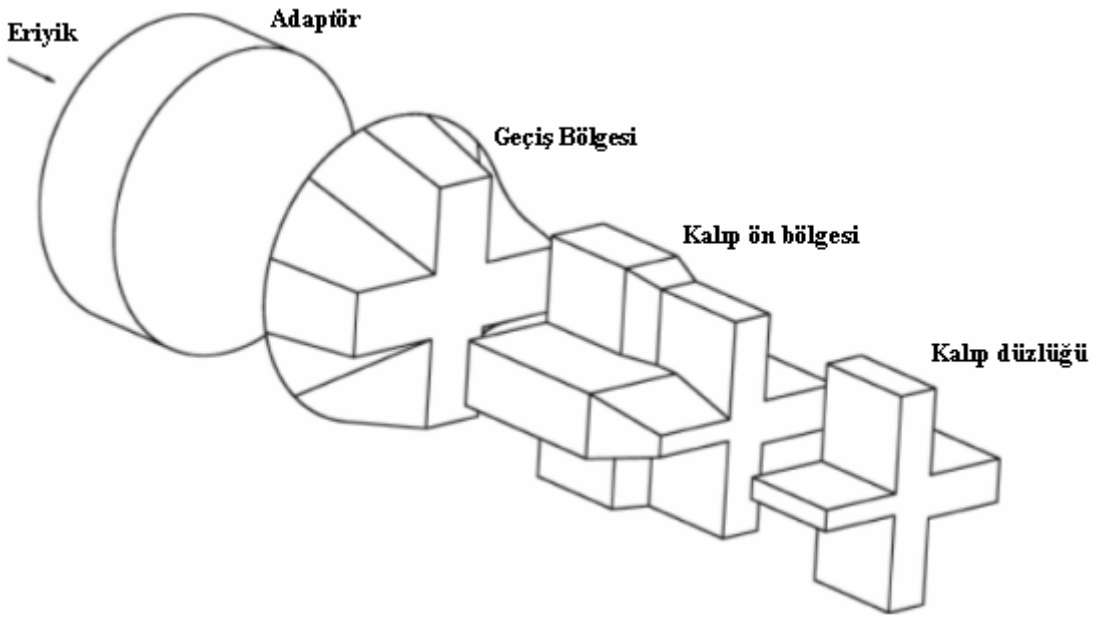


Şekil 2.23: Şekil 2.22 'deki kalıp çıkışında hız dağılımı dengelendikten sonraki çıkan ürün **(Nóbrega ve diğ., 2004)**

Şekil 2.24 'te akışı dengelemek için kalıp ön bölgesindeki kanal uzunlukları ve geçiş açılarını değiştirme yoluna gidilmiştir. Böylece profilin büyük kesitini besleyen kanalların akışa karşı direnci arttırılmış, kesiti küçük olanların direnci azaltılmıştır.

Bu çalışmaların yapılabilmesi için eriyiğin akış davranışlarının (reolojik) biliniyor olması gerekir. Böylece akışı karakterize eden denklemlerle (süreklilik, momentum ve enerji denklemleri) akış alanı çözülebilir. Bu konular sonraki ilgili bölümlerde işlenecektir.

Kalıp geometrilerinde el ile değişiklik yapmak zaman aldığı için yerine çeşitli optimizasyon yöntemleri **(Michaeli, 2003)** kullanılır.



Şekil 2.24: Akışın dengelenmiş olduğu kalıp iç geometrisi **(Carneiro ve diğ., 2001)**

Bölüm 5 ’te basit geometriler (dairesel, dikdörtgen, halka) için bir çok basitleştirmeden sonra elde edilen analitik ifadeler verilmektedir. Çekilecek profil basit geometrilere bölündükten sonra, her bir geometride ortalama hız eşit olacak şekilde kanal uzunlukları hesaplanabilir. Bunun bir örneği Şekil 2.25 ‘te görülmektedir. Burada kalıp dikdörtgenle daireye bölünebilir. Basitleştirmelerden kaynaklanan hatalardan dolayı bu bize ancak yaklaşık çözüm verebilir. Şekil 2.25 ‘deki durumda dairesel kanal ile dikdörtgen kanal arasında akışkan geçişi olacaktır.

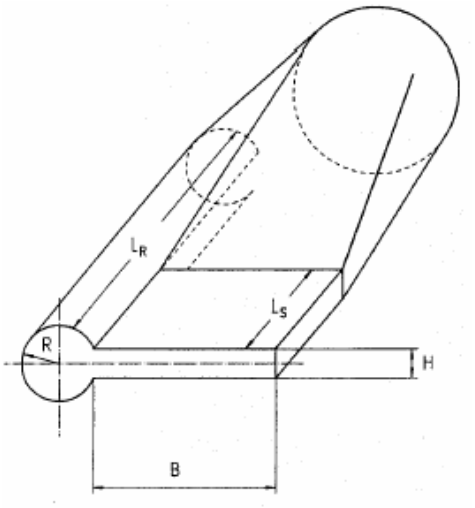
Boru ekstrüzyonunda ise akışın dengelenmesi problemi yoktur. Çünkü boru simetriktir ve kesiti değişmez, sabittir. Problem pencere profilleri gibi simetrik olmayan geometrilerde ortaya çıkmaktadır.

2.3.2. Şişme (Die swell)

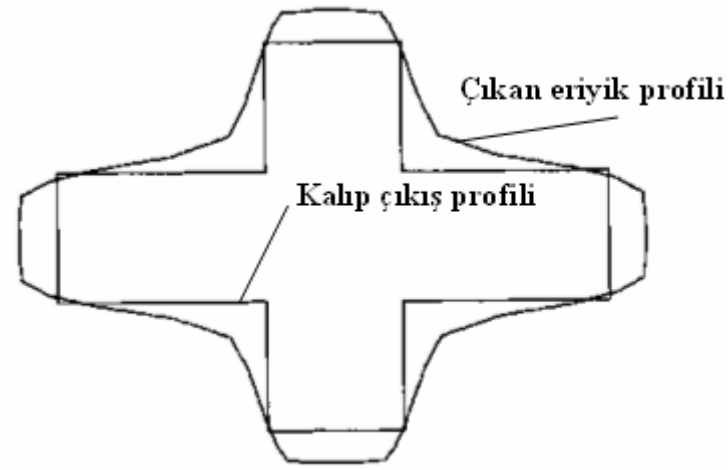
Polimer eriyikler kalıp çıkışında belli miktarlarda şişerler; yani malzeme, kalıp çıkış kesitinden farklı bir profile sahip olarak çıkar (Şekil 2.26). Dairesel kesitlerde ise çapta büyüme olur (Şekil 2.27).

Şişme olayına büyük oranda polimerin elastik özelliği sebep olmaktadır. Polimer molekülleri su, gaz gibi maddelerden farklı olarak çok uzun zincirli, bazen dallanmış molekül yapısına sahiptirler (Şekil 2.28). Akış yokken bu moleküller birbirlerine

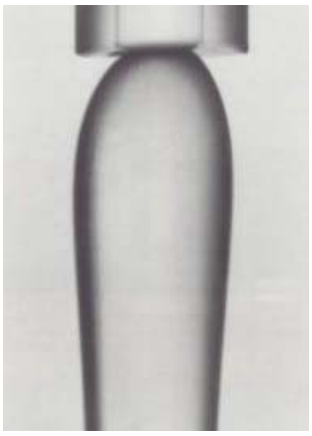
dolanmış durumdadırlar. Eriyik Şekil 2.29 ‘daki gibi dar bir kanala girerken moleküller akış doğrultusunda çekme gerilmesine maruz kalırlar ve dar kanal içinde ilerlerken kayma gerilmesine maruz kaldıklarından moleküller Şekil 2.28 ’deki gibi yönlenirler. Daha sonra kalıptan çıkan moleküllere etkiyen gerilmeler ortadan kalkınca elastik enerjiden ötürü molekül zincirleri tekrar eski karmaşık yapılarına dönmek isterler , böylece eriyik akış yönüne dik genişlemiş olur, yani şişer ve akış doğrultusundaki hız azalmış olur. Gerilme gevşemesi adı verilen bu



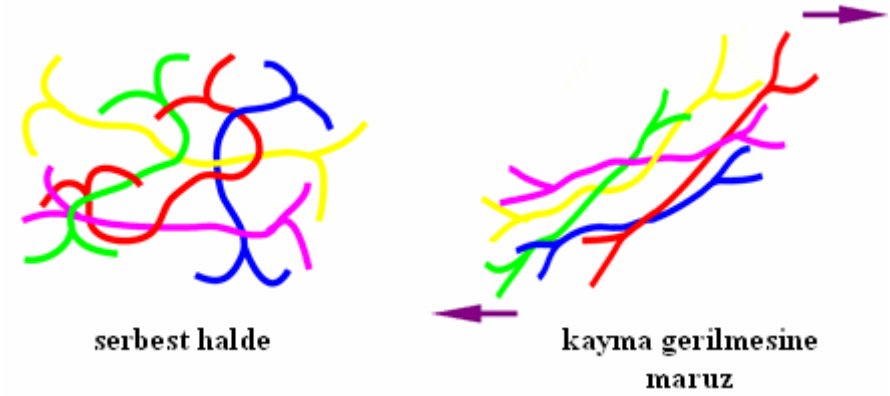
Şekil 2.25: Kanal uzunlukları akışı dengelemek için ayarlanmış profil kalıbı **(Michaeli, 2003)**



Şekil 2.26: Profil ekstrüzyonunda kalıp çıkışında şişme **(Gifford, 2003)**

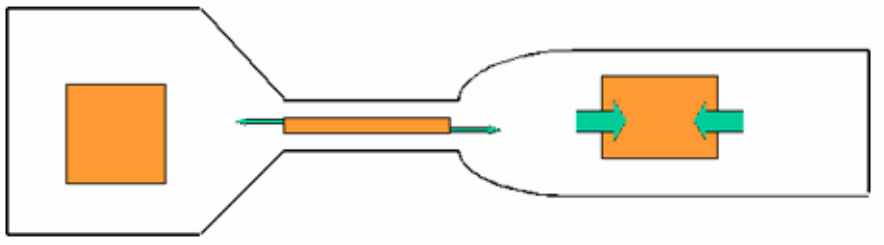


Şekil 2.27: Dairesel kesit çıkışında şişme



Şekil 2.28: Polimer molekülleri

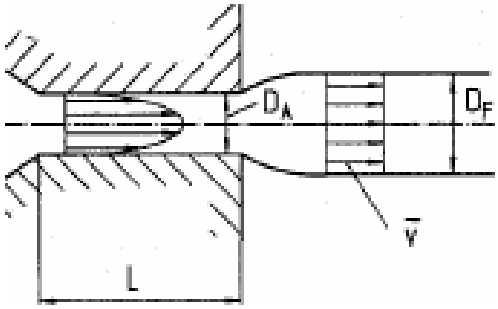
olay zamana bağlıdır. Yani dar kanaldan geçen moleküller zamanla eski dolaşmış yapılarına dönerler. Bundan dolayı dar kanal uzadıkça eriyik çıkışta daha az şişecektir. Bu olay da polimerin viskoelastik özelliklerinden kaynaklanmaktadır; yani polimerler akışkanlar gibi viskoz, katılar gibi esnektirler, ikisinin arasında özellikler gösterirler.



Şekil 2.29: Kalıptan çıkarken viskoelastik eriyiğin şişmesi

Şişme olayı sadece viskoelastik akışkanlarda görülen bir olay değildir, elastik olmayan viskoz akışkanlarda da görülür. Şekil 2.30 'da görüldüğü gibi kalıptayken

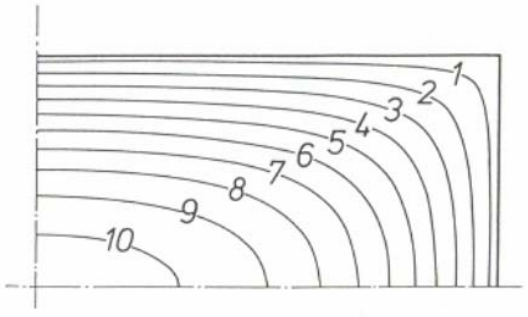
cidarda sıfır, merkezde maksimum hıza sahip akışkan, kalıptan çıkınca üniform hız profiline sahip olur, bundan dolayı şişme meydana gelir.



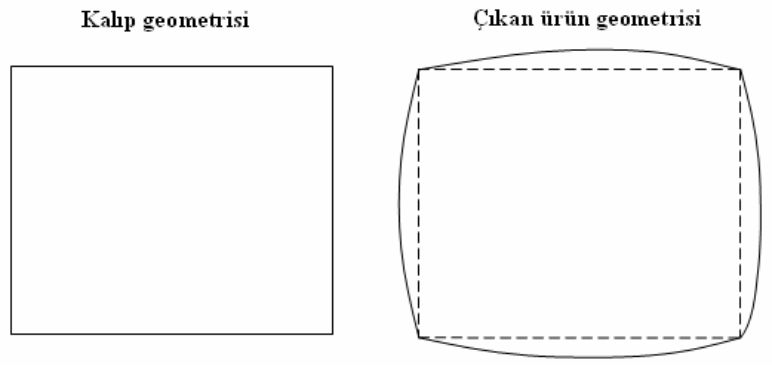
Şekil 2.30: Hız profilinin çıkışta yeniden düzenlenmesi **(Michaeli, 2003)**

Şişme olayının önemli problemlerinden biri de profil çevresi boyunca üniform gerçekleşmemesidir. Bu durum profilde şekil bozukluğuna neden olur. Şekil 2.31 'de çeyrek bir dikdörtgen profilden çıkan akışkana ait eş hız eğrileri görülmektedir. Burada birim şekil değiştirme hızının kenarlarda yüksek, köşelerde ise düşük olduğu anlaşılmaktadır. Bundan dolayı kenarlarda şişme köşelere nazaran daha fazla olur (Şekil 2.32).

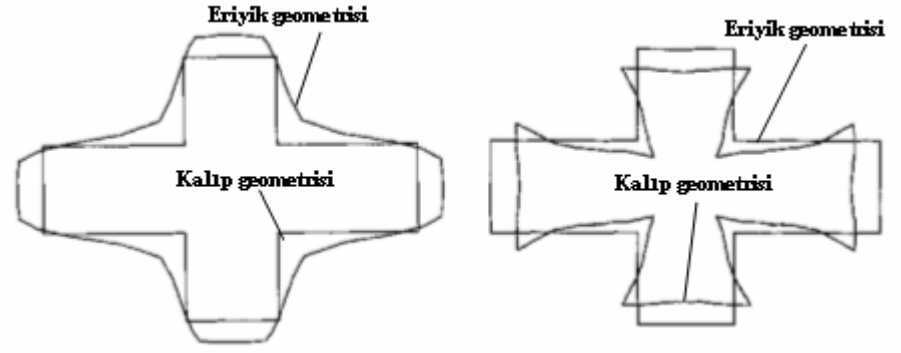
Şişme miktarı, Şekil 2.30 örnek olarak düşünülürse kalıp son düzlüğünün boyu ve eriyik sıcaklığı arttıkça azalır, cidardaki birim şekil değiştirme hızı arttıkça (veya debi arttıkça) artar.



Şekil 2.31: Çeyrek dikdörtgen kesitte hız alanı **(Michaeli, 2003)**



Şekil 2.32: Dikdörtgen kesitten çıkan eriyik geometrisi

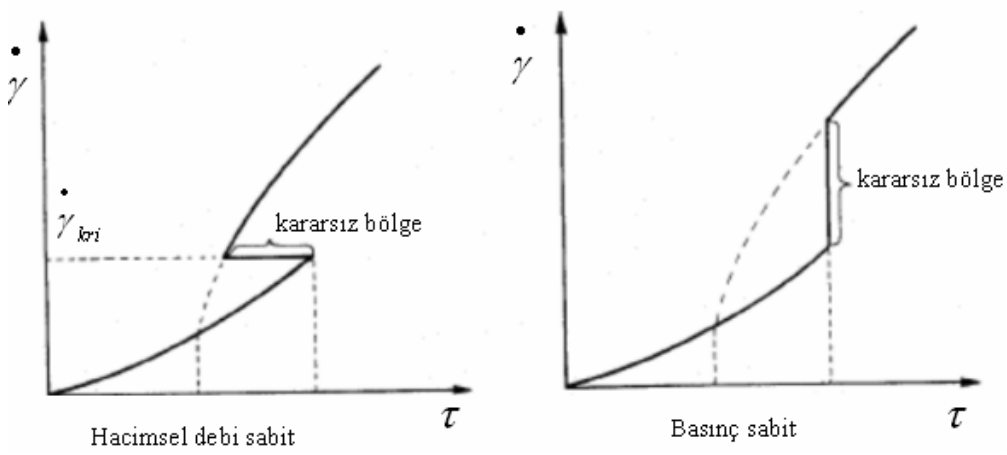


Şekil 2.33: İstenilen ürün geometrisini elde etmek için dizayn edilen kalıp **(Gifford, 2003)**

Ticari sayısal akışkanlar dinamiği (SAD) yazılımları kullanılarak polimer eriyiğin kalıp içerisinden ve havayla temas ettiği durumdaki (serbest yüzey) akışı simüle edilebilmektedir. Sonuçta kalıp çıkışında malzemenin nasıl bir şekil değişikliğine (deformasyona) uğradığı tespit edilebilmektedir (Şekil 2.26). Hatta ters ekstrüzyon yöntemi kullanılarak olması istenen ürün geometrisi verilip bunu sağlayacak kalıp geometrisi bulunabilmektedir (Şekil 2.33).

2.3.3. Kalıp Çıkışında Düzensiz Eriyik Akışı (Melt Fracture)

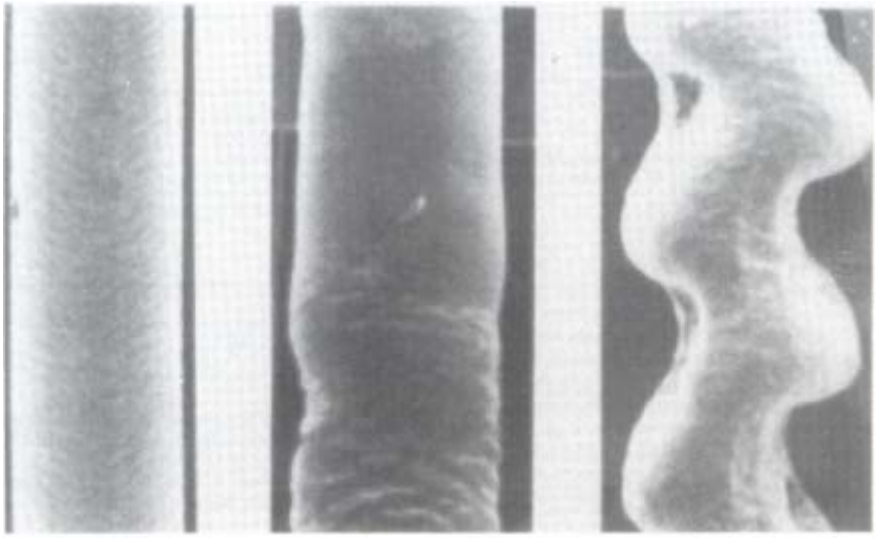
Akış davranışlarının öğrenilmesi için yapılan deneylerde özellikle HDPE için Q hacimsel debisi, belli bir değeri geçtikten sonra τ kayma gerilmesinde süreksiz değişimler olduğu görülmüştür veya sabit basınçta kayma gerilmesi belli bir değeri geçtikten sonra debide değişmeler olduğu görülmüştür. İki durumda da $\tau - \dot{\gamma}$ (Kayma gerilmesi – Şekil Değiştirme Hızı) eğrisinde süreksizlikler oluşur (Şekil 2.34).



Şekil 2.34: Kapiler reometrede karşılaşılan gerilme-şekil değiştirme hızı eğrisindeki kararsızlıklar **(Michaeli, 2003)**

Bu olay sonucu kalıptan çıkan ürün üzerinde periyodik olarak değişen düzensizlikler oluşur (Şekil 2.35).

Bu olaya eriyiğin elastik özellikleri açısından bakanlar da vardır. Buna göre geometri ve polimerin molekül yapısından dolayı akış sırasında belli bir kritik kayma gerilmesi veya şekil değiştirme hızını aştıktan sonra zincirli yapıya sahip moleküller daha fazla yönlenememektedirler. Bu olay akım çizgilerinde düzensizliklere yol açar, sonuçta bu olay ürüne yansır **(Michaeli, 2003).**



Şekil 2.35: Farklı $\dot{\gamma}_a$ "görünen şekil değiştirme hızlarında", kapilerden çıkan HDPE eriyikleri. Soldan sağa doğru $\dot{\gamma}_a$ değerleri 75, 75, 2250 s^{-1} ve bunlara karşılık τ_a değerleri 0.20, 0.27, 0.33 MPa 'dır. **(Baird ve Collias, 1998)**

3. POLİMER ERİYİKLERİN ÖZELLİKLERİ

Ekstrüzyon işleminde teorik hesaplama yapabilmek için polimerlerin reolojik ve termodinamik özelliklerinin bilinmesi gerekir. Reolojik özellikler malzemenin gerilme etkisinde nasıl şekil değiştireceği ile ilgilenir. Termodinamik özellikler ise ısı transferi problemlerinde, örneğin kalibrede soğutma olayını çözerken gereklidir.

3.1. Polimerlerin Reolojik Özellikleri

Polimerlerin akış karakterlerine giriş yapmadan evvel reolojiden kısaca bahsetmek yerinde olacaktır.

3.1.1. Reoloji

Reoloji, kuvvet etkisi altındaki maddelerin davranışlarını inceleyen bilim dalıdır. Polimer eriyik akış alanını çözmek için süreklilik, momentum ve enerji denklemlerinin yanında reolojik ve termodinamik denklemlerin de bir arada kullanılması gerekir. Reoloji denklemi, akış hız alanı ile bunun sonucu oluşan gerilme alanı arasındaki ilişkiyi ifade eder.

Momentumun korunumu denklemini yazalım **(Baird ve Collias, 1998)**:

$$\underbrace{\rho \frac{D\vec{V}}{Dt}}_{\text{atalet kuvvetleri}} = \underbrace{\rho \vec{g}}_{\text{yer çekimi kuvveti}} - \underbrace{\nabla p}_{\text{basınç kuvvetleri}} + \underbrace{\nabla . \tau_{ij}}_{\text{viskoz kuvvetler (normal + kesme kuvvetleri)}} \qquad \textbf{(3.1)}$$

Denklemden görüldüğü gibi polimer eriyiğinin akışı esnasında dört kuvvet etki etmektedir. Bunlar atalet kuvvetleri (ekstrüzyon prosesinde diğer kuvvetlerin yanında önemsizdir), yer çekimi kuvveti, basınç kuvvetleri, viskoz kuvvetlerdir (sürtünmelerden kaynaklanan kayma gerilmeleri ve ani kesit değişimlerinden veya polimerin karmaşık zincirli yapısından kaynaklanan normal gerilmeler). Bu denklemi kartezyen koordinatlarda x, y, z doğrultuları için yazacak olursak;

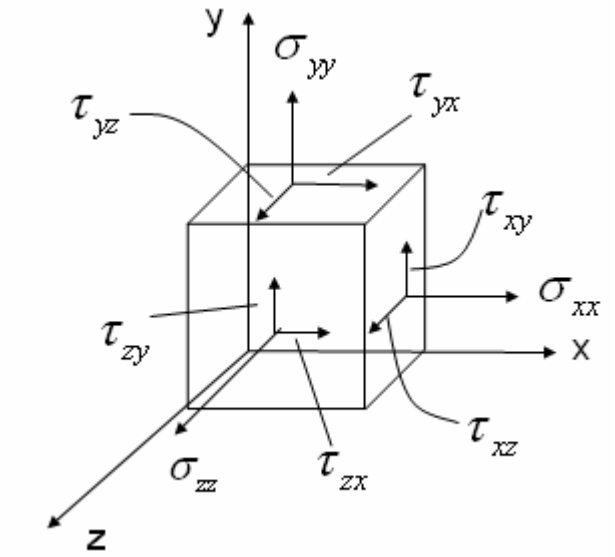
$$\rho\left(\frac{\partial v_x}{\partial t}+v_x\frac{\partial v_x}{\partial x}+v_y\frac{\partial v_x}{\partial y}+v_z\frac{\partial v_x}{\partial z}\right)=\rho g_x-\frac{\partial p}{\partial x}+\left(\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x}+\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y}+\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z}\right) \quad \textbf{(3.1a)}$$

$$\rho\left(\frac{\partial v_y}{\partial t}+v_x\frac{\partial v_y}{\partial x}+v_y\frac{\partial v_y}{\partial y}+v_z\frac{\partial v_y}{\partial z}\right)=\rho g_y-\frac{\partial p}{\partial y}+\left(\frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x}+\frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y}+\frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z}\right) \quad \textbf{(3.1b)}$$

$$\rho\left(\frac{\partial v_z}{\partial t}+v_x\frac{\partial v_z}{\partial x}+v_y\frac{\partial v_z}{\partial y}+v_z\frac{\partial v_z}{\partial z}\right)=\rho g_z-\frac{\partial p}{\partial z}+\left(\frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x}+\frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y}+\frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z}\right) \quad \textbf{(3.1c)}$$

Burada önemli olan hız alanı ile denklemlerin en sağındaki viskoz gerilmeler arasındaki ilişkiyi saptamaktır. Reoloji bu ilişkinin nasıl olduğuyla ilgilenir.

Şekil 3.1 ‘de sonsuz küçük akışkan elemanının maruz kaldığı viskoz gerilmeler gösterilmiştir.

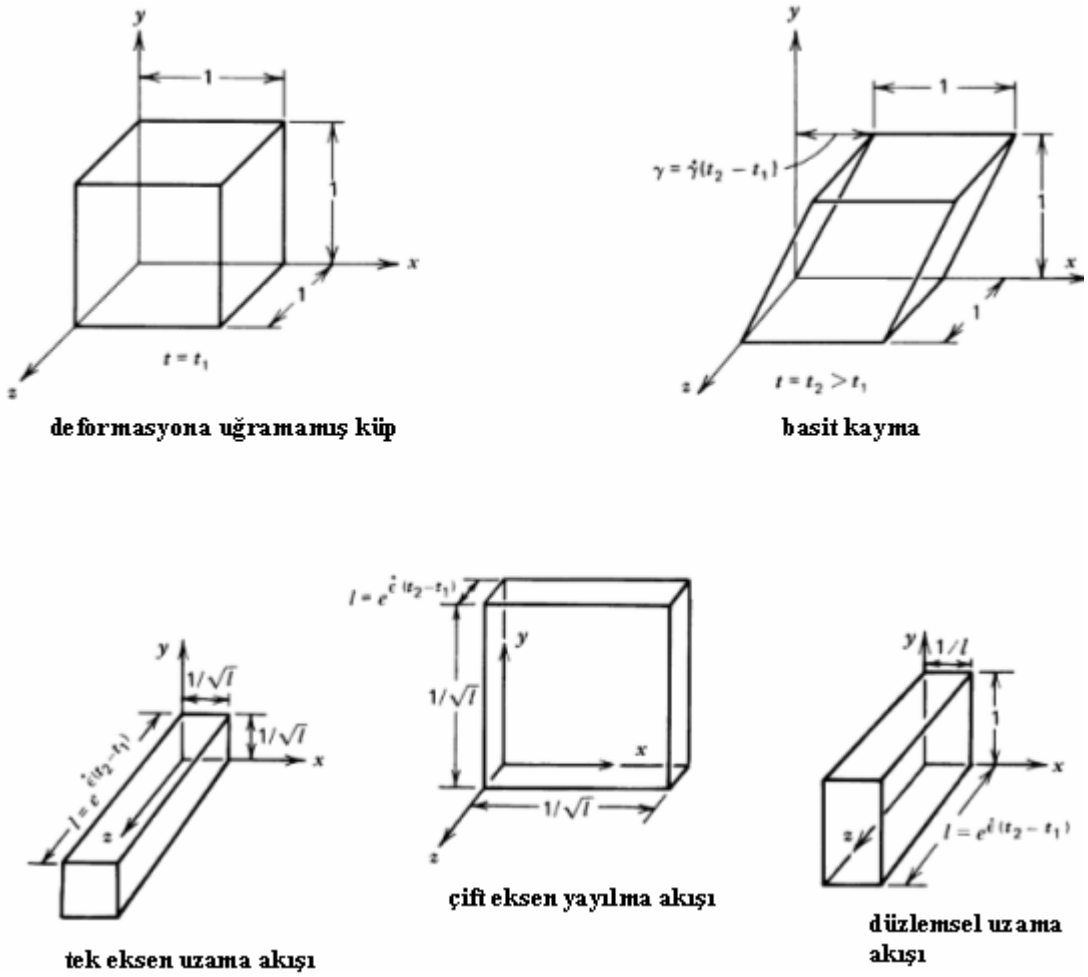


Şekil 3.1: Sonsuz küçük akışkan hacim elemanında viskoz gerilmeler

Buradan 9 elemanlı gerilme tensörünü yazalım:

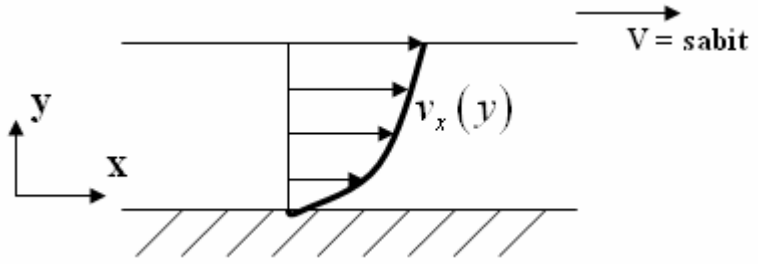
$$\tau_{ij}=\begin{bmatrix}\sigma_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz}\\ \tau_{yx} & \sigma_{yy} & \tau_{yz}\\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_{zz}\end{bmatrix} \quad \textbf{(3.2)}$$

Şekil 3.2 ‘de polimer işleme yöntemlerinde karşılaşılabilecek deformasyon tipleri görülmektedir.



Şekil 3.2: Birim hacim elemanı küpün maruz kaldığı deformasyon tipleri **(Bird ve diğ., 1987)**

Örnek:



Şekil 3.3: Tek boyutlu daimi rejimde tam gelişmiş akış

Şekil 3.3 'teki gibi akışta eğer akışkan su hava gibi Newton tipi bir akışkan ise, kayma gerilmesi, τ kayma şekil değiştirme hızı (shear rate) , $\dot{\gamma}$ ile doğru orantılıdır.

$$\tau \sim \frac{dv_x}{dy} \qquad \dot{\gamma} = \frac{dv_x}{dy} \tag{3.3}$$

Ancak polimer eriyiği gibi akışkanların büyük bir kısmında durum böyle değildir. Kayma gerilmesi ile kayma şekil değiştirme hızı arasındaki ilişki lineer olmadığı gibi örnekteki gibi bir akış olayında sabit bir hız profilinde kayma gerilmesi zamana bağlı olarak da değişebilir. Reoloji bu soruların cevabını aramaktadır.

$$\tau = f(\frac{dv_x}{dy}, t, ...) \qquad \textbf{(3.4)}$$

3.1.2. Polimerin Ana Akış Karakteristikleri

Gazlar ile su ve yağ gibi çoğu küçük moleküllü sıvı Newton tipi akışkandır. Kan, boya polimer gibi maddeler ideal elastik katı ile ideal viskoz akışkan özelliklerine sahiptirler **(Macosko, 1994).**

Polimer eriyiklerde Şekil 3.3 'teki gibi bir kayma akışında normal gerilmeler ortaya çıkar. Bunun nedeni polimerlerin karmaşık zincirli molekül yapıya sahip olmasıdır. Kayma gerilmesi nedeni ile moleküller akış doğrultusunda yönlenirler, bunun sonucu depolanan elastik enerji normal gerilmelere neden olur. Bu olay Şekil 3.4 'te rahatlıkla görülmektedir. Newton tipi akışkan merkezkaç kuvvetinin etkisiyle çubuktan hafifçe uzaklaşırken, polimer çözeltisi çubuğa tırmanmaktadır.

Polimerik akışkanlarda görülen başka bir olay Şekil 3.5 'teki gibi tüpsüz sifon olayıdır. Polimer molekülleri akım çizgisi boyunca yönlenirler ve akış doğrultusunda büyük gerilmeler ortaya çıkar. Bunun sonucunda sifon olayı gerçekleşir **(Bird ve diğ., 1987).**

Polimer eriyiklerin uzama viskoziteleri kayma viskozitelerine göre oldukça fazladır. Ayrıca uzama viskozitesi uzama hızıyla artmakta, kayma viskozitesi ise kayma şekil değiştirme hızıyla azalmaktadır. Bunun dışında polimer eriyiğin reolojik özellikleri zamana da bağlıdır.

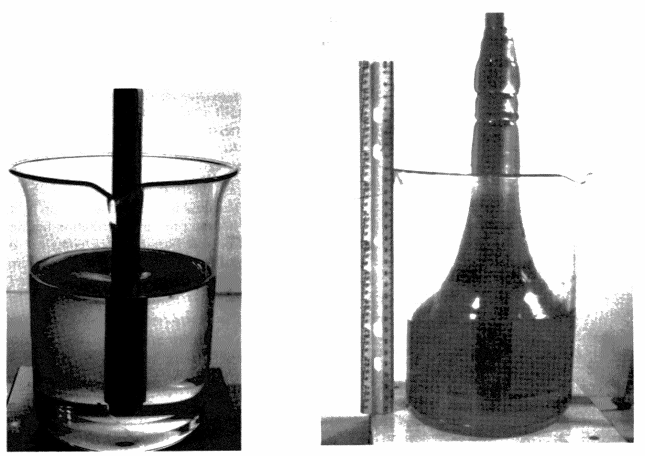
Sonuçta polimer eriyiklerin ana reolojik karakteristikleri şöyle sıralanabilir:

-Kayma şekil değiştirme hızının artmasıyla kayma viskozitesinin azalması (sanki-plastik davranış) (shear thinning viscosity), $\eta(\dot{\gamma})$

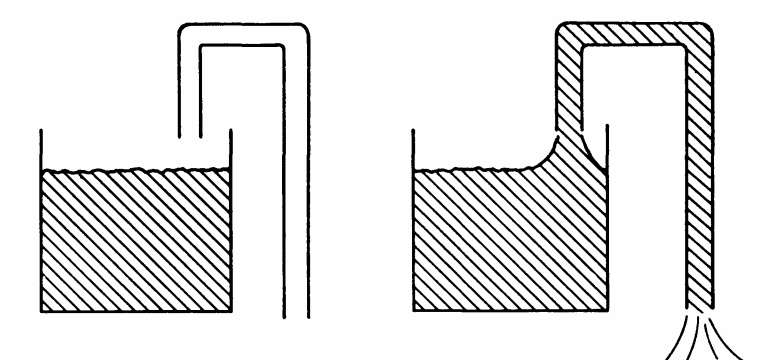
-Açısal şekil değişimi sırasında oluşan normal gerilmeler,

-Uzama şekil değiştirme hızının artmasıyla uzama viskozitesinin artması (extensional thickenning viscosity), $\bar{\eta}(\dot{\in})$

-Zamana bağlı reolojik özellikler, yani üstteki üç özelliğin de zamanla değişmesi.



Şekil 3.4: Silindir içinde dönen çubuk. Solda Newton tipi akışkan, gliserin. Sağda gliserin içerisinde polimer çözeltisi. Soldaki çubuk çok hızlı dönmesine rağmen sıvı serbest yüzeyi düz, sağdaki çubukta ise düşük bir hızdaki dönüş polimer çözeltisinin tırmanmasına yeterli oluyor **(Bird ve diğ., 1987)**



Şekil 3.5: Tüpsüz sifon. Solda; sifon, Newton tipi akışkandan ayrılınca akışkan kısa bir mesafe sonra sifondan ayrılıyor. Sağda; sifon polimerik akışkandan ayrılmayacak şekilde birkaç santimetreye kadar çekilebiliyor **(Bird ve diğ.,1987)**

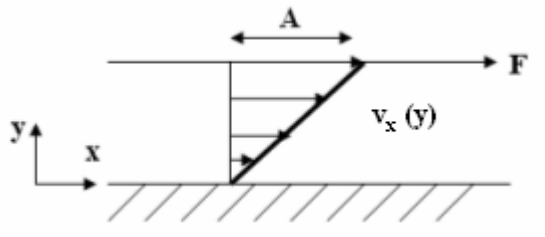
3.1.3. Kayma Viskozitesi

Newton tipi akışkanlarda Şekil 3.6 'da görülen bir akışta kayma gerilmesi, τ ile kayma şekil değiştirme hızı, $\dot{\gamma}$ arasındaki ilişki doğrusaldır, yani bu iki büyüklük

arasındaki oran su ve havada olduğu gibi sabittir. Bu orana dinamik kayma viskozitesi veya sadece viskozite denir.

$$\tau = F / A \qquad \dot{\gamma} = \frac{dv_x}{dy} \tag{3.5}$$

$$\eta = \tau / \dot{\gamma} \tag{3.6}$$



Şekil 3.6: Tek boyutlu viskoz akış

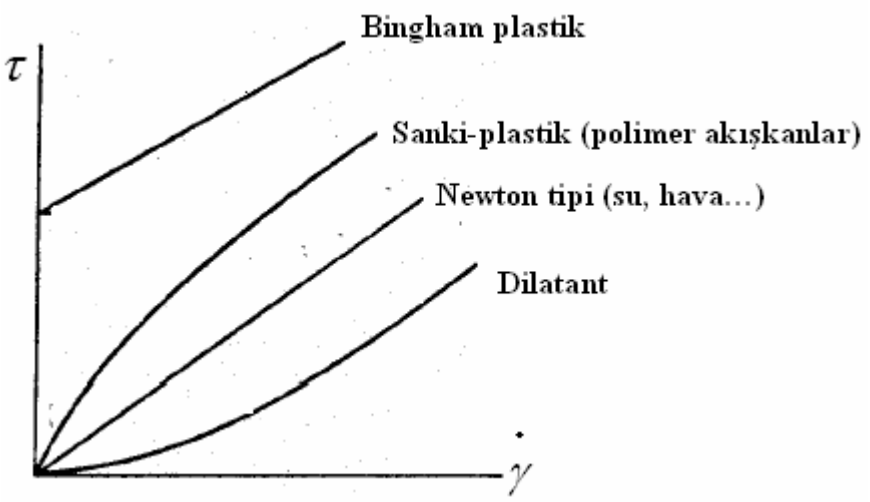
Ancak polimer akışkanlarda durum böyle değildir. Yani kayma gerilmesi ile kayma şekil değiştirme hızı arasındaki oran lineer değildir (Şekil 3.7). Kayma şekil değiştirme hızı arttıkça $\tau / \dot{\gamma}$ oranı azalır, başka bir deyişle kayma şekil değiştirme hızı arttıkça kayma viskozitesi azalır. Bu davranışı gösteren akışkanlara sanki-plastik akışkanlar denir. Polimer akışkanlar için (3.6) 'daki denklem şu şekildedir:

$$\tau = \eta(\dot{\gamma})\dot{\gamma} \tag{3.7}$$

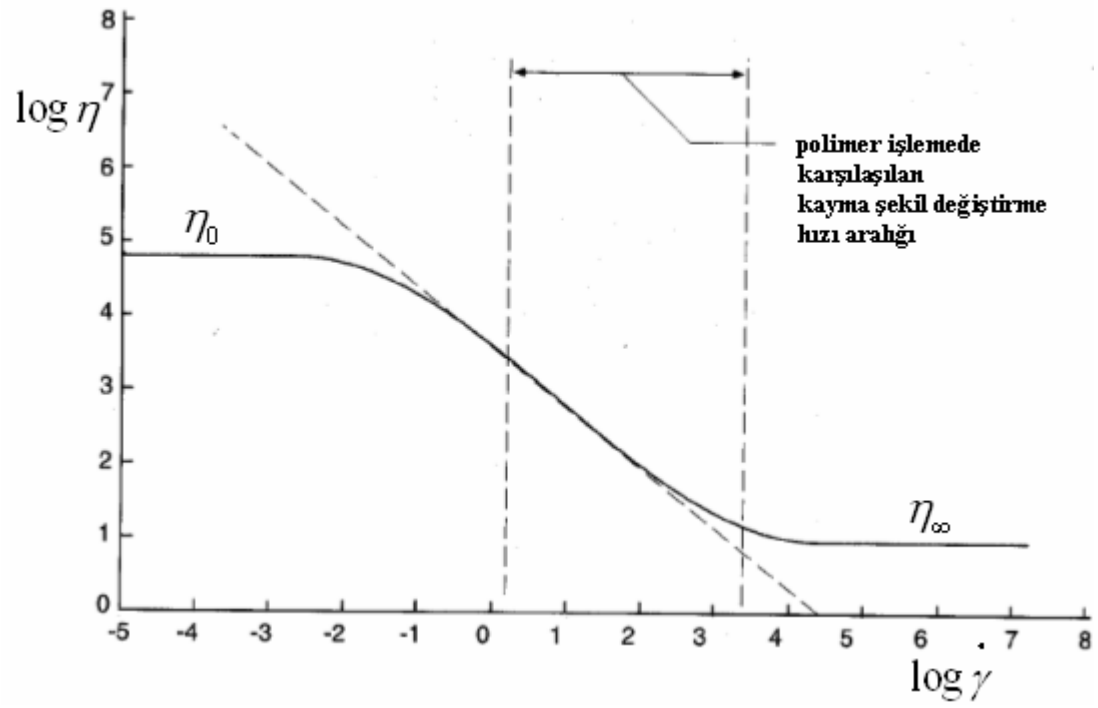
Şekil 3.8 'de polimer akışkanların genel kayma viskozitesi değişimi görülmektedir

(Rauwendaal, 2001). Sıfıra yakın kayma şekil değiştirme hızlarında viskozite sabittir, bu sabit değere "sıfır kayma viskozitesi",η_0 adı verilir. Yine çok yüksek kayma şekil değiştirme hızıdeğerlerinde viskozite sabit olur, buna da "sonsuz kayma viskozitesi", η_∞ adı verilir.

Şimdi polimer akışkanlar için en çok kullanılan viskozite modellerini görelim.



Şekil 3.7: Farklı akışkanlara ait gerilme-şekil değiştirme hızı eğrileri



Şekil 3.8: Logaritmik ölçekte polimer akışkanların viskozite-kayma şekil değiştirme hızı değişimi

3.1.3.1. Ostwald-de-Waele 'nin Kuvvet Yasası

Kuvvet yasası aşağıdaki modeli kullanmaktadır:

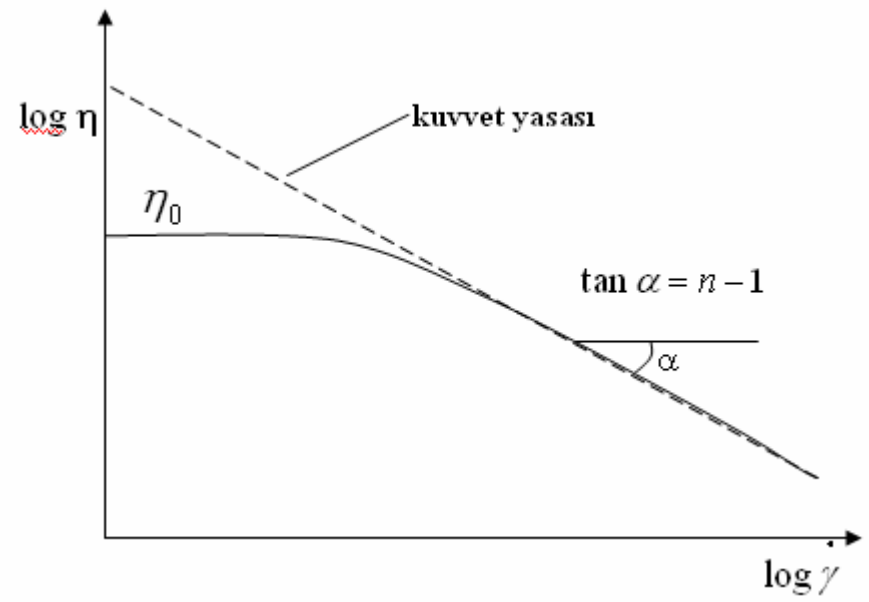
$$\tau = m\dot{\gamma}^n \qquad \dot{\gamma} = \frac{dv_x}{dy} \tag{3.8}$$

Burada m kıvam faktörü [Pa.s^n], n ise akışkanın Newton tipi davranıştan sapma derecesini gösterir. n = 1 Newton tipi akışkanlara, n > 1 dilatant akışkanlara, n < 1

ise sanki-plastik akışkanlara uymaktadır. n, değeri çoğu polimer akışkan için 0,2 ile 0,7 arasında değişir. Yukarıdaki ifadede her iki taraf kayma şekil değiştirme hızı, $\dot{\gamma}$ ile bölünürse kuvvet yasası viskozite için yazılmış olur.

$$\eta = m\dot{\gamma}^{n-1} \qquad \textbf{(3.9)}$$

Şekil 3.9 'da kuvvet yasasının viskozite eğrisini sadece eğimin sabit olduğu bölgede temsil ettiği görülüyor (kesikli çizgi). Viskozitenin sabit olduğu (sıfır kayma viskozitesi), kayma şekil değiştirme hızının sıfıra yakın olduğu bölgede modelin geçerliliği kayboluyor. Ancak kuvvet yasası, polimer proseslerinde genelde yeterlidir ve ekstrüzyon kalıplarının dizaynında 10^0 ile 10^4 s^{-1} kayma şekil değiştirme hızı aralığında geçerlidir **(Michaeli, 2003)**.



Şekil 3.9: Kuvvet yasası modeli

Örnek: Deneysel verilerden kuvvet yasası parametreleri m ve n 'nin hesaplanması.

Veriler Polymer Science and Technology Yüksek Lisans Programı 'nda açılan Polymer Rheology Dersi kapsamında yapılan laboratuar çalışmasından alınmıştır. Çalışmada 25 °C 'deki %1 polimer çözeltisi (su içinde çözünmüş) kullanılmıştır. Polimer çözeltisinin viskozitesi eş eksenli silindir reometresi yardımıyla ölçülmüştür. İçteki dönen silindire etki eden momentin büyüklüğünden silindirin yüzeyindeki

kayma gerilmesi tespit edilebilir. Silindirin dönme devir sayısı ise kayma şekil değiştirme hızı ile ilişkilidir. Bu reometre hakkında daha ayrıntılı bilgi için **Macosko (1994)** kaynağına bakılabilir. Nihayetinde deney verileri olarak elimizde kayma gerilmesi ile kayma şekil değiştirme hızı değerleri mevcuttur. Denklem (3.6) kullanılarak viskozite değerleri hesaplanmıştır. Tablo 3.1 'de değerler görülmektedir. Bu değerlere göre Şekil 3.10 'da kayma gerilmesi – şekil değiştirme hızı eğrisi, Şekil 3.11 'de viskozite eğrisi görülmektedir.

Kuvvet yasası modelini yazalım.

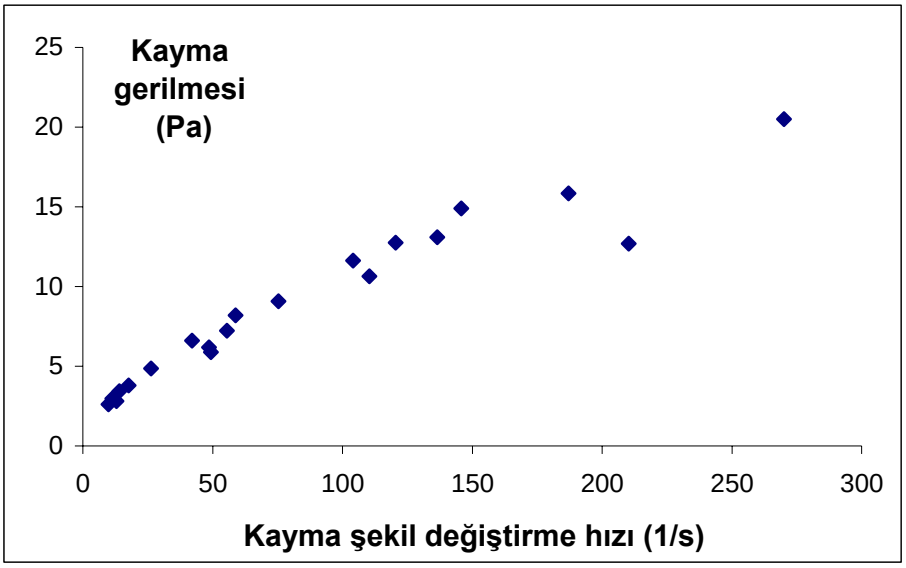
$$\tau = m\dot{\gamma}^{n} \tag{3.10}$$

Her iki tarafın doğal logaritması alınır.

$$\log\tau = \log\left(m\dot{\gamma}^{n}\right) \tag{3.11}$$

Aşağıdaki şekilde denklem yeniden düzenlenir.

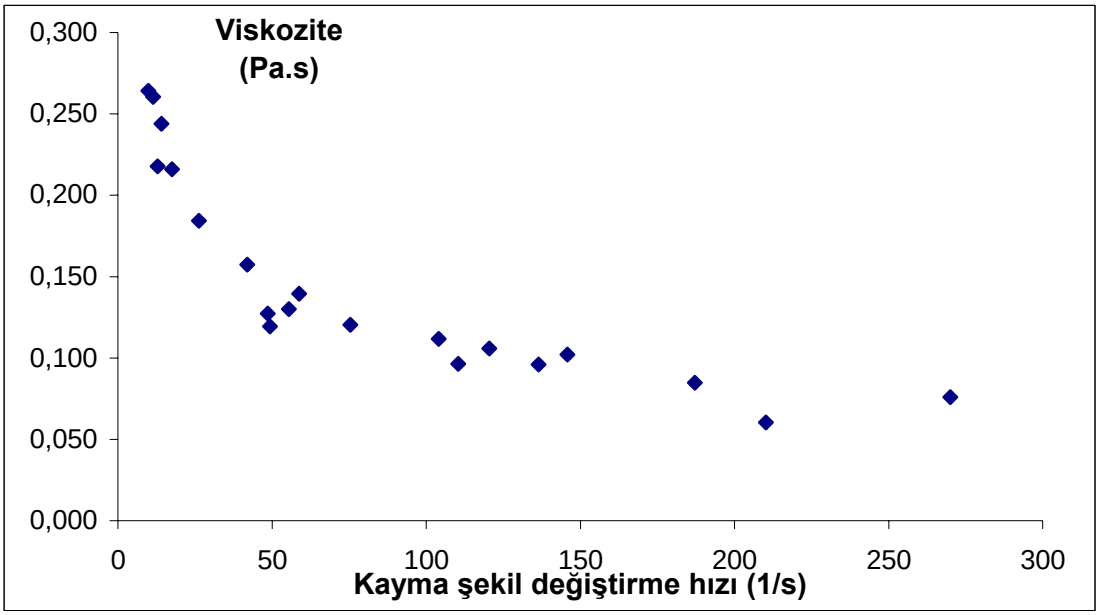
$$\underbrace{\log\tau}_{y} = \underbrace{\log m}_{b} + \underbrace{n}_{a}\underbrace{\log\dot{\gamma}}_{x} \qquad y = ax + b \tag{3.12}$$



Şekil 3.10: Polimer çözeltisine ait kayma gerilmesi – şekil değiştirme hızı eğrisi

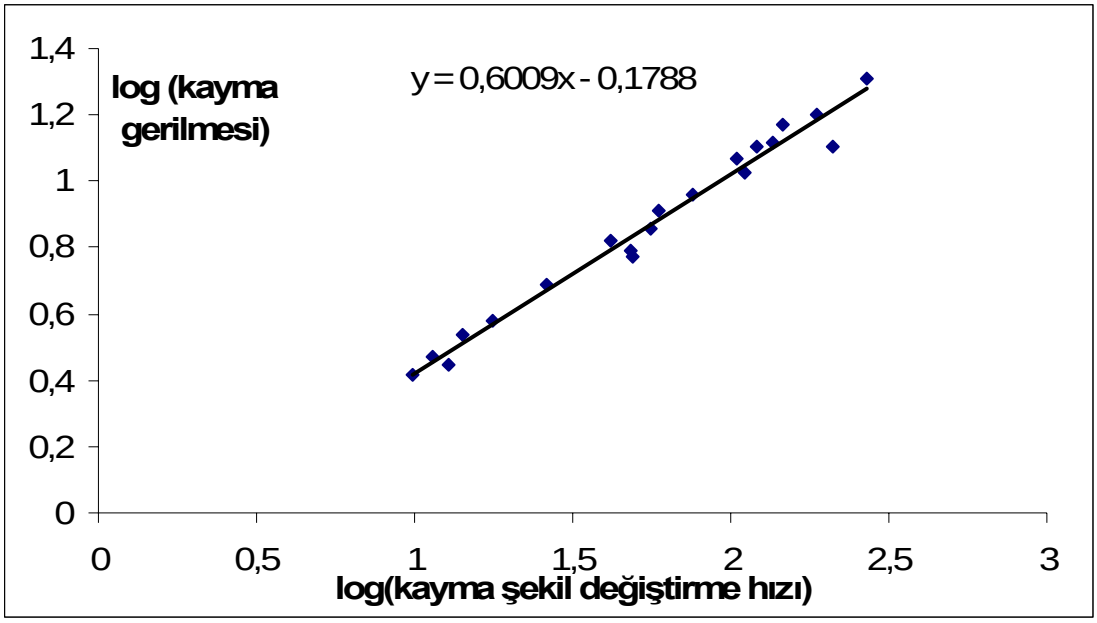
Tablo 3.1: Deneye ait veriler

Kayma şekil değiştirme hızı(1/s)	Kayma gerilmesi (Pa)	Viskozite (Pa.s)
9,88	2,61	0,264
11,4	2,97	0,261
12,9	2,81	0,218
14,1	3,44	0,244
17,6	3,8	0,216
26,3	4,85	0,184
42	6,61	0,157
48,6	6,19	0,127
49,3	5,89	0,119
55,5	7,22	0,130
58,8	8,2	0,139
75,4	9,08	0,120
104,1	11,63	0,112
110,4	10,65	0,096
120,5	12,75	0,106
136,5	13,1	0,096
145,8	14,9	0,102
187,1	15,85	0,085
210,2	12,7	0,060
270	20,5	0,076



Şekil 3.11: Polimer çözeltisine ait viskozite değişimi

Şekil 3.12 'deki gibi $\log\dot{\gamma} - \log\tau$ değişimi çizilir. Uydurulan lineer a ve b katsayıları kullanılarak m ve n sabitleri aşağıdaki gibi belirlenir.



Şekil 3.12: Polimer çözeltisi için $\log\dot{\gamma} - \log\tau$ değişimi

$$a = n = 0,6009 \qquad \textbf{(3.13)}$$

$$b = \log m = -0,1788 \quad \Rightarrow \quad m = 0,6625 \text{ Pa.s}^{n} \qquad \textbf{(3.14)}$$

$$\tau = 0,6625\dot{\gamma}^{0,6009} \qquad \eta = 0,6625\dot{\gamma}^{-0,3991} \qquad \textbf{(3.15)}$$

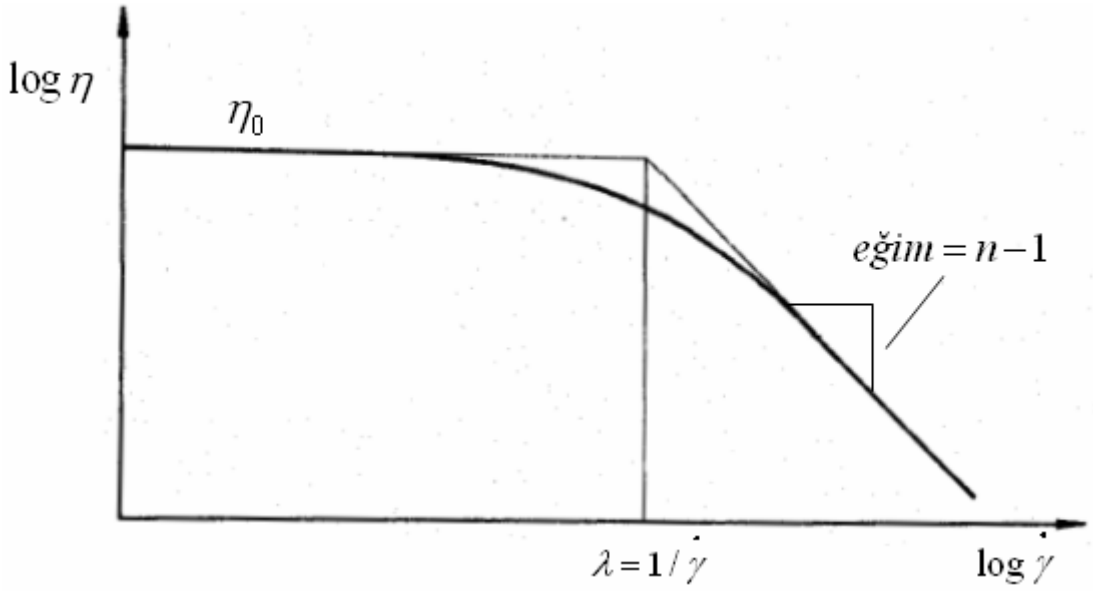
3.1.3.2. Bird – Carreau Modeli (Polyflow 3.10.0 User Guide)

Diğer bir viskozite modeli Bird – Carreau modelidir. Bu model polimer akışkanların viskozite eğrisini oldukça iyi temsil etmektedir ve aşağıdaki biçimdedir.

$$\frac{\eta - \eta_\infty}{\eta_0 - \eta_\infty} = \left[1 + \left(\lambda\dot{\gamma}\right)^2\right]^{\frac{n-1}{2}} \qquad \textbf{(3.16)}$$

Burada η_∞, kayma şekil değiştirme hızı sonsuza giderken viskozitenin aldığı değerdir. Polimer akışkanlar için η_∞ sıfır alınabilir **(Baird ve Collias, 1998).** λ, doğal zaman (natural time) olarak adlandırılır ve viskozitenin azalmaya başladığı kayma şekil

değiştirme hızı değerinin tersidir, diğer bir deyişle -1. kuvvetidir. η_0 sıfır viskozite değeri olmaktadır ve kayma şekil değiştirme hızı sıfıra yakın iken viskozitenin değeridir. n, kuvvet yasası indeksi olup Newton tipi davranıştan sapmanın derecesidir. Sayısal çözümlerde oldukça fazla kullanılan bir modeldir. Şekil 3.13 'de bu modele ait parametreler gösterilmiştir.



Şekil 3.13: Bird – Carreau modeli

3.1.3.3. Cross Modeli (Polyflow 3.10.0 User Guide)

Bu model aşağıdaki gibidir:

$$\eta = \frac{\eta_0}{1+\left(\lambda\dot{\gamma}\right)^m} \qquad \textbf{(3.17)}$$

η_0 sıfır kayma şekil değiştirme hızı viskozitesi

λ doğal zaman (sanki-plastik davranışın başladığı kayma şekil değiştirme hızının -1. kuvveti)

m = 1 – n Cross modeli indeksi

Bird – Carreau modeli gibi viskozite değişimini iyi temsil eden bir modeldir. Bird – Carreau modelinden farkı sabit viskozite bölgesinden kuvvet yasası bölgesine

geçişte anlaşılabilir. Bu geçiş Bird – Carreau modelinde ani iken Cross modelinde daha yumuşaktır.

3.1.3.4. Carreau - Yasuda Modeli (Polyflow 3.10.0 User Guide)

Bu modelin denklemi şöyledir:

$$\frac{\eta - \eta_\infty}{\eta_0 - \eta_\infty} = \left[1 + \left(\lambda\dot{\gamma}\right)^a\right]^{\frac{n-1}{a}} \qquad \textbf{(3.18)}$$

Bird – Carreau modelindeki kullanılan üsteki 2 yerine bu modelde kullanıcının belirlediği a sabiti vardır. a sabiti, sabit viskozite bölgesiyle kuvvet yasası bölgesi arasındaki geçişin şeklini belirler. a < 1 ise geçiş bölgesini uzatır, a > 1 ise geçiş ani olur. Model beş ayrı parametreyle (η_0, η_∞, λ, a ve n) kontrol edildiğinden çok esnektir. Bundan dolayı en çok kullanılan kayma viskozite modelidir.

3.1.4. Kayma Sırasında Oluşan Normal Gerilmeler

Akışkan hareketsiz halde iken gerilme tensörü,

$$T = - pI \qquad \textbf{(3.19)}$$

şeklindedir. Açıkça yazılırsa,

$$T_{ij} = \begin{bmatrix} -p & 0 & 0 \\ 0 & -p & 0 \\ 0 & 0 & -p \end{bmatrix} \qquad \textbf{(3.20)}$$

Burada **T** toplam gerilme tensörü, **I** ise birim tensör olmaktadır. Akışkan hareket halinde iken toplam gerilme tensörü,

$$T = -pI + \tau \qquad \textbf{(3.21)}$$

olur. Açık gösterimde

$$T_{ij} = \begin{bmatrix} -p+\sigma_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & -p+\sigma_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & -p+\sigma_{zz} \end{bmatrix} \quad \textbf{(3.22)}$$

τ, ekstra veya viskoz gerilme tensörü olarak adlandırılır. Dolayısıyla sıkıştırılamaz akışlarda toplam gerilme tensöründen p terimi alınırsa geriye kalan viskoz gerilme tensörü τ, akışkanın maruz kaldığı tüm deformasyon etkilerini içerir. Genelde reoloji denklemleri τ 'ya bağlı olarak yazılır.

Viskoz kayma gerilmelerini doğrudan ölçebiliyoruz, ancak viskoz normal gerilmeleri (örneğin σ_{xx}) doğrudan ölçemiyoruz. Bunun yerine deneylerden basınç etkisini içinde barındıran $T_{xx} = -p + \sigma_{xx}$ değerini bilebiliyoruz. Basınç terimini yok etmek için reoloji denklemlerinde normal gerilme farkları kullanılır.

$$T_{xx} - T_{yy} = \sigma_{xx} - \sigma_{yy} \quad \textbf{(3.23)}$$

$$T_{yy} - T_{zz} = \sigma_{yy} - \sigma_{zz} \quad \textbf{(3.24)}$$

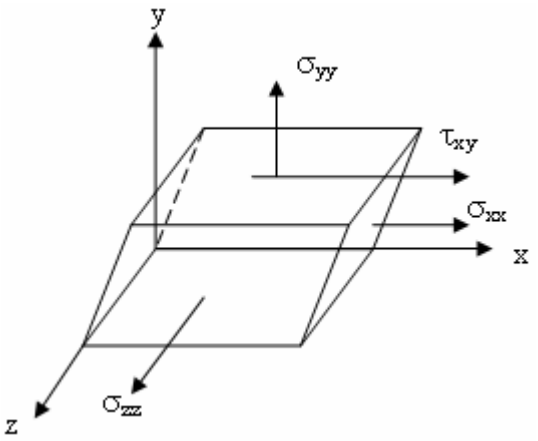
Viskoelastik bir akışkan iki paralel levha arasında sabit şekil değiştirme hızı sağlandığında , değişen τ_{xy} kayma gerilmesinin yanında $N_1 = \sigma_{xx} - \sigma_{yy}$ ve $N_2 = \sigma_{yy} - \sigma_{zz}$ normal gerilme farkları da oluşur (Şekil 3.14). Burada x akış yönü, y akışa dik yön, z ise xy düzlemine dik yön olmaktadır. N_1 normal gerilme farkı N_2 'ye göre büyük olmaktadır ve N_1 pozitif, N_2 negatif olmaktadır. Daha önce bahsedilen polimer akışkanın çubuğa tırmanma olayının sorumlusu N_1 'dir. $-N_2 / N_1$ oranı 0,05 ile 0,3 arasında değişmektedir **(Macosko, 1994)**. Şekil 3.15 'teki akışkan için N_2 / N_1 oranı 0,11 dir ve yaklaşık olarak kayma şekil değiştirme hızından bağımsızdır.

$T_{12} = T_{xy} = \tau_{xy}$, birincil normal gerilme farkı N_1 ve negatif ikincil normal gerilme farkının kayma şekil değiştirme hızıyla değişimi **(Macosko, 1994)**

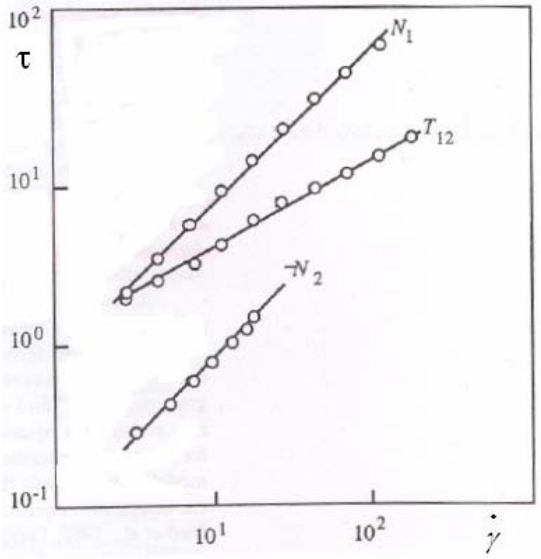
3.1.5. Uzama Viskozitesi

Kayma şekil değiştirme hızının artmasıyla polimer eriyiğin kayma viskozitesi azalırken, uzama şekil değiştirme hızının artmasıyla uzama viskozitesi artmaktadır.

Şekil 3.16 ‘da tek eksende uzama akışı görülmektedir. Şekil 3.17 ‘de bu akış şeklinin oluştuğu bir geometri görülmektedir. Böyle bir akışta uzama viskozitesi şöyle tanımlanmaktadır:



Şekil 3.14: Kayma sırasında oluşan normal gerilmeler



Şekil 3.15: Dekalin içerisindeki %1,18 poli izobutilen çözeltisi için kayma gerilmesi

$$\eta_u = \frac{\sigma_{xx} - \sigma_{yy}}{\dot{\in}} \qquad \textbf{(3.25)}$$

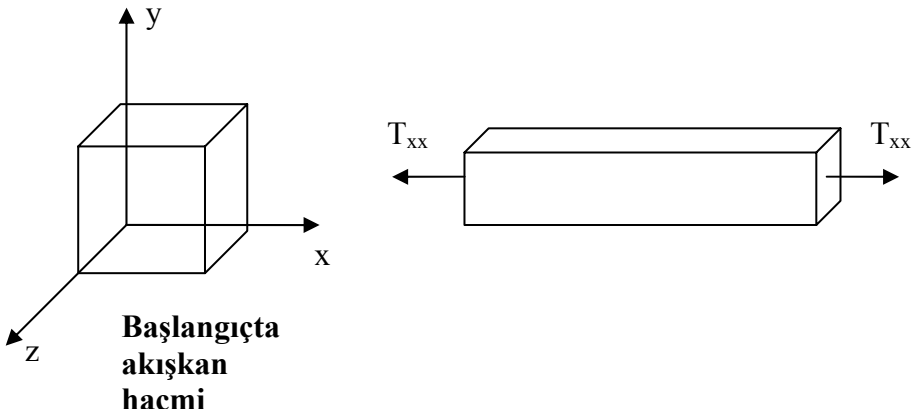
Burada $\sigma_{xx} - \sigma_{yy}$ normal gerilme farkı, $\dot{\in}$ uzama şekil değiştirme hızı olmaktadır. Uzama şekil değiştirme hızı akışkanın birim zamanda birim boydaki uzama miktarıdır.

$$\dot{\epsilon} = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{l(t+\Delta t) - l(t)}{l(t).\Delta t} = \frac{1}{l}\frac{dl}{dt} \qquad \textbf{(3.26)}$$

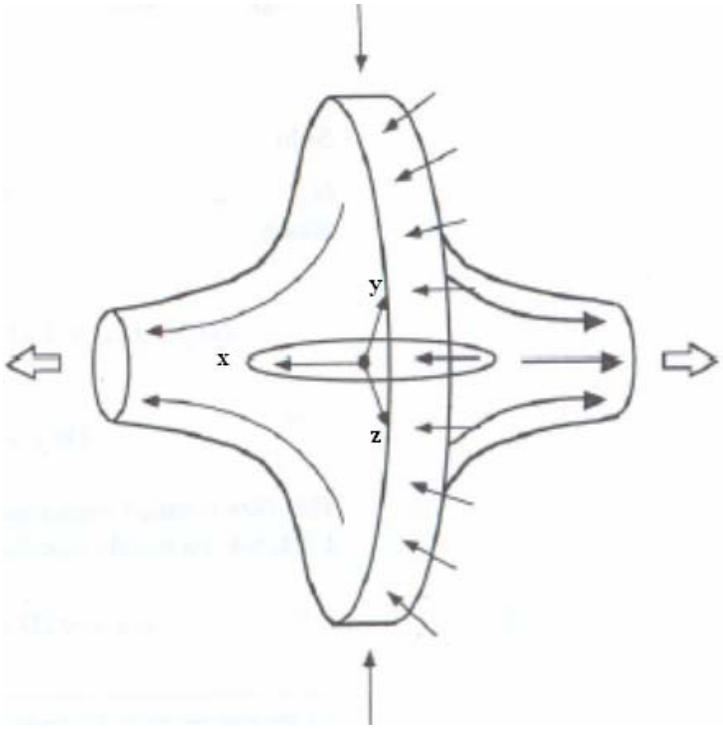
Akışkanlar mekaniğinde kullanılan bilindik formu ile yazacak olursak, şekildeki tek eksen uzama için uzama şekil değiştirme hızı:

$$\dot{\epsilon} = \frac{dv_x}{dx} \qquad \textbf{(3.27)}$$

olur.

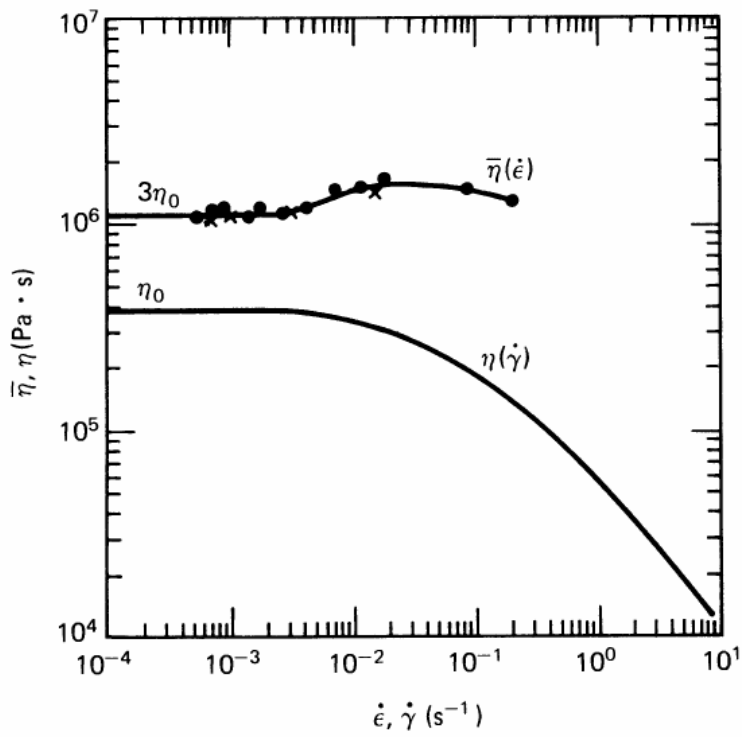


Şekil 3.16: Bir boyutlu uzama



Şekil 3.17: Daimi rejim tek eksen uzama akışında akım çizgileri

Polimer akışkanlarda uzama viskozitesi küçük uzama şekil değiştirme hızlarında kayma viskozitesinin 3 katı kadardır ($\bar{\eta}_u = 3\eta$). Bu durum Şekil 3.18 'de görülmektedir. Bu orana Trouton oranı denir. Uzama hızı arttıkça belli bir değerden sonra uzama viskozitesi artar. Viskoziteler arasındaki oran şekil değiştirme hızı arttıkça oldukça hızlı artış gösterir. Kayma viskozitesi ile uzama viskozitesi arasında bir ilişki yoktur, yani ikisi birbirinden bağımsızdır.



Şekil 3.18: 160 °C 'deki polistiren eriyiğin şekil değiştirme hızlarına bağlı olarak kayma ve uzama viskozitelerinin değişimi. Küçük şekil değiştirme hızlarında viskozite oranı yaklaşık 3 'tür. ($\bar{\eta}$: uzama viskozitesi) **(Macosko, 1994)**

3.1.6. Genelleştirilmiş Newton Tipi Akışkan Modeli

Momentum denklemlerini çözmek için viskoz kuvvet terimlerinin hesaplanması gerekir. Bunun için gerilmeler ile şekil değiştirme hızları arasındaki ilişkinin kurucu denklem (constitutive equation) yardımıyla tanımlanması gerekir. Newton 'un viskozite kanununa göre gerilme tensörü ile şekil değiştirme hızı tensörü arasındaki ilişki şöyleydi:

$$\tau_{ij} = \mu \dot{\gamma}_{ij} \qquad \textbf{(3.28)}$$

Gerilme tensörü, τ aşağıdaki gibidir.

$$\tau_{ij} = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix} \tag{3.29}$$

μ Newton tipi akışkan viskozitesi olmaktadır. Şekil değiştirme hızı tensörü $\dot{\gamma}_{ij}$, kartezyen koordinatlar için Tablo 3.2 'de verilmiştir.

Tablo 3.2: Şekil değiştirme hızı tensörü $\dot{\gamma} = \nabla\vec{v} + (\nabla\vec{v})^{\mathrm{T}}$

$\dot{\gamma}_{xx} = 2\dfrac{\partial v_x}{\partial x}$	$\dot{\gamma}_{xy} = \dot{\gamma}_{yx} = \left(\dfrac{\partial v_y}{\partial x} + \dfrac{\partial v_x}{\partial y}\right)$
$\dot{\gamma}_{yy} = 2\dfrac{\partial v_y}{\partial y}$	$\dot{\gamma}_{yz} = \dot{\gamma}_{zy} = \left(\dfrac{\partial v_z}{\partial y} + \dfrac{\partial v_y}{\partial z}\right)$
$\dot{\gamma}_{zz} = 2\dfrac{\partial v_z}{\partial z}$	$\dot{\gamma}_{zx} = \dot{\gamma}_{xz} = \left(\dfrac{\partial v_x}{\partial z} + \dfrac{\partial v_z}{\partial x}\right)$

Denklem (3.28) 'i Newton tipi olmayan akışkanlara uygulayabilmek için viskozitenin şekil değiştirme hızı tensörünün büyüklüğü ile ifade edilmesi gerekir. Viskozite skaler bir büyüklük olduğu için şekil değiştirme hızı tensörünün skaler bir fonksiyonu olarak ifade edilmesi gerekir. Tensörel bir büyüklükle ilgili skaler büyüklükler tensörün envaryantlarıdır **(Baird ve Collias, 1998)**. $\dot{\gamma}$ için envaryantlar şu şekildedir:

$$I_1 = \sum \dot{\gamma}_{ii} = 2\left[\left(\frac{\partial v_x}{\partial x}\right) + \left(\frac{\partial v_y}{\partial y}\right) + \left(\frac{\partial v_z}{\partial z}\right)\right] \tag{3.30}$$

$$I_2 = \sum_i \sum_j \dot{\gamma}_{ij}\dot{\gamma}_{ji} = \dot{\gamma}_{xx}^2 + \dot{\gamma}_{xy}^2 + \dot{\gamma}_{xz}^2 + \dot{\gamma}_{yx}^2 + \dot{\gamma}_{yy}^2 + \dot{\gamma}_{yz}^2 + \dot{\gamma}_{zx}^2 + \dot{\gamma}_{zy}^2 + \dot{\gamma}_{zz}^2 \tag{3.31}$$

$$I_3 = \det \dot{\gamma} \tag{3.32}$$

Sıkıştırılamaz akışlar için $I_1 = 0$ dır. Böylelikle viskozite I_2, I_3 'ün fonksiyonudur.

$$\eta = \eta(I_2, I_3) \tag{3.33}$$

Uzama akışına nazaran kayma akışının baskın olduğu akışlarda I_3 çok önemli olmamaktadır. Bundan dolayı η yalnız I_2 'nin fonksiyonu olur **(Bird ve diğ., 1987).**

$$\eta = \eta(I_2) \tag{3.34}$$

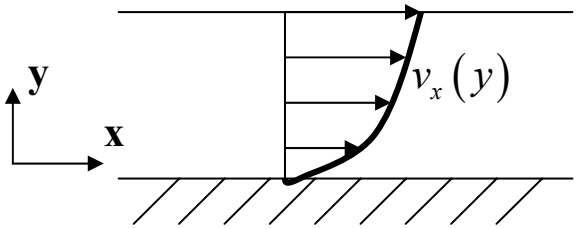
$$\dot{\gamma} = \sqrt{\frac{1}{2} I_2} \tag{3.35}$$

Sonuçta Genelleştirilmiş Newton Tipi Akışkan Modeli,

$$\tau_{ij} = \eta(\dot{\gamma})\dot{\gamma}_{ij} \tag{3.36}$$

şeklindedir. Model aşağıdaki örnekle daha iyi anlaşılacaktır.

Tek boyutlu viskoz akış için Genelleştirilmiş Newton Tipi Akışkan Modeli 'ni kullanalım:



Şekil 3.19: Tek boyutlu viskoz akış

Akış tek boyutlu, viskoz ve tam gelişmiş olduğundan bu akış için yalnız τ_{yx} gerilmesi ve $\dot{\gamma}_{yx}$ kayma şekil değiştirme hızı mevcuttur. Normal gerilme veya başka kayma gerilmesi yoktur. Tablo 3.2 'den,

$$\dot{\gamma}_{yx} = \left(\frac{\partial v_y}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial y} \right) = \frac{dv_x}{dy} \tag{3.37}$$

olur. (3.36) 'daki $\dot{\gamma}$, (3.35) ve (3.31) denklemleri kullanılarak bulunur.

$$I_2 = \sum_i \sum_j \dot{\gamma}_{ij}\,\dot{\gamma}_{ji} = \cancel{\dot{\gamma}_{xx}^2} + \dot{\gamma}_{xy}^2 + \cancel{\dot{\gamma}_{xz}^2} + \dot{\gamma}_{yx}^2 + \cancel{\dot{\gamma}_{yy}^2} + \cancel{\dot{\gamma}_{yz}^2} + \cancel{\dot{\gamma}_{zx}^2} + \cancel{\dot{\gamma}_{zy}^2} + \cancel{\dot{\gamma}_{zz}^2}$$

$$I_2 = 2\dot{\gamma}_{yx}^2 \tag{3.38}$$

Bu ifade (3.35) denkleminde yerine konursa,

$$\dot{\gamma} = \sqrt{\frac{1}{2} 2 \dot{\gamma}_{yx}^2} = \dot{\gamma}_{yx} = \frac{dv_x}{dy} \tag{3.39}$$

olarak bulunur. Sonuçta denklem (3.36) 'yı bu örnek için yazılırsa,

$$\tau_{yx} = \eta\left(\frac{dv_x}{dy}\right)\frac{dv_x}{dy} \tag{3.40}$$

olur. Bundan sonra Bölüm 2.2.1 'deki viskozite modellerinden biri kullanılır. Carreau – Yasuda modelini kullanalım.

$$\eta\left(\dot{\gamma}\right) = \eta_0\left[1 + \left(\lambda\dot{\gamma}\right)^a\right]^{\frac{n-1}{a}} \tag{3.41}$$

(3.40) denkleminde yerine yazılır ve sonuçta

$$\tau_{yx} = \eta_0\left[1 + \left(\lambda\frac{dv_x}{dy}\right)^a\right]^{\frac{n-1}{a}}\frac{dv_x}{dy} \tag{3.42}$$

elde edildi.

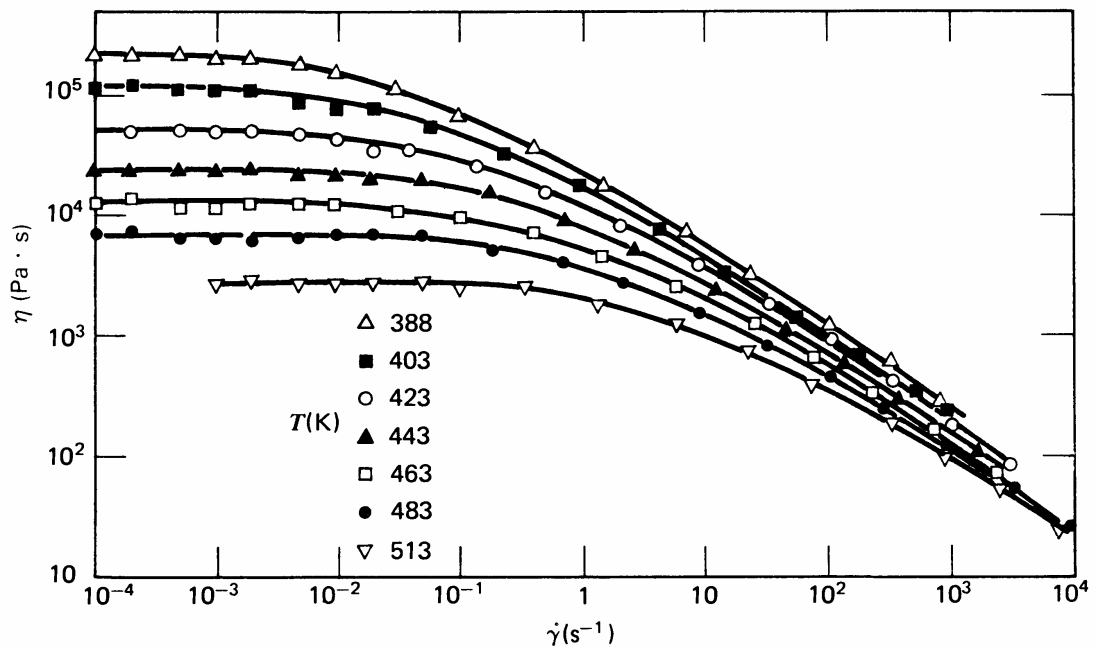
Genelleştirilmiş Newton tipi akış, Newton tipi akışkanlar (sabit viskozite) ile "elastik olmayan ve Newton tipi olmayan" akışkanların akışını içine alır. Newton tipi akışkan modeli, başka bir deyişle sabit viskoziteli akışkan modeli ancak düşük molekül ağırlıklı akışkanlar için uygundur. Hatta çok düşük hızlı polimer eriyiklerin akışı da sabit viskozite kabulü ile çözülebilir **(Macosko, 1994).**

Genelleştirilmiş Newton Tipi Akışkan Modeli sanki-plastik davranışları (viskozitenin kayma şekil değiştirme hızıyla azalması) verebilmesine rağmen polimer eriyiklerin zamana bağlı reolojik özellikleri, kayma akışında oluşan normal gerilmeleri, kayma ve uzama akışlarındaki farklı olan davranışları (uzama viskozitesinin artması) gibi diğer özelliklerini tanımlayamaz **(Macosko, 1994)**. Ancak Newton tipi olmayan, elastik de olmayan akışkanlar için kullanılan bu model akışın fiziğini yakalamada yeterlidir. Akış sırasında meydana gelen basınç düşüşlerini doğru hesaplayabilir.

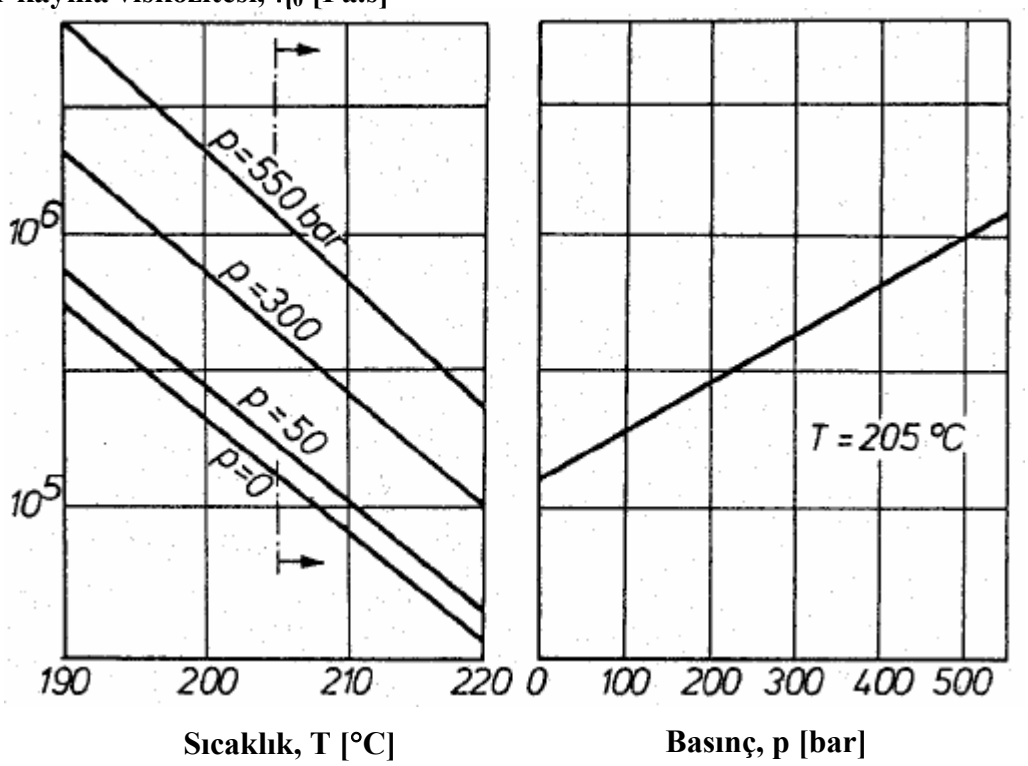
3.1.7. Sıcaklık ve Basıncın Viskoziteye Etkisi

Sıcaklık düştükçe çoğu polimerin kayma şekil değiştirme hızına duyarlılığı artar (Şekil 3.20). Amorf yapılı polimerlerin (PVC, PMMA) viskozitesi sıcaklık değişimine duyarlılığı fazlayken, yarı kristalli polimerlerin (PE, PP) duyarlılığı oldukça azdır. Sıcaklık, T_g (camsı geçiş sıcaklığı) sıcaklığından uzaklaştıkça sıcaklığın viskozite değişimine etkisi azalır **(Michaeli, 2003).**

Çoğu polimer prosesinde basıncın viskozite değişimine etkisi yaklaşık 350 bardan düşük değerlerde önemsizdir.



Şekil 3.20: Düşük yoğunluklu bir polimere ait değişik sıcaklıklardaki kayma viskozitesi **(Bird ve diğ., 1987)**



Şekil 3.21: Sıcaklık ve basıncın PMMA polimerinin viskozitesine etkisi **(Michaeli, 2003)**

3.1.7.1. Sıcaklığın etkisi

Şekil 3.20 'de de görüldüğü gibi düşük kayma şekil değiştirme hızlarında (özellikle sıfır kayma viskozite bölgesinde) sıcaklığın viskoziteye etkisi yüksek kayma hızlarındakine göre oldukça fazladır. Polimer eriyiklerin farklı sıcaklıklardaki viskozite eğrileri şekil olarak birbirine benzerler (Şekil 3.22). Bundan dolayı tek bir eğri ile sıcaklıktan bağımsız olarak viskozite fonksiyonları gösterilebilir. Bu eğri referans eğri adını alır ve sıcaklıktan bağımsızdır. Bu eğri şu şekilde elde edilir: Viskozite o sıcaklıktaki sıfır kayma viskozitesine bölünür ve kayma şekil değiştirme hızı sıfır kayma viskozitesi ile çarpılır. Grafik olarak, eğrilerin, eğimi -1 olan doğru üzerinde kaydırıldığı anlamına gelir (Şekil 3.23).

Referans eğriyi ifade eden fonksiyon aşağıdaki gibi bulunur:

$$\frac{\eta(\dot{\gamma},T)}{\eta_0(T)} = f\left(\eta_0(T)\,\dot{\gamma}\right) \qquad \textbf{(3.43)}$$

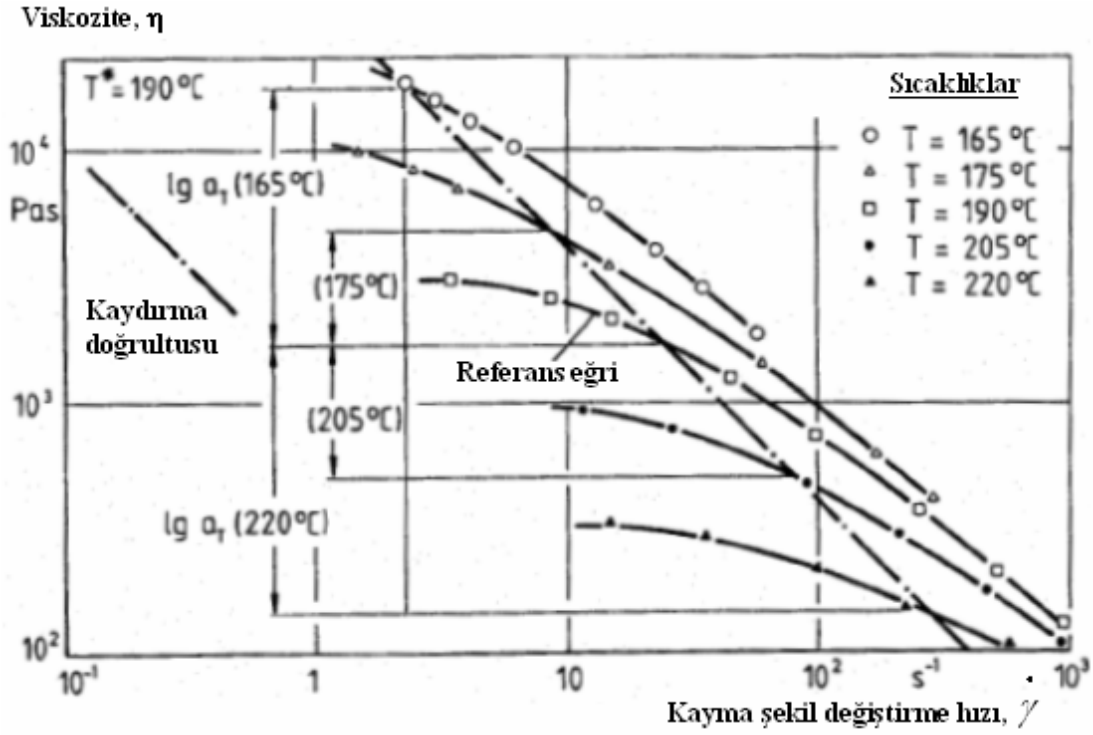
Burada T sıcaklığı seçilebilecek herhangi bir referans sıcaklık değeridir.

Bilinen herhangi bir sıcaklıktaki viskozite eğrisinden farklı sıcaklığa ait viskozite eğrisini elde etmek için kaydırma katsayısı, a_T bilinmelidir. a_T şöyle bulunur:

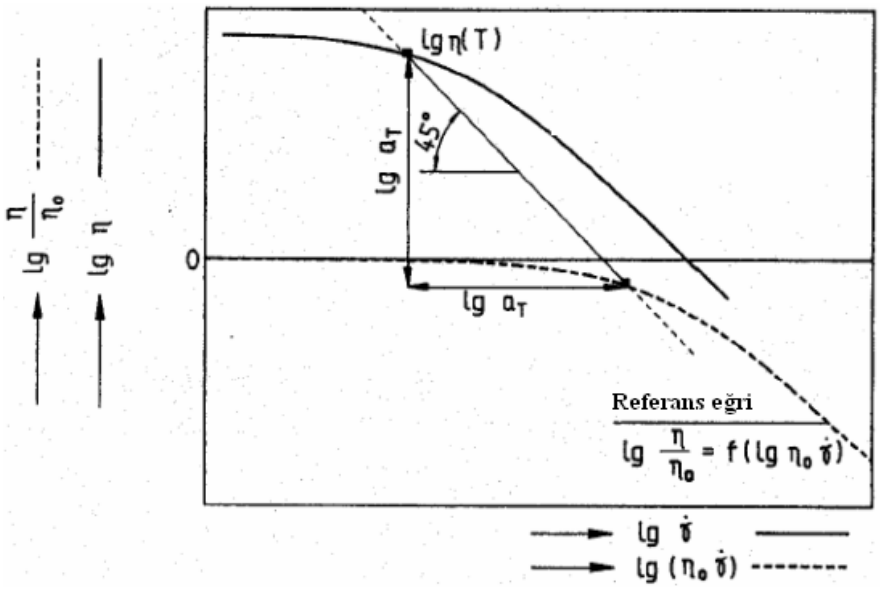
$$a_T = \frac{\eta_0(T)}{\eta_0(T_0)} \text{ veya } \log a_T = \log \frac{\eta_0(T)}{\eta_0(T_0)} \qquad \textbf{(3.44)}$$

log a_T değeri, T_0 referans sıcaklığındaki viskozite eğrisinin her iki eksendeki kayma miktarıdır (Şekil 3.23). Burada T_0 referans sıcaklığı, T hesaplanacak viskozite eğrisinin sıcaklığı olmaktadır.

Elimizde eğer bir tek sıcaklığa ait viskozite eğrisi varsa, a_T çeşitli yöntemlerle hesaplanarak farklı sıcaklıklardaki viskozite eğrileri elde edilebilir. Bu yöntemlerden en önemli iki tanesi Arrhenius Kuralı ile WLF (Williams, Landel, ve Ferry) Denklemi 'dir.



Şekil 3.22: CAB için farklı sıcaklıklardaki viskozite eğrileri **(Michaeli, 2003)**



Şekil 3.23: Herhangi bir viskozite fonksiyonu için zaman – sıcaklık süperpozisyon prensibi **(Michaeli, 2003)**

Arrhenius Kuralı,

$$a_T = \exp\left[\frac{E_0}{R}\left(\frac{1}{T}-\frac{1}{T_0}\right)\right] \qquad \textbf{(3.45)}$$

Burada E_0 polimere özgü akış aktivasyon enerjisidir ve birimi J/mol.K dir. R evrensel gaz sabiti olup değeri 8,314 J/mol.K dir. Bazı polimerlerin E_0/R değerleri şöyledir **(Baird ve Collias, 1998)**: 4500 K (LDPE), 2830 K (HDPE), 5140 K (PP). T_0 referans sıcaklığı ifade etmektedir. Böylece a_T kaydırma katsayısı sıcaklığın fonksiyonu olmaktadır.

Arrhenius Kuralı T_g+100 °C 'den büyük sıcaklıklar için uygundur ve özellikle yarı kristalli termoplastikler (PE, PP…) için gayet iyi sonuç verir.

Küçük sıcaklık değişimleri için veya kaba hesaplama yapmak için a_T aşağıdaki ampirik ifade ile hesaplanabilir.

$$a_T = \exp[-\alpha(T-T_0)] \qquad \textbf{(3.46)}$$

α : polimere özgü sıcaklık katsayısı

WLF Denklemi,

$$\log a_T = \log \frac{\eta(T)}{\eta(T_S)} = -\frac{C_1(T - T_S)}{C_2 + (T - T_S)} \qquad \textbf{(3.47)}$$

Standart sıcaklık olarak ifade edilen T_S, yaklaşık T_g + 50 °C değerine eşittir. Bazı polimerler için T_g değerleri Tablo 3.3 'te verilmiştir. WLF sabitleri C_1 ve C_2 sırasıyla 8,86 ve 101,6 'ya eşittir.

Eğer T_S yerine herhangi bir T_R sıcaklığı referans sıcaklık olarak kullanılmak istenirse WLF Denklemi aşağıdaki gibi yeniden düzenlenir.

$$\log a_T = \log \frac{\eta(T)}{\eta(T_R)} = \log\left(\frac{\eta(T)}{\eta(T_S)} . \frac{\eta(T_S)}{\eta(T_R)}\right)$$

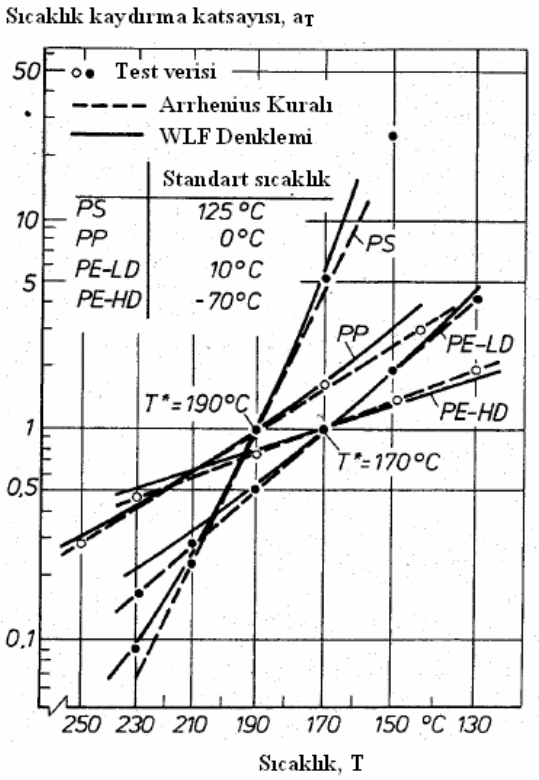
$$\Rightarrow \quad \log a_T = \frac{C_1(T_R - T_S)}{C_2 + (T_R - T_S)} - \frac{C_1(T - T_S)}{C_2 + (T - T_S)} \qquad \textbf{(3.48)}$$

WLF Denklemi amorf yapılı polimerler için daha uygun olsa da yarı kristalli polimerler için de kullanılabilir. Arrhenius Kuralına göre deneysel verilere daha iyi uyum sağlar, özellikle camsı geçiş sıcaklığına yakın değerlerde çok iyi sonuç verir.

Her iki bağıntı da referans sıcaklığına göre ± 30 °C aralığında viskozite-sıcaklık ilişkisini yeterince iyi tanımlar. Şekil 3.24 'te bazı polimerlerin iki bağıntıya göre a_T değerlerinin sıcaklıkla değişimi görülmektedir.

Tablo 3.3: Bazı polimerlerin camsı geçiş sıcaklıkları, T_g **(Michaeli, 2003)**

Polimer	**T_g (°C)**
HDPE	-120
LDPE	-70
POM	-40
PP	-10
PS	70
PVC	80
PMMA	90



Şekil 3.24: Bazı polimerler a_T değerleri **(Michaeli, 2003)**

3.1.7.2. Basıncın etkisi

Basıncın viskozite değişimine etkisi sıcaklığın etkisine oranla çok azdır. Bununla birlikte basınç arttıkça polimerin viskozitesi artar. Polistiren için sabit kayma gerilmesinde yapılan çalışmalarda 150 °C 'de basıncın 1000 kat artmasına karşılık viskozitenin 200 ila 1000 kat arasında arttığı görülmüştür **(Rauwendaal, 2001)**. Aynı şartlar altında polietilenin viskozitesi 4, 5 kat artmıştır. Polistirenin sıcaklığı 200 °C 'de iken diğer şartlar değiştirilmeyip başka bir deneme yapılmış, bu sefer viskozite 30 ila 50 kat artmıştır, yani viskozitesi 150 °C 'dekine oranla 10 ila 20 kat arasında daha düşüktür.

Yapılan çalışmalar polimer viskozitesinin sıcaklığa bağlı değişimiyle basınca bağlı değişimi arasındaki oranın yaklaşık sabit olduğu tespit edilmiştir. Böylece viskozite sıcaklık değişimine duyarlı olduğunda basınç değişimine de duyarlı olmaktadır.

$$\frac{\frac{1}{\eta}\left(\frac{\partial \eta}{\partial P}\right)}{\frac{1}{\eta}\left(\frac{\partial \eta}{\partial T}\right)} \cong -5E-7\left[{}^{\circ}C/Pa\right] \qquad \textbf{(3.49)}$$

Viskozitenin basınçla değişimi aşağıdaki formülle hesaplanabilir.

$$\eta(p) = \eta(p_r)\exp\left[\alpha_p\left(p - p_r\right)\right] \quad \textbf{(3.50)}$$

Formüldeki basınç duyarlılığı katsayısı, α_p 'nin değeri polimerden polimere çok farklıdır. p_r ise viskozite değerinin bilindiği referans basıncıdır.

Viskozitenin basınca bağımlılığı WLF Denklemi kullanılarak da ifade edilebilir. Bunun için T_S 'nin basınca bağlı değişiminin bilinmesi gerekir. $T_S = T_g + 50$ °C olduğu biliniyordu. T_g 'nin 1000 bara kadar doğrusal değiştiği kabul edilebilir. 1000 bardan sonra T_g 'nin basınçla artışı çok daha küçük bir orana sahiptir.

$$T_g\left(p\right) = T_g\left(1\ bar\right) + \xi.p \quad \textbf{(3.51)}$$

T_g her 1000 barda 15…30 °C yükselir. Buna göre herhangi bir polimer için T_g yaklaşık olarak,

$$T_g\left(p\right) \approx T_g\left(1\ bar\right) + \left[\left(15...30\right).10^{-3}\ ^{\circ}C/bar\right].p \quad \textbf{(3.52)}$$

ile hesaplanabilir. T_1 sıcaklığındaki ve p_1 basıncındaki viskozite eğrisi biliniyor ise T_2 sıcaklığındaki ve p_2 basıncındaki viskozite eğrisini hesaplamak için,

$$\log a_T = \log\left(\frac{\eta(T_2, p_2)}{\eta(T_1, p_1)}\right) = \frac{C_1(T_2 - T_S(p_2))}{C_2 + (T_2 - T_S(p_2))} - \frac{C_1(T_1 - T_S(p_1))}{C_2 + (T_1 - T_S(p_1))} \quad \textbf{(3.53)}$$

WLF denklemi kullanılabilir.

Sıcaklık kaydırma katsayısı, a_T 'nin kullanımı:

$$\eta(\dot{\gamma}, T) = a_T \eta_R(a_T\,\dot{\gamma}) \quad \textbf{(3.54)}$$

Burada $\eta(\dot{\gamma}, T)$ T sıcaklığındaki viskozite fonksiyonu, $\eta_R(\dot{\gamma})$ referans sıcaklığı T_R 'deki viskozite fonksiyonudur. Burada a_T 'yi Arrhenius Kuralı ile hesaplayalım.

$$a_T = \exp\left[\frac{E_0}{R}\left(\frac{1}{T}-\frac{1}{T_R}\right)\right] \quad \textbf{(3.55)}$$

Viskozite fonksiyonu olarak Bölüm 2.2.1 'deki viskozite fonksiyonlarından Bird – Carreau Modeli 'ni seçelim.

$$\eta_R(\dot{\gamma}) = \eta_0\left[1+\left(\lambda\dot{\gamma}\right)^2\right]^{\frac{n-1}{2}} \quad \textbf{(3.56)}$$

η_0 : referans sıcaklıktaki sıfır kayma viskozitesi

Bundan sonra T sıcaklığına ait viskozite fonksiyonu yazılabilir.

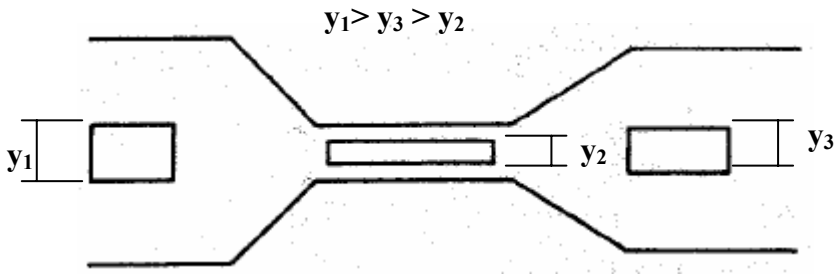
$$\eta(\dot{\gamma},T) = a_T.\eta_0\left[1+\left(a_T.\lambda\dot{\gamma}\right)^2\right]^{\frac{n-1}{2}} \quad \textbf{(3.57)}$$

3.1.8. Polimer Akışkanların Viskoelastik Özellikleri

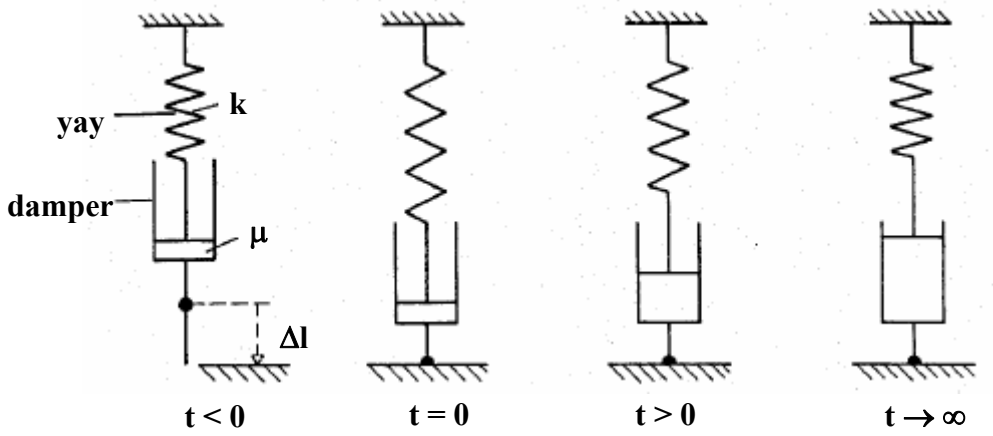
Polimer eriyikler sıvı gibi viskoz, katı gibi elastik davranış gösterirler. Bu özelliğe viskoelastiklik adı verilir, bu polimer moleküllerinin zincirli yapıya sahip olmalarından ileri gelmektedir. Viskoelastiklik akışkanın reolojik özelliklerinin zamana bağlı olmasına neden olur.

Viskoelastik davranışlar, özellikle ani kesit değişimlerinde etkili olmaktadır (Şekil 3.25). Eriyik farklı kesitler arasında geçiş yaparken kısmi elastik deformasyona uğrar. Dolayısıyla eriyik elastik enerjiye sahiptir. Eriyik kalıptan çıkarken elastik enerji eriyiğin şişmesinde harcanır.

Bu tersinir şekil değiştirme yeteneği polimer eriyiklerin entropi elastikliği olarak bilinir. Başlangıçta düzensiz haldeki makro moleküller (Şekil 3.28) deformasyon sırasında yönlenerek yapı düzeni artar, bu durumda entropi düşer. Ancak moleküler yapı zamanla eski yapısını kazanmaya çalışacaktır (Termodinamiğin İkinci Yasası). Yani, polimer yeni şartlara uyum sağlamıştır. Makro moleküllerin eski dolaşık hale gelmeleri (gevşeme) zamana bağlı olarak gerçekleşir. Eriyik kalıptan çıktıktan sonra da gevşeme devam eder.



Şekil 3.25: Viskoelastik akışkanın kısmi elastik deformasyonu

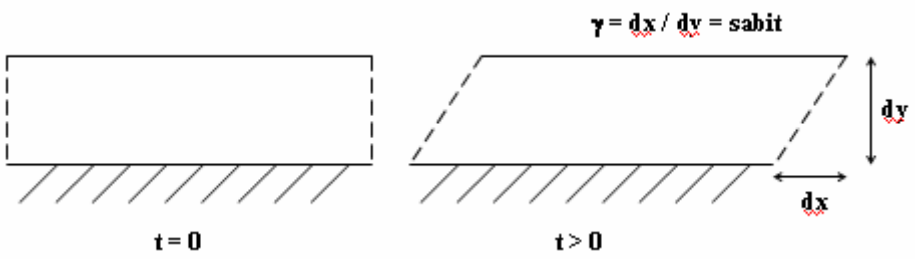


Şekil 3.26: Şekil 3.25 'te meydana gelen gerilme gevşemesine yay-damper modeli benzeşimi

Şekil 3.25 'teki olay Şekil 3.26 'daki yay-damper modeliyle açıklanabilir. Başlangıçta model serbest haldedir, yani akışkan henüz dar kesite girmemiştir. t = 0 anında model ucundan aniden çekilerek Δl kadar uzatılır. Yeterince uzun süre beklenirse elastik şekil değiştiren yay, viskoz damper sayesinde yavaşça gevşeyerek başlangıçtaki, gerilmeye maruz olmadığı duruma gelir. Yani kalıp dar kesiti uzun olduğu taktirde, başlangıçta akış doğrultusunda yönlenen zincirli yapı zamanla eski düzensiz, dolaşık moleküler yapısını alır.

Yönlenmedeki gevşeme için gereken zaman sıcaklık arttıkça azalır. Çünkü sıcaklığın artması molekül hareketliliğini ve boşlukları arttırır **(Michaeli, 2003)**.

Gerilme gevşemesini irdelemenin bir başka yolu da Şekil 3.27 'deki gibi eriyiğe sabit kayma şekil değişimi uygulanıp gerilme gevşemesini zamana bağlı ölçmektir. Şekil 3.28 'de görüldüğü gibi polimer eriyiğin gerilmesi üstel olarak azalmaktadır.



Şekil 3.27: Kayma şekil değişiminin sabit tutulması

Zamana bağlı gerilme değerlerinden gevşeme modülüne geçersek,

$$G(t) = \frac{\tau(t)}{\gamma} \qquad \textbf{(3.58)}$$

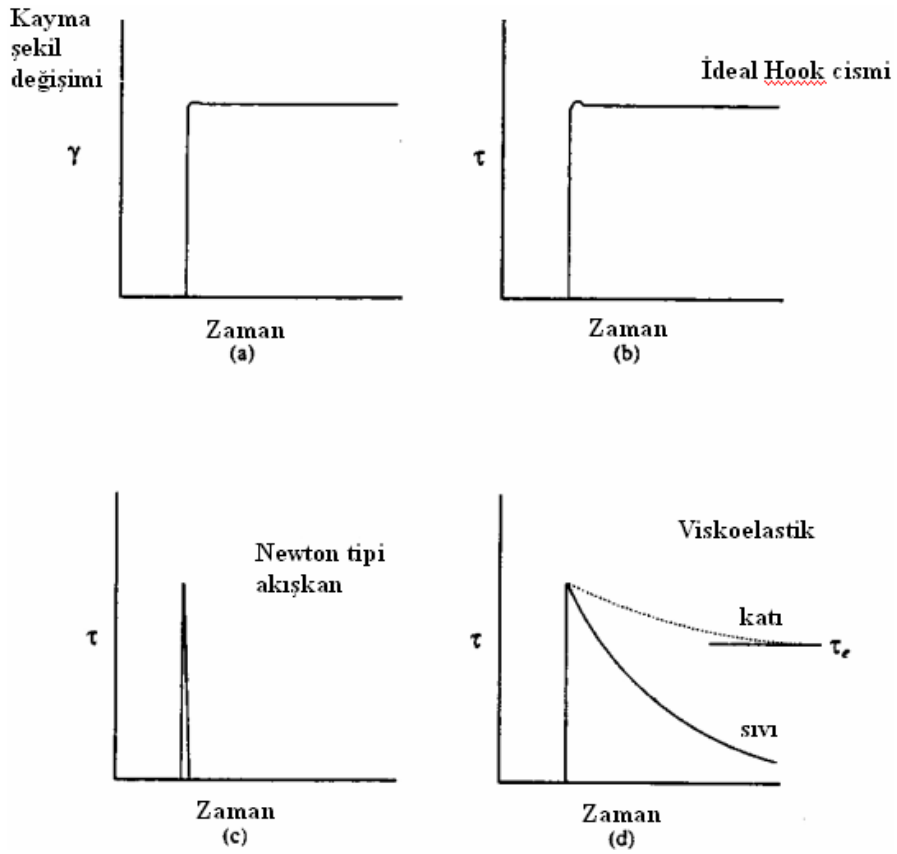
olur. Polimer akışkanlar için $\gamma < \gamma_c \cong 0{,}5$ için gevşeme modülü aynı eğri üzerine düşer. Bu durum lineer viskoelastiklik olarak adlandırılır. Ancak kritik kayma şekil değişiminden, $\gamma > \gamma_c$ sonra gevşeme modülü γ 'dan bağımsız kalamaz . Bu davranışa lineer olmayan viskoelastik davranış denir. Bu durumda gevşeme modülü şöyle ifade edilir:

$$G(\gamma,t) = \frac{\tau(\gamma,t)}{\gamma} \quad (\gamma > \gamma_c \text{ için}) \qquad \textbf{(3.59)}$$

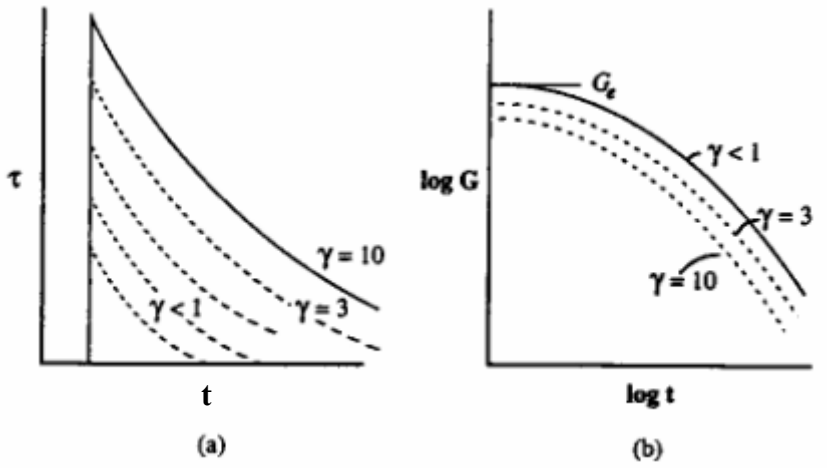
Şekil 3.29 'da polidimetilsiloksan için lineer ve lineer olmayan viskoelastik davranış görülebilir.

Polimer akışkanların elastik özelliklerinin bir başka etkisi de kayma viskozitesinin zamana bağımlı olmasıdır. Şekil 3.30 'da polibutadien çözeltisi için sabit kayma şekil değiştirme hızında kayma viskozitesinin zamanla değişimi gösterilmiştir. Şekilde farklı kayma şekil değiştirme hızları için de eğriler verilmiştir. Polimerler için zamana bağlı kayma viskozitesi,

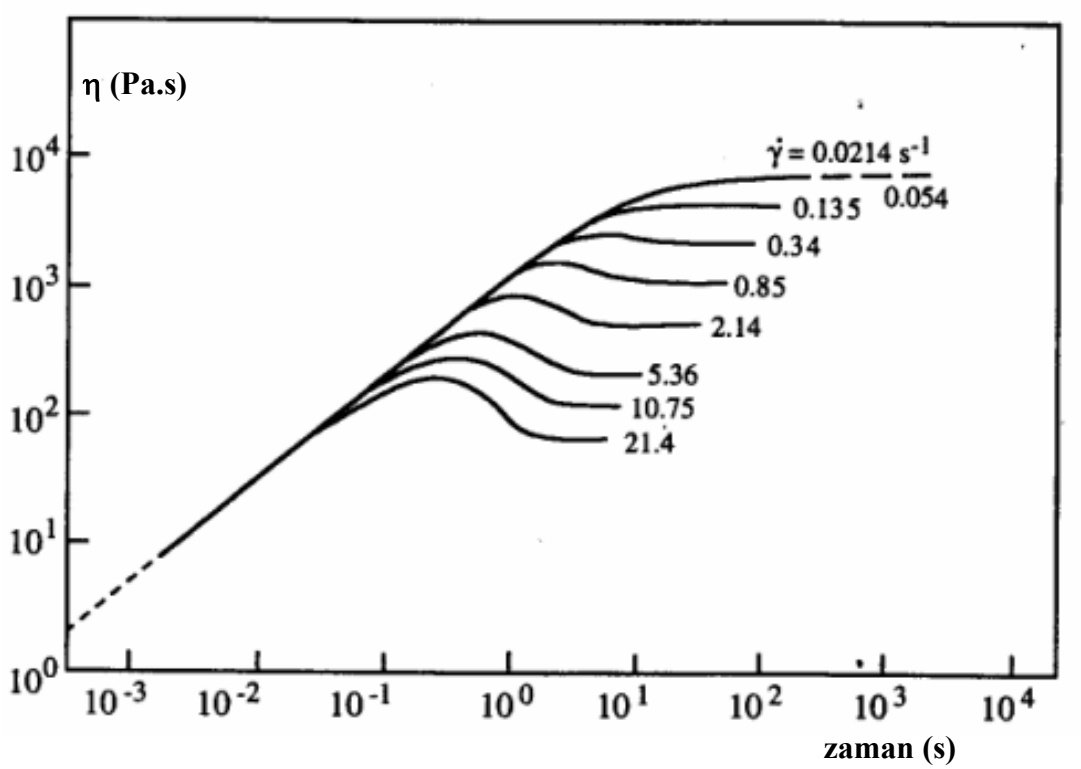
$$\eta(\dot{\gamma},t) = \frac{\tau_{yx}(\dot{\gamma},t)}{\dot{\gamma}} \qquad \textbf{(3.60)}$$



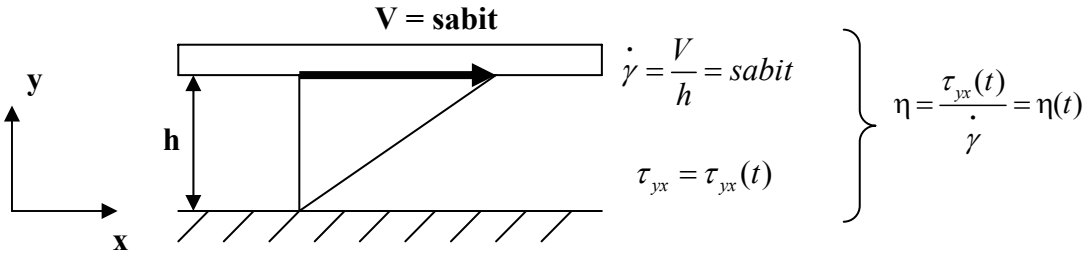
Şekil 3.28: Aniden oluşturulan Şekil 2.27 'deki gibi sabit kayma şekil değişimine karşı zamana bağlı gerilme cevabı. **a)** Kayma şekil değişimi-zaman eğrisinde küçük bir maksimum noktası görülüyor. Kontrol sistemlerinde karşılaşılan sürekli rejime geçme süresidir. **b)** İdeal Hook cisminde gerilme gevşemesi olmaz. **c)** Newton tipi akışkanda kayma şekil değişimi sabitlendiği anda gerilme kaybolur. **d)** Viskoelastik akışkanda zamanla gerilme sıfıra giderken, viskoelastik cisimde artık gerilme kalır.



Şekil 3.29: Polidimetilsiloksan için zamana ve kayma şekil değişimine bağlı kayma gerilmesi gevşemesi grafiği. Kayma şekil değişimi aniden sıfırdan sabit bir değere getiriliyor. **a)** Gerilme aniden yükseliyor, daha sonra üstel olarak gerilme gevşemesi gerçekleşiyor. **b)** Logaritmik ölçekte gevşeme modülü G 'nin zamanla değişimi çıkarılınca, $\gamma < 1$ için $G(\gamma,t)$ eğrilerinin üst üste düştüğü görülüyor, yani bu polimer için $\gamma_c = 1$ dir **(Macosko, 1994).**



Şekil 3.30: Hidrokarbon yağı içindeki % 7,55 polibutadien çözeltisine ait sabit kayma şekil değiştirme hızında (Şekil 3.31) zamanla kayma viskozitesinin değişimi. Grafikte farklı kayma hızları için eğriler verilmiştir. **(Macosko, 1994)**



Şekil 3.31: Sabit kayma şekil değiştirme hızında kayma viskozitesinin zamanla değişimi. Şekil 3.30 'daki grafikteki deneyi temsilen.

formülü ile verilebilir. Şekil 3.30 'daki en küçük kayma şekil değiştirme hızı, $\dot{\gamma}$ = 0.0214 1/s doğrusal viskoelastik bölgededir. Çünkü viskozite artık $\dot{\gamma}$ 'dan bağımsızdır. Aynı zaman değerinde viskozite eğrileri kesilirse viskozitenin kayma şekil değiştirme hızıyla azaldığı görülecektir. Ayrıca kayma viskozitesinin daimi rejimdeki değerine gelmeden önce bir tepe noktasından geçtiği görülüyor. Kayma şekil değiştirme hızının yüksek, zamanın küçük değerlerinde doğrusal viskoelastik davranış görülüyor. Doğrusal viskoelastik davranıştan sapmalar yüksek kayma şekil değiştirme hızıile zaman ilerledikçe görülüyor.

Polimer akışkanların kayma viskoziteleri kayma şekil değiştirme hızının artmasıyla azalmasına rağmen, uzama viskoziteleri uzama hızının artmasıyla artmaktadır. Ayrıca uzama viskozitesi elastik özelliklerden dolayı zamana bağlıdır. Zamana bağlı tek eksen uzama viskozitesi,

$$\eta_u(\dot{\in},t)=\frac{\sigma_{xx}(\dot{\in},t)-\sigma_{yy}(\dot{\in},t)}{\dot{\in}} \qquad \textbf{(3.61)}$$

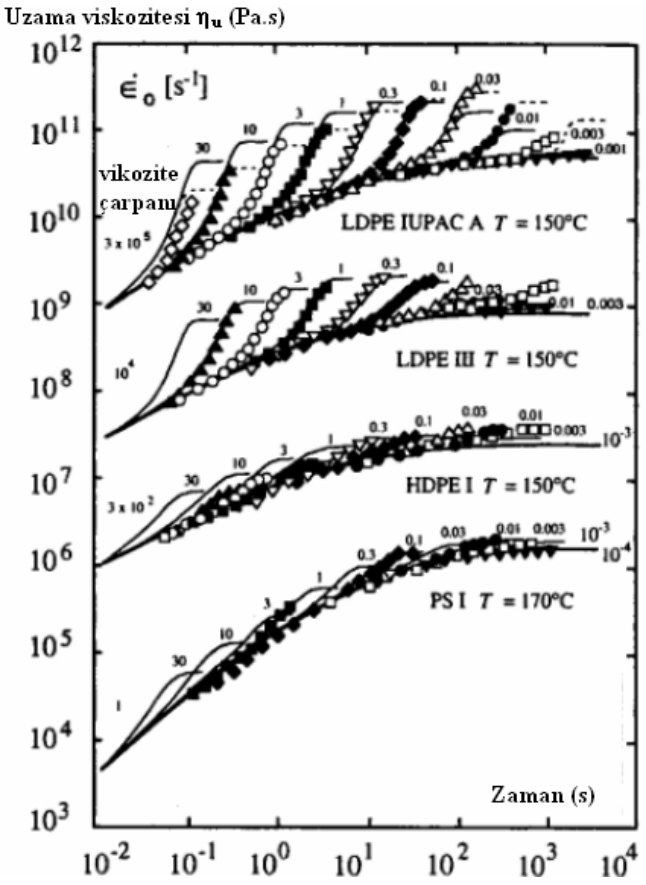
formülü ile verilebilir. Şekil 3.32 'de farklı polimerlere ait uzama viskozitelerinin zamanla ve uzama hızıyla değişimleri görülmektedir. Şekilde dallanmış zincir yapısına sahip polimerlerin (LDPE) uzama hızıyla vizkozitelerinin artışı daha belirgindir. Çok küçük uzama hızlarında polimerler, lineer viskoelastik davranış sergilemektedirler, yani viskozite uzama hızından bağımsızdır. Yine Şekil 3.32 'de kısa dallı zincire sahip PS ve HDPE 'nin uzama hızıyla viskozitelerinin artışı LDPE 'e göre daha yavaştır.

Uzama viskozitesindeki doğrusal olmayan değişimin, moleküler yapıya olan duyarlılığı, kayma viskozitesininkinden daha fazladır ve bu iki viskozitenin doğrusal olmayan değişimleri arasında herhangi bir güvenilir bağıntı yoktur **(Macosko, 1994).**

Özetle polimer akışkanlar zincirli moleküler yapıya sahip olmalarından dolayı viskoz özelliklerin yanında elastik özelliklere de sahiptirler. Bundan dolayı reolojik özelliklerde zamana bağımlılık; şekil değişiminin artmasıyla uzama viskozitesinin artması, kayma viskozitesinin azalması ve açısal şekil değişiminin olduğu akışlarda normal gerilmelerin ortaya çıkması gözlenmektedir. Reoloji ve polimer viskoelastik davranışları hakkında **(Macosko, 1994)** ve **(Bird ve diğ., 1987)** kaynaklarından faydalanılabilir.

3.2. Termodinamik Özellikler

Yoğunluk, özgül ısı kapasitesi, ısı iletim katsayısı, ısı yayılım katsayısı gibi polimer eriyiğin termodinamik özellikleri, enerji ve momentum denklemlerinde yer aldığı için önem arz etmektedir. Özellikle ısı geçişinin önemli olduğu problemlerde örneğin kalibre soğutma kapasitesinin belirlenmesinde, izotermal olmayan kalıp içi akışlarda veya ekstrüderin ısıtma kapasitesinin belirlenmesinde termodinamik



Şekil 3.32: Dört farklı eriyiğin farklı uzama hızlarındaki $\dot{\epsilon}$, uzama viskozitelerinin zamana bağlı değişimi. Çarpan kullanılarak eğriler dikey eksende kaydırılmıştır. **(Macosko, 1994)**

özelliklerin sıcaklığa bağlı değişimlerinin bilinmesi gereklidir. Bu çalışmada kalıp içi eriyik akışı incelendiğinden, özelliklerin bu bölgedeki sıcaklığa bağlı değişimleri ile ilgilenilecektir.

Ekstrüzyon kalıplarında 300 barın altında basınç etkisi ihmal edilebilir **(Michaeli, 2003)**. Bazı polimer özellikleri eriyik bölgedeki sıcaklıklarda sabit kabul edilebilir. Bu durum amorf yapılı polimerler için camsı geçiş sıcaklığı T_g 'nin üstünde, yarı kristalli polimerler için erime sıcaklığı T_m 'nin üstünde geçerlidir.

3.2.1. Yoğunluk

Polimerlerin yoğunluğu metallerinkinin çok altındadır. Oda sıcaklığında yoğunlukları 1 g/cm^3 civarındadır ve sıcaklığa, basınca ve soğuma hızına bağlıdır. Yüksek soğuma hızında moleküller pozisyon alacak zaman bulamazlar. Bu yüzden

düşük soğuma hızlarında ürünün yoğunluğu nispeten yüksek kalır. Ayrıca yoğunluk basınçla artar.

Şekil 3.33 'te çeşitli polimerlerin 1 barda özgül hacimlerinin sıcaklıkla değişimi verilmiştir. Yarı kristalli polimerlerin erime sıcaklığında özgül hacimleri aniden artmaktadır.

Ekstrüzyon kalıbı akışlarında basınç nispeten düşük olduğu için akışkan sıkıştırılamaz kabul edilebilir, eriyik sıcaklığında ise kalibrede olduğu gibi çok büyük değişimler yoktur.

Sıcaklığa bağlı yoğunluğun değişimi,

$$\rho(T) = \rho(T_0)\frac{1}{1+\alpha(T-T_0)} \qquad \textbf{(3.62)}$$

formülü ile verilebilir. Burada,

α : ısıl genleşme katsayısı

$\rho(T_0)$: referans sıcaklıktaki yoğunluk

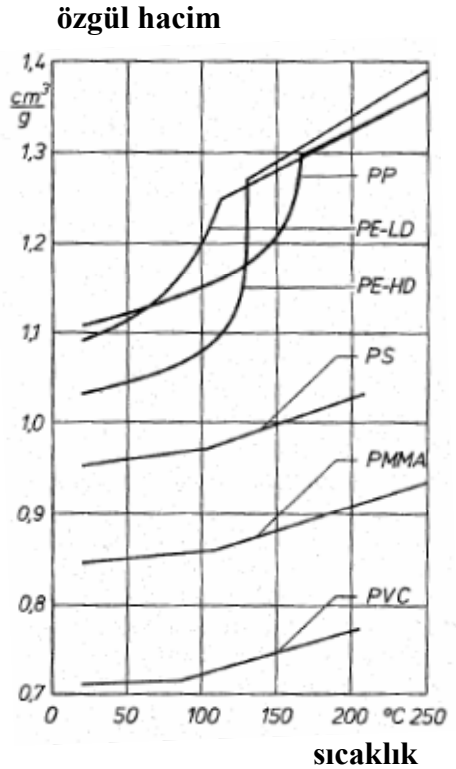
$\rho(T)$: T sıcaklığındaki yoğunluk

olmaktadır. Ancak bu ifade doğrusal değişimlerde geçerlidir. Amorf yapılı polimerlerde camsı geçiş sıcaklığının, yarı kristalli polimerlerde ise erime sıcaklığının üstünde veya altında yukarıdaki ifade kullanılabilir.

3.2.2. Isı İletim Katsayısı

Polimerlerin ısıl iletkenlikleri çok düşüktür ve değeri metallerinkinin iki veya üçte biri kadar olup 0,12 W/mK civarındadır. Bu yüzden homojen ısıtılmaları ve soğutulmaları zordur. Bu durum ısıl gerilmelere, soğuma esnasında oluşan çekme boşluklarına, çıkan ürün profilinde şekil bozukluğuna neden olur.

Yarı kristalli polimerlerin ısı iletim katsayıları erime sıcaklığının altında çok değişken olsa da eriyik bölgede sabit olduğu kabul edilebilir (Şekil 3.34).



Şekil 3.33: Çeşitli polimerlerin özgül hacimlerinin sıcaklıkla değişimi **(Michaeli, 2003)**

Isı iletim katsayısı, k basınçla doğru orantılıdır. Ekstrüzyon işleminde 300 bara kadar değişimler % 5 kadardır. Bundan dolayı basıncın etkisi ihmal edilir.

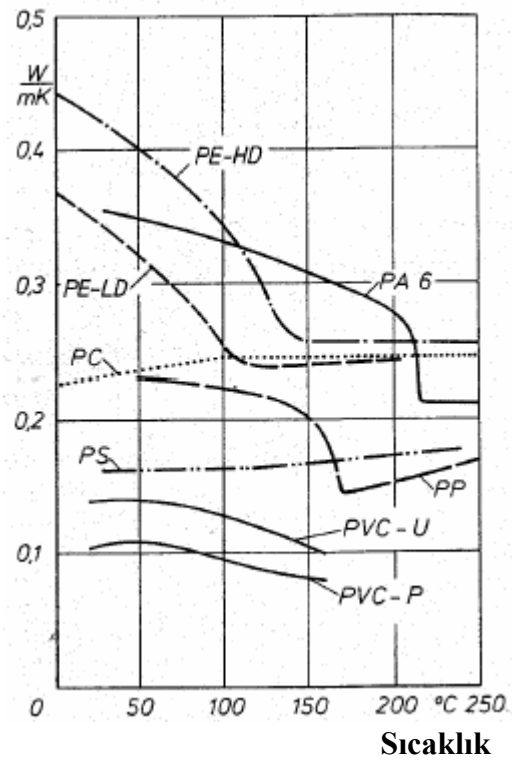
3.2.3. Özgül Isı Kapasitesi

Özgül ısı kapasitesi, c_p plastikler için 1,5 J/gK civarındadır ve çeliklere göre yaklaşık üç kat fazladır. Basıncın c_p 'ye etkisi ihmal edilebilir. Amorf yapılı polimerlerin c_p değerleri T_g sıcaklığının altında ve üstünde yaklaşık doğrusal artmaktadır (Şekil 3.35).

3.2.4. Isı Yayılım Katsayısı

Isı yayılım katsayısı, α,

$$\alpha = \frac{k}{\rho c_p} \qquad \textbf{(3.63)}$$

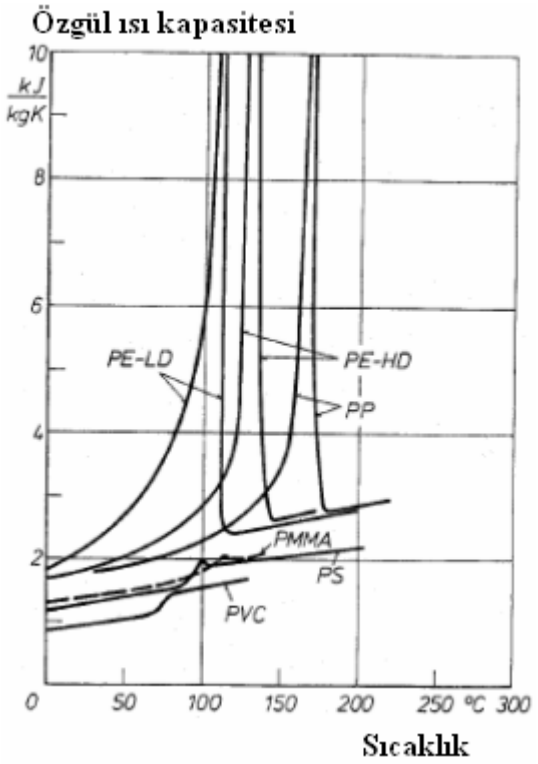


Şekil 3.34: Çeşitli polimerlerin ısı iletim katsayılarının sıcaklığa bağlı değişimleri **(Michaeli, 2003)**

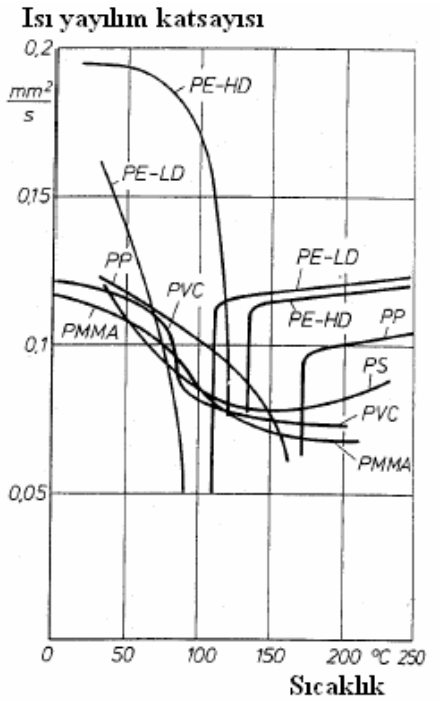
formülü ile bilinen k, ρ ve c_p değerlerinden hesaplanır. Çoğunlukla ekstrüzyon prosesinde α sabit kabul edilebilir. Bununla birlikte sıcaklığa, basınca ve moleküler yönlenmeye bağlı olarak değişir. Isı yayılım katsayısı 100 bara kadar % 1-2 ancak değişir.

Tablo 3.4: Polimerlerin bazı önemli özellikleri. n: kuvvet yasası indeksi **(Rauwendaal, 2001)**

Polimer	**k (W/m°C)**	**c_p (kj/kg°C)**	**ρ (kg/m^3)**	**T_g (°C)**	**T_m (°C)**	**n (-)**
PS	0,12	1,20	1,06	101	-	0,30
PVC	0,21	1,10	1,40	80	-	0,30
PMMA	0,20	1,45	1,18	105	-	0,25
LDPE	0,24	2,30	0,92	-120/-90	120	0,35
LLDPE	0,24	2,30	0,92	-120/-90	125	0,60
HDPE	0,25	2,25	0,95	-120/-90	130	0,50
PP	0,15	2,10	0,91	-10	175	0,35



Şekil 3.35: Çeşitli polimerlerin sıcaklığa bağlı özgül ısı kapasitesi değişimleri **(Michaeli, 2003)**



Şekil 3.36: Çeşitli polimerlerin sıcaklığa bağlı ısı yayılım katsayıları **(Michaeli, 2003)**

Tablo 3.5: Bazı polimerlerin 150 °C 'deki termodinamik özellikleri
(Baird ve Collias, 1998)

Polimer	**k (W/m°C)**	**c_p (kj/kg°C)**	**ρ (kg/m^3)**
LDPE	0,241	2,57	0,782
HDPE	0,255	2,65	0,782
PP	0,142	2,80	0,867
PVC	0,166	1,53	1,31
PS	0,167	2,04	0,997
PMMA	0,195	-	1,11

4. KORUNUM DENKLEMLERİ

Bir akış alanını tümüyle tanımlamak için hız vektörünün; yoğunluk, basınç ve sıcaklık gibi termodinamik büyüklüklerin her noktada, her an bilinmesiyle mümkün olmaktadır. Akış alanının çözümünde kütle, momentum ve enerji korunum denklemleri olmak üzere üç temel korunum denklemi kullanılmaktadır.

Bu denklemlerin yanında malzemenin reolojik özellikleri ile ilgili bünye denklemlerinin (constitutive equation) kullanılması gerekmektedir. Malzeme denklemleri, gerilme ile şekil değiştirme arasındaki ilişkiyi basınç ve sıcaklığın etkilerini de içerecek şekilde veren bağıntılardır.

İzotermal bir polimer eriyik akışını tanımlamak için;

-süreklilik denkleminin,
-momentumun korunumunun
-malzeme reoloji denkleminin

kullanılması gerekmektedir. Isı geçişinin önemli olduğu akışlarda enerji denklemi ile hal denkleminin de probleme dahil edilmesi gerekmektedir.

4.1. Süreklilik denklemi

En genel haliyle süreklilik denklemi,

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+\frac{\partial\left(\rho v_x\right)}{\partial x}+\frac{\partial\left(\rho v_y\right)}{\partial y}+\frac{\partial\left(\rho v_z\right)}{\partial z}=0 \qquad \textbf{(4.1)}$$

şeklindedir ve her türlü akış koşulu için geçerlidir. Polimer ekstrüzyonunda akış sıkıştırılamaz kabul edilebilir ve kütlenin korunumu denklemi aşağıdaki biçimi alır:

$$\nabla.\vec{V}=\frac{\partial v_x}{\partial x}+\frac{\partial v_y}{\partial y}+\frac{\partial v_z}{\partial z}=0 \qquad \textbf{(4.2)}$$

Yani akış sırasında yoğunluk sabittir.

4.2. Hareket Denklemleri

Newton ‘un İkinci Yasasına göre bir sisteme etki eden toplam kuvvet o sistemin kütlesi ile ivmesinin çarpımına eşittir.

$$\sum \vec{F} = m\vec{a} \tag{4.3}$$

Newton ‘un İkinci Yasası, polimer eriyiklerin akışı için aşağıdaki gibi yazılabilir **(Baird ve Collias, 1998)**:

$$\underbrace{\rho \frac{D\vec{V}}{Dt}}_{\substack{\text{birim hacim}\\ \text{için atalet}\\ \text{kuvvetleri}}} = \underbrace{\rho\vec{g}}_{\substack{\text{birim hacim}\\ \text{başına}\\ \text{yer çekimi}\\ \text{kuvveti}}} - \underbrace{\nabla p}_{\substack{\text{birim hacim}\\ \text{başına}\\ \text{basınç}\\ \text{kuvvetleri}}} + \underbrace{+\nabla.\tau_{ij}}_{\substack{\text{birim hacim başına}\\ \text{viskoz kuvvetler}\\ \text{(normal + kesme kuvvetleri)}}} \tag{4.4}$$

Eşitliğin sol tarafı birim hacim için atalet kuvvetini, sağ tarafındaki terimler sırasıyla birim hacim başına yerçekimi kuvvetini, basınç kuvveti ve viskoz (sürtünme) kuvvetlerini göstermektedir.

Hareket denkleminin kartezyen koordinatlardaki x bileşeni;

$$\rho\left(\frac{\partial v_x}{\partial t} + v_x\frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y\frac{\partial v_x}{\partial y} + v_z\frac{\partial v_x}{\partial z}\right) = \rho g_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \left(\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z}\right) \tag{4.5}$$

şeklindedir. Polimer eriyik akışında Re sayısı çok küçük olduğu için, (4.5) Denklemi ‘nin sol tarafındaki atalet kuvvetleri ihmal edilmektedir. Yer çekimi kuvveti de ihmal edilebilmektedir. Yani polimer eriyik akışında viskoz kuvvetler ile basınç kuvvetleri etkenlerdir. Başka bir deyişle polimerik akışkanların viskoziteleri çok yüksek olduğu için akış esnasında oluşan yüksek viskoz kuvvetler ancak kalıp gerisindeki basınç kuvvetleri ile dengelenmektedir. Bazı akışkanlara ait yaklaşık viskozite değerleri Tablo 4.1 ‘de verilmiştir. Ayrıca polimer işlemlerinde akış laminer karakterdedir.

Tablo 4.1: Bazı akışkanların yaklaşık viskozite değerleri **(Barnes ve diğ., 1989)**

Akışkan	**Yaklaşık viskozite (Pa.s)**
Cam eriyiği (500 °C)	10^{40}
Polimer eriyiği	10^{3}
Bal	10^{1}
Gliserol	10^{0}
Zeytin yağı	10^{-1}
Su	10^{-3}
Hava	10^{-5}

4.3. Enerji Denklemi

İzotermal olmayan akış koşullarında enerji denkleminin de çözülmesi gerekir. Enerji denkleminin çözülmesiyle akış alanındaki sıcaklık dağılımı belirlenmiş olur.

Genel haliyle enerji denklemi aşağıda verilmiştir **(Baird ve Collias, 1998)**.

$$\underbrace{\rho c_v \frac{DT}{Dt}}_{\substack{\text{birim hacim}\\ \text{başına}\\ \text{taşınımla ısı}\\ \text{transferi}}} = \underbrace{-p\left(\nabla.\vec{V}\right)}_{\substack{\text{birim hacim}\\ \text{başına}\\ \text{sıkıştırma}\\ \text{işi}}} + \underbrace{\nabla\left(k\nabla T\right)}_{\substack{\text{birim hacim}\\ \text{başına}\\ \text{iletimle ısı}\\ \text{transferi}}} + \underbrace{\Phi}_{\substack{\text{birim hacim}\\ \text{başına}\\ \text{viskoz ısı}\\ \text{üretimi}}} \tag{4.6}$$

Polimer ekstrüzyonu işleminde eriyiği sıkıştırılamaz kabul edilebilmektedir. Bu yüzden Denklem (4.6) 'dan *sıkıştırma işi* terimi atılır.

$$\rho c_v \frac{DT}{Dt} = \nabla\left(k\nabla T\right) + \Phi \tag{4.7}$$

Enerji denklemi kartezyen koordinatlarda açık şekilde aşağıdaki gibi yazılmaktadır.

$$\begin{aligned} &\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + v_x \frac{\partial T}{\partial x} + v_y \frac{\partial T}{\partial y} + v_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = -\left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right) \\ &+ \left\{ \sigma_{xx} \frac{\partial v_x}{\partial x} + \sigma_{yy} \frac{\partial v_y}{\partial y} + \sigma_{zz} \frac{\partial v_z}{\partial z} \right\} \\ &+ \left\{ \tau_{xy} \left(\frac{\partial v_y}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial y} \right) + \tau_{yz} \left(\frac{\partial v_z}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial z} \right) + \tau_{zx} \left(\frac{\partial v_x}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial x} \right) \right\} \end{aligned} \tag{4.8}$$

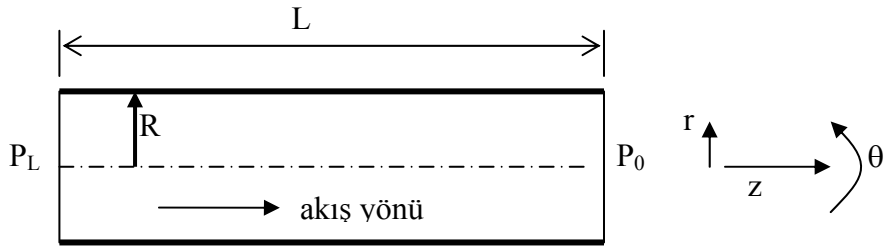
Burada q_x, q_y, q_z ısı akıları Fourier Yasası yardımıyla,

$$q_x = -k\frac{\partial T}{\partial x} \quad , \quad q_y = -k\frac{\partial T}{\partial y} \quad , \quad q_z = -k\frac{\partial T}{\partial z} \tag{4.9}$$

hesaplanır.

Polimer malzemelerin akışında akış doğrultusunda iletimle ısı transferi ihmal edilmektedir. Kalıp içi akışlarda yoğunluk, ısı iletim katsayısı ve ısıl yayılım katsayısı sabit kabul edilebilmektedir. Ancak kalibrede soğuma sırasında bu kabuller geçerliliğini yitirmektedir.

4.4. Newton Tipi Olmayan Bir Akışkanın Boru İçerisinden Akışı



$$\Delta P = P_L - P_0$$

Şekil 4.1: Boru içerisinden akış

Şekil 4.1 'de görüldüğü gibi akışkan R yarıçaplı, L uzunluğundaki bir borudan +z yönünde akmaktadır. Giriş basıncı P_L, çıkış basıncı P_0 dır. Burada maksat Q debisi ile ΔP basınç farkı arasındaki ilişkiyi tespit etmektir. Bunun için öncelikle dairesel kesitteki hız dağılımının bilinmesi gerekmektedir. Silindirik koordinatlarda z doğrultusundaki hareket denklemini yazalım.

$$\rho\left(\underbrace{\frac{\partial v_z}{\partial t}}_{1} + \underbrace{v_r}_{2}\frac{\partial v_z}{\partial r} + \underbrace{\frac{v_\theta}{r}}_{2}\underbrace{\frac{\partial v_z}{\partial \theta}}_{3} + v_z\underbrace{\frac{\partial v_z}{\partial z}}_{4}\right) = \rho g_z - \frac{\partial p}{\partial z}$$
$$-\left(\frac{1}{r}\frac{\partial(r\tau_{rz})}{\partial r} + \frac{1}{r}\underbrace{\frac{\partial \tau_{\theta z}}{\partial \theta}}_{3} + \underbrace{\frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z}}_{4}\right) \tag{4.10}$$

Aşağıdaki kabullerden dolayı yukarıda işaretlenen numaralı terimler denklemden atılır.

1) Akış daimi, yani zamandan bağımsız,

2) v_r, $v_\theta = 0$ yalnız $v_z \neq 0$, yani tek boyutlu akış,

3) Akışta eksenel simetri var,

4)Tam gelişmiş akış.

Ayrıca akış laminerdir ve cidarda kayma yoktur, yani akışkan hızı cidarda sıfırdır. Problem izotermal akış koşulları için çözülecektir. Yukarıdaki kabuller sonucunda denklem,

$$-\frac{1}{r}\frac{\partial(r\tau_{rz})}{\partial r}-\frac{\partial p}{\partial z}=0 \qquad \textbf{(4.11)}$$

halini alır. Burada,

$$\frac{\partial p}{\partial z}=-\frac{\Delta P}{L} \qquad \textbf{(4.12)}$$

olduğundan,

$$-\frac{1}{r}\frac{\partial(r\tau_{rz})}{\partial r}+\frac{\Delta P}{L}=0 \qquad \textbf{(4.13)}$$

olur. Düzenleme yapılırsa,

$$\frac{\partial(r\tau_{rz})}{\partial r}=\frac{\Delta P}{L}r \qquad \textbf{(4.14)}$$

elde edilir. İntegrasyon sonucu,

$$\tau_{rz}=\frac{\Delta P}{L}\frac{r}{2}+\frac{C}{r} \qquad \textbf{(4.15)}$$

bulunur. τ_{rz}, r = 0 da sonlu büyüklük olması gerektiğinden C = 0 alınır.

$$\tau_{rz} = \frac{\Delta P}{L}\frac{r}{2} \tag{4.16}$$

Akışkan Kuvvet Yasası modeline uyan bir akışkan olsun. Kuvvet Yasası modeli:

$$\tau_{rz} = m\left(-\frac{dv_z}{dr}\right)^n \tag{4.17}$$

şeklindedir. Boru akışında dv_z/dr negatif olduğundan terimin önüne eksi işareti konmaktadır. Burada m ve n modelin sabitleri olup anlamları Kuvvet Yasası 'nın tarif edildiği bölümde verilmiştir. Genellikle n sabiti polimerler için 0,2 ile 0,7 arasında değişmektedir **(Michaeli, 2003)**.

(4.16) ile (4.17) denklemleri birbirine eşitlenirse,

$$m\left(-\frac{dv_z}{dr}\right)^n = \frac{\Delta P}{L}\frac{r}{2} \tag{4.18}$$

olur. Buradan,

$$\frac{dv_z}{dr} = -\left(\frac{\Delta P}{2mL}\right)^{\frac{1}{n}} r^{\frac{1}{n}} \tag{4.19}$$

olur. İntegrasyon sonucu,

$$v_z = -\left(\frac{\Delta P}{2mL}\right)^{\frac{1}{n}} \frac{r^{\frac{1}{n}+1}}{\frac{1}{n}+1} + C_1 \tag{4.20}$$

şeklinde bulunur. İntegrasyon sabitini bulmak için r = R 'de $v_z = 0$ kaymama sınır şartı kullanılır:

$$C_1 = \left(\frac{\Delta P}{2mL}\right)^{\frac{1}{n}} \frac{R^{\frac{1}{n}+1}}{\frac{1}{n}+1} \tag{4.21}$$

Hız dağılımı,

$$v_z(r) = \left(\frac{\Delta P}{2mL}\right)^{\frac{1}{n}} \frac{R^{\frac{1}{n}+1}}{\frac{1}{n}+1}\left[1-\left(\frac{r}{R}\right)^{\frac{1}{n}+1}\right] \tag{4.22}$$

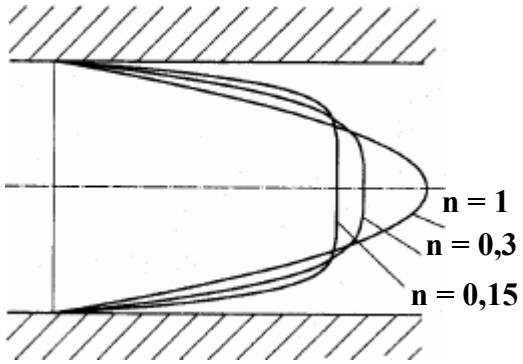
olarak bulunur. Maksimum hızı $\frac{dv_z}{dr} = 0$ 'dan.

$$v_{z_maks.} = \left(\frac{\Delta P}{2mL}\right)^{\frac{1}{n}} \frac{R^{\frac{1}{n}+1}}{\frac{1}{n}+1} \tag{4.23}$$

şeklinde bulunur. Hızın maksimum hıza oranı ise,

$$\frac{v_z}{v_{z_maks}} = \left[1-\left(\frac{r}{R}\right)^{\frac{1}{n}+1}\right] \tag{4.24}$$

olarak bulunur. n yerine 1 konursa Newton tipi akışkanlar için laminer akışta geçerli ifade bulunmuş olur. Şekil 4.2 'de Denklem (4.24) kullanılarak hesaplanmış hız profilleri görülmektedir.



Şekil 4.2: Farklı Kuvvet Yasası üslerinde hız profilleri

Debiyi bulmak için hızı kesit alanı üzerinde integre etmek gerekmektedir.

$$Q = \int v_z dA = \int_{r=0}^{R} \left(\frac{\Delta P}{2mL}\right)^{\frac{1}{n}} \frac{1}{\frac{1}{n}+1}\left[R^{\frac{1}{n}+1} - r^{\frac{1}{n}+1}\right].\underbrace{2\pi r.dr}_{dA} \tag{4.25}$$

$$Q = \left(\frac{\Delta P}{2mL}\right)^{\frac{1}{n}} \frac{2\pi}{\frac{1}{n}+1} \int_{r=0}^{R} \left[r.R^{\frac{1}{n}+1} - r^{\frac{1}{n}+2} \right] dr \qquad \textbf{(4.26)}$$

Ara işlemler yapılınca debi için aşağıdaki ifade bulunur.

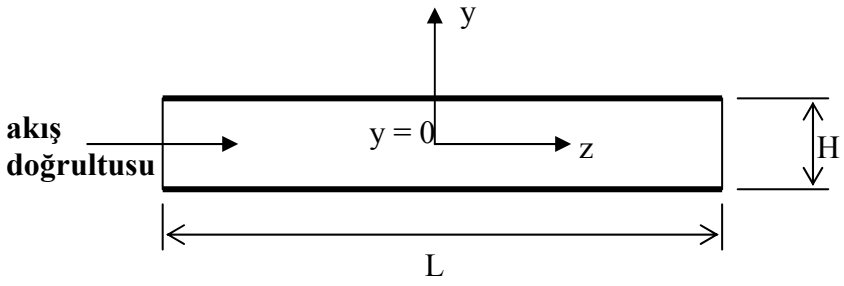
$$Q = \left(\frac{\Delta P}{2mL}\right)^{\frac{1}{n}} \frac{\pi R^{\frac{1}{n}+3}}{\frac{1}{n}+3} \qquad \textbf{(4.27)}$$

Kesitteki ortalama hızı bulmak için debi kesit alanına bölünürse,

$$\overline{v_z} = \frac{Q}{A} = \frac{Q}{\pi R^2} \quad \Rightarrow \quad \overline{v_z} = \left(\frac{\Delta P}{2mL}\right)^{\frac{1}{n}} \frac{R^{\frac{1}{n}+1}}{\frac{1}{n}+3} \qquad \textbf{(4.28)}$$

elde edilir.

Şekil 4.3 'deki uzunluğu L, genişliği W ve yüksekliği H olan dikdörtgen kesitli kanal için benzer işlemler kartezyen koordinatlardaki momentum denkleminin z bileşeni kullanılarak yapılabilir. x doğrultusundaki değişimleri ihmal etmek için W>>H olmalıdır. Bu durumda hesaplanan ifadeler Tablo 4.2 'de verilmiştir.



Şekil 4.3: Dikdörtgen kesitli kanaldan akış. Kağıt düzlemine dik doğrultudaki genişlik, W. (W/H>20)

Tablo 4.2: Kuvvet Yasası kullanılarak dikdörtgen kesitli kanal için elde edilen ifadeler (W/H > 20) **(Baird ve Collias, 1998)**

	Kuvvet Yasası modeli : $\tau_{yz} = m.\left(-\frac{dv_z}{dy}\right)^n$
Kayma gerilmesi dağılımı	$\tau_{yz}(y) = \left(\frac{\Delta P}{L}\right) y$
Hız dağılımı	$v_z(y) = \frac{H}{2\left(\frac{1}{n}+1\right)}\left(\frac{H.\Delta P}{2mL}\right)^{\frac{1}{n}}\left[1-\left(\frac{2y}{H}\right)^{\frac{1}{n}+1}\right]$ $y \geq 0$
Ortalama hız	$\overline{v_z} = \frac{H}{2\left(\frac{1}{n}+2\right)}\left(\frac{H.\Delta P}{2mL}\right)^{\frac{1}{n}}$
Debi	$Q = \frac{WH^2}{2\left(\frac{1}{n}+2\right)}\left(\frac{H.\Delta P}{2mL}\right)^{\frac{1}{n}}$

5. DENEYLER VE SAYISAL SİMÜLASYONLAR

Bu çalışma kapsamında polimer malzemenin akış davranışları üzerine deneyler yapılmış ve Polyflow 3.10.0 yazılımı kullanılarak deneyler için sayısal simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Deney 1 ve simülasyon sonuçları bir önceki bölümde türetilen analitik ifadelerden yararlanılarak irdelenmiştir.

Bu bölümün son kısmında ise Şekil 1.1 'deki hedef profil için simülasyonlar yapılmıştır. Simülasyonlardan yararlanılarak profilin imali için öneriler yapılmıştır.

5.1. Deney 1

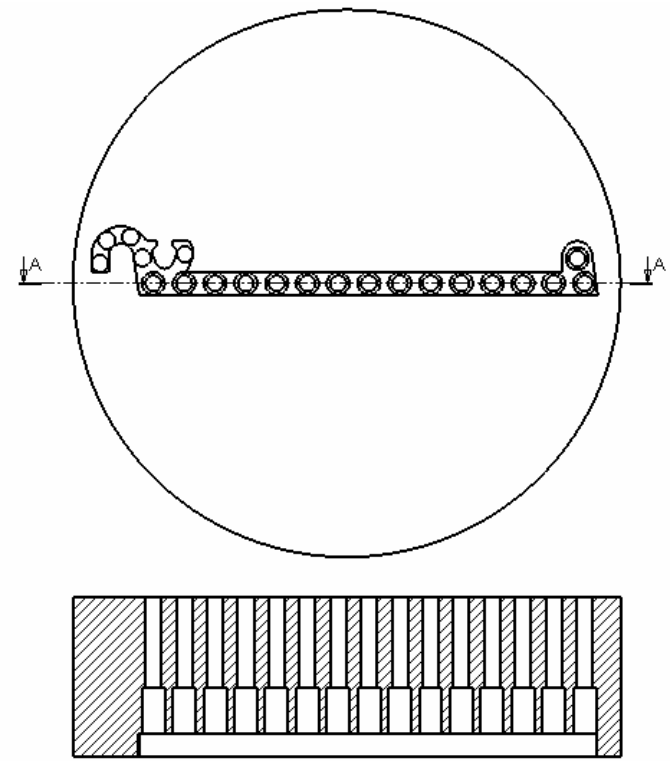
5.1.1. Deneyin Amacı

Dairesel kesit basit bir geometriye sahiptir. Eğer delik içerisindeki polimer malzemenin akışına hakim olunabilirse, Şekil 1.1 'deki profilin farklı çaplardaki deliklerle beslenmesi sağlanabilecektir (Şekil 5.1). Nihai hedef çıkışta ortalama hızların mümkün olduğunca birbirine eşitlenmesi olduğundan, Şekil 5.1 'dekine benzer şekilde büyük çaplı delikler akışa karşı direnci arttırmak için kademeli yapılmalıdır. Bu amaçla Şekil 5.2 'de görüldüğü gibi çizgisel olarak dizilmiş deliklerin bulunduğu plaka deneyde kullanılmıştır. Şekil 1.2 'deki kalıp düzlüğü olarak bu parça kullanılmıştır. Plakada dokuz delik vardır ve delik merkezleri arasındaki mesafe eşittir.

5.1.2. Deneyin Yapılışı

Deneyde polimer malzeme olarak HDPE kullanılmıştır. Kafa sıcaklığı ve ekstrüder vidasının devir sayısı sabit tutularak daimi rejimde malzeme akışı sağlanmıştır. Delikten çıkan eriyik için kronometre ile süre tutulmuş ve bu süre zarfında çıkan malzemenin ağırlığı 0,0001 gram hassasiyetle ölçebilen hassas bir terazide tartılmıştır. Yani deneyde ölçtüğümüz verilerden yalnızca deliklerdeki kütlesel debi

dağılımını tespit edebilmekteyiz. Deney iki farklı kafa sıcaklığı ve devir sayısı için tekrarlanmıştır. Böylece Deney 1 dört farklı koşulda yapılmıştır.



Şekil 5.1: Profilin farklı çapta deliklerle beslenmesi

5.1.3. Deneyin Sonuçları

Deneyde ölçülen verilerden hesaplanan kütlesel debi değerleri Tablo 5.1 'de verilmiştir. Görüldüğü gibi sabit kafa sıcaklığında devir sayısı iki kat artınca kütlesel debi de yaklaşık olarak iki kat artmıştır ve kütlesel debinin deliklere dağılımı çok değişmemiştir (Tablo 5.2).

Sabit devir sayısında kafa sıcaklığı 210 °C 'den 230 °C 'ye çıkarılınca deliklerden çıkan toplam kütlesel debide % 7 ile % 9 arasında artış olduğu görülmüştür (Tablo 5.3). Nedeni sıcaklığın artmasıyla polimer eriyik viskozitesinin azalması, yani akışa karşı oluşturduğu direncin zayıflamasıdır.

Devir sayısı 40 d/d ve kafa sıcaklığı 210 °C için inceleme yapılmıştır (Tablo 5.4). Denklem (5.1) kullanılarak eldeki kütlesel debi değerlerinden hacimsel debiye geçilebilmiştir.

$$Q = \dot{m} / \rho \qquad \textbf{(5.1)}$$

Tablo 5.1: Deney 1 için kütlesel debinin deliklere dağılımı (Delik boyları 35 mm dir.)

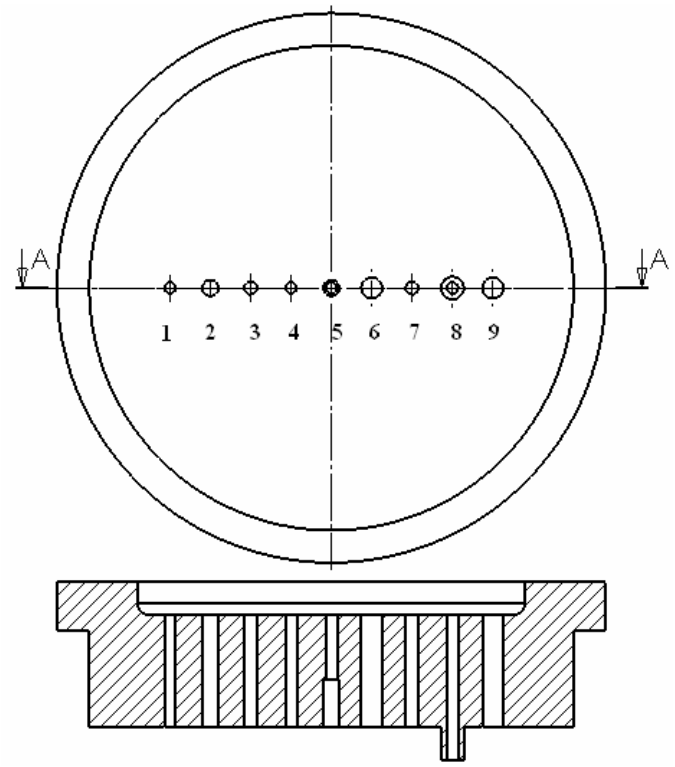
Delik Sıra No	**Delik Çapı (mm)**	**Kafa Sıcaklığı**			
		210 °C		230 °C	
		Devir Sayısı		**Devir Sayısı**	
		40 d/d	80 d/d	40 d/d	80 d/d
		KÜTLESEL DEBİ (g/dk)			
1	Ø3,5	3,34	6,54	3,76	6,89
2	Ø5	13,66	27,78	14,45	29,25
3	Ø4	4,58	8,81	4,77	9,44
4	Ø3,5	3,12	5,49	3,25	6,45
5	Ø3,5 (20 mm)→5 (15 mm)	4,01	7,80	4,21	8,23
6	Ø6,5	43,83	76,05	45,09	95,74
7	Ø4	4,34	8,65	4,90	9,03
8	Ø3,5 (akış boyu 10 mm uzun)	1,77	3,35	1,98	3,61
9	Ø6,5	49,68	101,69	52,13	106,28

Tablo 5.2: Sabit kafa sıcaklığında devir sayısının 40 d/d 'dan 80 d/d 'ya arttırılmasıyla kütlesel debideki artış oranı

Delik Sıra No	**Delik Çapı (mm)**	**Kafa Sıcaklığı**	
		210 °C	230 °C
		KÜTLESEL DEBİ ARTIŞI ($\dot{m}_{80\ d/d} / \dot{m}_{40\ d/d}$)	
1	Ø3,5	1,96	1,83
2	Ø5	2,03	2,02
3	Ø4	1,93	1,98
4	Ø3,5	1,76	1,98
5	Ø3,5 (20 mm)→5 (15 mm)	1,95	1,96
6	Ø6,5	1,74	2,12
7	Ø4	1,99	1,84
8	Ø3,5 (akış boyu 10 mm uzun)	1,89	1,82
9	Ø6,5	2,05	2,04
Toplamda (9 delik toplamı)		1,92	1,96

Polimer eriyiğin yoğunluğu literatürden faydalanılarak yaklaşık 0,75 g/cm^3 alınmıştır **(Baird ve Collias, 1998)**. Tablo 5.4 'e bakıldığında aynı çapa ve boya sahip deliklerden örneğin 6,5 mm çaplı delikten iki tane vardır. Merkeze yakın olanın debisi daha düşüktür. Şekil 5.4 'te görüldüğü gibi eriyik deliklere giriş yapmadan

önce kafa merkezine doğru akmaktadır. Dolayısıyla merkezden uzak deliklerde debi daha fazladır. Sonuçta buradan delik girişlerinde homojen basınç dağılımı olmadığı



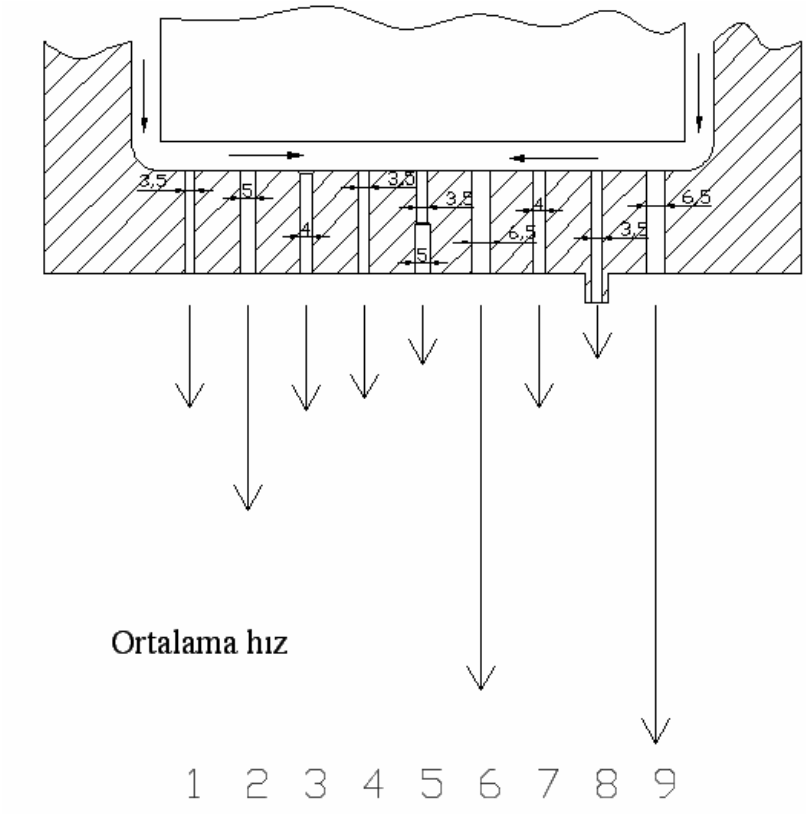
Şekil 5.2: Deney 1 'de kullanılan parça

Tablo 5.3: Sabit devir sayısında kafa sıcaklığının 210 °C 'den 230 °C 'ye çıkarılmasıyla kütlesel debideki artış oranı

Delik Sıra No	**Delik Çapı (mm)**	**Devir Sayısı**	
		40 d/d	80 d/d
		KÜTLESEL DEBİ ARTIŞI ($\dot{m}_{230\ °C}/\dot{m}_{210\ °C}$)	
1	Ø3,5	1,13	1,05
2	Ø5	1,06	1,05
3	Ø4	1,04	1,07
4	Ø3,5	1,04	1,17
5	Ø3,5 (20 mm)→5 (15 mm)	1,05	1,05
6	Ø6,5	1,03	1,26
7	Ø4	1,13	1,04
8	Ø3,5 (akış boyu 10 mm uzun)	1,12	1,08
9	Ø6,5	1,05	1,05
Toplamda (9 delik toplamı)		1,07	1,09

Tablo 5.4: Devir sayısı 40 d/d ve kafa sıcaklığı 210 °C iken hacimsel debi ve ortalama hızın deliklere dağılımı (yoğunluk 0,75 g/cm^3 olarak alındı)

Delik Sıra No	Delik Çapı (mm)	Hacimsel debi (cm^3/dk)	Hacimsel debinin yüzde dağılımı (%)	Kesitteki ortalama hız(m/dk)
1	Ø3,5	4,45	2,6	0,46
2	Ø5	18,21	10,6	0,93
3	Ø4	6,10	3,6	0,49
4	Ø3,5	4,16	2,4	0,43
5	Ø3,5 (20 mm) →5 (15 mm)	5,34	3,1	0,27
6	Ø6,5	58,44	34,2	1,76
7	Ø4	5,79	3,4	0,46
8	Ø3,5 (akış boyu 10 mm uzun)	2,36	1,4	0,25
9	Ø6,5	66,24	38,7	2,00
	TOPLAM	171,09	100	



Şekil 5.3: Deney 1 'de n = 40 d/d ve T_{kafa} = 210 °C şartlarındaki teste ait ortalama hızların birbirine göre büyüklükleri

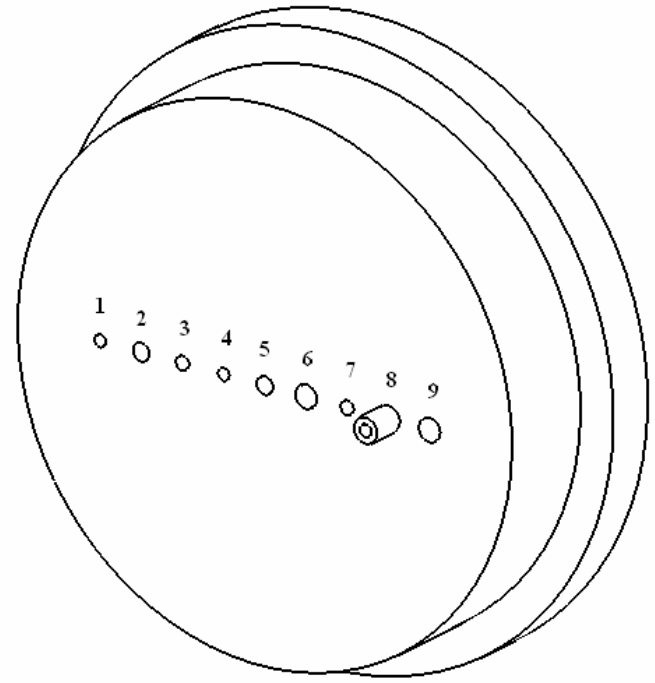
söylenebilir. Sonraki bölümlerde yer alan sayısal simülasyon sonuçları da bu tespiti doğrulamaktadır, ancak basınç değerlerindeki bu fark çok fazla değildir.

Şekil 5.4 ‘te dokuz deliğe ait ortalama hızların birbirine göre bağıl büyüklükleri oklarla gösterilmiştir. Eğer bu bir profilin eldesinde, kalıp çıkışındaki polimer eriyiğin içindeki hız dağılımı olsaydı, malzeme kalıptan çok dengesiz bir şekilde çıkacaktı ve başarılı bir imalat mümkün olmayacaktı.

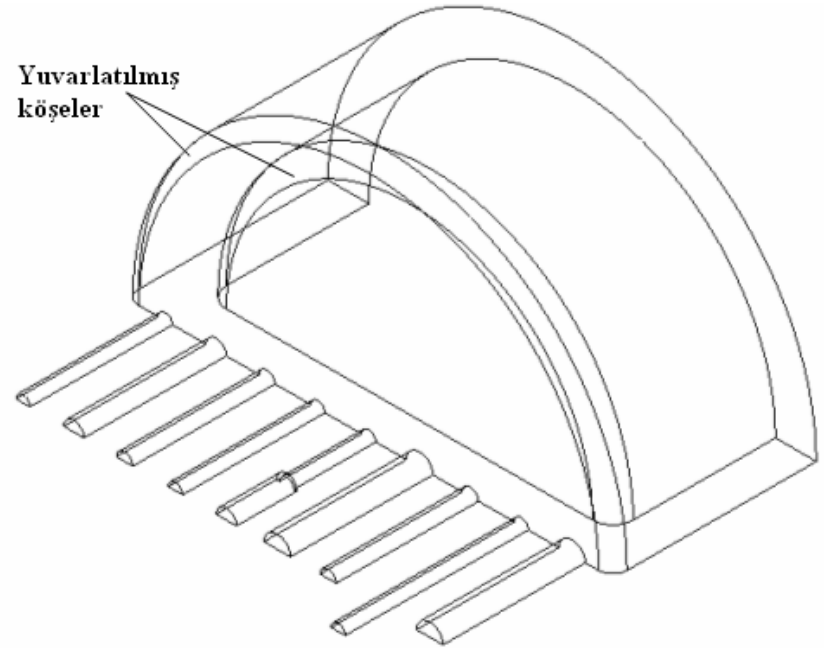
5.1.4. Simülasyonlar

Simülasyonlar daha önce de belirtildiği gibi Polyflow yazılımıyla gerçekleştirilmiştir, bu yazılım sonlu elemanlar yöntemini kullanmaktadır.

Deney 1 ‘de kullanılan kalıp düzlüğü Şekil 5.5 ‘de görülmektedir. Kalıp düzlüğünün arkasında kalan bölüm Şekil 1.2 ‘de olduğu gibidir. Kafa içindeki akışkan hacmi Şekil 5.6 ‘da görülmektedir. “Yuvarlatılmış köşelerin” varlığı sonlu eleman sayısını arttırmaktadır. Bu da bilgisayar mevcut hafızasının problemi çözmede yetersiz kalmasına neden olmaktadır. Bu köşelerin Şekil 5.7 ‘deki gibi keskin köşe yapılması



Şekil 5.4: Deney 1 ‘de kullanılan kalıp düzlüğü

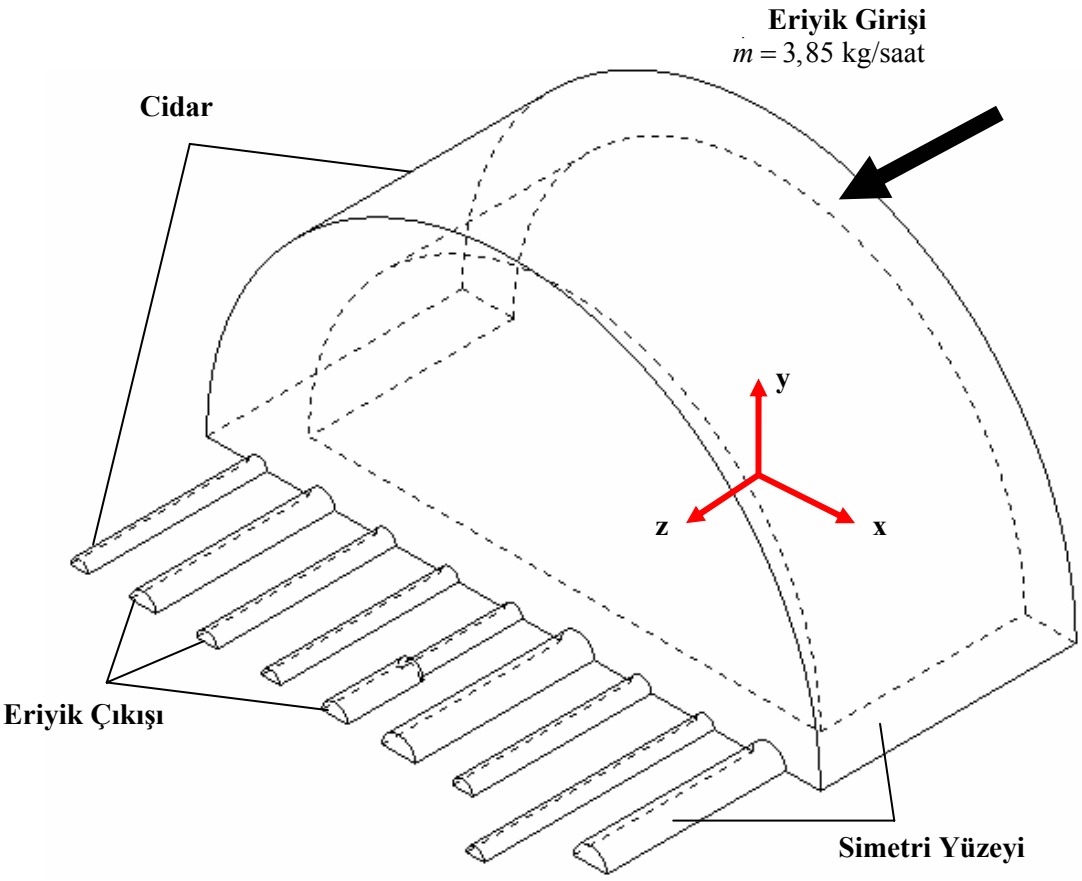


Şekil 5.5: Kafa içerisindeki akışkan hacminin bir kısmı

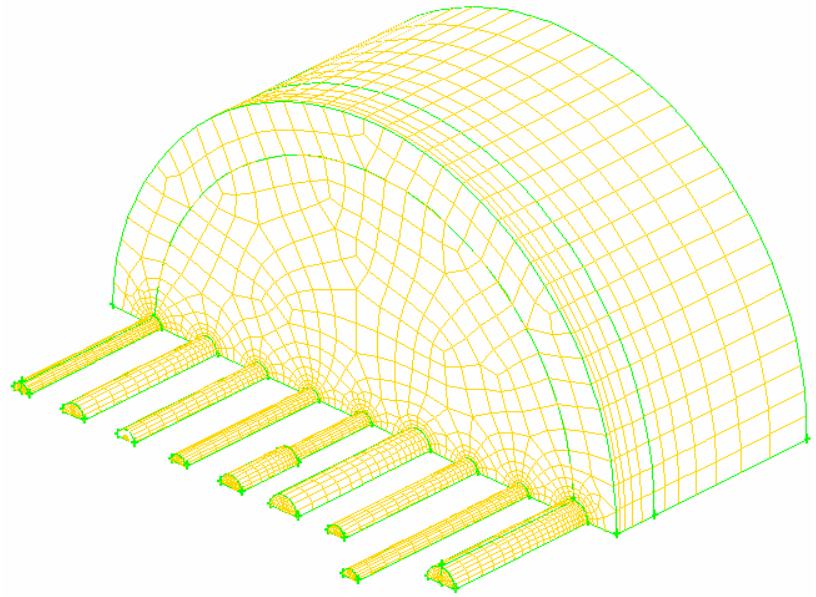
durumunda sonuçların değişmediğini simülasyonlar göstermiştir. Akışkan hızının çok düşük olması nedeniyle sözü geçen geometri değişikliği sonuçları etkilememiştir. Ayrıca yatay eksene göre geometri simetrik olduğundan Şekil 5.7 'de görüldüğü gibi akışkan hacminin yarısı simülasyonlarda kullanılmıştır. Simülasyonlar, devir sayısının 40 d/d, kafa sıcaklığının 210 °C olduğu durumda elde edilen sonuçlar kullanılarak yapılmıştır. Deneyden elde ettiğimiz tek sonuç kütlesel debinin deliklere dağılımıydı. Simülasyonda bu debi değerleri toplanarak Şekil 5.7 'de girişe toplam debi olarak verilmiştir. Simetri olduğundan simülasyonda bu debinin yarısı girilmiştir.

Deneyde HDPE kullanılmıştır. Ancak eriyiğin reolojik özellikleri bilinmediğinden, simülasyonlarda literatürdeki farklı iki HDPE malzemenin reolojik özellikleri kullanılmıştır. Yani simülasyonlar iki farklı malzemeyle gerçekleştirilmiştir.

Simülasyonlarda kullanılan çözüm ağı yapısı Şekil 5.8 'de görülmektedir.



Şekil 5.6: Simülasyonda kullanılan akışkan hacmi



Şekil 5.7: Deney 1 ‘e ait simülasyonlar için çözüm ağı

5.1.4.1. Kabuller ve Sınır Koşulları

Sıkıştırılamaz akış kabulü ile yani yoğunluğun sabit kabul edilmesiyle süreklilik denkleminin aşağıdaki biçimi simülasyonlarda kullanılmıştır.

$$\frac{\partial v_x}{\partial x}+\frac{\partial v_y}{\partial y}+\frac{\partial v_z}{\partial z}=0 \qquad \textbf{(5.2)}$$

Ekstrüzyon işleminde çok yüksek basınçlar oluşmadığı için bu kabul geçerlidir.

Akışın izotermal olduğu varsayılarak çözüm yapılmıştır, yani enerji denklemi (Denklem 4.6) çözülmemiştir.

Akış daimi kabul edilmiş, atalet ve yer çekimi kuvvetleri basınç ile viskoz kuvvetlerin yanında ihmal edilmiştir. Ekstrüzyon işlemi sürekli bir üretim yöntemi olduğundan daimi rejim yani zamandan bağımsız çözüm kabulü doğrudur. Genellikle polimer malzemelerin ekstrüzyonunda akış hızı oldukça yavaş ve eriyik viskozitesi bir hayli yüksek olduğu için atalet kuvvetleri göz ardı edilebilmektedir. Bu kabuller altında hareket denklemleri (3.1),

$$\nabla p=\nabla.\tau_{ij} \qquad \textbf{(5.3)}$$

şeklini alır. Bu denklemin üç bileşeni,

$$\begin{aligned}
\frac{\partial p}{\partial x}&=\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x}+\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y}+\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z}\\
\frac{\partial p}{\partial y}&=\frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x}+\frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y}+\frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z}\\
\frac{\partial p}{\partial z}&=\frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x}+\frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y}+\frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z}
\end{aligned} \qquad \textbf{(5.4)}$$

şeklinde yazılır. Yani akış sırasında viskoz kuvvetler basınç kuvvetleriyle dengelenmektedir. Ayrıca polimerin viskoelastik özellikleri ihmal edilmiştir. Denklem (5.4) 'ün sağ tarafındaki terimler, Bölüm 2.1.6 'daki Genelleştirilmiş Newton Tipi Akışkan Modeli ile modellenmiştir. Bunun için Denklem (3.36) kullanılmaktadır. Yani polimerin

$$\tau_{ij} = \eta(\dot{\gamma})\,\dot{\gamma}_{ij} \tag{3.36}$$

reolojik özelliklerinden yalnız kayma viskozitesinin kayma şekil değiştirme hızıyla azalması dikkate alınmıştır. Bu modelin kullanılması kalıp içindeki basınç dağılımının saptanmasında yeterli olmaktadır **(Macosko, 1994)**. Yani bu model kalıp çıkışında üniform hız dağılımı elde etmek için kullanıldığında büyük ölçüde başarılı olmaktadır. Ancak kalıp çıkışındaki şişme miktarlarının gerçeğe yakın bir şekilde hesaplanabilmesi için viskoelastik modellerin kullanılması gerekmektedir.

Her iki simülasyonda da Bird-Carreau viskozite modeli (Denklem 3.16) kullanılmıştır.

$$\frac{\eta - \eta_\infty}{\eta_0 - \eta_\infty} = \left[1 + \left(\lambda\dot{\gamma}\right)^2\right]^{\frac{n-1}{2}} \tag{3.16}$$

Simülasyon 1 ‘de kullanılan HDPE ‘e ait 200 °C ‘deki Bird – Carreau Modeli parametreleri aşağıda verilmiştir **(Baird ve Collias, 1998).**

$\eta_\infty = 0$: sonsuz kayma viskozitesi

$\eta_0 = 1520$: sıfır kayma viskozitesi [Pa.s]

$\lambda = 0{,}08$: doğal zaman [s]

$n = 0{,}5$: Kuvvet Yasası indeksi

Eriyik sıcaklığı 210 °C kabul edilmiştir. Bu sıcaklıktaki viskozite fonksiyonunu elde etmek için Denklem (3.54) kullanılmıştır.

$$\eta(\dot{\gamma}, T) = a_T.\eta_R(a_T.\dot{\gamma}) \tag{3.54}$$

Burada η_R referans sıcaklıktaki yani 200 °C ‘deki viskozite fonksiyonu olmaktadır. a_T sıcaklık kaydırma katsayısı, Denklem (3.45) ile hesaplanmaktadır.

$$a_T = \exp\left[\frac{E_0}{R}\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)\right] \tag{3.45}$$

Bu ifadedeki değişkenlere ait değerler aşağıda verilmiştir.

$E_0/R = 2830$ K HDPE için **(Baird ve Collias, 1998)**

$T = 210 + 273 = 483$ K (Eriyik sıcaklığı)

$T_0 = 200 + 273 = 473$ K (Referans sıcaklık)

Yukarıdaki işlemlerden sonra yeni Bird – Carreau Modeli (Denklem 3.16) sabitleri şunlardır:

$\eta_0 = 1343$ Pa.s

$\lambda = 0{,}071$ s

$n = 0{,}5$

Simülasyon 2 'de ise **Bird ve diğ. (1987)** 'den alınan bir HDPE malzemeye ait 170 °C 'deki Bird – Carreau Modeli parametreleri kullanılmıştır ve aşağıda değerleri verilmiştir.

$\eta_0 = 8920$ Pa.s

$\lambda = 1{,}58$ s

$n = 0{,}496$

Simülasyon 1 için yapılan işlemlere benzer şekilde eriyik sıcaklığı 210 °C için Bird – Carreau Modeli parametreleri hesaplanmıştır.

$\eta_0 = 5255$ Pa.s

$\lambda = 0{,}93$ s

$n = 0{,}496$

Sınır şartları her iki simülasyon için aynıdır. Şekil 5.7 'de sınır şartları isimlendirilmiştir.

Deneyde devir sayısı 40 d/d ve kafa sıcaklığı 210 °C iken çıkan eriyiğin kütlesel debisi 7,7 kg/saat olarak ölçülmüştür. Eriyiğin yoğunluğu 750 kg/m^3 alınarak $Q = \dot{m} / \rho$ formülüyle hacimsel debi $2{,}85158 \times 10^{-6}$ m^3/s olarak hesaplanmıştır. Simetriden dolayı Eriyik Girişi 'ne hacimsel debinin yarısı olan $1{,}42579 \times 10^{-6}$ m^3/s girilmiştir. Şekil 5.7 'de görülen giriş kesitinde tam gelişmiş akış koşullarındaki hız profili alınmıştır.

Cidarda kaymama sınır şartı uygulanmıştır, yani v_n normal hız bileşenleri ile v_t teğetsel hız bileşenlerinin sıfır olduğu kabul edilmiştir.

Simetri Yüzeyi 'nde v_n normal hız bileşeni ve τ kayma gerilmesinin değeri sıfırdır.

Eriyik dokuz adet delikten çıkmaktadır. Deliklerin çıkış kesitlerinde σ normal gerilme ve v_t teğetsel hız bileşeni sıfır değerindedir.

5.1.4.2. Simülasyon Sonuçları

Simülasyonlar sonucunda dokuz deliğe ait çıkış debileri Tablo 5.5 'de görülmektedir. Tablo 5.5 'in sağ iki sütununda simülasyonlarla deneyler arasındaki sapma verilmiştir. Burada tanımlanan sapma aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

$$\%\ \text{Sapma} = \frac{|Q_{simülasyon_i} - Q_{deney_i}|}{Q_{deney_i}} \times 100 \qquad \textbf{(5.5)}$$

Burada Q debiyi, i alt indisi delik numarasını ifade etmektedir. Sapma değerlerine bakıldığında Simülasyon 2 'deki viskozite modelinin deney sonuçlarına daha yakın değerler verdiği görülmektedir. Ancak simülasyonlarda kullanılan viskozite modellerinin literatürden alındığını, deneyde kullanılan malzemeye ait olmadığını hatırlamak gerekmektedir.

Tablo 5.6 'da ise iki simülasyon arasındaki sapma (Denklem 5.6) görülmektedir. Tabloda 8 numaralı delikte %50 'leye yakın sapma olduğu görülmektedir ve diğer

deliklerde de farklı sapmalar oluşmuştur. Buradan reolojik özellikleri farklı akışkanların farklı debi dağılımına neden oldukları görülebilmektedir. Yani kalıp

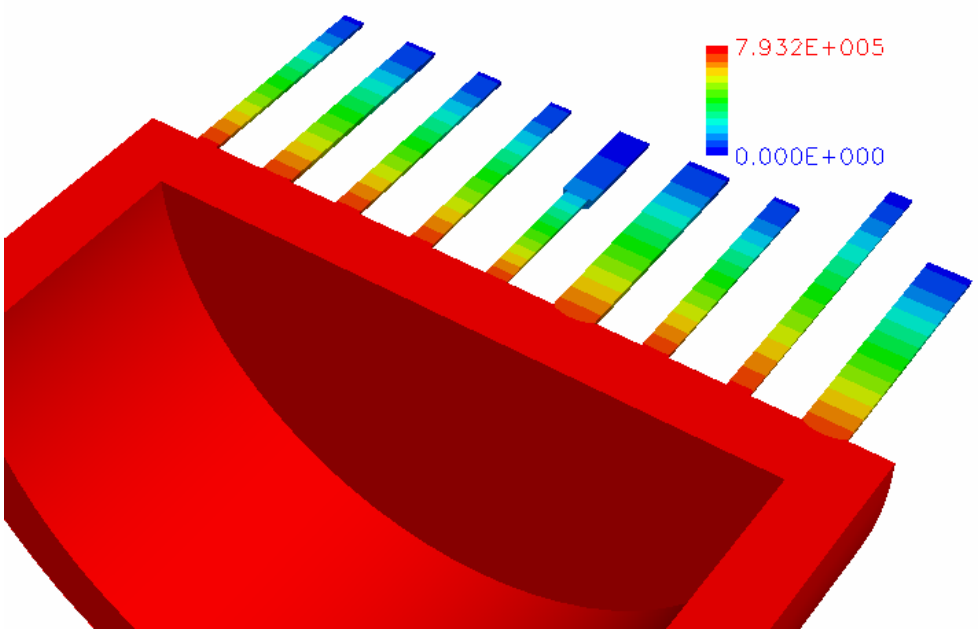
$$\%\ \text{Sapma} = \frac{|Q_{sim.1_i} - Q_{sim.2_i}|}{Q_{sim.2_i}} \times 100 \qquad \textbf{(5.6)}$$

Tablo 5.5: Devir sayısı 40 d/d, kafa sıcaklığı 210 °C şartlarında yapılan deney ile simülasyon sonuçlarının karşılaştırılması

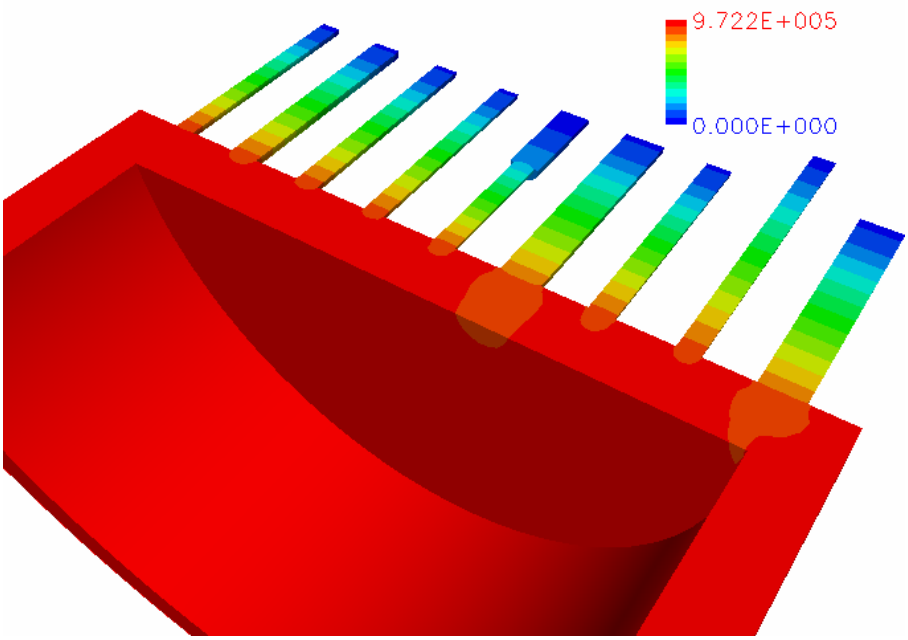
Delik Sıra No	Delik Çapı (mm)	Deney Debisi (m^3/s)	Sim.1 Debisi (m^3/s)	Sim.2 Debisi (m^3/s)	Deney ile Sim.1 debisi arasında sapma (%)	Deney ile Sim.2 debisi arasında sapma (%)
1	Ø3,5	3,71E-08	3,41E-08	2,85E-08	8,1	23,32
2	Ø5	1,52E-07	1,55E-07	1,53E-07	2,09	1,04
3	Ø4	5,08E-08	5,82E-08	5,13E-08	14,47	0,89
4	Ø3,5	3,47E-08	3,35E-08	2,71E-08	3,56	21,92
5	Ø3,5 (20 mm) →5 (15 mm)	4,45E-08	5,15E-08	4,37E-08	15,80	1,72
6	Ø6,5	4,87E-07	4,96E-07	5,16E-07	1,87	6,02
7	Ø4	4,82E-08	5,77E-08	4,93E-08	19,63	2,29
8	Ø3,5 (akış boyu 10 mm uzun)	1,97E-08	2,46E-08	1,65E-08	24,93	16,08
9	Ø6,5	5,52E-07	5,15E-07	5,40E-07	6,67	2,22
TOPLAM DEBİ		1,43E-06	1,43E-06	1,43E-06		

Tablo 5.6: Simülasyon 1 ile Simülasyon 2 çıkış debileri arasında yüzde sapma değerleri

Delik Sıra No	Delik Çapı (mm)	Sim.1 ile Sim.2 debileri arasındaki Sapma (%)
1	Ø3,5	19,83
2	Ø5	1,04
3	Ø4	13,45
4	Ø3,5	23,51
5	Ø3,5 (20 mm)→5 (15 mm)	17,83
6	Ø6,5	3,91
7	Ø4	16,95
8	Ø3,5 (akış boyu 10 mm uzun)	48,87
9	Ø6,5	4,55



Şekil 5.8: Simülasyon 1 ‘de basınç dağılımı (basınç birimi Pa) (simetri yüzeyi tarafından görünüm)



Şekil 5.9: Simülasyon 2 ‘de basınç dağılımı (basınç birimi Pa) (simetri yüzeyi tarafından görünüm)

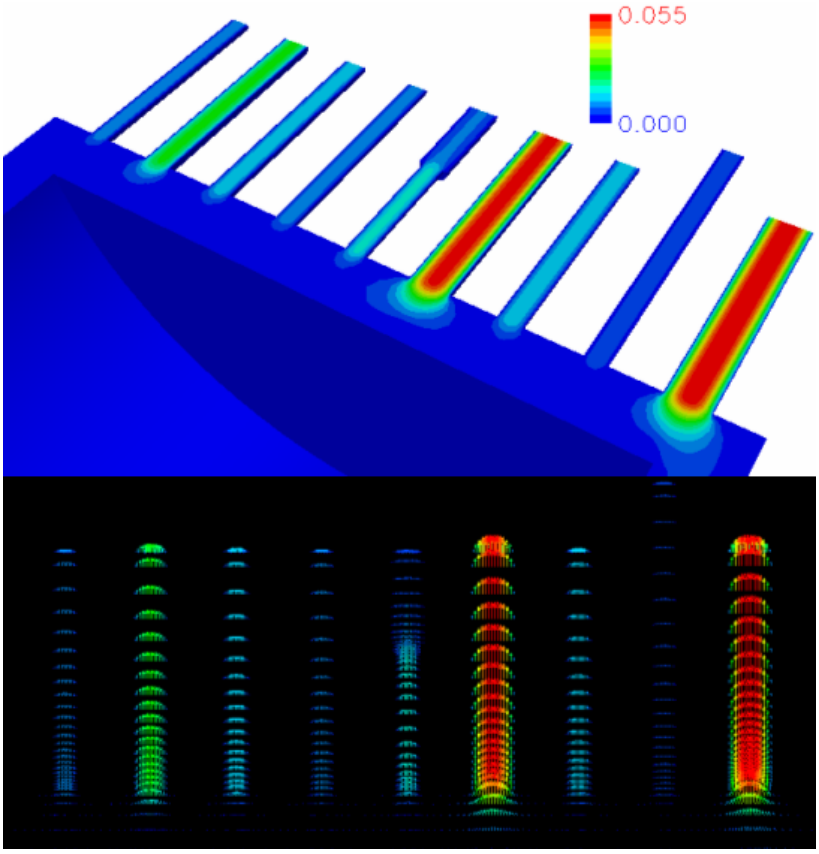
tasarımı yapılırken kullanılacak malzeme dikkate alınmalıdır. Reolojik özellikleri farklı malzeme kullanılırsa kalıp tasarımı başarılı bir üretimle sonuçlanmayabilir.

Şekil 5.9 ve 5.10 ‘a bakıldığında basınç dağılımları görülmektedir. Simülasyon 2 ‘deki malzeme daha viskoz olduğu için en yüksek basınç değeri de daha fazladır.

Simülasyon 1 ‘de giriş kesitindeki basınç 7,93 bar iken, Simülasyon 2 ‘de 9,72 bar ‘dır.

Ayrıca basınç kaybının çok büyük bir bölümü son bölümde yani silindirik deliklerin boyunca gerçekleşmektedir. Nedeni delik cidarlarındaki hız gradyenlerinin yüksek olmasıdır.

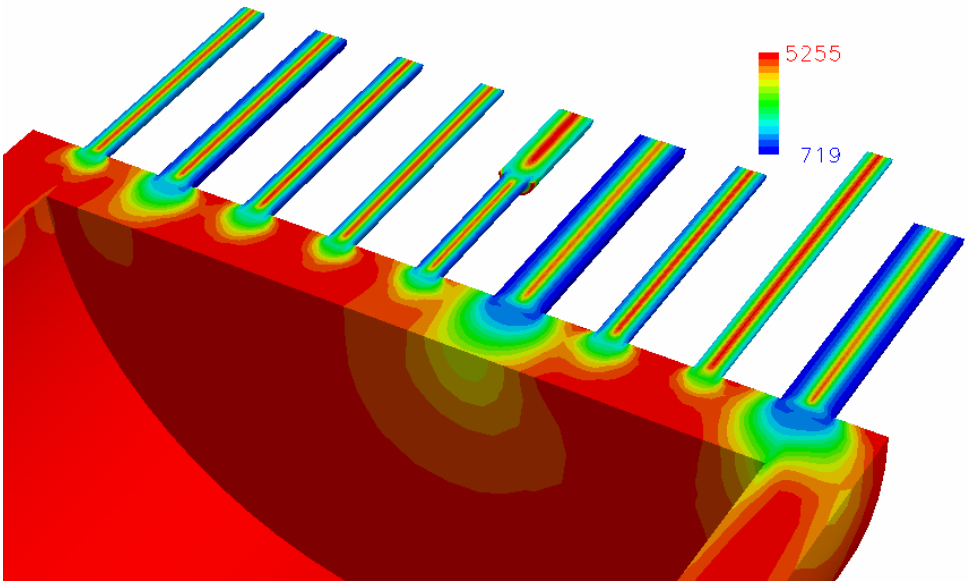
Şekil 5.11 ‘de Simülasyon 1 ‘den elde edilen hız dağılımı verilmiştir. Görüldüğü gibi büyük çaplı deliklerin akışa karşı dirençleri diğerlerine göre düşük olduğu için akışkan hızı bu deliklerde diğerlerine göre bir hayli yüksektir.



Şekil 5.10: Simülasyon 2 ‘ye ait hız dağılımı. Hızın birimi m/s ‘dir.

Şekil 5.12 ‘de Simülasyon 2‘ye ait viskozite katsayısı dağılımı verilmektedir. Şekil değiştirme hızının yüksek olduğu delik cidarlarında viskozite düşük, akış hızının çok yavaş olduğu torpido etrafında ve şekil değiştirme hızının düşük olduğu delik merkezlerinde viskozite yüksektir. Simülasyon sonuçlarına göre kayma viskozitesi, sıfır kayma viskozitesi değeri olan 5255 Pa.s ile 719 Pa.s arasında değişmektedir.

Şekil 5.13 ‘te delik girişlerinin bulunduğu hat boyunca basıncın değişimi görülmektedir. Basınç değerlerinde çok büyük farklar olmadığı fark edilmektedir. Delik giriş basınçlarında en yüksek basınç ile en düşük basınç arasındaki fark % 7 ‘dir (Tablo 5.7). Böylece delik giriş bölgesinde yaklaşık olarak homojen basınç dağılımı olduğunu kabul etmek mümkün olmaktadır. Böylece Şekil 1.2 ‘deki torpido kaldırıldığında geriye kalan geometriyi simüle etmek yeterli olabilecektir. Ayrıca simülasyon için geometride çözüm ağı oluştururken harcanan zaman azalacaktır.

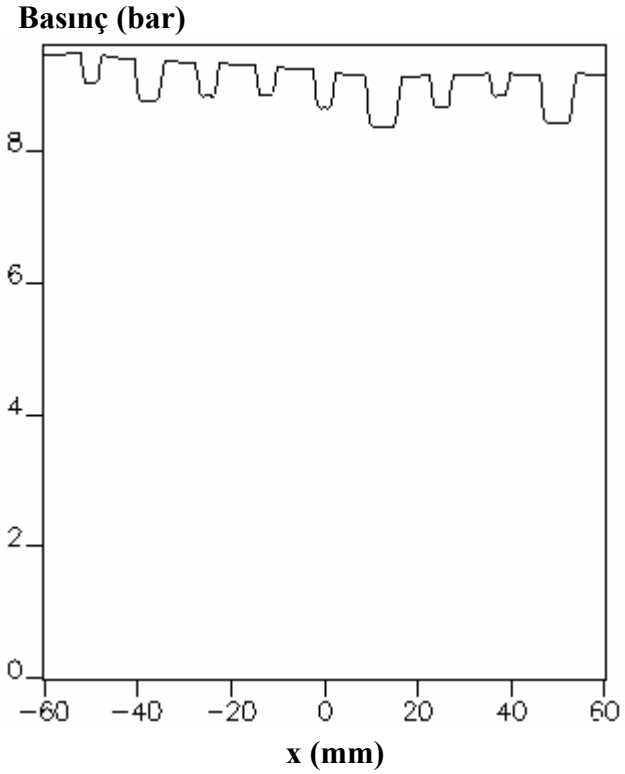


Şekil 5.11: Simülasyon 2 ‘de viskozite dağılımı. Viskozitenin birimi Pa.s ‘dir.

Şekil 5.14 ‘te 5 numaralı deliğe ait basınç ve maksimum hızın değişimi verilmiştir. Maksimum hızın değişimine bakıldığında delik girişinden çok kısa bir mesafe sonra hızın sabit değerine ulaştığı yani tam gelişmiş hız profiline ulaşma mesafesinin (giriş uzunluğu) az olduğu anlaşılmaktadır. Ayrıca basınç değişiminin doğrusal olduğu ve büyük çaplı delikte (Ø 5 mm) basınç gradyeninin beklendiği gibi daha az olduğu görülmektedir.

Şekil 5.15 ‘te 9 no ‘lu delikteki hız profilinin akış doğrultusunda gelişimi görülmektedir. Girişten 5 mm sonra akışın tam gelişmiş hale geldiği anlaşılmaktadır.

Simülasyonda viskoelastik özelliklerin göz ardı edildiği unutulmamalıdır. Viskoelastik akışkanların giriş uzunluğunun daha yüksek olduğu ifade edilmektedir **(Michaeli, 2003).**

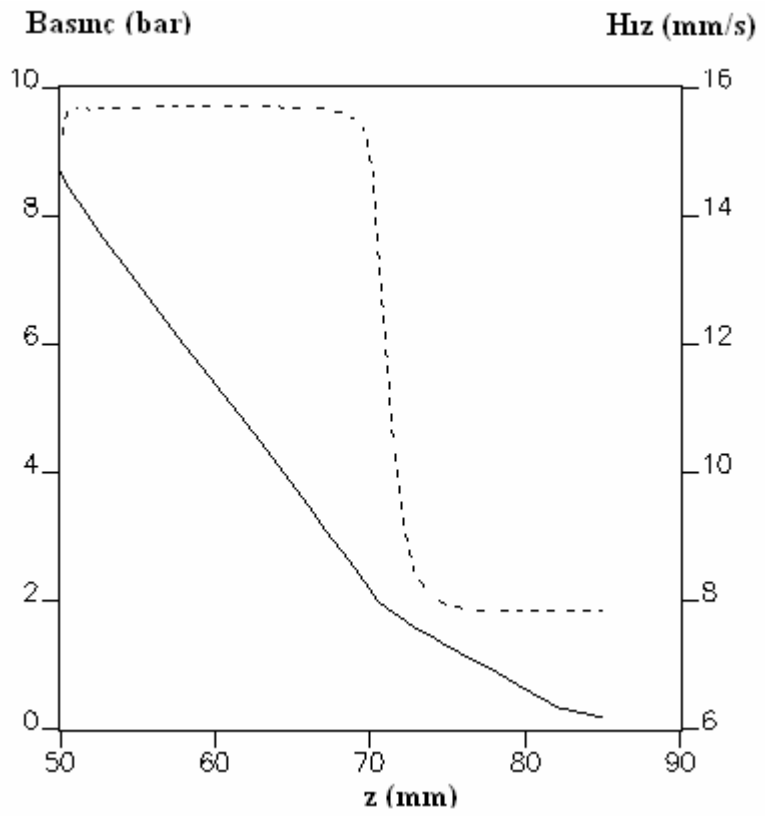


Şekil 5.12: Şekil 5.10 ‘daki simetri yüzeyinde delik girişlerinin bulunduğu hat boyunca basıncın değişimi

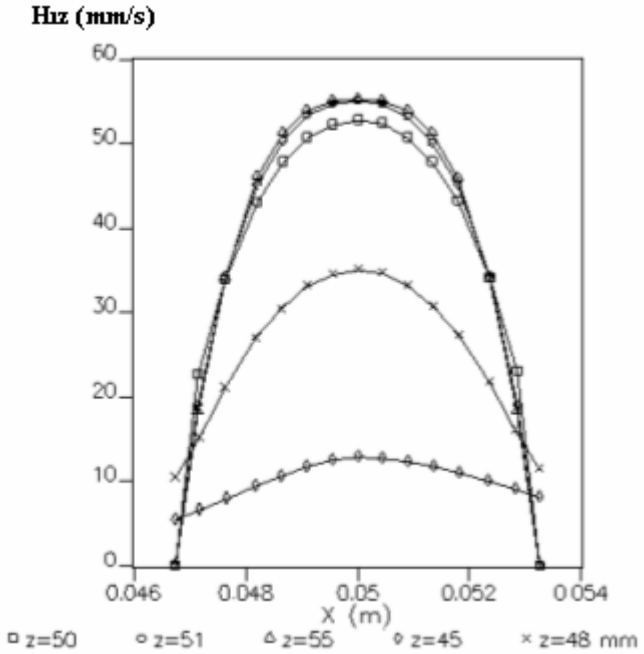
Tablo 5.7: Simülasyon 2 ‘de delik girişlerindeki basınç değerleri ve birbirlerine göre yüzdesel büyüklükleri

Delik Sıra No	**Delik Çapı (mm)**	**Basınç (bar)**	**Yüzde Büyüklük (%)**
1	Ø3,5	9,059	100
2	Ø5	8,787	97
3	Ø4	8,858	98
4	Ø3,5	8,862	98
5	Ø3,5 (20 mm)→5 (15 mm)	8,677	96
6	Ø6,5	8,390	93
7	Ø4	8,687	96
8	Ø3,5 (akış boyu 10 mm uzun)	8,856	98
9	Ø6,5	8,440	93

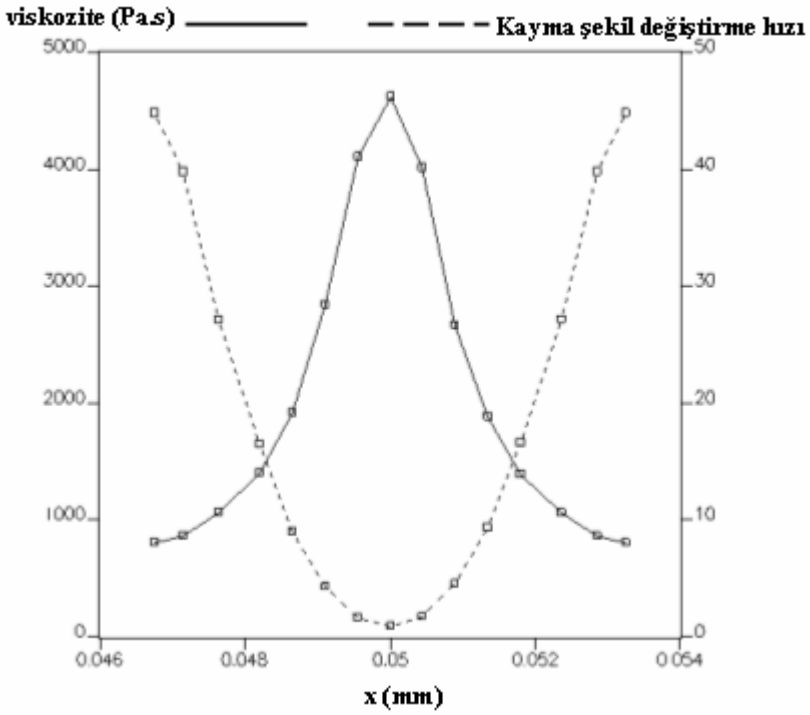
Şekil 5.16 ‘da 9 no ‘lu deliğin kesiti üzerinde viskozitenin değişimi görülmektedir. Şekil değiştirme hızının en yüksek değerde olduğu cidarda viskozite en düşük değerinde iken, şekil değiştirme hızının sıfır olduğu delik merkezinde viskozite *sıfır kayma viskozitesine* eşittir.



Şekil 5.13: 5 numaralı deliğin (kademeli delik) girişinden çıkışına kadar ekseni boyunca basıncın (düz çizgi) ve maksimum hızın (kesikli çizgi) değişimi



Şekil 5.14: 9 numaralı deliğin girişinden önceki ve sonraki hız profili (z = 50 mm, delik girişi)



Şekil 5.15: 9 no 'lu delikte girişten 20 mm sonra kesitteki viskozite ve şekil değiştirme hızı profilleri. Deliğin tam boyu 35 mm 'dir.

5.1.5. Şekil 5.7 'deki Delik Girişinden Önceki Geometri Yerine Dikdörtgen Kesitli Bir Hacim Kullanılması (Simülasyon 3)

Şekil 1.2 'de görülen torpido, deliklerin giriş bölgesinde homojen olmayan basınç dağılımına neden olmaktadır. Acaba torpido, bu homojensizliğe ne derecede sebep olmaktadır? Eğer belirli sınırlar dahilinde ise sadece Şekil 1.2 'de görülen kalıp düzlüğünün simülasyonda kullanımı yeterli olabilecektir. Böylece çözüm ağı oluşturma ve hesaplama zamanları düşecektir. Gerekli denemeler yapıldıktan sonra

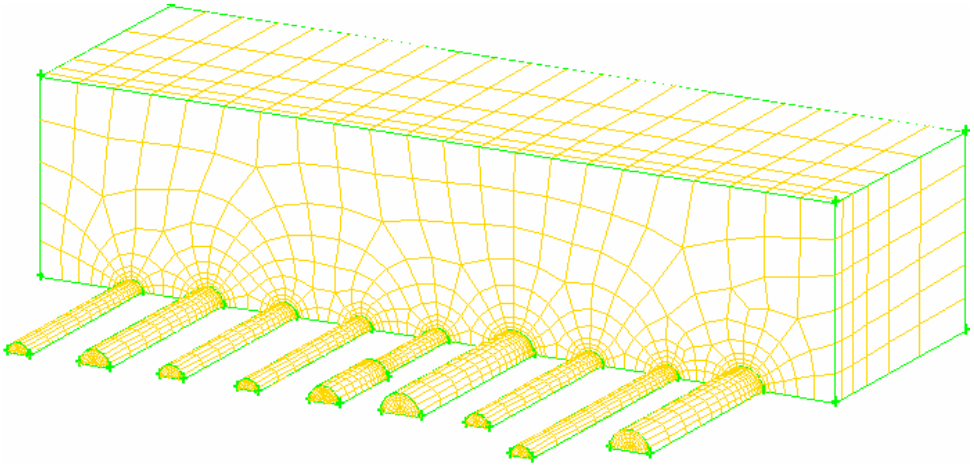
nihai simülasyon kalıp düzlüğünden önceki bölüm de dahil edilerek yapılabilecektir. "Simülasyon Sonuçları" kısmında en büyük basınç farkının % 7 kadar olduğu tespit edilmişti. Bu kısımda Simülasyon 1 'deki şartların hepsi korunarak Şekil 5.7 'deki deliklerden önceki akışkan hacmi dikdörtgen bir geometri ile değiştirilmiştir.

Simülasyon 3 'de kullanılan akışkan hacmi Şekil 5.17 'de görülmektedir. Simülasyon 1 'deki akışkanın Bird-Carreau Modeli sabitleri şöyleydi:

η_0 = 1343 Pa.s

λ = 0,071 s

n = 0,5



Şekil 5.16: Simülasyon 3 ‘de kullanılan geometri ve çözüm ağı yapısı

Simülasyon 3 ‘te elde edilen debi dağılımı ve Simülasyon 1 ile karşılaştırılması Tablo 5.8 ‘de görülmektedir. Torpidonun eriyiği çevreden merkeze doğru yönlendirmesinden dolayı Simülasyon 1 ‘de kenarlardaki debi değerleri daha yüksektir. Ancak Tablo 5.8 ‘den çıkış debilerindeki farkın %5 ‘i geçmediği görülmektedir.

Tablo 5.8: Simülasyon 1 ile 3 için debi dağılımının karşılaştırılması

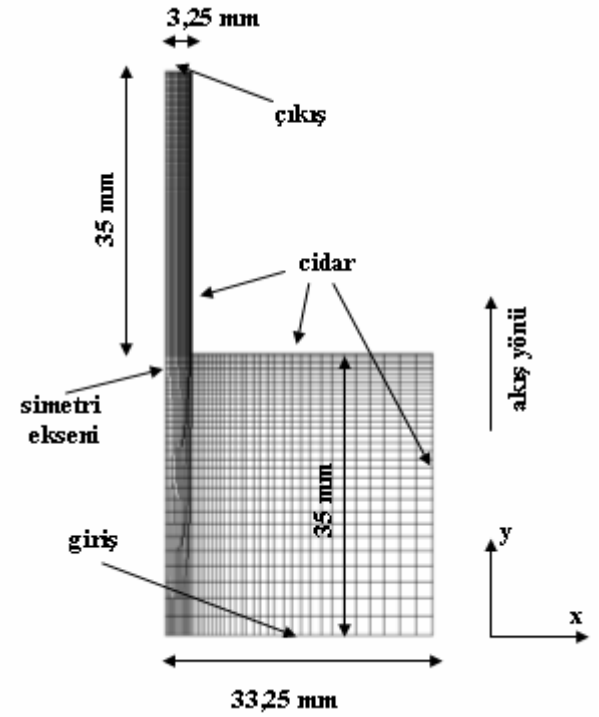
Delik Sıra No	Delik Çapı (mm)	Simülasyon 1 ‘de Debi (m^3/s)	Simülasyon 3 ‘de Debi (m^3/s)	Sapma (%)
1	Ø3,5	3,41E-08	3,24E-08	4,98
2	Ø5	1,55E-07	1,56E-07	0,82
3	Ø4	5,82E-08	5,75E-08	1,15
4	Ø3,5	3,35E-08	3,24E-08	3,07
5	Ø3,5 (20 mm) →5 (15 mm)	5,15E-08	4,99E-08	3,10
6	Ø6,5	4,96E-07	5,08E-07	2,43
7	Ø4	5,77E-08	5,75E-08	0,31
8	Ø3,5 (akış boyu 10 mm uzun)	2,46E-08	2,40E-08	2,35
9	Ø6,5	5,15E-07	5,08E-07	1,48

5.1.6. Deney 1 'de 9 Numaralı Delik için Yapılan Simülasyon ve Analitik Yaklaşım

Yüksek kalitede çözüm ağının oluşturulduğu üç boyutlu sayısal simülasyonlarda mevcut bilgisayar kapasitesi yetersiz kalmaktadır. Tek delik için yeterince iyi çözüm ağı oluşturulabilir. Böylece akış hakkında daha hassas sonuçlara ulaşılabilir.

Bu amaçla Deney 1 'de kullanılan parçadaki 9 no 'lu delik için bir simülasyon gerçekleştirilmiştir.

Geometri dönel bir parça olduğu için eksenel simetri vardır. Dolayısıyla 2 boyutlu



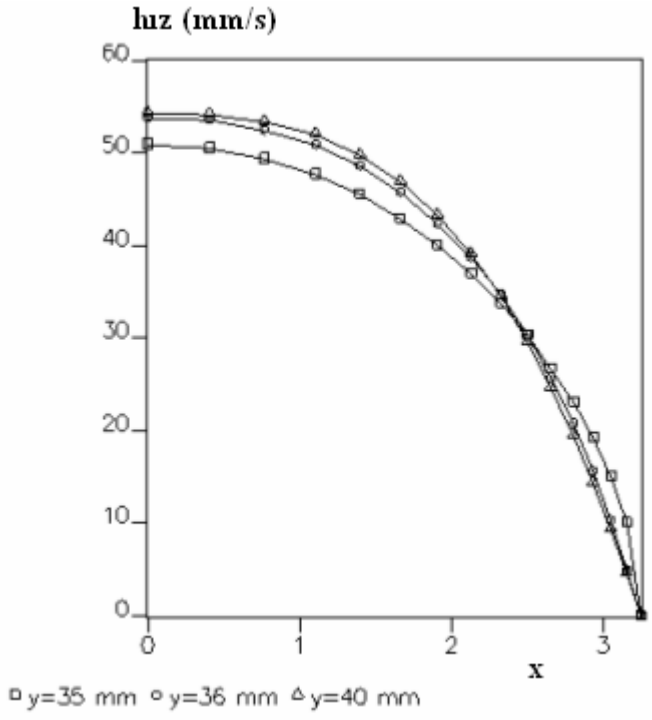
Şekil 5.17: Simülasyonda kullanılan geometri ve çözüm ağı yapısı

çözüm yapılabilmektedir ve hesaplama zamanı da 3 boyutlu problemlere göre çok daha azalmaktadır.

Sınır şartları Simülasyon 1 ve 2 'deki gibidir (Şekil 5.18). Girişte Simülasyon 2 'de hesaplanan 9 numaralı deliğe ait 1,08E-06 m^3/s çıkış debisi kullanılmıştır (Tablo 5.5). Simülasyon 2 'deki simetriden dolayı tablodaki değerin 2 katı alınmıştır. Girişte hız profili tam gelişmiş durumdadır.

Cidarda kaymama koşulu geçerlidir. Akış daimidir. Atalet kuvvetleri ve yer çekimi kuvveti ihmal edilmiştir. Akışkan Simülasyon 2 'de kullanılan ile aynıdır. Yani Bird – Carreau Modeli sabitleri η_0 = 5255 Pa.s, λ = 0,93 s, n = 0,496 dir. Viskoelastik özellikler yine göz ardı edilmiştir.

Simülasyon sonucu Şekil 5.19 'da görüldüğü gibi 5 mm sonra akış tam gelişmiş duruma gelmektedir.

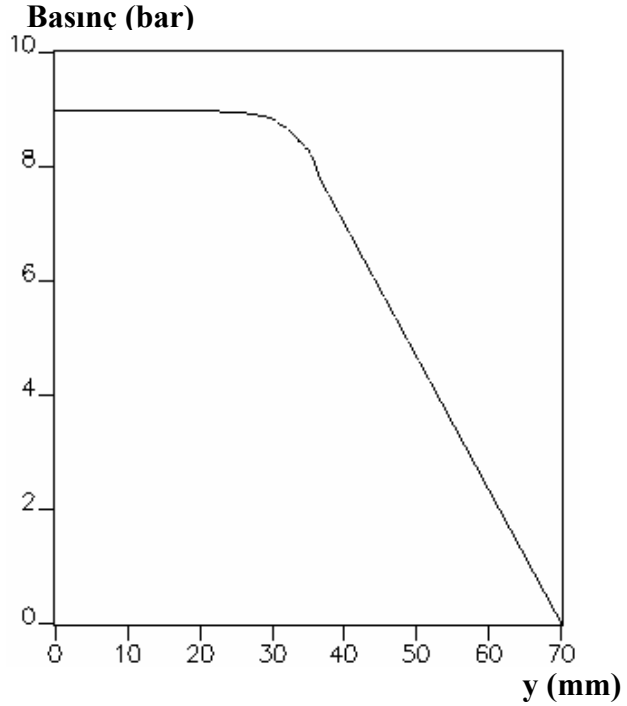


Şekil 5.18: Delik girişinden itibaren hız profilinin gelişimi

Şekil 5.20 'de basıncın simetri ekseni boyunca değişimi görülmektedir. Deliğin girişindeki basınç değeri 8,273 bardır. Deliğin son bölümünde basınç lineer bir şekilde azalmaktadır, bu bölümdeki basınç gradyeninin değeri 0,2338 bar/mm dir.

Dolayısıyla giriş etkileri ihmal edildiği taktirde 35 mm tam delik boyunda basınç düşüşü 8,183 bardır. Yani giriş basınç kaybı 8,273 – 8,183 = 0,09 bardır. Simülasyona göre giriş basınç kaybı, delikteki toplam basınç kaybının %1 'ini oluşturmaktadır. Delik boyu arttıkça giriş basınç kaybının tüm basınç kaybındaki yüzdesi daha da azalacaktır. Ancak burada polimerlerin elastik özellikleri ihmal edilmiştir. Halbuki polimer eriyiği delik girişinde uzama deformasyonuna maruz kalmaktadır, bunun sonucunda malzeme elastik enerji depolamaktadır. Bu enerji

girişte oluşan ek basınç kaybıyla üretilmektedir **(Michaeli, 2003)**. Dolayısıyla giriş basınç kaybı daha da artmaktadır. Ancak akışkan hızı yeterince düşükse bahsedilen elastik etkiler yok sayılabilmektedir.

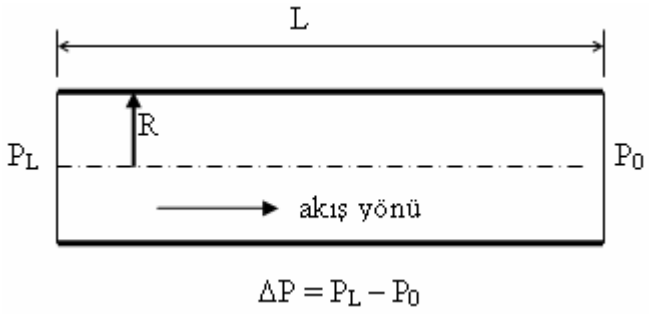


Şekil 5.19: Simetri ekseni boyunca basıncın değişimi. (Delik girişi y = 35 mm).

Simülasyon sonucuna göre giriş basınç kaybının delikteki tüm basınç kaybındaki payının çok az olduğu yukarıda söylenmişti. Bu durumda Altbölüm 5.4 'te Kuvvet Yasası için çıkarılan analitik ifade (5.27) kullanılabilecektir. Bu ifadeye göre Şekil 5.21 'de görüldüğü gibi R yarı çapına, L boyuna sahip bir borudan akan ve Kuvvet Yasası 'na uyan bir akışkanın Δp basınç kaybı ile Q hacimsel debisi arasında aşağıdaki ilişki vardır.

$$Q = \left(\frac{\Delta P}{2mL} \right)^{\frac{1}{n}} \frac{\pi R^{\frac{1}{n}+3}}{\frac{1}{n}+3} \qquad \textbf{(4.27)}$$

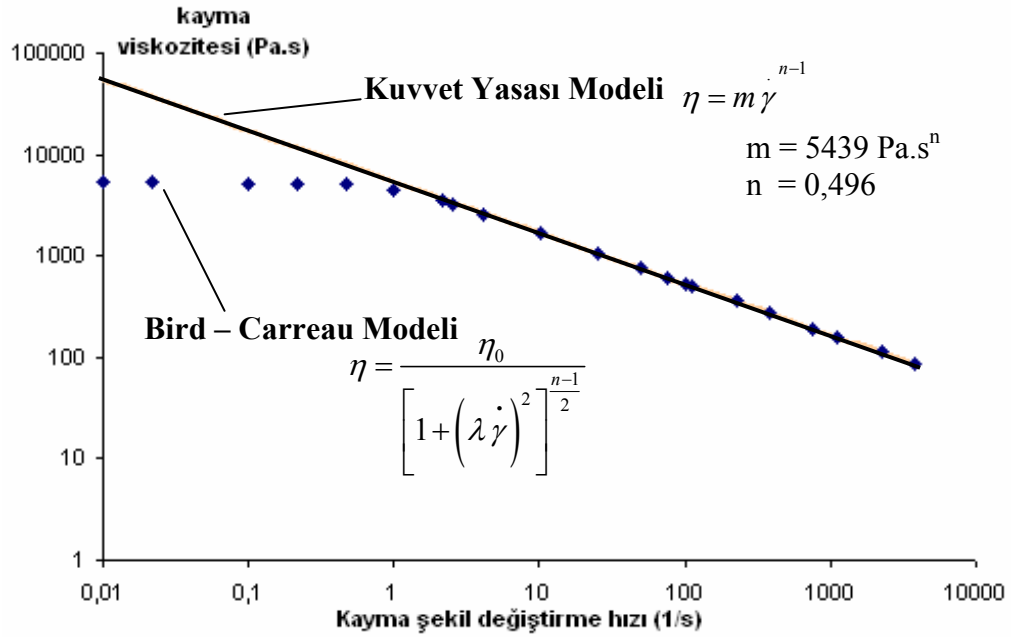
Burada m ve n Kuvvet Yasası 'na ait sabitlerdir. Bu ifade Δp için yazılacak olursa,



Şekil 5.20: Dairesel kesit içerisinden akış

$$\Delta P = \left[\frac{Q(1+3n)}{\pi n R^{\frac{1}{n}+3}} \right]^n 2mL \qquad \textbf{(5.7)}$$

ifadesi bulunur. Bu ifadede hacimsel debi bilindiği taktirde basınç kaybını hesaplamak mümkün olmaktadır. Bu ifadeyi kullanabilmek için m ve n 'nin bilinmesi gerekmektedir. Bu sabitler Alt bölüm2.1.3.1 'de gösterildiği gibi hesaplanabilmektedir. Gerekli işlemler yapıldığında m = 5439 Pa.s^n ve n = 0,496 olarak bulunmaktadır. Simülasyonda kullanılan akışkana ait viskozite modellerinin sabitleri Tablo 5.9 'da özetlenmiştir.



Şekil 5.21: Simülasyonda kullanılan akışkanın viskozite-şekil değiştirme hızı eğrisine Kuvvet Yasası modelinin uydurulması.

Tablo 5.9: Simülasyonda kullanılan akışkana ait viskozite modellerinin sabitleri

	Bird-Carreau Modeli	Kuvvet Yasası
η_0	5255	-
λ	0,93	-
n	0,496	0,496
m	-	5439

Artık 9 numaralı delikteki basınç kaybı analitik olarak hesaplanabilecektir. Debi Simülasyon 2 'deki 9 numaralı deliğe ait çıkış debisi 1,08E-06 m^3/s alınmıştır. Delik boyu 35 mm, delik yarıçapı 3,25 mm dir. Değerler Denklem (5.7) 'de yerine konursa,

$$\Delta P = \left[\frac{Q(1+3n)}{\pi n R^{\frac{1}{n}+3}}\right]^n 2mL = \left[\frac{1,08.10^{-6}(1+3.0,496)}{0,496.\pi.0,00325^{\frac{1}{0,496}+3}}\right]^{0,496} 2.5439.0,035$$

$$= 817384 \text{ Pa} = 8,174 \text{ bar}$$

deliğin girişindeki basınç bulunmuş olur. Giriş etkilerinin ihmal edildiği Bird – Carreau modelinin kullanıldığı sayısal çözümde giriş basıncı 8,183 bar olarak bulunmuştu. Kuvvet Yasası modelinin (Şekil 5.22) düşük şekil değiştirme hızlarında viskozitenin değişimini temsil edememesinden dolayı hesaplanan giriş basıncındaki hata % 0,1 dir.

5.1.7. Simülasyon 4: Kuvvet Yasası modeli kullanımı

Kuvvet Yasası sıfıra yakın şekil değiştirme hızlarında akışkanın viskozite değerini gerçek değerinden çok yüksek göstermektedir (Şekil 5.22). Kuvvet Yasası 'nın bu eksikliğinin Deney 1 'de kullanılan parçadaki çıkış debi dağılımına etkisini görmek için Simülasyon 2 'deki akışkanın viskozite modeli için Kuvvet Yasası kullanılacaktır. Bu sayısal simülasyondaki koşullar, simülasyon 2 'deki koşulların tümü ile aynıdır. Diğer bir deyişle geometri, çözüm ağı yapısı, kabuller ve sınır şartları Simülasyon 2 'deki gibidir. Yalnız, Şekil 5.22 'de verilen Kuvvet Yasası modeli kullanılmıştır.

Tablo 5.10 'da Simülasyon 4 'ün sonuçları görülmektedir. Simülasyon 2 sonuçları arasındaki maksimum bağıl hata % 3,26 'dır.

Tablo 5.10: Simülasyon 2 'deki akışkanın viskozite modeli için Kuvvet Yasası kullanılması durumunda toplam giriş debisinin deliklere dağılımı ve Simülasyon 2 debi dağılımı ile karşılaştırılması

Delik Sıra No	Delik Çapı (mm)	Sim.2 Debisi (m^3/s)	Sim.4 Debisi (m^3/s)	Bağıl Hata (%)
1	Ø3,5	2,85E-08	2,94E-08	3,26
2	Ø5	1,53E-07	1,57E-07	2,33
3	Ø4	5,13E-08	5,20E-08	1,28
4	Ø3,5	2,71E-08	2,72E-08	0,29
5	Ø3,5 (20 mm) →5 (15 mm)	4,37E-08	4,35E-08	0,47
6	Ø6,5	5,16E-07	5,13E-07	0,63
7	Ø4	4,93E-08	4,89E-08	0,81
8	Ø3,5 (akış boyu 10 mm uzun)	1,65E-08	1,62E-08	1,74
9	Ø6,5	5,40E-07	5,39E-07	0,21

5.1.8. Deney 1 'de Çıkış Debilerinin Hesabı için Analitik Yaklaşım

Şekil 5.23 'teki parçada delik girişlerindeki basınç kayıpları ile 5 numaralı delikteki genişlemeden kaynaklanan yersel karakterdeki ek basınç kaybı ihmal edilmektedir. Ayrıca torpidonun akışkanı merkeze doğru yönlendirmesinin basınç dağılımı üzerindeki etkisi göz ardı edilmektedir. Yani deliklerin girişindeki basıncın sabit ve P_0 'a eşit olduğu kabul edilmektedir. Çıkış basıncı da P_L basıncına eşittir, dolayısıyla ΔP basınç kaybı tüm deliklerde eşit olmaktadır.

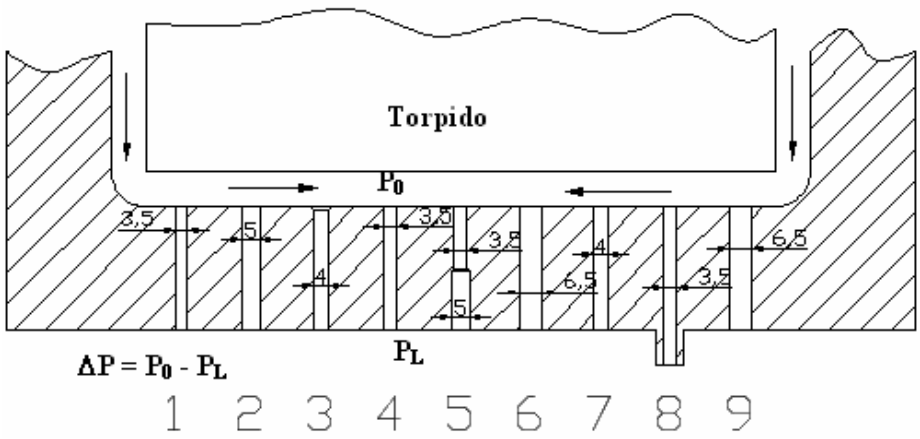
$$\Delta p_1 = \Delta p_2 = ... = \Delta p_{51} + \Delta p_{52} = ... = \Delta p_9 = \Delta p \qquad \textbf{(5.8)}$$

Burada Δp_{51} küçük çaplı delikte, Δp_{52} büyük çaplı delikte meydana gelen basınç kaybıdır.

Kuvvet Yasası modeli için R yarıçapına, L uzunluğuna sahip dairesel kesitli bir boruda debi ile basınç arasındaki ilişki türetilmişti. Basınç kaybı için yazılan ifade

$$\Delta P = \left[\frac{Q(1+3n)}{\pi n R^{\frac{1}{n}+3}} \right]^n 2mL \qquad \textbf{(4.7)}$$

şeklindedir (Altbölüm 5.4). Bu ifade Denklem (5.8) 'de yerine yazılırsa,



Şekil 5.22: Deney 1 'de kullanılan kalıp düzlüğünün kesit görünüşü ve delik çapları

$$\left[\frac{Q_1(1+3n)}{\pi n R_1^{\frac{1}{n}+3}}\right]^n 2mL_1 = \left[\frac{Q_2(1+3n)}{\pi n R_2^{\frac{1}{n}+3}}\right]^n 2mL_2 = \ldots$$
$$= \left[\frac{Q_5(1+3n)}{\pi n R_{51}^{\frac{1}{n}+3}}\right]^n 2mL_{51} + \left[\frac{Q_5(1+3n)}{\pi n R_{52}^{\frac{1}{n}+3}}\right]^n 2mL_{52} = \ldots = \left[\frac{Q_9(1+3n)}{\pi n R_9^{\frac{1}{n}+3}}\right]^n 2mL_9 \quad \textbf{(5.9)}$$

olur. Denklem (5.9) 'da Q_i,i. deliğe ait çıkış debisini ifade etmektedir. m ve n Kuvvet Yasası modeli sabitleri olup sadece sıcaklığa bağlı olarak değişmektedir. Gerekli sadeleştirmeler yapılıp Q_i debileri parantezin dışına alınırsa,

$$Q_1^n \left[\frac{1}{R_1^{\frac{1}{n}+3}}\right]^n L_1 = Q_2^n \left[\frac{1}{R_2^{\frac{1}{n}+3}}\right]^n L_2 = \ldots$$
$$= Q_5^n \left\{\left[\frac{1}{R_{51}^{\frac{1}{n}+3}}\right]^n L_{51} + \left[\frac{1}{R_{52}^{\frac{1}{n}+3}}\right]^n L_{52}\right\} = \ldots = Q_9^n \left[\frac{1}{R_9^{\frac{1}{n}+3}}\right]^n L_9 \quad \textbf{(5.10)}$$

ifadesi elde edilmektedir. Tüm terimlerin 1/n 'inci kuvveti alınırsa,

$$Q_1 \underbrace{\left[\frac{1}{R_1^{\frac{1}{n}+3}}\right] L_1^{\frac{1}{n}}}_{a_1} = Q_2 \underbrace{\left[\frac{1}{R_2^{\frac{1}{n}+3}}\right] L_2^{\frac{1}{n}}}_{a_2} = \ldots$$

$$= \underbrace{Q_5 \left\{ \left[\frac{1}{R_{51}^{\frac{1}{n}+3}}\right]^n L_{51} + \left[\frac{1}{R_{52}^{\frac{1}{n}+3}}\right]^n L_{52} \right\}^{\frac{1}{n}}}_{a_5} = \ldots = \underbrace{Q_9 \left[\frac{1}{R_9^{\frac{1}{n}+3}}\right] L_9^{\frac{1}{n}}}_{a_9} = K \qquad \textbf{(5.11)}$$

bulunur. Burada K sabit bir değerdir, a_i terimleri ise geometrik ölçülerden hesaplanabilmektedir. Burada elde edilecek analitik sonuçlar Simülasyon 4 sonuçları ile karşılaştırılacaktır. Simülasyon 4 'teki akışkana ait Kuvvet Yasası modeli (Denklem 3.9) sabitleri Tablo 5.9 'da n = 0,496 ve m = 5439 Pa.s^n olarak verilmişti. Viskozite modelinden sadece n Kuvvet Yasası indeksinin Denklem (5.11) 'e dahil olduğu görülmektedir. Yani bu analitik yaklaşıma göre debi dağılımı viskozite modelinin sadece n sabitine bağlıdır.

Debi değerleri aşağıdaki ifadelerden bulunabilmektedir.

$$Q_1 = \frac{K}{a_1}, \quad Q_2 = \frac{K}{a_2}, \ldots, \quad Q_5 = \frac{K}{a_5}, \ldots, \quad Q_9 = \frac{K}{a_9}, \qquad \textbf{(5.12)}$$

Ancak K sabiti bilinmemektedir. Bunun için debi değerleri toplanarak giriş debisine eşitlenir.

$$Q_1 + Q_2 + \ldots + Q_5 + \ldots + Q_9 = \left(\frac{1}{a_1} + \frac{1}{a_2} + \ldots + \frac{1}{a_5} + \ldots \frac{1}{a_9}\right) K = Q_{giriş} \qquad \textbf{(5.13)}$$

$Q_{giriş}$ debisi olarak Tablo 5.5 'ten toplam debinin iki katı olan 2,85E-06 m^3/s değeri alınır. Çünkü simülasyonlarda geometrinin yarısı ile çözüme gidilmişti, dolayısıyla toplam debinin yarısı giriş debisi olarak ayarlanmıştı. K sabitinin solundaki a_i

sabitlerini içeren terim deliklerin R ve L değerleri kullanılarak 7,52E-10 olarak hesaplanmıştır. Buradan K sabiti 3791 olarak bulunmuştur. a_i değerleri ve sonuçta hesaplanan debi değerleri Tablo 5.11 'de verilmiştir. Tablo 5.11 'e bakıldığında Simülasyon 4 ile aradaki sapmanın 1. delik hariç maksimum % 10 olduğu

görülmektedir. 1 numaralı delikteki debi değeri Simülasyon 4 'te daha yüksektir, bunun Şekil 5.23 'te de görüldüğü gibi akışkanın öncelikle çevredeki deliklere hücum etmesinden kaynaklandığı söylenebilir.

Tablo 5.11: Analitik çözüm ile Simülasyon 4 'te hesaplanan çıkış debilerinin karşılaştırılması

Delik Sıra No	Delik Çapı (mm)	a_i	Sim.4 Debisi (m^3/s)	Analitik Debi (m^3/s)	Sapma (%)
1	Ø3,5	7,83E+10	5,88E-08	4,84E-08	17,67
2	Ø5	1,31E+10	3,14E-07	2,90E-07	7,71
3	Ø4	4,01E+10	1,04E-07	9,46E-08	9,00
4	Ø3,5	7,83E+10	5,43E-08	4,84E-08	10,92
5	Ø3,5 (20 mm) →5 (15 mm)	4,36E+10	8,71E-08	8,69E-08	0,17
6	Ø6,5	3,51E+09	1,03E-06	1,08E-06	5,25
7	Ø4	4,01E+10	9,79E-08	9,46E-08	3,40
8	Ø3,5 (akış boyu 10 mm uzun)	1,30E+11	3,25E-08	2,92E-08	10,22
9	Ø6,5	3,51E+09	1,08E-06	1,08E-06	0,26
TOPLAM DEBİ			2,85E-06	2,85E-06	

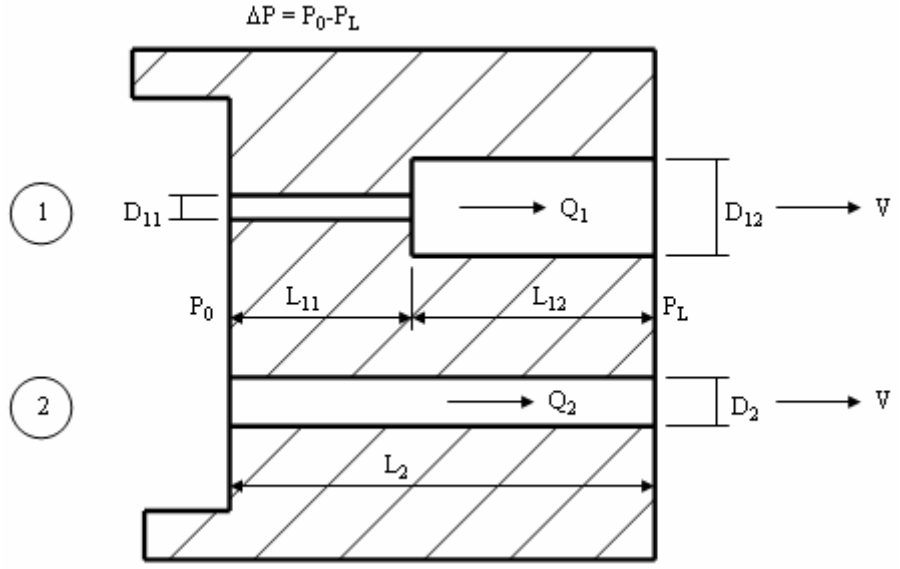
5.1.9. Ekstrüzyon Kalıbı Çıkışında Hız Dağılımının Üniform Olmasını Sağlamak İçin Bir Yöntem

Altbölüm 5.4 'te dairesel kesitli boru içerisindeki polimer eriyiğin akışında, delik boyunca meydana gelen ΔP basınç düşüşü ile Q hacimsel debisi arasındaki bağıntı (Denklem 4.27) analitik olarak çıkarılmıştır. Bu analitik yaklaşımda akışın tam gelişmiş olduğu yani akış doğrultusunda hız dağılımının değişmediği kabul edilmiştir. Önceki kısımlardaki sayısal simülasyon sonuçları da giriş uzunluğunun bu tip akışlarda çok kısa olduğunu göstermiştir.

Dairesel kesitteki polimer malzeme akışı için elimizde analitik ifade bulunmaktadır. Bu nedenle Şekil 5.1 'deki gibi bir profilin farklı çaplara sahip deliklere bölünmesi yoluna gidilebilir. Bu yaklaşımda çıkış kesitindeki ortalama akışkan hızının eşitlenmesi amaçlanmaktadır. Bu nedenle Şekil 5.1 'de görüldüğü gibi büyük çaplı delikler kademeli yapılacaktır, çünkü büyük çaplı deliklerde daha az basınç düşüşünden ötürü debi yüksektir ve ortalama hızın tüm deliklerde eşitlenmesi için

büyük çaplı deliklerin daha küçük çaplı deliklerle kademelendirilmesi gerekmektedir. Burada bahsedilen yaklaşım Şekil 5.24 ile açıklanmaya çalışılacaktır.

Şekil 5.24 'te deliklerin girişindeki basıncın aynı olduğu dolayısı ile her iki delik boyunca toplam basınç düşüşünün eşit ve ΔP olduğu kabul edilmiştir. Ayrıca bu



Şekil 5.23: 1 ve 2 numaralı deliklerin çıkışında ortalama hızın eşitlenmesi

yaklaşımda giriş basınç kayıpları ile 1 numaralı delikteki kesit değişiminden kaynaklanan ek basınç kaybı ihmal edilmiştir. Denklem (4.27) 'den ΔP basınç kaybı çekilerek Denklem (5.7) tekrar yazılabilir:

$$\Delta P = \left[\frac{Q(1+3n)}{\pi n R^{\frac{1}{n}+3}} \right]^n 2mL \qquad \textbf{(4.7)}$$

Şekil 5.24 'te her iki kısımdaki basınç kayıplarının eşit olmasından faydalanılarak,

$$\Delta P_{11} + \Delta P_{12} = \Delta P_2 \qquad \textbf{(5.14)}$$

ifadesi yazılabilir. Burada ΔP_{11}, 1 numaralı kanalda küçük çaplı delik boyunca basınç kaybını, ΔP_{12} ise büyük çaplı delik boyunca basınç kaybını ifade etmektedir. İfade açık halde yazılırsa,

$$\left[\frac{Q_1\,(1+3n)}{\pi n\,R_{11}^{\frac{1}{n}+3}}\right]^n 2m\,L_{11}+\left[\frac{Q_1\,(1+3n)}{\pi n\,R_{12}^{\frac{1}{n}+3}}\right]^n 2m\,L_{12}=\left[\frac{Q_2\,(1+3n)}{\pi n\,R_2^{\frac{1}{n}+3}}\right]^n 2m\,L_2 \qquad \textbf{(5.15)}$$

olur. Sadeleştirmeler sonucu,

$$\left[\frac{Q_1}{R_{11}^{\frac{1}{n}+3}}\right]^n L_{11}+\left[\frac{Q_1}{R_{12}^{\frac{1}{n}+3}}\right]^n L_{12}=\left[\frac{Q_2}{R_2^{\frac{1}{n}+3}}\right]^n L_2 \qquad \textbf{(5.16)}$$

ifadesine ulaşılmaktadır. Delik çıkışlarında ortalama hızın eşit olması için Q_1 ve Q_2 debileri arasında aşağıdaki ilişki olmalıdır.

$$V=\frac{Q_1}{A_{12}}=\frac{Q_2}{A_2} \quad \Rightarrow \quad \mathrm{Q}_1=\frac{A_{12}}{A_2}Q_2$$

$$\Rightarrow \quad Q_1=\left(\frac{D_{12}}{D_2}\right)^2 Q_2 \qquad \textbf{(5.17)}$$

Denklem (5.16) ‘da R_{12}, R_2, Q_1, Q_2, L_2 değerleri önceden bilinmektedir. L_{11} seçildiği taktirde L_{12} ‘de dolayısıyla belirlenmiş olmaktadır. Bu durumda Denklem (5.16) ‘da tek bilinmeyen olarak R_{11} yani kademeli kısımdaki küçük deliğin yarıçapı kalmaktadır.

Özetle bu yaklaşımda hedeflenen profil farklı çapta deliklerle doldurulmaktadır. Çıkış hızının eşitlenmesi için büyük çaplı delikler kademeli yapılmaktadır. Denklem (5.16) ‘da başlangıçta kademeli kısımdaki küçük çaplı deliğin boyu ve çapı olmak üzere iki bilinmeyen vardır. Bunlardan biri seçildiği taktirde diğeri hesaplanabilmektedir.

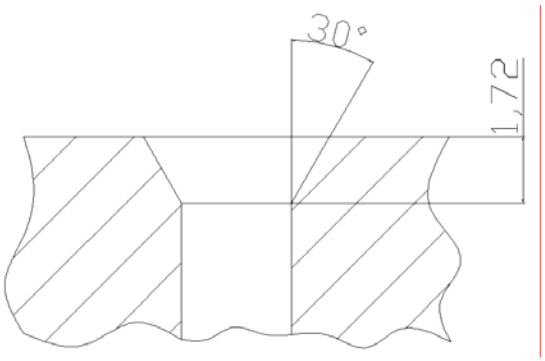
Dikkat edilirse Denklem (5.16) ‘da akışkana ait tek etkin parametre Kuvvet Yasası indeksi n ‘dir. Buradan akış dengelemesi probleminin akışkan özelliklerine bağlı olduğu görülmektedir.

5.2. Deney 2

Farklı delik giriş geometrilerinin giriş basınç kaybına etkisini görmek maksadıyla Deney 2 yapılmıştır. Bu deneyde eşit uzunluk ve çaptaki 4 adet deliğe Tablo 5.12 ‘de görüldüğü gibi farklı derinliklerde havşa açılmıştır. Deney sırasında ekstrüder vidasının devir sayısı 40 d/d, kafa sıcaklığı 190 °C ‘idi. Ancak deney sonuçlarına bakıldığında debi değerlerinin birbirine çok yakın olduğu görülmektedir. Buna akış hızının çok düşük olmasının neden olduğu düşünülmektedir.

Tablo 5.12: Deney 2 ‘ye ait kütlesel debi dağılımı (devir sayısı 40 d/d ve kafa sıcaklığı 190 °C)

Sıra No	Delik Çapı (mm)	Pah Ölçüsü (mm)	Debi (g/dk)
1	Ø6,5	1,72x30°	14,81
2	Ø6,5	2,62x30°	14,95
3	Ø6,5	3x30°	14,02
4	Ø6,5	3,32x30°	14,11



Şekil 5.24: Deney 2 ‘de 1 numaralı deliğin pah açısı ve derinliği

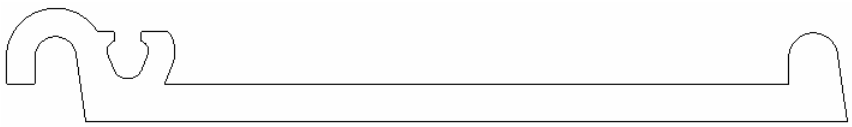
5.3. Hedef Profil için Sayısal Simülasyonlar

Daha önce de belirtildiği üzere Dizayn Grup firmasında Şekil 5.26 ‘daki profilin üretimi düşünülmektedir. Profilin hammaddesi olarak HDPE kullanılması uygun görülmüştür.

Bu maksatla yapılan bir denemede kalıptan ilk çıkan malzemenin soğuduktan sonraki fotoğrafı Şekil 5.27 ‘de görülmektedir. Burada çıkış kesiti hız dağılımında dengesizlikler olduğu görülmektedir. Bu da malzeme içinde artık gerilmelere neden olmaktadır ve sonuçta imal edilen ürünün mukavemetinin azalmasına yol açmaktadır. Bunun dışında bu durum eriyiğin kalıptan çıkarken akış doğrultusundan sapmasına

ve profil geometrisinde şekil bozukluklarının oluşmasına neden olmaktadır. Deneme Şekil 1.2 ‘de görülen kafa ile gerçekleştirilmiştir. Şekil 1.2 ‘deki kalıp düzlüğünü dolduran eriyik hacmi Şekil 5.28 ‘de görülmektedir. Kalıp düzlüğünün uzunluğu 35 mm ‘dir.

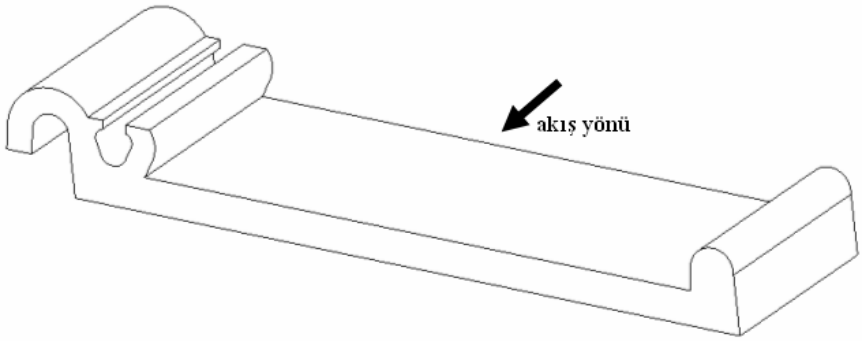
Şekil 5.28 ‘deki akışkan hacmi için sayısal simülasyonlar gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.25: Hedef profil



Şekil 5.26: Kalıptan ilk çıkan malzemenin soğuduktan sonra çekilmiş bir fotoğrafı

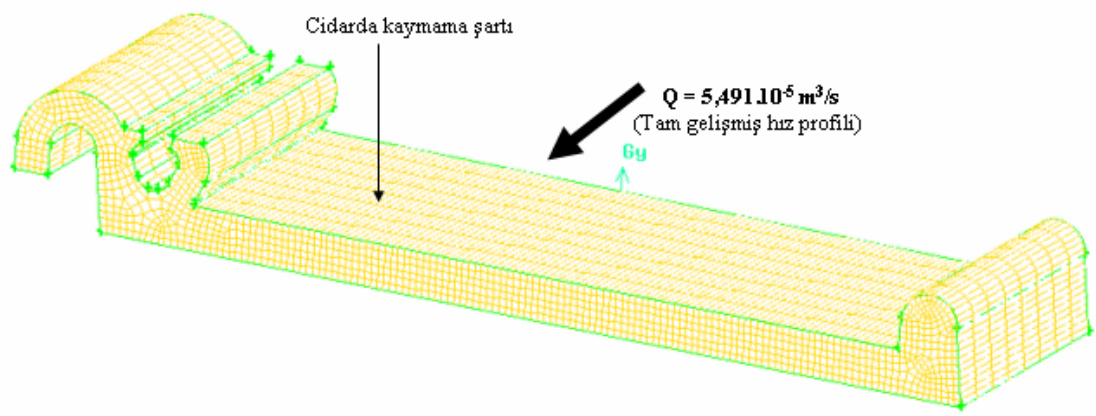


Şekil 5.27: Kalıp düzlüğü içerisindeki akışkan hacmi

5.3.1. Sayısal Simülasyon 5

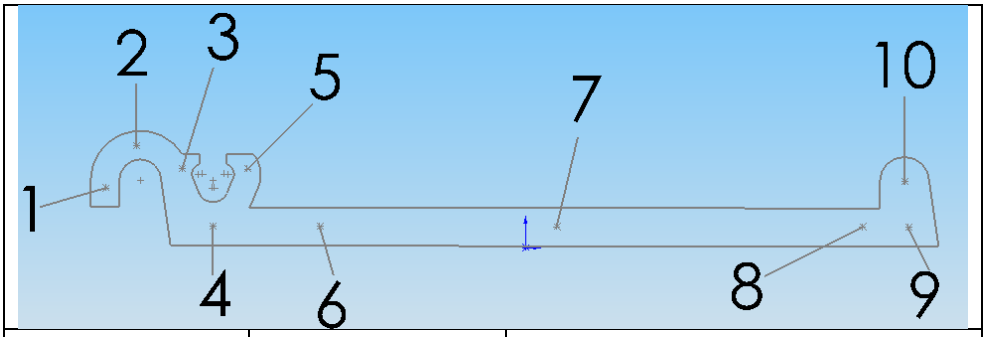
Bu simülasyonda Şekil 5.29 ‘daki çözüm ağı kullanılmıştır. Simülasyon 2 ‘ye benzer şekilde atalet kuvveti ve yer çekimi kuvveti ihmal edilmiştir. Akışın sıkıştırılamaz olduğu kabul edilerek çözüme gidilmiştir. Akışkan özellikleri için **Bird ve diğ. (1987)** kaynağındaki bir HDPE malzemesi kullanılmıştır. Bu polimere ait 170 °C ‘deki Bird-

Carreau Modeli sabitleri: η_0 = 8920 Pa.s, n = 0.496 ve λ = 1.58 s dir. Eriyiğin akışı sırasında sıcaklığının 170 °C olduğu ve sabit kaldığı kabul edilmiştir. Girişte tam gelişmiş akış koşullarının geçerli olduğu kabul edilmiştir. Cidarlarda kaymama koşulu geçerlidir. Simülasyonda üretim hızı 5 m/dk alınmıştır. Yani kesitteki $\overline{V}$ ortalama hızı 5 m/dk 'dır. Profilin kesit alanı 658,92 mm^2 dir. $Q = A.\overline{V}$ formülünden hacimsel debi 5,491.10^{-5} m^3/s olarak hesaplanmaktadır. Bu değer Şekil 5.29 'da görüldüğü gibi simülasyonda giriş debisi olarak girilmiştir.

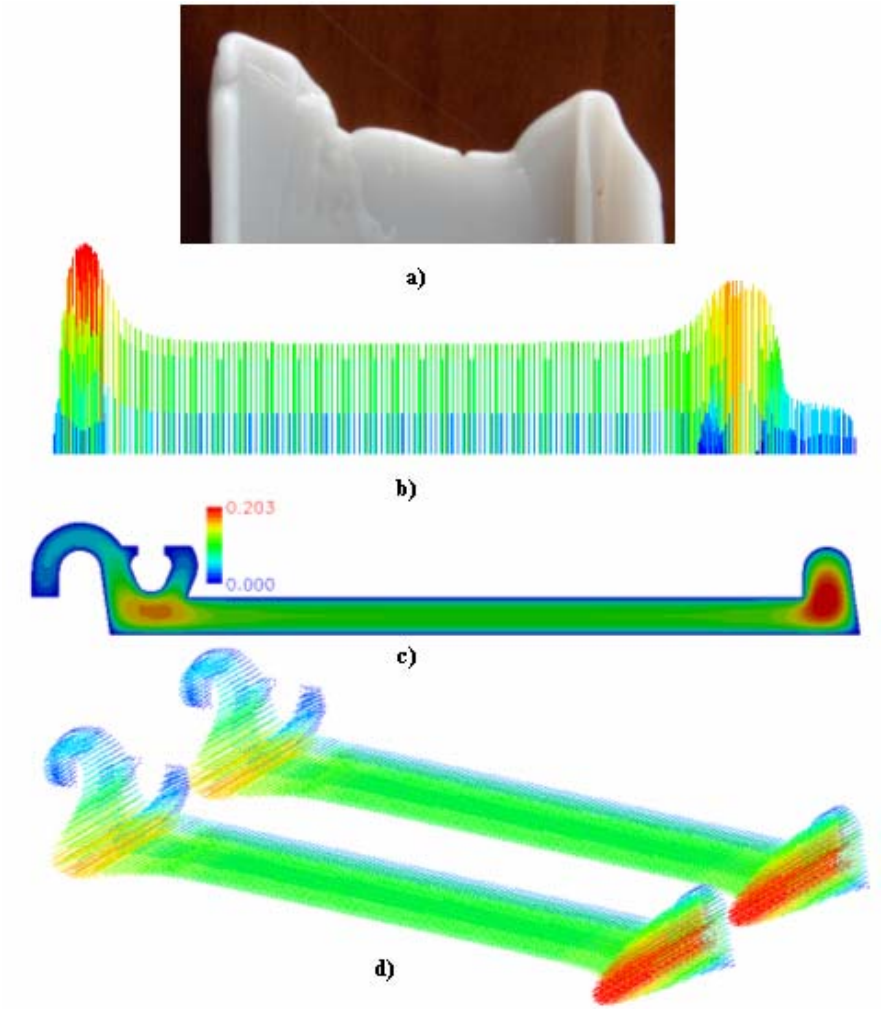


Şekil 5.28: Profil simülasyonlarında kullanılan çözüm ağı

Tablo 5.13: Simülasyon 5 'de şekilde görülen noktalardaki hız değerleri



Nokta no	Hız (cm/s)	Hızın 9. noktadaki hıza göre % büyüklüğü
1	3,33	18
2	4,8	26
3	6,73	36
4	16,57	88
5	3,17	17
6	11,14	59
7	10,87	58
8	13,75	73
9	18,74	100
10	15,79	84



Şekil 5.29: **a)** Hedef profil için yapılan deneme **b)** Simülasyonda kalıp çıkış kesitindeki vektörel olarak hız büyüklükleri **c)** Simülasyonda kesitteki renkli eş hız eğrileri (en yüksek hız 0,203 m/s) **d)** Çıkış kesitindeki hız vektörlerinin farklı açıdan görünümü

Simülasyon sonucunda kalıp çıkışındaki hız dağılımı Şekil 5.30b, c ve d 'de görülmektedir. Şekil 5.30 'a bakıldığında deneme ile simülasyon sonuçları arasında bir uyum olduğu görülmektedir. Profil kesitinin et kalınlıkları değişken olduğu için kalıp çıkışında hız dağılımı üniform olmamakta yani dengesiz olmaktadır. Profil kesitinin dar bölgelerinde akış hızı oldukça düşük iken, geniş kısımlarında hızlar oldukça yüksektir.

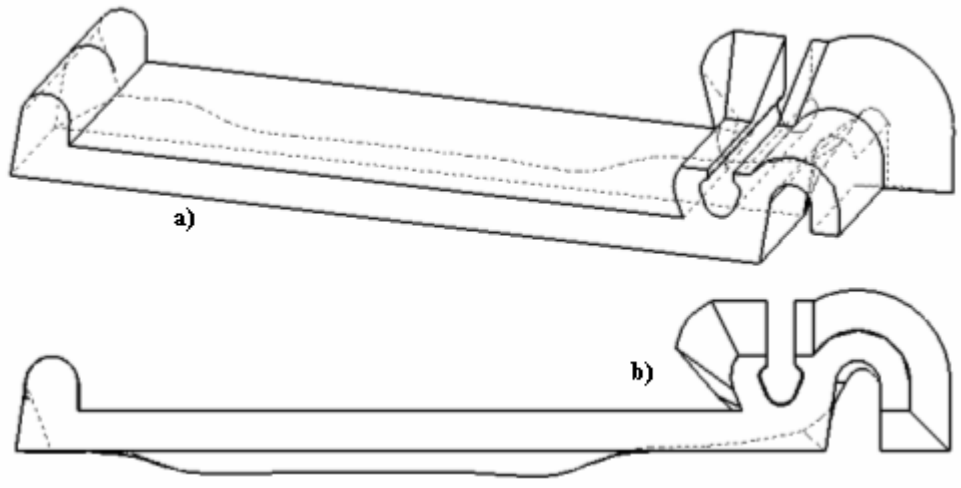
Profil için başka bir simülasyon daha yapılmıştır. Bu simülasyonda Simülasyon 5 'ten farklı olarak atalet kuvvetleri de hesaba katılmıştır. Fakat ne Tablo 5.13 'teki noktalardaki hız değerlerinde ne de akış boyunca meydana gelen basınç kaybında bir farklılık olmadığı görülmüştür. Bu da bize atalet kuvvetlerinin ekstrüzyon akışı simülasyonlarında ihmal edilebileceğini tekrar göstermektedir.

Ayrıca üretim hızı 1 ve 20 m/dk alınarak Simülasyon 5 ile aynı kabul ve sınır şartlarında iki simülasyon daha gerçekleştirilmiştir ve Tablo 5.13 ‘te belirtilen noktalardaki hız değerleri eşit oranda artmış veya azalmıştır. Yani hız dağılımı şekilsel olarak benzerdir.

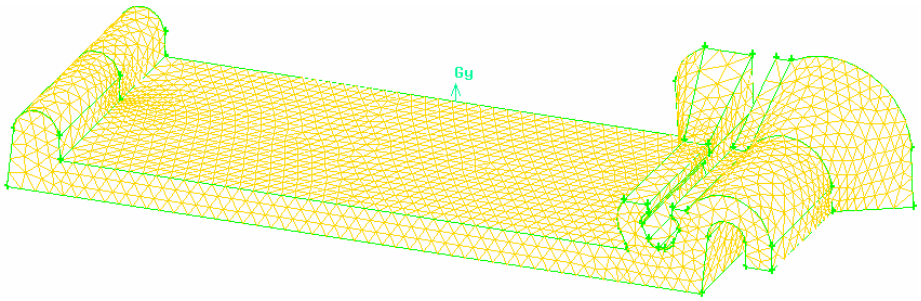
5.3.2. Simülasyon 6: Çıkış kesitinde üniform hız dağılımı sağlamak için kalıp düzlüğü geometrisinde değişikliklere gitme

Şekil 5.30c ve d ‘ye bakıldığında iki bölgede eriyik hızının yüksek, kesitin dar kısımlarında yani iki kulakta hızın oldukça düşük olduğu görülmektedir. Çıkış kesitinde akışkan hızının dengelenmesi amacıyla kalıp düzlüğünde Şekil 5.31 ‘de görülen değişiklikler yapılmıştır. Kesitin dar olduğu bölgelerde giriş kesiti genişletilerek bu kesitlere konik geçiş sağlanmıştır. Şekil 5.31b ’de görüldüğü gibi akışkan hızının yüksek olduğu iki kesitin giriş kısımlarında akışa karşı direnç arttırılmıştır.

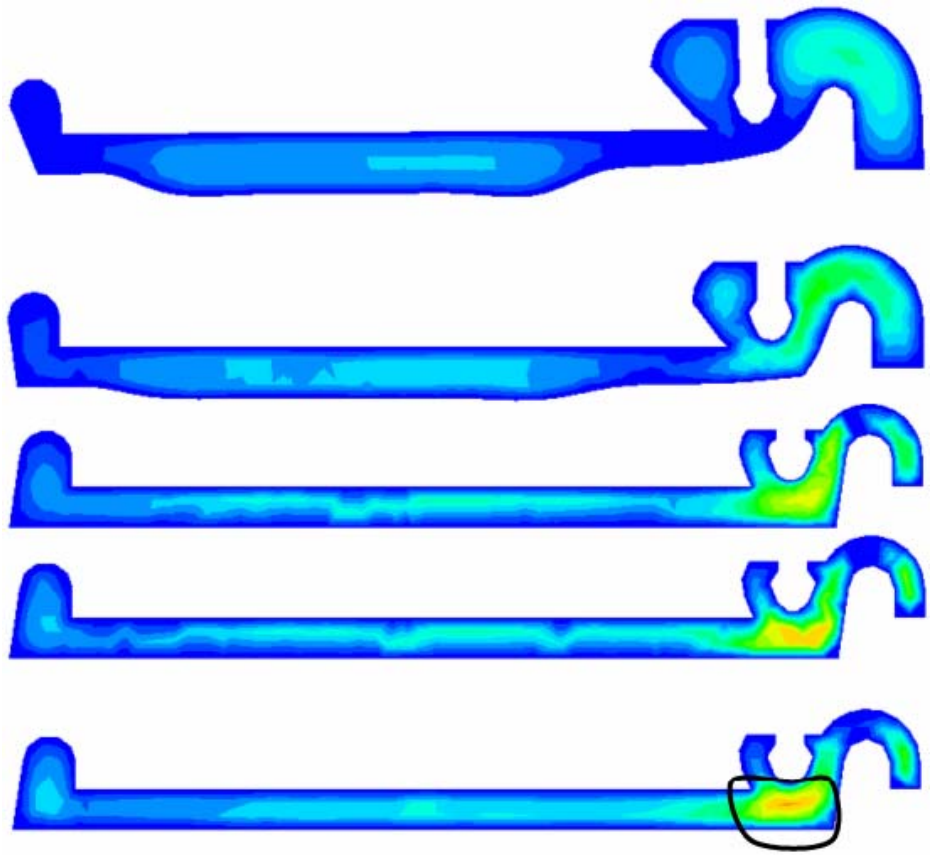
Simülasyonda kullanılan çözüm ağı yapısı Şekil 5.32 ‘de görülmektedir. Simülasyon 5 ‘teki kabul ve sınır şartları kullanılmıştır, yani sözü geçen tek fark geometridir.



Şekil 5.30: Simülasyon 6 ‘da kullanılan geometri



Şekil 5.31: Simülasyon 6 ‘daki geometriye ait çözüm ağı

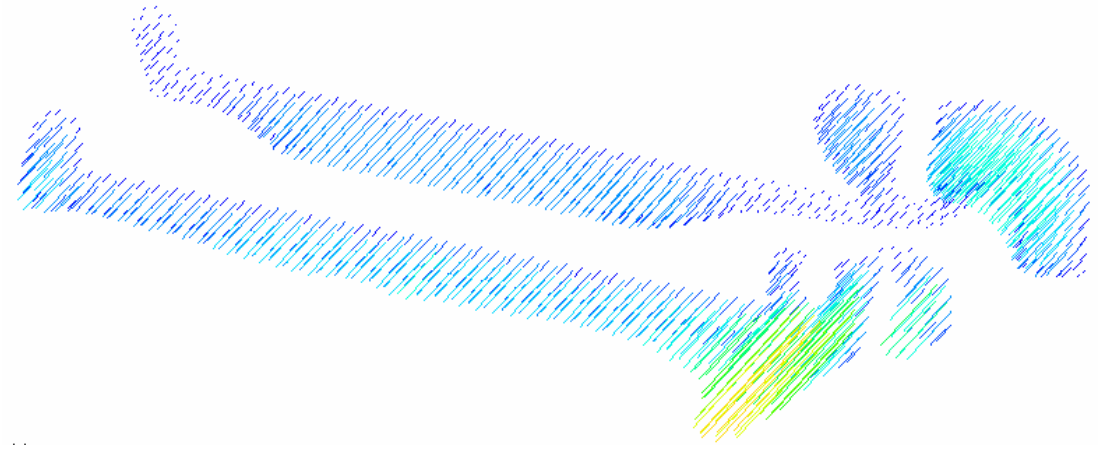


Şekil 5.32: Akış boyunca farklı kesitlerde hız dağılımları. Sırasıyla kesitlerin girişten uzaklıkları 0, 7, 18, 25, 35 (çıkış kesiti) mm ‘dir.

Simülasyon sonucunda girişten uzaklıkları farklı olan kesitlere ait hız dağılımları Şekil 5.33 ‘te görülmektedir. Girişte genişletilmiş kesitlerde hız yüksek olmasına rağmen çıkış kesitinde hız azalmıştır. Buna karşılık girişi daraltılmış, Şekil 5.33 ‘te işaretlenmiş bölgenin çıkışında hız yüksektir. Girişte dar bölgelere yüksek miktarda giren akışkan çıkışa doğru Şekil 5.33 ‘te kapalı eğri ile işaretlenmiş bölgeye yönlenmektedir.

Şekil 5.34 ‘te çıkış kesitindeki hız dağılımı vektörel olarak gösterilmiştir. Şekil 5.34 ‘teki profilin sol bölümünde hız dağılımı dengeli iken sağ kısmındaki geniş bölümde

çıkış hızı maksimum değerine ulaşmaktadır. Bunun nedeni dar kısımlarda direnç fazla olduğu için akışkan geniş kısma doğru yönelmektedir. Bu yüzden tasarım aşamasında profilin kesit kalınlıklarının değişimi ani olmamalıdır. Mümkün olduğunca kesit kalınlığı homojen olacak şekilde profil tasarımı yapılmalıdır.



Şekil 5.33: Simülasyon 6 'da giriş ve çıkış kesitinde vektörel hız büyüklükleri

Bu yaklaşımda inisiyatif kullanarak tasarımcı geometriyi değiştirme yoluna gitmiştir. Ancak bu çok zaman alıcı olabilmektedir. Ayrıca akış dengelemesi açısından bakıldığında başarı garanti değildir, başarılı olsa dahi kalıbın imalatı kolay olmayacaktır. Geometri eğrisel yüzeylere sahip olduğu için çözüm ağının oluşturulmasında da problemler yaşanmaktadır.

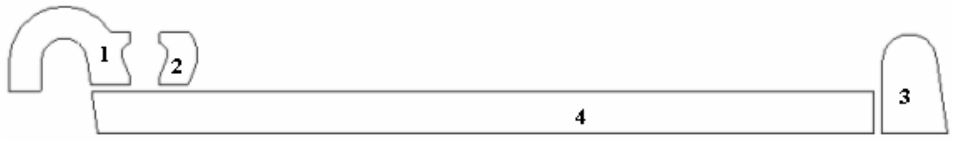
5.3.3. Profilin Parçalara Bölünmesi ile Akışın Dengelenmesi Yöntemi

Şekil 5.26 'daki hedef profil, kendi içinde yaklaşık olarak homojen kesit kalınlığına sahip 4 parçaya ayrılabilir. Şekil 5.35 'te profilin parçalara ayrılmış şekli görülmektedir. Böylece bu ayrık parçalarda dengeli bir hız dağılımı elde etmek mümkündür.

Toplam debi, parçaların kesitleriyle orantılı olarak 4 'e ayrılacaktır. Böylece ortalama hızın tüm parçalarda eşit olması sağlanacaktır.

$$\overline{V} = \frac{Q_T}{A_{profil}} = \frac{Q_i}{A_i} \qquad \textbf{(5.18)}$$

Burada Q_T toplam debiyi, A_{profil} profilin kesit alanını, $\overline{V}$ ortalama hızı veya üretim hızını ifade etmektedir. i alt indisi ise parça numarasını göstermektedir. Denklem (5.18) 'den i. parçaya ait debi Q_i çekilirse,



Şekil 5.34: Profilin 4 parçaya bölünmüş görünüşü

$$Q_i = \frac{A_i}{A_{profil}} Q_T = \varphi_i Q_T \qquad \textbf{(5.19)}$$

ifadesi bulunur. φ_i i. parçanın kesitinin profil kesitine oranıdır.

Q_i debisi ile her bir parça için ayrı ayrı simülasyon yapılacaktır. Böylece 5 m/dk ortalama hızda her bir parçaya ait birim boydaki basınç kaybı tespit edilir. Daha sonra 5 m/dk ortalama hızda basınç kayıplarının eşit olması için gereken parça boyları hesaplanır. Kalıp tasarımı, bu ayrık parçaların çıkışa az bir mesafe kala birleşmelerini sağlayacak şekilde yapılır. Kalıbın arka geometrisi yani bu ayrık 4 parçanın giriş kısmı olabildiğince genişletilir, böylece bu kısımdaki basınç gradyeninin diğer 4 parçanınkine oranla çok düşük kalması sağlanır. Bunun sonucunda ayrık parça girişlerinde basınç değerlerinin eşit olması sağlanmış olur.

Bütün profilin (Şekil 5.26) kesit alanı 658,92 mm^2 'dir. Üretim hızının 5 m/dk olabilmesi için debinin $5{,}491\times10^{-5}$ m^3/s olması gerekmektedir. Diğer parçaların kesit alanları sırası ile 83,9; 23,04; 77,08; 460,66 mm^2 'dir. Bu durumda toplam debinin parçalara dağılımı Tablo 5.14 'te görülmektedir.

Tablo 5.14: Parçaların kesit oranları ve debi değerleri

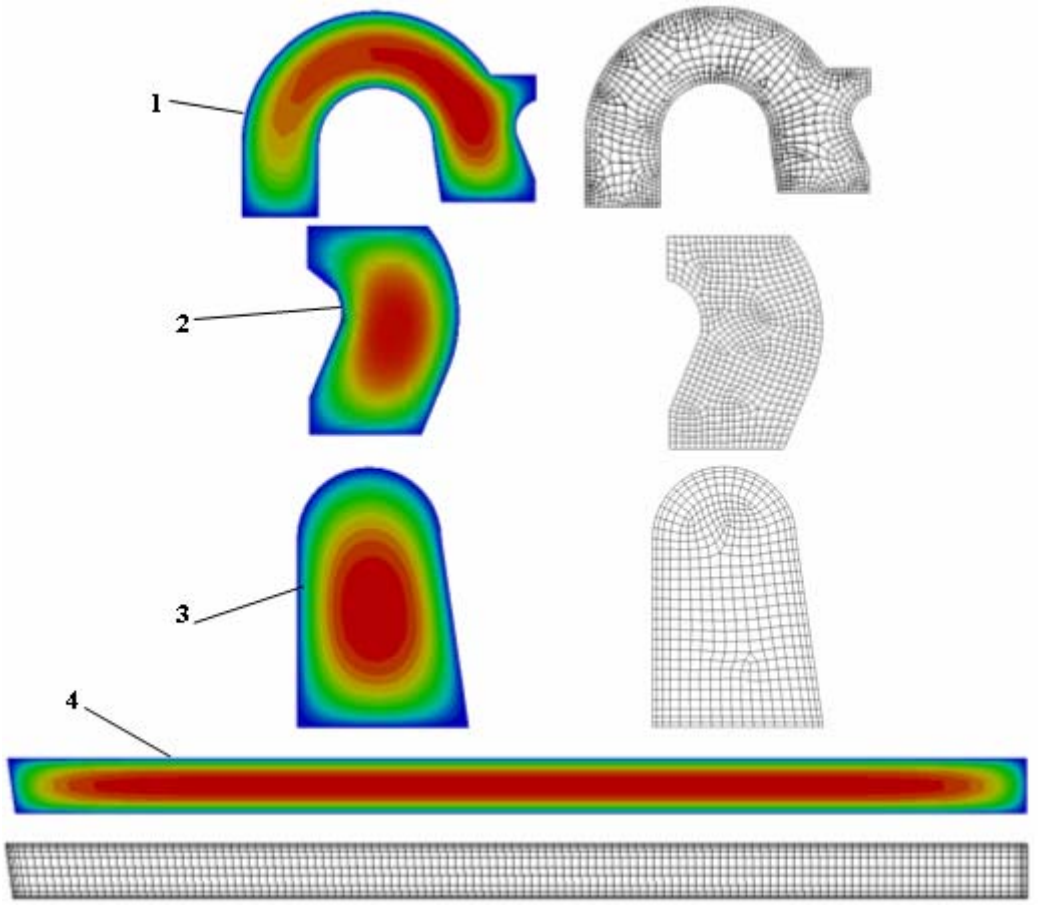
Parça no	**φ_i**	**Q_i (m^3/s)**
1	0,1301	$0{,}714.10^{-5}$
2	0,0357	$0{,}196.10^{-5}$
3	0,1197	$0{,}657.10^{-5}$
4	0,7145	$3{,}924.10^{-5}$

Simülasyonlarda Simülasyon 5 'teki kabuller yapılmış ve sınır şartları kullanılmıştır. Simülasyonda yine Bird – Carreau Modeli sabitleri; η_0 = 8920 Pa.s, n = 0.496 ve

λ = 1.58 s olan akışkan kullanılmıştır. Tablo 5.14 ‘teki debi değerleri parçaların giriş kesitine verilmiştir.

Simülasyonlar sonucu elde edilen hız dağılımı Şekil 5.36 ‘da görülmektedir. Tablo 5.15 ‘te ise parçaların birim boylarında oluşan basınç kayıp değerleri verilmiştir.

Kalıp çıkışından 5 mm önce parçaların birleşip nihai profili oluşturmaları düşünülmüştür. 2 no. ‘lu parçanın direnci en yüksektir, dolayısıyla uzunluğu en kısa olacak parça da odur. 2 no. ‘lu parçanın toplam uzunluğu 5 mm ‘lik son kısım da

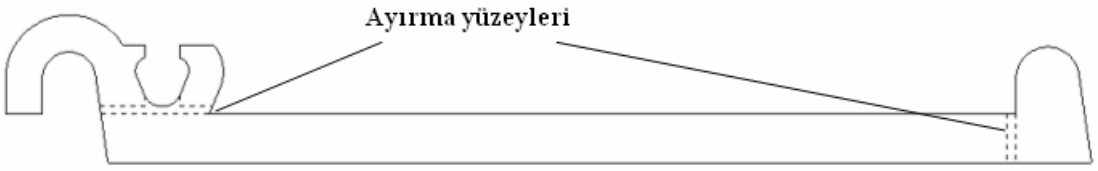


Şekil 5.35: 4 parçanın ayrı ayrı simülasyonları sonucunda hız dağılımı ve parçalara ait çözüm ağı

Tablo 5.15: Simülasyonlar sonucunda ortalama hızın 5 m/dk olması durumunda her bir parçaya ait birim boyda meydana gelen basınç kaybı

Parça no	$\Delta P/L$ (Pa/mm)
1	53310,2
2	79524,0
3	30007,6
4	33658,3

dahil olmak üzere 15 mm düşünülmüştür. 15 mm boyda 2 no. ‘lu parçada meydana gelen basınç kaybı 11,9 bar ‘dır. 5 m/dk ortalama hızda 11,9 bar basınç kaybını oluşturacak parça uzunlukları Şekil 5.38 ve Tablo 5.16 ‘da verilmiştir.



Şekil 5.36: Profilin ayırma yüzeyleri

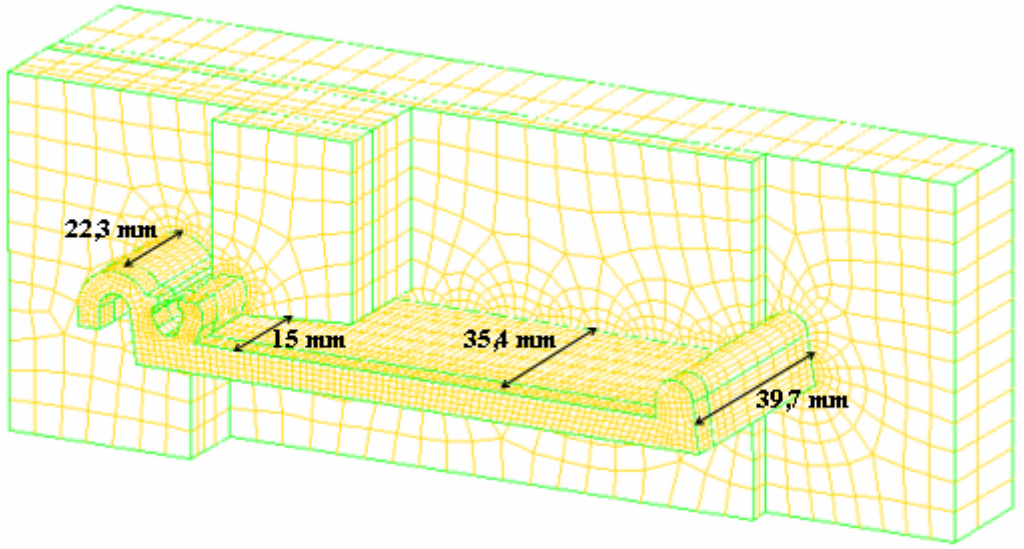
Tablo 5.16: 5 m/dk ortalama hızda 11,9 bar basınç kaybını oluşturacak parça uzunlukları

Parça no	**Parça uzunluğu (mm)**	**Parça uzunluklarının 2 no. ‘lu parçanın uzunluğuna oranı**
1	22,3	1,5
2	15,0	1,0
3	39,7	2,6
4	35,4	2,4

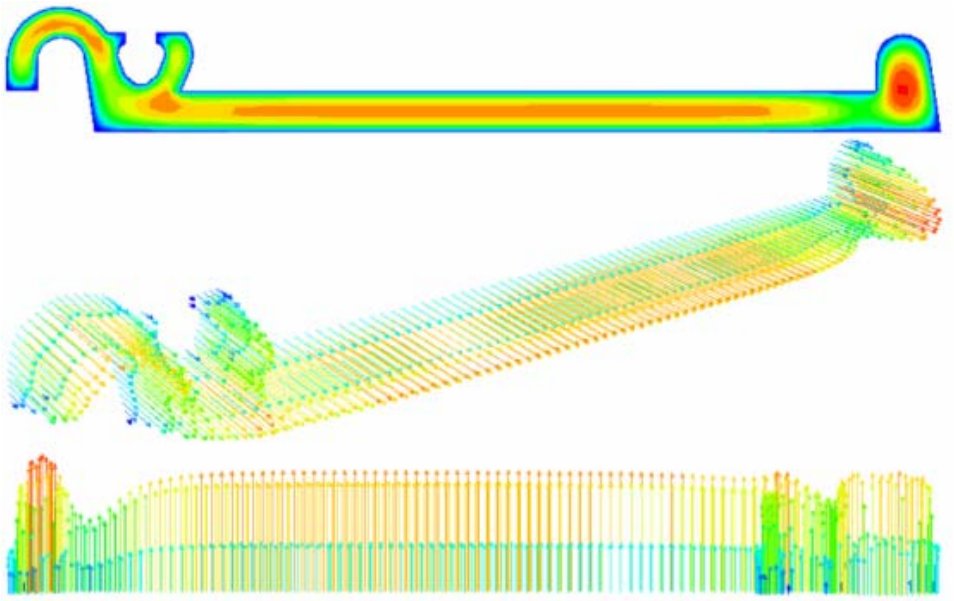
Simülasyonda kullanılan geometri Şekil 5.37 ‘de görülmektedir. Çözüm ağı yapısını oluşturmada kolaylık sağlaması açısından kalıbın giriş geometrisi dikdörtgen bir profille oluşturulmuştur. Basınç gradyeninin olabildiğince düşük olması için parçaların giriş geometrileri büyük kesitli yapılmıştır, böylece parça girişlerinde eşit basınç değerleri yakalamak mümkün olacaktır.

Simülasyon, dikdörtgen kesitli girişe $5{,}491\times10^{-5}$ m^3/s debisi girilerek gerçekleştirilmiştir. Simülasyon sonucunda kalıp çıkışında elde edilen hız dağılımı Şekil 5.39 ‘da verilmiştir. Görüldüğü gibi hız dağılımının büyük oranda dengelenmesi başarılmıştır. Sadece 3 ile 4 no. ‘lu parçaların birbirinden ayrıldığı bölgede hızlar biraz düşüktür. Şekil 5.40 ‘ta bu bölgedeki hızın, maksimum hızın %55 ’i kadar olduğu görülmektedir.

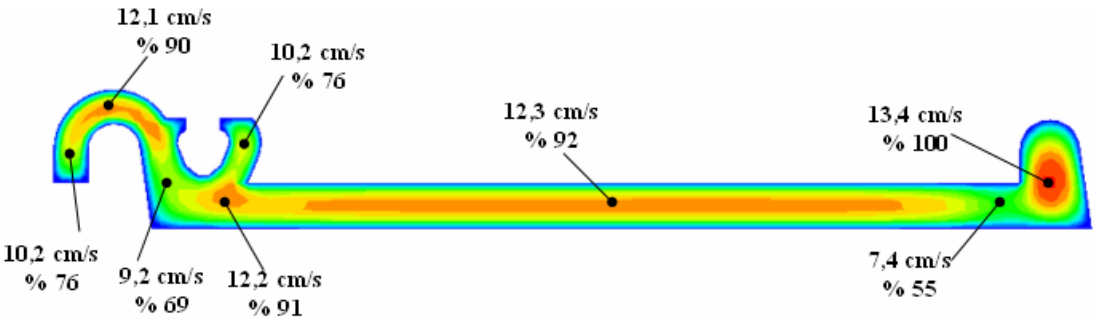
Şekil 5.41 ‘deki 1, 2, 3, 4 numaralı eriyik hızının 0 ‘a eşit olduğu yüzeylerdeki basınç değerleri sırasıyla 13,853; 13,721; 13,867; 14,036 bar ‘dır. Görüldüğü gibi basınç değerleri hemen hemen eşittir. Dolayısıyla arka geometride genel akış doğrultusunda çok düşük basınç kaybı meydana gelmektedir.



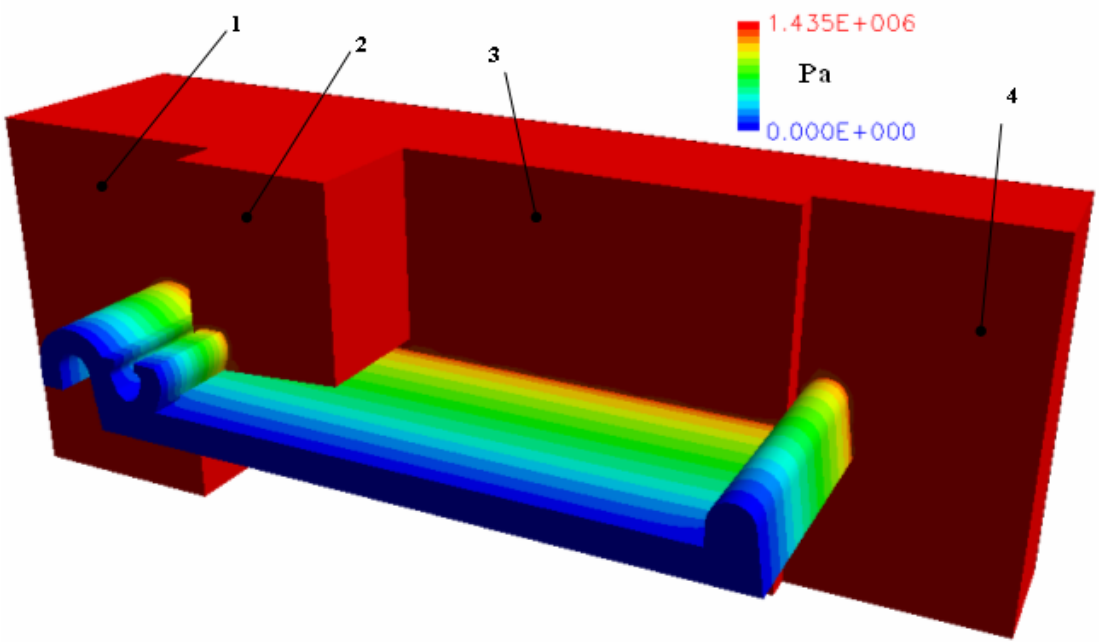
Şekil 5.37: Simülasyonda kullanılan geometri ve çözüm ağı yapısı. Şekilden anlaşılacağı üzere ayrık parçalar çıkıştan 5 mm önce birleşmektedir.



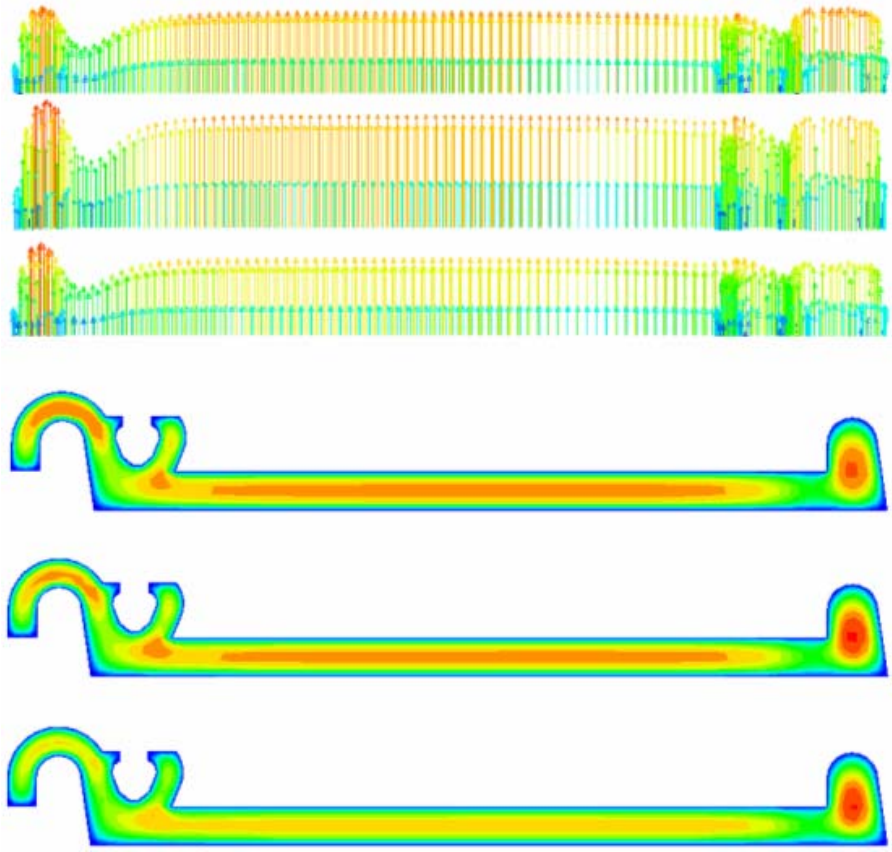
Şekil 5.38: Simülasyon sonucu çıkış kesitinde hız dağılımı



Şekil 5.39: Çıkış kesitinin bazı noktalarında hız değerleri ve bu hız değerlerinin maksimum hıza oranları



Şekil 5.40: Simülasyon sonucu elde edilen basınç dağılımı



Şekil 5.41: Yukarıdan aşağıya doğru n = 0,4 ; 0,496 ; 0,6 için çıkış kesitinde hız dağılımı

Sonrasında 4 parça için Bird-Carreau Modeli sabitlerinden sadece n Kuvvet Yasası indeksi değiştirilerek simülasyonlar yapılmıştır. 0,4 ve 0,6 olmak üzere iki farklı n

değeri kullanılmıştır. Tablo 5.17 'deki simülasyon sonuçlarına göre n arttıkça birim boydaki basınç kaybı ve parça uzunlukları arasındaki oran artmaktadır. Şekil 5.42 'de n = 0,4; 0,496 ve 0,6 için çıkış kesitinde hız dağılımı görülmektedir. Görüldüğü gibi hız dağılımında önemli bir fark yoktur. Dolayısıyla n değeri 0,4 - 0,6 aralığında olan polimer malzemeleri için bu kalıbın kullanılması durumunda hemen hemen aynı performans elde edilecektir.

Tablo 5.17: Bird – Carreau Modeli 'nin farklı n değerleri için parçalarda meydana gelen birim boydaki basınç kaybı (ortalama hız 5 m/dk) ve parçalarda eşit basınç kaybı oluşturulabilmesi için 2 no. 'lu parçaya göre uzunluk oranları.

	Birim boyda basınç kaybı (Pa/mm)			**Eşit basınç kaybı oluşturmak için gerekli boyutsuz parça uzunlukları**		
Parça no	**n = 0,4**	**n = 0,496**	**n = 0,6**	**n = 0,4**	**n = 0,496**	**n = 0,6**
1	32407	53310	91067	1,5	1,5	1,5
2	47632	79524	138192	1,0	1,0	1,0
3	19164	30008	48631	2,5	2,6	2,8
4	20985	33658	55856	2,3	2,4	2,5

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında polimer ekstrüzyonunda kalıp içerisindeki akış, profil kalıp çıkış kesitinde akışın dengelenmesi amacıyla deneyler ve sayısal simülasyonlarla incelenmiştir.

Deneyler aynı ekstrüder vidası devir sayısında sıcaklığın arttırılmasının polimer eriyiğin debisinde artış sağlandığını göstermektedir. Bunun nedeni sıcaklığın artmasıyla polimer viskozitesinin azalmasıdır. Yani sıcaklık arttırıldıkça aynı ekstrüder ile daha yüksek imalat hızlarına çıkılabilmektedir. Ayrıca debi değerlerinin kalıp deliklerine dağılımı incelendiğinde torpidonun basınç dağılımına etkisinin tahmin edilenden çok daha az olduğu, başka bir deyişle kalıp düzlüğü girişinde basınç dağılımının yaklaşık olarak homojen olduğu söylenebilir.

Simülasyonlarda *Genelleştirilmiş Newton Tipi Akışkan Modeli* kullanılması tercih edilmiştir. Sayısal simülasyonlarda literatürden alınan iki HDPE 'e ait Bird-Carreau Viskozite Modeli sabitleri kullanılmıştır, polimerlerin viskoelastik özellikleri ihmal edilmiştir.

Deney parçası için yapılan sayısal simülasyonlarda debi dağılımının akışkana bağlı olduğu görülmüştür. Bu durum kalıp tasarımının akışkana bağlı olduğunu göstermektedir. Kalıp düzlüğü girişinde basınç dağılımının hemen hemen homojen olduğu sayısal simülasyonlarla doğrulanmıştır. Ayrıca ekstrüzyonda giriş basınç kayıplarının çok düşük olduğu, bu yüzden ihmal edilebileceği tespit edilmiştir. Böylece sayısal simülasyonlarda kalıp düzlüğünün tek başına kullanılması yeterli olabilmektedir. Tasarımda gerekli değişiklikler yapıldıktan sonra sonucun kontrol edilmesi amacıyla tüm kalıp geometrisi için sayısal simülasyon yapılabilir. Böylece kalıp tasarımı hızlandırılabilir. Ayrıca kalıp çıkış kesitindeki hız dağılımının imalat hızından etkilenmediği görülmüştür. Hareket denklemlerindeki atalet kuvvetlerinin ihmal edilmesinin sayısal simülasyon sonuçlarını değiştirmediği görülmüştür. Çünkü akış hızı çok düşük, polimerin viskozitesi oldukça yüksektir. Yani polimer

ekstrüzyonunda basınç kuvvetleri ve viskoz kuvvetler etkin kuvvetlerdir ve birbirlerini dengelemektedirler.

Kuvvet Yasası Modeli 'nin, akışkanın viskozitesini sıfıra yakın kayma şekil değiştirme hızlarında temsil edemediği görülmüştür. Ancak sayısal simülasyon sonuçlarına göre Kuvvet Yasası Modeli, basınç kaybını ve kalıp çıkış kesitinde hız dağılımını hesaplamada yeterince doğru sonuçlar vermektedir.

Analitik ifadeler probleme yaklaşımda yön gösterici niteliktedir. Profilin deliklerle beslenmesi yöntemine başvurulacak olursa, giriş basınç kaybı ve kesit değişimi sonucu oluşan basınç kaybı çok düşük olduğundan analitik yaklaşım, tasarımın ilk aşamasında kullanılabilir. Daha sonra sayısal simülasyonlar yardımıyla son değişiklikler yapılabilir.

Şekil 5.28 'deki kalıp düzlüğü için sayısal simülasyon yapılmıştır ve aynı kalıp geometrisi için firmada yapılan üretim denemesi ile karşılaştırılmıştır. Kalıp çıkışındaki akış hızındaki dengesizlik sayısal simülasyon sonucunda da göze çarpmaktadır. Malzeme çıkışındaki bu dengesizliğin nedeni profil kesitinin homojen kalınlığa sahip olmamasına bağlanabilir.

Profil kesitinin et kalınlıklarında ani değişiklikler olduğu taktirde akışkan, çapraz akış sonucu dar bölgelerden geniş bölgelere yönelecektir, yani homojen kesit kalınlığına sahip olmayan profil kalıplarının çıkış kesitinde akışın dengelenmesi oldukça zordur. Bu yüzden profil tasarımında mümkün olduğunca kesitin et kalınlıkları homojen olmalıdır ve kesitin et kalınlıklarında ani değişimler olmamalıdır. Şartlar bu değişikliklere imkan vermiyorsa, kesit et kalınlıkları arasındaki fark fazla olan bu bölgeler ayırma yüzeyleri ile birbirlerinden ayrılabilir, böylece çapraz akış önlenmiş olur.

Şekil 1.1 'deki hedef profilin imalinde akışın dengelenmesi probleminin yaşanmaması için profil kesiti kendi içinde homojen et kalınlığına sahip parçalara bölünmüştür. Bu yönteme göre parçalardan eşit ortalama eriyik hızı elde edilebilmesi için parça uzunlukları farklı tutulmuştur. Bu yöntem akış dengelemesi problemini büyük oranda gidermiştir, ancak imal edilen profillerin mukavemetinin olumsuz

yönde etkilenmesi olasıdır. Ayrıca kalıbın imalatı da kolay değildir. Ayırma yüzeylerine yakın bölgelerde eriyiğin kalıp çıkışındaki hızı nispeten düşüktür. Akışkan, kalıptan çıktıktan sonra hız dağılımı biraz daha kendini toplayacaktır ve bahsedilen düşük hızlı bölgeler imalat hızına uyum sağlayacaktır. Buradan sayısal simülasyonların deneylerle desteklenmesinin yerinde olacağı anlaşılmaktadır.

KAYNAKLAR

Akyüz, Ö. F., 2001. Plastikler ve Plastik Enjeksiyon Teknolojisine Giriş, PAGEV Yayınları, İstanbul.

Baird, D.G. and Collias, D.I., 1998. Polymer processing: principles and design, Wiley-Interscience publication, New York.

Barnes, H. A., Hutton, J.F. and Walters, K., 1989. Introduction to rheology, Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam

Bird R. B., Armstrong R. C., Hassager O., 1987. Dynamics of polymeric liquids, Wiley-Interscience publication, New York.

Carneiro, O. S., Nobrega, J. M., Pinho, F. T. and Oliveira, P. J., 2001. Computer aided rheological design of extrusion dies for profiles, *Journals of Materials Processing Technology*, **114**, 75-86.

Gifford, W. A., 2003. Compensating for die swell in the design of profile dies, *Polymer Engineering and Science*, **43**, 1657-1665

Macosko, C. W., 1994. Rheology: Principles, measurements and applications, Wiley-VCH, New York.

Michaeli, W., 2003. Extrusion dies for plastics and rubber: design and engineering computations, Hanser, Münich.

Nóbrega, J. M., Carneiro, O. S., Pinho, F. T. and Oliveira, P. J., 2004. Flow Balancing in Extrusion Dies for Thermoplastic Profiles, Part III: Experimental Assesment, *Intern. Polymer Processing*

Polyflow 3.10 User Guide, 2003. *Fluent Inc.*, Lebanon

Rauwendaal, C., 2001. Polymer extrusion, Hanser, Munich.

ÖZGEÇMİŞ

1982 yılında İstanbul ‘da dünyaya gelen Oktay YILMAZ, ilk öğretimini B. Halkalı İlk Öğretim Okulu ve Mehmet Akif Ersoy Lisesi ‘nde tamamladı. Avcılar Anadolu Meslek Lisesi ’nden 2000 yılında mezun oldu. 2004 yılında Yıldız Teknik Üniversitesi ’nden Makina Mühendisliği diplomasını aldı. Ocak 2005 ‘te İstanbul Teknik Üniversitesi, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, Isı – Akışkan Yüksek Lisans Programı ’nda yüksek lisans öğrenimine başladı.

Oktay YILMAZ İstanbul Teknik Üniversitesi, Makina Fakültesi, Hidromekanik ve Hidrolik Makinalar Anabilim Dalı ‘nda halen araştırma görevlisi olarak çalışmaktadır.