



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

**POLYESTER İPLİK ÜRETİMİNDE,  
DÜZE SONRASI İPLİK AKIŞININ  
FLUENT PROGRAMI KULLANILARAK MODELLENMESİ**

Şengül TEKE

YÜKSEK LİSANS TEZİ  
TEKSTİL MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**BURSA-2010**



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

**POLYESTER İPLİK ÜRETİMİNDE,  
DÜZE SONRASI İPLİK AKIŞININ  
FLUENT PROGRAMI KULLANILARAK  
MODELLENMESİ**

Şengül TEKE

Doç. Dr. Şule ALTUN  
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ  
TEKSTİL MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**BURSA-2010**

T.C.  
ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**POLYESTER İPLİK ÜRETİMİNDE,  
DÜZE SONRASI İPLİK AKIŞININ  
FLUENT PROGRAMI KULLANILARAK MODELLENMESİ**

Şengül TEKE

YÜKSEK LİSANS TEZİ  
TEKSTİL MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Bu Tez 23/02/2010 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği ile kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Şule ALTUN  
Danışman

Prof. Dr. Yusuf ULCA Y

Prof. Dr. İrfan KARAGÖZ

## ÖZET

Eriyikten lif üretimi prosesi, sentetik liflerin üretiminde önemli bir endüstriyel prosestir. Bu proses termoplastik polimerlerin şekil, yapı ve özelliklerinin değişimiyle meydana gelmekte ve lifin nihai özellikleri bu durumda oluşan uzama akışına bağlı olarak belirlenmektedir. Özellikle polimerin tek eksenli non-izotermal uzama davranışı proseste baskındır. Ayrıca proseste, momentum ve ısı transferi gerçekleşmektedir. Bilgisayar simülasyonu, lif hızı, çapı, sıcaklığı ve yoğunluğunun lif üretim hattının fonksiyonu olarak hesaplayabilen ve bu nedenle enerji ve zaman kazancı sağlayan yararlı bir yöntemdir.

Bu çalışmada, farklı kütle akış miktarları ve kristalizasyonun ihmal edilebildiği düşük çekim hızlarında eriyikten lif üretimi prosesini tanımlayan bir model oluşturulmaktadır. Polimer akışının viskoz akış olduğu varsayımıyla Newtonian modele ait kurucu denklemler kullanılmaktadır. Proses parametrelerini tanımlamak için lif modeli CFD hesaplamalarında soğutma havası ile bir arada tanımlanmaktadır. Bu modelde enerji, momentum ve kütle denklemleri çözülmektedir. Bu amaçla Fluent Continuous Fiber Model kullanılmaktadır. Elde edilen grafikler daha önce literatürde PET için yapılmış olan iki deneysel çalışma ile (George 1982, Bansal ve Shambaugh 1998) karşılaştırılmaktadır. Karşılaştırmalar sonucunda oluşan farklılıklar tartışılmaktadır. Sonuçlar, yapılan modellemenin eriyikten lif üretimi prosesinde önemli özellikleri tanımladığını göstermektedir. Bununla beraber, viskoelastik davranış lif hızı ve lif çapında belirgin farklılıklar oluşturmaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** Eriyikten Lif Üretimi, Polietilen Tereftalat, Polimer, Uzama Akışı, Viskoelastik, Isı Transferi, Fluent, Newtonian, Modelleme.

**ABSTRACT**

The fiber-spinning process is an important industrial operation to manufacture synthetic fibers. The process includes change in shape, structure and properties of the thermoplastic polymer and the final properties of the fiber are characterized by the extensional properties of the polymer. Specifically, the non-isothermal response of the polymer in uniaxial extension dominates the process. Also the process includes momentum and heat transfer. Computer simulation is useful method to simulate melt spinning process that can compute the velocity, diameter, temperature, and density as a function of distance from the spinneret which provides saving energy and time.

In this study, a model is formulated to describe the melt spinning of (PET) within the different mass throughputs and low range of take-up velocities when the degree of crystallization becomes negligible. The constitutive equations of Newtonian model are used for modelling which assumes the flow of polymer is as a viscous. To simulate the influence of process parameters to the melt spinning process a fiber model is used and coupled with CFD calculations of the quench air flow. In the fiber model energy, momentum and mass balance are solved for the polymer mass flow. The above formulation is implemented in Fluent Continuous Fiber Model. Numerical predictions of the model compare well with experimental data reported in the literature for a PET (George 1982, Bansal ve Shambaugh 1998). The reasons for the observed differences between experimental profiles and those computed from the model are discussed. The results show that the model describes the major features of the melt spinning process. However, viscoelasticity plays an important role in accurately predicting diameter and velocity profiles.

**Key Words:** Melt spinning, Polyethylene terephthalate, Polymer, Extensional Flow, Viscoelastic, Heat Transfer, Fluent, Newtonian, Modelling.

## İÇİNDEKİLER

	Sayfa
TEZ ONAY SAYFASI.....	II
ÖZET.....	III
ABSTRACT.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
KISALTMALAR DİZİNİ.....	VIII
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	IX
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	X
SİMGELER DİZİNİ.....	XIII
GİRİŞ.....	1
1. KURAMSAL TEMELLER.....	5
1.1. Eriyikten Lif Üretimi Prosesi.....	5
1.1.1. Lif üretim yöntemleri.....	5
1.1.2. Eriyikten lif üretimi genel tanımlama.....	6
1.1.2.1. Ekstruder.....	7
1.1.2.2. Pompalama işlemi.....	9
1.1.2.3. Filtreleme.....	10
1.1.2.4. Düzeler.....	10
1.1.2.5. Soğutma havası.....	11
1.1.2.6. Bitim yağı.....	13
1.1.2.7. Çekim.....	13
1.2. Lif Eriyiğinin Özellikleri.....	15
1.2.1. Reolojik özellikler.....	15
1.2.1.1. Reolojinin tanımı.....	15
1.2.1.2. Akış türleri.....	16
1.2.1.3. Polimerlerin akış özellikleri.....	20
1.2.1.4. Viskoelastik davranış.....	22
1.2.1.5. Polimerlerde viskoelastik davranış.....	24
1.2.2. Termodinamik özellikler.....	26
1.2.2.1. Yoğunluk.....	26
1.2.2.2. Özgül ısı kapasitesi.....	26
1.2.2.3. Uzama viskozitesi (Newtonian viskozite).....	27
1.2.2.4. Isı iletim katsayısı.....	29
1.3. Eriyikten Lif Üretimi Prosesinde Lif Yapısının Gelişimi.....	29
1.3.1. Oryantasyon gelişimi ve çiftkırınım.....	30
1.3.2. Kristalizasyon oluşumu.....	33
1.4. Eriyikten Lif Üretimi Proses Analizi.....	36
1.4.1. Eriyikten lif üretimi prosesi değişkenleri.....	36
1.4.2. Lif modelinin tanımlanması.....	37
1.4.3. Radyal ısı dağılımının etkileri.....	39

1.4.4. Multi-Filament etkisi .....	39
1.5. Eriyikten Lif Üretimi Prosesinde Sayısal Analizin Uygulaması.....	40
1.6. Temel Denklemler.....	41
1.6.1. Süreklilik denklemi.....	42
1.6.2. Momentum dengesi .....	42
1.6.2.1. Reolojik kuvvet (F <sub>reol(z)</sub> ) .....	43
1.6.2.2. Yüzey gerilimi kuvveti (F <sub>yüzey</sub> ) .....	44
1.6.2.3. Yerçekimi kuvveti (F <sub>yerçekimi</sub> ) .....	44
1.6.2.4. Atalet kuvveti (F <sub>atalet</sub> ) .....	45
1.6.2.5. Sürüklenme kuvveti (F <sub>sür</sub> ).....	45
1.6.2.6. Kuvvetlerin lif üretim hattında etkileri .....	47
1.6.3. Enerji denklemi.....	48
1.6.3.1. Lif ve ortam arasındaki etkileşim .....	48
1.6.3.2. Lif üretim hattında enerji denklemi .....	49
2. MATERYAL VE YÖNTEM.....	51
2.1. Korunum Denklemleri.....	51
2.2. Kullanılan Program Ve Uygulaması .....	52
2.3. Yapılan Kabuller .....	55
2.4. Proses Şartları.....	56
2.4.1. Çekim hızı değişimini inceleyen deneysel veri proses şartları .....	56
2.4.2. Kütle akış miktarı değişimini inceleyen deneysel veri proses şartları.....	57
3. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA .....	58
3.1. Uzunluk-Hız Değişim Grafikleri .....	58
3.1.1. Çekim hızı değişimi sonuçları .....	58
3.1.2. Kütle akış miktarı (0.8 g/dk) değişimi sonuçları .....	61
3.1.3. Kütle akış miktarı (1.5 g/dk) değişimi sonuçları .....	65
3.1.4. Kütle akış miktarı (3.0 g/dk) değişimi sonuçları .....	66
3.2. Uzunluk-Sıcaklık Değişim Grafikleri .....	70
3.2.1. Çekim hızı değişimi sonuçları .....	70
3.2.2. Kütle akış miktarı (0.8 g/dk) değişimi sonuçları .....	73
3.2.3. Kütle akış miktarı (1.5 g/dk) değişimi sonuçları .....	74
3.2.4. Kütle akış miktarı (3.0 g/dk) değişimi sonuçları .....	76
3.3. Uzunluk-Lif Çapı Değişim Grafikleri .....	78
3.3.1. Kütle akış miktarı (0.8 g/dk) değişimi sonuçları .....	78
3.3.2. Kütle akış miktarı (1.5 g/dk) değişimi sonuçları .....	81
3.3.3. Kütle akış miktarı (3.0 g/dk) değişimi sonuçları .....	82
3.4. Uzunluk-Lif Yoğunluğu Değişim Grafikleri.....	86
3.4.1. Çekim hızı ve kütle akış miktarı (0.8 g/dk) değişimi sonuçları.....	86
3.4.2. Çekim hızı ve kütle akış miktarı (1.5 g/dk) değişimi sonuçları.....	88
3.4.3. Çekim hızı ve kütle akış miktarı (3.0 g/dk) değişimi sonuçları.....	90
3.5. Tartışma ve Öneriler.....	92
3.5.1. Tartışma .....	92
3.5.1.1. Uzunluk-hız değişim grafikleri .....	92
3.5.1.2. Uzunluk-sıcaklık değişim grafikleri .....	93

3.5.1.3. Uzunluk-lif çapı değişim grafikleri.....	94
3.5.2. Öneriler .....	95
SONUÇ.....	96
KAYNAKLAR.....	97
ÖZGEÇMİŞ.....	103
TEŞEKKÜR .....	104



**KISALTMALAR DİZİNİ**

PET	- Polietilen teraftalat
FEC	- Akış Kaynaklı Kristalizasyon
PA	- Poliamid
PES	- Polyester
PP	- Polipropilen
PAN	- Akrilik
CV	- Viskoz lifi
CMD	- Modal
EL	- Elastan
CA	- Asetat
PAN	- Akrilik
FEM	- Sonlu Elemanlar Yöntemi method
LOY	- Low Oriented Yarn
MOY	- Medium Oriented Yarn
POY	- Partially Oriented Yarn
HOY	- Highly Oriented Yarn
FOY	- Fully Oriented Yarn
FDY	- Fully Drawn Yarn
WLF	- Williams-Landel-Ferry Denklemi
UCM	- Upper-convected Maxwell Modeli
PTT	- Phan Thien Tanner Modeli
K-BKZ	- Kaye/Bernstein-Kearsley-Zapas) Modeli

**ÇİZELGELER DİZİNİ**

	Sayfa
<b>Çizelge 1.1:</b> Lif Üretim Yöntemlerinin Karşılaştırılması. ....	5
<b>Çizelge 1.2:</b> Reoloji Bilim Alanına Giren Konular.....	15
<b>Çizelge 1.3:</b> Eriyikten Lif Üretimi Prosesi Temel Değişkenleri .....	38
<b>Çizelge 2.1:</b> Deneysel Verilere Ait Proses Şartları .....	56
<b>Çizelge 2.2:</b> Deneysel Verilere Ait Proses Şartları.....	57
<b>Çizelge 2.3:</b> Simülasyon Değerlerine Ait Proses Şartları. ....	57

## ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
<b>Şekil 1.1:</b> Eriyikten Lif Üretimi Prosesinin Şematik Gösterimi .....	6
<b>Şekil 1.2:</b> Ekstruderin Şematik Gösterimi.....	8
<b>Şekil 1.3:</b> Soğutma Sistemleri a) Cross-flow, b) Inflow, c) Outflow.....	11
<b>Şekil 1.4:</b> Kayma Akışının Şematik Tanımlanması. ....	16
<b>Şekil 1.5:</b> a) Tek Eksenli Uzama Akışı Diyagramı; b) Bir Damlanın Uzama Akışı Etkisiyle Deformasyona Uğraması ve Değişiminin Şematik Gösterimi. ....	17
<b>Şekil 1.6:</b> Uzama ve Kayma Viskozitesi-Deformasyon ve Uzama Oranının Fonksiyonu. ....	18
<b>Şekil 1.7:</b> İki Paralel Levha Arasında Hız, Kayma Oranı ve Kayma Gerilimi profilleri. ....	18
<b>Şekil 1.8:</b> Newtonian ve Non-newtonian Akışlarda, Viskozite Değişimi.....	19
<b>Şekil 1.9:</b> Polimer Akışlarda, Newtonian Akışlardan Farklı Olarak Oluşan:a)Weissenberg Efeği b) Düz Şişmesi. ....	21
<b>Şekil 1.10:</b> a) Hooke Cismi b) Hooke Cisminde Oluşan Şekil Değiştirme Miktarının Değişimi. ....	23
<b>Şekil 1.11:</b> a) Newtonian Cisim, b) Newtonian Cisimde Oluşan Şekil Değiştirme Miktarının Değişimi. ....	23
<b>Şekil 1.12:</b> Viskoelastik Modeller a) Maxwell Modeli, b) Kelvin Modeli, c) Birleştirilmiş Model.....	24
<b>Şekil 1.13:</b> PET Lifinde Sıcaklığa Bağlı (Arrhenius) Uzama Viskozitesi Değişimi. ....	28
<b>Şekil 1.14:</b> Eriyikten Lif Üretimi Prosesinde Lif Yapısının Gelişiminde Adımların Şematik Gösterimi. ....	30
<b>Şekil 1.15:</b> Eriyikten Lif Üretimi Prosesinde Moleküler Oryantasyon Oluşumu. ....	31
<b>Şekil 1.16:</b> Çekim Hızına Bağlı Olarak Kristal ve Amorf Yapıdaki Oryantasyonun Değişim Grafiği. ....	33
<b>Şekil.1.17:</b> Sıcaklık Ve Moleküler Oryantasyona Bağlı Olarak Kristalizasyon Derecesinin Değişim Grafiği. ....	34
<b>Şekil.1.18:</b> Eriyikten Lif Üretim Prosesinin Şematik Gösterimi. ....	37
<b>Şekil.1.19:</b> Eriyikten Lif Üretim Prosesinde Lif Üzerine Etkiyen Kuvvetler. ....	42
<b>Şekil.1.20:</b> Eriyikten Lif Üretim Prosesinde Lif Üzerine Etkiyen Kuvvetler. ....	48
<b>Şekil.2.1:</b> Soğutma Bölgesinin Sayısal Ağı (Mesh).....	52
<b>Şekil.2.2:</b> Lif Özelliklerinin Girildiği Pencere (1) .....	53
<b>Şekil.2.3:</b> Lif Özelliklerinin Girildiği Pencere (2) .....	54
<b>Şekil.2.4:</b> Lif Özelliklerinin Girildiği Pencere (3) .....	54
<b>Şekil.2.5:</b> Soğutma Havası Özelliklerinin Girildiği Pencere .....	55
<b>Şekil 3.1:</b> Deneysel Veriler (George 1982).....	58
<b>Şekil 3.2:</b> Simülasyon Değerleri. ....	58
<b>Şekil 3.3:</b> PET Lifi Üzerinde Oluşan Kuvvetlerin Etkisi. ....	60
<b>Şekil 3.4:</b> Soğutma Havası Özelliklerinin Değişiminin Lif Hızına Etkileri a) Soğutma Havası Hızının Değişim b) Soğutma Havası Sıcaklığının Değişimi (Simülasyon Değerleri)61	61
<b>Şekil 3.5:</b> Deneysel Veriler (Bansal and Shambaugh 1998). Proses şartları Çizelge 2.2' de belirtilmektedir. ....	61

<b>Şekil 3.6:</b> Simülasyon Değerleri. Proses şartları Çizelge 2.2' de belirtilmektedir.....	62
<b>Şekil 3.7:</b> Yüksek Çekim Hızlarında Lif Hızı Grafiği (Simülasyon Değerleri).....	63
<b>Şekil 3.8:</b> Lif Üretim Hattında, Farklı Üretim Hızlarının ve Buna Bağlı Boyun Verme Oluşumunun Şematik Gösterimi .....	64
<b>Şekil 3.9:</b> Boyun Verme Parametresinin (H) Matematiksel İfadesi .....	64
<b>Şekil 3.10:</b> Deneysel Veriler (Bansal and Shambaugh 1998). .....	65
<b>Şekil 3.11:</b> Simülasyon Değerleri. . .....	65
<b>Şekil 3.12:</b> Deneysel veriler (Bansal and Shambaugh 1998). .....	66
<b>Şekil 3.13:</b> Simülasyon değerleri. ....	67
<b>Şekil 3.14:</b> Sabit Çekim Hızında, Kütle Akış Oranı Değişiminin Lif Hızına Etkisi. a) 1500 m/dk Çekim Hızı, b) 2500 m/dk Çekim Hızı, c) 3500 m/dk Çekim Hızı, d) 4500 m/dk Çekim Hızı İçin, Farklı Kütle Akış Oranlarında Lif Hızı Değişimi (Simülasyon Değerleri).....	68
<b>Şekil 3.15:</b> Simülasyon Değerleri. ....	69
<b>Şekil 3.16:</b> Deneysel Veriler (George 1982). .....	70
<b>Şekil 3.17:</b> Simülasyon Değerleri. ....	70
<b>Şekil 3.18:</b> Yüksek Çekim Hızlarında Yapılan Lif Üretim İşlemine Ait Ortalama Lif Sıcaklığı Ölçümü Deneysel Verileri .....	71
<b>Şekil 3.19:</b> Soğutma Havası Özelliklerinin Değişiminin Lif Sıcaklığına Etkileri a) Soğutma Havası Hızının Değişimi, b) Soğutma Havası Sıcaklığının Değişimi (Simülasyon Değerleri).....	72
<b>Şekil 3.20:</b> Deneysel veriler (Bansal and Shambaugh 1998). ....	73
<b>Şekil 3.21:</b> Simülasyon Değerleri . . .....	73
<b>Şekil 3.22:</b> Deneysel Veriler (Bansal and Shambaugh 1998). ....	74
<b>Şekil 3.23:</b> Simülasyon Değerleri. . .....	75
<b>Şekil 3.24:</b> Deneysel veriler (Bansal and Shambaugh 1998). ....	76
<b>Şekil 3.25:</b> Simülasyon Değerleri. ....	76
<b>Şekil 3.26:</b> 1500 m/dk Çekim Hızı İçin, Farklı Kütle Akış Oranlarında Ortalama Lif Sıcaklığı Değişimi (Simülasyon Değerleri).....	78
<b>Şekil 3.27:</b> Deneysel Veriler (Bansal and Shambaugh 1998). ....	78
<b>Şekil 3.28:</b> Simülasyon Değerleri. . .....	79
<b>Şekil 3.29:</b> Yüksek Çekim Hızlarında Yapılan Lif Üretim İşlemine Ait Lif Çapı Ölçümü Deneysel Verileri.....	80
<b>Şekil 3.30:</b> Deneysel Veriler (Bansal and Shambaugh 1998). ....	81
<b>Şekil 3.31:</b> Simülasyon Değerleri. . .....	81
<b>Şekil 3.32:</b> Deneysel Veriler (Bansal and Shambaugh 1998). ....	82
<b>Şekil 3.33:</b> Simülasyon Değerleri . . .....	83
<b>Şekil 3.34:</b> Sabit Çekim Hızında, Kütle Akış Oranı Değişiminin Lif Çapına Etkisi. a) 1500 m/dk Çekim Hızı, b) 2500 m/dk Çekim Hızı, c) 3500 m/dk Çekim Hızı, d) 4500 m/dk Çekim Hızı İçin, Farklı Kütle Akış Oranlarında Lif Hızı Değişimi(Simülasyon Değerleri).....	84
<b>Şekil 3.35:</b> Simülasyon değerleri . . .....	85
<b>Şekil 3.36:</b> Deneysel Veriler (Bansal and Shambaugh 1998). ....	86
<b>Şekil 3.37:</b> Simülasyon Değerleri. . .....	86

<b>Şekil 3.38:</b> Farklı Çekim Hızlarında, PET Lifinin Çiftkırınım Gelişimi .....	87
<b>Şekil 3.39:</b> Deneysel Veriler (Bansal and Shambaugh 1998). .....	88
<b>Şekil 3.40:</b> Simülasyon Değerleri. . .....	89
<b>Şekil 3.41:</b> Deneysel Veriler (Bansal and Shambaugh 1998). . .....	90
<b>Şekil 3.42:</b> Simülasyon Değerleri. . .....	90
<b>Şekil 3.43:</b> 1500 m/dk Çekim Hızı İçin, Farklı Kütle Akış Oranlarında Lif Yoğunluğu Değişimi (Simülasyon Değerleri).....	91
<b>Şekil 3.44:</b> 3000m/dk Çekim Hızında Newtonian Model ve Viskoelastik (UCM) Model Arasındaki Hız Profili Simülasyon Sonuçları Farkı.....	92
<b>Şekil 3.45:</b> Farklı Çekim Hızlarında K-BKZ Viskoelastik Model, PTT Model ve Deneysel Veriler Arasındaki Lif Sıcaklığı Profili Farkı. ....	93
<b>Şekil 3.46:</b> 3000m/dk Çekim Hızında Newtonian Model ve UCM Model Arasındaki Lif Çapı Profili Simülasyon Sonuçları Farkı. ....	94

**SİMGELER DİZİNİ**

A	- Lifin Kesit Alanı, $A = \pi D^2/4$ (cm <sup>2</sup> )
C <sub>f</sub>	- Yüzey Sürtünme Katsayısı
C <sub>p</sub>	- Özgül Isı Kapasitesi (cal/g°C)
D	- Lif Çapı (cm)
D <sub>cr</sub>	- Maksimum Kristalizasyon Oranı (°C)
D <sub>0</sub>	- Düze Çapı (cm)
E <sub>η</sub>	- Polimer Aktivasyon Enerjisi (kcal/mol)
F	- Kuvvet (dyne)
F <sub>0</sub>	- Düze Çıkışındaki İlk Kuvvet (dyne)
F <sub>atalet</sub>	-Lif Üretim Hattı Boyunca Polimer Kütlesinin İvmesi Tarafından Üretilen Atalet Kuvveti (dyne)
F <sub>reo</sub>	- Düzeden Uzaklığa Bağlı Olarak Lif Üzerinde Etkiyen Kuvvet (dyne)
F <sub>sür</sub>	- Lif Soğutma Ortamında Hareket Ederken Akışın Sürüklenme Kuvveti (dyne)
F <sub>yerçekimi</sub>	- Lif Üretim Hattındaki Yerçekimi Kuvveti (dyne)
F <sub>yüzey</sub>	- Lif/Hava Etkileşiminde Oluşan Yüzey Gerilimi Kuvveti (dyne)
g	- Yerçekimi İvmesi (981 cm/s <sup>2</sup> )
h	- Yükseklik (cm)
H	-Boyun Verme Parametresinin Matematiksel İfadesi
ΔH <sub>f</sub>	- Birim Kütleye Düşen Kristalizasyon Isısını Tanımlayan Gizli Isı (cal/g)
IV	- İntresik viskozite (dl/g)
k	- Boltzmann Sabiti (1.38x10 <sup>-23</sup> J/K)
K	- Sabit (Denklem 1.24)
K <sub>max</sub>	- Maksimum Kristalizasyon Oranının Oluştığı Değişim Sabiti (s <sup>-1</sup> )
L	- Lif Üretim Hattı Uzunluğu (cm)
n <sub>z</sub>	- Lif Eksenine Paralel Çiftkırınım
n <sub>r</sub>	- Lif Eksenine Dikey Çiftkırınım
Δn	- Çiftkırınım (Oryantasyon)

$\Delta n_0$	- İntresik Çiftkırınım
$\Delta n_c$	- Kristalin Oryantasyon
$\Delta n_a$	- Amorf Oryantasyon
$N_1$	- Birincil normal gerilme farkı (dyne/cm <sup>2</sup> )
$N_2$	- İkincil normal gerilme farkı (dyne/cm <sup>2</sup> )
Re	- Reynolds Sayısı
s	-Aerodinamik Sürüklenmeden Dolayı Lif/Hava Etkileşimindeki Kayma Gerilmesi (dyncm <sup>-1</sup> )
T	- Lif Sıcaklığı (°C)
$T_a$	- Soğutma Havası Sıcaklığı (°C)
$T_g$	- Polimerin Camlaşma Sıcaklığı (°C)
$T_m$	- Polimerin Erime Sıcaklığı (°C)
$T_{max}$	- Maksimum Kristalizasyon Oranının Oluştuğu Lif Sıcaklığı (°C)
$T_0$	- Ekstruder Sıcaklığı (Başlangıç Sıcaklığı)
V	- Hız (m/dk)
W	- Kütle Akış Miktarı (Debi) (g/dk)
X	- Kristalizasyon Derecesi
x, y, z	- Kartezyen koordinatlar
z	- Lif Üretim Hattı Uzunluğunda Herhangi Bir Uzunluk (cm)
$z_1$	- Soğutma Havası Uygulanan Bölgenin Başlangıç Uzunluğu (cm)
$z_2$	- Soğutma Havası Uygulanan Bölgenin Bitiş Uzunluğu (cm)
$\alpha$	- Isı Transferi Katsayısı (cal/cm <sup>2</sup> s°C)
$\alpha_{zz} - \alpha_{rr}$	- Lifin Eksenel ve Radyal Yönlerindeki Polarizability Bileşenleri Farkı
$\epsilon$	- Uzama Oranı (s <sup>-1</sup> )
$\phi$	- Zincir Ekseni Ve Lif Ekseni Arasındaki Açı
$\gamma$	- Kayma Oranı (s <sup>-1</sup> )
$\eta$	- Kayma viskozitesi (g/cms)
$\eta_0$	- Sıfır kayma viskozitesi(g/cms)
$\eta_\epsilon$	- Uzama viskozitesi(g/cms)
$\eta_{hava}$	- Havanın Dinamik Viskozitesi (g/cms)
$\lambda$	- Polimer Isı İletim Katsayısı (cal/cms°C)

$\lambda_{hava}$	- Havanın Isı İletim Katsayısı (cal/cms°C)
$\nu_{hava}$	- Havanın Kinematik Viskozitesi (cm <sup>2</sup> /s)
$\rho$	- Lif Yoğunluğu (g/cm <sup>3</sup> )
$\rho_{hava}$	- Soğutma Havaşı Yoğunluğu (g/cm <sup>3</sup> )
$\sigma$	- Normal Gerilme (dyne/cm <sup>2</sup> )
$\sigma_f$	-Hava Sürüklenmesinden Kaynaklanan Lif Yüzeyinde Oluşan Kayma Gerilimi (dyne/cm <sup>2</sup> )
$\tau$	- Kayma gerilmesi (dyne/cm <sup>2</sup> )
$v_L$	- Çekim hızı (m/dk)
$v_0$	- Ekstruder hızı (Başlangıç Hızı) (m/dk)
$v_c$	- Akış hızına dikey yönde soğutma havaşı hızı (m/dk)
$f$	- Oryantasyon Faktörü
$\Phi$	- Eksenel Yöndeki Z Noktası İçin Ortalama Mutlak Kristalinite Derecesi



## GİRİŞ

Sentetik lif üretiminde, Polyester lifi özellikle de PET (polietilen teraftalat) dünyada en fazla üretim hacmine sahip sentetik lifdir. 2002 yılında üretilen sentetik elyafın % 58' lik bir payına sahiptir (Jaffe ve East 2007). PET lifinin, ucuz hammaddesinden ve nispeten kolay üretilmesinden dolayı düşük üretim maliyetine sahip olması, özellikle hazır giyimde kullanım rahatlığından dolayı tercih edilmesi bunun sebepleri olarak gösterilebilir (Jaffe ve East 2007, Reese 2003). Ayrıca, PET lifinde eriyikten lif üretim metodunun kullanılabilir olması da, tercih edilmesinde büyük etkindir. Eriyikten lif üretimi temiz ve üretim kirliliğine yol açmayan ekonomik bir prosestir. Eriyikten lif üretimi hem kararlı bir lif formu, hem de liflerin mikro yapısını kontrol edebilmeyi sağlamaktadır (Reese 2003).

Eriyikten lif üretim prosesinde lif, eriyik hale gelen polimerin pompalar yardımıyla filtre ve düzelerden geçerek, akış halindeyken soğutma havası etkisiyle katılaşmasının sağlanmasıyla elde edilmektedir. Dolayısıyla eriyikten lif üretimi prosesi momentum ve ısı transferinin gerçekleştiği ve kütlenin sabit kaldığı bir polimer prosesidir.

Lif yapısının geliştirilmesi ve daha düşük maliyetlerde istenen nihai lif özelliklerinin elde edilmesi gibi sebeplerden dolayı eriyikten lif üretimi prosesinde araştırmalar günümüzde de devam etmektedir. Proses esnasında lifte oluşan fiziksel ve yapısal değişiklikler ve proses dinamikleri araştırmacıların odaklandığı konulardır. Bu amaçla, özellikle sayısal analiz eriyikten lif çekimi prosesinin analizi için uygun bir metottur. Sıcaklık, hız, gerilim ve çap gibi profillerin gelişimi bu yöntemle elde edilebilmektedir (Kim ve ark. 2009).

Endüstriyel denemelerde zaman, materyal ve enerji harcamasına alternatif olan bilgisayar simülasyonu, mühendislik problemlerinin çözümünde en verimli yoldur ve polimer bilimi ve teknolojisinin bir çok alanında tercih edilmektedir (Ziabicki 1998, 2001). Bununla beraber modellemede başarı, materyal davranışına bağlı olarak belirlenen varsayımlara da çok fazla bağlıdır (Ziabicki 2001). Polimerlerin karmaşık yapısı bu varsayımları zorlaştırmaktadır.

Proses ve materyale bağılı değişkenler modellemenin başarısını büyük ölçüde etkilemektedir. Genel olarak, eriyikten lif üretimi prosesi, modelleme açısından incelendiğinde polimerin viskoelastik akışını, non-izotermal şartları, kompleks sınır şartlarını (hava sürüklemesi, serbest, yüzey, ısı transfer), akış deformasyonuna bağılı faz değişimini (kristalizasyonu) içermektedir. Bu maddeler modellemede yapılan varsayımların yönünü belirlemektedir. Tüm polimer prosesinde varsayımlar doğrultusunda belirlenen yapısal temel model, elde edilen reolojik davranış ve proses dinamiklerini de önemli derecede etkilemektedir (Doufas ve ark. 2000).

Eriyikten lif üretimi prosesinde başarılı bir modelleme yapabilmek için,

1. Belirlenen modelin doğru olarak uygulanabilmesi, üretim hattı boyunca lif çapı ve sıcaklığı profilleri hakkında geniş bir çekim hızı aralığı için tahminlerde bulunabilmesi,
2. Üretim hattı boyunca özellikle yüksek çekim hızlı üretim şartlarında oluşan boyun verme ve akış kaynaklı kristalizasyonun (FEC) etkili olduğu kristalinitenin tanımlanması ve katılma noktasının tespit edilmesi,
3. Proses dinamikleri, viskoelastik etki ve kristaliniteye bağılı olarak nihai lifin mekaniksel özelliklerinin ve mikro yapısının tahmin edilebilmesini sağlamalıdır (Kohler ve ark. 2007).

Bu maddelerde bahsedilen analizler doğrultusunda birçok araştırmacı eriyikten lif üretimi prosesini matematiksel olarak modellemiştir. İlk olarak eriyikten lif üretimi prosesinin matematiksel modellemesi Ziabicki ve Kedzierska (1957) ve Ziabicki (1961) tarafından soğutma ve inceme davranışının formüle edilmesiyle başlamıştır. Daha sonra Kase ve Matsuo (1965,1967) eriyikten lif üretimi prosesinin nümerik simülasyonunu, bu denklemleri temel olarak analiz etmişlerdir ve enerji denkleminde kullanılan ısı transferi katsayısını deneysel yollarla tanımlamışlardır. Kase ve Matsuo (1965, 1967) ve Kase (1985)'in kararlı durum için eriyikten lif üretimi prosesini ve zaman bağılı davranışların dinamiğini modelleyen çalışmaları, sonraki çalışmalara öncülük etmesi açısından dikkate değerdir (Spruiell 2000).

Eriyikten lif üretimi prosesini tanımlayan temel denklemler bundan sonra geniş olarak kullanılmış ve analizin modifikasyonu için birçok öneriler geliştirilmiştir. Bunların içerisinde

temel newtonian model yerine viskoelastik kurucu denklemlerinin kullanımı (Fisher ve Denn 1977, Kase 1992), multi-filament üretim şartlarında soğutma havasının etkisi (Ishihara ve ark 1989, Beyreuther ve Brünig 1997) bu teorilerle birleştirilmiş ve moleküler oryantasyon ve kristalizasyon gelişimi (Shimizu ve ark. 1985, Patel ve ark. 1991, Denton ve ark. 1995) bu çalışmalara eklenerek lif üretim prosesinde yapının nasıl oluşacağı hakkındaki varsayımlar (Lipscomb 1994, Kikutani ve ark. 1996) yapılmıştır. Bu çalışmalarda PET lifi içinde birçok modelleme yapılmıştır (Ziabicki 1976, Ziabicki ve Kawai 1985, Denton ve ark. 1995, Doufas ve ark. 2000a, 2000b).

Eriyikten lif üretimi prosesinin sayısal analizinde, çoğu araştırmacı newtonian korunum denklemlerini kullanarak makul sonuçlara ulaşmıştır (Kim ve ark. 2009). Bu çalışmalar tahmin edilebilen modellerde lif üretim işleminin daha anlaşılır olmasını sağlamak ve problem çözümüne yardımcı olmaktadır (Jeon ve Cox 2009). Ancak 1960' lardan itibaren günümüze kadar yapılan çalışmalara rağmen yukarıda bahsedilen şartların tümünü sağlamış eriyikten lif üretim modeli mevcut değildir. Mevcut modeller bazı önemli etkileri dikkate almamakta ve/veya kimi materyal karakteristikleri deneysel yollarla elde edilememektedir. Bu nedenle sayısal modeller, nicel tahminlerden ziyade nitel tahminler sunabilmektedir (Ziabicki 1998).

Bu çalışmada “Polyester İplik Üretiminde Düze Sonrası İplik Akışı” modelleneyecektir. Modellemede temel varsayım akışın newtonian kabul edilmesidir. Ayrıca çalışma düşük hızlarda çekim hızlarını ele almaktadır. Bu modellemeyi yapmak için Fluent programının Continuous Fiber Modeli kullanılmaktadır. Fluent Continuous Fiber Modeli, lifin akış esnasındaki davranışını ve lif özelliklerini lif ve lifi çevreleyen soğutma havası ortamını bir arada modelleyerek, etkileşimini analiz etmemizi sağlamaktadır.

Yapılan çalışmada, eriyikten lif üretimi prosesinin uygulaması hakkında bilgi verildikten sonra, materyal davranışını analiz etmek amacıyla, sırasıyla eriyik lif üretiminde eriyik haldeki polimerin reolojik özellikleri ve lif yapısının gelişimi incelenmektedir. Ardından, sayısal analizin adımlarından biri olan matematiksel model tanımlanmakta ve kullanılacak temel denklemler belirlenmektedir. Literatürde mevcut olan iki deneysel çalışma

(George 1982, Bansal ve Shambaugh 1998) simülasyonlarda karşılaştırma yapmak amacıyla kullanılmaktadır. Giriş şartları bu çalışmalar doğrultusunda belirlenmektedir.

Bu çalışmada proses değişkenleri çekim hızı ve kütle akış oranıdır. Farklı çekim hızlarında ve farklı kütle akış miktarlarında lif çapı, lif hızı, ortalama lif sıcaklığı ve lif yoğunluğu profilleri, lif üretim hattı boyunca belirlenmektedir. Deneysel ve simülasyon çalışmalarına ait grafikler karşılaştırılarak yorumlar yapılmaktadır. Son olarak, yapılan varsayımlara göre simülasyon çalışmalarının gerçeğe yakınlık derecesi değerlendirilmekte ve öneriler sunulmaktadır.

## 1. KURAMSAL TEMELLER

### 1.1. Eriyikten Lif Üretimi Prosesi

#### 1.1.1. Lif üretim yöntemleri

Polimerin işlenmesi (katı durumdan sıvı faza geçiş) iki farklı yöntemle meydana gelmektedir. Eriyikten lif üretim prosesi, proses sıcaklığında özellikleri değişmeyen termoplastik polimerlere uygulanmaktadır. Bu metot liflerin % 70' inde tercih edilmektedir. Eriyikten lif üretimi proses olarak basit olduğu ve diğer yöntemlere göre daha düşük maliyetlerde yapıldığı için geniş kullanım alanına sahiptir. Solüsyondan lif üretimi prosesinde ise, polimer uygun bir çözücüde çözülerek, uygun akıcılıkta viskoz sıvı elde edilmektedir (Cesare ve Fabrizio 2004).

**Çizelge 1.1: Lif Üretim Yöntemlerinin Karşılaştırılması.**

	Eriyikten üretim	Solüsyondan Üretim	
		Yaş Çekim	Kuru Çekim
Prensip	Erime noktasından daha yüksek sıcaklıkta ısıtılma	Kütle değişimi	Isı değişimi ve kütle değişimi
Polimer viskozitesi	Yüksek	Orta	
İşlem basıncı	Yüksek (100-300 bar)	Orta veya düşük basınç (20 bar'a kadar)	
Düzeler	Çelik (2 mm ve daha fazla) Delik çapı: 0.15-0.50 mm	Değişik materyaller olabilir (çelik, soy metal, cam) Delik çapı: 0.025-0.250 mm	
Eğirme Hızı	Yüksek İplik için 6000-7000 m/dk Tow için 1000-1500 m/dk	Düşük İplik için maksimum 200m/dk Tow için 15-40m/dk.	Orta İplik için maksimum 1000m/dk Tow için 200-600m/dak
Enine kesit	Düze kesitinin formunu alır	Genellikle deforme olmuş bir kesit (dairelerden çok loblu yapıya kadar değişir )	
Lif yapısı	Düzgün yüzeye sahip kompakt	Kaba bir yüzeye sahip mikro-gözenekli	Kompakt bir yüzeye sahip mikro-gözenekli
Lif Örnekleri	PA(poliamid), PES (polyester), PP (polipropilen)	PAN(akrilik), CV(viskoz), CMD (modal), EL(elastan)	CA(asetat),EL(elastan), PAN (akrilik)

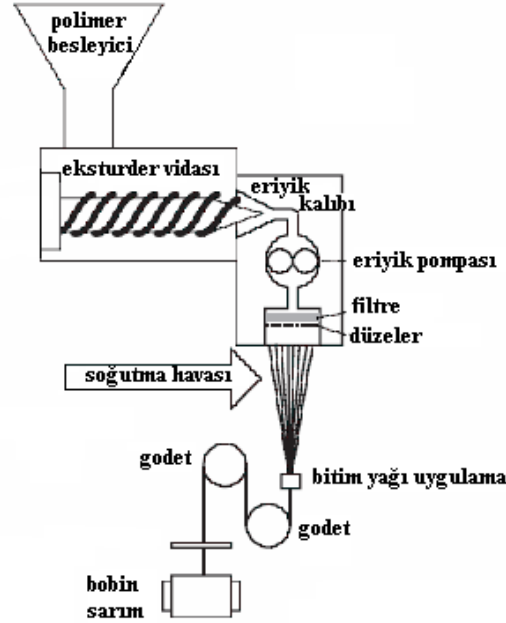
KAYNAK: CESARE, A. and F. FABRIZIO. 2004. Reference Books of Textile Technology: Man-Made Fibres. Acimit, Italy, 71 p.

Eriyikten lif üretimi prosesi ve solüsyondan lif üretimi proseslerinin genel hatlarıyla karşılaştırılması Çizelge 1.1’ de görülmektedir.

### 1.1.2. Eriyikten lif üretimi genel tanımlama

Çizelge 1.1’ de görüldüğü gibi, poliamid, polyester gibi birçok sentetik lif eriyikten lif üretimi yöntemiyle üretilmektedir.

Tüm sentetik lifler filament (sürekli lifler) ve stapel (kesikli lifler) olmak üzere iki temel gruba ayrılmaktadır. Filament ve stapel liflerin üretilmesinde eriyikten lif üretimi işlemi ve sonrasındaki proseslerde farklılıklar bulunmaktadır. Eriyikten lif üretimi prosesi teorik olarak incelendiğinde çok basit gibi görünse de, istenen lif özelliklerini elde edebilmek ve proses esnasındaki akış özelliklerini takip etmek oldukça karmaşıktır. Filament lifler için eriyikten lif üretim işlemi akış şeması Şekil 1.1’ de verilmiştir (East 2000).



**Şekil 1.1:** Eriyikten Lif Üretimi Prosesinin Şematik Gösterimi

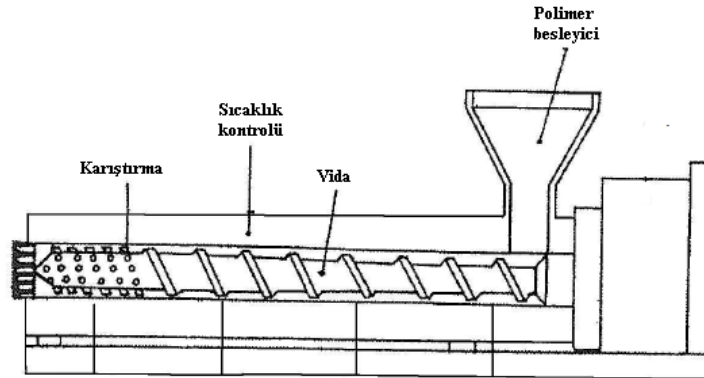
KAYNAK: EAST, A. J. 2000. Polyester Fibres. In: J. E. McIntyre (Editor), Synthetic Fibres: Nylon, Polyester, Acrylic, Polyolefin, Woodhead Publishing Ltd, England, p. 95-166.

Genel olarak tanımlayacak olursak, Şekil 1.1' de görüldüğü gibi :

- Katı haldeki polimer parçacıkları ekstruder içinde faz değiştirerek eriyik haline gelir ve ekstruder vidası tarafından eğirme pompalarına doğru itilir.
- Pompalar tarafından miktarı ölçülerek filtrelelere gönderilir.
- Eriyik haldeki polimer filtreleme işleminden sonra düzeye gelir.
- Düzeye deliklerinden dış ortama çıkar.
- Düzeden çıkan polimer soğutma (quenching) havasında katılaşmaya başlar.
- Her bir düze deliğinden çıkan lifler bir araya getirilerek iplik formuna sokulduktan sonra bitim yağları verilir.
- Çekim silindirlerinde çekme işlemine tabi tutulduktan sonra bobine sarılır (East 2000).

#### **1.1.2.1. Ekstruder**

Polimer cipsleri, eriyik hale gelmeden önce tamamen kurutulmaktadır. Genellikle bu işlem, vakum altında sıcaklığın artırılmasıyla gerçekleşmektedir. PET lifleri için, nem oranı ortam şartlarında % 0.4 civarındadır (Reese 2003). Kurutulmuş polimer cipsleri polimer besleyiciden ekstrudere iletilmekte, burada erime sıcaklığının 15-25 ° C üzerinde eritilmektedir. Polimer eriyiği, ekstruderden basınçla geçmekte ve eriyik kalıbına iletilmektedir (East 2000). PET lifinin genellikle eriyikten lif üretim sıcaklığı 280-300 ° C aralığındadır (Jaffe ve East 2007).



**Şekil 1.2:** Ekstruderin Şematik Gösterimi.

KAYNAK: SHENOY, A.V. and D. R. SAINI. 1996. Thermoplastic Melt Rheology and Processing, Marcel Dekker, USA, 472 p.

Şekil 1.2' de ekstruder silindir, elektrikle veya bir sıvı vasıtasıyla ısıtılmaktadır (Shenoy ve Saini 1996). Silindirin metal duvarlarına, silindir sıcaklıklarını sabitlemek amacıyla ısı sensörleri yerleştirilmektedir. Silindir bölümleri iç sürtünmeler tarafından üretilen aşırı ısıyı uzaklaştırmak için soğutulabilmektedir. Temel işlem değişkenleri, vida dönüş frekansı ve silindir sıcaklık profilidir. Temel dizayn değişkeni ise, vida çapı ( $D_{vida}$ ) ve uzunluğudur ( $L_{vida}$ ) ve genellikle  $L_{vida}/D_{vida}$  olarak belirtilmektedir.  $L_{vida}/D_{vida}$  oranı büyük ölçüde, ekstruder çıkışını, ekstruderdeki polimer bekleme zamanını ve ısı transferi için uygun silindir yüzeyini tanımlamaktadır. Vida dizaynı bir ekstruder işleminin başarısını belirleyen en önemli faktördür (Tadmor ve Gogos 1979).

Kimi zaman ekstruder çıkışı ile eriyik kalıbı arasına bir filtre konabilmektedir. Isıtılmış eriyik kalıbı, sayısı 2-8 arasında değişebilen düze paketlerine sahiptir, Şekil 1.1'de düze paketi sadece bir tane olarak gösterilmiştir. Bu sistemlerden her birinde pompa, filtre ve düzeler (spinneretler) mevcuttur (East 2000).

Tüm sistem ısıtmaya tabi tutulmaktadır, ekstruder sıcaklığı polimer eriyiği ile aynı olmalıdır. Bu nedenle tüm bağlantı elemanlarının sıcaklığı bu ısıya dayanacak şekilde tasarlanmaktadır. Aynı zamanda bu sistemin basınç değeri -PET eriyiğinde 2000-20000 poise



aralığında- yüksek polimeri, sızdırmaması gerekmektedir (East 2000, Cesare ve Fabrizio 2004).

İyi tasarlanmış bir eriyikten lif üretim sisteminde, tüm proses boyunca polimer sıcaklığı sabit olmalı, sistem içinde ölü nokta, durgun bölge veya polimerin yolunu değiştirebilecek bir açıklık bulunmamalıdır. Sıcaklık değişimleri, polimerin iplik halinde özellikle boyama gibi işlemlerde lif boyunca farklılıklara sebep olmakta, bu da son aşamada oluşturulan kumaş yüzeylerinin düzgün olmaması gibi sorunlara yol açmaktadır (East 2000).

### **1.1.2.2. Pompalama işlemi**

Sentetik lif elde edebilmek için, polimer eriyiğinin filtreye iletilmesi ve ardından düze deliklerinden geçmesi gerekmektedir. Her iki durum için de polimerin akışı yönünde bir basınç oluşmalıdır. Ayrıca lifin, istenen değerler içinde üretimini sağlayacak akış hızına gelmesi de, pompalar vasıtasıyla sağlanmaktadır. Yüksek viskoziteli polimerlerde dişli pompalar kullanılmaktadır. Ekstruderler de pompalama amacıyla kullanılabilir (Weinberger 1996).

Dişli pompa birbirine geçen iki dişliden oluşmaktadır. Birim zamanda taşınan eriyik miktarı, dişli çarkların ve özellikle diş boşluklarının büyüklüğünün yanında, dişli çarkların dönüş hızıyla da belirlenmektedir (Tarakçıoğlu 1986). Dişli pompanın akış miktarı, dönme hızı ile orantılıdır. Oluşan basınç akış miktarına değil, aşağı yöndeki akış direncine bağlı olarak değişmektedir. Polimerin viskozitesi, dişleri arasından geri sızmanın olmaması için, yeterli viskoziteye sahip olmalıdır (Weinberger 1996).

Polimer eriyiği miktarı pozitif yer değiştirmeli dişli pompa ile ölçülmekte ve her dönüşünde karışmış olan polimer eriyiğinin bir kısmı iletilmektedir (Weinberger 1996).

### 1.1.2.3. Filtreleme

PET lif üretiminde kullanılan filtreler, kum ve ince eleklerden oluşmaktadır (Tarakçioğlu 1986). Eriyik, düzede tıkanıklık olmaması amacıyla filtreden geçirilmekte, böylece içerisindeki yabancı maddeler uzaklaştırılmaktadır. Bu maddeler kum parçacıkları, alüminyum oksit tanecikleri ve özellikle günümüzde metal filtre kırıkları olabilir (East 2000).

Polimerin içerisinde bulunan partiküller, filamentlerde hatalara ve zayıf noktalara sebep olabilmektedir. Ayrıca partiküller düze deliklerine girerek, akışa etki etmekte ve lif çapının istenenden daha az olmasına sebep olabilmektedir. Lifteki bu farklılık sonraki proseslerde, mesela boya alımında farklılığa neden olmaktadır. Partiküller zamanla düze deliklerinde tıkanıklığa yol açacağı için, polimerin yönünün değişmesine de sebep olabilmektedirler. Bu gibi durumlarda tüm proses hattının kapatılıp, düze tabakasının temizlenmesi gerekmektedir (Weinberger 1996).

### 1.1.2.4. Düzeler

Polimer, eriyik kalıbı içinde son olarak küçük deliklerden basınçla itilmektedir. PET lifi için düze çapları 0.2-0.4 mm arasında ve sağlanan akış miktarı 1-5 g/dk arasındadır (Reese 2003).

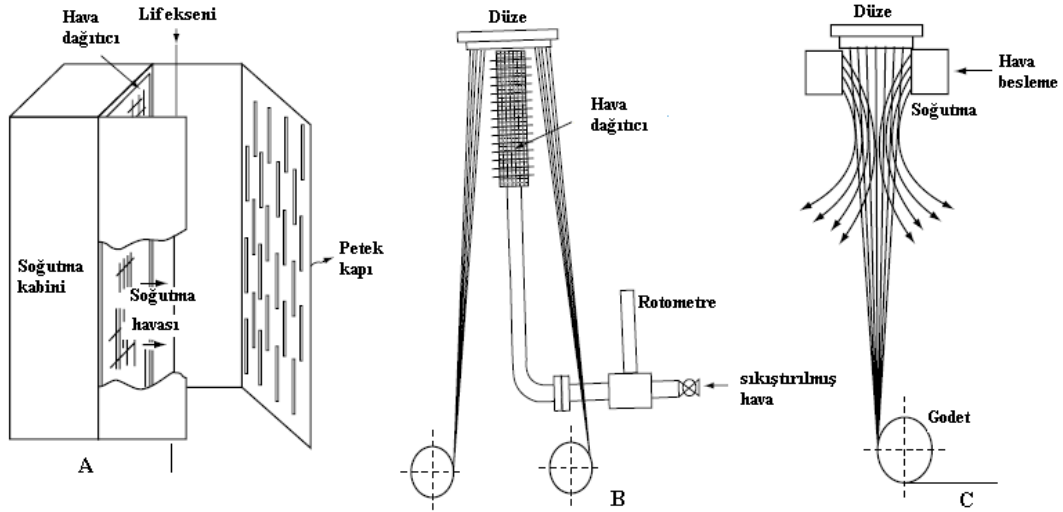
Polimer eriyiğinin lif şeklinde akmasını sağlayan düzeler çok küçük deliklerden oluşmaktadır. Düzede tek veya daha fazla delik bulunabilmektedir. Bu şekilde mono-filament veya multi-filament üretimi yapılmaktadır (Tarakçioğlu 1986). PET lifinde yuvarlak kesit yaygın olmasına rağmen, daha kompleks yapılar da mevcuttur (Reese 2003).

### 1.1.2.5. Soğutma havası

Polimer, düzelerden geçtikten sonra lif oluşumu başlamakta ve akma esnasında katılaşma gerçekleşmektedir. Soğutma prosesinin hızlanması için, liflere kontrollü bir şekilde laminer akışa sahip soğutma havası gönderilmektedir (East 2000).

Eriyik haldeki polimer düzeden çıkarken, hava ile soğutulmaktadır. Çoğu proste soğutma ortamı kullanılmaktadır. Soğutma havasının sıcaklığı 18-22 ° C arasındadır (Jaffe ve East 2007). Soğutma oranı, soğutma havası sıcaklığı, soğutma havası hızı ve lif inceliğine bağlı olarak değişmektedir. Soğutma havası sıcaklığı ve hızı lif üzerinde her hangi bir bozukluğa sebep teşkil etmemesi amacıyla kontrol altında tutulmaktadır (Adanur 1995).

Soğutma sistemlerinde 3 temel sistem mevcuttur. Cross-flow, outflow ve inflow soğutma sistemleri Şekil 1.3' de gösterilmektedir (James 1998).



Şekil 1.3: Soğutma Sistemleri a) Cross-flow, b) Inflow, c) Outflow.

KAYNAK: JAMES, A. 1999. An Overview of Quench Cabinet Systems. International Fiber Journal, 101–103.

Cross-flow soğutma kabin uzunluğu polimer çeşidine göre farklılık göstermekte olup, PET için 1.2 m genelde yeterli görülmektedir. PET için soğutma hava sıcaklığı ise 20-22 °C olarak uygundur. Her ne kadar yeni soğutma yöntemleri geliştirilse de tek yönlü (cross-flow) soğutma banyoları önemini korumaktadır, eriyikten üretilen polyester, poliamid ve polipropilen iplikleri için etkili ve düşük maliyetli bir sistemdir. Çok sayıda deliğin soğutma ünitesi çevresine yerleştirilebilmesi ve havanın uygun bir dağıtıcı sistem dağıtılabilmesiyle tüm lifler taze havayı alabilmektedir. En uzak lif bile önceki hiçbir life temas etmemiş havaya erişebilmektedir ( Kothari 2000).

Outflow soğutma sistemi, genelde hava olmak üzere dikey olarak yerleştirilmiş silindir bir yüzeyden çıkan yatay gaz akışından ibarettir. Gaz akışının çıktığı üniteye hava üfleme ünitesi denir. Üfleme ünitesi düze sisteminin altına yerleştirilmiş olup, üzerinde simetrik olarak konumlanmış yuvarlak veya eş merkezli delikler açılmıştır.

Diğer bir hava üfleli soğutma banyo tipi ise inflow soğutma sistemidir. Bu sistem, lifler için soğutma havası oluşturacak şekilde düzenin altına konumlandırılmış içi delik (hollow) silindir ve bu silindirin etrafını çevrelemiş yanal basınç odasından oluşmaktadır. Basınç odasının orta yüksekliğinde düzeden uzatılmış ve soğutma gazını aşağı yönlendiren silindir şeklinde gaz damperi bulunmaktadır. Böylece akış halindeki lif aynı yönlü akıştaki hava ile soğutulmaktadır (Mark ve Gaylord 1968).

Soğutma bölgesinde, her bir life aynı derecede soğutmanın uniform yapılması, liflerin aynı morfoloji ve özelliklere sahip olması açısından önemlidir. Eğer doğru bir şekilde soğutma sağlanamazsa, liflerde farklılıklar oluşmakta bu da kullanım aşamasında problemlere sebep olmaktadır. Liflerdeki uniform olmayan yapıyı en aza indirmek için hesaplamalı akışkanlar dinamiğinde sonu elemanlar yöntemine (finite element method-FEM) göre soğutma şartları modellenmektedir (Jaffe ve East 2007).

Kothari'ye göre (2000) diğer tüm eğirme şartlarının sabit tutulması halinde, soğutma havası sıcaklığı değişimi, lif mukavemet ve uzama oranını etkilemektedir. Soğutma havası sıcaklığının artırılması halinde, lifin uzama oranı ve boya alımı düşerken mukavemet aynı

kalmaktadır. Bunun nedeni soğutma havasının sıcaklığının yüksek olmasıyla lifin soğuma hızının düşmesi ve bu nedenle lifin yavaş soğuması sonucu da eriyik içindeki zincir moleküllerine kristalize olmaları için zaman verilmiş olmasıdır. Soğutma havası sıcaklığının artırılması, daha yüksek kristalinite eldesi demektir. Soğutma havası hızının artırılması, lif mukavemetinin düşmesine ve uzama oranının artmasına sebep olmaktadır. Bunun nedeni hızlı soğutmadan dolayı eriyik içindeki zincir moleküllerinin kristalizasyon için daha az zaman bulabilmesidir. Aynı zamanda soğutma havası hızı iplik düzgünsüzlüğünü de etkilemektedir. Düşük üfleme havası hızında liflere etkiyen bir hava desteği olmayacağından, lifler düzeden aşağı doğru stabil olmayan bir yolda akmaktadırlar. Yüksek üfleme havası hızında ise life etkiyen bir hava desteği olacağından lifin aktığı yol daha stabil olmaktadır. Ancak yüksek üfleme havası hızında aynı zamanda türbülans da oluşmaktadır (Kothari 2000).

#### **1.1.2.6. Bitim yağı**

Lif üretim hattında, düze çıkışında lifler katılaşmaya başlayıp aşağı doğru ilerlerken, hava ile yüzey sürtünmesi statik elektrik oluşumuna, dolayısıyla demet içindeki liflerin birbirine yapışmasına sebep olmaktadır. Sonraki işlemlerin rahat yapılabilmesi için, bitim yağları (antistatik ajanlar) bir silindir yardımıyla life uygulanmaktadır (Jaffe ve East 2007).

#### **1.1.2.7. Çekim**

Son olarak, lif demetleri çekim silindirleri yardımıyla bobinlere sarılmaktadır (Weinberger 1996). Godet olarak adlandırılan silindirlere geçerek lifler bir araya getirilerek bobinler oluşturulmakta ve diğer işlemler için sonraki proseslere iletilmektedir (Reese 2003). Katılan lifin kalınlığı (denyesi) önemlidir. Denye; polimerin yoğunluğu, her bir düzeden dakikada geçen polimer eriyiğinin miktarı ve godetlerdeki sarım hızına göre belirlenir. Her bir düze için polimerin kütle akış miktarı genellikle 1-5' g/dk dır. Eriyik haldeki polimerin düzelerden çıkış hızı, godetlerdeki çekim hızından düşüktür. Bu oran çekme (drawdown) faktörü olarak tanımlanmaktadır (East 2000).

Çekim hızı, iplik özelliklerinin oluşumunda temel etkindir. Çekim hızının artmasıyla, iplik üzerindeki gerilim artmakta, bu da kristalizasyon ve oryantasyonun artmasına sebep olmaktadır (Cesare ve Fabrizio 2004). Eriyikten lif üretim sistemlerinde 3 farklı çekim hızı sınırı vardır. 1000 m/dk' nın altındaki hızlar düşük hızlı, 1000-4000 m/dk aralığındaki hızlar orta hızlı ve 4000 m/dk' nın üzerindeki hızlar da yüksek hızlı çekim sistemleri olarak gruplandırılır. Yüksek hızlı çekimde moleküler oryantasyon için biraz daha fazla çekim gerekmektedir (East 2000).

Farklı hızlara bağlı olarak üretilen farklı karakterlerdeki lifler 5 gruba ayrılmaktadır. Bunlar:

1- LOY (low oriented yarn): 1800 m/dk' lık çekim hızında üretilen bu iplikler amorf yapıda olup, semi kristalin formunu alması için ilave çekim işlemi uygulanmalıdır. Bu haliyle depolanması halinde kırılğan bir yapıya sahiptir.

2- MOY (medium oriented yarn): 1800-2800 m/dk' lık çekim hızında üretilen bu iplikler, yüksek moleküler oryantasyon içerirken, hala kristalin değillerdir. Bu ipliklere çekim ve tekstüre işlemi uygulandıktan sonra kullanılabilirler. Bu haliyle depolanması halinde kırılğan bir yapıya sahiptir.

3- POY (partially oriented yarn): 2800-4200 m/dk' lık çekim hızında üretilen bu iplikler, açık ve net bir şekilde kristalin olmasalar bile o kadar yüksek düzeyde bir moleküler oryantasyona sahiptirler ki, birkaç ay bozulmadan özelliklerini muhafaza etmektedirler. Bu iplikler, çekim işleminden sonra çekim veya tekstüre işlemine alınarak kullanıma sunulmaktadır. Genelde polyester POY'lar 3000-3500 m/dk' lık hızlarda üretilmektedir.

4- HOY (highly oriented yarn): 4000-6000 m/dk' lık çekim hızında üretilen bu iplikler, yüksek moleküler oryantasyona sahip kısmen kristalin ipliklerdir. Bunlar tamamen çekilmiş iplikler olmadığından uzama oranı % 40-60 civarındadır.

5- FOY (fully oriented yarn): 6000 m/dk' dan daha yüksek hızlarda üretilen bu iplikler, her ne kadar % 20-30 civarında uzama oranına sahip olsalar da, yüksek düzgünlük içermelerinden dolayı sadece non-woven üretiminde kullanılır (Militky ve ark. 1991).

6- FDY (fully drawn yarn): FOY ipliğine verilen diğer bir isimlendirmedir. FOY'daki tanımlamada geçen sadece non-woven üretimde kullanılırken, FDY üretimde

aksine kumaş üretiminde kullanılan iplik üretimi yapılabilmektedir (The Textile Institute 1991).

## 1.2. Lif Eriyiğinin Özellikleri

Eriyikten lif üretimi prosesinin modellenebilmesi için, modelleme yapılacak materyalin özelliklerinin bilinmesi gerekmektedir. Yapılacak modellemede özellikle modelleme şartlarını belirleyebilmek için, polimer özellikleri (molekül ağırlığı gibi), proses (akış) aşamasındaki özellikleri (reolojik), proses şartlarına (sıcaklık, hız gibi) göre etkilenen özelliklerinin belirlenmesi gereklidir.

### 1.2.1. Reolojik özellikler

#### 1.2.1.1. Reolojinin tanımı

Lif oluşumunu incelerken reoloji kavramı kullanılmaktadır. Reoloji, materyallerde akış esnasında, gerilimden etkilenerek oluşan deformasyonu inceleyen bilim dalı olarak tanımlanmaktadır (Barnes 2000, Shenoy ve Saini 1996). Çizelge 1.2' de görüldüğü gibi reoloji bilimi hem katı, hem de akışkanlar mekaniğini kapsamaktadır.

**Çizelge 1.2:** Reoloji Bilim Alanına Giren Konular

Sürekli Ortamlar Mekaniği	Katı Mekaniği	Elastisite	
		Plastisite	Reoloji
	Akışkanlar Mekaniği	Newtonian Olmayan Akışkanlar	
		Newtonian Akışkanlar	

KAYNAK: <http://en.wikipedia.org/wiki/Birefringence>,05.2009.

### 1.2.1.2. Akış türleri

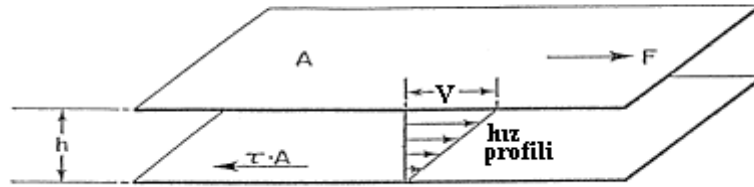
Polimer akış özelliklerini tanımlayabilmek için öncelikle akış türlerini incelemek gerekmektedir. Reoloji, daha önce de belirttiğimiz gibi normal akışlardan daha karmaşık yapıları inceleyen bir alandır.

Genel olarak akışlar, kayma akışları ve uzama akışları olmak üzere 2 ana grupta incelenmektedir (Shenoy ve Saini 1996).

Kayma akışları, paralel iki levha arasındaki akışın (Şekil 1.4) hareketi tanımlanmaktadır. Kayma gerilmesi, teğetsel uygulanan  $F$  kuvvetinin,  $A$  kesit alanına bölünmesiyle, kayma hızı ise  $V$  hızının  $h$  yüksekliğine bölünmesiyle elde edilir.

$$\eta = \frac{\text{kayma gerilmesi}}{\text{kayma hızı}} = \frac{F/A}{V/h} = \frac{\tau}{\gamma} \quad 1.1$$

Viskozite ( $\eta$ ), akışı tanımlayan en önemli özelliktir. Akmaya karşı gösterilen direnci ifade eder. Şekil 1.4' de görüldüğü gibi, viskozite kayma gerilmesinin kayma hızına oranı olarak tanımlanmaktadır (Vlachopoulos ve Strutt 2003).

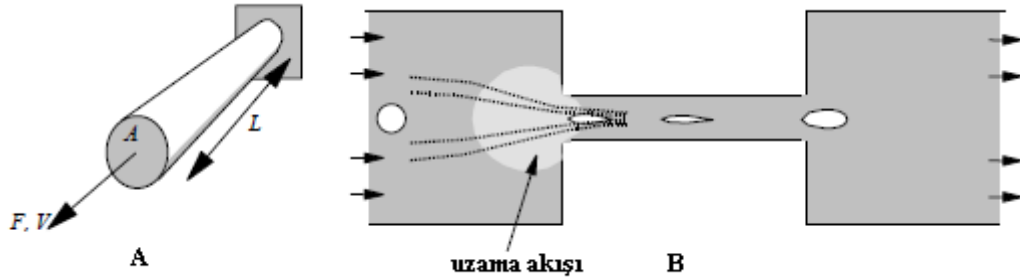


**Şekil 1.4:** Kayma Akışının Şematik Tanımlanması.

KAYNAK: VLACHOPOULOS, J. and D. STRUTT. The Role of Rheology in Polymer Extrusion. New Technologies for Extrusion Conference, Italy, 20-21 November 2003. 25 p.



Uzama akışları ise, materyalin Şekil 1.5.a' daki gibi boyuna yönde uzatıldığında oluşan akış olarak tanımlanmaktadır (Shenoy ve Saini 1996). Uzama viskozitesi  $\eta_e$ , akışın uzamaya karşı direncini ifade etmektedir (Vlachopoulos ve Strutt 2003). Şekil 1.5.b' de bir damlanın uzama akışı etkisiyle deformasyona uğraması ve değişimi görülmektedir.



**Şekil 1.5:** a) Tek Eksenli Uzama Akışı Diyagramı; b) Bir Damlanın Uzama Akışı Etkisiyle Deformasyona Uğraması ve Değişiminin Şematik Gösterimi.

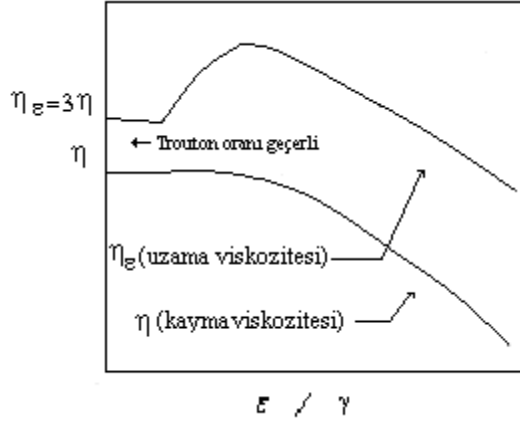
KAYNAK: BARNES, H.A. 2000. A Handbook of Elementary Rheology. Cambrian Printers, Aberystwyth, 200 p.

Uzama geriliminin ( $\sigma_\epsilon = F/A$ ), uzama (deformasyon) oranına ( $\epsilon = \dot{V}/L$ ) bölünmesiyle uzama viskozitesi elde edilmektedir.

$$\eta_\epsilon = \sigma_\epsilon / \epsilon$$

1.2

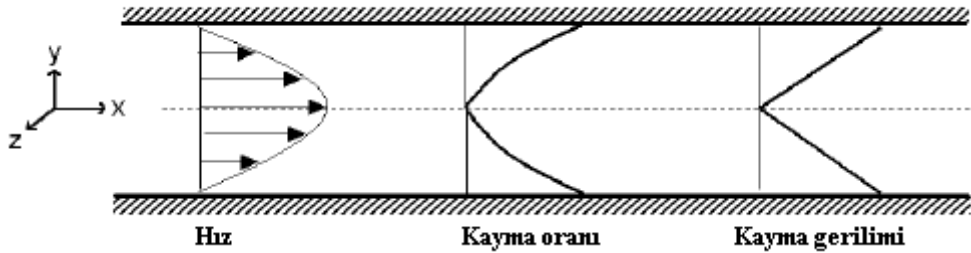
Kayma viskozitesi ile uzama viskozitesi arasında, sadece düşük kayma oranlarında, Trouton oranı olarak adlandırılan bir oran mevcuttur. Düşük kayma oranlarında, uzama viskozitesi, kayma viskozitesinin yaklaşık 3 katıdır. Bu oran lif üretiminin modellenmesinde, sınır şartlarını belirlerken hesaplamalarda kullanılmaktadır (Parys 1998). Şekil 1.6' da, polimerler için uzama viskozitesi ile kayma viskozitesi arasındaki ilişki görülmektedir (Vlachopoulos ve Strutt 2003).



**Şekil 1.6:** Uzama ve Kayma Viskozitesi-Deformasyon ve Uzama Oranının Fonksiyonu.

KAYNAK: VLACHOPOULOS, J. and D. STRUTT. The Role of Rheology in Polymer Extrusion. New Technologies for Extrusion Conference, Italy, 20-21 November 2003. 25 p.

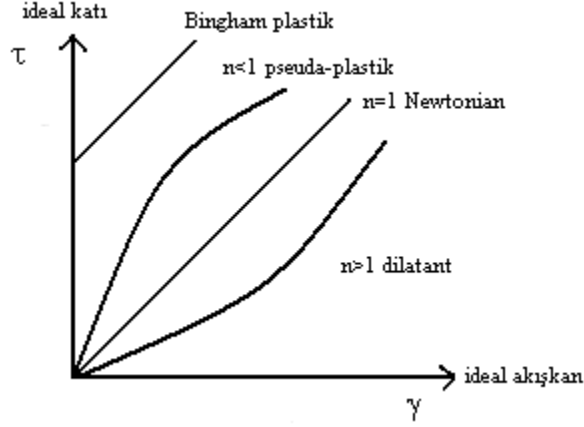
Akış, kuvvetle bir silindir içerisinde geçerken duvarlarda hem normal gerilme hem de kayma gerilmesi oluşur. Şekil 1.7' de görüldüğü gibi akış düzlemsel kalıptan geçerken kayma gerilmesi ortada sıfır, duvarlarda maksimum değerdedir (Vlachopoulos ve Strutt 2003).



**Şekil 1.7:** İki Paralel Levha Arasında Hız, Kayma Oranı ve Kayma Gerilimi profilleri.

KAYNAK: VLACHOPOULOS, J. and D. STRUTT. The Role of Rheology in Polymer Extrusion. New Technologies for Extrusion Conference, Italy, 20-21 November 2003. 25 p.

Akışlarda bir diğer sınıflandırma, viskozite değişiminin oranı ile ifade edilmektedir. Eğer viskozite değişimi lineer ise newtonian, değilse non-newtonian olarak adlandırılmaktadır. Şekil 1.8' de newtonian ve non-newtonian akışa ait viskozite değişimleri görülmektedir.



**Şekil 1.8:** Newtonian ve Non-newtonian Akışlarda, Viskozite Değişimi.

KAYNAK: VLACHOPOULOS, J. and D. STRUTT. The Role of Rheology in Polymer Extrusion. New Technologies for Extrusion Conference, Italy, 20-21 November 2003. 25 p.

$$\tau = \kappa \left( \frac{du}{dy} \right)^n \quad 1.3$$

Şekil 1.8'de de görüldüğü gibi, non-newtonian akışlarda, dilatant akışlar, kayma hızı ile viskozitenin arttığı, pseudo-plastik akışlar ise azaldığı akışlardır. Diğer bir ifadeyle dilatant akışlarda, kaymaya bağlı kalınlaşma, pseudo-plastik akışlarda kayma bağlı incelmeye olmaktadır. Bingham akış ise kendi başına akmayan, belli bir kuvvetin uygulanmasından sonra, Newtonian akış gösteren akışlardır.

Farklı durumlar için, viskozite modelleri geliştirilmiştir. Kayma oranına bağlı viskozite değişimleri için, Power Law, Bird-Carreau Law, Cross Law, Carreau-Yasuda Law ve sıcaklığa bağlı viskozite değişimleri için Arrhenius, Williams-Landel-Ferry (WLF) bunlardan başlıcalarıdır (Polyflow 2008).

Non-newtonian akışlarda,  $\tau$ - $\gamma$  grafiklerinde, viskozite kayma gerilimi ve kayma hızıyla değişmektedir. Bu nedenle çeşitli tanımlar kullanılmaktadır. Düşük kayma gerilimi veya

kayma hızlarında, başka bir ifadeyle  $\tau$ - $\gamma$  eğrisinin doğrusal olduğu bölgedeki eğim “sıfır kayma viskozitesi” olarak ( $\eta_0$ ) tanımlanmaktadır (Pişkin 1987).

### 1.2.1.3. Polimerlerin akış özellikleri

Viskozitenin,  $\tau$  veya  $\gamma'$  ya bağlı olarak azaldığı akışkanlar, pseudo-plastiklerdir (sanki-plastik). Polimer eriyiklerinin çoğu pseudo-plastik davranış göstermektedirler (Pişkin 1987). Bu davranışı ifade etmek için farklı bağıntılar geliştirilmiştir.

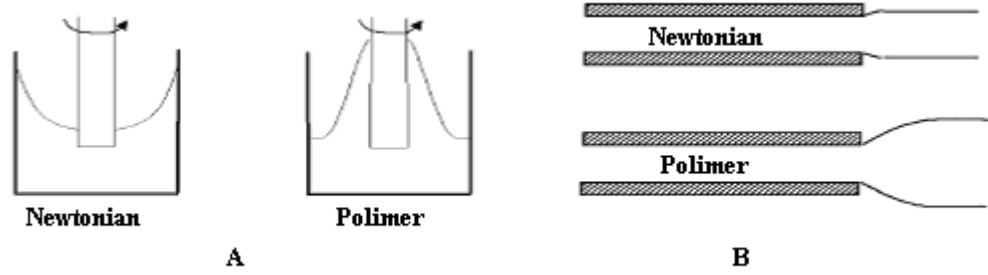
Polimer eriyiği akışları, viskozite değişiminden dolayı kompleks proseslerdir. Belirlenmiş bir sıcaklık için polimerin sabit bir viskozitesi yoktur. Viskozite polimerin moleküler ağırlığı, moleküler ağırlık dağılımı, zincir düzenlenmesi, sıcaklık gibi birçok değişkene bağlıdır (Riande ve ark. 2000).

Lif üretim prosesinde, kayma akışı, düze içinde gerçekleşmektedir. Düze çıkışından polimerin katılıp, nihai lif formuna kadar uzama akışı etkili olmaktadır (Beyreuther ve Brünig 2007).

Polimer eriyiklerinde uzama viskoziteleri kayma viskozitelerine göre oldukça yüksektir. Uzama viskozitesi uzama hızıyla artmakta, kayma viskozitesi ise kayma şekil değiştirme hızıyla azalmaktadır. Uzama akışı, polimer zincirlerinin oryantasyonunu sağlamakta, bu nedenle lifin görünümü ve performansını belirlemede önemli rol oynamaktadır. Bunun dışında polimer eriyiğin reolojik özellikleri zamana da bağlıdır (Shenoy ve Saini 1996).

Polimerlerde uzama ile malzemenin boyu uzarken, eni daralmaktadır. Daralmanın uzamaya oranı “Poisson oranı” olarak bilinir. Bu oran birçok polimer için 0.5 civarındadır. Polimer eriyiklerinin viskozitesi sıcaklık ve basınca bağlı olarak değişmektedir. Sıcaklıktaki artış viskozitede düşmeye, basınçtaki artış ise yükselmeye neden olmaktadır (Pişkin 1987).

Polimer akışlarında kayma gerilmelerinin yanı sıra, normal gerilmeler de etki etmektedir (Riande ve ark. 2000). Weissenberg çalışmasında, x yönünde (akış yönünde), y ve z yönlerinden farklı normal gerilmeler olduğunu tespit etmektedir. Bunun sebebi akış prosesinin, uzun molekül zincirlerine sahip polimerlerin mikro yapısında anizotropik davranış göstermesine sebep olmasıdır. “Weissenberg efekti” olarak literatüre geçen bu olay Şekil 1.9.a’ da şematik olarak gösterilmektedir. Şekil 1.9.a’ da polimer akışlarında “rod-climbing” (weissenberg) efekti görülmektedir. Burada polimer akışkanı silindir içerisinde dönerken, polimer zincirleri tarafından uygulanan kuvvetten dolayı normal dönme yönünde yukarı doğru bir hareket oluşmaktadır (Vlachopoulos ve Strutt 2003).



**Şekil 1.9:** Polimer Akışlarda, Newtonian Akışlardan Farklı Olarak Oluşan:

a) Weissenberg Efekti b) Düze Şişmesi.

KAYNAK: VLACHOPOULOS, J. and D. STRUTT. The Role of Rheology in Polymer Extrusion. New Technologies for Extrusion Conference, Italy, 20-21 November 2003. 25 p.

Normal gerilme farkı matematiksel olarak ifade edilebilmektedir.  $N_1$ , birincil normal gerilim farkı, akış yönündeki normal gerilim  $\sigma_{xx}$  ile dikey gerilim  $\sigma_{yy}$  arasındaki farktır.

$$N_1 = \sigma_{xx} - \sigma_{yy} \quad 1.4$$

İkincil normal gerilim farkı ise  $N_2$  ile ifade edilmektedir.

$$N_2 = \sigma_{yy} - \sigma_{zz} \quad 1.5$$

Deneyleer  $N_1$ 'in polimerler için genellikle pozitif,  $N_2$ 'nin ise negatif ve çoğu polimerde  $N_1$ 'in %20 si değerinde olduğunu göstermektedir. Normal gerilim farklılığı, yüksek kayma hızına sahip ekstruzisyonda çok geniş olabilmektedir (Vlachopoulos ve Strutt 2003).

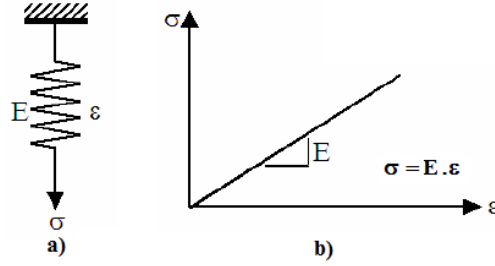
şekil 1.9.b' de düze şişmesi ise temel olarak polimerin çıkışta, kalıp içerisindeki uzamadan dolayı, büzülmesinden kaynaklanmaktadır. Düzgün olmayan basınç (sıkıştırma) farklı yönlerde birçok farklı ve kararlı olmayan akışlar oluşturmaktadır (Vlachopoulos ve Strutt 2003).

#### 1.2.1.4. Viskoelastik davranış

Cisme uygulanan dış kuvvet kaldırıldığı zaman cisim ilk konumuna geri dönüyorsa, bu davranış elastik bir davranıştır. Viskoz davranış ise cisme dış kuvvet uygulanınca gösterdiği gecikmeli şekil değişimi davranışdır. Viskoelastisite cisimlerin ortak elastik ve viskoz davranışdır (Strobl 2007).

Reoloji modelleri, basit cisimlerin değişik düzenlemeleri sonucuyla elde edilmektedir. Bu amaçla iki basit cisimden yararlanılmaktadır:

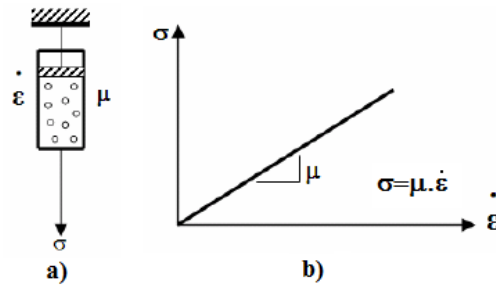
1. Elastik davranışı simgeleyen Hooke cismi: Hooke cismi olarak adlandırılan sistemde yay tam bir elastik elemandır. şekil 1.10'da E kayma modülüne sahip yay ideal yay,  $\sigma$  çekme gerilmesi uygulandığında,  $\epsilon$  miktarı kadar uzama göstermektedir. Uzama grafiği şekil 1.10.b' de görülmektedir.



**Şekil 1.10:** a) Hooke Cismi b) Hooke Cisminde Oluşan Şekil Değişirme Miktarının Değişimi.

KAYNAK: ÜN, H. 2007. Malzeme Bilgisi, Reoloji. Pamukkale Üniversitesi, Denizli. 64 s.

2. Viskoz davranışı simgeleyen yağ kutusu Newton cismi: Sıvıların kayma gerilmesi altında gecikmeli şekil değişimi gösterdiğini açıklayan ve tamamıyla viskoz davranış gösteren yağ kutusudur. Newton cisminin sabit gerilme altında şekil değişimi zamanla sürekli olarak artmaktadır. Şekil 1.11' de yağ kutusu,  $\sigma$  kayma gerilmesi uygulandığında,  $\dot{\epsilon}$  miktarınca kayma uzaması göstermektedir. Uzama grafiği Şekil 1.11.b' de görülmektedir.

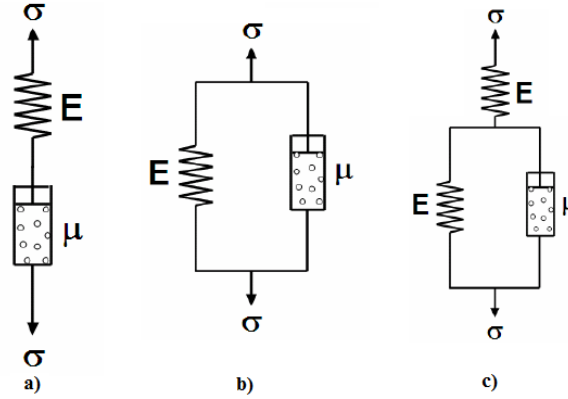


**Şekil 1.11:** a) Newtonian Cisim, b) Newtonian Cisimde Oluşan Şekil Değişirme Miktarının Değişimi.

KAYNAK: ÜN, H. 2007. Malzeme Bilgisi, Reoloji. Pamukkale Üniversitesi, Denizli. 64 s.

En önemli basit reolojik modeller, bunların paralel ve seri bağlanmaları ile elde edilmektedir. Bunlardan Maxwell modeli seri bağlı olup, akışkan bileşeni baskın cisimleri daha iyi, Kelvin modeli ise paralel bağlı olup katı bileşeni baskın cisimleri daha iyi

simgelemektedir (Ün 2007). Şekil 1.12’ de Maxwell, Kelvin ve bu ikisinin birleştirilmiş modelin şekilleri mevcuttur.



**Şekil 1.12:** Viskoelastik Modeller a) Maxwell Modeli, b) Kelvin Modeli, c) Birleştirilmiş Model.

KAYNAK: ÜN, H. 2007. Malzeme Bilgisi, Reoloji. Pamukkale Üniversitesi, Denizli.

64 s.

### 1.2.1.5. Polimerlerde viskoelastik davranış

Tüm polimer eriyikleri viskoelastik materyallerdir, uygulanan kuvvet doğrultusunda viskoz sıvı ve elastik katı malzeme arasında bir davranış göstermektedir. Bu davranışın hangi yönde olduğu akışkanın karakteristik zaman sabiti (relaxation time) ve akış prosesindeki karakteristik zaman arasındaki ilişkiye bağlıdır. Bu tanımlı ifade etmek için Deborah sayısı diye tanımlanan boyutsuz bir sayı kullanılmaktadır. Kısaca bu sayı elastik kuvvetlerin, viskoz kuvvetlere oranı olarak ifade edilmektedir. Bu sayının limiti, akışın şeklini belirlemektedir. Deborah sayısı 1.0 değerinden büyükse, elastik etki baskın, 0.5 değerinden küçükse viskoz etkiler baskındır. Bu iki değer aralığındaki değerlerde materyal viskoelastik davranış göstermektedir (Shenoy ve Saini 1996).

Viskoelastik efektler, ani akış hızı değişimlerinde etkili olmaktadır (akışın başlangıcında veya duruşlarda (Strobl 2007)). Yüksek hızlarda viskoelastik davranış daha



önemli hale gelmektedir. Bundan dolayı, çekim hızının artmasıyla viskozitenin etkisi azalmakta ve lif üzerindeki elastik efektlerin etkisi artmaktadır (Kase 1985).

Polimerin çekilebilirlik özelliği, viskoz ve elastik deformasyon etkilerine bağlıdır. Viskoz davranış, uzama viskozitesinde, özellikle düşük hızlarda, düzeye yakın uzaklıklarda baskın olmakta, elastik davranış ise lif hızının artmasıyla özellikle katılaşmaya yakın bölgelerde baskın olmaktadır. Lif üretim proseslerinde bazı durumlarda oluşan, boyun verme viskoelastik davranıştan etkilenmektedir. Katılaşma sonrası, lifte sadece oryantasyon gerçekleşmekte ve çekim silindirinde az veya çok elastik deformasyon oluşmaktadır. Bu davranışa rağmen, lif üretim prosesinin elastik efektler dikkate alınmaksızın simüle edilip, tanımlanması makul sonuçlar vermektedir. Fakat diğer taraftan, elastik davranışın simülasyona dahil edilmesi özellikle nihai lif özelliklerinin belirlenmesinde etkili rol oynamaktadır (Beyreuther ve Brünig 2007).

Polimerlerde viskoelastik davranışı modellemek için birçok model geliştirilmiştir. Bunlardan başlıcaları Upper-convected Maxwell Modeli (UCM), Phan Thien Tanner Modeli (PTT), Giesekus Modeli, POM-POM Model, K-BKZ (Kaye/Bernstein-Kearsley-Zapas) Model, Equivalent Generalized Newtonian Modeli'dir (Polyflow 2008).

Upper Convected Maxwell (UCM) Model, viskoelastik davranışı en basit tanımlayan modellemelerden biridir. Sabit viskozite ve normal gerilim farklarını belirlemektedir. Reolojik açıdan, akışla ilgili az bir bilgiye sahip olduğumuzda, veya güvenilir nitel tahminlerde tercih edilmelidir (Polyflow 2008).

Phan Thien Tanner Modeli (PTT) ve Giesekus Modeli gerçeğe yakın tahminleri sağlayan diferansiyel viskoelastik modeldir. Yüksek kayma oranlarında kayma incelenmesi ve normal gerilim farklarını belirlemektedir (Polyflow 2008).

Bu çalışmada elastik davranışı ihmal edilip, polimerin newtonian davranış gösterdiği varsayılarak lif üretim hattı modellenmektedir.

### 1.2.2. Termodinamik özellikler

Modellemede kullanılan temel denklemlerde, yoğunluk, özgül ısı kapasitesi, ısı iletim katsayısı, uzama viskozitesi gibi polimer eriyiğın termodinamik özellikleri kullanılmaktadır. Özellikle ısı transferinin olduğu lif üretim prosesinde, bu özelliklerin bağılı olduğu parametrelerle ilişkileri bilinmelidir. Yapılacak çalışmada, lif üretim hattında sıcaklık değışimi vardır, bunun etkisi bu özelliklerde etkili olmaktadır.

#### 1.2.2.1. Yoğunluk

Eriyik polimerlerin yoğunluğu sıcaklığa bağılı olarak tanımlanmaktadır.

$$\rho(T) = \rho_0 - \rho_1 T \quad 1.6$$

$\rho_0$  ve  $\rho_1$  polimerler için farklılık göstermektedir. PET lifi için yoğunluk;

$$\rho(T) = 1.356 - 5.0 \times 10^{-4} T$$

Bu denklemde, T °C cinsinden ifade edilmektedir (Shimizu ve ark. 1985). Genel olarak, PET lifi için yoğunluk 1.34-1.39 g/cm<sup>3</sup> aralığındadır (Kase 1985).

#### 1.2.2.2. Özgül ısı kapasitesi

Eriyik polimerlerin özgül ısı kapasitesi sıcaklığa bağılı olarak tanımlanmaktadır.

$$C_p(T) = C_{p0} - C_{p1} T \quad 1.7$$

$C_{p0}$  ve  $C_{p1}$  polimerler için farklılık göstermektedir. PET lifi için özgül ısı kapasitesi;

$$C_p(T) = 0.3 - 6.0 \times 10^{-4} T$$

Bu denklemde, T °C cinsinden ifade edilmektedir. Özgül ısı kapasitesinin birimi ise cal/g°C' dir (Shimizu ve ark. 1985).

### 1.2.2.3. Uzama viskozitesi (Newtonian viskozite)

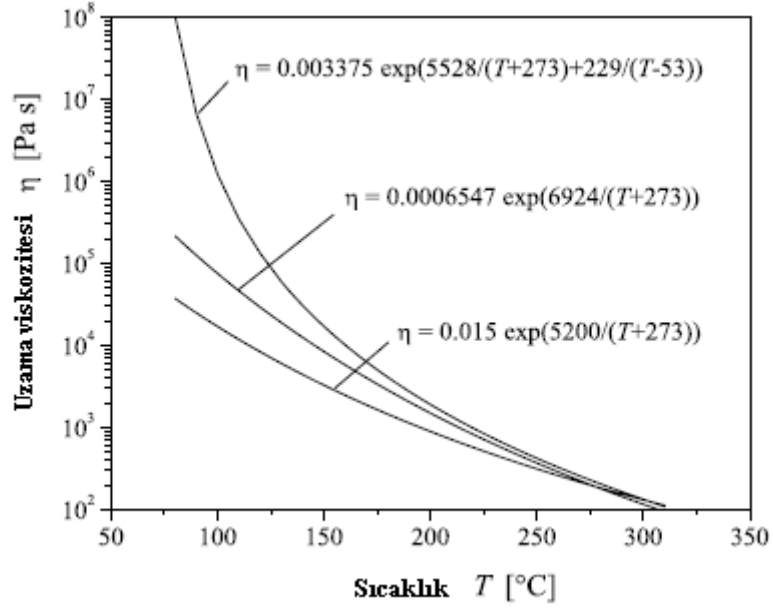
Uzama viskozitesi, lif üretim uzunluğu arttıkça, özellikle akışın karakterinin değişmesine (viskoelastik davranıştan dolayı) bağlıdır. Uzama viskozitesi daha öncede belirtildiği gibi genel olarak polimerin moleküler ağırlığı ve dağılımına bağlıdır. Moleküler ağırlığına bağlı olarak, uzama viskozitesi intrinsik viskozite (IV) olarak ifade edilmektedir. Newtonian uzama viskozitesi, bölgesel olarak bölgesel sıcaklığa bağlıdır. Non-newtonian viskozite ise sıcaklık ve uzama deformasyon oranına bağlıdır. Kristalizasyon oluştuğunda ise, ayrıca kristalizasyon derecesi de dikkate alınmalıdır (Beyreuther ve Brünig 2007).

Sıcaklığa bağlı viskozite, erime noktasının üzerindeki bir sıcaklık için genellikle, Arrhenius bağıntısıyla hesaplanmaktadır.

$$\eta(T) = \eta_0 \exp\left(\frac{E_\eta}{kT}\right) \quad 1.8$$

$\eta_0$ , sıfır kayma viskozitesi,  $E_\eta$  polimere ait aktivasyon enerjisi, k Boltzmann sabiti olup değeri  $1.38 \times 10^{-23}$  J/K ' dir (Spruiell 2000). Ziabicki' nin (1976) verilerine göre (1.1-3.0)  $\times 10^4$  moleküler ağırlığına sahip PET eriyiklerinin aktivasyon enerjisi 13.3-30 kcal/mol' dür .

PET için Arrhenius denklemine göre farklı viskozite eğrileri Şekil 1.13' de verilmektedir (Beyreuther ve Brünig 2007).



**Şekil 1.13:** PET Lifinde Sıcaklığa Bağlı (Arrhenius) Uzama Viskozitesi Değişimi.

KAYNAK: BEYREUTHER, R. and H. BRUNIG. 2007. Dynamics of Fibre Formation and Processing Modelling and Application in Fibre and Textile Industry. Springer, Leipzig, 347 p.

Sıcaklık camlaşma sıcaklığına ulaştığında, amorf polimerler için Denklem 1.8 kullanılmamaktadır. Bu durumda sıcaklığa bağlı viskoziteyi tanımlamak için Williams-Landell-Ferry (WLF) denklemini kullanmak daha uygun olmaktadır (Spruiell 2000).

$$\eta(T) = \eta_0 \exp\left(\frac{-(T - T_m)}{(51.6 + T - T_g)(51.6 - T_m - T_g)}\right) \quad 1.9$$

Denklem 1.9' da  $T_m$  polimerin erime sıcaklığı,  $T_g$  polimerin camlaşma sıcaklığıdır (Beyreuther ve Brünig 2007). PET için erime sıcaklığı 280-295 °C, camlaşma sıcaklığı ise 70 °C' dir (Beyreuther ve Brünig 2007).

Sıcaklığın viskoziteyi son derece etkilediği bilinmektedir. Polimerlerin viskozitesi sıcaklık ve soğutma oranına karşı çok hassastır, genellikle yüksektir, çekim hızının artmasıyla

bu hassasiyet daha da artmaktadır. Sıcaklık ve viskozite lif üretim dinamiklerinde çok etkilidir (Ziabicki 1985).

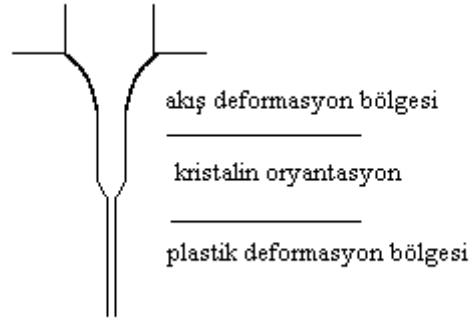
Uzama viskozitesinin moleküler ağırlığa  $\eta_0 \propto M^b$  oranısıyla ve intrinsik viskoziteye  $\eta_0 \propto (IV)^c$  oranısıyla bağlıdır. b (3.2...3.4) ve c (1.8...2.2) katsayıları polimere göre değişmektedir (Beyreuther ve Brünig 2007).

#### 1.2.2.4. Isı iletim katsayısı

Polimerlerin ısı iletkenlikleri metallere göre çok düşüktür. Polimerlerin ısı iletkenliklerinin düşük olması ısı yorulmaya neden olmaktadır. Bunun azalması için polimerik malzemelere katkı maddeleri ilave edilmektedir (Pişkin 1987). PET için, ısı iletim katsayısı ( $\lambda$ ) 0.24 W/mK' dir (Reese 2003).

### 1.3. Eriyikten Lif Üretimi Prosesinde Lif Yapısının Gelişimi

Lif üretim prosesinde süreç, genel olarak 3 adıma ayrılmaktadır. Şekil 1.14' de bu bölümler belirtilmektedir. 1. adım "akış deformasyon bölgesi" dir. Eriyik haldeki polimer yüksek miktarda uzamaya maruz kalmaktadır ve çapı hızla azalmaktadır. Bununla birlikte, sıcaklığın hala yüksek olması ve eriyiğin maruz kaldığı deformasyona rağmen, deforme olmuş moleküllerin relakse olması nedeniyle moleküler oryantasyon düşük miktardadır. 2. adım kristalin oryantasyon bölgesidir. Bu bölgede, lif yapısında hızlı bir değişim görülmektedir. 1. adımın aksine, lif daha soğuktur ve moleküler oryantasyon belli bir seviyeye ulaşmaktadır. Bu da moleküllerin, hava sürüklenmesinden kaynaklanan yüksek gerilim etkisiyle kristalin olma eğilimini sağlamaktadır. 3. adım ise "plastik deformasyon bölgesi" dir. Lif neredeyse katılaşmıştır, ama hava sürüklenmesinin sebep olduğu gerilimden dolayı hala uzatılabilir formdadır. Plastik deformasyon, aslında soğuk germe işlemine denktir (Matsui 1985). Bu adımlarda kristalizasyon, eğer lif belli bir çekim hızına ulaşırsa olmaktadır. Aksi halde sadece oryantasyon meydana gelmektedir.

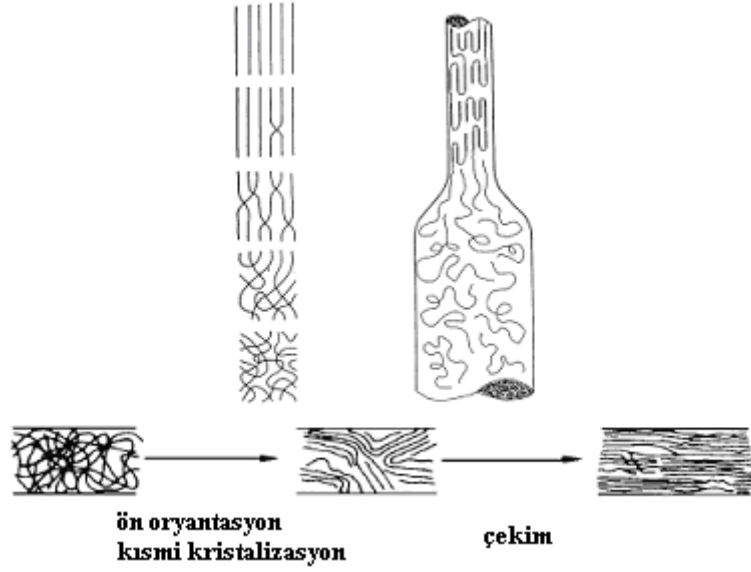


**Şekil 1.14:** Eriyikten Lif Üretimi Prosesinde Lif Yapısının Gelişiminde Adımların Şematik Gösterimi.

KAYNAK: MATSUI, M. 1985. Fiber Formation Process in High-Speed Spinning of Polyethylene Terephthalate. In: A. Ziabicki and H. Kawai (editors), High-Speed Fiber Spinning, John Wiley & Sons Ltd, USA, p. 137-151.

### 1.3.1. Oryantasyon gelişimi ve çiftkırımlım

Oryantasyon temel olarak uzama akışının polimer molekül zincirlerinin düzenlenmesine sebep olmasından kaynaklanmaktadır (Beyreuther ve Brünig 2007). Şekil 1.15’ de görüldüğü gibi lif üretim hattı boyunca, makro moleküllerin ve diğer yapıların (kristalit, fibril vb) lif ekseni boyunca paralelleşmeleri ve uzamaları “moleküler oryantasyon” olarak tanımlanmaktadır (Jaffe ve E  
ast 2007).



**Şekil 1.15:** Eriyikten Lif Üretimi Prosesinde Moleküler Oryantasyon Oluşumu.

KAYNAK: JAFFE, M. and A. J. EAST. 2007. Polyester Fibers. In: M. Lewin (Editor), Handbook of Chemistry, Taylor & Francis Group, USA, p.1-30.

Moleküler oryantasyonun, liflerde gerilim mukavemeti, modül, optik ve elektrikle ilgili özelliklerinin üzerinde etkisi vardır. Diğer taraftan, oryantasyon polimer kristalizasyonunu, katılma kinetiğini ve deformasyon dinamiklerini dolayısıyla lif üretim sürecinde yapı gelişimini önemli derecede etkilemektedir (Ziabicki 1976).

Moleküler oryantasyonun dağılımı, akış esnasında oluşan gerilime son derece bağlıdır. Gerilim ise lif kesitindeki sıcaklık dağılımından etkilenmektedir (Shimizu ve ark. 1985).

Oryantasyonu matematiksel olarak ifade etmek amacıyla, Maxwell çalışmasında akış halindeki polimer eriyiğindeki oryantasyondan dolayı oluşan çift kırınım gelişimini dikkate almaktadır (Maxwell 1873).

Farklı olan sıvı kristal fazları çift kırınım gibi optik özellikleri ile tanımlanmaktadır. Polarize ışıkla mikroskop altında incelendiklerinde farklı sıvı kristal fazları farklı kristal dokular gösterir (<http://en.wikipedia.org/wiki/Birefringence>).

Lifteki çift kırınım  $\Delta n$  ile tanımlanmaktadır.  $\Delta n$ ; kırınım indeksinin lif eksenine paralel çift kırınımı ( $n_z$ ) ve dikey ( $n_r$ ) çift kırınımı farkına eşittir (Spruiell 2000).

$$\Delta n = n_z - n_r \quad 1.10$$

Oryantasyonun oluşmasında, geniş anlamda yapısal elementlerin uzamanın fonksiyonu olarak tanımlanması söz konusudur. Bununla birlikte, lif üretim hattına özgü olarak sistemin makroskopik davranışı daha bir basit tanımlama sağlamaktadır. Oryantasyon faktörü  $f$  ile gösterilmektedir.

Tek yönlü oryantasyonda, oryantasyon faktörünün değeri Hermans ve ark. tarafından tanımlanmaktadır (Hermans 1939). Molekül zincirleri için, lif eksenine göre oryantasyon faktörü  $f$  Denklem 1.11 ile ifade edilmektedir (Spruiell 2000).

$$f = \frac{\overline{\alpha_{zz} - \alpha_{rr}}}{\alpha_1 - \alpha_2} = \frac{3\overline{\cos^2 \phi} - 1}{2} \quad 1.11$$

$\overline{\alpha_{zz} - \alpha_{rr}}$  lifin eksenel ve radyal yönlerindeki polarizability bileşenleri arasındaki fark,  $\phi$  ise zincir eksenini ve lif eksenini arasındaki açıdır. Bu tanımlamaya göre  $f = 1$  durumu için tüm moleküller lif eksenine paraleldir.  $f = 0$  durumu için gelişigüzel dağılmaktadır (izotropik sistem).  $f = 0.5$  durumu için tüm moleküller zincir eksenine dikeydir (Spruiell 2000).

Semi-kristalin polimerlerde, kristalin ( $X$ ) ve amorf fazın ( $1-X$ ) oryantasyonu ayrı ayrı belirtilmektedir (Shimizu ve ark. 1985). Denklem 1.12 ve 1.13' de, kristalin oryantasyon ( $\Delta n_c$ ) ve amorf oryantasyon ( $\Delta n_a$ ) değerinin tüm oryantasyon ( $\Delta n$ ) değerindeki etkileri belirtilmektedir.  $X$  kristalizasyon derecesi,  $f$  oryantasyon faktörü,  $\Delta n_0$  intrinsik çift kırınımdır (Shimizu ve Kikutani 2002).

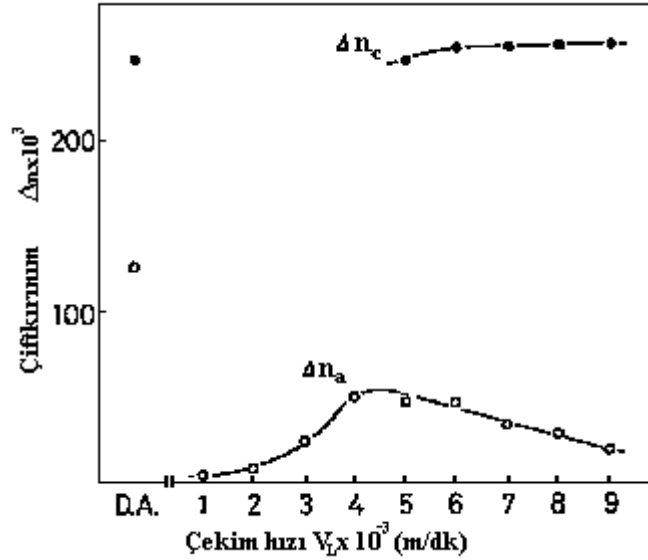
$$\Delta n = \Delta n_c X + \Delta n_a (1 - X) \quad 1.12$$



$$\Delta n_c = f\Delta n_0$$

1.13

Shimizu ve Kikutani (2002), farklı çekim hızlarına göre yaptığı deneysel çalışmada kırınım değerlerinin değişimini Şekil 1.16 ile ifade etmektedir. Kristalin oryantasyon ( $\Delta n_c$ ) 8000-9000 m/dk çekim hızlarında yüksek değerlerdedir. Amorf oryantasyon ( $\Delta n_a$ ) ise 4000-5000m/dk çekim hızlarında yükselmektedir. Ayrıca Şekil 1.16'da kristalin bölgenin oryantasyonunun, amorf bölgeye nazaran daha fazla olduğu da görülmektedir (Shimizu ve Kikutani 2002).



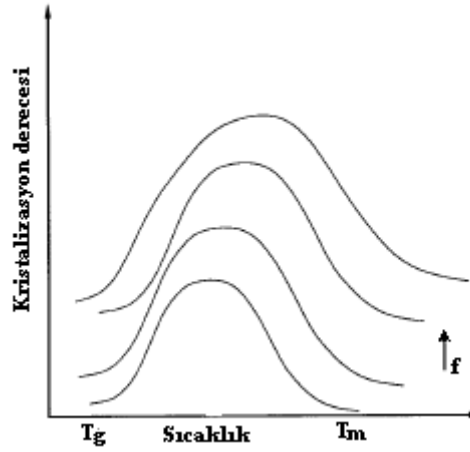
**Şekil 1.16:** Çekim Hızına Bağlı Olarak Kristal ve Amorf Yapıdaki Oryantasyonun Değişim Grafiği.

KAYNAK: SHIMIZU, J., T. KIKUTANI. 2002. Dynamics and Evolution of Structure in Fiber Extrusion. Journal of Applied Polymer Science, 83:539-558.

### 1.3.2. Kristalizasyon oluşumu

Kristalizasyon, düzensiz fazdan, yapının daha düzenli hale geldiği prosestir. Lif üretim hattında, kristalizasyon oluşumu, en önemli faz geçişidir. Kristalizasyon derecesi, ısı transferi

ve anlık uzama viskozitesini, dolayısıyla lif üretim prosesinin dinamik ve kinetiklerini etkilemektedir. Kristalizasyon non-izotermal şartlarda ve çoğunlukla moleküler oryantasyonun varlığında meydana gelmektedir. Moleküler oryantasyon faktörüne bağlı kristalizasyon derecesi Şekil 1.17’ de görülmektedir. Kristalizasyon oryantasyon derecesiyle artmaktadır (Raghavan ve Cuculo 1999). Matematiksel modellemesinin yapılabilmesi için, kristalizasyonun non-izotermal tanımının yapılması ve kristalizasyon oranının sıcaklık ve moleküler oryantasyona göre değişiminin bilinmesi gerekmektedir (Patel ve Spruiell 1991).



**Şekil.1.17:** Sıcaklık Ve Moleküler Oryantasyona Bağlı Olarak Kristalizasyon Derecesinin Değişim Grafiği.

KAYNAK: RAGHAVAN, J. S. and J. A. CUCULO. 1999. Analysis of Necking in High-Speed Spinning. Journal of Polymer Science: Part B. Polymer Physics, 37:1565-1573.

Faz geçişleri iki kinetik proses içermektedir, çekirdeklenme ve çekirdek büyümesi (Ziabicki 1976). Genel olarak kristalizasyon bir çekirdeklenme ve büyüme prosesidir. Yüksek sıcaklıklarda (erime noktasına yakın bir değerde), çekirdeklenme az, materyal kristalleşmesi yavaştır. Düşük sıcaklıklarda ise, moleküllerin hareket kabiliyeti olmadığından kristallerin büyümesi de yavaştır. Bu nedenle maksimum kristalleşme oranı, ara sıcaklıkta ( $T_{max}$ ) oluşmaktadır (Beyreuther ve Brünig 2007).

Kristalizasyon derecesinin matematiksel ifadesi Avrami tarafından, Denklem 1.14 ile verilmektedir.

$$K(T,0) = K_{\max} \exp \left[ (-4) \ln(2) \frac{(T - T_{\max})^2}{D_{cr}^2} \right] \quad 1.14$$

$K_{\max}$ , maksimum kristalizasyon oranının olduğu  $T_{\max}$  sıcaklığındaki değişim sabiti, ve  $D_{cr}$  ise maksimum kristalizasyon oranını ifade etmektedir. PET lifi için  $K_{\max}$   $0.016 \text{ s}^{-1}$ ,  $T_{\max}$   $190 \text{ }^\circ\text{C}$  ve  $D$  ise  $64 \text{ }^\circ\text{C}$ ' dir (Ziabicki 1976).

Lif üretim hattındaki kristalizasyonun nicel olarak tanımlanması non-izotermal şartlardan ve moleküler oryantasyonun etkisinden dolayı oldukça zordur. Moleküler oryantasyonun yok sayılması halinde bile, non-izotermal kristalizasyon analizi yapılamamaktadır. Bunun dışında lif üretim hattında ölçüm yapmak, deneysel teknik veya teoriler uygulamak mümkün değildir (Spruiell 2000).

Lif üretim hızının 1000-4000 m/dk aralığında olduğu durumlarda, PET liflerinde yüksek moleküler oryantasyon meydana gelmekte, fakat kristalizasyon oluşmamaktadır. 5000 m/dk' dan daha yüksek lif üretim hızlarında yüksek moleküler oryantasyon ve yüksek kristalizasyon gerçekleşmektedir. Kristalizasyonun bu hızlarda oluşması, yüksek moleküler oryantasyon ve soğutmadan kaynaklanmaktadır (Shimizu ve ark. 1985).

Kristalizasyon oranı, sıcaklık ve gerilime (moleküler oryantasyona) bağlıdır. Kristalizasyon oranı, erime sıcaklığının üzerinde ve camlaşma noktasının altında sıfırdır, moleküler oryantasyon faktörünün ( $f$ ) maksimum olduğu noktada, maksimum değeri vermektedir (Ziabicki 1985).

Maksimum kristalizasyon oranının oluşumunu sağlayan sıcaklıkta bile kristalizasyonun tamamlanabilmesi için sonsuz zaman gereklidir. Eriyikten lif üretimi esnasında, lif kristalizasyonunun oluşabildiği sıcaklıkta sürekli soğur. Soğutma oranının artması, verilen sıcaklıktaki kristalizasyon için gerekli süreyi azaltmaktadır. Bundan dolayı, soğutma oranının artması kristalizasyonun oluşum oranını azaltmaktadır. Soğutma hızı gereğinden fazla olursa, kristalin oluşumu için yeterli zaman oluşmamakta ve materyal camlaşma noktasının altına soğutulduğunda kristalin olmayan camsı faza geçmektedir. Bu

nedenle lif üretim hattında oluşan kristalizasyon için etkili parametreler arasında bir denge gereklidir, bu parametreler kristalizasyon kinetiğini etkiler ve bunlar soğutma hızını kontrol eder (Spruiell 2000).

#### **1.4. Eriyikten Lif Üretimi Proses Analizi**

##### **1.4.1. Eriyikten lif üretimi prosesi değişkenleri**

Düzeyle gelen eriyiğin şekil kazanmasından, katılaşmış lif olarak sarımına kadar geçen lif oluşumu şu adımlardan meydana gelmektedir:

- Lif çekme eriyiğinin düzeyle akması,
- Düze kanallarında meydana gelen olaylar,
- Lif eriyiğinin düzeden çıktıktan sonraki davranışı,
- Daha akışkan durumda bulunan lif eriyiğinin çekilmeye karşı tutumu,
- Lif eriyiğinin katılaşması.

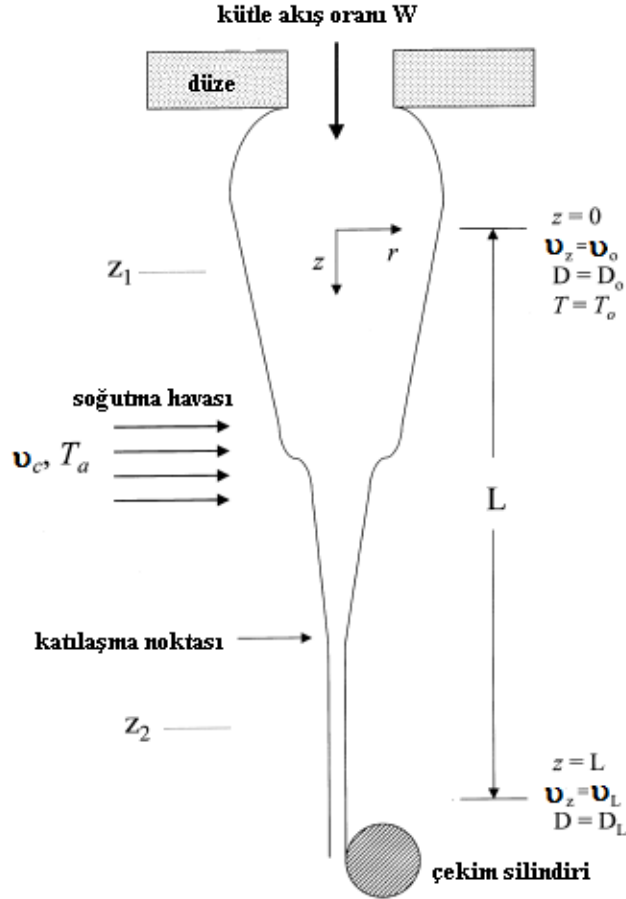
Bu adımlardan ilk ikisi düzede, diğerleri ise düzeden çıktıktan sonra meydana gelen olayları kapsamaktadır (Tarakçıoğlu 1986).

Eriyikten lif üretimi için temel değişkenler;

- Ekstruziyon sıcaklığı,
- Her bir düzeden geçen kütle akış miktarı (debi),
- Liflerin üretim hızı,
- Lif üretim hattındaki soğutma şartları,
- Düzelerin şekli, boyutları
- Lif üretim hattının uzunluğudur.

Bu değişkenler birbirine bağımlı değişkenlerdir. Mesela lif üretim hattı uzunluğu genellikle soğutma şartlarına göre belirlenmektedir (Spruiell 2000).

### 1.4.2. Lif modelinin tanımlanması



**Şekil.1.18:** Eriyikten Lif Üretim Prosesinin Şematik Gösterimi.

(Düze şişmesi efekti konunun anlaşılması için olduğundan daha büyük derecede gösterilmektedir.)

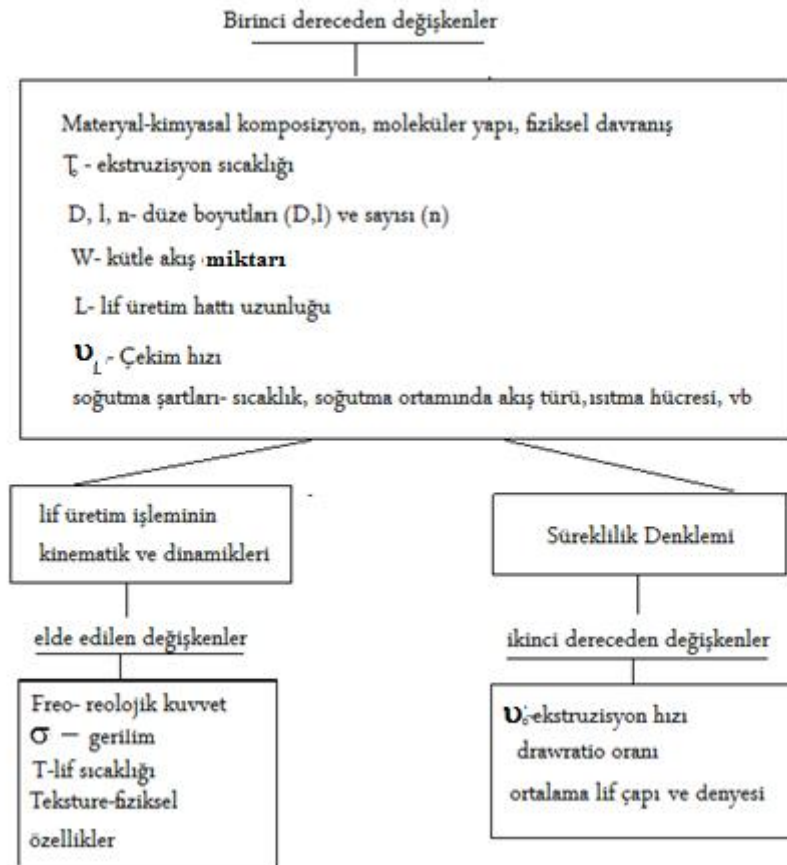
KAYNAK: DOUFAS, A. K., A. J. MCHUGH and C. MILLER. 2000. Simulation of melt spinning including flow-induced crystallization Part I. Model development and predictions. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 92: 14-18.

Eriyikten lif üretimi prosesi Şekil 1.18' de şematik olarak gösterilmektedir. Eksenel yönde simetrik ve viskoelastik akış olan polimer eriyiği  $D_0$  çapındaki düzeden  $W$  kütle akış miktarında (debi),  $T_0$  sıcaklığında çıkmaktadır. Düzeden  $L$  uzaklığında bir mesafeden,  $v_L$  çekim hızıyla (ekstruder hızı  $v_0$  dan daha büyük bir hızla) sürekli olarak çekilmektedir (Doufas ve ark. 2000). Ekstrude edilmiş olan lif önce şişmekte, sonra sürekli olarak incelmeye

devam etmektedir. “Düze şişmesi” diye isimlendirilen bu davranış, düze çıkışında yüzey gerilimi ve moleküler oryantasyonun relaksasyonu sonucu lif çapının, düze çapından daha büyük hale gelmesidir (Reese 2003). Bu bölgeden sonra, düzenin altında lif çapının nihai çapa, çok yaklaşmasından dolayı aşağı yöndeki lif hızı hemen hemen tüm aksenal noktalarda aynıdır. Bundan dolayı, lif  $0 < z < L$  bölgesinde, bir boyutlu (1-D) olarak modellenebilmektedir. Bu durumda, lifin kesit alanında süreklilik, momentum ve enerji denklemleri, ince lif oluşumundan dolayı ortalama değer olarak hesaplanabilmektedir. Düze çıkışının sonrasında polimer, akış hızına ( $v_c$ ) dikey yönde  $T_a$  sıcaklığına sahip ( $z_1 < z < z_2$ ) soğutma havasının bulunduğu soğutma bölgesine girmektedir (Doufas ve ark. 2000).

Ziabicki, eriyikten lif üretimi prosesinin değişkenlerini Çizelge 1.3’ te sunmaktadır (Ziabicki 1976).

**Çizelge 1.3:** Eriyikten Lif Üretimi Prosesi Temel Değişkenleri



KAYNAK: ZIABICKI, A. 1976. Fundamentals of Fibre Formation. John Wiley&Sons Interscience, New York, 1976, 482 p.

### 1.4.3. Radyal ısı dağılımının etkileri

Genel olarak radyal değişim büyük ölçüde ihmal edilmektedir. Bunun sebebi liflerin ince olması ve akış alanında uzamaya bağlı olarak incelenmesi ve lif çapındaki termal değişimlerin küçük olmasıdır (Spruiell 2000).

Giriş bölümünde verilen modellemeler incelendiğinde çoğunda, ince lif yaklaşımı kullanılmakta, yani sıcaklık, gerilim, viskozite gibi radyal değişimlerin ihmal edildiği görülmektedir. Çoğu eriyikten lif üretimi işleminin için bu doğru bir yaklaşımdır, ama kimi deneylerde bazı şartlar altında sıcaklığın radyal dağılımını lif yapısında önemli değişiklikler oluşturabilmektedir. Sıcaklık ve hızın radyal değişimi Matsuo ve Kase (1968), Shimizu ve ark. (1985) ve Katayama ve Yoon (1985) tarafından incelenmiştir. Bu çalışmalara göre, 4000m/dk'lık çekim hızlarında, 9000 m/dk'lık çekim hızlarına nispeten daha az radyal değişim olduğu tespit edilmektedir (Shimizu ve ark. 1985).

### 1.4.4. Multi-Filament etkisi

Bu proseste önemli olan hava akımı hızı, hava sıcaklığı ve sınır şartlarının tanımlanmasıdır ki, multi-filament demeti içinde bir liften diğerine bu şartlar nispeten değişebilmektedir. Özellikle, lif demetinin girişindeki sıcak lifler, soğutma havası demetinden geçerken havayı ısıtmaktadır. Ayrıca hava hızı demetin bir tarafından diğer tarafına nazaran farklı olabilmektedir. Eksenel hız, gelen hava akımının eksenel hız bileşimine etki etmekte ve soğutma havası doğrultusunda hız bileşenini azaltmaktadır. Her iki durumdan dolayı (soğutma havası sıcaklığı ve hızının değişimi) soğutma havası demetin çıkış tarafındaki soğutma şartları ile giriş tarafındaki şartları arasında farklılıklar oluşmaktadır. Bu durumda demet içindeki pozisyonun fonksiyonu olarak ısı transferine etkisi olduğu kadar, dinamikteki farklılıklara da sebep olmaktadır. Hava hızının azalması ve sıcaklık artışı, düzeden uzaklaştıkça azalmaktadır. Dinamik ve ısı transferindeki bu değişimlerden dolayı multi-filament demetin farklı bölümlerinde lif yapısı ve özellikleri de farklıdır (Spruiell 2000).

Ziabicki çalışmasında (1998), lifler arasındaki aerodinamik etkileşimlerin eriyikten lif üretimi dinamiklerini etkilediğini belirtmektedir. Bunun sebepleri ortalama ısı transferi ve yüzey sürtünme katsayısının azalması ve multi-filament demetindeki her bir lifin farklı soğutma derecesiyle karşılaşması olarak açıklanmaktadır.

Birçok araştırmacı multi-filament efektlerin modellenmesi konusunda denemeler yapmaktadır. Yasuda ve ark. (1984), lif demetini hücreler halinde alt bölümlere ayırmış, her bir hücreye kütle ve enerji denklemini uygulamıştır. Dutta (1987), Ishihara ve ark. (1989) daha sonra benzer yaklaşımlar uygulamıştır. Bu gibi etkilerin nasıl azaltıldığı önemli bir endüstriyel problem olmakla birlikte, oluşturulan liflerin yapı ve özellikleri uniformdur (Beyreuther ve Brünig 2007). Jeon ve Cox (2008, 2009) ise, PET için multi-filament modellemeyi çalışmışlardır.

Bu çalışmada verilen proses şartlarında yapının gelişimi incelenmektedir. Bu nedenle sonraki analizlerde mono-filament yaklaşımı ele alınmaktadır.

### **1.5. Eriyikten Lif Üretimi Prosesinde Sayısal Analizin Uygulaması**

Mühendislikte herhangi bir fiziksel sistemin matematik modellenmesi sonucu elde edilen karmaşık veya analitik çözülemeyen denklemlerin çözümünde kullanılan nümerik yöntemler son yıllarda özellikle bilgisayar alanındaki gelişmelere paralel olarak artmış ve sayısal analiz adıyla yeni bir bilim alanı haline gelmiştir.

Sayısal analizdeki gelişmeler teorik ve deneysel çalışmalara da kolaylık getirmiş, bilimsel çalışmalara zaman ve ekonomik bakımdan katkı sağlamıştır. Sayısal yöntemler, fiziksel olayların matematiksel modellerini çözümünde ve bilgisayar simülasyonlarının gerçekleştirilmesinde de büyük destek sağlamıştır.

Tanım olarak sayısal analiz, verilen sayısal bilgilerden ve matematik modelden hareketle aranan sayısal neticelerin hesaplanmasına ait yöntemleri inceleyen ve geliştiren bilim dalı şeklinde ifade edilebilir.



Bir mühendislik probleminin çözümünde izlenmesi gereken başlıca adımlar şunlardır:

1. Problemin tanımı,
2. Fiziksel modelin oluşturulması,
3. Matematik modelin oluşturulması,
4. Çözümün varlığı ve tekniğinin analizi,
5. Uygun bir yöntemle matematik modelin çözülmesi,
6. Hata analizi (Karagöz 2008).

Eriyikten lif üretimi prosesinin detaylı analizi için, prosesin dinamiği, uygun reolojik temel denklemlerin seçimi, materyal ve enerji denklemlerinin uygulaması, moleküler oryantasyonun gelişimi ve moleküler oryantasyon dahilinde kristalizasyon adımının incelenmesi gerekmektedir. Bu gibi analizlerde birçok nümerik varsayım ve yaklaşım vardır. Yine de eksik analiz bile eriyikten lif çekimi prosesindeki birçok değişkenin etkisini ve bu değişkenler arasındaki etkileşimi anlamada çok fayda sağlamaktadır (Spruiell 2000).

Eriyikten lif çekimini modellemenin en önemli yönü, şartlara göre belirlenen lif özelliklerinin belirlenmesidir (Beyreuther ve Brünig 2007). Modelleme sadece hız, gerilim, sıcaklık gibi hesaplamalarda değil, aynı zamanda lif yapısal özelliklerinin tahmini olarak belirlenmesinde de uygulanmaktadır (Beyreuther ve Brünig 2007). Lif yapısının gelişiminde en önemli parametreler sıcaklık, gerilim ve zamandır. Ayrıca kristalizasyon oluşumun söz konusu ise, kristalizasyon ısısı da etkisi dahil edilmelidir. Birçok araştırmacı eriyikten lif üretimi prosesini uzun zamandır modellemesine ve hala devam etmesine rağmen, kristalizasyonu tanımlayan güvenilir bir modelleme tam olarak geliştirilememiştir (Ziabicki 1998).

## 1.6. Temel Denklemler

Ekstrude edilmiş polimer eriyiğinin düzelerden iletilmesi ve çekim üniteleri tarafından aşağı doğru yönlendirilmesi için belirli bir kuvvetin uygulanması gerekmektedir. Eriyikten lif üretimi prosesinin mühendislik analizi için kütle, enerji ve momentum denge denklemlerinin

materyal davranışını da dahil ederek uygulanması gerekmektedir. Bu üç temel denklem aşağıda sırasıyla tanımlanmaktadır.

### 1.6.1. Süreklilik denklemi

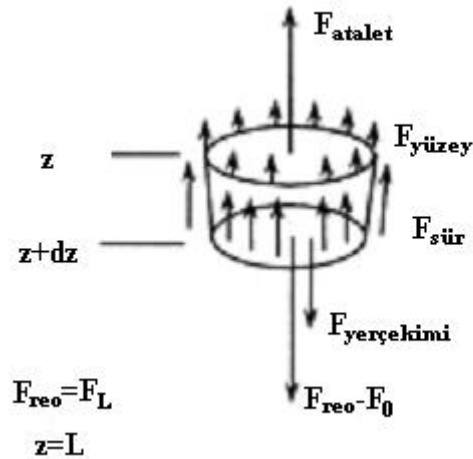
Bu proste en önemli ve temel denklem kütle korunumunu tanımlayan süreklilik denklemidir. Hava ve lif arasında kütle transferi söz konusu değildir (Ziabicki 1998).

$$W = \rho(z) \frac{\pi D^2(z)}{4} v(z) = \rho(z) A(z) v(z) \quad 1.15$$

$\rho$  polimer yoğunluğunu,  $A$  lifin kesit alanını ifade etmektedir.

### 1.6.2. Momentum dengesi

Lif üretim hattında tek bir life etki eden kuvvetler Şekil 1.19' da belirtilmektedir:



**Şekil.1.19:** Eriyikten Lif Üretim Prosesinde Lif Üzerine Etkiyen Kuvvetler.

KAYNAK: SPRUIELL, J. E. 2000. Structure Formation During Melt Spinning. In: D. R. Salem (Editor), Structure Formation in Polymeric Fibers, Hanser Gardner Publications, USA, p. 5-93.

Şekil 1.19' daki kuvvetleri incelersek,

- $F_0$ , düze çıkışındaki ilk kuvvet ( $z=0$ ),
- $F_{atalet}$ , lif üretim hattı boyunca polimer kütlesinin ivmesi tarafından üretilen atalet kuvveti,
- $F_{sür}$  lif soğutma ortamında hareket ederken akışın sürüklenme kuvveti,
- $F_{yerçekimi}$  lif üretim hattındaki yerçekimi kuvveti,
- $F_{yüzey}$  lif/hava etkileşiminde oluşan yüzey gerilimi kuvveti,
- $F_{reo}$ , düzeden uzaklığa bağlı olarak lif üzerinde etkiyen kuvvettir (Beyreuther ve Brünig 2007, Spruiell 2000).

Lif üretim hattındaki tek life etki eden kuvvetler şu şekilde yazılmaktadır:

$$F(z) = F_{reo}(z) = F_0 + F_{atalet} + F_{sür} - F_{yerçekimi} + F_{yüzey} \quad 1.16$$

### 1.6.2.1. Reolojik kuvvet ( $F_{reo(z)}$ )

Lif üretim hattındaki gerilim (veya normal gerilim farkları)  $\sigma_{zz} - \sigma_{rr}$  lif üretim hattında aksenal kuvvetin lif çapına bölünmesiyle elde edilmektedir.

$$F_{reo} = A(\sigma_{zz} - \sigma_{rr}) \quad 1.17$$

Normal gerilim farkları, akışkanın reolojik özelliklerine bağlıdır (Ziabicki 1998). Katılaşmanın başladığı lif üretim hattındaki bir noktada çekim geriliminin değeri, çekilmiş lifin nihai yapı ve özelliklerini belirlemede çok önemlidir (Spruiell 2000).

### 1.6.2.2. Yüzey gerilimi kuvveti ( $F_{\text{yüzey}}$ )

Yüzey gerilimi, Denklem 1.18' de ifade edildiği gibi, lifin uzama ve incilmesi devam ederken, lif yüzeyinin birim hacimde büyüme miktarı olarak tanımlanmaktadır (Beyreuther ve Brünig 2007).

$$F_{\text{yüzey}} = \frac{\pi}{2} s(D(0) - D(z)) \quad 1.18$$

Burada,  $s$  aerodinamik sürüklenmeden dolayı lif/hava etkileşimindeki kayma gerilmesidir. Daha öncede tanımlandığı gibi,  $D$  lif çapını ve  $z$  lif üretim hattındaki herhangi bir uzaklığı tanımlamaktadır. PET lifi için  $s$ ,  $35 \text{ dyn cm}^{-1}$ ' dir (Ziabicki 1998).

Yüzey gerilimi çok düşük viskoziteli materyaller hariç, diğer kuvvet bileşenleriyle karşılaştırıldığında genellikle küçüktür (Spruiell 2000). Yüzey geriliminin, lif üzerindeki toplam gerilime etkisi %1' den daha küçük miktarlardadır (Ziabicki 1985). Bu nedenle polimerler için genellikle ihmal edilmektedir (Doufas ve ark. 2000, 2001, Ziabicki 1998).

### 1.6.2.3. Yerçekimi kuvveti ( $F_{\text{yerçekimi}}$ )

Yerçekimi kuvveti, Denklem 1.19' da ifade edildiği gibi, herhangi bir  $z$  uzaklığında, lifin ağırlığını bildirmektedir (Beyreuther ve Brünig 2007).

$$F_{\text{yerçekimi}} = \int_0^z \rho g A(z) dz \quad 1.19$$

$\rho$  lif yoğunluğu,  $g$  yerçekimi ivmesi ( $\approx 981 \text{ cm/s}^2$ ) ve  $A$  lifin kesit alanını ( $A = (\pi D^2)/4$ ) ifade etmektedir. Yerçekimi kuvvetinin de, yüzey gerilim kuvveti gibi, düşük toplam gerilime katkısı ihmal edilecek kadar küçüktür. Aynı şekilde polimerler için genellikle ihmal edilmektedir.

#### 1.6.2.4. Atalet kuvveti ( $F_{atalet}$ )

Atalet kuvveti, lif üretim hattı boyunca polimer kütesinin hızına bağlı olarak ivmesi tarafından üretilmektedir (Spruiell 2000). Lif hızındaki değişim atalet kuvvetini doğrudan etkilemektedir (Beyreuther ve Brünig 2007).

$$F_{atalet} = W(v(z) - v_0) = \rho(z) \frac{\pi D^2(z)}{4} v(z)(v(z) - v_0) \quad 1.20$$

Denklem 1.20' de görüldüğü gibi atalet kuvveti yaklaşık olarak  $\approx D^2 v^2$  ile orantılıdır. Düşük çekim hızlarında bile etkilidir (Ziabicki 1985).

#### 1.6.2.5. Sürüklenme kuvveti ( $F_{sür}$ )

Sürüklenme kuvveti, lif üretim hattında hareket ederken akışın sürüklenme kuvvetidir (Beyreuther ve Brünig 2007).

$$F_{sür} = \int_0^z \pi D \sigma_f d(z) \quad 1.21$$

$\sigma_f$ , hava sürüklenmesinden kaynaklanan lif yüzeyinde oluşan kayma gerilimidir. “Sınır Tabaka Teorisi” ne göre teğetsel gerilim Denklem 1.22’ de ifade edilmektedir (Ziabicki 1998).

$$\sigma_f = \frac{1}{2} \rho_{hava} v^2(z) C_f \quad 1.22$$

$\rho_{hava}$ , soğutma havasının yoğunluğu ve  $C_f$  ise yüzey sürtünme katsayısıdır.

Denklem 1.21 ve 1.22’ nin kombine edilmesiyle, sürüklenme kuvveti :

$$F_{sür} = \frac{1}{2} \int_0^z \pi D(z) \rho_{hava} v^2(z) C_f \quad 1.23$$

şeklinde ifade edilmektedir (Beyreuther ve Brünig 2007).

$C_f$  ' nin hesaplanması için farklı metotlar vardır. En çok kullanılan, yüzey sürtünme katsayısı ile ilişkili olan soğutma havasının Reynolds sayıdır (Spruiell 2000).

$$C_f = K(\text{Re})^{-n} \quad 1.24$$

Lif üretim simülasyonu için en çok kullanılan yaklaşım Kase ve Matsuo (1965) tarafından geliştirilmiştir. Denklem şu şekilde kullanılmaktadır:

$$C_f = 0.37(\text{Re})^{-0.61} \quad 1.25$$

Reynolds sayısı, akışın atalet kuvvetlerinin viskoz kuvvetlere oranını bildiren boyutsuz bir sayıdır. Bu sayı akışın laminer veya türbülans bölgesinde olduğunu ifade etmektedir (White 1998).

$$\text{Re}(z) = \frac{\rho_{hava} \cdot v(z) \cdot D(z)}{\eta_{hava}} = \frac{v(z) D(z)}{\nu_{hava}} \quad 1.26$$

$\eta_{hava}$  , havanın dinamik viskozitesi,  $\nu_{hava}$  , havanın kinematik viskozitesi olup,  $\nu_{hava} = \eta_{hava} / \rho_{hava}$  şeklinde ifade edilmektedir (Beyreuther ve Brünig 2007).

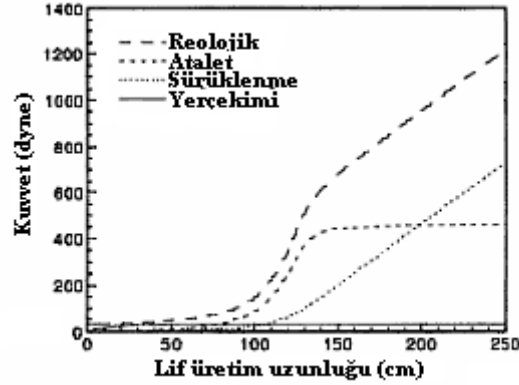
Life etkiyen tüm kuvvetleri dikkate aldığımızda momentum denklemi şu şekilde yazılmaktadır:

$$\frac{dF}{dz} = W \frac{dv}{dz} + \pi D \sigma f - \frac{\pi D^2}{4} \rho g + \frac{\pi}{2} \frac{d}{dz} (sD) \quad 1.27$$

### 1.6.2.6. Kuvvetlerin lif üretim hattında etkileri

Kase ve Matsuo (1967, 1965), Ziabicki (1976, 1985), Shimizu ve ark. (1983, 1985) gibi birçok araştırmacı life etkiyen kuvvet bileşenlerinin büyüklüklerini, çekim hızının fonksiyonu olarak çalışmıştır. Daha önce de belirtildiği gibi, düşük molekül ağırlığındaki materyallerin eriyikten üretimi dışında, yüzey gerilimi kuvveti ihmal edilmektedir. Ayrıca yerçekimi kuvveti, düşük hızlarda ince liflerin eriyikten üretimi haricinde, diğer kuvvetlere nazaran çok küçük bir değerde kalmaktadır. Bu nedenle polimer için normal eriyikten lif üretimi şartlarında, atalet ve sürüklenme kuvvetleri, reolojik kuvvetin temel bileşenleridir. Şekil 1.20’de lif üretim hattında düzeden çıkan life etki eden, düzeden uzaklığına göre gelişen kuvvet bileşenlerinin değeri gösterilmektedir. Bu hesaplamalarda her bir düze deliği için kütle akış miktarı 2,5 g/dk ve çekim hızı 6600 m/dk çekim hızına sahip, poliamid 66’ ya aittir (Spruiell 2000).

Şekil 1.20’ de görüldüğü gibi, yüksek çekim hızlarında, atalet kuvvetleri lif üretim hattının üst taraflarında yükselmekte, sonra katılaşma başladığında ve lif çapı sabit değere ulaştığında atalet kuvvetleri de sabit değere ulaşmaktadır. Hava sürüklenmesinden kaynaklanan kuvvet, daha sonra ortaya çıkmakta ve lif hızıyla beraber artmaktadır. Lif üretim uzunluğunun artmasından dolayı sürüklenme de arttığı için, çap ve hız sabit hale gelmektedir (Spruiell 2000). Shimuzu ve ark.’a göre (1983) bu durumda atalet kuvvetleri lif yapısının belirlenmesinde daha fazla etkiye sahiptir.



**Şekil.1.20:** Eriyikten Lif Üretim Prosesinde Lif Üzerine Etkiyen Kuvvetler.

KAYNAK: SPRUIELL, J. E. 2000. Structure Formation During Melt Spinning. In: D. R. Salem (Editor), Structure Formation in Polymeric Fibers, Hanser Gardner Publications, USA, p. 5-93.

### 1.6.3. Enerji denklemi

Enerji denklemine geçmeden önce, lif ve ortam havası arasındaki ısı transferi şekillerini tanımlamak gerekmektedir.

#### 1.6.3.1. Lif ve ortam arasındaki etkileşim

Liflerde ısı transferi konveksiyon (taşınım), radyasyon (ışınım) veya konduksiyon (iletim) yoluyla, soğutma esnasında ve lif üretim hattındaki objelerle (çekim silindiri gibi) temas ettiği anda gerçekleşmektedir (Doufas ve Mchugh 2000). Radyasyon ve serbest konveksiyonun katkısı genellikle ihmal edilmekte veya kimi zaman deneysel metotlarla belirlenerek, konveksiyon transferindeki ısı transferi katsayısına ilave edilmektedir. Bununla beraber, son zamanlarda yapılan kimi çalışmalar radyasyonun etkili olduğunu da göstermektedir (Beyreuther ve Brünig 2007).

Radyasyon, büyük ölçüde sıcaklığa bağlıdır. Eriyikten lif üretim prosesinde, 50-300°C sıcaklık aralığında, özellikle düzenin altında çok az etkisi vardır (Beyreuther ve Brünig 2007).



Radyasyon lif sıcaklığına bağlıdır ve özellikle lif üretim hattı sıcaklığının çok yüksek olduğu inorganik camlar ve metallerin üretim işleminde çok önemlidir (Doufas ve Mchugh 2001 ).

Serbest konveksiyon ısı transferi, termal genleşme ve yoğunluk değişiminin etkisiyle oluşan ortam havası hareketiyle ilişkilidir. Lif üretim hattında, soğutma işlemi, serbest konveksiyondur. Lif ve soğutma havası arasındaki sıcaklık farkına bağlıdır ve özellikle düşük hızlarda, düze yakınında etkili olmaktadır. Yüksek sıcaklıklara, düze yakınılarında hava akımında komplikasyonlara sebep olmaktadır. Türbülans olmaması ve lif üretim prosesinin stabil olması için eğirme blokları dikkatli dizayn edilmelidir (Beyreuther ve Brünig 2007).

Zorlanmış konveksiyon , eriyikten lif üretimi prosesinde etki olan ısı transferi şeklindedir. Bu sistemde ısı transferi katsayısının hesaplanması, enerji denklemiyle beraber açıklanacaktır.

### 1.6.3.2. Lif üretim hattında enerji denklemi

Düzeden uzaklığa bağlı olarak sıcaklık değişimi, enerji denkleminde hesaplanabilmektedir (Spruiell 2000).

Lifteki radyal sıcaklık değişimlerinin ihmal edilmesi ve kristalizasyon ısısının dahil edilmesiyle elde edilen diferansiyel enerji denklemi (Shimizu ve ark. 1983, Katayama ve Yoon 1985, Ziemenski ve Spruiell 1988, Patel ve ark. 1991):

$$\rho C_p v_z \frac{dT}{dz} = -\frac{4}{D} \alpha (T - T_a) + (\sigma_{zz} - \sigma_{rr}) \frac{dv_z}{dz} + \rho \Delta H_f v_z \frac{d\phi}{dz} \quad 1.28$$

Denklem 1.28' de  $C_p$  sıcaklık ve kristalinitenin bağlı olduğu ısı kapasitesidir. Sağdaki ilk terim denklemdeki  $\alpha$  konvektif ısı transferi katsayısı ile lif ve soğutma havası arasındaki konvektif ısı transferini ifade etmektedir. 2. terim viskoz kayıpları tanımlamaktadır. Son terimde ise  $\Delta H_f$  birim kütleyle düşen kristalizasyon ısısını tanımlayan gizli ısı ve  $\Phi$  sistemin aksel yöndeki z noktası için ortalama mutlak kristalinite derecesidir (Doufas ve ark. 2000).

Denklem 1.28' de temel parametre ısı transfer katsayısı  $\alpha$ ' dır. Bunun için lif üretim hattı boyunca sıcaklık profilinin hesaplanması gerekmektedir. Her iki teori ve deneysel verileri kullanarak (13,78,79) birçok araştırmacı lif üretim şartlarının fonksiyonu olarak ısı transferi katsayısının ilişkisini boyutsuz olarak tanımlamışlardır (Nusselt (Nu), Reynolds (Re), Pradtl (Pr), Grashof (Gr) sayıları gibi.). İlgili çalışmalar Ziabicki tarafından özetlenmektedir (Ziabicki 1976).

Isı transferi katsayısı, lif çapı, lif ve soğutma havası hızı, sıcaklık ve soğutma ortamının sıcaklığa bağlı fiziksel özelliklerine bağlıdır (Ziabicki 1998). En çok kullanılan korelasyonlardan biri Kase ve Matsuo (1965) tarafından geliştirilen Denklem 1.29' dur.

$$\alpha = 0.42 \lambda_{hava} \nu_{hava}^{-0.334} D^{-0.666} \nu_z^{0.334} \left[ 1 + \left( 8 \frac{\nu_c}{\nu_z} \right)^2 \right]^{0.167} \quad 1.29$$

Denklem 1.29' da, soğutma ortamı için,  $\lambda_{hava}$  havanın ısı iletim katsayısı,  $\nu_{hava}$  havanın kinematik viskozitesidir (Ziabicki 1998).

## 2. MATERYAL VE YÖNTEM

Eriyikten PET lifi üretim prosesinde, düze sonrasında lif eksenine yönünde üretim hattı uzunluğuna bağlı olarak, hız, sıcaklık, çap ve yoğunluk değişimi “Fluent Continuous Fiber Model” kullanılarak modellenmiştir.

### 2.1. Korunum Denklemleri

Birçok araştırmacı (Kase ve Matsuo 1965, Ziabicki 1967, Fisher ve Denn 1977, Doufas ve ark. 2000 gibi) eriyikten lif üretimi prosesini tanımlayabilmek için korunum denklemlerinin kullanımını incelemiştir. Bu denklemler hakkında detaylı bilgi 1.6. Temel Denklemler bölümünde verilmektedir. Bu çalışmada yapılan kabuller doğrultusunda kullanılan denklemler şu şekildedir:

$$\text{Süreklilik denklemi; } W = \rho(z) \frac{\pi D^2(z)}{4} v(z) = \rho(z) A(z) v(z) \quad 2.1$$

Momentum denkleminde etkisi çok az olduğu için, yüzey gerilimi kuvveti ihmal edilmektedir. Bu durumda momentum denklemi aşağıdaki gibidir:

$$\text{Momentum denklemi; } \frac{dF}{dz} = W \frac{dv}{dz} + \pi D \sigma_f - \frac{\pi D^2}{4} \rho g \quad 2.2$$

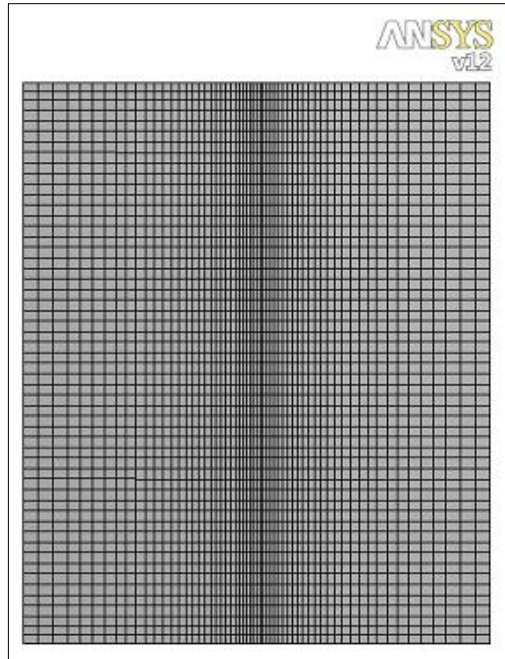
Enerji denkleminde ise newtonian yaklaşımından dolayı viskoz kayıplar ve düşük çekim hızlarına bağlı olarak kristalizasyon oluşmadığı için kristalizasyon oluşumunda ortaya çıkan gizli ısı hesaplanmamaktadır. Bu durumda enerji denklemi aşağıdaki gibidir:

$$\text{Enerji denklemi; } \rho C_p v_z \frac{dT}{dz} = -\frac{4}{D} \alpha (T - T_a) \quad 2.3$$

## 2.2. Kullanılan Program Ve Uygulaması

Akış alanı içerisinde hız ve sıcaklık dağılımlarının bulunabilmesi için yukarıda verilen korunum denklemlerinin çözülmesi gerekmektedir. Burada denklemler Ansys Fluent programının Continuous Fiber Modeli kullanılarak çözülmektedir. Fluent Continuous Fiber Modeli, lifin akış esnasındaki davranışını ve lif özelliklerini lif ve lifi çevreleyen soğutma havası ortamını bir arada modellemeyi ve lif/soğutma havası arasındaki etkileşimi analiz etmemizi sağlamaktadır. Lifin akışını modellerken, lif akışı için bir boyutlu (1D), soğutma havası ortamı için ise iki boyutlu (2D) yaklaşım kullanılmaktadır (Fluent 2006).

Ansys Fluent sonlu hacimler yöntemi ile çözüm yapan bir koddur. Bu yöntemde çözüm alanı, kontrol hacmi olarak adlandırılan küçük elemanlara ayrılmaktadır. Denklemler her bir kontrol hacmi için ayrıştırılarak, iteratif olarak çözülmektedir. Analiz sonunda, her bir kontrol hacmindeki değişkenler tüm domain içinde baştan sona tespit edilmekte, böylece akışın davranışı belirlenebilmektedir (Fluent 2006). Bu amaçla, bu çalışmada oluşturulan ağ (mesh) yapısı Şekil 2.1' de görüldüğü gibidir. Lif akışının olduğu bölgeler sonuçları daha fazla etkilediği için, bu bölgelerde sıklık arttırılmıştır.



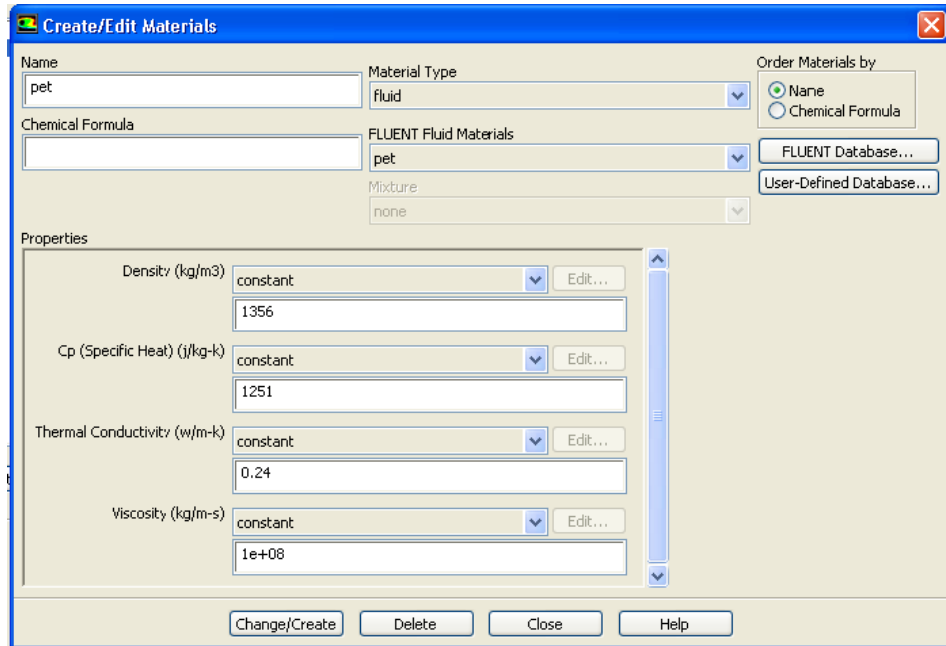
**Şekil.2.1:** Soğutma Bölgesinin Sayısal Ağı (Mesh)

Fluent Continuous Fiber Modeli, çözüm prosesinde şu adımları içermektedir:

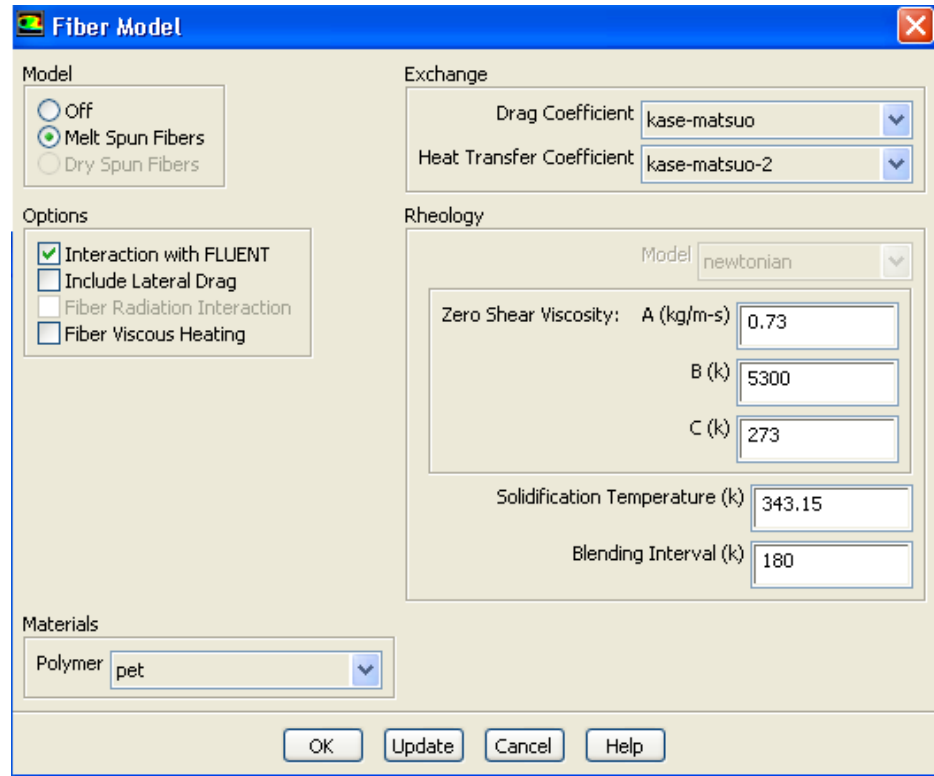
- Lif özellikleri girdi bilgilerine göre güncellenir,
- Lif ve soğutma havası hızlarına göre, lif ve soğutma havası arasındaki momentum değişimi için sürtünme faktörleri hesaplanır.
- Lif için momentum denklemi çözülür.
- İterasyon döngüsünün başından itibaren Reynolds sayıları kullanılarak, ısı transferi katsayıları hesaplanır.
- Lif için enerji denklemi çözülür
- Her bir kontrol hacmi için kütle akı ve lif çapı güncellenir.
- Çözülen her bir denklem takımı için yakınsama kontrol edilir.

Bu adımlar, yakınsama kriterleri tüm eşitlikler için sağlanıncaya kadar devam etmektedir (Fluent 2006). Bu çalışmada, momentum ve enerji çözümlerinde kullanılan yakınsama kriteri  $10^{-5}$  tir.

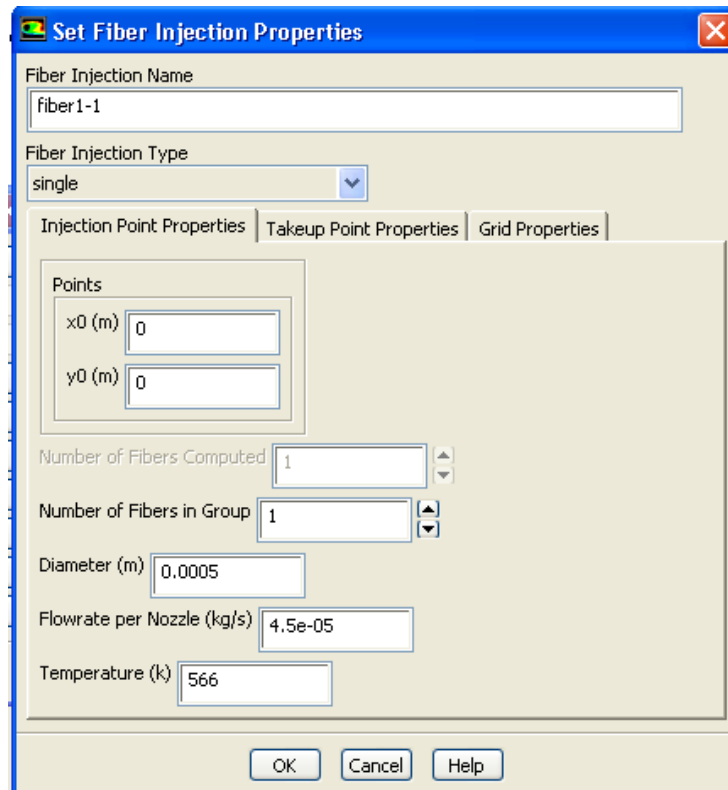
Şekil 2.2, 2.3, 2.4 ve 2.5 soğutma havası ve lif özellikleri için giriş yapılan sayfaları gösterilmektedir.



Şekil.2.2: Lif Özelliklerinin Girildiği Pencere (1)



Şekil.2.3: Lif Özelliklerinin Girildiği Pencere (2)



Şekil.2.4: Lif Özelliklerinin Girildiği Pencere (3)



**Şekil.2.5:** Soğutma Havaı Özelliklerinin Girildiği Pencere

### 2.3. Yapılan Kabuller

1. Lif çekimi hızının artmasıyla, lifin uzama oranının artmasından dolayı elastik etkilerin etkisi daha önemli hale gelmektedir. Yüksek moleköl ağırlığı, geniş moleköl dağılımı ve dallanmış zincirlere sahip polimerler (poliolefin gibi), daha fazla viskoelastiktir ve ilgili denklemlerin kullanılması şarttır. Buna rağmen PET, PA ve PP gibi materyallerin lif üretimi işleminin tanımlanmasında, elastik etkinin dahil edilmemesinin, gerçek davranışa yakın yaklaşımlar sağladığı da bilinmektedir (Kase ve Matsuo 1965, Shimizu ve ark. 1983, Kase 1985, Patel ve ark. 1991, Beyreuther ve Brünig 2007). Bunun için olası sebepler, lif üretimi için seçilen polimerlerin genellikle düşük moleköl ağırlığına sahip polimerler olması, bu nedenle elastisitenin az olması, ve lif üretiminde ani sıcaklık düşüşü ve buna bağlı olarak ani viskozite artışının elastisite etkisini azaltması olarak gösterilebilir. Bu nedenle, eriyikten lif üretimi esnasında polimerin davranışını açıklayabilmek için sıcaklığa bağlı viskozite temel denkleminin kullanımı yaygındır (Spruiell 2000).

Bu çalışmada da akışın newtonian olduğu kabul edilerek, viskoelastik davranış ihmal edilmektedir. Sıcaklığa bağlı Arrhenius viskozite denklemi (Denklem 1.8) kullanılmaktadır. Ayrıca viskoelastik etki ihmal edildiği için düze şişmesi efekti de hesaplanmamaktadır.

2. Bu çalışmada, eriyikten lif üretiminin modellenmesinde, uygulamalarda genel olarak tercih edilen (Doufas ve ark. 2000) tek bir düze deliğinden geçen lifin oluşumu (mono-filament yaklaşımı) dikkate alınmaktadır.

3. Mono-filament ve multi-filament modellerinin çoğu ideal proses şartlarına tekabül eden sürekli (kararlı) haldedir (Ziabicki 1998). Bu çalışmada da aynı şekilde sürekli rejim varsayımı yapılmaktadır.

4. Lif kesitinin dairesel olduğu kabul edilmekte ve radyal değişimler ihmal edilmektedir. Hız ve sıcaklığın enine kesitte uniform olduğu varsayılmaktadır.

5. Radyasyon ile ısı iletimi ihmal edilmektedir.

## 2.4. Proses Şartları

### 2.4.1. Çekim hızı değişimini inceleyen deneysel veri proses şartları

**Çizelge 2.1:** Deneysel Verilere Ait Proses Şartları

Intrinsik viskozite, $IV$ dl/g	0.675
Ekstruzisyon sıcaklığı, $T_0$ °C	300
Soğutma havası sıcaklığı, $T_a$ °C	14
Soğutma havası hızı, $v_c$ m/s	0.54
Düze çapı, $D_0$ cm	0.025
Kütle akış miktarı, $W$ g/dk	2.5
Lif üretim hattı uzunluğu, $L$ cm	150
Çekim hızı, $v_L$ m/dk	1000-2000-3000

KAYNAK: GEORGE, H.H. 1982. Model of Steady-State Melt Spinning at Intermediate Take-Up Speeds. Polymer Engineering and Science, 22 (5):292-299.

George (1982) tarafından hazırlanan çalışmada, sabit kütle akış miktarında (2.5 g/dk), 3 farklı çekim hızına göre (1000 m/dk, 2000m/dk ve 3000 m/dk) hız ve sıcaklık ölçümleri yapılmıştır. Elde edilen grafikler, lif uzunluğuna bağlı lif hızı değişimi ve lif sıcaklığı değişimi grafikleridir.



#### 2.4.2. Kütle akış miktarı değişimini inceleyen deneysel veri proses şartları

**Çizelge 2.2:** Deneysel Verilere Ait Proses Şartları.

Intrinsik viskozite, IV dl/g	0.64
Ekstruzisyon sıcaklığı, $T_0$ °C	310
Düze çapı, $D_0$ cm	0.0407
Kütle akış miktarı, W g/dk	0.8-1.5- 3.0
Lif üretim hattı uzunluğu, L cm	120
Çekim hızı, $v_L$ m/dk	1500-2500-3500-4500

KAYNAK: BANSAL, V. and R. L. SHAMBAUGH. 1998. On-line Density and Crystallinity of Polyethylene Terephthalate During Melt Spinning. Polymer Engineering and Science, 38(12):1959-1968.

Bansal ve Shambaugh (1998) tarafından hazırlanan çalışmada, 3 farklı kütle akış oranında (0.8 g/dk, 1.5 g/dk ve 3.0 g/dk), 3 farklı çekim hızına (1500 m/dk, 2500 m/dk, 3500 m/dk ve 4500 m/dk) göre hız, sıcaklık, lif çapı ve lif yoğunluğu ölçümleri yapılmıştır. Düzeden çıkan lif eriyiğinin soğutma havası etkisi olmadan, doğrudan ortam sıcaklığında soğuması sağlanmıştır. Elde edilen grafikler, lif uzunluğuna bağlı lif hızı değişimi, lif sıcaklığı değişimi, lif çapı değişimi ve yoğunluk değişimi grafikleridir.

Yapılan simülasyon çalışmalarında, Çizelge 2.3 proses şartları uygulanmaktadır. Çizelge 2.3' de verilen proses şartlarına göre elde edilen simülasyon grafikleri, Geroge (1982) ve Bansal ve Shambaugh'un (1998) deneysel çalışmaları ile karşılaştırılmıştır.

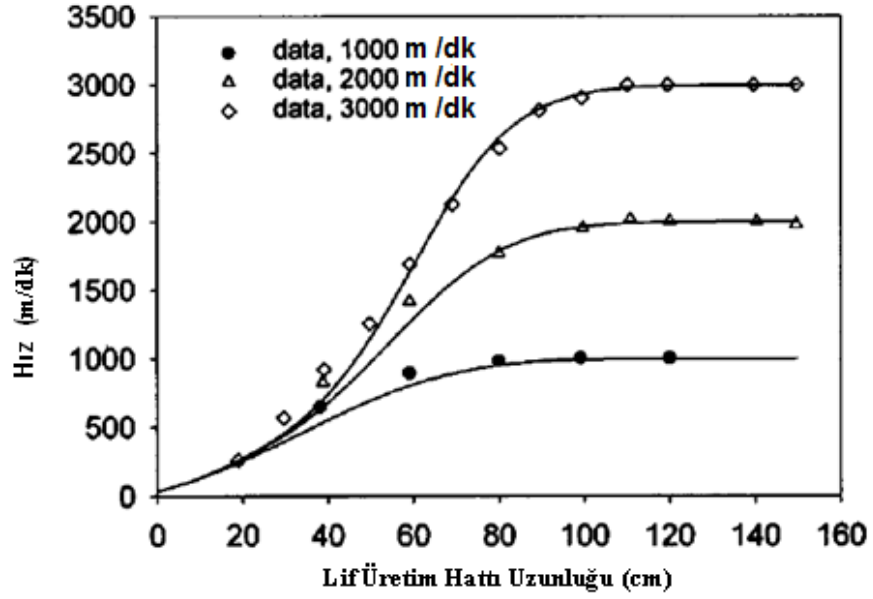
**Çizelge 2.3:** Simülasyon Değerlerine Ait Proses Şartları.

Intrinsik viskozite, IV dl/g	0.675, 0.64
Ekstruzisyon sıcaklığı, $T_0$ °C	300,310
Soğutma havası sıcaklığı, $T_a$ °C	14, 28
Soğutma havası hızı, $v_c$ m/s	0.54, 1.54
Düze çapı, $D_0$ cm	0.025, 0.0407
Kütle akış miktarı, W g/dk	2.5, 0.8-1.5- 3.0
Lif üretim hattı uzunluğu, L cm	150, 120
Çekim hızı, $v_L$ m/dk	1000-2000-3000, 1500-2500-3500-4500-6000-8000

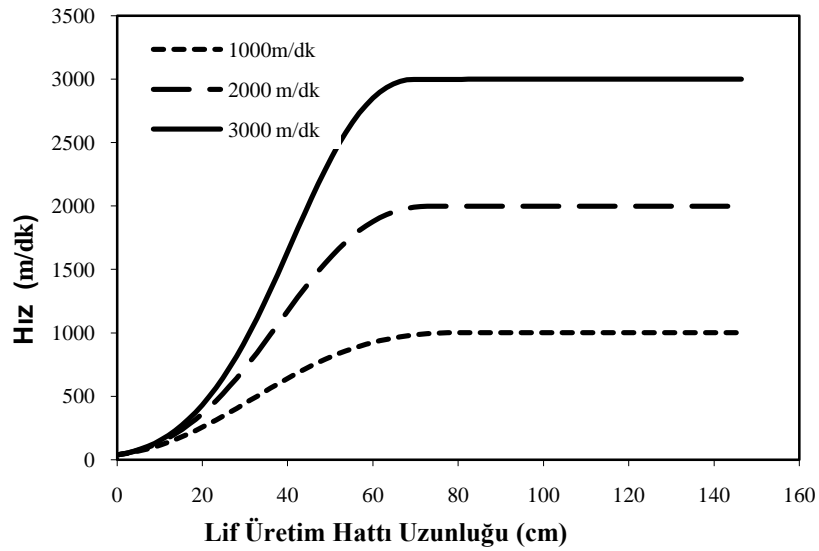
### 3. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

#### 3.1. Uzunluk-Hız Değişim Grafikleri

##### 3.1.1. Çekim hızı değişimi sonuçları



Şekil 3.1: Deneysel Veriler (George 1982). Proses şartları Çizelge 2.1' de belirtilmektedir.



Şekil 3.2: Simülasyon Değerleri. Proses şartları Çizelge 2.3' de belirtilmektedir.

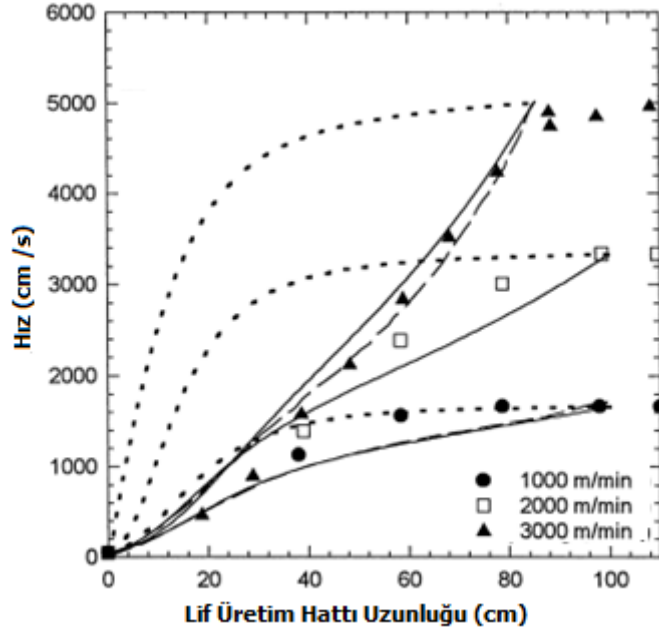
Şekil 3.1 ve 3.2' de, lif hızı değişimi 2.5 g/dk kütle akış miktarı için, 1000m/dk-2000m/dk-3000m/dk çekim hızlarında, lif üretim hattı uzunluğunun fonksiyonu olarak belirtilmektedir. Şekil 3.1 ve 3.2 sırasıyla George (1982) tarafından yapılan deneysel çalışma sonuçları ve bu deneye ait parametrelerle bilgisayar programında hazırlanan simülasyon değerleridir. Lif hızının çekim hızına ulaşma süresi simülasyon grafiklerinde biraz daha kısadır.

Düşük lif hızlarında düzeye yakın kısımlarda, viskoz davranış uzama akışına sebep olmaktadır. Fakat hızın artmasıyla birlikte elastik davranış özellikle katılma bölgesinden önce daha önemli hale gelmektedir (Beyreuther ve Brünig 2007). Şekil 3.1 ve 3.2' de başlangıçta sıfır olan lif hızı, çekim hızına bağlı olarak artış göstermekte, uygulanan çekim hızının değerine ulaşmaktadır. Tüm çekim hızları için, düzeye yakın mesafelerde hız profilleri deneysel gözlemlere uygun olarak aynıdır. Bununla beraber, uzaklık arttıkça, hız profili farklılaşmaya başlamaktadır. Yüksek çekim hızlarında lif hızı, çok hızlı bir şekilde yükselmeye başlamakta, boyun verme ve katılma davranışıyla birlikte daha kısa sürelerde çekim hızına ulaşmaktadır. Çekim hızına ulaştığı değer katılma noktasıdır. Çekim hızı arttıkça, boyun verme rejimi daralmakta ve katılma noktası düzeye daha yakın uzunluklarda gerçekleşmektedir (Doufas ve ark. 2000). Katılmanın meydana geldiği mesafe, çekim hızının artmasıyla düzeye daha yakın uzaklıklarda olmaktadır (Spruiell 1988).

Şekil 3.1 ve 3.2' de çekim hızına ulaşılan uzunluk tüm hızlar için birbirine çok yakındır, çekim hızı arttıkça lif hızının daha çabuk yükseldiğini de grafiklerde görebilmekteyiz. Bunun sebebi çekim hızına bağlı olarak, lif üzerinde oluşan reolojik kuvvetin artmasıdır. Ziabicki (1976), lif üzerinde oluşan kuvvetleri tanımlarken reolojik kuvveti belirleyen bileşenlerin özellikle atalet ve sürüklenme kuvvetleri olduğunu belirtmektedir.

Şekil 3.3'te Mitsoulis ve Beaulne (2000) tarafından yapılan çalışmada, oluşan kuvvetlere bağlı olarak, hız profilindeki değişimler görülmektedir. Bu çalışma, 300 °C' de yapılan eriyikten PET lifi üretimi prosesi için hazırlanmıştır. Semboller George (1982) tarafından yapılan deneysel çalışma sonuçlarını, kesik çizgiler Gagon ve Denn'in (1981)

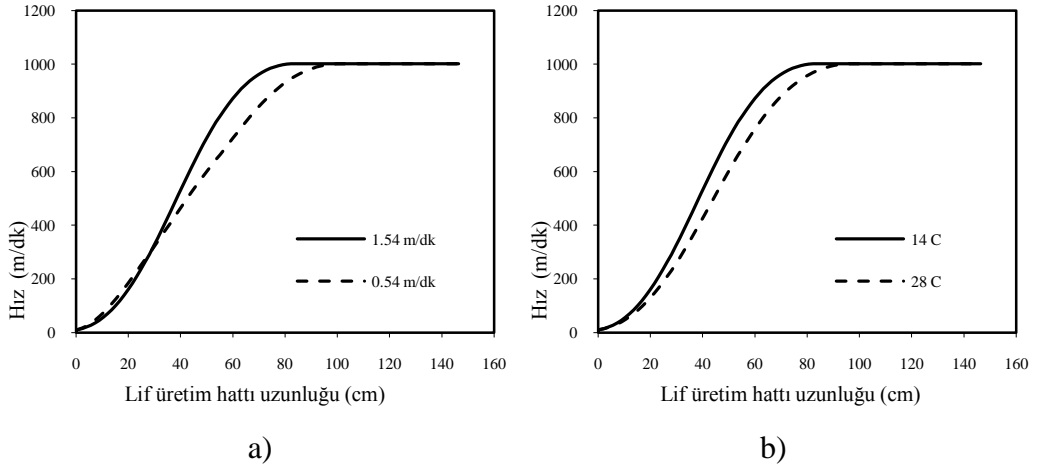
yaptığı simülasyon sonuçlarını ve sürekli çizgiler ise Mitsoulis ve Beaulne (2000) tarafından yapılan simülasyon çalışmasını göstermektedir. Şekil 3.3'te görüldüğü gibi lif üzerinde oluşan kuvvetler hız profilinin eğilimini değiştirmektedir. Atalet ve sürüklenme kuvvetleri hızın daha geç artmasına sebep olmaktadır.



**Şekil 3.3:** PET Lifi Üzerinde Oluşan Kuvvetlerin Etkisi.

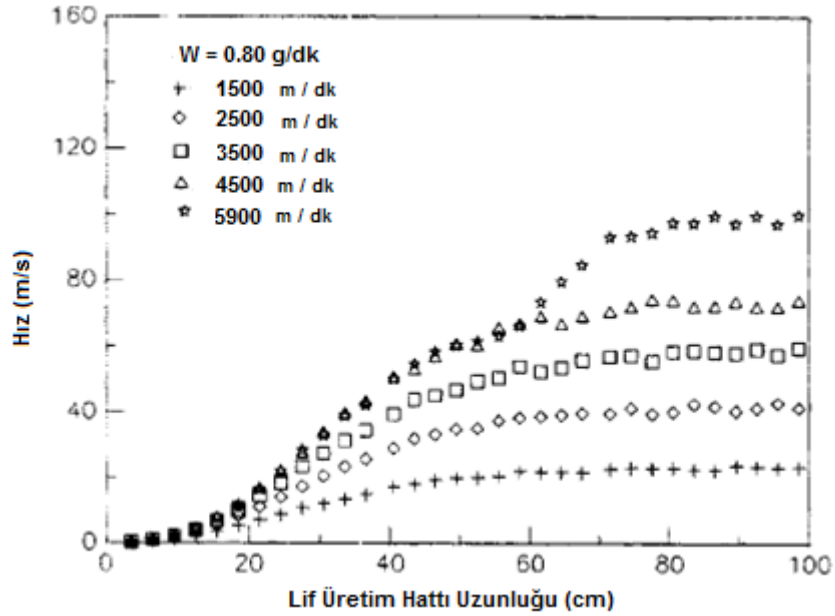
KAYNAK: MITSOULIS, E. and V. M. BEAULNE. 2000. Numerical Simulation of Rheological Effects in Fiber Spinning. *Advances in Polymer Technology*, 19(3):155-172.

Soğutma havasının sıcaklığı ve hızı, lifin hız profilini değiştirmektedir. Şekil 3.4.a ve 3.4.b' de görüldüğü gibi lifin hızı, soğutma havası sıcaklığının artışıyla daha geç artmaya başlamaktadır ve bu durum viskoz kuvvetlerin etkili olmasından kaynaklanmaktadır. Soğutma havası hızının artması ise aksi yönde, hızın daha çabuk yükselmesine sebep olmaktadır. Diğer proses şartları Çizelge 2.3' de verilmektedir.

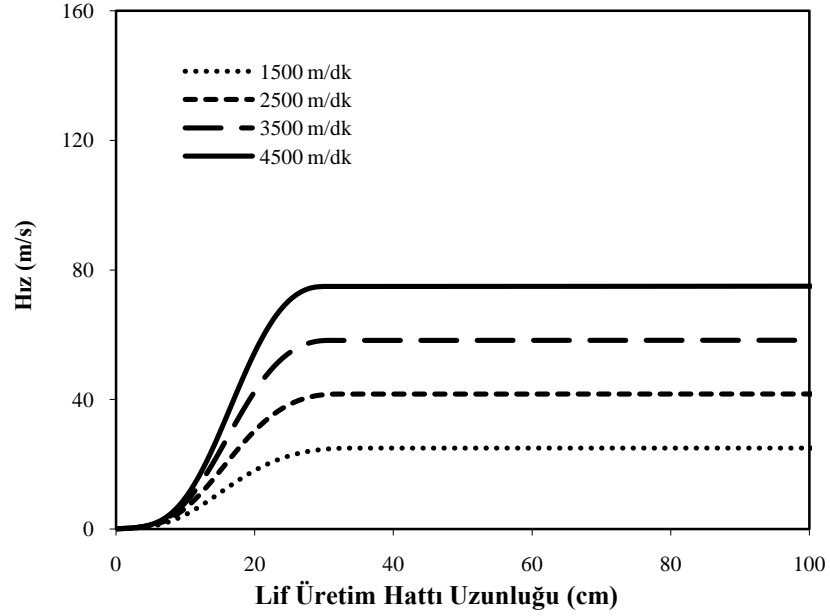


**Şekil 3.4:** Soğutma Havası Özelliklerinin Değişiminin Lif Hızına Etkileri a) Soğutma Havası Hızının Değişim b) Soğutma Havası Sıcaklığının Değişimi (Simülasyon Değerleri)

### 3.1.2. Kütle akış miktarı (0.8 g/dk) değişimi sonuçları



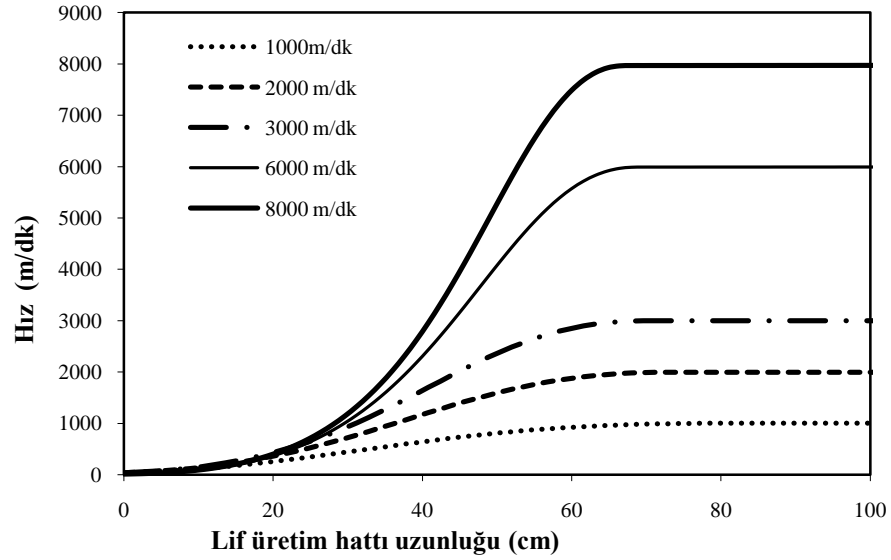
**Şekil 3.5:** Deneysel Veriler (Bansal and Shambaugh 1998). Proses şartları Çizelge 2.2' de belirtilmektedir.



**Şekil 3.6:** Simülasyon Değerleri. Proses şartları Çizelge 2.3' de belirtilmektedir.

Şekil 3.5 ve 3.6' da, lif hızı değişimi 0.8 g/dk kütle akış miktarı için, 1500m/dk-2500m/dk-3500m/dk-4500m/dk çekim hızlarında, lif üretim hattı uzunluğunun fonksiyonu olarak belirtilmektedir. Şekil 3.5 ve 3.6 sırasıyla Bansal ve Shambaugh (1998) tarafından yapılan deneysel çalışma sonuçları ve bu deneye ait parametrelerle bilgisayar programında hazırlanan simülasyon değerleridir. Lif hızının çekim hızına ulaşma süresi simülasyon grafiklerinde biraz daha kısadır.

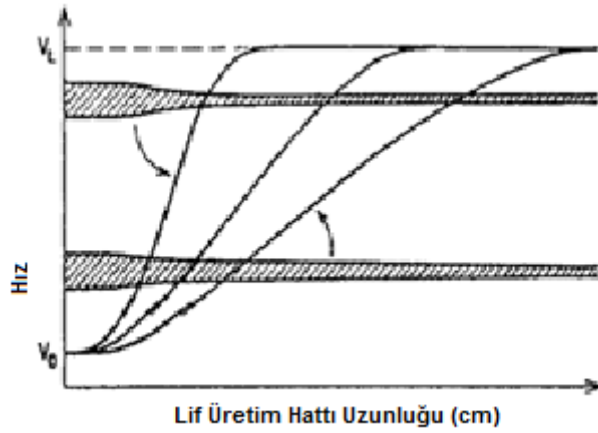
Şekil3.5 ve 3.6' yı incelediğimizde, çekim hızına bağlı olarak lif hızının arttığı, lifin çekim hızına ulaşmasının Şekil 3.6'da Şekil 3.5' e göre daha çabuk olduğunu görmekteyiz. Fakat kristalizasyon oluşmadığı için çekim hızına ulaşma hızı, yüksek hızlara göre oldukça yavaştır.



**Şekil 3.7:** Yüksek Çekim Hızlarında Lif Hızı Grafiği (Simülasyon Değerleri).

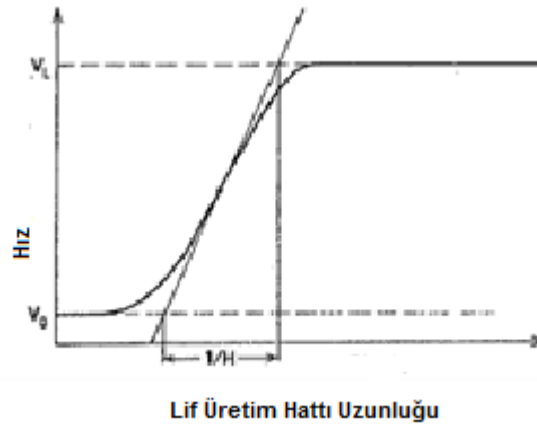
Kristalizasyon sıcaklık ve lif üzerinde oluşan gerilime, dolayısıyla bu gerilimi doğrudan etkileyen çekim hızına bağlıdır (Ziabicki 1976). Çekim hızının 1000-4000m/dk aralığında olduğu durumlarda PET liflerinde yüksek moleküler oryantasyon görülmekte, fakat kristalizasyon gerçekleşmemektedir (Shimizu ve ark. 1985). Bu durum hız profilinin daha yavaş artmasına sebep olmaktadır. Yüksek hızlarda daha ani çıkışlar söz konusudur. Şekil 3.7 yüksek hızlarda olan lif üretim hattında, hız değişimini göstermektedir.

Ziabicki çalışmasında (1976), hız profiline bağlı olarak akış esnasında oluşan boyun verme olayını matematiksel olarak modellemektedir. Şekil 3.8 ve 3.9' da görüldüğü gibi, lifin çekim hızına ulaşma hızı, viskoelastik davranışa, dolayısıyla bu etkiyi oluşturan kuvvetlere bağlı olarak meydana gelmektedir. Viskoz yapıdan dolayı oluşan kuvvetler, hız ne kadar yüksekse o kadar etkili olmakta, ve yaklaşık 4500m/dk' dan daha büyük hızlarda boyun verme olayına sebep olmaktadır. Şekil 3.5 ve 3.6 grafikleri bu modelleme esas alınarak incelendiğinde, boyun verme olayının gerçekleşmediğini yada fark edilmeyecek kadar az olduğunu bize bildirmektedir.



**Şekil 3.8:** Lif Üretim Hattında, Farklı Üretim Hızlarının ve Buna Bağlı Boyun Verme Oluşumunun Şematik Gösterimi

KAYNAK: ZIABICKI, A. 1985.Fundamental Scientific Problems. In: A. Ziabicki and H. Kawai (editors), High-Speed Fiber Spinning, John Wiley & Sons Ltd, USA, p. 21-63.



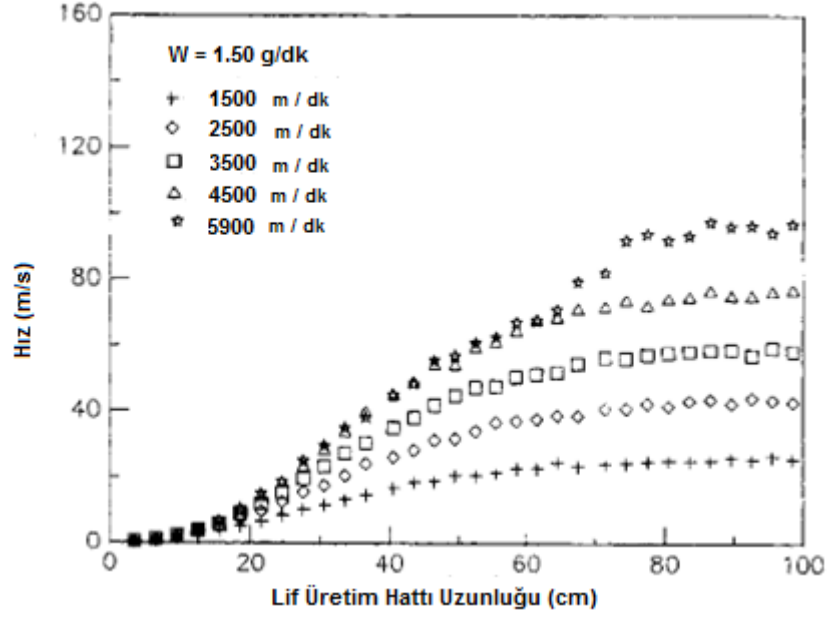
**Şekil 3.9:** Boyun Verme Parametresinin (H) Matematiksel İfadesi

$$(1/H = (v_L - v_0)/(dv/dz)_{\max})$$

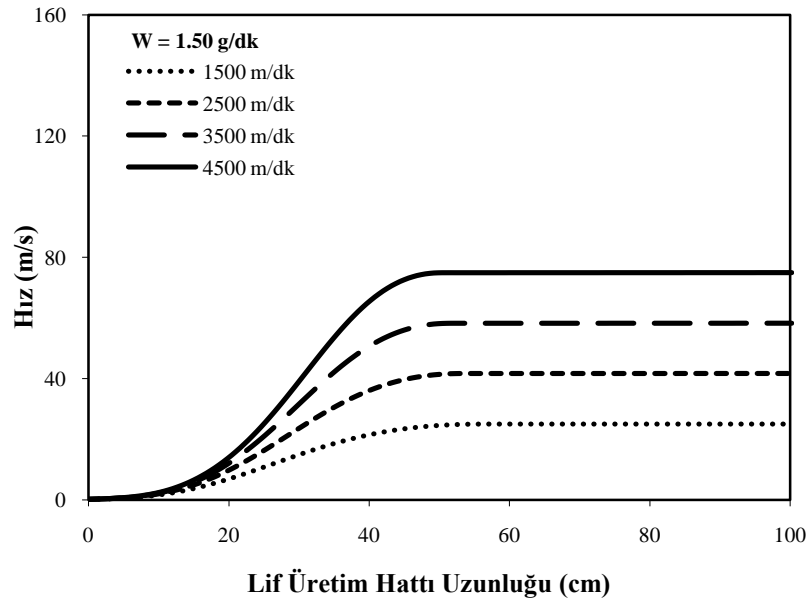
KAYNAK: ZIABICKI, A. 1985.Fundamental Scientific Problems. In: A. Ziabicki and H. Kawai (editors), High-Speed Fiber Spinning, John Wiley & Sons Ltd, USA, p. 21-63.



### 3.1.3. Kütle akış miktarı (1.5 g/dk) değişimi sonuçları



Şekil 3.10: Deneysel Veriler (Bansal and Shambaugh 1998). Proses şartları Çizelge 2.2' de belirtilmektedir.

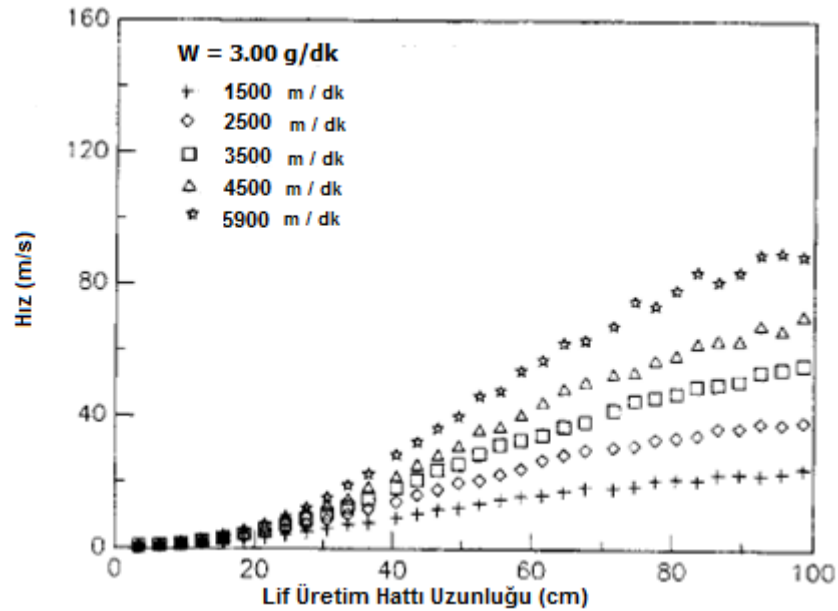


Şekil 3.11: Simülasyon Değerleri. Proses şartları Çizelge 2.3' de belirtilmektedir.

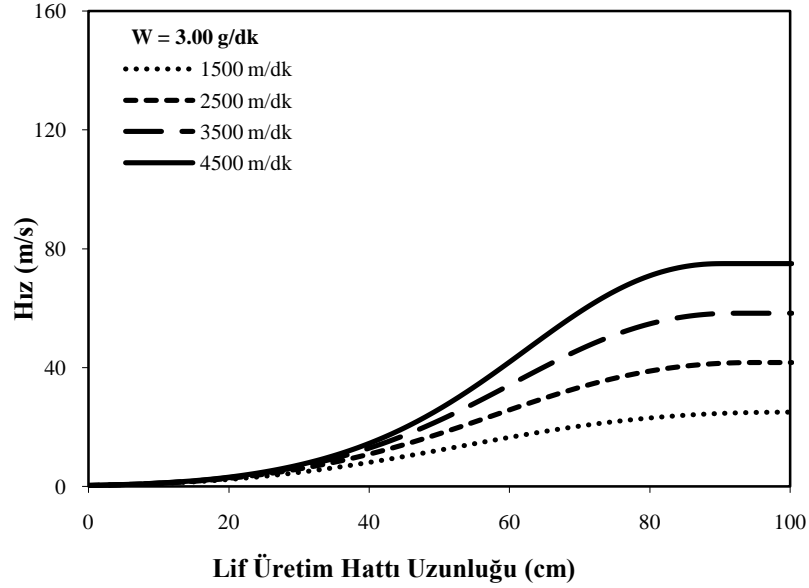
Şekil 3.10 ve 3.11’ de, lif hızı değişimi 1.5 g/dk kütle akış miktarı için, 1500m/dk-2500m/dk-3500m/dk-4500m/dk çekim hızlarında, lif üretim hattı uzunluğunun fonksiyonu olarak belirtilmektedir. Şekil 3.10 ve 3.11 sırasıyla Bansal ve Shambaugh (1998) tarafından yapılan deneysel çalışma sonuçları ve bu deneye ait parametrelerle bilgisayar programında hazırlanan simülasyon değerleridir. Lif hızının çekim hızına ulaşma süresi simülasyon grafiklerinde biraz daha kısadır.

Şekil 3.10 ve 3.11’ de yine, çekim hızına bağlı olarak lif hızının arttığı, lifin çekim hızına ulaşmasının daha çabuk olduğunu görmekteyiz. Fakat kütle akış miktarının artması, lif hızının çekim hızına ulaşma hızını daha da yavaşlatmıştır. Kütle akış miktarının artışı, oluşan kuvvetlerin, özellikle de atalet kuvvetinin artmasına sebep olduğu için bu yavaşlama görülmektedir. Şekil 3.14 sabit çekim hızında farklı kütle akış oranlarının lif hızına etkisini göstermektedir. Kütle akış miktarının etkisi, bu grafiklerde daha net görülebilmektedir.

### 3.1.4. Kütle akış miktarı (3.0 g/dk) değişimi sonuçları



Şekil 3.12: Deneysel veriler (Bansal and Shambaugh 1998). Proses şartları Çizelge 2.2’ de belirtilmektedir.



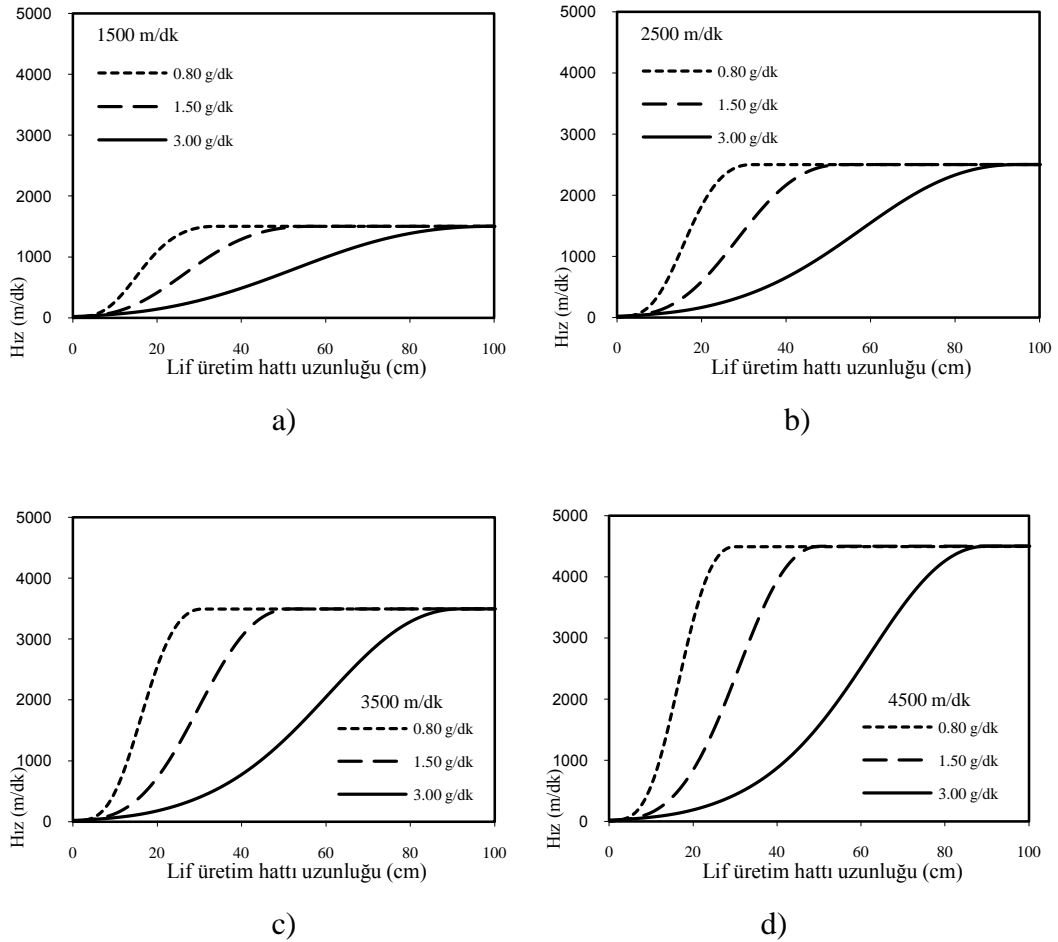
**Şekil 3.13:** Simülasyon değerleri. Proses şartları Çizelge 2.3' de belirtilmektedir.

Şekil 3.12 ve 3.13' de, lif hızı değişimi 3.00 g/dk kütle akış miktarı için, 1500m/dk-2500m/dk-3500m/dk-4500m/dk çekim hızlarında, lif üretim hattı uzunluğunun fonksiyonu olarak belirtilmektedir. Şekil 3.12 ve 3.13 sırasıyla Bansal ve Shambaugh (1998) tarafından yapılan deneysel çalışma sonuçları ve bu deneye ait parametrelerle bilgisayar programında hazırlanan simülasyon değerleridir. Lif hızının çekim hızına ulaşma süresi simülasyon grafiklerinde biraz daha kısadır.

Şekil 3.12 ve 3.13' de, çekim hızının artmasıyla lif hızı artmakta, fakat bu artış kütle akış miktarının artmasıyla lif hızının çekim hızına ulaşması düzeden oldukça uzaklaşmaktadır.

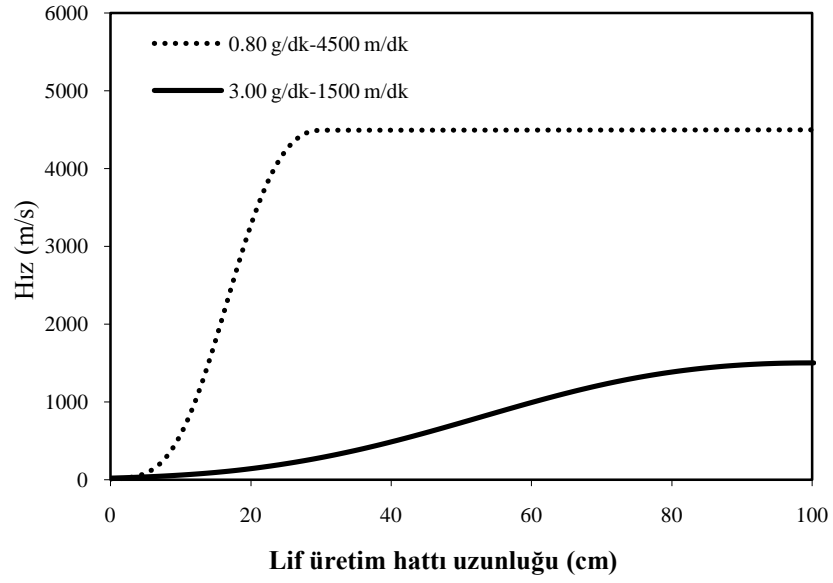
Çekim hızının artması ve kütle akış miktarının azalması, lif üretim prosesinin sınırlarını belirlemektedir. Yüksek çekim hızı, daha yüksek gerilime ve materyaldeki deformasyon oranının artmasına sebep olmaktadır (Beyreuther ve Brünig 2007). Yapılan çalışmada, şimdiye kadar sunulmuş olan grafikler bu durumu desteklemektedir.

Şekil 3.1, 3.5, 3.10, 3.12 deneysel veriler grafikleri ile 3.2, 3.6, 3.11, 3.13 simülasyon sonuçları grafikleri arasındaki fark, diğer bir ifadeyle çekim hızına ulaşma profilinin daha hızlı olması simülasyon değerlerinin, newtonian model kullanılarak hazırlanmasından kaynaklanmaktadır. Bu fark, polimerin gerçek davranışının viskoelastik olması ve viskoz yapının hız değişimini geciktirmesinden dolayıdır. Ayrıca Tartışma bölümünde, Şekil 3.43’ de Kim ve ark. (2009) tarafından, Newtonian ve viskoelastik model arasındaki farkları açıklamak amacıyla hazırlanan çalışma, yaptığımız simülasyon sonuçları ve deneysel veriler arasındaki farkı açıklamaktadır.



**Şekil 3.14:** Sabit Çekim Hızında, Kütle Akış Oranı Değişiminin Lif Hızına Etkisi. a) 1500 m/dk Çekim Hızı, b) 2500 m/dk Çekim Hızı, c) 3500 m/dk Çekim Hızı, d) 4500 m/dk Çekim Hızı İçin, Farklı Kütle Akış Oranlarında Lif Hızı Değişimi (Simülasyon Değerleri)

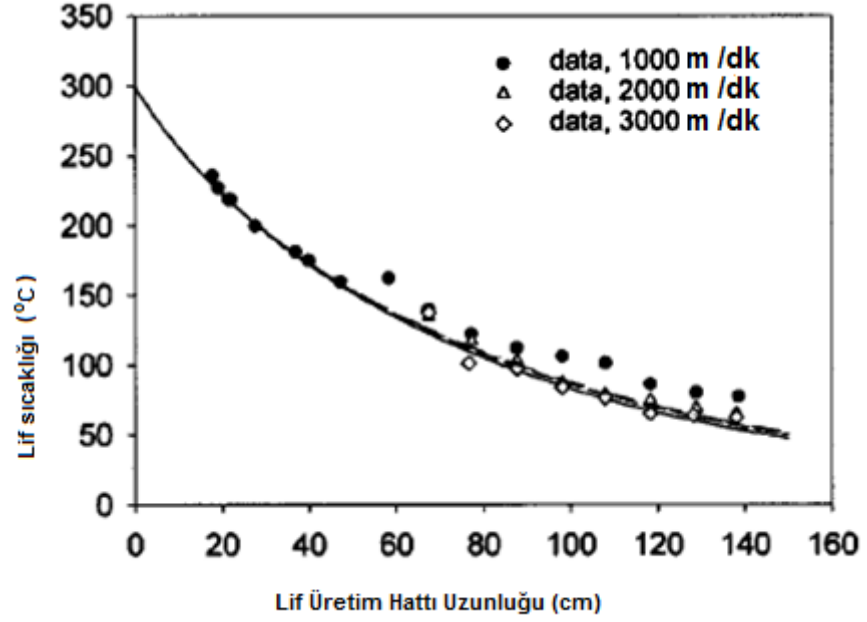
Lif hızına ait bu farklılıkları ele aldığımızda, yüksek çekim hızı ve düşük kütle oranı ile lifin çekim hızına en çabuk şekilde ulaşacağımızı görmekteyiz. Bu çalışmalardaki en yüksek hız, en düşük kütle akış miktarı ve en düşük hız, en yüksek kütle akış miktarı arasındaki lif hızı değişim grafiği şekil 3.15’ de verilmektedir.



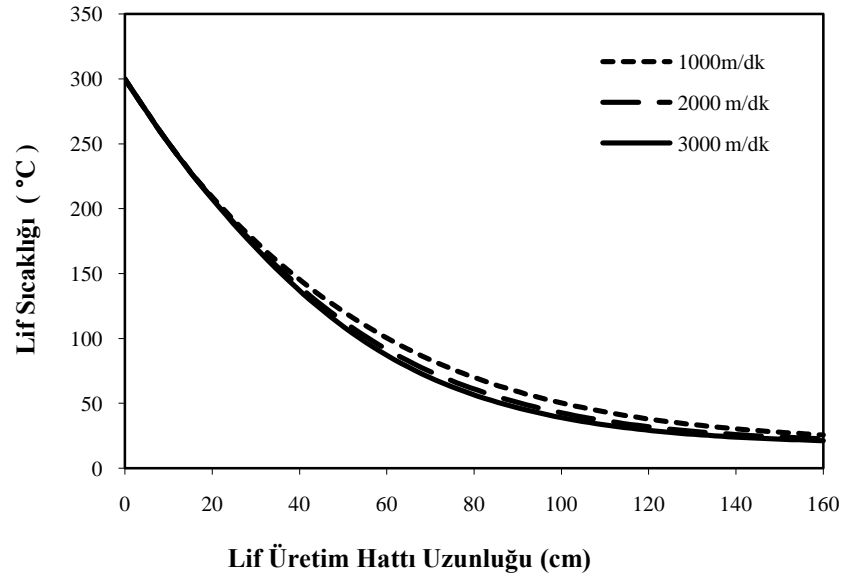
**Şekil 3.15:** Simülasyon Değerleri. Proses şartları Çizelge 2.3’ de belirtilmektedir.

### 3.2. Uzunluk-Sıcaklık Değişim Grafikleri

#### 3.2.1. Çekim hızı değişimi sonuçları



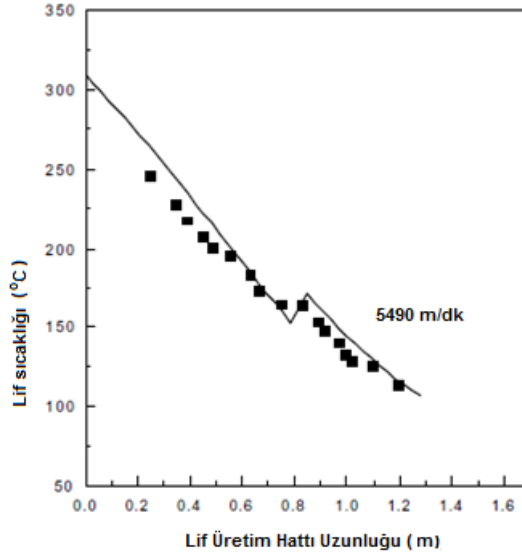
Şekil 3.16: Deneysel Veriler (George 1982). Proses şartları Çizelge 2.1.' de belirtilmektedir.



Şekil 3.17: Simülasyon Değerleri. Proses şartları Çizelge 2.3' de belirtilmektedir.

Şekil 3.16 ve 3.17' de, ortalama lif sıcaklık değişimi 2.5 g/dk kütle akış miktarı için, 1000m/dk-2000m/dk-3000m/dk çekim hızlarında, lif üretim hattı uzunluğunun fonksiyonu olarak belirtilmektedir. Şekil 3.16 ve 3.17 sırasıyla George (1982) tarafından yapılan deneysel çalışma sonuçları ve bu deneye ait parametrelerle bilgisayar programında hazırlanan simülasyon değerleridir. Simülasyon grafiklerinde sıcaklık değişimi daha hızlıdır ve ulaşılan ulaşılan nihai sıcaklık daha düşüktür.

Şekil 3.16 ve 3.17' de ortalama lif sıcaklığı, lif üretim hattı boyunca azalmaktadır. Elde edilen grafiklerde de görüldüğü gibi düşük hızlarda, hız farklarının sıcaklık üzerinde ayırt edici bir etkisi söz konusu değildir. Kristalizasyonun düşük hızlarda oluşmaması bu duruma sebep olmaktadır.

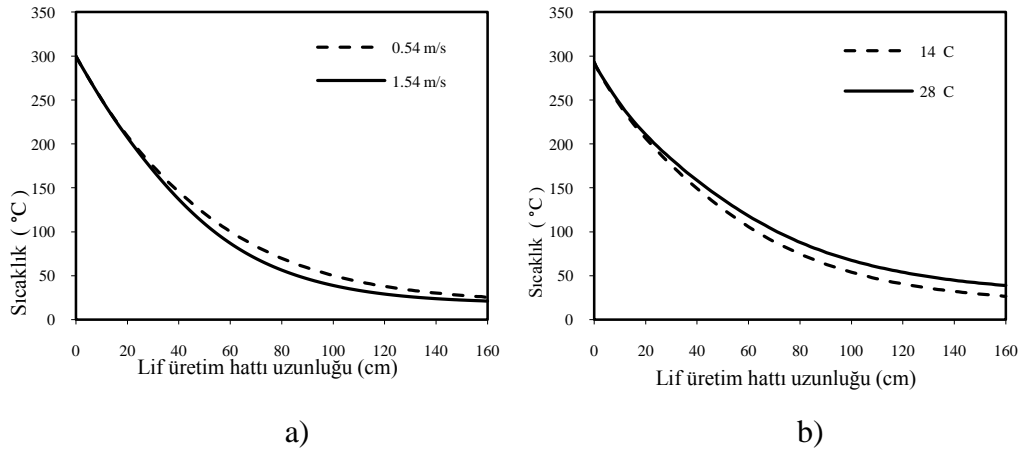


**Şekil 3.18.** Yüksek Çekim Hızlarında Yapılan Lif Üretim İşlemine Ait Ortalama Lif Sıcaklığı Ölçümü Deneysel Verileri .

KAYNAK: VASSILATOS, G., B. H. KNOX, and H. R. E. FRANKFORT. 1985. Dynamics, Structure Deveoplment, and Fiber Properties in High-Speed Spinning of Polyethylene Terephthalate. In: A. Ziabicki and H. Kawai (editors), High-Speed Fiber Spinning, John Wiley & Sons Ltd, USA, p. 383-428.

Eriyikten lif çekimi işleminde sıcaklığın azalması ile viskozite değeri yüksek değerlere ulaşmakta ve çekim hızı final değerine ulaşmaktadır. Gerçekte akış deformasyonu, camlaşma sıcaklığına ulaşmadan sonlanmaktadır. Bunun sebebi kristalizasyonun oryantasyon ve gerilimin yüksek değerlerinde oluşmasıdır (Beyreuther ve Brünig 2007). Şekil 3.18, Vassilatos (1985) tarafından, kristalizasyonun oluştuğu yüksek çekim hızında (5490 m/dk) yapılan deneysel çalışmaya ait ortalama lif sıcaklığı profilini göstermektedir. Burada kristalizasyon esnasında açığa çıkan ısıdan dolayı oluşan anlık bir yükselme görülmektedir. Şekil 3.16 ve 3.17’ de kristalizasyon oluşumu söz konusu olmadığı için anlık değişim söz konusu değildir.

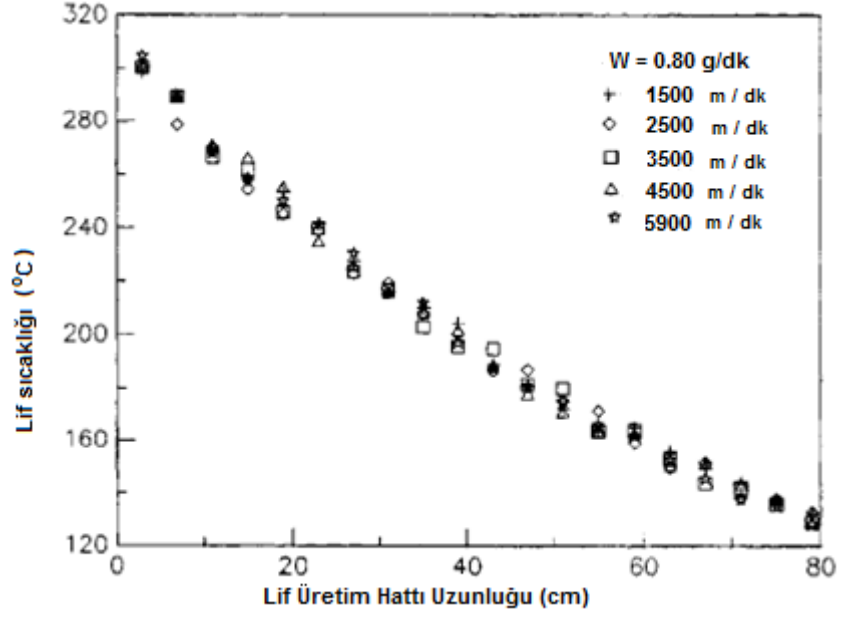
Soğutma havasının sıcaklığı lifin ulaştığı nihai sıcaklığı ve ortalama lif sıcaklığı profilini değiştirmektedir. Şekil 3.19 b, soğutma havası sıcaklığının artmasıyla lifin daha geç soğuduğunu ve buna bağlı olarak aynı lif üretim hattı uzunluğunda lifin daha yüksek sıcaklıklarda olduğunu göstermektedir. Soğutma havası hızı ise ortalama lif sıcaklığının sadece profilini etkilemektedir. Şekil 3.19.a ve 3.19.b soğutma havası hızının, ortalama lif sıcaklığı üzerindeki etkilerini simüle etmektedir. Görüldüğü gibi, soğutma hızının artması soğumanın daha çabuk gerçekleşmesine sebep olmaktadır.



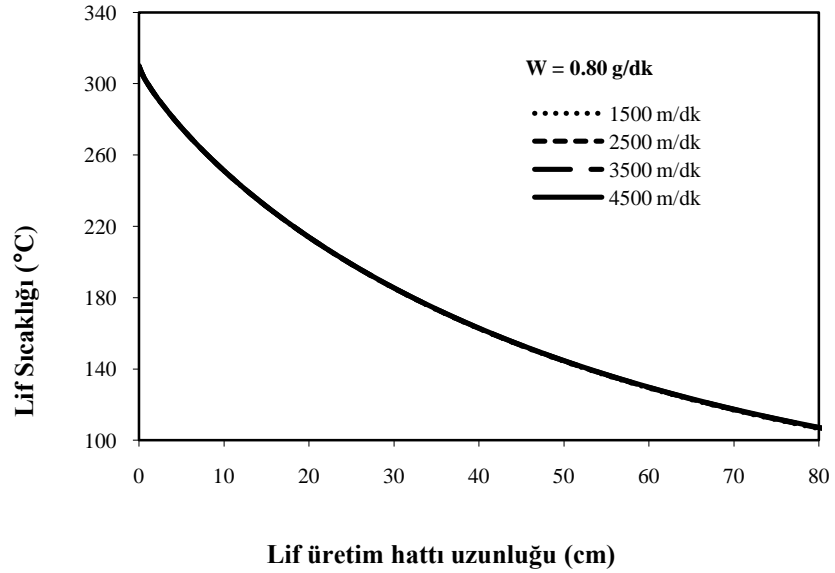
**Şekil 3.19:** Soğutma Havası Özelliklerinin Değişiminin Lif Sıcaklığına Etkileri a) Soğutma Havası Hızının Değişimi, b) Soğutma Havası Sıcaklığının Değişimi (Simülasyon Değerleri).



### 3.2.2. Kütle akış miktarı (0.8 g/dk) değişimi sonuçları



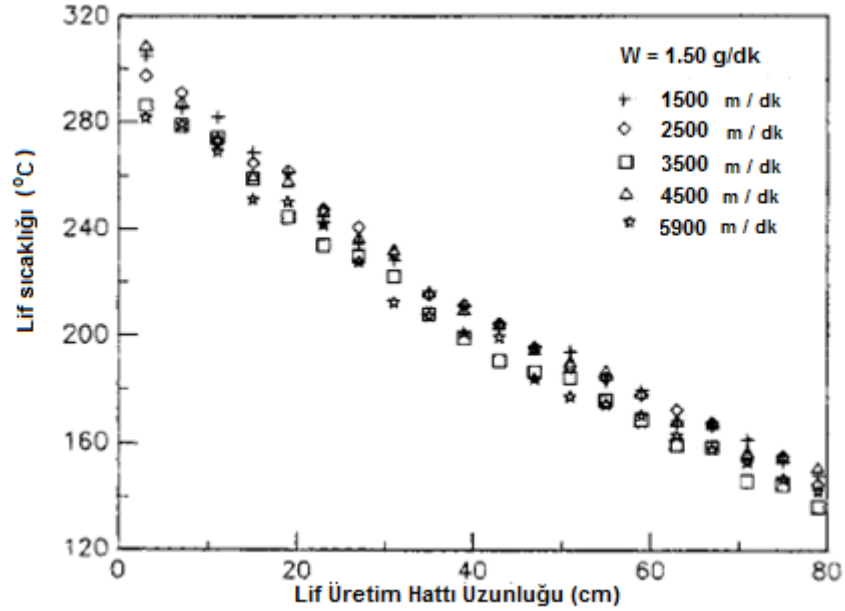
Şekil 3.20: Deneysel veriler (Bansal and Shambaugh 1998). Proses şartları Çizelge 2.2' de belirtilmektedir.



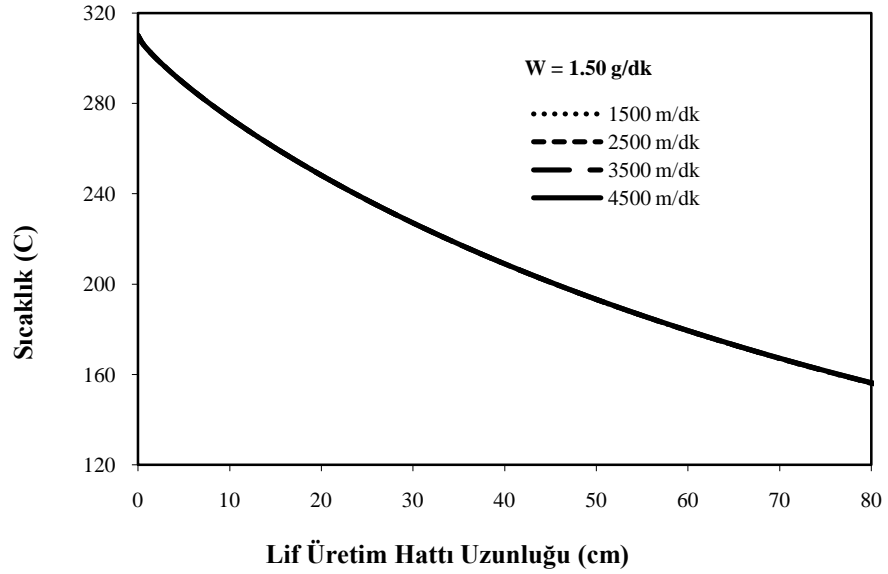
Şekil 3.21: Simülasyon Değerleri . Proses şartları Çizelge 2.3' de belirtilmektedir.

Şekil 3.20 ve 3.21' de, ortalama lif sıcaklık değişimi 0.8 g/dk kütle akış miktarı için, 1500m/dk-2500m/dk-3500m/dk-4500m/dk çekim hızlarında, lif üretim hattı uzunluğunun fonksiyonu olarak belirtilmektedir. Şekil 3.20 ve 3.21 sırasıyla Bansal and Shambaugh (1998) tarafından yapılan deneysel çalışma sonuçları ve bu deneye ait parametrelerle bilgisayar programında hazırlanan simülasyon değerleridir. Simülasyon grafiklerinde sıcaklık değişimi daha hızlıdır ve ulaşılan ulaşılan nihai sıcaklık daha düşüktür.

### 3.2.3. Kütle akış miktarı (1.5 g/dk) değişimi sonuçları



Şekil 3.22: Deneysel Veriler (Bansal and Shambaugh 1998). Proses şartları Çizelge 2.2' de belirtilmektedir.

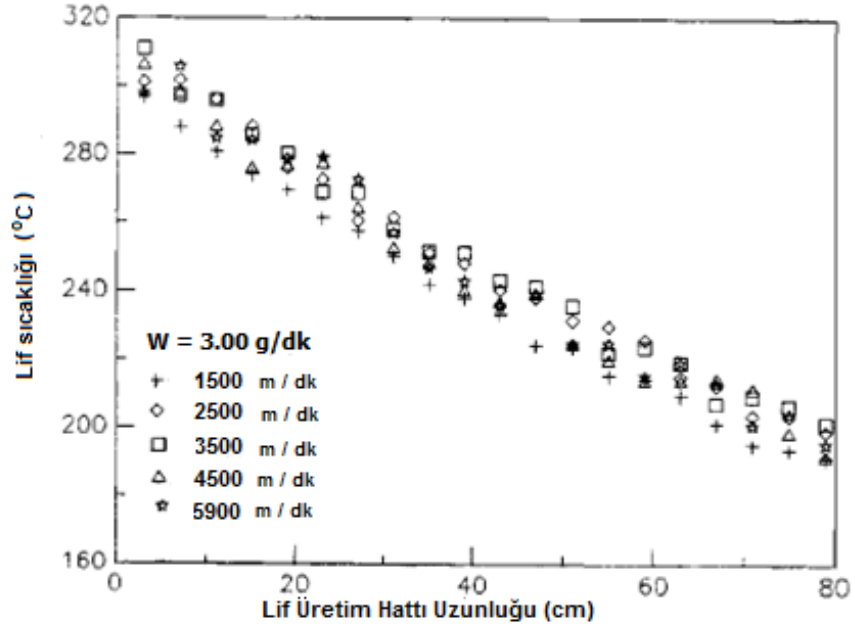


**Şekil 3.23:** Simülasyon Değerleri. Proses şartları Çizelge 2.3' de belirtilmektedir.

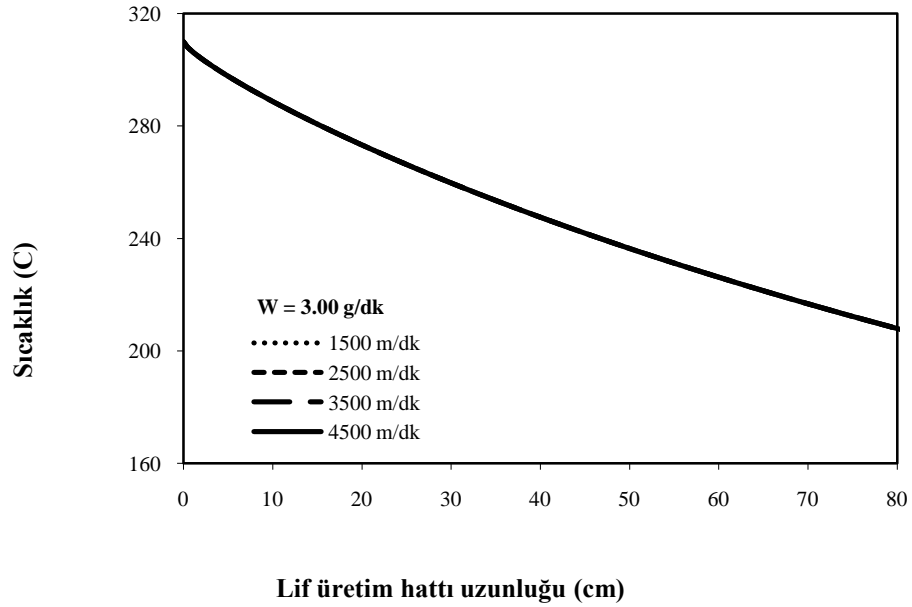
Şekil 3.22 ve 3.23' de, ortalama lif sıcaklık değişimi 1.50 g/dk kütle akış miktarı için, 1500m/dk-2500m/dk-3500m/dk-4500m/dk çekim hızlarında, lif üretim hattı uzunluğunun fonksiyonu olarak belirtilmektedir. Şekil 3.22 ve 3.23 sırasıyla Bansal and Shambaugh (1998) tarafından yapılan deneysel çalışma sonuçları ve bu deneye ait parametrelerle bilgisayar programında hazırlanan simülasyon değerleridir. Simülasyon grafiklerinde sıcaklık değişimi daha hızlıdır ve ulaşılan ulaşılan nihai sıcaklık daha düşüktür.

Şekil 3.22 ve 3.23' de ortalama lif sıcaklığı, aynı şekilde lif üretim hattı boyunca azalmaktadır ve çekim hızının farklı olması sıcaklık üzerinde etkili değildir. Kütle akış miktarının artmasıyla, soğumanın daha geç olduğu görülmektedir.

### 3.2.4. Kütle akış miktarı (3.0 g/dk) değişimi sonuçları



Şekil 3.24: Deneysel veriler (Bansal and Shambaugh 1998). Proses şartları Çizelge 2.2' de belirtilmektedir.



Şekil 3.25: Simülasyon Değerleri. Proses şartları Çizelge 2.3' de belirtilmektedir.

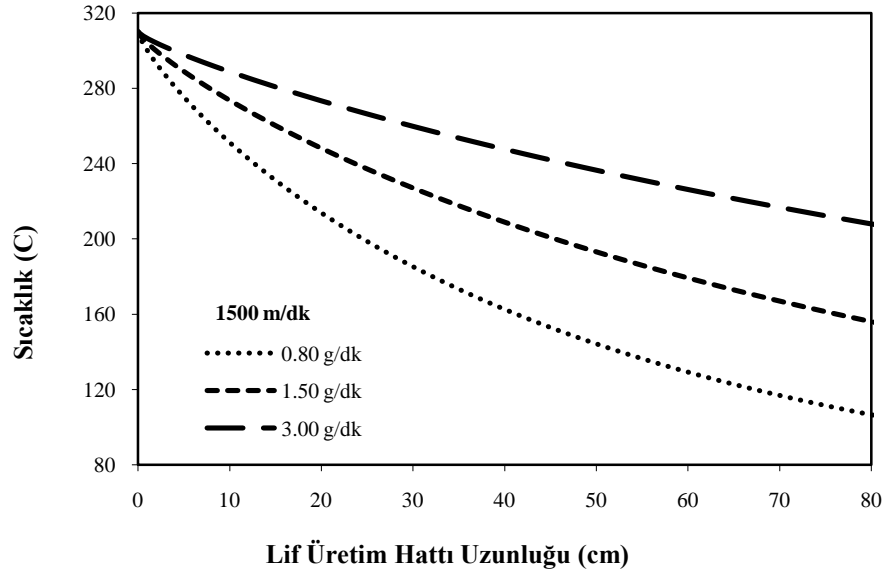
Şekil 3.24 ve 3.25' de, ortalama lif sıcaklık değişimi 3.00g/dk kütle akış miktarı için, 1500m/dk-2500m/dk-3500m/dk-4500m/dk çekim hızlarında, lif üretim hattı uzunluğunun fonksiyonu olarak belirtilmektedir. Şekil 3.24 ve 3.25 sırasıyla Bansal and Shambaugh (1998) tarafından yapılan deneysel çalışma sonuçları ve bu deneye ait parametrelerle bilgisayar programında hazırlanan simülasyon değerleridir. Simülasyon grafiklerinde sıcaklık değişimi daha hızlıdır ve ulaşılan ulaşılan nihai sıcaklık daha düşüktür.

Şekil 3.24 ve 3.25' de ortalama lif sıcaklığı, çekim hızının farklılığından etkilenmemektedir. Kütle akış miktarının artması lifin soğumasını daha da geciktirmektedir. Kalın lifler daha geç soğumaktadır.

Şekil 3.16, 3.20, 3.22, 3.24 deneysel veriler grafikleri ile 3.17, 3.21, 3.23, 3.25 simülasyon sonuçları grafikleri arasındaki fark, yani nihai lif sıcaklığının simülasyon değerlerinde daha düşük sonuçlanması, simülasyon değerlerinin, newtonian model kullanılarak hazırlanmasından kaynaklanmaktadır. Bu fark, enerji denkleminde radyasyon yoluyla ısı transferinin denklemde yer almamasıdır. Radyasyon, özellikle cam veya metallerin elde edildiği 1200 ° C ve daha yüksek sıcaklıklarda önemli olmaktadır. Lif üretim işlemlerinde ihmal edilmektedir (Beyreuther ve Brünig 2007). Ayrıca Tartışma bölümünde, Şekil 3.44' de Mitsoulis ve Beaulne (2000) tarafından, viskoelastik model ve deneysel çalışmalar arasındaki farkları açıklamak amacıyla hazırlanan çalışma, yaptığımız simülasyon sonuçları ve deneysel veriler arasındaki farkı da açıklamaktadır.

Ortalama lif sıcaklığı değişiminde, viskoelastik yapının belirgin bir etkisi yoktur. Bu nedenle, viskoelastik model veya Newtonian model olması, simülasyon sonuçları arasındaki fark oluşturmamaktadır. Viskoelastik polimerin mekanik davranışına bağımlı değişkenleri (hız, çap gibi) etkilidir.

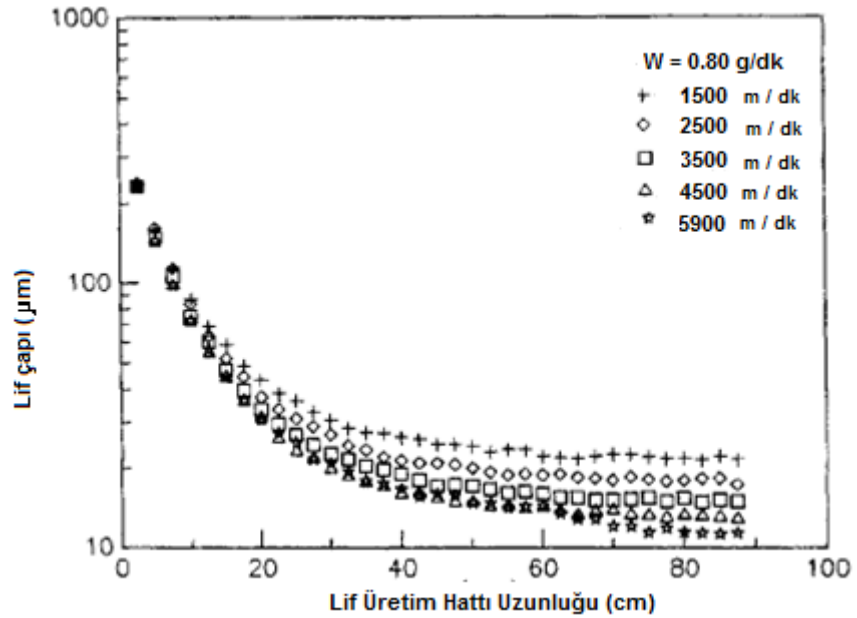
Aynı çekim hızında farklı kütle akış miktarının ortalama lif sıcaklığı üzerindeki etkisi Şekil 3.26' da daha net görülmektedir. Çekim hızı farkı, lif sıcaklığı değerinde etkili olmadığı için, kütle akış miktarının etkisi sadece 1500 m/dk çekim hızında gösterilmektedir.



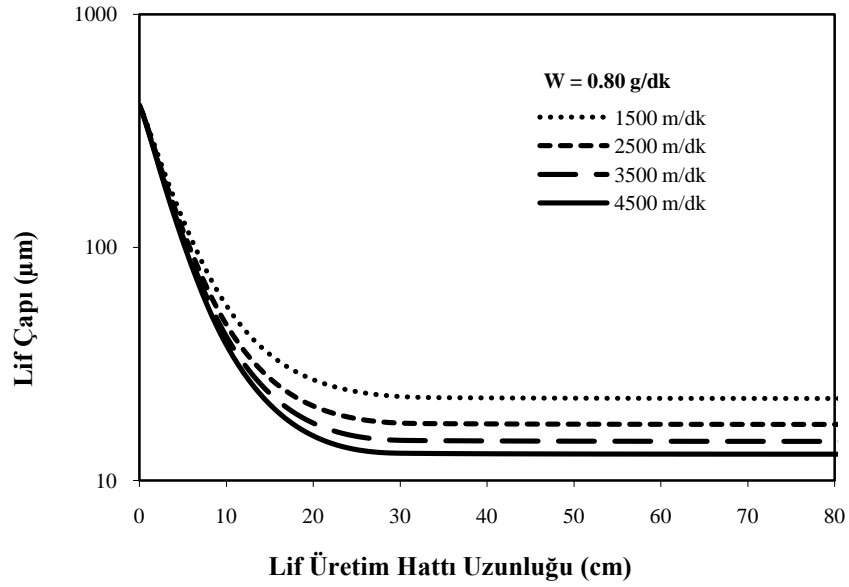
Şekil 3.26: 1500 m/dk Çekim Hızı İçin, Farklı Kütle Akış Oranlarında Ortalama Lif Sıcaklığı Değişimi (Simülasyon Değerleri).

### 3.3. Uzunluk-Lif Çapı Değişim Grafikleri

#### 3.3.1. Kütle akış miktarı (0.8 g/dk) değişimi sonuçları



Şekil 3.27: Deneysel Veriler (Bansal and Shambaugh 1998). Proses şartları Çizelge 2.2' de belirtilmektedir.

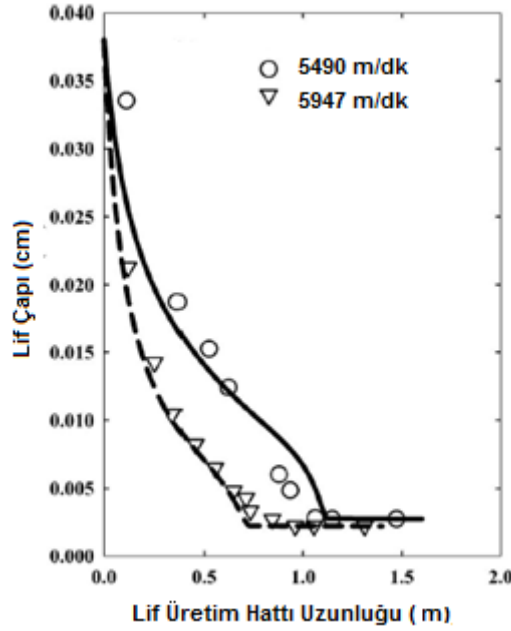


Şekil 3.28: Simülasyon Değerleri. Proses şartları Çizelge 2.3' de belirtilmektedir.

Şekil 3.27 ve 3.28' de, lif çapı değişimi 0.8 g/dk kütle akış miktarı için, 1500m/dk-2500m/dk-3500m/dk-4500m/dk çekim hızlarında, lif üretim hattı uzunluğunun fonksiyonu olarak belirtilmektedir. Şekil 3.27 ve 3.28 sırasıyla Bansal and Shambaugh (1998) tarafından yapılan deneysel çalışma sonuçları ve bu deneye ait parametrelerle bilgisayar programında hazırlanan simülasyon değerleridir. İki grafik arasındaki fark, simülasyon çalışmalarında lif çapı değişiminin daha hızlı olmasıdır. Lif üretim hattı uzunluğunun sonunda nihai çap değerleri aynı sonucu vermektedir.

Lif çapının değişimi çekim hızı ve kütle akış miktarına bağlı olarak doğrudan değişmektedir. Soğutma havası hızı, lif çapının sadece değişim eğrisine etki etmekte, ortalama değeri etkilememektedir (Ziabicki 1976).

Şekil 3.27 ve 3.28' de çekim hızının lif çapının doğrudan etkilediğini, hız değerlerinin artmasıyla daha ince lif çaplarına ulaşılabildiğini görmekteyiz.



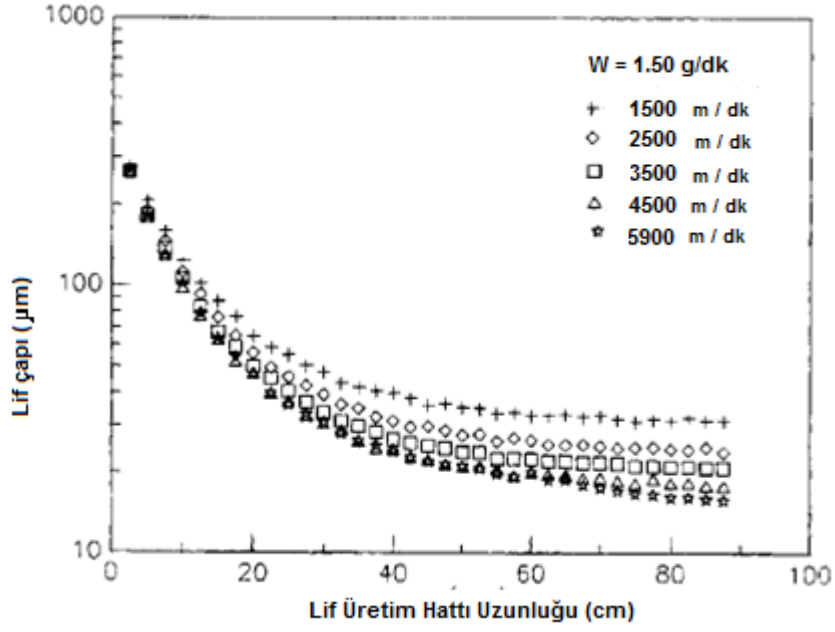
**Şekil 3.29:** Yüksek Çekim Hızlarında Yapılan Lif Üretim İşlemine Ait Lif Çapı Ölçümü Deneysel Verileri.

KAYNAK: VASSILATOS, G., B. H. KNOX, and H. R. E. FRANKFORT. 1985. Dynamics, Structure Deveoplment, and Fiber Properties in High-Speed Spinning of Polyethylene Terephthalate. In: A. Ziabicki and H. Kawai (editors), High-Speed Fiber Spinning, John Wiley & Sons Ltd, USA, p. 383-428.

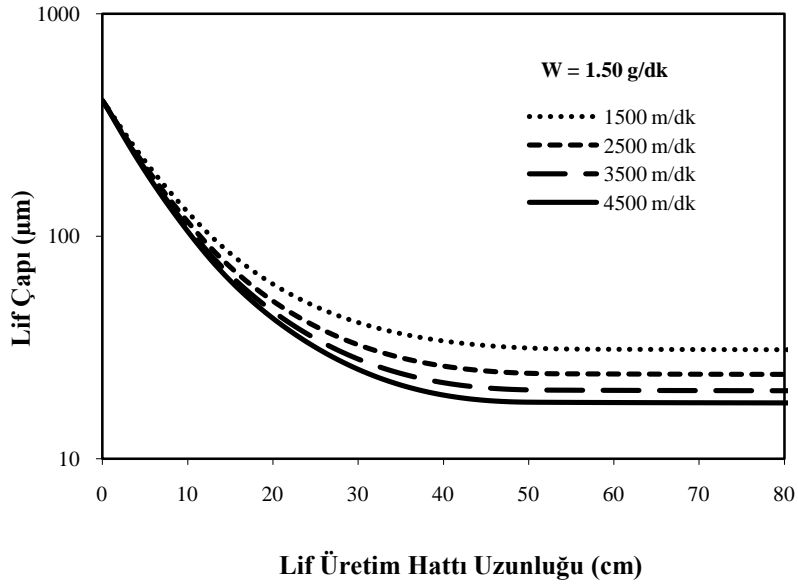
Lif çapı profili, lif üretim hattında katılma noktasından önceki ve sonraki durumda oldukça farklı olmaktadır. Kristalizasyon ani incelmelerin olduğu alana yakın kısımlarda oluşmaktadır (Perez 1985). Düşük çekim hızlarında (4000-4500m/dk' dan küçük hızlarda) kristalizasyon olmadığı için bu ani düşüş görülmemekle beraber, lif üretim hattı uzunluğu arttıkça (sıcaklığın azalmasına bağlı olarak) düzeye yakın uzunluklarda, lif çapı profilindeki değişimi şekil 3.27 ve 3.28' de görebiliriz. Yüksek çekim hızlarında, boyun verme olayının gelişiminden dolayı lif çapında keskin bir değişim görülebilmektedir. Şekil 3.29, yüksek hızlarda yapılan lif üretim işlemine ait deneysel verileri göstermektedir. Vassilatou (1985), tarafından yapılan bu çalışmada çekim hızları 5947 m/dk ve 5490 m/dk' dır. Kristalizasyon oluşumunun gerçekleştiği bu çalışmada, çaptaki ani değişim net olarak görülmektedir.



### 3.3.2. Kütle akış miktarı (1.5 g/dk) değişimi sonuçları



Şekil 3.30: Deneysel Veriler (Bansal and Shambaugh 1998). Proses şartları Çizelge 2.2' de belirtilmektedir.

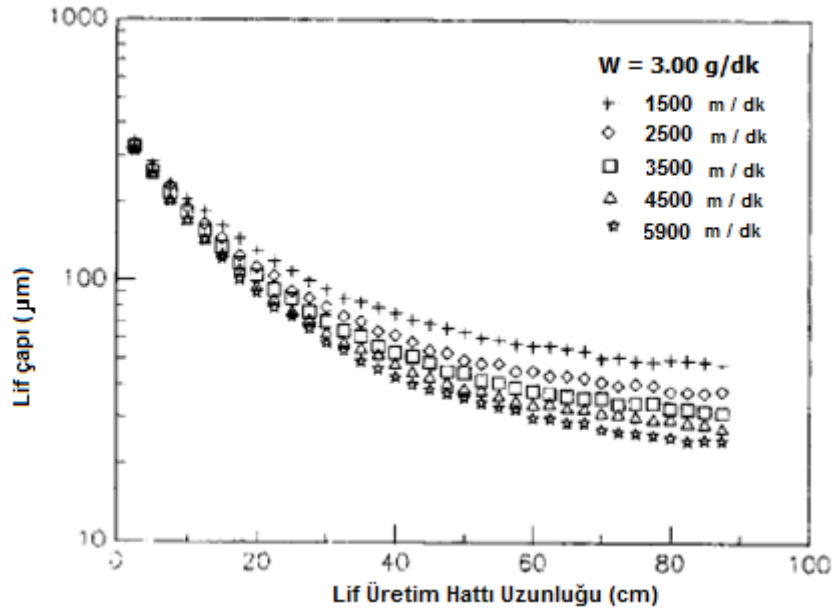


Şekil 3.31: Simülasyon Değerleri. Proses şartları Çizelge 2.3' de belirtilmektedir.

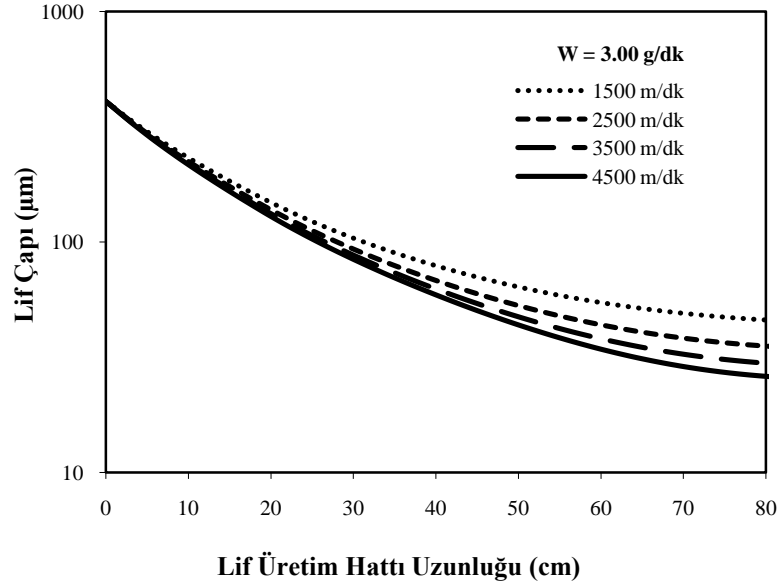
Şekil 3.30 ve 3.31' de, lif çapı değişimi 1.50 g/dk kütle akış miktarı için, 1500m/dk-2500m/dk-3500m/dk-4500m/dk çekim hızlarında, lif üretim hattı uzunluğunun fonksiyonu olarak belirtilmektedir. Şekil 3.30 ve 3.31 sırasıyla Bansal and Shambaugh (1998) tarafından yapılan deneysel çalışma sonuçları ve bu deneye ait parametrelerle bilgisayar programında hazırlanan simülasyon değerleridir. İki grafik arasındaki fark, simülasyon çalışmalarında lif çapı değişiminin daha hızlı olmasıdır. Lif üretim hattı uzunluğunun sonunda nihai çap değerleri aynı sonucu vermektedir.

Şekil 3.30 ve 3.31' de de çekim hızının lif çapını doğrudan etkilediğini, hız değerlerinin artmasıyla daha ince lif çaplarına ulaşılabildiğini görmekteyiz. Fakat bu inceleme, kütle akış miktarının artmasına bağlı olarak daha az olmakta, yani lif çapı aynı çekim hızı için yüksek kütle akış miktarında daha kalın olmaktadır. Şekil 3.34 aynı çekim hızında farklı kütle akış oranlarının lif çapına etkisini göstermektedir. Kütle akış miktarının etkisi bu grafiklerde daha net görülebilmektedir.

### 3.3.3. Kütle akış miktarı (3.0 g/dk) değişimi sonuçları



Şekil 3.32: Deneysel Veriler (Bansal and Shambaugh 1998). Proses şartları Çizelge 2.2' de belirtilmektedir.



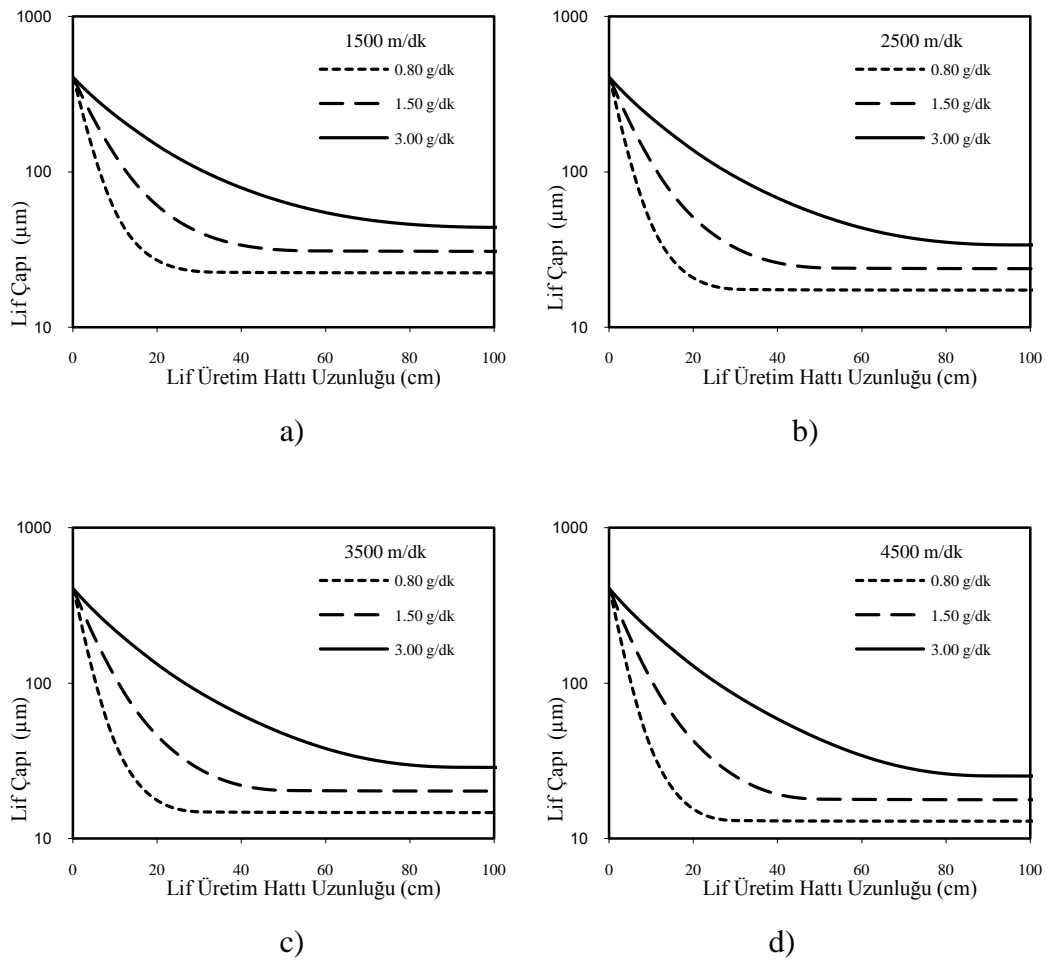
**Şekil 3.33:** Simülasyon Değerleri. Proses şartları Çizelge 2.3' de belirtilmektedir.

Şekil 3.32 ve 3.33' de, lif çapı değişimi 3.00 g/dk kütle akış miktarı için, 1500m/dk-2500m/dk-3500m/dk-4500m/dk çekim hızlarında, lif üretim hattı uzunluğunun fonksiyonu olarak belirtilmektedir. Şekil 3.32 ve 3.33 sırasıyla Bansal and Shambaugh (1998) tarafından yapılan deneysel çalışma sonuçları ve bu deneye ait parametrelerle bilgisayar programında hazırlanan simülasyon değerleridir. İki grafik arasındaki fark, simülasyon çalışmalarında lif çapı değişiminin daha hızlı olmasıdır. Lif üretim hattı uzunluğunun sonunda nihai çap değerleri aynı sonucu vermektedir.

Şekil 3.32 ve 3.33' de, çekim hızına bağlı olarak lif çapı değişmekte ve yüksek hızlarda daha ince olmaktadır. Bu çalışmada daha önceki daha düşük kütle akış miktarına sahip çalışmalara göre, lif çapı değişimi oldukça azalmış, sabit bir noktaya ulaşamamıştır.

Lif sıcaklığının, camlaşma sıcaklığından daha yüksek olduğu durumda yapının viskoz özelliği baskın olmakta ve sıcaklığın azalması ile viskoz deformasyon azalmaktadır. Diğer taraftan katılma sonrası, elastik deformasyon baskın olmaktadır (Shimizu ve ark. 1985). Bu sonuca, Şekil 3.27, 3.30, 3.32 deneysel veriler ile 3.28, 3.31 ve 3.33' simülasyon sonuçları arasındaki farklılıkla da ulaşabilmekteyiz. Lif çapının değeri, eğrilerin nihai lif üretim hattı

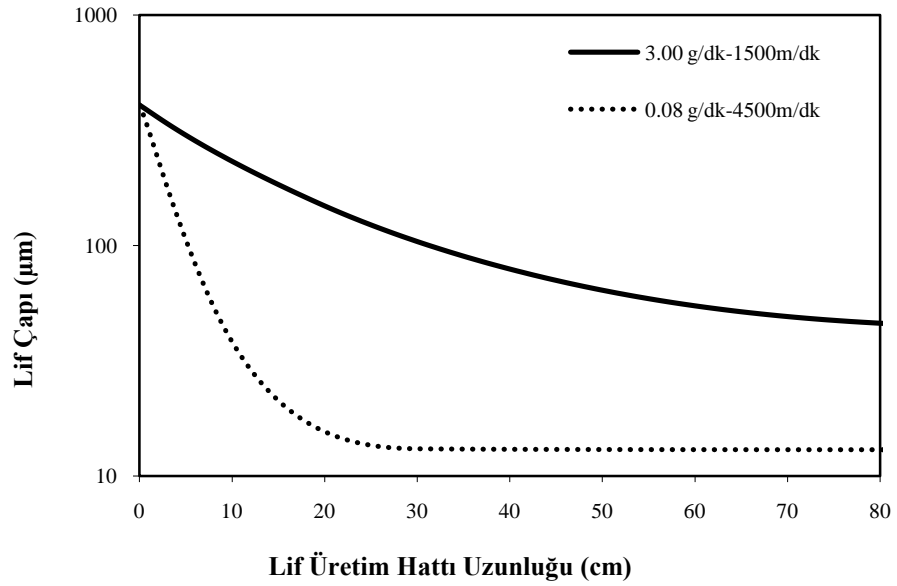
uzunluğuna ulaştığı noktada aynı olmakla beraber, deneysel çalışmalara ait Şekil 3.27, 3.30 ve 3.32 'deki eğrilerde sabit değere yaklaşma uzunluğunun daha buyk değerler olduğunu tespit edebiliriz. Bunun sebebi, bahsedildiği gibi polimerin gerçek davranışının viskoelastik olmasıdır. Viskoz yapı bu gecikmeye sebep olmaktadır. Ayrıca Tartışma bölümünde, Kim ve ark. (2009) tarafından viskoelastik ve newtonian yaklaşımın deneysel verilerle karşılaştırmasını yapmak amacıyla hazırlanan Şekil 3.45' de aynı sonucu bildirmektedir.



**Şekil 3.34:** Sabit ekim Hızında, Kötü Akış Oranı Değişiminin Lif apına Etkisi. a) 1500 m/dk ekim Hızı, b) 2500 m/dk ekim Hızı, c) 3500 m/dk ekim Hızı, d) 4500 m/dk ekim Hızı İçin, Farklı Kötü Akış Oranlarında Lif Hızı Değişimi(Simülasyon Değerleri).

Lif sıcaklığı düşüşünün kütle akış miktarının artmasıyla daha geç olması, viskoz yapının daha etkin olmasına sebep olmaktadır. Şekil 3.34’ de görüldüğü gibi lif çapının, yüksek kütle akış miktarında daha yüksek bir değerde kalması bu ifadeyi desteklemektedir. Deneysel çalışma ve simülasyon değerleri arasındaki fark, viskoz yapıdan kaynaklanmaktadır, ancak aradaki fark kütle akış miktarının artmasıyla, nispeten azalmıştır. Bunun sebebi kütle akış miktarının artmasıyla yapının viskoelastik etkisinin azalmaya başlamasıdır.

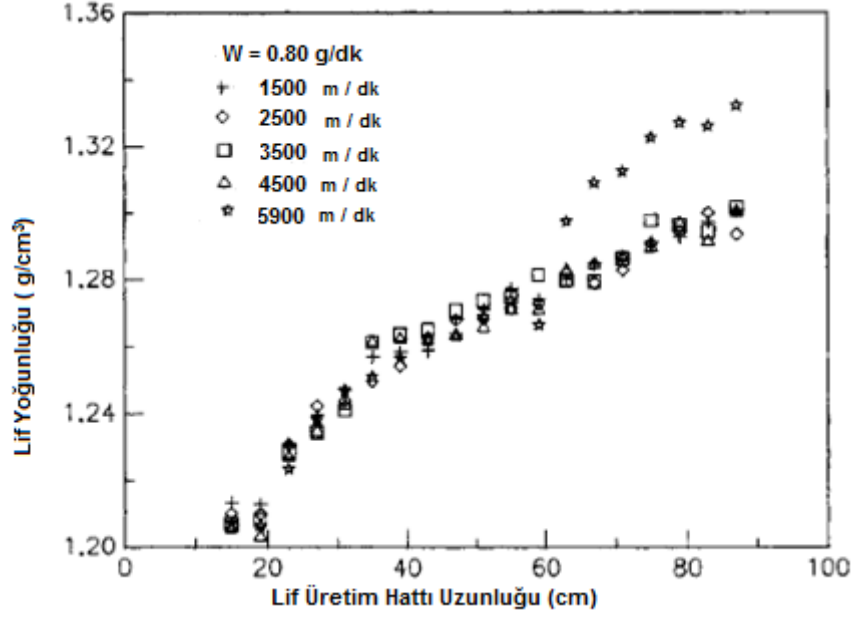
Lif çapına ait bu farklılıkları ele aldığımızda, yüksek çekim hızı ve düşük kütle oranı ile en düşük lif çapına ulaşacağımızı görmekteyiz. Bu çalışmalardaki en yüksek hız, en düşük kütle akış miktarı ve en düşük hız, en yüksek kütle akış miktarı arasındaki lif çapı değişim grafiği şekil 3.35’ te verilmektedir.



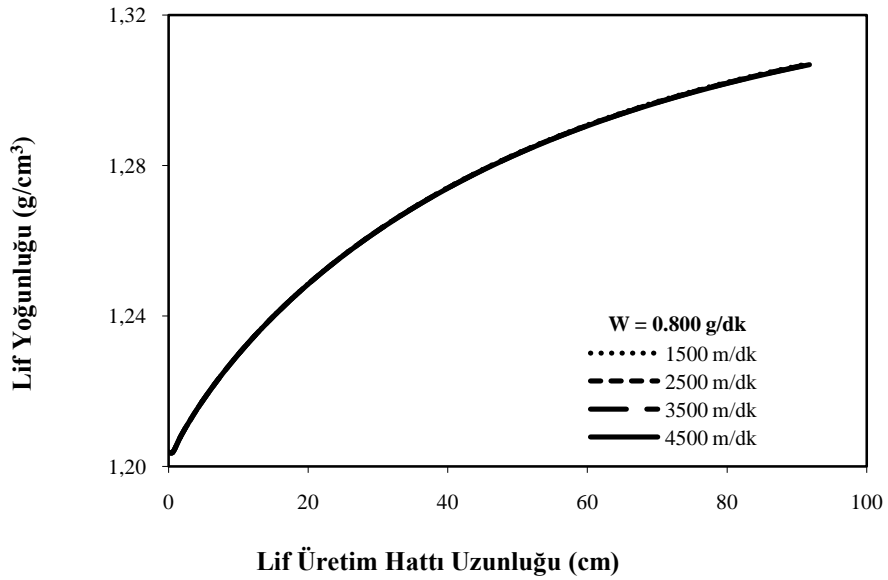
Şekil 3.35: Simülasyon değerleri. Proses şartları Çizelge 2.3’ de belirtilmektedir.

### 3.4. Uzunluk-Lif Yoğunluğu Değişim Grafikleri

#### 3.4.1. Çekim hızı ve kütle akış miktarı (0.8 g/dk) değişimi sonuçları



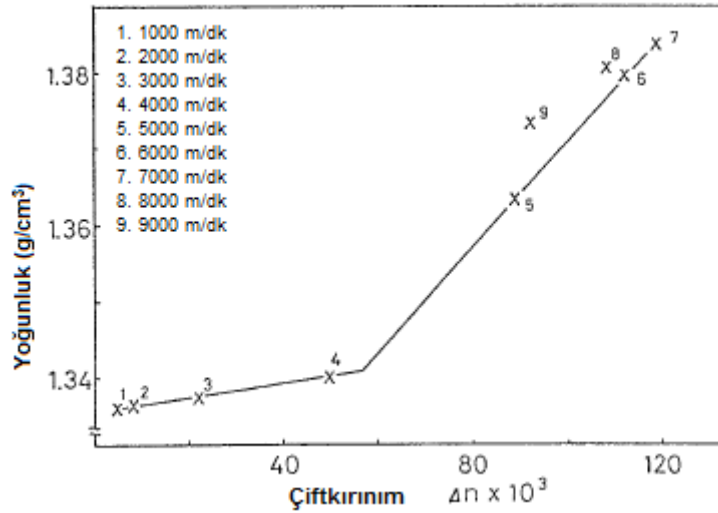
Şekil 3.36: Deneysel Veriler (Bansal and Shambaugh 1998). Proses şartları Çizelge 2.2' de belirtilmektedir.



Şekil 3.37: Simülasyon Değerleri. Proses şartları Çizelge 2.3' de belirtilmektedir.

Şekil 3.36 ve 3.37' de, lif yoğunluğu değişimi 0.08 g/dk kütle akış miktarı için, 1500m/dk-2500m/dk-3500m/dk-4500m/dk çekim hızlarında, lif üretim hattı uzunluğunun fonksiyonu olarak belirtilmektedir. Şekil 3.36 ve 3.37 sırasıyla Bansal and Shambaugh (1998) tarafından yapılan deneysel çalışma sonuçları ve bu deneye ait parametrelerle bilgisayar programında hazırlanan simülasyon değerleridir. Simülasyon çalışmalarında yoğunluk değişimi daha hızlı ve ulaşılan yoğunluk daha yüksektir.

Şekil 3.36 ve 3.37' de farklı çekim hızlarında çok az bir fark görülmektedir. Yüksek çekim hızlarında yoğunluk, özellikle kristalizasyonun oluşmasından dolayı artmaktadır. Yoğunluk, sıcaklık ve çekim hızına dolayısıyla kristaliniteye bağlıdır. (Beyreuther ve Brünig 2007). Ziabicki çalışmasında (1976), kristalizasyonun sağlanamadığı 4500 m/dk' dan daha düşük çekim hızlarında, üretimi yapılan tüm PET liflerinin hemen hemen tamamen amorf yapıda olduğunu bildirmektedir. Şekil 3.36 ve şekil3.37'de de kristalizasyon oluşmadığı için sadece sıcaklığa bağlı bir artış vardır.



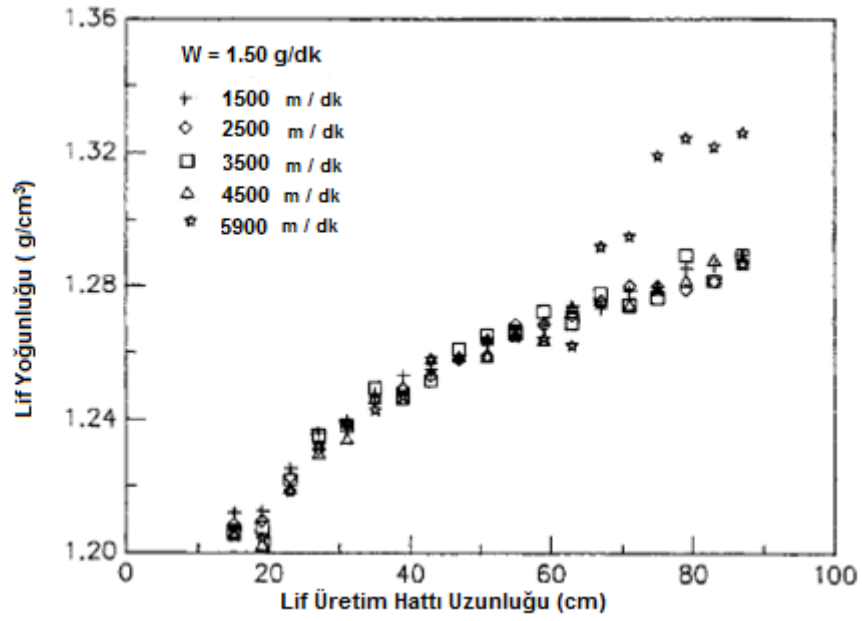
**Şekil 3.38:** Farklı Çekim Hızlarında, PET Lifinin Çiftkırınım Gelişimi.

KAYNAK: SHIMIZU, J., T. KIKUTANI. 2002. Dynamics and Evolution of Structure in Fiber Extrusion. Journal of Applied Polymer Science, 83:539-558.

Şekil 3.38, çift kırınım ve yoğunluğun çekim hızı artışına bağlı olarak artışı göstermektedir. Bu değerler aynı zamanda sırasıyla lifin moleküler oryantasyonu ve

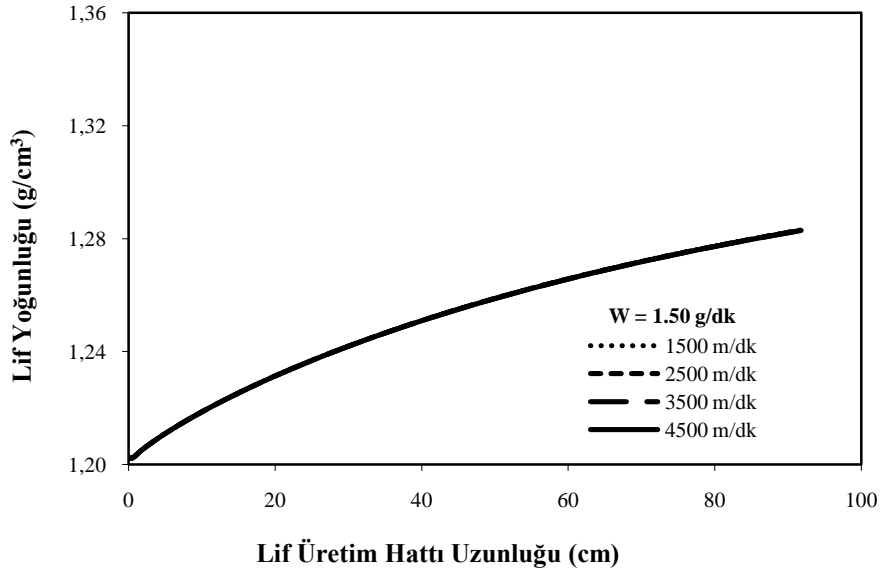
kristalinite derecesini de ifade etmektedir. Yoğunluk, 4000m/dk ile 5000m/dk arasında ani bir yükselme göstermekte, 7000m/dk' da maksimum değerine ulaşmaktadır (Shimizu ve Kikutani 2002). Bu da kristalizasyon için gerekli çekim hızının en az 4000-4500 m/dk olması gerektiğini göstermektedir.

### 3.4.2. Çekim hızı ve kütle akış miktarı (1.5 g/dk) değişimi sonuçları



Şekil 3.39: Deneysel Veriler (Bansal and Shambaugh 1998). Proses şartları Çizelge 2.2' de belirtilmektedir.



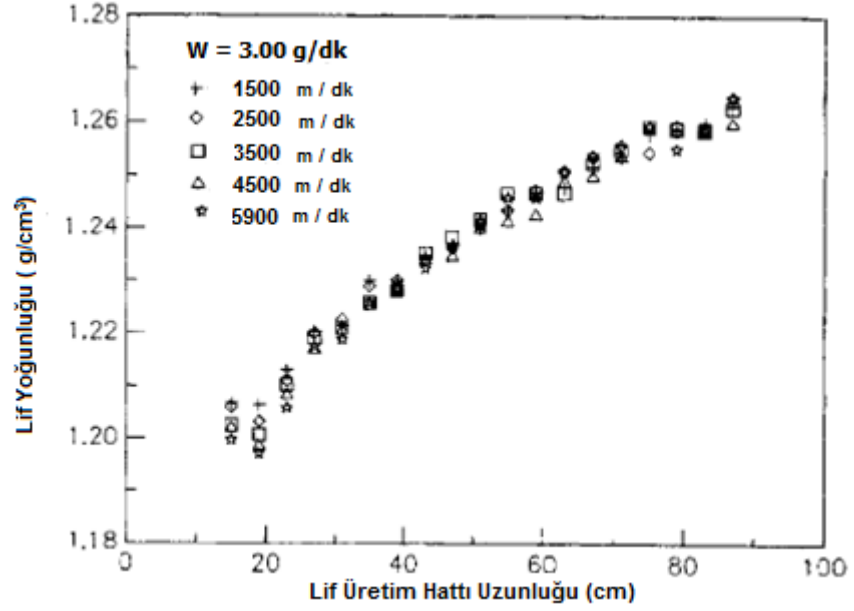


**Şekil 3.40:** Simülasyon Değerleri. Proses şartları Çizelge 2.3’ de belirtilmektedir.

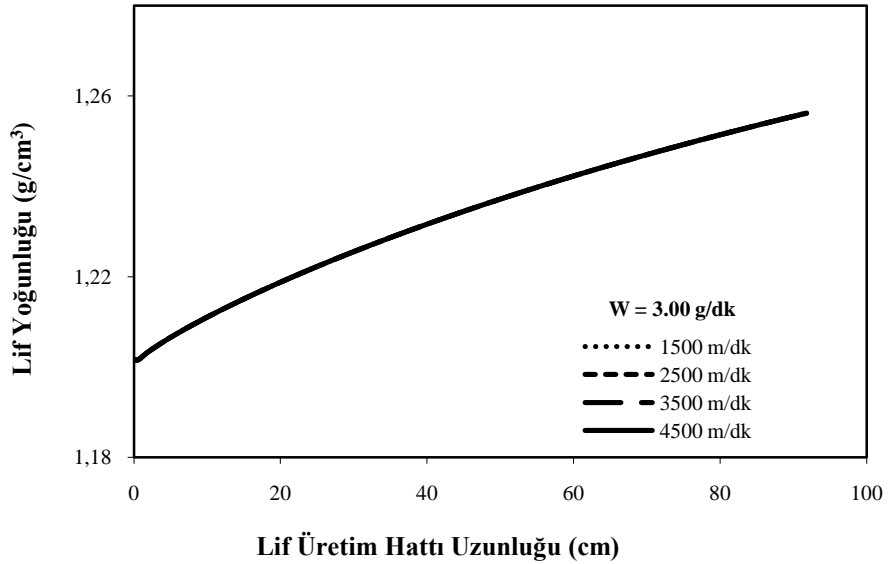
Şekil 3.39 ve 3.40’ de, lif yoğunluğu değişimi 1.50 g/dk kütle akış miktarı için, 1500m/dk-2500m/dk-3500m/dk-4500m/dk çekim hızlarında, lif üretim hattı uzunluğunun fonksiyonu olarak belirtilmektedir. Şekil 3.39 ve 3.40 sırasıyla Bansal and Shambaugh (1998) tarafından yapılan deneysel çalışma sonuçları ve bu deneye ait parametrelerle bilgisayar programında hazırlanan simülasyon değerleridir. Simülasyon çalışmalarında yoğunluk değişimi daha hızlı ve ulaşılan yoğunluk daha yüksektir.

Şekil 3.39 ve 3.40 incelendiğinde, aynı şekilde düşük çekim hızlarının yoğunluk değişimi üzerinde çok fazla bir etkisinin olmadığı görülmektedir. Kütle akış miktarının artması yoğunluğun daha yavaş yükselmesine ve düşük değerde olmasına sebep olmaktadır. Kütle akış miktarının etkisini Şekil 3.43’ te daha net görebilmekteyiz.

### 3.4.3. Çekim hızı ve kütle akış miktarı (3.0 g/dk) değişimi sonuçları



Şekil 3.41: Deneysel Veriler (Bansal and Shambaugh 1998). Proses şartları Çizelge 2.2' de belirtilmektedir.

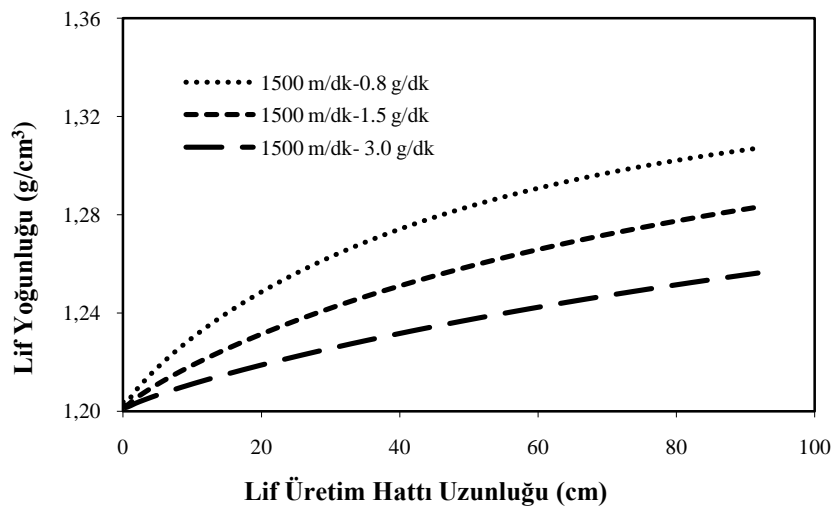


Şekil 3.42: Simülasyon Değerleri. Proses şartları Çizelge 2.3' de belirtilmektedir.

Şekil 3.41 ve 3.42’ de, lif yoğunluğu değişimi 3.00 g/dk kütle akış miktarı için, 1500m/dk-2500m/dk-3500m/dk-4500m/dk çekim hızlarında, lif üretim hattı uzunluğunun fonksiyonu olarak belirtilmektedir. Şekil 3.41 ve 3.42 sırasıyla Bansal and Shambaugh (1998) tarafından yapılan deneysel çalışma sonuçları ve bu deneye ait parametrelerle bilgisayar programında hazırlanan simülasyon değerleridir. Simülasyon çalışmalarında yoğunluk değişimi daha hızlı ve ulaşılan yoğunluk daha yüksektir.

Şekil 3.41 ve 3.42 incelendiğinde, kütle akış miktarı nihai yoğunluk değerinin  $1.26 \text{ g/cm}^3$  e kadar düşmesine sebep olmaktadır. Kütlenin (kalınlığın) artışı geç soğumaya sebep olmakta, sıcaklığın etkisiyle de yoğunluk değişimi az olmaktadır. Çekim hızının değişimde bir farklılık yoktur. Kristalizasyon oluşmadığı için ani yükselmeler görülmemektedir.

Şekil 3.37, 3.39, 3.41 deneysel veriler ve şekil 3.37, 3.40, 3.42 simülasyon çalışmaları arasındaki fark kristalizasyon gerçekleşmediği için sadece sıcaklığın etkisiyle oluşmaktadır. Sıcaklık grafiklerinde elde ettiğimiz sonuçlara paralel olarak, sıcaklığa bağlı yoğunluk simülasyona ait değerlerde daha yüksek değerlere ulaşmaktadır. Çünkü lif sıcaklığı simülasyon sonuçlarında daha düşük sıcaklıklarda sonuçlanmaktadır. Yine kristalizasyon oluşmadığı için çekim hızı etkili olmamakta, viskoelastik yapı yoğunluk farkının etkilememektedir.



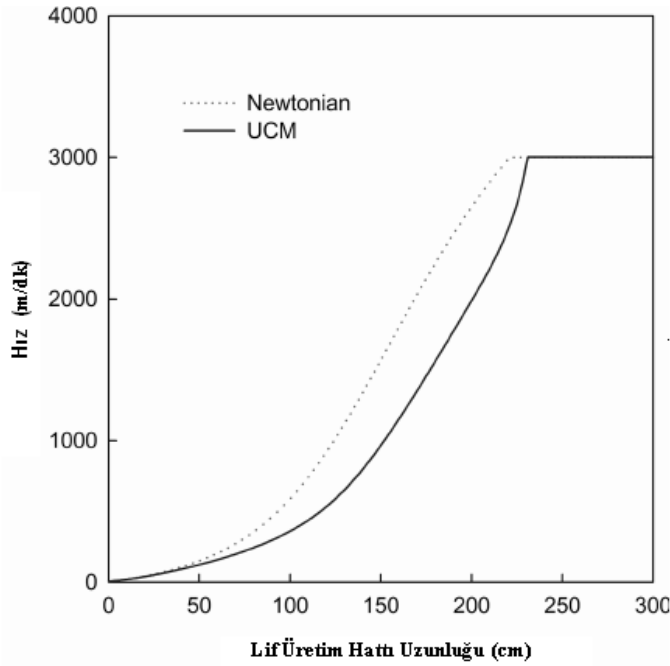
**Şekil 3.43:** 1500 m/dk Çekim Hızı İçin, Farklı Kütle Akış Oranlarında Lif Yoğunluğu Değişimi (Simülasyon Değerleri).

### 3.5. Tartışma ve Öneriler

#### 3.5.1. Tartışma

Bu sonuçlar birçok araştırmacı tarafından da değerlendirilmektedir (Mitsoulis ve Beaulne 2000, Kim ve ark. 2009 gibi). Yapılan çalışmalarla ilgili olarak, lif hızı, lif sıcaklığı ve lif çapı grafiklerinde oluşan farklılık, yapılan bu araştırmalarla da desteklenerek aşağıda anlatılmaktadır. Fakat lif yoğunluğu ile ilgili bir çalışma mevcut olmadığı için, lif yoğunluğu grafikleri ile ilgili bir çalışma aktarılamamaktadır.

##### 3.5.1.1. Uzunluk-hız değişim grafikleri



**Şekil 3.44:** 3000m/dk Çekim Hızında Newtonian Model ve Viskoelastik (UCM) Model Arasındaki Hız Profili Simülasyon Sonuçları Farkı.

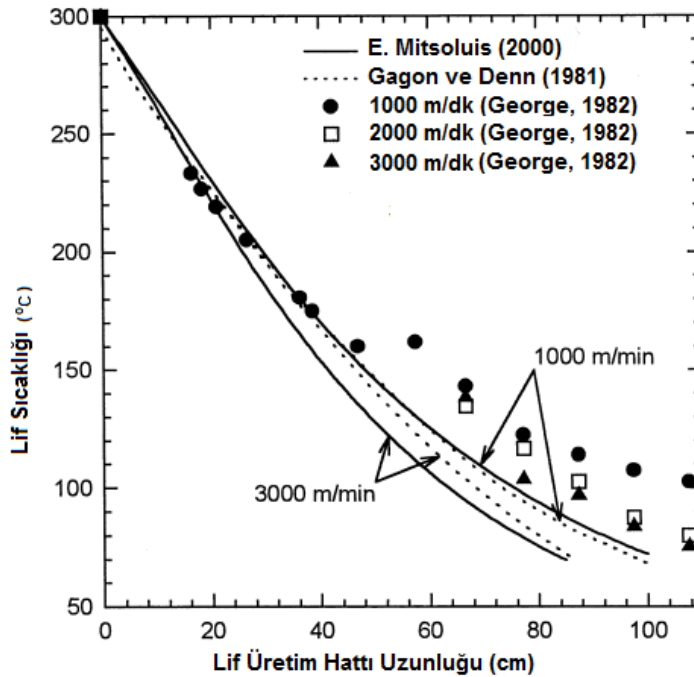
KAYNAK: KIM, S.C., T. H. OH, S. S. HAN and W. S. LYOO. 2009. Effect of Constitutive Equations on Theoretical Analysis in Melt Spinning Process. Korea-Australia Rheology Journal, 21(3): 149-153.

Şekil 3.44, Kim ve ark. (2009) tarafından viskoelastik (UCM) ve newtonian yaklaşımın deneysel verilerle karşılaştırmasını yapmak amacıyla hazırlanmıştır. Bu çalışmada

görüldüğü gibi, viskoelastik yaklaşım deneysel sonuçlara daha yakın bir eğilimdedir. Newtonian model eksponansiyel bir sonuç verirken, viskoelastik model elastik kuvvetlerin etkisini de hesaba kattığından dolayı boyun verme deformasyonunu bildirmektedir.

Newtonian ve viskoelastik model arasındaki fark newtonian modelde viskoz deformasyonun daha etkili olmasından kaynaklanmaktadır. Ayrıca Shimizu ve ark. (1985) tarafından yapılan simülasyon sonuçlarında göre, 4000m/dk'lık bir çekim hızı için yapılan simülasyonlarda, viskoelastik (UCM modeli) model, newtonian modele göre hız profilinde yaklaşık %30 fark oluşturmaktadır. Bu fark hız azaldıkça azalmaktadır (Zhang ve ark. 2001). Bu çalışmada yapılan simülasyon sonuçları bu bilgileri desteklemektedir.

### 3.5.1.2. Uzunluk-sıcaklık değişim grafikleri

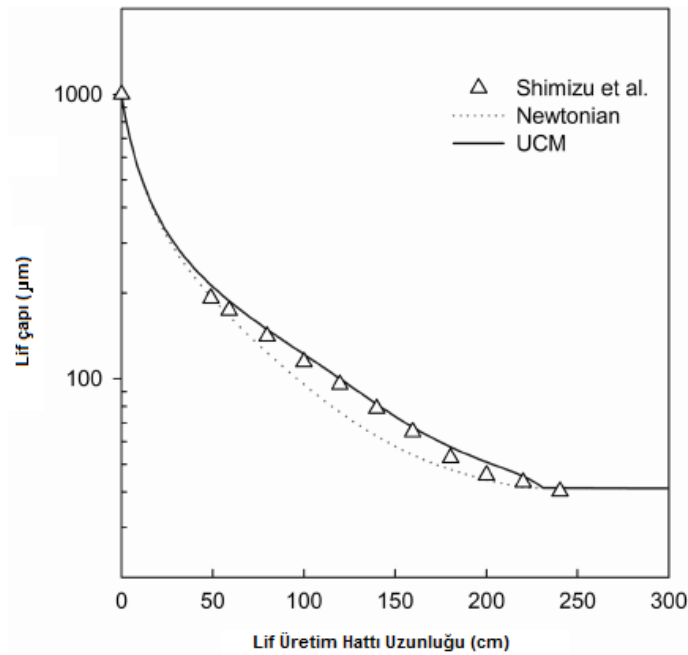


**Şekil 3.45:** Farklı Çekim Hızlarında K-BKZ Viskoelastik Model, PTT Model ve Deneysel Veriler Arasındaki Lif Sıcaklığı Profili Farkı.

KAYNAK: MITSOULIS, E. and V. M. BEAULNE. 2000. Numerical Simulation of Rheological Effects in Fiber Spinning. *Advances in Polymer Technology*, 19(3):155-172.

Şekil 3.44, Mitsoulis ve Beaulne (2000) tarafından, deneysel veriler ve viskoelastik model yaklaşımının sonuçlarını karşılaştırmak amacıyla hazırlanmıştır. Bu çalışmada simgeler Geroge (1982) tarafından hazırlanan deneysel verileri, düz çizgiler Mitsoulis ve Beaulne (2000) tarafından uygulanan K-BKZ (Kaye/Bernstein-Kearsley-Zapas) model sonuçlarını ve kesikli çizgiler ise Gagon ve Denn (1981) tarafından uygulanan PTT (Phan Thien/Tanner) model sonuçlarını göstermektedir. Çalışmada görüldüğü gibi, nihai lif sıcaklığı simülasyon değerlerinde daha düşük sonuçlanmakta ve soğuma daha çabuk gerçekleşmektedir. Aynı fark Newtonian model hazırlanarak elde edilen simülasyon sonuçlarında da görülmektedir. Bu fark, enerji denkleminde radyasyon yoluyla ısı transferinin denkleme yer almamasından kaynaklanmaktadır. Ortalama lif sıcaklığı değişiminde, viskoelastik yapının belirgin bir etkisi yoktur. Bu nedenle, viskoelastik model veya Newtonian model olması, simülasyon sonuçları arasında fark oluşturmamaktadır.

### 3.5.1.3. Uzunluk-lif çapı değişim grafikleri



**Şekil 3.46:** 3000m/dk Çekim Hızında Newtonian Model ve UCM Model Arasındaki Lif Çapı Profili Simülasyon Sonuçları Farkı.

KAYNAK: KIM, S.C., T. H. OH, S. S. HAN and W. S. LYOO. 2009. Effect of Constitutive Equations on Theoretical Analysis in Melt Spinning Process. Korea-Australia Rheology Journal, 21(3): 149-153.

Şekil 3.45, Kim ve ark. (2009) tarafından viskoelastik ve newtonian yaklaşımın deneysel verilerle karşılaştırmasını yapmak amacıyla hazırlanmıştır. Bu çalışmada simgeler Shimuzu (1985) tarafından hazırlanan deneysel verileri, düz çizgi UCM model sonuçlarını ve kesikli çizgi ise Newtonian model sonuçlarını göstermektedir. Bu çalışmada da görüldüğü gibi, viskoelastik yaklaşım deneysel sonuçlara daha yakın bir eğilimdedir, fakat nihai çap inceliğini ele aldığımızda her iki yaklaşımda aynı değere ulaşmaktadır. Newtonian model eksponansiyel bir sonuç verirken, viskoelastik model elastik kuvvetlerin etkisini de hesaba kattığından dolayı boyun verme deformasyonunu bildirmektedir. Burada da eğriler arasındaki fark, bu çalışmada yapılan simülasyon çalışmalarında elde edildiği gibi, değişimin gerçekte daha geç olmasıdır.

### 3.5.2. Öneriler

Yapılan çalışmada Newtonian yaklaşımı kullanılmıştır. Bu yaklaşım grafiklerde farklılıklar oluşturmakla beraber, proses analizinde belirleyici değişkenler hakkında yorum yapabilmek ve öngörülebilir bulunabilmek adına bilgiler sunmaktadır. Ancak, viskoelastik modellerle yapılan karşılaştırmalar, daha yakın sonuçlar verdiğini de göstermektedir. Bu nedenle aynı çalışma viskoelastik modeller kullanılarak yapılabilir.

Eriyikten lif üretiminde, yüksek hızlarda kristalizasyon görülmektedir. Bu çalışmada kullanılan en yüksek hız değeri 4500 m/dk' dır. Bu nedenle kristalizasyon mekanizması dahil edilmemiştir. Çalışma, özellikle yüksek hızlı lif üretim sistemlerinde de faydalı olacağından, kristalizasyon mekanizması dahil olacak şekilde yüksek hızlarda da simülasyon yapılabilir.

Polimerlerin viskoelastik davranışı viskozite ve zaman sabitine bağlıdır. Viskozite ve relaksasyon zamanı ölçümleri, simülasyon sonuçlarını etkilemektedir. Bu nedenle deneysel verilerle karşılaştırma yapılacağı zaman, deneylerin bizzat üretim şartlarına göre yapılması ve sınır şartlarının o andaki prosese göre belirlenmesi daha makul sonuçlar verebilir.

## SONUÇ

Elde edilen sonuçlardan da görüldüğü üzere, deneysel veriler ve simülasyon sonuçları doğrultusunda, eriyikten lif üretimi prosesinde lif yapısının belirlenmesinde etkili olan proses değişkenleri belirlenebilmekte ve bu değişkenlerin ne derece etkili olduğu görülebilmektedir. Uygulanan simülasyon, fabrika üretim şartlarında, özellikle lif hızı ve kütle akış miktarı optimizasyonun belirlenmesinde yaklaşık sınırları belirleyebilmektedir.

Bu sonuçlara göre, çekim hızı değişimi, özellikle iç yapının düzenlenmesinde dolayısıyla oryantasyon ve kristalizasyon oluşumunda ve lif çapının belirlenmesinde etkili iken, kütle akış miktarı lif sıcaklığı, lif yoğunluğu ve lif çapının belirlenmesinde etkilidir. Ayrıca yapılan karşılaştırmalar sonucunda, viskoelastik davranışın etkileri de çok net fark edilmektedir.

Yapılan çalışmada, elde edilen simülasyon sonuçları ile deneysel veriler karşılaştırıldığında, bazı farklılıklar olduğu tespit edilmektedir. Yapılan kabullerde en belirleyici özellik olan Newtonian varsayımdır. Bu varsayıma göre lifin gerçek davranışı olan viskoelastik davranışın elastik bileşeni ihmal edilmektedir ve hesaplamalar viskoz akış kurallarına göre yapılmaktadır. Bundan dolayı, özellikle lif hızı ve çapının karşılaştırılmasında farklılıklar olmuştur. Bu farklılıklar,

1. Lif hızı grafiklerinde, ulaşılan nihai hız aynı olmakla beraber, hazırlanan simülasyon çalışmalarında lif hızının, nihai hıza ulaşmasının daha çabuk olduğu,
2. Lif sıcaklığı grafiklerinde, hazırlanan simülasyon çalışmalarında sıcaklık değişiminin daha hızlı olduğu ve ulaşılan nihai sıcaklığın daha yüksek olduğu,
3. Lif çapı grafiklerinde, ulaşılan nihai çap aynı olmakla beraber, hazırlanan simülasyon çalışmalarında lif çapı değişiminin daha hızlı olduğu,
4. Lif yoğunluğu grafiklerinde, hazırlanan simülasyon çalışmalarında yoğunluk değişiminin daha hızlı olduğu ve ulaşılan yoğunluğun daha yüksek olduğu sonuçlarına ulaşılmaktadır.



**KAYNAKLAR**

ADANUR, S. 1995. Wellington Sears Handbook of Industrial Textiles. Technomic, USA, p. 59.

BANSAL, V. and R. L. SHAMBAUGH. 1998. On-line Density and Crystallinity of Polyethylene Terephthalate During Melt Spinning. *Polymer Engineering and Science*, 38(12):1959-1968.

BARNES, H.A. 2000. *A Handbook of Elementary Rheology*. Cambrian Printers, Aberystwyth, 200 p.

BEYREUTHER, R. and H. BRUNIG. 1997. High Filament Velocities in The Underpressure Spunbonding Nonwoven Process-Realized with The Help of a Fiber Spinning Model. *International Fibre Journal*, 12:129-134.

BEYREUTHER, R. and H. BRUNIG. 2007. *Dynamics of Fibre Formation and Processing Modelling and Application in Fibre and Textile Industry*. Springer, Leipzig, 347 p.

BOS, C. 1988. A Sublayer Description for The Air Friction Acting on Thin Filaments During Melt Spinning. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 31(1): 167-176.

CAO, J., T. KIKUTANI, A. TAKAKU and J. SHIMIZU. 1989. Nonisothermal Orientation-Induced Crystallization in Melt Spinning of Polypropylene. *Journal of Applied Polymer Science*. 37: 2683-2697.

CESARE, A. and F. FABRIZIO. 2004. *Reference Books of Textile Technology: Man-Made Fibres*. Acimit, Italy, 71 p.

DENTON, J. S., J. A. CUCULO and P. A. TUCKER. 1995. Computer Simulation of Highspeed Spinning of PET. *Journal of Applied Polymer Science*, 57: 939-951.

DOUFAS, A. K., A. J. MCHUGH and C. MILLER. 2000. Simulation of melt spinning including flow-induced crystallization Part I. Model development and predictions. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 92: 14-18.

DOUFAS, A. K., A. J. MCHUGH, C. MILLER and A. IMMANENI. 2000. Simulation of melt spinning including flow-induced crystallization Part II. Quantitative comparisons with industrial spinline data. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 92:81-103.

DOUFAS, A. K., and A. J. MCHUGH. 2001. Simulation of melt spinning including flow-induced crystallization Part III. Quantitative comparisons with PET spinline data. *Journal of Rheology*, 45(2): 403-420.

DUTTA, A. 1987. Melt Spinning of (Multifilament) Poly(Ethylene Terephthalate) Fibers: A Simulation Approach. *Polymer Engineering Science*, 27:1050-1058.

EAST, A. J. 2000. Polyester Fibres. In: J. E. McIntyre (Editor), *Synthetic Fibres: Nylon, Polyester, Acrylic, Polyolefin*, Woodhead Publishing Ltd, England, p. 95-166.

FISHER, R. J. and M. M. DENN. 1977. Mechanics of nonisothermal polymer melt spinning. *AIChE Journal*, 23: 23-28.

FULCHIRON, R., P. REVENU, B. S. KIM, C. CARROT and J. J. GUILLET. 1997. Extrudate Swell and Isothermal Melt Spinning Analysis of Linear Low Density Polyethylene Using The Wagner Constitutive Equation. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 69: 113-136.

FLUENT 6.3 Continuous Fiber Module Manual. 2006. Fluent Inc., Lebanon, 69 p.

GAGON, D. K. and M. M. DENN. 1981. Computer Simulation of Steady Polymer Melt Spinning. *Polymer Engineering Science*, 21:844-853.

GEORGE, H.H. 1982. Model of Steady-State Melt Spinning at Intermediate Take-Up Speeds. *Polymer Engineering and Science*, 22 (5):292-299.

HERMANS, P. H., P. PLATZEK. 1939. *Kolloid-Z*, 88:68-72.

<http://en.wikipedia.org/wiki/Birefringence>, Erişim Tarihi: 15.05.2009. Konu: Birefringence.

<http://en.wikipedia.org/wiki/Rheology>, Erişim Tarihi: 29.08.2009. Konu: Rheology.

ISHIHARA, H., S. HAYASHI and H. IKEUCHI. 1989. Computer Simulation of Multifilament Air Jet Spinning. *International Polymer Processing*, 7:91-95.

JAFFE, M. and A. J. EAST. 2007. Polyester Fibers. In: M. Lewin (Editor), *Handbook of Chemistry*, Taylor & Francis Group, USA, p.1-30.

JAMES, A. 1999. An Overview of Quench Cabinet Systems. *International Fiber Journal*, 101-103.

JEON, Y. J. and C. L. COX. 2008. Modeling of Multifilament PET Fiber Melt-Spinning. *Journal of Applied Polymer Science*, 110:2153-2163.

JEON, Y. J. and C. L. COX. 2009. Simulation of Multifilament Semicrystalline Polymer Fiber Melt-Spinning. *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, 4(1):34-43.

KARAGÖZ, İ. 2008. Sayısal Analiz ve Mühendislik Uygulamaları, Nobel Yayın, Ankara, s.1-9.

KASE, S. and T. MATSUO. 1965. Studies on Melt Spinning I. Fundamental Equations on the Dynamics of Melt Spinning Part A. Journal of Polymer Science, 3 : 2541-2554.

KASE, S. and T. MATSUO. 1967. Studies on Melt Spinning II. Steady-State and Transient Solutions of Fundamental Equations Compared with Experimental Results. Journal of Applied Polymer Science, 11: 251-287.

KASE, S. 1985. Mathematical Simulation of Melt Spinning Dynamics : Steady-State Conditions and Transient Behavior. In: A. Ziabicki and H. Kawai (editors), High-Speed Fiber Spinning, John Wiley & Sons Ltd, USA, p. 67-114.

KATAYAMA, K. and M. G. YOON. 1985. Polymer Crystallization in Melt Spinning: Mathematical Simulation. In: A. Ziabicki and H. Kawai (editors), High-Speed Fiber Spinning, John Wiley & Sons Ltd, USA, p. 207-225.

KIKUTANI, T., J. RADHAKRISKNAN, S. ARIKAWA, A. TAKAKU, N. OKUI, X. JIN, F. NIWA and Y. KUDO. 1996. High-Speed Melt Spinning of Bicomponent Fibers: Mechanisms of Fiber Structure Development in Poly(Ethylene Terephthalate)/Polypropylene System. Journal of Applied Polymer Science, 62:1913-1924.

KIM, S.C., T. H. OH, S. S. HAN and W. S. LYOO. 2009. Effect of Constitutive Equations on Theoretical Analysis in Melt Spinning Process. Korea-Australia Rheology Journal, 21(3): 149-153.

KOHLER, W. H. and A. J. MCHUGH. 2007. 2D Modeling of High-speed Fiber Spinning with Flow Enhanced Crystallization. Journal of Rheology, 51 (4): 721-733.

KOTHARI, V.K. 2000. Progress in Textiles: Science and Technology, Volume 2, Textile Fibers: Developments and Innovations, IAFL, India. p.37-154.

LIPSCOMB, G. G. 1994. The Melt Hollow Fiber Spinning Process: Steady-State Behavior, Sensitivity and Stability. Polymers for Advanced Technologies, 5:745-758.

MARK, H. F. and N. G. GAYLORD. 1968. Encyclopedia of Polymer Science ve Technology. John Wiley&Sons Inc, London, 13:747.

MATSUI, M. 1985. Fiber Formation Process in High-Speed Spinning of Polyethylene Terephthalate. In: A. Ziabicki and H. Kawai (editors), High-Speed Fiber Spinning, John Wiley & Sons Ltd, USA, p. 137-151.

MAXWELL, J. C. 1873. On Double Refraction in a Viscous Fluid in Motion. Proceedings of the Royal Society, 46-47.

MCHUGH, A. J., W. H. KOHLER and P. SHRIKHANDE. 2004. Modelling of Flow-Enhanced Crystallisation in Fibre Spinning. *Plastics, Rubbers and Composites*, 33(9/10):377-382.

MILITKY, J., J. VANICEK, J. KRYSTUFEK and V. HARTYCH. 1991. Modified Polyester Fibers. *Textile Science and Technology*, 10:42-45.

MITSOULIS, E. and V. M. BEAULNE. 2000. Numerical Simulation of Rheological Effects in Fiber Spinning. *Advances in Polymer Technology*, 19(3):155-172.

MOUSOGLOU, A. 1983. On The Cooling of Fibers. *Journal of Heat Transfer*, 105:830-834.

PARYS, V. M. 1998. PP Fiber Engineering: Latest Developments. *Chemical Fibers International*, 48 (4): 1434-1548.

PATEL, R. M. and J. E. SPRUIELL. 1991. Crystallization Kinetics During Polymer Processing-Analysis of Available Approaches for Process Modeling. *Polymer Engineering and Science*, 31(10):730-738.

PATEL, R. M., J. H. BHEDA and J. E. SPRUIELL. 1991. Dynamics and Structure Development During High-Speed Melt Spinning of Nylon 6 II. Mathematical modeling. *Journal of Applied Polymer Science*, 42:1671-1682.

PEREZ, G. 1985. Some Effects of the Rheological Properties of Polyethylene Terephthalate. In: A. Ziabicki and H. Kawai (editors), *High-Speed Fiber Spinning*, John Wiley & Sons Ltd, USA, p. 333-362

PİŞKİN, E. 1987. *Polimer Teknolojisine Giriş, İnkılap Kitabevi, İstanbul*, 195 s.

*Polyflow 3.10 User Guide*, 2008. Ansys Inc., U. S., p.11/1-52.

RAGHAVAN, J. S. and J. A. CUCULO. 1999. Analysis of Necking in High-Speed Spinning. *Journal of Polymer Science: Part B. Polymer Physics*, 37:1565-1573.

REESE, G. 2003. Polyester Fibers: Fiber Formation and End-use Applications. In: J. Scheirs and T. E. Long (Editors), *Modern Polyesters: Chemistry and Technology of Polyesters and Copolyesters*, John Wiley & Sons Ltd, England, p. 401-435.

RIANDE, E., R. D. CALLEJO, M. G. PROLONGO, R. M. MASEGOSA and C. SALOM. 2000. *Polymer Viscoelasticity Stress and Strain In Practice*, Marcel Dekker ,USA, 871 p.

SHENOY, A.V. and D. R. SAINI. 1996. *Thermoplastic Melt Rheology and Processing*, Marcel Dekker, USA, 472 p.

SHIMIZU, J., N. OKUI and K. TAMAI. 1983. Air Drag in High-Speed Spinning. *Sen-i Gakkaishi*, 39:398-407.

SHIMIZU, J., N. OKUI, and T. KIKUTANI. 1985. Simulation of Dynamics and Structure Formation in High-Speed Melt Spinning. In: A. Ziabicki and H. Kawai (editors), *High-Speed Fiber Spinning*, John Wiley & Sons Ltd, USA, p. 173-200.

SHIMIZU, J., T. KIKUTANI. 2002. Dynamics and Evolution of Structure in Fiber Extrusion. *Journal of Applied Polymer Science*, 83:539-558.

SPRUIELL, J. E. 2000. Structure Formation During Melt Spinning. In: D. R. Salem (Editor), *Structure Formation in Polymeric Fibers*, Hanser Gardner Publications, USA, p. 5-93.

STROBL, G. 2007. *The Physics of Polymers*. Springer, Leipzig, p.223-286.

TADMOR, Z. and C. G. GOGOS. 1979. *Principles of Polymer Processing*. Wiley, Newyork, 736 p.

TARAKÇIOĞLU, I. 1986. *Tekstil Terbiyesi ve Makinaları, Cilt III. Aracılar Matbaa, İzmir, s. 38-185.*

The Textile Institute Textile Terms And Definitions Committee. 1991. *Textile Terms ve Definition, 9.baskı, The Textile Institute, p.131.*

ÜN, H. 2007. *Malzeme Bilgisi, Reoloji. Pamukkale Üniversitesi, Denizli. 64 s.*

VASSILATOS, G., B. H. KNOX, and H. R. E. FRANKFORT. 1985. Dynamics, Structure Deveoplment, and Fiber Properties in High-Speed Spinning of Polyethylene Terephthalate. In: A. Ziabicki and H. Kawai (editors), *High-Speed Fiber Spinning*, John Wiley & Sons Ltd, USA, p. 383-428.

VLACHOPOULOS, J. and D. STRUTT. *The Role of Rheology in Polymer Extrusion. New Technologies for Extrusion Conference, Italy, 20-21 November 2003. 25 p.*

WEINBERGER, C. B. 1996. *Synthetic Fiber Manufacturing. Drexel University, Philadelphia, 43 p.*

WHITE, F. M. 1998. *Fluid Mechanics. Mcgraw-Hill College, England, 767 p.*

YASUDA, H., H. SUGIYAMA and S. HAYASHI. 1984. Applications of The Steady-state Multifilament Melt Spinning Theory. *Sen-i Gakkaishi*, 40:488-493.

ZHANG, C. X., H. P. WANG and C. SHENG. 2007. Poly (trimethylene terephthalate) Fiber Melt-Spinning: Material Parameters and Computer Simulation. *Fibers and Polymers*, 8(3):295-301.

ZIABICKI, A. and K. KEDZIERSKA. 1959. Studies on The Orientation Phenomena by Fiber Formation from Polymer Melts I. Preliminary Investigations on Polycapronamide. *Journal of Applied Polymer Science*, 2:14.

ZIABICKI, A. and K. KEDZIERSKA. 1960. Mechanical Aspects of Fibre Spinning Process in Molten Polymers Part II. Stream Broadening After The Exit from The Channel of The Spinneret. *Colloid & Polymer Science*, 171: 51.

ZIABICKI, A. 1961. Mechanical Aspects of Fibre Spinning Process in Molten Polymers Part III. Tensile Force and Stress. *Colloid & Polymer Science*, 175: 14.

ZIABICKI, A. 1976. *Fundamentals of Fibre Formation*. John Wiley & Sons Interscience, New York, 1976, 482 p.

ZIABICKI, A. and H. KAWAI. 1985. *High-speed Fiber Spinning Science and Engineering Aspects*. Wiley-Interscience, New York, 1985, p 3-485.

ZIABICKI, A. 1985. Fundamental Scientific Problems. In: A. Ziabicki and H. Kawai (editors), *High-Speed Fiber Spinning*, John Wiley & Sons Ltd, USA, p. 21-63.

ZIABICKI, A., L. JARECKI and A. WASIAK. 1998. Dynamic Modelling of Melt Spinning. *Computational and Theoretical Polymer Science*, 8 (1/2): 143-157.

ZIABICKI, A. 2001. Polymer Crystallization in Complex Conditions. Towards More Realistic Modelling of Industrial Processes. *Macromolecular Symposia*, 175:225-238.

ZIEMINSKI, F. and J. E. SPRUIELL. 1988. On-line Studies and Computer Simulation of The Melt Spinning of Nylon-66 Filaments. *Journal of Applied Polymer Science*, 35:2223-2245.

## ÖZGEÇMİŞ

22 Mayıs 1979'da Almanya'da dünyaya gelen Şengül TEKE, ilk, orta ve lise eğitimini Denizli'de tamamladı. 1997 yılında Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Tekstil Mühendisliği Bölümünde lisans eğitimine başladı. 2001 yılında, Tekstil Mühendisliği Anabilim dalından mezun oldu. 2002 Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tekstil Mühendisliği Anabilim Dalı'nda lisans üstü eğitimine başladı.

Şengül Teke, 2001'den 2005'e kadar SEBA Tekstil'de çeşitli kademelerde görev aldıktan sonra 2005 yılından itibaren AYPAŞ Tekstil'de İşletme Müdürü olarak görev aldı. Daha sonra doğum nedeniyle bu görevinden ayrılarak çalışma hayatına ara verdi.

## TEŞEKKÜR

İlk olarak, bu konuda çalışma fırsatı veren tez danıŐmanım sayın Doç. Dr. Şule ALTUN'a birlikte çalıŐtıĐımız sürece gösterdiği anlayıŐtan, sıkıntılı dönemlerde moral verici bir tutum sergilemesinden ve çalıŐmamda ince detayları görmemi sağlayan tavsiyelerinden dolayı teşekkür etmek istiyorum. Lisans eğitimim sonrasında, iÇ kariyerimi edinmemde ve yüksek lisans eğitimini tamamlamamda büyük desteği olan Sayın Prof. Dr. Yusuf ULCAY' a teşekkür ediyorum.

Özellikle Fluent programını öğrenmemde yardımcı olan ve tezi tamamlama sürecinde bana sonsuz sabır gösteren eŐim Mehmet TEKE' ye teşekkür ediyorum. Tez çalışmasında karŐılaŐtıĐım problemleri zmemde bana yardımcı olan Sayın Prof. Dr. İrfan KARAGÖZ'e teşekkür ediyorum.

Son olarak, bu günlere gelmemde hakkını ödeyemeyeceğim emeğe sahip olan aileme teşekkür ediyorum.