

155694

**PLASTİK ENJEKSİYON KALIPLARINDA ERGİMİŞ PLASTİK
AKIŞININ MATEMATİKSEL MODELLENMESİ VE DENEYSEL
OLARAK İNCELENMESİ**

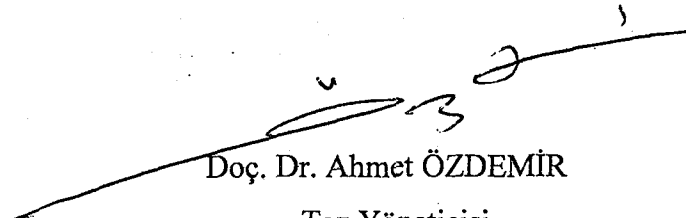
ABDULMECİT GÜLDAŞ

**DOKTORA TEZİ
(MAKİNA EĞİTİMİ)**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**Temmuz 2004
ANKARA**

Abdulgecit GÜLDAŞ tarafından hazırlanan PLASTİK ENJEKSİYON KALIPLARINDA ERGİMİŞ PLASTİK AKIŞININ MATEMATİKSEL MODELLENMESİ VE DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ adlı bu tezin Doktora Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.


Doç. Dr. Ahmet ÖZDEMİR

Tez Yöneticisi

Bu çalışma, jürimiz tarafından Makina Eğitimi Anabilim Dalı'nda DOKTORA tezi olarak kabul edilmiştir.

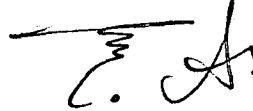
Başkan: : Prof. Dr. Duran ALTIPARMAK



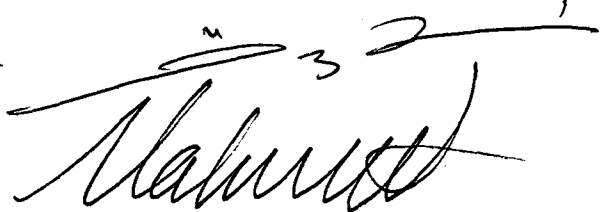
Üye : Prof. Dr. Halit KARABULUT



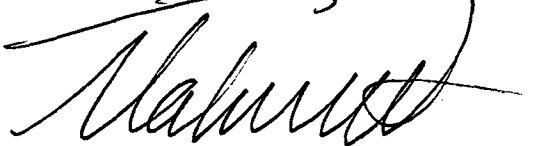
Üye : Doç. Dr. Ersan ASLAN



Üye : Doç. Dr. Ahmet ÖZDEMİR



Üye : Doç. Dr. Mahmut D. MAT



Bu tez, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygundur.



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	iii
TEŞEKKÜR.....	v
ÇİZELGELERİN LİSTESİ	vi
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	viii
EKLERİN LİSTESİ.....	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xv
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR TARAMASI.....	8
2.1. Hele - Shaw Metodu.....	11
2.2. Navier-Stokes Eşitlikler Kullanılarak Yapılan Analizler.....	32
2.3. Sonlu Elemanlar Kullanılarak Yapılan Analizler	39
2.4. Isıl Özellikler ve Kalıcı Gerilmeler.....	44
2.5. Gaz Destekli Enjeksiyonla Kalıplama Yöntemi.....	49
2.6. Elyaf Takviyeli Polimer Üretiminde, Kalıp Boşluğundaki Plastik Akışına Bağlı Olarak Elyaf Yönelimlerinin Tespiti	51
2.7. Yapay Zeka Yöntemleri Kullanılarak Enjeksiyon Parametrelerinin Tespit Edilmesi.....	52
2.8. Basınç-Hacim-Sıcaklık (PVT) İlişkisi ve Viskozite Modelleri.....	55
2.8.1. Plastiklerde basınç-hacim ve sıcaklık (PVT) ilişkisi.....	56
2.8.2. Viskozite modelleri.....	58
2.9. Enjeksiyon Parametreleri ve Soğutmaya Bağlı Olarak Gerçekleşen Enjeksiyon Hataları.....	60
2.10. Ergimiş Plastikğin Kalıp Boşluğundaki Akışının Deneysel Yollarla Gözlenmesi.....	61

2.11. Sonuç.....	63
3. ERGİMİŞ PLASTİK AKIŞINI YÖNETEN EŞİTLİKLER VE AYRIKLAŞTIRMA.....	69
3.1. Temel denklemler	69
3.2. Denklemlerin Boyutsuzlaştırılması	71
3.2.1. Süreklilik denkleminin boyutsuzlaştırılması	72
3.2.2. Momentum denklemlerinin boyutsuzlaştırılması	73
3.2.2.1. X doğrultusundaki momentum denkleminin boyutsuzlaştırılması.....	73
3.2.2.2. Y doğrultusundaki momentum denkleminin boyutsuzlaştırılması.....	74
3.2.3. Enerji denkleminin boyutsuzlaştırılması.....	75
3.3. Sınır Şartları.....	77
3.4. Sayısal Çözümleme.....	78
3.4.1. Sonlu Kontrol Hacmi Yöntemi.....	79
3.4.2. Sonlu Kontrol Hacmi Yöntemi İle Kısmi Diferansiyel Eşitliklerin Ayrıklaştırılması.....	80
3.4.3. Explicit yöntem.....	82
3.4.4. Tam Implicit yöntem.....	83
3.4.5. Crank Nicolson yöntemi.....	83
3.4.6. Sürekli, bir boyutlu konveksiyon ve difüzyon denkleminin ayrıklaştırılması.....	84
3.4.7. Upwind metodu.....	86
3.4.8. Plastik Akışını Yöneten Boyutsuz Denklemlerin Cebirsel Hale Getirilmesi.....	88
3.4.8.1. Süreklilik denklemi.....	89
3.4.8.2. Momentum Denklemleri.....	90

3.4.8.3. Enerji denklemi.....	94
3.4.9 $A(Pec)$ fonksiyonunun çözüm yöntemine göre değişimi.....	96
3.4.10 Geçici Akıslarda Basınç-Hız Çiftinin Çözüm Algoritması.....	97
3.4.11. Kaydırılmış ızgara sistemi.....	98
3.4.12. SIMPLE algoritması.....	99
3.4.13. SIMPLE algoritmasının işlem sırası.....	104
3.4.14. Van Leer Sayısal Yöntemi.....	106
3.5. Gaus-Jordan Eliminasyon Yöntemi.....	107
3.6. Katılık Oranının Tespiti.....	110
4. PLASTİKLERİN ÖZELLİKLERİ VE AKIŞDAVRANIŞLARI.....	111
4.1. Plastiklerin Mekanik Özellikleri ve Deformasyon Davranışı.....	111
4.2. Plastiklerin Akış Davranışı.....	113
4.3. Ergime Akış İndeksi Değerinin Belirlenmesi.....	119
4.3.1. Sıcaklığın viskozite üzerindeki etkisi.....	122
4.3.2. Basıncın viskozite üzerindeki etkisi.....	123
4.3.3. Kayma hızı ve kayma gerilmesinin viskozite üzerindeki etkisi	123
4.4. Akış Analizinde Kullanılan Teorik Viskozite Modelleri.....	124
4.4.1. Üs yasası modeli.....	125
4.4.2. Moldflow ikinci dereceden viskozite modeli.....	126
4.4.3. Carreau modeli.....	127
4.4.4. Cross modeli.....	128
4.4.5. Cross-WLF modeli.....	128
4.4.6. Düzeltilmiş Cross modeli.....	129
4.4.7. Moldflow matris veri modeli.....	129

4.4.8. Ellis modeli.....	130
4.5. Akış Analizinde Basınç-Hacim-Sıcaklık (PVT) ilişkisi.....	130
4.5.1.Basınç-hacim ve sıcaklık verilerinin kullanılması.....	130
4.5.1.1. Sabit basınçta sıcaklığın özgül hacim üzerindeki etkisi.....	131
4.5.1.2. Sabit sıcaklıkta basıncın özgül hacim üzerindeki etkisi.....	131
4.6. Tait Eşitliği İle Yoğunluk Hesabı.....	134
4.7. Kalıp Boşluğunun Ergiyik Plastik İle Dolması.....	135
5 MATERYAL VE METOD.....	137
5.1 Yüksek Yoğunluklu Polietilen Malzemesinin Ergiyik Akış İndeksi Cihazı İle Bazı Reolojik Özelliklerinin Belirlenmesi.....	138
5.2. EAİ Testinin Yapılışı.....	140
5.3. Ergimiş Plastiğin Kalıp Boşluğundaki Gerçek Akışının Deneysel Olarak Gözlenmesi İçin Deney Setinin Tasarımı ve Üretimi.....	143
5.3.1. Parça geometrisi.....	144
5.3.2. Kalıp tasarımı ve üretimi.....	145
5.3.3. Deneylerin Yapılışı.....	147
5.4. Video Kamera İle Görüntülerin Kaydedilmesi.....	148
6. DENEYSEL BULGULAR, SONUÇ VE TARTIŞMA.....	149
6.1. Ergiyik Akış İndeksi değerlerinin deneysel olarak belirlenmesi.....	150
6.2. Kayma Gerilmesi –Kayma Hızı Değişimi ve Akış Üssü Sabiti.....	156
6.3. Viskozitenin EAİ, Kayma Hızı, Basınç ve Sıcaklık İle Değişimi, Aktivasyon Enerjisi.....	158
6.4. Sayısal Çözümleme İle Elde Edilen Akış Analizleri.....	163
7. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	212
7.1. Sonuç.....	212

7.2. Öneriler.....	216
KAYNAKLAR.....	218
EKLER.....	238
ÖZGEÇMİŞ.....	266



**PLASTİK ENJEKSİYON KALIPLARINDA ERGİMİŞ PLASTİK AKIŞININ
MATEMATİKSEL MODELLENMESİ VE DENEYSEL OLARAK
İNCELENMESİ**

(Doktora Tezi)

Abdulmecit GÜLDAŞ

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

Temmuz 2004

ÖZET

Gerçekleştirilen bu çalışmada, ergimiş plastiğin kalıp boşluğundaki akış analizinin yapılabilmesi için, Navier Stokes denklemleri ile matematiksel modelleme yapılmıştır. Sonlu Kontrol Hacmi yöntemi ile yapılan ayırıklaştırmada, Tam Implicit ve Upwind yöntemleri kullanılmıştır. Basınç terimini hesaplanabilmesi için SIMPLE algoritması uygulanmıştır. Akış analizi için YYPE malzemesinin kullanıldığı çalışmada, reolojik özelliklerin belirlenebilmesi için Ergiyik Akış İndeksi cihazı ile deneysel inceleme yapılmıştır. Teorik olarak elde edilen simülasyon görüntülerinin, gerçek akış ile karşılaştırılabilmesi için bir tarafına cam plaka yerleştirilen kalıp seti tasarlanmış ve imalatı gerçekleştirilmiştir. Kalıp boşluğundaki ergimiş plastiğin gerçek akışı, dijital video kamera vasıtasıyla görüntülenmiştir. Ayrıca, Moldflow paket programlarıyla da aynı geometriye sahip kalıp boşluğun dolum analizi yapılmıştır. Teorik çalışma sonuçları ile deneysel olarak elde edilen gerçek akış görüntüleri ve Moldflow programlarının sonuçları karşılaştırılmıştır.

Bilim Kodu : 626.12.00

Anahtar Kelimeler : Enjeksiyonla kalıplama, Akış simülasyonu, Matematiksel modelleme, Navier Stokes eşitlikleri, Sonlu Kontrol Hacmi, Sayısal analiz, Ergiyik Akış İndeksi, Viskozite, Akış davranış (Üs yasası) sabiti

Sayfa Adedi : 266

Tez Yöneticisi : Doç. Dr. Ahmet ÖZDEMİR



MATHEMATICAL MODELLING AND EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE FLOW OF MOLTEN PLASTIC IN INJECTION MOLDING

(PhD Thesis)

Abdulmecit GÜLDAŞ

**GAZİ UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY**

July 2004

ABSTRACT

In this work accomplished, Navier-Stokes equations were used for analyzing the flow of molten plastic in the mold cavity. Differential equations were discretised using Finite Control Volume method. In discretisation process, Full Implicit and Upwind methods were used. Furthermore, SIMPLE algorithm was used for calculating pressure. In the study, for determining of rheological properties of HDPE material that was used for flow analyzing, an experimental study was performed using an apparatus of melt flow index. To compare the simulation images obtained theoretically with real flow, a mold that a glass plate was mounted on a side of which was designed and manufactured. Real flow of molten plastic in the cavity was monitored by digital video camera. In addition, filling analysis of the same mold cavity was performed by Moldflow package. Flow simulations obtained from numerical analysis were compared with real flow behaviors obtained from experimental study and results of the filling simulation analysis of the software were compatible each others.

Science Code : 626.12.00

Key Words : Injection molding, Flow simulation, Mathematical modelling, Navier Stokes equations, Finite Control Volume, Numerical analysis, Melt Flow Index, Viscosity, Flow Behavior (Power law) Index

Page Number : 266

Adviser : Assoc. Prof. Ahmet ÖZDEMİR



TEŞEKKÜR

Bu çalışmamda yardımlarını esirgemeyen danışmanım Sayın Doç. Dr. Ahmet ÖZDEMİR' e teşekkür ederim. Tecrübelerinden faydalandığım Prof. Dr. Duran Altıparmak ve Doç. Dr. Ersan ASLAN ve Yrd. Doç. Dr. Abdulkadir GÜLLÜ ve Prof. Dr. Mahmut GÜLESİN' e teşekkür ederim. Ayrıca, matematiksel modellemede ve sayısal analiz konusunda yardımlarını esirgemeyen Prof. Dr. Haşmet Türkoğlu, ve Niğde Ün. Müh. ve Mim Fak. Makine Müh. Bölümünden Doç. Dr. Mahmut D. MAT' a ve plastiklerin reolojik özelliklerinin belirlenmesinde yardımlarını esirgemeyen Prof. Dr. H. İbrahim ÜNAL beye teşekkürü borç bilirim. Deney cihazının yapımında ve tezin yazımında yardımlarını esirgemeyen Arş. Gör. Onuralp ULUER ve Yrd. Doç. Dr. Hakan DİLİPAK' a teşekkür ederim.

Ergimiş plastiğin kalıp boşluğundaki gerçek akışının gözlenmesi için yapılan deneysel çalışmalarda, gerek makine ve teçhizat ve gerekse manevi desteklerini esirgemeyen DAYM Teknik Müdür Yrd. Enver KESİKTAŞ ve Enjeksiyon Bölüm Şefi İ. Necdet SAYLAN' a ve emeği geçen tüm DAYM personeline teşekkür ederim. Ayrıca, çalışmalarım sırasında çeşitli vesilelerle yardıma bulunan diğer arkadaşlarıma teşekkürü bir borç bilirim.

Doktora çalışmasında 2002K120250 kodlu projeyi desteklediğinden dolayı Devlet Planlama Teşkilatı' na ve TEF.07/01-22 kodlu projeyi desteklediğinden dolayı da Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri' ne teşekkür ederim.

Doktora çalışmalarım sırasında, sabrıyla bana yardımcı olup sıkıntıları aşmamda her zaman yanımda olan ve desteğini esirgemeyen eşime ve aileme şükranlarımı sunarım.

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Düzeltilmiş Cross Model ve Tait eşitliğinde bulunan sabit sayılar.....	24
Çizelge 3.1. $A(Pec)$ fonksiyonunun çözüm yöntemine göre değişimi.....	96
Çizelge 4.1. YYPE ve DYPE malzemeleri için Tait değerleri.....	135
Çizelge 6.1 Farklı yükler altında elde edilen EAI - sıcaklık değişimi değerleri.....	151
Çizelge 6.2 YYPE malzemesi için, farklı sıcaklıklarda akış davranış üssü değerleri.....	157
Çizelge 6.3. Değişik basınç ve sıcaklıklar için görünür viskozite değerleri	160
Çizelge 6.4. Farklı basınçlar için, Aktivasyon Enerjisi ve A sabiti değerleri.....	162
Çizelge 6.5. YYPE (I-668) malzemesi için giriş şartları ve sayısal çözümleme için gerekli parametre değerleri.....	170
Çizelge 6.6. Teorik hesaplamada kullanılan değişik şartlardaki enjeksiyon parametreleri.....	170
Çizelge 6.7. I. grup enjeksiyon parametreleri ile yapılan analizde, akış alanı ve akış burnundaki sıcaklığın zaman göre dağılımı.....	174
Çizelge 6.8. I. grup enjeksiyon parametreleri ile yapılan analizde, akış alanı ve akış burnundaki hız değerinin zaman göre değişimi.....	178
Çizelge 6.9. II. grup enjeksiyon parametreleri ile yapılan analizde, akış alanı ve akış burnundaki sıcaklığın zaman göre dağılımı.....	184
Çizelge 6.10 Farklı enjeksiyon şartlarına göre yapılan analizlerde kalıp boşluğunun dolum süreleri.....	189
Çizelge 6.11 Enjeksiyon hızına göre kalıp boşluğunun dolum.....	189

Çizelge6.12.	Gerçek akış görüntülerinin el edildiği deneysel akış analizinde kullanılan değişik şartlar altındaki enjeksiyon parametreleri.....	191
Çizelge 6.13.	Moldflow ve C-Mold paket programları ile yapılan akış analizinde kullanılan enjeksiyon parametreleri.....	197



ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil		Sayfa
Şekil 2.1	Akış burnu oluşumu.....	14
Şekil 2.2	NASPLAN programı ile analizi yapılan numune, a) Giriş ve yolluk tayini, b) Sonlu Elemanlar için alt bölgelere ayrılmış geometri.....	18
Şekil 2.3	Geliştirilen programın genel akış diyagramı.....	20
Şekil 2.4	Çekme deney numunesi biçimindeki kalıp boşluğu ve giriş noktaları.....	24
Şekil 2.5	C geometrisindeki kalıp boşluğu ve giriş noktaları.....	24
Şekil 2.6	Subbiah ve arkadaşları tarafından analizi yapılan geometri ve kesiti a) 2h yüksekliğindeki kalıp boşluğunun kesiti ve hız profili, b) Çalışılan geometrik şekil.....	27
Şekil 2.7	Sayısal ızgara oluşturma tekniği ile ergimiş plastiğin kalıp boşluğunda zamana göre ilerlemesi.....	29
Şekil 2.8	İki boyutlu kontrol hacmi, a) Sonlu hacim yönteminde Power Law yaklaşımına göre kontrol hacmi ızgara sistemi, b) Dolaylı düzeltilmeli Upwind yöntemine göre yapılmış kontrol hacmi.....	34
Şekil 2.9	Reynolds sayısının 400 olduğu ve sabit vorticity' de oluşan akım çizgileri	38
Şekil 2.10	Viskoz ısı üretiminin dikkate alındığı kontrol hacminde, plastiğin kalıp boşluğunu doldurması ve sıcaklık değişimi.....	41
Şekil 2.11	a) Optimizasyon öncesi boşluk içindeki basınç dağılımları, b) Optimizasyon sonrası boşluk içindeki basınç dağılımları.....	42
Şekil 2.12	Dikdörtgen şekilli kalıp boşluğunun dolum tipi, a) Dengesiz dolum tipi, b) Akış yönlendiricilerin uygulanması, c) Optimizasyon ve akış yönlendiricilerin uygulanması sonrası dengeli dolum tipi.....	43
Şekil 2.13	Kalıp içerisindeki sıcaklığın kalıp uzunluğuna göre değişimi, a) Sıcaklığın değişik ısıl iletkenlik katsayısına göre değişimi, b) Sıcaklığın değişik ısı transferi katsayısına göre değişimi.....	46

Şekil 2.14	Kaynak hattı oluşumu ve kaynak hattındaki hatalar.....	48
Şekil 2.15	Gaz destekli enjeksiyonla kalıplama yönteminde gazın ergimiş plastik içerisindeki ilerlemesi.....	49
Şekil 2.16	Ergimiş plastiğin içerisine gaz girişinin altı farklı zaman aralığındaki değişimi.....	50
Şekil 2.17	Elyafların kalıp içerisindeki plastiğin akış doğrultusunda yönelimleri a) zamana bağlı olarak akışkanın ilerlemesi, b) Akış tipine bağlı olarak gerçekleşen elyaf yönelimleri.....	51
Şekil 2.18	İki farklı geometrideki akış izleri ile, teorik olarak elde edilen elyaf yönelimleri.....	53
Şekil 2.19	Optimum enjeksiyon parametrelerinin belirlenmesinde, deneysel tasarım yaklaşımı modelinin işlem sırası.....	54
Şekil 2.20	Basınç-Özgül hacim-Sıcaklık (PVT) ilişkisi.....	57
Şekil 2.21	Viskozitenin farklı sıcaklıklar altında kayma hızı ile.....	59
Şekil 2.22	Viskozitenin basınç karşısındaki değişimi.....	61
Şekil 2.23	Video kamera kullanılarak kalıp boşluğundaki akışın gözlenmesi.....	63
Şekil 3.1	Sayısal olarak akış analizi yapılacak çözüm bölgesi.....	78
Şekil 3.2	Diferansiyel denklemin integre edileceği kontrol hacmi	79
Şekil 3.3	Geçici, bir boyutlu ısı denkleminin integre edildiği bir boyutlu kontrol hacmi.....	80
Şekil 3.4	Sıcaklık profilleri, a) Parçalı doğrusal profil, b) Basamak profil..	81
Şekil 3.5	Bir boyutlu konveksiyon ve difüzyon denkleminin integre edildiği bir boyutlu kontrol hacmi.....	84
Şekil 3.6	Akışkanın batıdan doğuya doğru aktığı bir boyutlu kontrol hacmi.....	86
Şekil 3.7	Akışkanın doğudan batıya doğru aktığı bir boyutlu kontrol hacmi.....	87
Şekil 3.8	Süreklilik denkleminin integre edildiği kontrol hacmi.....	89

Şekil 3.9	X doğrultusundaki momentum denkleminin kaydırılmış ızgara sistemine göre integre edildiği U -kontrol hacmi.....	91
Şekil 3.10	Y doğrultusundaki momentum denkleminin kaydırılmış ızgara sistemine göre integre edildiği V -kontrol hacmi.....	93
Şekil 3.11	Enerji denkleminin kaydırılmış ızgara sistemine göre integre edildiği kontrol hacmi.....	95
Şekil 3.12	İndis notasyonuna göre kontrol hacmi ve geri kaydırılmış ızgara sistemi.....	99
Şekil 3.13	Phoneics programında uygulanan akış şeması.....	105
Şekil 4.1	Malzemelerin uygulanan yükler karşısındaki davranışı a) Katıların deformasyonu, b) Sıvıların.....	112
Şekil 4.2	Plastikler için tipik gerilim-uzama grafiği.....	113
Şekil 4.3	Kararlı basit kayma akışı.....	114
Şekil 4.4	Kayma gerilimi-kayma hızı grafiği.....	115
Şekil 4.5	Ergimiş plastiğin kalıp boşluğundaki akışı. a) Kalıp boşluğunun dolumu sırasındaki kayma akışı b) Kalıp boşluğu içindeki uzama akışı, c) Kalıp boşluğunun dolumu sırasındaki kayma hızı dağılımı.....	117
Şekil 4.6	Basınç değişimi ile ergimiş plastiğin hızı arasındaki ilişki.....	117
Şekil 4.7	Dağıtıcı sistem ve basınç dağılımı.....	118
Şekil 4.8	Kalıp boşluğundaki basınç değişimi. a) Basınç dağılımı incelenen örnek parça, b) Basınç dağılımının zamana göre değişimi.....	119
Şekil 4.9	Görünür viskozite grafiği.....	121
Şekil 4.10	Basınç-Özgül hacim-Sıcaklık (PVT) ilişkisi.....	130
Şekil 4.11	Yarı kristalin polipropilen ve polistiren' e ait PVT diyagramı.....	132
Şekil 4.12	Dolum safhasında ergiyeğin ilerlemesi ve katılaştıran katman.....	135
Şekil 4.13	Dolum ve ütüleme safhaları sonrası kalıp boşluğu.....	136
Şekil 5.1	ASTM D1238 ve TSE 1323 standardına göre yapılan EAİ testi şematik resmi.....	139

Şekil 5.2	Bilgisayar kontrollü EAI deney cihazı.....	141
Şekil 5.3	Nexygen Davenport yazılımı ile yapılan EAI deneylerinde, yazılım ekran görüntüsü.....	143
Şekil 5.4	Parça geometrisi ve boyutları.....	145
Şekil 5.5	Deney düzeneğinin şematik görünüşü.....	146
Şekil 5.6	Deneyde kullanılmak üzere imal edilen plastik enjeksiyon kalıbı	147
Şekil 6.1	Kayma gerilmesi-kayma hızı grafiği ($T=220\text{ }^{\circ}\text{C}$).....	154
Şekil 6.2	1,2-5 kg yükler için, ergiyik akış indeksi-görünür viskozite grafiği.....	159
Şekil 6.3	7,16-12,16 kg yükler için, ergiyik akış indeksi-görünür viskozite grafiği.....	159
Şekil 6.4	1,2-5 kg arası yükler için, $\ln$ Görünür Viskozite – $(1/T)$ grafiği.	162
Şekil 6.5	7,16-12,16 kg arası yükler için, $\ln$ Görünür Viskozite – $(1/T)$ grafiği.....	162
Şekil 6.6	I. Grup enjeksiyon parametreleri için, sayısal analiz sonucu elde edilen ergimiş plastiğin kalıp boşluğunu doldurma tipi görüntüleri.....	171
Şekil 6.7	I. grup enjeksiyon parametreleri için, akış burnunun y doğrultusunda zamana göre ilerlemesi.....	172
Şekil 6.8	I. Grup analiz sonucu akış burnundaki ve kalıp boşluğundaki sıcaklığın zamana göre değişimi.....	172
Şekil 6.9	I. grup enjeksiyon parametreleri ile yapılan analizde, akış alanındaki ve akış burnunda zamana göre sıcaklık dağılımı (A: Akış alanının sıcaklığı, B: akış burnuna yakın bölgenin sıcaklığı).....	174
Şekil 6.10	I. Grup analizden elde akış alanındaki hız değişimi.....	177
Şekil 6.11	I. grup enjeksiyon parametrelerine göre akış alanında oluşan zamana göre hız değişimleri.....	178
Şekil 6.12	II. Grup enjeksiyon parametreleri için, sayısal analiz sonucu elde edilen ergimiş plastiğin kalıp boşluğunu doldurma tipi görüntüleri.....	182

Şekil 6.13	II. grup enjeksiyon parametreleri için, akış burnunun y doğrultusunda zamana göre ilerlemesi.....	183
Şekil 6.14	II. Grup analiz sonucu akış burnundaki ve kalıp boşluğundaki sıcaklığın zamana göre değişimi.....	183
Şekil 6.15	II. grup enjeksiyon parametreleri ile yapılan analizde, akış alanındaki ve akış burnunda zamana göre sıcaklık dağılımı (A: Akış alanının sıcaklığı, B: akış burnuna yakın bölgenin sıcaklığı).....	184
Şekil 6.16	III. grup enjeksiyon parametreleri için, sayısal analiz sonucu elde edilen ergimiş plastiğin kalıp boşluğunu doldurma tipi görüntüleri	185
Şekil 6.17	III. grup enjeksiyon parametreleri için, akış burnunun y doğrultusunda zamana göre ilerlemesi	186
Şekil 6.18	IV. grup enjeksiyon parametreleri için, sayısal analiz sonucu elde edilen ergimiş plastiğin kalıp boşluğunu doldurma tipi görüntüleri.....	187
Şekil 6.19	VI. grup enjeksiyon parametreleri için, sayısal analiz sonucu elde edilen ergimiş plastiğin kalıp boşluğunu doldurma tipi görüntüleri.....	188
Şekil 6.20	VII. grup enjeksiyon parametreleri için, sayısal analiz sonucu elde edilen ergimiş plastiğin kalıp boşluğunu doldurma tipi görüntüleri.....	189
Şekil 6.21	Enjeksiyon hızı değişimine göre kalıp boşluğu dolum süreleri grafiği.....	190
Şekil 6.22	I. grup deneylerden elde edilen, YYPE malzemesinin kalıp boşluğundaki gerçek akış görüntüleri (T= 220 °C, p= 5 MPa, Vida hızı= 47 mm/s).....	192
Şekil 6.23	II. grup deneyden elde edilen, YYPE malzemesinin kalıp boşluğundaki gerçek akış görüntüleri (T= 220 °C, p= 5 MPa, Vida hızı= 55 mm/s).....	194
Şekil 6.24	III. grup deneyden elde edilen, YYPE malzemesinin kalıp boşluğundaki gerçek akış görüntüleri (T= 220 °C, p= 4 MPa, Vida hızı= 47 mm/s).....	195

Şekil 6.25	IV. grup deneyden elde edilen, YYPE malzemesinin kalıp boşluğundaki gerçek akış görüntüleri ($T= 225\text{ }^{\circ}\text{C}$, $p= 5\text{ MPa}$, Vida hızı= 47 mm/s).....	196
Şekil 6.26	Moldflow ile yapılan I. grup analizlerden elde edilen, YYPE malzemesinin kalıp boşluğundaki akış simülasyonu ($T= 220\text{ }^{\circ}\text{C}$, $p= 5\text{ Mpa}$).....	198
Şekil 6.27	Moldflow ile yapılan I. grup analizde, YYPE malzemesinin kalıp boşluğundaki akışında elde edilen sıcaklık dağılımı.....	199
Şekil 6.28	Moldflow ile yapılan I. grup analizlerden elde edilen, YYPE malzemesinin kalıp boşluğundaki akış simülasyonu ($T= 220\text{ }^{\circ}\text{C}$, $p= 4\text{ Mpa}$).....	200
Şekil 6.29	Moldflow ile yapılan II. grup analizden elde edilen, YYPE malzemesinin kalıp boşluğundaki akış simülasyonu ($T= 220\text{ }^{\circ}\text{C}$, $p= 6,5\text{ Mpa}$).....	201
Şekil 6.30	C-Mold ile yapılan analizden elde edilen, YYPE malzemesinin kalıp boşluğundaki akış simülasyonu ($T= 220\text{ }^{\circ}\text{C}$, $p= 5\text{ Mpa}$).....	202
Şekil 6.31	C-Mold ile yapılan analizden elde edilen, YYPE malzemesinin kalıp boşluğundaki akış çizgileri.....	203
Şekil 6.32	Sayısal analiz, gerçek akış görüntüsü, Moldflow ve C-Mold ile elde edilen akış burnunun profillerinin karşılaştırılması.....	204
Şekil 6.33	Sayısal analiz ile elde edilen akış görüntüsü, gerçek akış görüntüsü ve Moldflow simülasyon görüntülerinin karşılaştırılması ($T= 220\text{ }^{\circ}\text{C}$, $p = 5\text{ MPa}$).....	206
Şekil 6.34	Sayısal analiz ile elde edilen akış görüntüsü, gerçek akış görüntüsü ve Moldflow simülasyon görüntülerinin karşılaştırılması ($T= 220\text{ }^{\circ}\text{C}$, $p = 4\text{ MPa}$).....	210

EKLERİN LİSTESİ

EKLER	Sayfa
EK 1 Farklı yükler için, EAI - Sıcaklık grafiği ve EAI-sıcaklık ilişkisine ait sabitler.....	238
EK 2 Değişik sıcaklıklar için, EAI - basınç grafiği ve EAI- basınç ilişkisine ait sabitler.....	239
EK 3 EAI-görünür kayma hızı grafiği (T=200 °C).....	240
EK 4 Değişik Sıcaklıklar İçin, Ergiyik Akış İndeksi-Görünür Kayma Gerilmesi Grafiği.....	241
EK 5 Görünür ve Düzeltilmiş Kayma Hızı v Viskozite Değerleri ve ASTM 1238 ve TSE 1323 Standartlarına Göre Kullanılan Ağırlıklar ve Kapiler Silindirde Oluşturdıkları Basınç Değerleri.....	242
Ek 6 Farklı Sıcaklıklar İçin Log Kayma Gerilmesi-Log Kayma Hızı Grafiği.....	245
EK 7 Değişik Yükler İçin Görünür Viskozite-Sıcaklık Grafiği.....	247
EK 8 Değişik Sıcaklıklar İçin, Görünür Viskozite-Basınç Grafiği.....	248
EK 9 Değişik Sıcaklıklar İçin Ln Görünür Viskozite- Basınç Grafiği ve Ln Görünür Viskozite-Basınç Değişimini Veren Denkleme Ait Sabitler.....	249
EK 10 Değişik Sıcaklıklar İçin Görünür Viskozite-Görünür Kayma Hızı Grafiği	250
EK 11 Değişik sıcaklıklar için Görünür viskozite-görünür kayma gerilmesi grafiği.....	251
EK 12 Phoenix yazılımı q1 Dosyası.....	252
EK 13 Phoenix yazılımı Ground Dosyası.....	255
EK 14 YYPE I-668 malzemesine ait bazı teknik veriler.....	265

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
a	Diferansiyel ifadelerin cebirsel forma dönüştükten sonra oluşan katsayı
$c_{(p)}$	Sabit basınçta ısınma ısısı (özellik ısı), J/kg °C
D	Difüzyon terimi
F	Kütle akısı
h	Isı taşınım katsayısı, W/m ² °C
k	Isı iletim katsayısı, W/m ² °C
n	Akış davranış üssü (Power-Law)
m_0	Kararlılık sabiti
p	Basınç, N/m ² (Pa)
P_{ec}	Peclet sayısı
P_{ref}	Referans basınç, ms ² /kg
Ra	Rahley sayısı
Re	Reynold sayısı
t	Zaman, s
T	Sıcaklık, °C
$T_{Giriş}$	Ergimiş plastiğin kalıp boşluğuna giriş sıcaklığı, °C
T_k	Kalıp sıcaklığı, °C
$T_{ref}=T^0$	Referans sıcaklık, °C
u	Hızın x yönündeki bileşeni, m/s
v	Hızın y yönündeki bileşeni, m/s
U	X yönündeki boyutsuz hız
V	Y yönündeki boyutsuz hız
U_{ref}	Referans hız, m/s

V_{ref}	Referans hız, m/s
V	Özgül hacim, cm ³ /g
w	Hızın z yönündeki bileşeni, m/s
x	Koordinat elemanı
y	Koordinat elemanı
X	Boyutsuz koordinat elemanı
Y	Boyutsuz koordinat elemanı
X_{ref}	Referans uzunluk, m
W	Akış alanının en büyük uzunluğu, m
ρ	Yoğunluk, kg/m ³
η	Dinamik viskozite, Ns/m ² (Pa s)
ν	Kinematik viskozite, m ² /s
α_f	Isıl yayılım sabiti, m ² /s
α_p	Basınç terimini düzeltme faktörü
α_u	u -hızını düzeltme faktörü
α_v	v -hızını düzeltme faktörü
ϕ	Boyutsuz sıcaklık
φ	Genel değişken
τ	Kayma gerilmesi, N/m ² (Pa)
$\dot{\gamma}$	Kayma hızı, s ⁻¹
∇	Laplace operatörü
β	Hacimsel genleşme katsayısı, °C ⁻¹
κ	İzotermal sıkıştırılabilirlik

Kısaltmalar**Açıklama**

Eş.	Eşitlik
PVT	Basınç-Hacim-Sıcaklık (Pressure-Volume-Temperature)
SKH	Sonlu Kontrol Hacmi
SE	Sonlu Elemanlar

SF	Sonlu Farklar
SIMPLE	Semi Implicit Pressure Link Equation
TDMA	Tri-Diagonal Matrix Algorithm (Gaus-Jordan Eliminasyon Metodu)
PP	Polipropilen
PS	Polistiren
YYPE	Yüksek Yoğunluklu Polietilen
DYPE	Düşük Yoğunluklu Polietilen



1. GİRİŞ

19. yüzyılın sonlarına doğru bulunan plastikler, özellikle 2. Dünya savaşıdan sonra daha da geliştirilmiş ve binlerce çeşidi ile endüstride ve günlük hayatımızda hızla artan bir şekilde kullanılır olmuştur. Fiziksel ve kimyasal özelliklerine göre üretim yöntemleri de farklılıklar gösteren plastik parçaların üretiminde, çeşitli üretim teknikleri (enjeksiyon, ekstrüzyon, şişirme vb.) geliştirilmiştir. Plastik parçaların yaklaşık 1/3' ünün enjeksiyon yöntemi ile üretilmektedir. Bu kadar geniş üretim kapasitesine sahip olan enjeksiyon yöntemi ile üretim konusunda özellikle üretilen parçaların geometrik yapısı ve boyut toleransları, yüzey kalitesi ve dayanıma etki eden faktörler hakkında bir çok araştırma yapılmıştır.

Geri dönüşümlü malzemelerden olan termoplastik ürünlerin üretilmesinde, en çok enjeksiyon yöntemi kullanılmaktadır. Metallerin basınçla kalıplanarak üretilmesi prensibinin temel alındığı enjeksiyon yöntemi, plastik mamul üretiminde kullanılan ve kullanımı her geçen gün diğer plastik parça üretim yöntemlerine göre artan, en önemli üretim yöntemlerindendir. Hammaddenin tek bir işlemle istenilen şekilde kalıplanarak ürüne dönüştürülebilmesi ve bir çok durumda imal edilen ürünün ikinci bir işlem gerektirmeden kullanılabilmesi, bu metodu seri üretimde oldukça avantajlı hale getirmektedir. Bu nedenle, oyuncak, otomobil parçaları, ev eşyaları, çeşitli elektronik parçaları vb. gibi günlük hayatta sık rastlanan ve kullanılan plastik ürünlerin bir çoğu, plastik enjeksiyon yöntemi ile üretilmektedir.

Herhangi bir plastik ürün tasarlanırken, kullanım yerine göre fonksiyonel kısımları da dikkate alınarak şekli, kesiti ve boyutları belirlenip, üretim şartları da bu kriterler dikkate alınarak tespit edilmektedir. Tasarlanan plastik ürünlerin en az maliyetle üretilerek, en yüksek verimle kullanılabilmeleri de öncelikli olarak hangi yöntemle üretilcekleri belirlemektedir. Enjeksiyon yöntemi ile üretilcek plastik parçalarda, plastik ürünün maliyetinin yaklaşık %50' si tasarım ve kalıp maliyetidir. Maliyetin geriye kalan %50' lik kısmı ise, hammadde, kalıplama maliyeti vb. oluşturmaktadır. Plastik parçaların ve kalıbın tasarımı ve üretim maliyetleri ne kadar az aşağıya çekilirse, üretilcek plastik ürünlerin fiyatları da o kadar ucuz olacaktır. Toplumların

sanayileşmeleri ile birlikte küreselleşen dünyada rekabetin sadece belirli bölgelerde değil, dünya ölçeğinde olduğu düşünüldüğünde, plastik parçaların en az maliyetle en kaliteli bir şekilde üretilmesi, oldukça önem arz etmektedir.

Plastik parçaların tasarımındaki en önemli husus, ürünün fonksiyonel unsurlarının belirlenmesidir. Bununla birlikte, kullanım yeri de dikkate alınarak yapılan malzeme seçimi her malzemenin farklı fiziksel ve kimyasal özelliğe sahip olmasından dolayı ayrı bir öneme sahiptir. Her plastik farklı özelliklere sahip olduğu gibi, yapıları gereği üretim koşullarına göre, aynı malzemeler bile çok farklı özelliklerde olabilmektedir. Aynı malzeme grubuna giren YYPE malzemesinin farklı üretici firmalar tarafından üretilen türleri de bir birinden farklı özellikler göstermektedir. Plastikler, genel olarak değerlendirildiklerinde fiziksel ve kimyasal olarak çok değişik özellikler göstermektedir. Bu özellikler, plastiğin amaca uygun seçimince alternatifinin bol olmasını sağlamaktadır.

Tasarım aşaması biten plastik parçanın üretilmesi için, kalıbının tasarlanması gerekmektedir. Kalıp tasarımı yapılırken, plastiğin kendine has özellikleri de dikkate alınarak tasarım yapılmaktadır. Plastik hammadde üreticileri ürettikleri plastik hammaddeye ait bir takım teknik verileri kataloglarında belirtmiş olmalarına rağmen bir çok teknik verinin yetersiz kaldığı bilinmektedir. Malzemeyi tanımlamada ve karakteristik özelliklerinin tümünü belirlemede eksik olan bu veriler, zaten araştırmacıların üzerinde çalıştıkları konuların başında gelmektedir. Üretici firmalar, kataloglarında plastik malzemenin yoğunluğu, enjeksiyon sıcaklığı, ergime sıcaklığı, kalıptan çıkarma sıcaklığı, camsı geçiş sıcaklığı, belirli şartlar için viskozitesi, ısınma ısısı, ısı iletim kapasitesi ve bazı mekanik mukavemetleri gibi değerleri vermektedir. Bunlar akışı etkileyen ve kalıplama sırasında enjeksiyon parametrelerinin ayarları için önemli olan teknik verilerdir. Ancak, enjeksiyon sırasında ergimiş plastiğin kalıp içerisinde nasıl akacağı ve kalıp boşluğunu doldurma tipi gibi kalıplanan ürünün kalitesini etkileyen parametreler hakkındaki bilgiler, bu kataloglarda bulunmamaktadır.

Enjeksiyon kalıbı tasarlanırken, ergimiş plastiğin kalıp boşluğundaki akışının bilinmesi son derece önemlidir. Plastik malzeme enjeksiyon memesinden yolluğa ve oradan dağıtıcı kanallar vasıtasıyla giriş ve kalıp boşluğuna akmaktadır. Tasarımı yapılan kalıbın kaç gözlü (kalıp boşluğu sayısı) olacağı, dağıtıcı kanalların kesiti, yeri ve boyutları, girişin kesiti ve yeri son derece önemlidir. Kalıplanan ürünün, kalıplama süresinden plastiğin mekanik mukavemetine, geometrik yapısına ve estetiğine kadar bir çok özellik bu kalıp tasarım parametrelerinden etkilenmektedir.

Enjeksiyonla kalıplama yöntemi, ergimiş plastiğin kalıp boşluğuna enjekte edilmesi, kalıp boşluğuna dolan plastiğin soğuyup katılaşarak kalıp boşluğunun şeklini alması işlemidir. Enjeksiyon memesinden yolluğa, yolluktan dağıtıcı kanallara ve giriş aracılığıyla kalıp boşluğuna akan ergimiş plastik, nispeten daha düşük sıcaklıkta olan kalıp yüzeylerine temas etmektedir. Akış sırasında kalıp duvarlarına temastan dolayı, plastik malzemedan kalıp malzemesine doğru bir ısı akışı gerçekleşmektedir.

Özellikle ergimiş plastik, akış sırasında temas ettiği yüzeylerde katılaşarak yapışmakta ve sıcak ergiyik bu katılaşan ve daralan kesitten akarken fiskiye tipi akış sergilemektedir. Bu nedenle, yolluk, dağıtıcı kanallar giriş ve ince kesitli bölgelerde akış sırasında plastiğin aktığı kesitin zamana ve kalıp sıcaklığına bağlı olarak daralması, kalıp tasarımı ve enjeksiyon parametrelerinin ayarlanması sırasında ayrı bir özen ve önem gerektirmektedir.

Plastik enjeksiyon kalıbının tasarım ve imal maliyeti ayrıca enjeksiyon sırasında en uygun enjeksiyon parametrelerinin ayarlanabilmesi için deneme baskılarının yapılması hem maliyeti artırmakta hem de malzeme kaybına sebep olmaktadır. Bu nedenle, plastik parçaya ait kalıp tasarımı yapılırken, ergimiş plastiğin kalıp boşluğundaki akışının belirlenmesi ve buna göre kalıp unsurlarının tasarımı gerçekleştirilmelidir. Kalıp boşluğunun nasıl dolduğu, dolum tipine göre dağıtıcı kanalların yerleri ve boyutları, giriş yerinin tespiti çok iyi yapılmalıdır. Ayrıca, ergimiş plastiğin kalıp boşluğu içerisindeki akışının önceden bilinmesi en uygun enjeksiyon parametrelerinin ayarlanmasına yardımcı olmaktadır. Enjeksiyon tezgahının bir çevrimde basabileceği en fazla malzeme miktarı da dikkate alınarak

kalıp boşluğu sayısı belirlenmektedir. Plastik parça maliyetine ihmal edilemeyecek derecede etkisi olan bir çevrimde elde edilen plastik parça sayısı, üretilen parça birim maliyetini düşürmektedir.

Endüstride karşılaşılan en önemli sorunlardan biri enjeksiyon tezgahına bağlanmış kalıp boşluğuna ergimiş plastik basılacağı zaman gerekli olan basınç, hız ve sıcaklık değerleridir. Genellikle deneme yanılma yolu ile belirlenmeye çalışılan bu enjeksiyon parametrelerinin tespit edilmesi hem maliyeti yüksek bir yöntem hem de en uygun parametrelerin seçilebilmesi oldukça zordur. Deneme baskılarının sayısı arttıkça israf olan malzeme direkt olarak toplam üretimin maliyetini artırmaktadır. Özellikle büyük ebatlardaki plastik parça üretiminde deneme yanılma yolu oldukça pahalı bir yöntem olmaktadır.

Enjeksiyon yöntemiyle plastik parça üretiminde ergimiş plastik, genellikle ince kesitli, düzgün olmayan geometrideki kalıp boşluklarına, belirli bir basınç, hız ve sıcaklık altında enjekte edilmektedir. Enjekte edilen ergimiş plastik kalıp boşluğunda ilerlerken, ideal olmayan (Non-Newtonian) ve özdeş ısıya sahip olmayan (Non-Isothermal) bir akış özelliği sergilemektedir. Akış sırasında kalıp duvarlarına temas sebebiyle dinamik olarak yoğunluğu değişen ergiyik plastiğin kayma gerilmesi ve kayma hızı, zamana bağlı olarak akışı etkileyen bütün parametrelerde değişim göstermektedir.

Ergimiş plastiğin enjeksiyon memesinden kalıp boşluğuna doğru akması kalıplamada çok önemli ve dikkat edilmesi gereken analizleri beraberinde getirmektedir. Ergimiş plastiğin akış biçimi, hız dağılımı, basınç dağılımı ve sıcaklık dağılımı, kalıp boşluğunun dolma süresini ve ürünün boyut ve kalite yönüyle kusurlu olup olmadığının bir göstergesi sayılmaktadır.

Ergiyik plastik akarken viskozitesi kısa zaman aralıklarında değişmekte ve aynı zamanda kalıp duvarlarına temas eden yüzeylerde ergimiş plastik, ani ısı kaybından dolayı katılaşarak yüzeye yapışmaktadır. Ürünün kalıplanması sırasında, akışı etkileyen parametreler iyi ayarlanmadığında, kalıp boşluğu tamamen dolmamakta (ürün eksik

çıkarmakta), ergimiş plastik çok ince detaylara girememekte ve dayanıksız ve estetik bozukluğa sahip ürünler elde edilmektedir.

Doktora çalışması, teorik analiz ve deneysel çalışma olarak iki aşamada gerçekleştirilmiştir. Birinci aşamada, matematiksel modelleme yapılmış ve sayısal analiz yöntemi ile çözümleme yapılarak akış analizi gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın ikinci aşamasında ise, teorik olarak akış analizi yapılan Yüksek Yoğunluklu Polietilen (YYPE) malzemesine ait akış özelliklerinin deneysel olarak belirlenmesi ve ergimiş plastiğin kalıp boşluğundaki gerçek akışının tespiti yapılmıştır.

Gerçekleştirilen çalışmanın ilk aşamasında, zamana bağlı olarak ısı kaybeden, yoğunluğu ve viskozitesi değişen ve temas ettiği yüzeylerde yapışıp katılaşan bir akışkanın ve matematiksel modeli çıkarılarak, akış dinamiği incelenmiştir. Bu bağlamda, temel denklemler olan süreklilik, momentum ve enerji denklemleri irdelenerek birim kontrol hacminde oluşan değişimler incelenmiştir. Diferansiyel formdaki temel denklemler, Sonlu Kontrol Hacmi (SKH) Yöntemine göre cebirsel hale getirilip Gauss-Siedel iteratif olarak çözümlenmiştir. Temel denklemlerin sayısal olarak çözümlenmesinde, zaman ve konum değişimleri için “Tam Implicit Yöntemi”, difüzyon terimleri için ise akışın hangi taraftan geldiğinin dikkate alındığı “Upwind yöntemi” kullanılmıştır. Basınç terimini veren herhangi bir diferansiyel ifade bulunmadığından, SIMPLE algoritması kullanılarak, süreklilik denklemi ve momentum denklemleri birleştirilerek basınç denklemi haline dönüştürülmüştür. Diferansiyel denklemlerin çözümlenmesinde kaydırılmış ızgara sistemi (Staggered grid) kullanılarak, skaler değişkenler ana düğüm noktalarına, vektörel değişkenler ise kaydırılmış düğüm noktalarına atanarak hesaplama yapılmıştır.

Çalışmanın ikinci aşaması olan deneysel çalışma ise, akış analizi yapılan YYPE malzemesinin reolojik incelenmesi ve ergimiş plastiğin kalıp boşluğundaki gerçek akışının gözlenmesi gerçekleştirilmiştir. Ergiyik akış indeksi cihazı kullanılarak yapılan reolojik incelemede, değişik sıcaklık ve basınca göre, ergime akış indeksi, viskozite, kayma hızı ve kayma gerilmesi gibi, akış için önemli parametrelerin sıcaklık ve basınç karşısındaki değişimleri incelenmiştir. Ayrıca, ideal olmayan akış

özelliğine sahip malzemelerin akış analizlerinde kayma gerilmesi ve viskozite değerlerinin hesaplanmasında kullanılan ve Üs yasası sabiti (akış davranış sabiti, Power Law indeksi) değerleri tespit edilmiştir. Bunun yanında, sıcaklığa bağlı viskozite hesaplamalarında kullanılan, aktivasyon enerjisi değerleri de tespit edilmiştir. Deneysel çalışmanın ikinci aşamasında ise, ergimiş plastiğin kalıp boşluğundaki gerçek akışını gözlemleyebilmek için, bir tarafına cam plaka yerleştirilen kalıp boşluğundaki akış, kamera vasıtasıyla görüntülenmiştir. Ergimiş plastiğin kalıp içerisindeki akış görüntüleri resim formatına dönüştürülerek, akışın zaman göre nasıl gerçekleştiği ve kalıp boşluğunun ne kadar sürede dolduğu belirlenmiştir.

Temel denklemlerde bulunan viskozite teriminin hesaplanabilmesi için, Üs yasası (Power Law) viskozite modeli, yoğunluk değişimi ise Boussinesq Yöntemine göre hesaplanmıştır. Yapılan sayısal analizde, ergimiş plastik ile kalıp boşluğundaki hava arasında açık bir yoğunluk farkı olduğundan, iki farklı yoğunluk ara yüzeyinin tespiti için Van Leer Yöntemi kullanılmıştır. Gauss-Jordan iterasyon yöntemi ile yapılan hesaplama sonucunda, elde edilen değerlere göre kalıp boşluğundaki yoğunluk değişimine bağlı olarak akış simülasyonu yapılmıştır.

Ergimiş plastikler, katı-sıvı faz değişimi olarak bilinen camsı geçiş sıcaklığının altındaki sıcaklıklarda katı özellik gösterdiklerinden akmamaktadır. Sıcaklığın bu değerin altına düştüğü yerlerde malzeme katılaşp bir katman tabakası oluşturmaktadır. Yapılan analizlerde, katılık oranı dikkate alınarak camsı geçiş sıcaklığının altındaki bölgeler tespit edilerek, pelteleşmiş tabakalar da tespit edilmiştir. Cebirsel hale getirilen denklem takımları PHOENICS programı kullanılarak çözümlenmiş, akış tipi, sıcaklık dağılımı, hız dağılımı, viskozite dağılımı ve kalıp boşluğunun nasıl ve ne kadar sürede dolduğunun tespiti yapılmış ve akış simüle edilmiştir.

Teorik olarak yapılan akış simülasyon sonuçları ile deneysel olarak elde edilen akış görüntülerinin karşılaştırılmalarının yanında, aynı kalıp geometrisi belirlenen enjeksiyon şartlarında ticari paket programları ile de analiz edilip akış simülasyonu

yapılmıştır. Moldflow ve C-Mold paket programları ile aynı şartlar altında yapılan akış analizi ve simülasyon görüntüleri ile deneysel olarak ve teorik olarak elde edilen akış simülasyonları karşılaştırılmıştır. Bu çalışmaya göre, Navier-Stokes denklemlerinin Sonlu Kontrol Hacmi yöntemi ile ayrıklaştırılıp çözümlenmesi ile PHOENICS programında elde edilen sonuçlar ile deneysel olarak ve simülasyon programlarında elde edilen sonuçlarla oldukça uyum içinde oldukları tespit edilmiştir.

Hazırlanan bu tez giriş dahil olmak üzere, 8 bölümden oluşmaktadır. İkinci bölümde, literatürdeki çalışmalar konu bütünlüğü içerisinde gruplara ayrılarak incelenmiştir. Üçüncü bölümde ergimiş plastiklerin akış analizlerinin yapılabilmesi için gerekli matematiksel modelleme yapılarak temel denklemler türetilmiştir. Dördüncü bölümde ise, diferansiyel formdaki temel denklemlerin çözümlenebilmesi için sayısal çözümleme yapılarak, diferansiyel ifadeler cebirsel forma dönüştürülmüş ve çözüm için gerekli olan iterasyon yöntemi sunulmuştur. Beşinci bölümde, Non-Newtonian akış özelliği gösteren plastiklerin reolojik özellikleri, viskozite modelleri hakkında bilgiler verilmiştir. Altıncı bölümde, Doktora çalışmasının ikinci aşamasını oluşturan deneysel çalışma hakkında bilgiler verilmiş olup, deneysel çalışmanın yöntem ve uygulamaları hakkında bilgiler verilmiştir. Yedinci bölüm, sonuç ve tartışma bölümü olup, yapılan çalışmanın ve elde edilen bulguların değerlendirilmesi, teorik çalışma sonuçları ile deneysel ticari paket programların sonuçlarının karşılaştırılması yapılmıştır. Sekizinci bölümde ise, sonuç ve öneriler sunulmuştur.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Günlük yaşantımızın vazgeçilmez bir parçası olan plastik ürünler, son zamanlarda metalik parçaların yerini almaya başlamıştır. Üretiminin diğer malzemelere göre daha ucuz ve kolay olmasının en büyük nedenlerinden birisi, enjeksiyonla kalıplama tekniği gibi yöntemlerle üretiliyor olmasıdır. Enjeksiyonla üretilen parçalar kalıplama sonrası son işlem gerektirmedikinden, kalıptan çıkan plastik parçalar doğrudan kullanılabilir. Endüstride, kalıptan çıkan plastik parçaların ikinci bir işlem görmeden kullanılabilmesi, hem maliyet açısından hem de zaman açısından oldukça önemlidir. Bu nedenle, enjeksiyon kalıbından çıkan plastik parçanın hiç bir işlem görmeden kullanılabilmesi için, kalıplanan ürünün istenilen özelliklere sahip olması gerekmektedir. Bu nedenle, endüstrinin her aşamasında kullanılan plastik parçaların en kısa sürede ve en ucuza mal edilerek üretilmeleri çok önemlidir.

Bilindiği gibi, enjeksiyonla kalıplama tekniği ile üretilen parçaların hem maliyeti hem de kaliteleri kalıba ve enjeksiyon parametrelerine bağlıdır. Endüstriyel bir plastik parça üretiminde, üretim süresinin büyük bir kısmı kalıp tasarımı ve imalatı safhasında geçmektedir. Üretilen plastik parçanın kalitesi, görünümü ve mekanik özelliklerinin belirleyici unsurlarından biri kalıptır. Plastik ürünün hassas, kaliteli ve ucuza mal edilebilmesinin yolu, en uygun kalıp tasarımının yapılmasına bağlıdır. Bu nedenle, kalıp imal edilmeden önce boşluk sayısı, dağıtıcı kanalların yeri, tipi ve boyutları, giriş sayısı, boyutları ve yeri, soğutma sistemi gibi bir çok etkili değişken dikkate alınarak en uygun tasarım yapılmalı ve kalıp imalatı gerçekleştirilmelidir.

Plastiklerin enjeksiyonla kalıplanarak şekillendirilmesi işleminde en karmaşık konu plastiklerin akışmasıdır. Yapılan araştırmalar incelendiğinde, çalışmalar özellikle plastiğin akışı üzerinde yoğunlaşmaktadır. Plastiklerin akışının karmaşık ve çözümünün zor olmasının sebebi, plastiğin yapısından kaynaklanmakta ve ergimiş plastiğin çok karmaşık akış özelliğine sahip olmasındandır. Ergimiş plastikler türlerine göre, genellikle 180 °C – 350 °C sıcaklık aralığında şekillendirilmektedir. Enjeksiyonla kalıplama işlemi sırasında, plastiğe şeklini veren kalıbın sıcaklığı 30 °C

– 70 °C aralığında olup, akış esnasında ergimiş plastikten kalıp yüzeylerine ısı akısı (ısı transferi) olmaktadır. Yani, ergimiş plastik kalıp içerisinde akarken, plastiğin sıcaklığı değişmektedir. Bu nedenle, sıcaklık değişimine bağlı olarak akışı etkileyen ve akışla ilgili tüm parametrelerde değişmektedir.

Plastik enjeksiyon kalıpcılığıyla parça üretiminde, ergimiş plastik genellikle ince kesitli ve düzgün olmayan geometrideki kalıp boşluklarına belirli bir basınç, hız ve sıcaklık altında enjekte edilmektedir. Enjekte edilen ergimiş plastik kalıp boşluğuna dolarken, ideal olmayan ve uniform ısıya sahip olmayan formda akmaktadır. Ayrıca, akış esnasında soğuk kalıp yüzeylerine temas eden ergimiş (sıcak) plastik, yüzeye yapışarak ilerlemekte ve ısınıyı kaybetmektedir. Sıcaklık kaybıyla beraber plastiğin kalıp yüzeylerine temas ettiği bölgelerde katılaşmış katmanlar oluştuğundan, kalıp içerisinde kesit daralması olmaktadır. Ayrıca, değişen sıcaklık ile birlikte akışkanın yoğunluğu da değişmektedir. Dolayısıyla, kayma gerilmesi ve kayma hızı da değişen bu akış tipinde, zamana bağlı olarak, akışı etkileyen sıcaklık, basınç, hız, viskozite gibi tüm parametreler değişmektedir.

Uzun zincirli ve çok sayıda moleküllerden (makromolekül) oluşan plastik üzerine uygulanan itme kuvveti ile akmaya zorlandığında, akışkan hem plastik hem de viskoz akış özelliği göstermektedir. Üzerine uygulanan yüklerle harekete geçen akışkanın, kayma hızına bağlı olarak akış doğrultusu değişmekte ve böylelikle uzun zincirli makromoleküller de yönlendirilebilmektedir. Uzun zincirli moleküller akış doğrultusunda yönlendirildiklerinde, akışa karşı göstermiş oldukları direnç de azalmakta dolayısıyla, akışkanın viskozitesi akış sırasında düşmektedir. Kayma incelmesi olarak da bilinen plastiklerin bu özelliği, teorik olarak yapılan akış analizlerinde hatalara neden olmaktadır. Bunlara ilaveten plastiklerin akışını karmaşık hale getiren diğer bir özellik de, akışkanın kayma hızı ile kayma gerilmesi arasındaki ilişkinin doğrusal olmayan bir ilişkide olmasıdır. Newtonian olmayan akış olarak ta bilinen bu özellik, plastiklerin akışını diğer akışkanlardan ayıran en önemli özellik olmuştur.

Bu kadar karmaşık akış özelliği gösteren plastiklerin, enjeksiyonla kalıplama tekniği ile son işlem görmeden kalıplama sonrası kullanılabilmesi için, kalıplanan ürünün hatasız üretilmesi gerekmektedir. Plastiğin çeşidine, katkı maddesine, kalıbın kalitesine ve enjeksiyon parametrelerine bağlı olan ve ürün kalitesini etkileyen tüm parametrelerin kontrol altına alınması ile istenilen özellikte plastik parça üretilmektedir.

Enjeksiyonla kalıplama tekniği konusunda bu güne kadar bir çok araştırma yapılmış ve yapılmaya da devam etmektedir. Enjeksiyon işlemi konusunda yapılan çalışmaların büyük bir çoğunluğu, ergimiş plastiğin kalıp boşluğuna dolması (akış simülasyonu), dolduktan sonraki termodinamik değişimleri, bu değişimlerin ürün üzerindeki fiziksel ve mekanik özellikleri, estetik görünümü, geometrik yapısı ve boyut tamlığı gibi ürün kalitesini doğrudan etkileyen parametrelere etkilerinin araştırılması üzerinde yoğunlaşmıştır (1).

Ergimiş plastiklerin akış dinamiğinin incelenmesi, akışı etkileyen parametrelerin hesabı ve akış simülasyonunda bir çok matematiksel yöntem kullanılmaktadır. İdeal olmayan akış özelliğine sahip ergimiş plastikler, enjeksiyon sırasında basınç altında ilerlerken soğuk kalıp yüzeyleri ile temas ettiğinden, sıcak akışkandan soğuk yüzeylere ısı akışı olmaktadır. Yani akışkan hareketi sırasında zamana bağlı olarak ergimiş plastiğin sıcaklığı değişmektedir. Sıcaklık değişimine bağlı olarak da akışkanın hemen hemen tüm parametreleri de değişmektedir. Ayrıca, plastiğin kimyasal yapısından kaynaklanan ideal olmayan akış özelliğine sahip olması ve kalıp içerisindeki akışının çok karmaşık oluşu, plastiklerin akış dinamiğinin incelenmesinde bir çok modelin geliştirilmesine sebep olmuştur.

Karmaşık akış özelliği sergileyen plastiklerin akış analizleri yapılırken, kullanılan temel denklemler genellikle diferansiyel formda ve çok sayıda terimden oluştuklarından çözümleri hem zor olmakta hem de uzun süreler almaktadır. Akış simülasyonu için yapılan analitik çözümlemeler sağlıklı sonuç vermediğinden, analizler genellikle sayısal çözümleme metotları ile yapılmaktadır. Temel denklemlerin çözümü için çok sayıda sayısal çözümleme metotları geliştirilmiştir.

Bunun yanında, sayısal çözümleme metotlarının yanında farklı kabuller ve ihmaller yapılarak temel denklemlerden değişik yöntemlere dayalı bir çok yeni denklemler türetildiği tespit edilmiştir.

2.1. Hele - Shaw Metodu

Plastiklerin akış analizlerinde kullanılan temel eşitlikler, kütleinin korunumu, momentumun korunumu ve enerjinin korunumu prensiplerine dayanmaktadır. Doğrusal zincirlere sahip ergimiş plastiklerin akışı sadece basınç, hız ve sıcaklıktan ibaret olmayıp, kayma hızı, viskozite ve yoğunluk parametrelerinde oldukça büyük bir etkisi vardır. Polimerler, kimyasal yapıları gereği sıcaklıkla genişmekte olup, basınç karşısında da sıkışma özelliğine sahiptir. Ayrıca, plastiklerin viskoziteleri de kendine has karakteristik bir yapıdadır. Bu kadar karmaşık ve çok sayıda etkeni bulunan bir akışın analizinde kullanılan yönetici eşitlikler, diferansiyel formda olduğu için çözümü de karmaşıktır.

Diferansiyel formdaki temel denklemlerin analitik çözümleri için bazı metotlar geliştirilmiş ise de, analitik çözümler tek boyutta sınırlı kaldığından, plastiklerin akış simülasyonunu ve akış dinamiğinin incelenmesinde pek kullanılmamıştır. Analitik çözümün uygun olmadığı bu akış türünde, diferansiyel ifadeler için çok çeşitli sayısal çözümlemeler geliştirilmiştir. Karmaşık yapıda olan ergimiş plastiklerin akışlarının incelenmesinde, belirli kabuller yapılarak diferansiyel ifadeler sadeleştirilip uygun sınır şartlarına göre çözümlenebilmektedir. Bu bağlamda, Hele-Shaw yaklaşımı olarak bilinen modelde, temel denklemler belirli kabuller yapılarak sadeleştirilmektedir.

Enjeksiyonla kalıplamada ergimiş plastiğin akış analizinde kullanılan temel denklemler, Eş. 2.1' de verilen süreklilik denklemi, Eş. 2.2, Eş. 2.3 ve-2.4' de verilen momentum denklemleri ve Eş. 2.5' deki enerji denklemleridir. Hele-Shaw yaklaşımının ana prensiplerinden olan kabullerden biri, akışın sıkıştırılmaz olduğudur (1). Böylece süreklilik denklemi $\nabla \cdot \vec{V} = 0$ halini almaktadır.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad [2.1]$$

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} = \rho f_x - \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} (2\eta \frac{\partial u}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (\eta (\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y})) + \frac{\partial}{\partial z} (\eta (\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z})) - \rho (u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z}) \quad [2.2]$$

$$\rho \frac{\partial v}{\partial t} = \rho f_y - \frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} (\eta (\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x})) + \frac{\partial}{\partial y} (2\eta \frac{\partial v}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (\eta (\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z})) - \rho (u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z}) \quad [2.3]$$

$$\rho \frac{\partial w}{\partial t} = \rho f_z - \frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} (\eta (\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x})) + \frac{\partial}{\partial y} (\eta (\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y})) + \frac{\partial}{\partial z} (2\eta \frac{\partial w}{\partial z}) - \rho (u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z}) \quad [2.4]$$

$$\begin{aligned} & \rho C_p (\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z}) \\ & = \beta T (\frac{\partial P}{\partial t} + u \frac{\partial P}{\partial x} + v \frac{\partial P}{\partial y} + w \frac{\partial P}{\partial z}) + \eta \dot{\gamma}^2 + k (\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}) \end{aligned} \quad [2.5]$$

Burada, u, v ve w hızları, P basıncı, T sıcaklığı, ρ yoğunluğu, η viskoziteyi, C_p ısınma ısısını, k ısı iletim katsayısını, β genleşme katsayısını ve $\dot{\gamma}$ kayma hızını temsil etmektedir (1). Eş. 2.1' de verilen süreklilik denklemi, Eş. 2.2, Eş. 2.3 ve Eş. 2.4 'de verilen momentum denklemleri ve Eş. 2.5' de verilen enerji denklemlerinden oluşan temel denklemler, bütün akışkanlar için geçerli olup, ergimiş plastiklerin akış simülasyonu ve akış analizlerinde kullanılmaktadır. Momentum denklemlerinde, eşitliklerin solundaki terim momentum değişim oranını, eşitliğin sağındaki ilk terim yer çekiminden doğan kuvvetleri, ikinci terim basınç değişimini, üçüncü dördüncü ve beşinci terimler viskoz kuvvetleri son terim ise atalet kuvvetlerini ifade etmektedir. Enerji denkleminde ise, eşitliğin solundaki terim toplam enerji değişimini, eşitliğin sağındaki ilk terim ergiyiğin genleşmesi ve sıkışmasından dolayı oluşan toplam enerji değişim oranını, ikinci terim viskoz yayılmadan dolayı oluşan enerji değişimini ve son terim ise kondüksiyondan dolayı gerçekleşen enerji değişimini ifade etmektedir.

Hele-Shaw yaklaşımının diğer bir önemli kabulü ise, enjeksiyonla kalıplama da kalıplanan plastik parça ince kesitli olduğundan, kalıp boşluğu içerisinde z doğrultusu olarak tanımlanan üçüncü doğrultuda akışın fazla değişmediğidir (1). Yani analiz yapılırken denklemler iki boyutlu gibi kabul edilmektedir. Fakat, z

doğrultusunda ise Eş. 2.6' da verilen bağıntıdaki gibi, akışkanlık hesaplanarak momentum denklemleri çözümlenmektedir (1-15).

$$S = \int_0^h \frac{z^2}{\eta} dz \quad (2.6)$$

Yukarıda verilen eşitliklerde diferansiyel formda olan ve çözümü oldukça zor olan denklemleri basitleştirmek için bazı kabuller ve ihmaller yapılmıştır. Bunun için, boyut analizi olarak adlandırılan bir yöntemle, yönetici eşitliklerde her bir terimin büyüklüğü tahmin edilmektedir. Böylece, boyutları tahmin edilen terimler içerisinde sayısal değeri çok küçük olan terimlerin denklem içerisindeki ağırlığı da (etkisi) ihmal edilebileceğinden hareketle, denklemde bazı terimler göz ardı edilmektedir. Bu yöntem için gerekli en önemli kriter, karakteristik değerler düşüncesidir. Büyüklük sırasının tespitine yarayan bu değerler, kalıp boşluğunun uzunluğu, kalıp boşluğunun kalınlığı, ergimiş plastiğin viskozitesi ve çözüm için gerekli referans hız değeridir. Bu parametrelerin kesin değerine gerek duyulmaksızın, sadece büyüklük sıraları yapılmaktadır. Böylece, denklem içerisinde yeterince küçük olan terimler ihmal edilmektedir.

Boyut analizine göre yapılan büyüklük sırası işlemlerinden sonra, etkisi az olan ve ihmal edilebilecek kadar küçük olan terimler, denklemlerden atılmaktadır. Daha sonra z doğrultusunda akışın ve sıcaklığın fazla değişmediği kabul edilerek üçüncü boyut, tamamen ihmal edildikten sonra Eş. 2.2, Eş. 2.3, Eş. 2.4 ve Eş. 2.5' deki denklemler, sırasıyla Eş. 2.7, Eş. 2.8, Eş. 2.9 ve Eş. 2.10'daki denklemlere dönüştürülmektedir (1, 2, 5-13, 15-17).

- Momentum denkleminin x-bileşeni

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\eta \frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad [2.7]$$

- Momentum denkleminin y-bileşeni

$$\frac{\partial p}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\eta \frac{\partial v}{\partial z} \right) \quad [2.8]$$

Momentum denkleminin z-bileşeni

$$\frac{\partial p}{\partial z} = 0 \quad [2.9]$$

- Enerji denklemi

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \eta \dot{\gamma}^2 + k \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad [2.10]$$

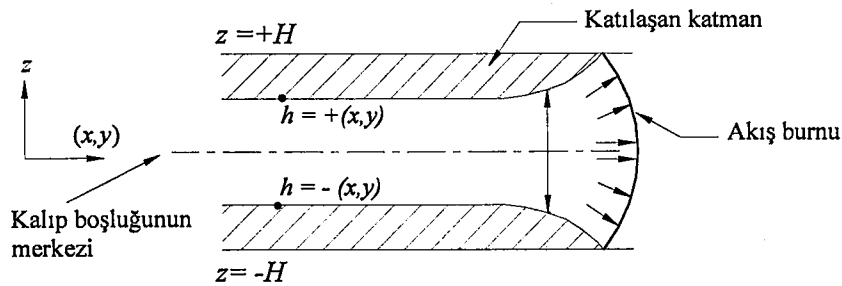
Eşitlik 2.10' daki kayma hızı, $\dot{\gamma}$, Eş. 2.11' de verilen

$$\dot{\gamma} = \sqrt{\left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)^2} \quad [2.11]$$

bağıntısı ile ifade edilmektedir (1-11, 15-17).

Eş. 2.7 ila Eş. 2.10 arasında verilen denklemlerde, kalıp boşluğu geometrisi ve plastik malzeme özelliklerinin de dikkate alındığı sadeleştirme işlemi ile, ergimiş plastiğin kalıp boşluğundaki akışı ve boşluğu doldurması safhasını modellemek için kullanılan temel denklemler basitleştirilmiştir. Ancak, kalıp boşluğu dolduktan sonraki aşamada, yukarıdaki basitleştirme ve ihmaller geçerli olmamaktadır. Özellikle ergimiş plastiğin sıkıştırılabilirlik özelliği, bu safhanın en etkin parametrelerinden biridir.

Eş. 2.7 ve Eş. 2.8 de görüldüğü gibi, basınç sadece x ve y ' nin bir fonksiyonudur. Bu nedenle, u ve v hızlarını elde etmek için, momentum denklemlerinin kalınlık kesitinde integre edilmesi yeterli olmaktadır (1,7-10,15).



Şekil 2.1. Akış burnu oluşumu (1)

Şekil 2.1' de belirtilen notasyonlar kullanıldığında, merkez çizgisi $z = 0$ da yer almaktadır. Ergimiş plastik ile katılaşıp katman arasındaki arayüzey noktasındaki konum ise $z = +h(x, y)$ ve $z = -h(x, y)$ dir. Kalıp boşluğu kalınlığı $2H$ ve herhangi bir

(x,y) noktasındaki ergiyik bölgenin kalınlığı $-h$ ' dan $+h$ ' a kadardır. Eş. 2.7 dz ' ye göre, " $-h$ " den " z " ye integre edilirse;

$$\int_{h^-}^z \frac{\partial P}{\partial x} dz = \int_{h^-}^z \frac{\partial}{\partial z} \left(\eta \frac{\partial u}{\partial z} \right) dz \quad [2.12]$$

$$\frac{\partial P}{\partial x} z = \eta \frac{\partial u}{\partial z} - \left[\eta \frac{\partial u}{\partial z} \right]_{z=h^-} + \left[\frac{\partial P}{\partial x} z \right]_{z=h^+} \quad [2.13]$$

eşitliği elde edilir. Ara işlemlerin yapılmasında takibinin kolaylaşması ve (x,y) ' nin sabit olmasından dolayı, $\left[\eta \frac{\partial u}{\partial z} \right]_{z=h^-} - \left[\frac{\partial P}{\partial x} z \right]_{z=h^+} = A(x,y)$ şeklinde tanımlanabilir.

Eş. 2.13 deki denklemin her iki yanını η ile bölünür ve tekrar integre edilirse,

$$\frac{\partial P}{\partial x} \int_{h^-}^z \frac{z}{\eta} dz = u(z) - u(h^-) - A(x,y) \int_{h^-}^z \frac{dz}{\eta} \quad [2.14]$$

eşitliği elde edilir. Katılaştıran katman ve ergiyiğin yüzeyinde ($z = -h$ ve $z = +h$ ' da) $u=0$ dır. Buna kayma yapışması denir. Benzer işlemler Eş. 2.8 için uygulanırsa,

$$u(z) = \frac{\partial P}{\partial x} \int_{h^-}^z \frac{z}{\eta} dz + A(x,y) \int_{h^-}^z \frac{dz}{\eta} \quad [2.15]$$

Eş. 2.16 ' da verilen hızın y bileşeni elde edilmiş olur.

$$v(z) = \frac{\partial P}{\partial y} \int_{h^-}^z \frac{z}{\eta} dz + B(x,y) \int_{h^-}^z \frac{dz}{\eta} \quad [2.16]$$

Burada, $B(x,y) = \left[\eta \frac{\partial v}{\partial z} \right]_{z=h^-} - \left[\frac{\partial P}{\partial y} z \right]_{z=h^+}$ olarak tanımlanmıştır.

Sınır şartı ($V=0$), $z = +h$ durumunda Eş. 2.15' e uygulanırsa,

$$A(x,y) = -\frac{\partial P}{\partial x} \left\{ \frac{\int_{h^-}^{h^+} \frac{z}{\eta} dz}{\int_{h^-}^{h^+} \frac{dz}{\eta}} \right\} = -\frac{\partial P}{\partial x} C(x,y) \quad [2.17]$$

şeklinde yazılır. Buradaki C terimi ise; $C = \int_{h^-}^{h^+} \frac{z}{\eta} dz / \int_{h^-}^{h^+} \frac{dz}{\eta}$ şeklinde tanımlanmıştır.

Bu sonuçlar kullanılarak Eş. 2.15 ve Eş. 2.16 yeniden düzenlenirse;

$$u(z) = \frac{\partial P}{\partial x} \left[\int_{h^-}^z \frac{z}{\eta} dz - C(x, y) \int_{h^-}^z \frac{dz}{\eta} \right] \quad [2.18]$$

$$v(z) = \frac{\partial P}{\partial y} \left[\int_{h^-}^z \frac{z}{\eta} dz - C(x, y) \int_{h^-}^z \frac{dz}{\eta} \right] \quad [2.19]$$

şeklinde yazılabilir. Ortalama hızlar;

$$\bar{u} = \frac{1}{h^+ - h^-} \int_{h^-}^{h^+} u(z) dz \quad [2.20]$$

$$\bar{v} = \frac{1}{h^+ - h^-} \int_{h^-}^{h^+} v(z) dz \quad [2.21]$$

şeklinde yazılır. $u = z$ ve $v = \int_{h^-}^z \frac{dz}{\eta}$ kabulleri yapıp, gerekli düzenlemelerden sonra,

$$\bar{u} = \frac{-2S_2}{h^+ - h^-} \frac{\partial P}{\partial x} \quad [2.22]$$

$$\bar{v} = \frac{-2S_2}{h^+ - h^-} \frac{\partial P}{\partial y} \quad [2.23]$$

eşitlikleri elde edilir. Eş. 2.22 ve Eş. 2.23' de bulunan S_2 terimi, iki boyutlu akışkanlık terimi olup, Eş. 2.6' da tanımlanmıştır. Eş. 2.1' de verilen süreklilik denklemi, $z = -H$ ve $z = +H$ arasında integre edilirse;

$$\int_{H^-}^{H^+} \frac{\partial u}{\partial x} dz + \int_{H^-}^{H^+} \frac{\partial v}{\partial y} dz = 0 \quad [2.24]$$

olarak yazılır ve sınırlarda (katılan katmanda) $u = v = 0$ olduğundan,

$$= \frac{\partial}{\partial x} \int_{h^-}^{h^+} u dz + \frac{\partial}{\partial y} \int_{h^-}^{h^+} v dz \quad [2.25]$$

$$= \frac{\partial}{\partial x} ((h^+ - h^-) \bar{u}) + \frac{\partial}{\partial y} ((h^+ - h^-) \bar{v}) \quad [2.26]$$

olarak yazılır. Eş. 2.22 ve Eş. 2.23 de verilen ortalama hızlar, Eş. 2.26' da yerine yazılır ve gerekli işlem yapılırsa, basınç terimini içeren süreklilik denklemi;

$$\frac{\partial}{\partial x}(S_2 \frac{\partial P}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(S_2 \frac{\partial P}{\partial y}) = 0 \quad [2.27]$$

şeklinde yazılır (1-11, 14, 15).

Eş. 2.27' de akış alanı merkez çizgisine göre simetrik kabul edilirse, simetri ekseninin bir tarafı hesaplanacağından, sayısal çözümlemede harcanan süre daha da azalmaktadır. Simetri eksenine göre hız, sıcaklık ve viskozite, simetri ekseninde yeniden tanımlanmaktadır. Kalıp boşluğu kesitindeki hız profili, sıcaklık ve viskozite

kalıp boşluğu eksenine göre ($z=0$ da) simetriktir. Böylece, $\frac{\partial u}{\partial z} = \frac{\partial v}{\partial z} = 0$, $\frac{\partial T}{\partial z} = 0$

olur. Viskozitenin simetri eksenindeki tanımından hareketle;

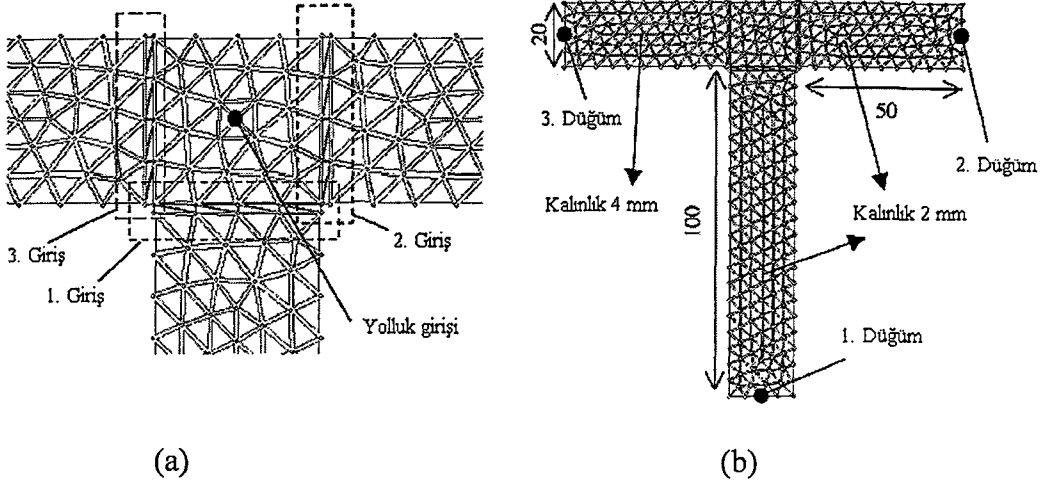
$$\int_{h^-}^{h^+} \frac{z}{\eta} dz = \int_{h^-}^h \frac{z}{\eta} dz = \int_0^h \frac{z}{\eta} dz + \int_{h^-}^0 \frac{z}{\eta} dz = \int_0^h \frac{z}{\eta} dz - \int_0^h \frac{z}{\eta} dz = 0 \quad [2.28]$$

şeklinde yazılabilir. Eş. 2.28 deki ifade akışkanlık teriminde (S_2) yerine yazılır ve ara işlemler yapılırsa, akışkanlık terimi;

$$S_2 = \int_0^h \frac{z^2}{\eta} dz \quad [2.29]$$

olarak yazılır.

Plastik parça üretiminde en çok baş vurulan üretim yöntemlerinden biri olan enjeksiyonla kalıplama yönteminde, üretilecek parçanın kalitesini enjeksiyon parametreleri, giriş sayısı ve girişin konumu gibi faktörler etkilemektedir. Çok karmaşık parçalar ve çok gözlü kalıplarda tasarım aşamasında giriş yeri ve sayısı, üretim sırasında ise enjeksiyon parametrelerinin belirlenmesi oldukça zordur. Hele-Shaw yaklaşımı kullanılarak yapılan matematiksel modellemeye dayanan akış analizinde, Bikas, Pantelelis ve Kanarachos (2) tarafından NASPLAN adlı bir program hazırlanmıştır. Hazırlanan bu program ile, doğrusal olmayan denklemlerin çözümü, giriş yerinin ve sayısının tespiti gibi enjeksiyon parametrelerinin tespiti yapılmıştır.



Şekil 2.2. NASPLAN programı ile analizi yapılan numune, a) Giriş ve yolluk tayini, b) Sonlu Elemanlar için alt bölgelere ayrılmış geometri (2)

En uygun enjeksiyon parametresinin hesaplanması konusunda, üç farklı nümerik optimizasyonla gerçekleştirilen analizin yapıldığı bu çalışmada, Şekil 2.2’ de verilen geometri üzerinde optimizasyon uygulanmıştır. Moldflow analiz programının hazırlandığı ve uygulandığı yöntemin esas alınarak hazırlanan NASPLAN programında, Sonlu Elemanlar Yöntemine göre sayısal olarak çözümleme yapılmıştır. Ayrıca, elde edilen değerler, optimizasyona tabi tutularak en uygun enjeksiyon parametreleri tespit edilmiş ve akış simülasyonu gerçekleştirilmiştir.

Eş. 2.30’ da verilen Cross-WLF viskozite modelinin kullanıldığı viskozite modeli, kayma hızı, basınç ve sıcaklığın bir fonksiyonu olarak bulunan bazı deneysel verilere dayanmaktadır.

$$\eta(T, P, \dot{\gamma}) = \frac{\eta_0(T, P)}{1 + (\eta_0 \dot{\gamma} / \tau^*)^{1-n}} \quad [2.30]$$

Burada referans viskozite olan η_0 , basınç ve sıcaklığın bir fonksiyonu olarak üstel bir formda verilmiştir (Eş. 2.31).

$$\eta_0(T, P) = D_1 \exp \left[-\frac{A_1(T - T^*)}{A_2 + (T - T^*)} \right] \quad [2.31]$$

Burada, $T^* = D_2 + D_3 P$ ve $A_2 = \bar{A}_2 + D_3 P$ olarak tanımlanmıştır. $D_1, D_2, D_3, A_1, \bar{A}_2$ parametreleri polimer veri tabanından alınan ve malzemeye bağlı olan sabitlerdir.

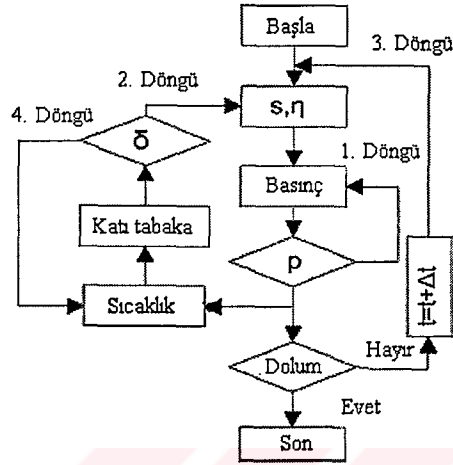
Hook-Jeewes, Kompleks ve Gelişim yöntemi olarak adlandırılan üç farklı nümerik optimizasyon ile, farklı giriş kesitleri kullanılarak yapılan analizde, elde edilen parametreler tekrar tekrar değiştirilerek en uygun parametre ve giriş kesiti tayini yapılmıştır (2). Ayrıca, sıcaklığın dikkate alınmadığı bu çalışmada, plastiğin kalıp boşluğuna akışı sırasında, vakumla destek verilerek, akışın daha kolay olması sağlanmıştır. Buna göre, akış sırasında vakum desteğinin olmasından dolayı, daha düşük basınçlarla kalıplama yapılabilmektedir. Genetik algoritma yöntemine dayanan gelişim optimizasyon tekniği ile yapılan analiz, diğer iki yöntemden daha başarılı sonuçlar vermiştir (2).

Jian ve arkadaşları (3) tarafından yapılan çalışmada, toz enjeksiyonla üretim sırasında enjeksiyon parametreleri ve akış simülasyonu, Hele-Shaw yöntemi kullanılarak çözümlenmiştir. Dar kesitli kalıp içerisindeki ergimiş plastiğin akışkanlığını temsil eden S parametresi, incelenmiştir. Diferansiyel formdaki Hele-Shaw yöntemine ait denklemlerin sayısal çözümleme yöntemi ile çözümlenmesinde, Sonlu Elemanlar Yöntemi kullanılmıştır. Enjeksiyonla kalıplamada, çözümü basitleştirmek için, genellikle kalıp boşluğu içerisindeki akış incelenirken, ergimiş plastik ile soğuk kalıp yüzeyi arasında akış sırasında oluşan katı tabaka, ihmal edilmektedir. İnce kesite sahip kalıp boşluğunda veya akış hattında akış sırasında katı tabaka, hem kesitin daralmasına sebep olmakta hem de ergimiş plastik ile kalıp arasındaki ısı akısını önleyen yeni bir tabaka oluşmaktadır. Katılaştıran tabakadaki sıcaklık dağılımı ve ısı transferi hesabı

$$\rho_s C_p \frac{\partial T_s}{\partial t} = k \frac{\partial T_s}{\partial z_s^2} \quad [2.32]$$

formülü (3) ile hesaplanmaktadır. Yapılan bu çalışmada, içerisinde seramik partiküllerin bulunduğu ve Newtonian olmayan akış özelliğine sahip ergimiş plastiğin akışı, izotermal olmayan şartlar dikkate alınarak, çözülmüş ve akış simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Şekil 2.3' de verilen basit akış şemasında görüldüğü gibi, plastiğin kalıp boşluğundaki akış simülasyonunu yapan program, dört ana kontrol döngüsüne sahip olup, hesaplamalar, geri beslemeli olarak yapılmaktadır. Birinci aşamada iterasyon ile basınç dağılımı hesaplanmaktadır. İkinci adımda, sıcaklık dağılımı hesaplanmaktadır. Üçüncü döngü de ise, zamana bağlı olarak kalıp

boşluğu dolana kadar adım adım akış burnu tayini yapılmaktadır. Dördüncü ve son adımda ise, çözüm sırasında alt bir döngü olarak her adımda geçerli olan katı katman tabakası tayini ve kalınlığı hesaplanmaktadır.



Şekil 2.3. Geliştirilen programın genel akış diyagramı (3)

Ergimiş plastik ile kalıp arayüzeyinde oluşan katılaşmış tabakanın kalınlığı ve konumunun tayininde geçerli olan esas kural, ergiyiğin sıcaklığı kontrol edilerek, camsı geçiş sıcaklığının altına düşmesinin belirlenmesidir. Akışkanın sıcaklığının camsı geçiş sıcaklığına kadar düşmesi durumunda, ergimiş plastik sıvı fazdan katı hale geçeceğinden, hangi noktada katı tabaka oluşup oluşmadığı ve kalınlığının ne olduğu belirlenebilmektedir.

Akış analizinde, seramik parçacıkları taşıyan sıvının yoğunluğu ve ısı iletim katsayısının sabit, akışın sıkıştırılmaz ve simetrik olarak aktığı kabul edilmiştir. Ayrıca, akış üzerinde etkisi olan atalet kuvvetleri ve yer çekimi ihmal edilmiştir. Galerkin Sonlu Elemanlar Yöntemi kullanılarak çözüm yapılan bu çalışmada, kalıp içerisine enjekte edilen akışkan (karışım) için viskozite modeli üç aşamalı olarak hesaplanmıştır. Literatürde, yüzden fazla viskozite modeli bulunmasına rağmen, toz enjeksiyon simülasyonunda başarılı olduğu bilinen, toz, bağlayıcı ve taşıyıcıların hepsini dikkate alan ve daha kullanışlı olan Eş. 2.33, Eş. 2.34 ve Eş. 2.35’ deki viskozite modelleri kullanılmıştır. Birinci aşamada bağlayıcı viskozitesi hesaplanmıştır. Polimerin viskozitesinin dikkate alındığı bu aşama için Eş. 2.33’ de verilen bağıntı kullanılmıştır.

$$\ln \eta_b = \sum_{i=1}^n w_i \ln \eta_i \quad [2.33]$$

$$\eta_f = \eta_0 \left(1 - \frac{\phi}{\phi_m} \right)^{-2} \quad [2.34]$$

$$\eta = \eta_0 \exp \left(\frac{E}{k} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right) \quad [2.35]$$

Eşitlik 2.34' de besleyici viskozitesi Eş.. 2.35 de ise saf bağlayıcının (polimer) viskozitesi hesaplanmıştır. Viskozitelerin hesaplanmasında kullanılan bu eşitliklerde η_i polimerin viskozitesini temsil etmekte, w_i karışım içerisindeki polimerin ağırlığını, η_b bağlayıcının viskozitesini, η_f taşıyıcının viskozitesini ϕ taşıyıcıya eklenen toz malzemeyi ϕ_m maksimum toz miktarını temsil etmektedir. Eşitlik 2.35' deki E viskoz akışkanın aktivasyon enerjisini, k Boltzmann sabitini, T sıcaklığı, η ve η_0 ise saf polimerin viskozitesini temsil etmektedir. C++ programlama dilinin kullanıldığı bu çalışmaya göre, en uygun akışkanlık tanımı ve hesaplanması

$S(z) = \int_0^{h-z} (z^2 / \eta) dz$ formülü ile gerçekleştirildiği tespit edilmiştir. Ayrıca, Hele-Shaw yaklaşımının temelini oluşturan, süreklilik denkleminin, akışkanlığı da içeren basınç denkleminin dönüşmesi ile elde edilen basınç denklemi ve enerji denkleminin analizde en önemli eşitlikleri oluşturduğu belirtilmektedir (3).

Kalıp geometrisi ve giriş sayısının, enjeksiyon parametrelerine etkilerinin araştırıldığı çalışma, Garcia ve arkadaşları (4) tarafından yapılmıştır. Ergimiş polimerin kalıp boşluğunu doldurma safhasının incelendiği bu çalışmada, girişin yeri, sayısının ve kalıp boşluğu geometrisinin kalıp boşluğunun dolmasına etkileri araştırılmıştır. Geometrik veriler ile Skeleton dönüşümü ve Hausdorff mesafesi parametrelerinin Hele-Shaw yönteminde kullanılması ile yapılan analizde, geometrik veriler ile Skeleton dönüşümü ve Hausdorff mesafesi arasında bir ilişki olduğu tespit edilmiştir (4). Dikdörtgen, kare, ve L şeklinde boşluk ve disk şeklindeki bir geometrinin incelendiği çalışmada, kalıp boşluğunun geometrisi ile akış parametreleri arasındaki ilişkinin yüksek olduğu ve geometriye bağlı olarak Hausdorff mesafesinin etken olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, en iyi etkinin disk

şeklindeki geometride ve en uygun Hausdorff mesafesinin, optimum giriş yeri tespitinden sonra bulunduğu belirtilmektedir.

Plastik parçaların kalıptan çıkarıldıktan sonra çarpılma ve büzülmelerinin sebebi, tutma basınçları safhasında, kalıp boşluğunda özdeş olmayan basınç ve sıcaklık dağılımının etkin olmasıdır (5, 6). Plastik parçaların enjeksiyonla kalıplama yöntemi ile üretilmeleri işleminde enjeksiyon parametrelerinden kaynaklanan çarpılmalar ve kalıcı gerilmeler, sadece uygun enjeksiyon parametrelerinin seçilememesinden değil, aynı zamanda kalıp yüzeylerinin özdeş soğutulamamasından kaynaklanmaktadır. Lee (7) tarafından Hele-Shaw yaklaşımı ve Sonlu Elemanlar yöntemi kullanılarak yapılan çalışmada, kalıbın dolum aşaması ve tutma basınçları safhası incelenmiş. Böylece, kalıplanan plastik parçanın kalıptan çıkarıldıktan sonra ısı etkenlerinden kaynaklanan kalıcı gerilmelerinin etkileri tespit edilmiştir. Lee tarafından geliştirilen program ile çekme deney numunesi ve “C” geometrisinde kalıp boşluğu hazırlanıp hem teorik analiz yapılmış, hem de deneysel olarak incelenmiştir.

Akış analizi için, belirli kabuller ve sınır şartları ile sadeleştirilmiş Stokes eşitliğinden elde edilen Hele-Shaw yaklaşımı kullanılmıştır. Hele-Shaw yaklaşımından elde edilen ve akışkanlık ile basınç terimlerini içeren süreklilik denklemi ile hızlar için simetrik sınır şartlarının kabul edildiği momentum denklemi birleştirilerek

$$\frac{\partial}{\partial x}(S_2 \frac{\partial P}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(S_2 \frac{\partial P}{\partial y}) = G \frac{\partial P}{\partial t} + F \quad [2.36]$$

denklemini elde edilmiştir. Burada,

$$S = \int_0^b \rho \int_{\frac{z}{\eta}}^{\frac{z}{\eta}} dz d\bar{z} \quad [2.37]$$

$$G = \int_0^b \left(\frac{\partial \rho_l}{\partial P} \right) \tau dz + \int_{\delta}^b \left(\frac{\partial \rho_s}{\partial P} \right) \tau dz \quad [2.38]$$

$$F = \int_0^b \left(\frac{\partial \rho_l}{\partial T} \right) p \frac{\partial T}{\partial t} dz + \int_{\delta}^b \left(\frac{\partial \rho_s}{\partial T} \right) p \frac{\partial T}{\partial t} dz + (\rho_l - \rho_s)_{z=\delta} \frac{\partial \delta}{\partial t} \quad [2.39]$$

olarak tanımlanmıştır (7). Eş. 2.37 -Eş. 2.39 denklemlerinde bulunan b kalıp boşluğu kalınlığının yarısını, δ ergiyik sıvı ve katı arayüzeyi koordinatını, l sıvı fazı ve s ise katı fazı temsil etmektedir.

Plastikler, yapıları gereği kayma hızına bağlı olarak, kayma incelmesi olarak ta bilinen değişken bir iç gerilmeye sahiptir. Makro moleküllerden oluşan, doğrusal uzun zincirlere sahip plastikler, üzerine uygulanan gerilme ile hareket etmektedir. Kayma hızına bağlı olarak, akış sırasında kritik değerlerde, uzun zincirler tam doğrusal hale geldiklerinde, akmaya karşı oluşan iç direnç azaldığından akışkanın viskozitesi düşmektedir. Kayma incelmesi olarak da bilinen bu durum, aslında polimerlerin akışının çok daha karmaşık hale gelmesine sebep olmaktadır.

Lee tarafından yapılan bu çalışmada, Eş. 2.39' da verilen akış analizinde kayma incelmesini de dikkate alarak analiz yapabilmek için Düzeltilmiş Cross viskozite modelinin kullanıldığı tespit edilmiştir (7).

$$\eta(\dot{\gamma}, T, P) = \frac{\eta_0(T, P)}{1 - (\eta_0 \dot{\gamma} / \tau^*)^{1-n}} \quad [2.39]$$

Eş. 2.39' da bulunan ve amorf yapıdaki termoplastiklerin sıfır kayma hızındaki viskoziteleri Eş. 2.40' da verilen bağıntı ile hesaplanmıştır.

$$\eta_0 = \begin{cases} D_1 \exp \left[\frac{A_1(T - T^*)}{A_2 + (T - T^*)} \right] & T > T^* \\ \infty & T \leq T^* \end{cases} \quad [2.41]$$

Ayrıca, tutma basınçları safhasında kullanılan sıkıştırılabilirlik ve genleşme katsayılarının elde edilmesi için, basınç-hacim ve sıcaklık ilişkisini (Pressure-Volume-Temperature, PVT) deneysel verilere dayalı olarak veren Tait eşitliği kullanılmıştır. Tait eşitliği,

$$v(P, T) = (a_{0s} + a_{1s}(T - T_g))(1 - 0,0894 \ln(1 + \frac{P}{B_s})) \quad (T \leq T_g) \quad [2.42.a]$$

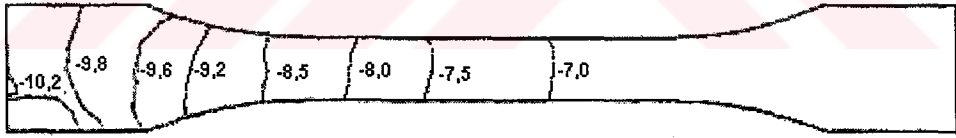
$$v(P, T) = (a_{0m} + a_{1m}(T - T_g))(1 - 0,0894 \ln(1 + \frac{P}{B_m})) \quad (T > T_g) \quad [2.42.b]$$

şeklinde ifade edilmiştir (7). Eş. 2.39-Eş. 2.41’de bulunan ve deneysel olarak elde edilmiş sabit sayılar, Çizelge 2.1’ de verilmiştir. Eş 2.42.a ve Eş 2.42.b’ de ikinci alt indis olarak verilen s ve m indisleri, sırasıyla katı ve ergiyiği temsil etmektedir.

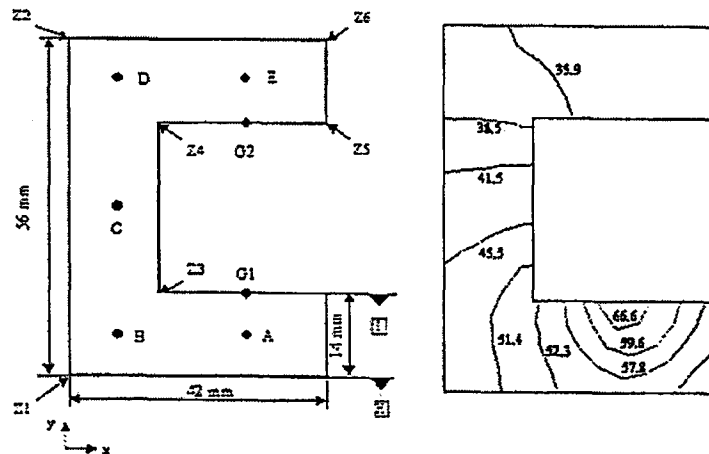
Çizelge 2.1. Düzeltilmiş Cross Model ve Tait eşitliğinde bulunan sabit sayılar (7)

Düzeltilmiş Cross model için sabitler	n	0,28466	Tait eşitliği için verilen sabit sayılar		Ergiyik	Camsı geçiş
	τ^* (Pa)	$9,357 \times 10^4$		a_0 (m ³ /kg)	$9,8266 \times 10^{-4}$	$9,8266 \times 10^{-4}$
	D_1 (Pa.s)	$2,21 \times 10^{12}$		a_1 (m ³ /kgK)	$5,84 \times 10^{-7}$	$4,15 \times 10^{-7}$
	D_2 (K)	373,150		B_0 (Pa)	$2,16 \times 10^8$	$4,61 \times 10^8$
	D_3 (K/Pa)	0		B_1 (1/K)	$4,9743 \times 10^{-3}$	$2,888 \times 10^{-3}$
	A_1	30,106		T_∞ (K)	363,150	
	A_2	51,600		B_2 (K/Pa)	$3,42 \times 10^{-7}$	

Şekil 2.4 de görülen çekme deney numunesi ve Şekil 2.5’ de verilen C geometrisindeki boşluklar için farklı giriş noktaları kullanılarak dolum analiz yapılmıştır.



Şekil 2.4. Çekme deney numunesi biçimindeki kalıp boşluğu ve giriş noktaları (7)



Şekil 2.5. C geometrisindeki kalıp boşluğu ve giriş noktaları (7)

Yapılan analizde, basınç terimi ve ısı kalıcı gerilmelerin hesaplanmasında Sonlu Elemanlar yöntemi, akış burnu tayininde ise, Sonlu Kontrol Hacmi yöntemi kullanıldığı görülmektedir. Sayısal çözümlemede, her bir zaman aralığında, kalıp boşluğunda oluşan basınç, hız ve sıcaklık değerleri hesaplanmıştır. Basınç ve sıcaklık terimleri, kalıcı gerilme ve deformasyon analizinin hesaplanmasından elde edilmiştir.

Çalışmada, deformasyon analizinde,

$$\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} = 0 \quad \text{ve} \quad \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} = 0 \quad [2.43]$$

eşitlikleri kullanılmıştır. Gerilim-yer değiştirme ilişkisi,

$$\varepsilon_{xx} = \frac{\partial \delta_x}{\partial x}, \quad \varepsilon_{yy} = \frac{\partial \delta_y}{\partial y}, \quad 2\varepsilon_{xy} = \frac{\partial \delta_x}{\partial y} - \frac{\partial \delta_y}{\partial x} \quad [2.44]$$

şeklinde ifade edilmiştir. Gerinim-gerilme ilişkisi ise,

$$\sigma = C(\varepsilon - \varepsilon_o) + \sigma_o = C\varepsilon - f \quad [2.45]$$

olarak tanımlanmıştır. Buradaki gerilme ve gerinim terimleri ise sırasıyla,

$$\sigma = \{\sigma_{xx} \quad \sigma_{yy} \quad \sigma_{xy}\}^T \quad [2.46]$$

$$\varepsilon = \{a \Delta T a \Delta T 0\}^T \quad [2.47]$$

olarak yazılmaktadır. Eşitlik 2.47 deki “a” terimi doğrusal genleşme sabiti olup, Tait eşitliğinden elde edilmektedir. Malzemenin elastikiyet sabiti C ile gösterilmiş olup, δ_x ve δ_y ise, sırasıyla x ve y doğrultularındaki yer değiştirmeleri temsil etmektedir. Yapılan sayısal analize göre, kalıp içerisindeki basınç değişiminin ilk 2 saniyeden sonra azaldığı ve en büyük değerinin girişe yakın bölgede yer aldığı belirtilmektedir.

Chiang, Hieber ve Wang tarafından yapılan iki farklı çalışmada, Hele-Shaw yaklaşımı kullanılarak, plastiğin kalıp içerisindeki akışı modellenmiştir (8, 9). İki aşamalı olarak yapılan çalışmanın birinci aşamasında, ergimiş plastiğin kalıp boşluğunu doldurma safhası sıkıştırılamaz akış olarak analiz edilmiştir (8). Fakat, kalıp boşluğunun dolması işleminden sonra, “Newtonian” ve “isothermal” olmayan akış özelliği gösteren plastiğin akışı, sıkıştırılabilir akış olarak ele alınmıştır. Eş. 2.36 - Eş. 2.39’ da görüldüğü gibi akışkanlık ve basınç terimini içeren süreklilik

denklemine yoğunluk terimi eklenerek G ve F katsayıları hesaplanmıştır. Bu nedenle Hele-Shaw yaklaşımında ihmal edilen yoğunluk, Eş. 2.38' de G sayısı içinde basıncın bir fonksiyonu olarak Eş. 2.39' da ise F sayısı içinde sıcaklığın bir fonksiyonu olarak hesaplamalara dahil edilmektedir. Ayrıca, plastiğin hem katı halindeki yoğunluğu hem de sıvı ergimiş haldeki yoğunluğu dikkate alınmaktadır. Viskozite modeli olarak literatürde, en sık kullanılan modellerden olan ve bazı parametreleri deneysel verilere dayanan, Cross Model kullanıldığı tespit edilmiştir. PVT ilişkisini hesaplayabilmek için, Tait eşitliğinden yararlanılmıştır.

$$Cp(T) = c_1 + c_2 \tilde{T} + c_3 \tanh(c_4 \tilde{T}) \quad [2.48]$$

$$Cp(T) = c_1 + c_2 \tilde{T} + c_3 \exp h(-c_4 \tilde{T}^2) \quad [2.49]$$

Eş. 2.48' de verilen denklemde, amorf yapıdaki akışkanlar için sıcaklığın bir fonksiyonu olan ısınma ısısı, Eş. 2.49' da ise, yarı kristal malzemeler için Cp değeri verilmiştir. Burada, $\tilde{T} = (T - c_5)$ ' e eşit olup, c sayıları ise sabitlerdir. Bunun yanında,

$$k(T) = \lambda_1 + \lambda_2 \tilde{T} + \lambda_3 \tanh(\lambda_4 \tilde{T}) \quad [2.50]$$

eşitliği ile sıcaklığın bir fonksiyonu olan ısı iletim katsayısı hesaplanmaktadır. Böylece, akış sırasında ısı transferinden dolayı sıcaklığı değişen ergimiş polimerin sıcaklık değişimine bağlı olarak, kalıp yüzeylerine temas eden yerlerdeki katılaşmış tabaka ile sıvı fazdaki tabakanın hem ısınma ısısını hem de ısı iletim katsayısını birbirlerinden farklı olarak değerlendirmek mümkün olmaktadır. Yapılan çalışmaların büyük bir yoğunluğunda, sıcaklık değişimine bağlı olarak değişen, ısınma ısısı ve ısı iletim katsayısının değişiminin dikkate alındığı tespit edilmiştir.

Çalışmanın ikinci aşamasında ise, kılcal reometre yardımı ile viskozite tayini yapılmıştır. Bunun yanında, ticari olarak yayınlanan değerlerden yararlanılarak PVT verileri belirlenmiştir. Çok sayıda PVT verilerinin arasından en uygun değerlerin tespiti için, Eğri Benzetme Tabanlı Simplex Optimizasyon yöntemi kullanılarak, değerler optimizasyona tabii tutulmuşlardır. Ayrıca, yapılan çalışmada sıcaklık-ısınma ısısı ve sıcaklık-ısı iletim katsayısı arasındaki ilişki grafik şeklinde verilmiştir.

Subbiah ve arkadaşları (15) yaptıkları çalışmada, Şekil 1-b' deki gibi ince kesitli ve düzgün olmayan bir geometrik şeklin, enjeksiyonla kalıplamada ergimiş plastikte doldurulmasını Hele-Shaw modelini kullanarak incelemişlerdir (15). Sayısal ızgara oluşturma tekniği ile de akış burnunun tespitinin yapıldığı çalışmada, iki boyutlu düzensiz şeklin içinde ergimiş plastiğin nasıl aktığı, zamana göre ilerlemesi, basınç ve sıcaklık dağılımları gibi parametreler elde edilmiştir.

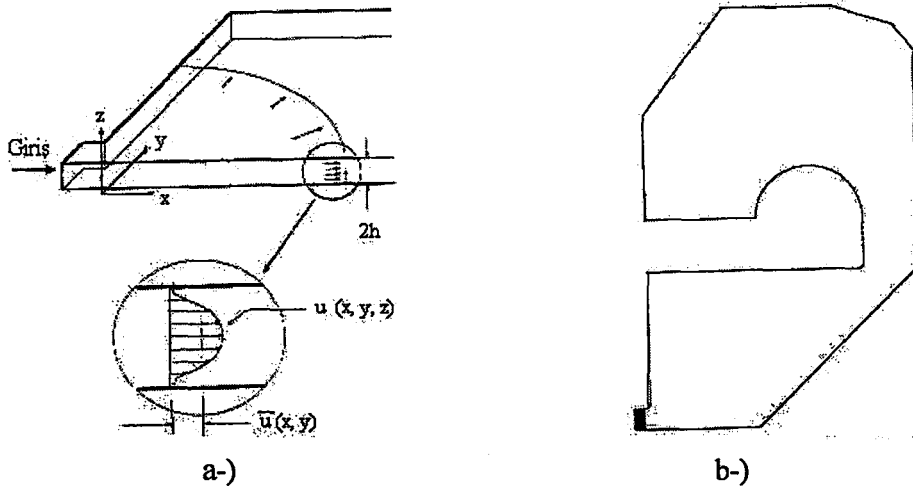
Genelleştirilmiş Hele-Shaw yaklaşımının esas alındığı bu çalışmada, Şekil 2.6 a' daki ince kesitli kalıp boşluğundaki akışı simüle etmek için Eş. 2.22 ve Eş. 2.23 de verilen ortalama hızlar kullanılmıştır. Ortalama hızlar, Eş. 2.51' deki gibi tekrar "streamline fonksiyonu" olarak tanımlanmıştır.

$$\bar{u} = \frac{\partial \psi}{\partial y} \quad \bar{v} = -\frac{\partial \psi}{\partial x} \quad [2.51]$$

Akışkanlık ve basınç terimini içeren Eş. 2.27'deki süreklilik denklemi, Eş. 2.51' deki ortalama hızlara göre yeniden yazılırsa,

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{S} \frac{\partial \psi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{S} \frac{\partial \psi}{\partial y} \right) = 0 \quad [2.52]$$

elde edilir.



Şekil 2.6. Subbiah ve arkadaşları tarafından analizi yapılan geometri ve kesiti
a) 2h yüksekliğindeki kalıp boşluğunun kesiti ve hız profili, b)
Çalışılan geometrik şekil (15)

Kalıp yüzeylerindeki ψ değerinin sabit olduğu, ve girişte ve serbest yüzeylerde ise $\frac{\partial \psi}{\partial n}$, in sıfır olduğu sınır şartlarına göre denklem takımları çözümlenmektedir. Newtonian olmayan akış özelliği gösteren ergimiş plastiğin viskozitesi, Eş. 2.53' de verilen Carreau viskozite modeli kullanarak hesaplanmaktadır.

$$\eta(\dot{\gamma}) = \eta_{\infty} + (\eta_0 - \eta_{\infty})[1 + (\lambda\dot{\gamma})^2]^{(n-1)/2} \quad [2.53]$$

Eş. 2.53' de, sonsuz viskozite (η_{∞}) olarak tanımlanan terim, sıcaklığa bağlı olarak bulunan ve Eş. 2.54 de verilen Arrhenius metoduna göre hesaplanmıştır.

$$\eta_{\infty} = \eta(\dot{\gamma}) \exp \left[\frac{A_n(T - T_0)}{T_0} \right] \quad [2.54]$$

Akış burnunun tayininde sayısal ızgara oluşturma tekniği kullanılmıştır. Sayısal ızgara oluşturma tekniği, Şekil 2.7' de görüldüğü gibi, kalıp boşluğu geometrisine bağlı olarak, her bir zaman aralığı için hesaplanarak, kontrol hacminde ızgara sınırları belirlenmektedir. Sayısal ızgara oluşturma yönteminde, koordinat sisteminde x, y yerine, hesaplamalar için ξ ve η kullanılarak ızgara kontrol fonksiyonları (P, Q) belirlenmiştir. Buna göre, ızgara kontrol fonksiyonları,

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \xi}{\partial y^2} = P \quad [2.55]$$

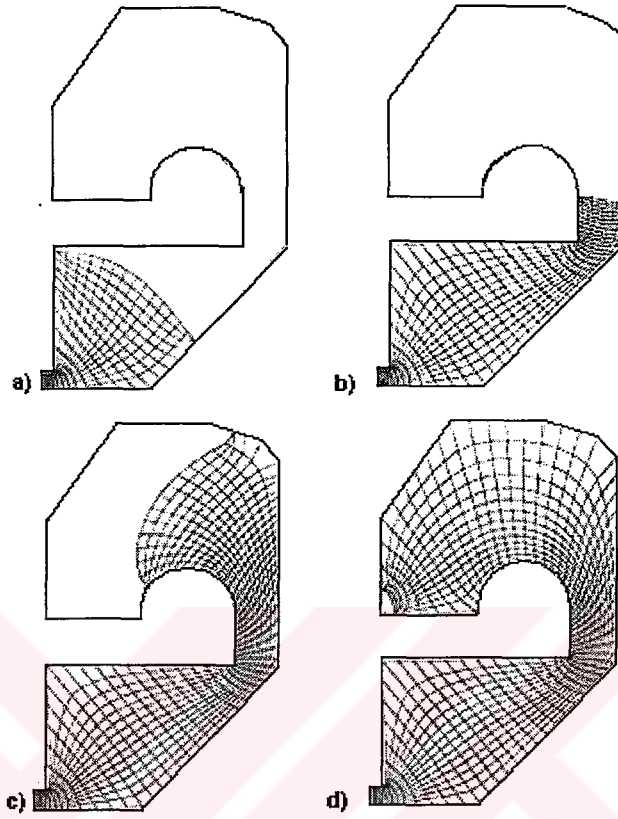
$$\frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \eta}{\partial y^2} = Q \quad [2.56]$$

olarak tanımlanmıştır. Hareketli akış burnu tayini için birden fazla koordinat sistemi kullanılarak yapılan hesaplamada, ikinci dereceden transformasyon dönüşümü yapılmaktadır.

$$\alpha x_{\xi\xi} - 2\beta x_{\xi\eta} + \gamma x_{\eta\eta} + J^2(Px_{\xi} + Qx_{\eta}) = 0 \quad [2.57]$$

$$\alpha y_{\xi\xi} - 2\beta y_{\xi\eta} + \gamma y_{\eta\eta} + J^2(Py_{\xi} + Qy_{\eta}) = 0 \quad [2.58]$$

Eş. 2.57 ve Eş. 2.58' de $\alpha = x_{\eta}^2 + y_{\eta}^2$, $\beta = x_{\xi}x_{\eta} + y_{\xi}y_{\eta}$ ve $\gamma = x_{\xi}^2 + y_{\xi}^2$ geometrik katsayılar olarak tanımlanmış, J ise iki boyutlu Jacobi transformasyonu olup, $J = x_{\xi}y_{\eta} - x_{\eta}y_{\xi}$ olarak ifade edilmektedir.



Şekil 2.7. Sayısal ızgara oluşturma tekniği ile ergimiş plastiğin kalıp boşluğunda zamana göre ilerlemesi (15)

Genelleştirilmiş Hele-Shaw akış modeli kullanılarak yapılan analizde, hazırlanan TGMOLD ald program yardımı ile enerji denklemi üç boyutlu olarak ele alınmış, temel denklemler Sonlu Farklar yöntemine göre çözümlenmiş olup, ızgara kontrol fonksiyonları hesaplanırken, genelleştirilmiş Upwind metodu ile diferansiyel ifadeler cebirsel hale dönüştürülmüştür. Temel denklemlerin çözümünde, iki sınır şartı kullanılmıştır. Birincisi, kalıp yüzeylerinde tanımlanmış olup, Dirichlet sınır şartı kullanılmıştır. İkincisi ise, akış burnunun tayininde Neuman sınır şartı kullanılmıştır. Analizi ve simülasyonu yapılan ergimiş plastiğin akış şekli, sıcaklık ve basınç dağılımı tespit edildikten sonra ticari programlarla da karşılaştırılmıştır. TGMOLD programı sonuçları ile simülasyon programlarının sonuçlarının birbirlerine oldukça yakın olduğu yapılan çalışmada vurgulanmıştır.

Genleştirilmiş Hele-Shaw yaklaşımının kullanıldığı ve literatürde bir çok araştırmada referans olarak gösterilen ve Hieber ve Shen tarafından yapılan araştırmada, düzensiz bir kalıp boşluğunda ergimiş plastiğin akışının analizi yapılmıştır (16). Kalıp boşluğu dolana kadar geçen sürenin incelendiği bu çalışmada, basınç teriminin hesaplanmasında Sonlu Elemanlar, sıcaklık dağılımının hesaplanmasında ise Sonlu Farklar yöntemleri bir arada kullanılmıştır. İki boyutlu olarak çözülen ve viskozite modeli olarak Power-Law modelinin kullanıldığı bu çalışmada, Hele-Shaw yaklaşımının en önemli unsuru olan basınç terimlerinin hesaplanması için hız profillerinin belirlenmesinde temel denklem takımları, “streamline fonksiyonu” şekline dönüştürülmüştür. Subbiah ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada olduğu gibi, süreklilik denklemi, Eş. 2.51’ deki tanımlamalardan sonra Eş. 2.52’ deki forma dönüştürülmüş ve akışkanlık terimleri hesaplanarak basınç terimleri bulunmuştur. Subbiah ve arkadaşlarının yaptığı çalışmanın aksine, Hieber ve Shen, Power Law viskozite modelini kullanmış, akış burnunun konumunu ve hareketlerini de sayısal ızgara oluşturma tekniği yerine, Sonlu Elemanlarla akışın olup olmadığının kontrolü ile hesaplamıştır.

Sonlu Farklar yöntemi kullanılarak enerji denkleminin çözülmesiyle bulunan ergimiş plastiğin sıcaklığı, her adımda tüm nokta için hesaplanmıştır. Böylece, sıcaklık değişiminin viskozite üzerindeki etkisi belirlenmiş olup, akış üzerinde en etkin parametrelerden biri olan viskozitenin değişimi tespit edilmiştir. İki boyutlu kontrol hacmi için yapılan sayısal analiz ve simülasyonda, kalıp boşluğu dolana kadar geçen süre incelendiğinden akışkan sıkıştırılmaz kabul edilmiştir. Bu nedenle yoğunluk sabit kabul edilmiştir. Ayrıca, ısınma ısı ve ısı iletim katsayılarının da sıcaklık karşısında değişmediği kabul edilerek hesaplamalar yapılmıştır. Basınç sensörleri ve kısa basışlarla elde edilen deneysel çalışmalarla da, kontrol hacmindeki basınç dağılımları ve akış burnu ilerlemesi tespiti yapılarak teorik olarak elde edilen bulgularla karşılaştırılmıştır.

Basınç ve sıcaklık değişiminin akış sırasında akışı etkileyen en önemli parametre olduğu, bu nedenle, kalıp boşluğu dolarken plastik parçanın çarpılmalarını en aza indirmek için basıncın zamana karşı sürekli değişen bir şekilde ayarlanmasıyla

kalıplanan plastik parça kalitesinin arttığı belirtilmiştir (12, 15). Chen ve arkadaşları (17) tarafından yapılan ve Hele-Shaw yaklaşımının kullanıldığı çalışmada, basınç ve sıcaklık değişiminin akış parametreleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Bu çalışmaya göre, kalıp boşluğu dolana kadar geçen sürede akış sıkıştırılmaz kabul edilmekle beraber, tutma basınçları safhasında sıcaklık değişiminin yoğunluk üzerindeki etkisinin fazla olduğu, bunun, katılma sırasında büzölmelere neden olduğu belirtilmektedir.

Stokes denklemlerinden belirli sınır şartları, bazı kabuller ve ihmallerin yapılması sonucu elde edilen Hele-Shaw metodu ile yapılan analizler, akışın iki boyutlu olduğunu, parça kalınlığının parça uzunluğu ve genişliğinin yanında ihmal edilebilir olduğu kabul edilmiştir (1-13). Kalıp boşluğu dolana kadar geçen sürede akışın sıcaklık karşısındaki değişimi sadece viskozite değişimi ile sınırlı olup, yoğunluğun değişiminin ihmal edilmesi esas alınmıştır (1). Ergimiş plastiğin gerçek akışında plastiğin sıcaklığının değişimi ile yoğunluk değişmektedir. Fakat Newtonian olmayan akış özelliği gösteren ve doğrusal olmayan diferansiyel denklem takımlarının sayısal olarak çözümünün kolaylaşması, hem de zaman olarak daha kısa sürede sonuç alınabilmesi bakımından denklemler sadeleştirilmiştir (1, 3, 5-9). Ayrıca, yine Hele-Shaw metodunun kabullerinden biri olan parça kesitinde akışkanın, parça kesitine göre simetrik olduğu düşünölerek, denklem takımları sadece simetrik eksenin bir tarafı için çözümlenmiştir (1, 7-16, 15). Enjeksiyon kalıbı tasarımında, kalıp boşluğu içerisindeki ergimiş plastiğin en kısa sürede soğutularak bir parça üretiminin tüm safhalarını kapsayan ve çevrim olarak bilinen parça üretim zamanını en aza indirmek, tasarımcı için hayati önem arz etmektedir (2). Plastik parça birim maliyetini de etkileyen çevrim zamanının an aza indirilmesinde, kalıbın soğutularak ergimiş plastiğin kalıp boşluğunda en kısa sürede soğuması sağlanmaktadır. Kalıbın yapısı, kalıp boşluğunun geometrisi ve kalıp gözü sayısına bağlı olarak, çok değişik şekillerde tasarlanan soğutucu sistemden ve içerisine plastik enjekte edilen kalıp çekirdeğinin farklı kesitlerde olmasından dolayı kalıp, özdeş olarak soğutulamamaktadır. Özdeş olmayan bir soğutmanın sonucu, kalıp yüzeylerinde farklı sıcaklıklar oluşmaktadır. Bu nedenle, plastik parça kesitinin simetrik olduğu kabul edilerek yapılan sadeleştirmeler, sayısal analiz sonucu elde

edilen akış ve simülasyon verilerinin gerçek akıştan uzaklaşmasına sebep olmaktadır (18-21).

2.2. Navier-Stokes Eşitlikler Kullanılarak Yapılan Analizler

Kayma gerilmesi ile kayma hızı arasında doğrusal bir ilişki olmamasından dolayı, Newtonian olmayan akış olarak tanımlanan, ergimiş plastiklerin akışının incelenmesi ve simülasyonunda, Hele-Shaw yaklaşımının yanında Navier-Stokes eşitliklerinin kullanılmasıyla da sayısal çözümler yapılmaktadır. Navier-Stokes eşitliklerinin çözümlenmesi ile yapılan analizlerde ise, bu terimler genellikle ihmal edilmemiş olup, diferansiyel denklem takımları, tanımlanan sınır şartlarına bağlı olarak ayrıklaştırma işlemine tabi tutulmaktadır (22, 23). Ayrıca, Hele-Shaw metodunda incelenen kontrol hacmi üç boyutlu da olsa akış, iki boyutlu gibi çözülmekte, plastik parçanın kalınlığını temsil eden üçüncü boyuttaki akışın fazla değişmediği ve simetrik akış olduğu kabul edilmektedir. Üçüncü boyutun ihmal edilmesi yerine, kalınlığa bağlı olarak bulunan akışkanlık terimi hesaplanmaktadır (1, 2, 6-16).

Bölüm 3' de detaylı açıklaması verilen Momentum denklemlerindeki akışkan kütlelerine etki eden tüm parametreler, denklem içerisinde bulunmakta ve akış üç boyutlu olarak analiz edilebilmektedir (19-27, 30-32). Analizi yapılan plastik parçanın kalınlığının artması, uniform soğutmanın olmaması ve viskoz kuvvetlerle atalet kuvvetlerinin etken olduğu durumlarda, Navier-Stokes eşitliklerini kullanmak daha sağlıklı sonuçlar vermektedir (23, 26). Navier-Stokes eşitlikleri kullanılarak yapılan analizlerde, doğrusal olmayan denklem takımlarının çözümü için bir çok sayısal çözümleme metotları uygulanmaktadır (23-27, 30). Temelde Sonlu Farklar ve Sonlu Elemanlar gibi sayısal çözümleme metotları uygulanırken, içerisinde çok sayıda diferansiyel terimlerin bulunduğu Navier-Stokes denklemleri, Hele-Shaw yönteminde olduğu gibi belirli kabuller, etkisinin az olduğu düşünülen parametrelerin ihmal edilmeleri, tanımlamalar ve sınır şartlarına bağlı olarak sadeleştirilebilmektedir (25). Ergimiş plastik akışı ve bu tip viskoelastik akışlarda, Navier-Stokes eşitlikleri ve sayısal çözümleme tekniği olarak da Sonlu Elemanlar ve Sonlu Farklar yöntemleri kullanılmaktadır (19-21, 23-29).

Diferansiyel denklem takımlarının çözümünde, hem uygulanması hem de hesapların daha basit olması nedeniyle, Sonlu Farklar yönteminin kullanıldığı çok sık görülmektedir (19-21, 23, 30). Sonlu Elemanlar yönteminde, kontrol hacminin alt bölgelere ayrılarak hesaplama yapılması ve hesaplanan değerin kapalı bir alan için yapılmasıyla hata en aza indirilmektedir (7, 15, 16, 25). Uygulamadaki zorluklar nedeniyle bir çok çalışmada, araştırmacının akışı etkileyen parametrelerde en etkin kabul ettiği parametrenin hesaplanmasında Sonlu Elemanlar, diğer parametrelerin hesaplanmasında, Sonlu Farklar yöntemleri kullanılmaktadır (7, 16). Her iki metodun bir arada kullanıldığı (hybrid) melez yöntemlerle de sayısal analizler yapılabilmektedir (1, 7, 16). Sonlu Farklar yöntemlerinde olan Sonlu Kontrol Hacmi metodunda ise, çözüm alanı (kontrol hacmi), klasik Sonlu Farklar gibi ızgaralara ayrılmaktadır. Izgara üzerindeki düğüm noktalarının değerleri hesaplanırken, iki düğüm noktası arasında, difüzyon arayüzeyi oluşturulmaktadır. Diferansiyel ifadeler, bu iki difüzyon yüzeyi arasında integre edilerek cebirsel forma dönüştürülmektedir (22, 23). Hesaplanması gereken parametre, genel Sonlu Farklar metodunun ızgara mantığı ve iki arayüzey arasındaki sınırlardan oluşan alanda integre edilerek hesaplandığından, hem ızgara mantığı hem de alan mantığı bir arada kullanılmış olmaktadır. Hem uygulanmasının basit oluşu, hem de akış burnunun tayininde çok iyi sonuçlar vermesi bakımından, simülasyonlarda çok sık baş vurulan bir yöntemdir (4, 11, 19-21, 24, 27-30).

Çok boyutlu ve karmaşık geometrilerin hesaplanmasında, hem konveksiyon terimlerini hesabı hem de diğer parametrelerin hesaplanması, bilgisayar belleğinin çalışma yoğunluğunu artırmakta ve hesaplama işlemi uzun sürmektedir (20). Xue ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, Navier-Stokes denklemlerini yüksek mertebeden konveksiyon interpolasyonu ile Kapalı Sonlu Hacim (Kontrol Hacmi) metoduna göre çözümleme yaparak, çok boyutlu viskoelastik akışkanın akışını incelemişlerdir (21). Analizlerde hesaplamaların uzun zaman alması doğrusal olmayan denklem takımlarının çözüm metotlarına bağlıdır. Bu nedenle, Xue ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada, sayısal çözümlemeden kaynaklanan hata paylarını en aza indirmek ve kararlılığı sağlamak için, yüksek mertebeden Kapalı Sonlu Hacim metoduyla çözümleme yapılmıştır. Düşük dereceden çözüm yöntemi olan Sonlu

Kontrol Hacminde, cebirsel ifadelerdeki katsayıların bulunmasında kullanılan Power-Law yöntemi ile, yüksek mertebeli yaklaşım karşılaştırılmıştır.

Genel kütle ve ısı transferini modelleyen konveksiyon-difüzyon denklemi Eş. 2.59' da verilmiştir.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\Lambda \Phi) = -\nabla \cdot (\Lambda u \Phi) + \nabla \cdot (\Gamma \nabla \Phi) + S_\Phi \quad [2.59]$$

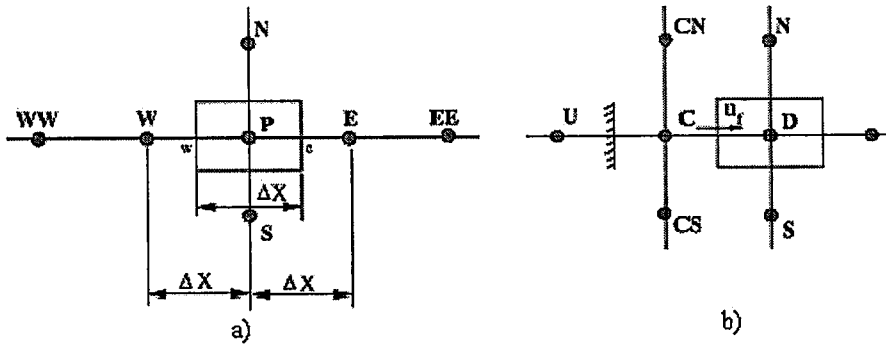
burada, t zaman, u hız vektörü, Φ bağımlı değişken ve diğer terimler ise vektör ve tensörleri temsil etmektedir. Λ ve Γ farklı anlamlar ifade etmekte olup, her bir değişken için farklı anlamlar taşımakta, S ise kaynak terimini ifade etmektedir. Genelleştirilmiş Sonlu Hacim metodunda Eş. 2.59' da verilen genel denklem, Eş. 2.60' da ki formda yazılmaktadır.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\Lambda \Phi) = -\frac{\partial}{\partial x}(\Lambda u \Phi) + \frac{\partial}{\partial x}(\Gamma \frac{\partial \Phi}{\partial x}) + S \quad [2.60]$$

Eş. 2.60' da ki tek boyutlu konveksiyon ve difüzyon denklemi, Şekil 2.8.a' da gösterilen kontrol hacminde, zaman ve hacim elemanlarına göre integre edilirse,

$$(a_p + a_p^0)\Phi_p = \sum_{nb} a_{nb} \Phi_{nb} + (\bar{S}_c + \bar{S}_p \Phi_p) + a_p^0 \Phi_p^n \quad [2.61]$$

eşitliği elde edilmektedir.



Şekil 2.8. İki boyutlu kontrol hacmi, a) Sonlu hacim yönteminde Power Law yaklaşımına göre kontrol hacmi ızgara sistemi, b) Dolaylı düzeltilmeli Upwind yöntemine göre yapılmış kontrol hacmi

Doğrusal olmayan denklem takımlarının sonlu kontrol hacmi formülasyonunda, Upwind yaklaşımının esaslarından olan ayrıca, kararlı ve doğru hesaplama için gerekli olan dört kural mutlaka sağlanmalıdır. Birincisi $(\Phi_e)_w = (\Phi_w)_p$, ikincisi komşu düğüm noktalarının a katsayısının sıfırdan büyük ($a_{nb} \geq 0$) veya eşit olması,

üçüncüsü kaynak teriminin doğrusallaştırılması sonucu elde edilen kaynak teriminin sıfırdan küçük ($\bar{S}_p \leq 0$) veya eşit olması, son olarak da hesaplanan noktadaki katsayı (P noktasına ait a değeri) değerinin, komşu katsayıların toplamına eşit olmasıdır (22,23).

Power Law yönteminde, komşu noktalarının a katsayılarının değeri Eş. 2.62' den hesaplanmaktadır (21-23).

$$a_{nb} = D_{nb} f(|P_{nb}|) + [\text{sign}(nb) F_{nb}, 0] \quad [2.62]$$

Burada $f(|P_{nb}|)$ fonksiyonu, Peclet sayısına bağlı bir fonksiyon olup, Power Law yöntemi için Eş. 2.63' deki bağıntı tanımlanmıştır.

$$f(|P_{nb}|) = [0, \max(1 - 0.1|P_{nb}|)^5] \quad [2.63]$$

Dolaylı Düzeltmeli Upwind (UPDC, Upwinding with Deferred Correction) yönteminde ise Şekil 2.8.b 'de ki kontrol hacminde integrasyon yapılmaktadır. Dolaylı Düzeltilmiş Upwind yöntemi ve Sonlu Kontrol Hacmi yöntemlerine göre, ayrıklaştırılan deferansiyel denklem takımlarından elde edilen cebirsel ifadelerindeki katsayılar, QUICK (Quadratic Upwind Differencing Scheme), Merkezi Farklar ve ikinci dereceden Upwinding katsayılarının bileşimlerinden elde edilen katsayılar kullanılmaktadır. Patankar (22)' in Upwind yöntemine göre cebirsel hale getirilen diferansiyel denklem takımlarında, kararlı ve doğru hesaplamalar için gerekli olan dört kural UPDC yönteminde gerekli olmayıp, hesaplaması daha basit ve kullanışlı olduğu belirtilmektedir (21).

Sonlu Kontrol Hacmi ve Tam Implicit metodu kullanılarak, Navier-Stokes denklemlerinin çözüldüğü ve kalıp içerisine dolan köpüğün akış analizinin yapıldığı çalışmada, Seo ve diğerleri, yoğunluğu, sıcaklığın ve basıncın bir fonksiyonu olarak hesaplamıştır. Ayrıca, "Tam Implicit" yöntemi kullanılarak yapılan çözümlemede, akışkan viskozitesi, "Dilatant Viskozite" olarak kabul edilerek hesaplamalar yapılmıştır (24). Kalıp boşluğu dolarken, akışkan köpüğün önünde dışarı atılan hava da çözümde dikkate alınmıştır. Kalıp boşluğu dolarken, içeride sıkışan ve akışkanın

yerini alması için dışarı atılan hava, akışa ter bir kuvvet uygulayarak akışı engellemeye çalışmaktadır. Bu nedenle, hem viskozite hem de yoğunluk terimleri, Eş. 2.64 ve Eş. 2.65' deki f katsayısı ile çarpılarak hesaplanmaktadır.

$$\mu = \mu_k f + \mu_h (1 - f) \quad [2.64]$$

$$\rho = \rho_k f + \rho_h (1 - f) \quad [2.65]$$

Kararsız akış olarak hesaplanan polimerin akışında, süreklilik ve momentum denklemleri Tam Implicit metoduna göre ayrıklaştırılmış, önce basınç terimleri ve basınç terimlerine bağlı olarak da diğer parametreler bulunmuştur. Upwind ve Sonlu Kontrol Hacmi metodunun çözüm mantığını oluşturan ve her parametre için dikkate alınan nokta ve komşu noktalar için bulunan katsayıların bulunmasıyla, akının (flux) difüzyon terimlerine oranı ile elde edilen Peclet sayısına bağlı fonksiyon hesaplanmıştır. Xue ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada kullanılan ve Eş. 2.63' de verilen bağıntı bu çalışmada da kullanılmıştır.

Momentum denklemlerinin çözülmesi ile hesaplanan hız profillerinde, under-relaxation yöntemi ile yakınsama (hassaslaştırma) yapılmıştır. Sayısal analiz yöntemlerinin en önemli problemlerinden olan yakınsama veya ıraksama gibi durumlarla karşılaşmamak için, Eş. 2.66' da verilen bağıntı ile hesaplanan parametre, bir önceki zaman diliminde bulunan değer ile yeni hesaplanan değer, belirli bir katsayı ile çarpılması sonucu elde edilmektedir.

$$u^{new} = \alpha_v u + (1 - \alpha_v) u^{(n-1)} \quad [2.66]$$

Navier-Stokes eşitlerinin çözülmesi ile yapılan analizlerde, basınç terimini veren herhangi bir diferansiyel denklem yoktur. Fakat, momentum denklemlerinde en etkin parametrelerden biri olan ve ihmal edilmesi mümkün olmayan basınç terimi bulunmaktadır. SIMPLE (Semi-Implicit Method Pressure-Linked Equations) yöntemi ile süreklilik denklemleri ve momentum denklemleri birleştirilerek, basınç terimlerine bağlı yeni bir denklem türetilmektedir (22, 23, 25). Elde edilen bu yeni denklemle basınç terimi hesaplanmıştır.

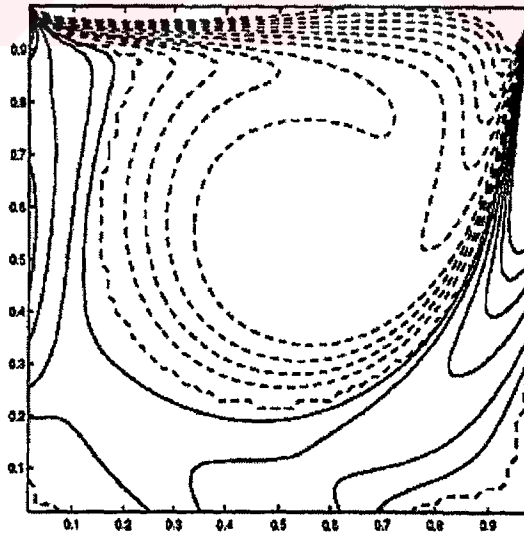
Navier-Stokes denklemlerinin kullanıldığı, serbest hareketli sınır yöntemi ile kararsız viskoz akış, Tang ve diğerleri tarafından incelenmiştir (27). Kesiti aniden daralan bir tüp içindeki viskoelastik akışın incelendiği bu çalışmada, etkin parametre olarak ele alınan basınç terimi, SIMPLER (SIMPLE Revised) algoritması ile hesaplanmıştır. Sonlu Farklar mantığını oluşturan ızgaralara ayrılmış bölgede, Upwind yöntemi ve kaydırılmış ızgara sistemi kullanılmıştır.

Eksenel simetrik bir siklon ayırıcı da, laminar akış olarak ele alınan akışkanın akış dinamiğinin incelendiği Yüksek Lisans çalışmasında, Yiğitler (28), Navier-Stokes eşitliklerini, Sonlu Kontrol Hacmi yöntemine göre çözümlenmiştir. Basınç-hız bağıntısı için SIMPLER algoritması, eksenel ve radyal hızlar için ayrı ağ sistemi kullanılmıştır. Basınç, yoğunluk, sıcaklık gibi skaler değişkenlerle hız gibi vektörel değişkenleri aynı noktada hesaplamamak için kaydırılmış ızgara sisteminin tercih edildiği görülmüştür. Hesaplamalarda gerçek değerden sapmaları en aza indirmek için yapılan under-relaxation yöntemi ile hassaslaştırma yapılmış olup, under-relaxation parametresi $\alpha = 0.8$ alınmıştır. Cebirsel ifadelerin iterasyon ile hesaplanmasında Gauss-Jordan iterasyon yöntemi olarak da bilinen TDMA (Tri-Diagonal Matrix Algorithm) ve Thomas iterasyon yöntemleri kullanılarak akış parametreleri elde edilmiştir. Kaydırılmış ızgara sistemi, aynı düğüm noktalarında skaler ve vektörel değişkenlerin hesaplanmasında oluşan hataları gidermek için, hız gibi vektörel değişkenler, iki düğüm noktası arasında belirlenen difüzyon yüzeyine taşınmaktadır (22, 23, 29-32). İki düğüm noktası arasında oluşturulan arayüzey, sonlu kontrol hacmi tekniğinin ana kurallarından biri olmaktadır.

Yapılan bu çalışmada, viskozite ve sıcaklık terimlerinin akış üzerindeki etkileri araştırılmamış, sadece akış alanındaki hız ve basınç terimleri hesaplanmıştır. Yiğitler' in yaptığı çalışmanın aksine Ertürk (33), yaptığı çalışmada düzlemsel bir boşlukta, viskoz akışı, zaman ve sıcaklıktan bağımsız davranış olarak incelemiştir. Newtonian olmayan akış olarak ele alınan akışkanın basınç-hız değişkenlerini içeren denklemler yerine, Girdap-akış fonksiyonu değişkenlerini içeren denklemler kullanılmıştır. Gauss-Siedel iterasyon yöntemi ile hesaplanan akış fonksiyonlarında -Carreau viskozite modeli kullanılmıştır. Hesaplamalar, Reynolds ve Weissenberg

sayılarının değişik değerleri için yapılarak, farklı sınır hareketleri, kontrol hacmindeki akım hareketleri ve kararlılığı incelenmiştir.

Upper-Convected Maxwell (UCM) akışının incelendiği çalışmada, Sasmal (34), Navier-Stokes eşitliklerini kullanarak viskoz akışkanın akım çizgileri (streamline fonksiyonu) hesaplamıştır. Sonlu Kontrol Hacmi formülasyonu ile cebirsel hale getirilen çalışmada, denklemler ilk önce vorticity (girdap) fonksiyonuna çevrilmiştir. Ertürk'ün (33) yaptığı çalışmada, Reynold sayısı Weissenberg sayılarının akım fonksiyonlarına etkileri incelenmişti. Bu çalışmada ise, Weissenberg ve Deborah sayılarının akım fonksiyonuna etkileri araştırılmıştır. Cebirsel hale getirilen denklem takımları TDMA algoritması yöntemi ile iterasyon yapılarak akış parametreleri hesaplanmıştır (34). Şekil 2.9' da verildiği gibi akım çizgilerinin hesaplandığı çalışmada, kaydırılmış ızgara sisteminde, ikinci dereceden Crank-Nicholson yöntemine göre ayırıştırma yapılmıştır. Yiğitler'in (28) çalışmasında olduğu gibi, TDMA iterasyon yöntemi ile iteratif hesaplamalar yapılarak, Reynolds sayısının akım çizgileri ve akış üzerindeki etkileri araştırılmıştır.



Şekil 2.9. Reynolds sayısının 400 olduğu ve sabit vorticity' de oluşan akım çizgileri (34).

Newton-Raphson iterasyon yöntemi ile doğru basınç terimlerinin hesaplandığı çalışmada, Kumar ve arkadaşları (35), silindirik bir kontrol hacminde, özdeş ısı dağılımının olmadığı DYPE malzemesinin sabit debideki akışını ve boşluğu

doldurması incelenmiştir. Analitik çözümlerle de karşılaştırılan sayısal çözümlemede akış, sıcaklığın bir fonksiyonu olarak karakterize edilmiştir. Üs yasası (Power-Law) viskozite modelinin kullanıldığı hesaplamalarda, silindirik kalıp boşluğunun ekseninin iki tarafı simetrik olduğundan, eksenin sadece bir tarafı çözümlenerek hem hesaplamada kolaylık sağlanmış hem de hesaplama zamanı azaltılmıştır. Eş. 2.67' de verilen ve eksenel yöndeki kondüksiyon terimlerinin ihmal edildiği, silindirik koordinatlar için enerji denklemi çözümlenerek sıcaklık dağılımları hesaplanmıştır.

$$\rho c_p V_z \frac{\partial T}{\partial z} = k \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \mu \left(\frac{\partial V_z}{\partial r} \right)^2 \quad [2.67]$$

Ortalama sıcaklık formülü olarak,

$$T_{avg} = \frac{\int_0^R \rho 2\pi r dr V_z c_p T}{\int_0^R \rho 2\pi r dr V_z c_p} \quad [2.68]$$

bağıntısı kullanılmıştır. Enjeksiyon yöntemi ile üretilen plastik ürünlerde, çarpımalara ve büzölmelere yol açan özdeş olmayan sıcaklık dağılımlarının akış üzerindeki etkileri belirlenmiş, kontrol hacminde sıcaklığın ve basıncın zamana bağlı olarak değişimini veren grafikler sunulmuştur.

2.3. Sonlu Elemanlar Kullanılarak Yapılan Analizler

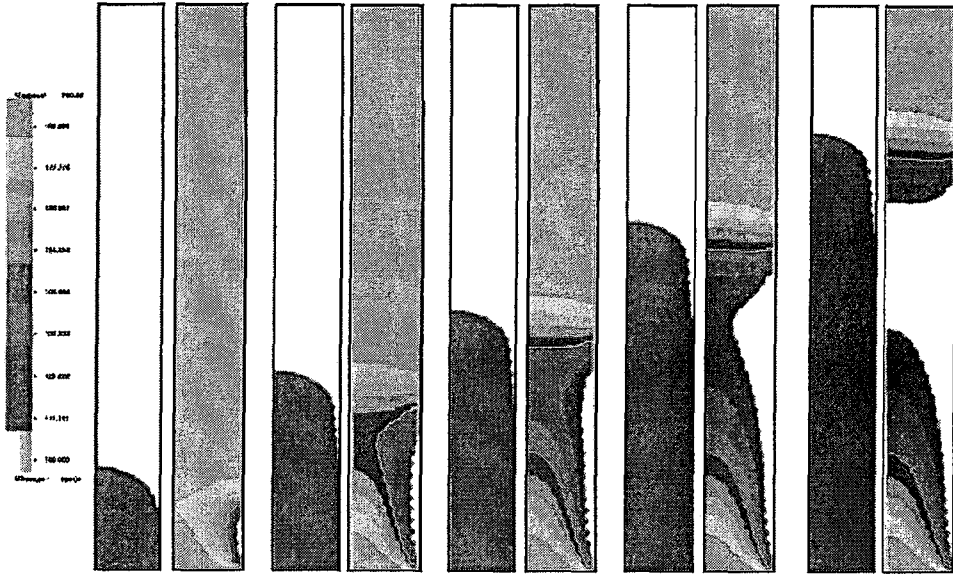
Ergimiş plastiklerin akış dinamiğinin incelenmesi ve simülasyonunda, akışı etkileyen tüm parametrelerin dikkate alınarak çözümlenmesi oldukça zordur (15, 16, 23). Ayrıca, ele alınan akışkan kütleline etki eden tüm kuvvetlerin tanımlanabildiği ve akışı çözebilecek cebirsel ifadeler olmadığından, diferansiyel formadaki kütlelin korunumu, momentum ve enerji denklemleri esas alınmaktadır (1, 22, 23). Temel denklemler olan bu diferansiyel eşitlikler, çeşitli kabuller ve akış tipi için, çözüm alanının sınır şartları ve özel uygulamalara göre farklı metotlar uygulanarak değişik formlarda kullanılmaktadır. Diferansiyel formdaki bu denklemler, sayısal çözüm metotları ile çözümlenip, akış parametreleri hesaplanabilmektedir (1-4, 7, 16, 19-23,

30). Sayısal çözüm metotları, yöntem itibari ile Sonlu Elemanlar ve Sonlu Farklar yöntemi ve Spectral çözüm yöntemi gibi metotlara ayrılmaktadır (23, 33-39).

Sonlu Elemanlar ile sayısal olarak çözüm mantığında esas kural, çözüm alanının sonlu sayıda alt bölgelere ayrılması prensibine dayanmaktadır (33-47). Sonlu Farklar yönteminde ise, çözüm alanı istenilen aralıklarda ızgaralar şeklinde (ızgara) bölümlenip, sonlu sayıda düğüm noktalarının oluşturulması esasına dayanmaktadır. Diferansiyel ifadeler bu yöntemlerden birine göre ele alınıp çözümlenmektedir. Hangi metotla çözümleme yapılırsa yapılsın temelde matematiksel modelleme aynı olup, sadece sayısal çözümlemede diferansiyel terimler integre edilirken yöntem değişmektedir. Sonlu Elemanlar yönteminde, en sık kullanılan Galerkin ve çok değişik yöntemlerle geliştirilen Petrow-Galerkin, Taylor'un Süreksiz Galerkin yöntemi gibi bir çok metodun yanında, Least-squares yönteminin de çözümlemelerde kullanıldığı tespit edilmiştir (1, 3, 7, 15, 16, 19-23, 30, 33-50).

Pichelin ve Coupez, Taylorun Süreksiz Galerkin Sonlu Elemanlar yöntemini kullanarak yaptıkları çalışmada, viskozite olarak hem Üs yasası modelini hem de Carreau modeli kullanılmıştır. Bunun yanında, akış sırasında sıcaklık değişiminin çok önemli olduğunu dikkate alarak sayısal çözümde viskoz ısı üretimini hesaplamıştır. Şekil 2.10' da iki boyutlu kontrol hacmindeki akış analizi için sıcaklık ve kayma hızına bağımlı viskozite, kondüksiyonla taşınan ısı ve viskoz ısı üretiminin sıcaklık dağılımına etkileri araştırılmıştır (43). Bu çalışmada, basınç ve hız değerleri Sonlu Elemanlarla sıcaklık terimleri ise, klasik Sonlu Farklar yöntemi ile iterasyon yaptırılarak bulunmuştur.

Sonlu Elemanlar veya Sonlu Farklar gibi sayısal yöntemlerin hangisi kullanılırsa kullanılsın, akışı etkileyen parametrelerin hesaplanmasında ve akış simülasyonunda en önemli etken seçilen sayısal yöntem değil, yöntemde ızgara aralığı veya alt bölgelerin hassasiyetinin yeterince küçük alınmasıdır. Sonlu Farklar yöntemlerinde de aynı durum söz konusudur.



Şekil 2.10. Viskoz ısı üretiminin dikkate alındığı kontrol hacminde, plastiğin kalıp boşluğunu doldurması ve sıcaklık değişimi (43).

Taylor serisi (Merkezi Farklar, İleri ve Geri Farklar), Newton Raphson, Runga-Kutta ve Sonlu Kontrol Hacmi gibi onlarca sayısal yöntemlerde, ızgara aralığı yeterince küçük seçildiğinde, hemen hemen tüm metotlar aynı sonucu vermektedir (23, 34, 39, 45-63). Aralarında ki tek fark, uygulamada daha basit olması ve çözüm yapılırken en kısa sürede hesaplama yapabilmesidir (23, 38, 39, 42-53, 58).

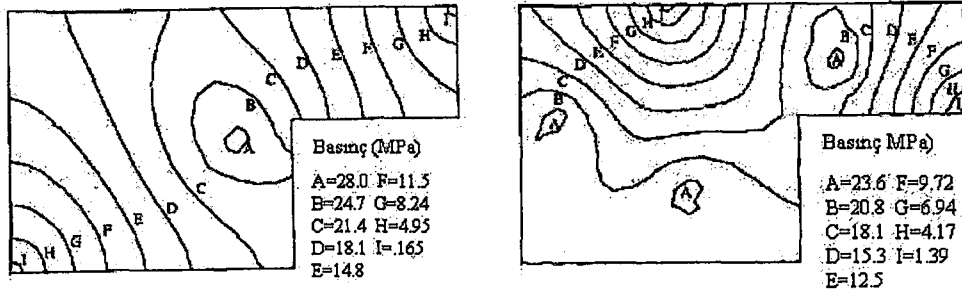
Plastik akışının yapıldığı bir çok çalışmada ise, hem Sonlu Elemanlar hem de Sonlu Farklar yöntemi bir arada kullanılmaktadır (1, 15, 16, 54-56). Moldflow analiz programı basınç ve hız değerlerini ve akış burnunun tayinini, Sonlu Elemanlar yöntemini kullanarak hesaplarken, sıcaklık terimini ise Sonlu Farklarla hesaplamaktadır (1, 59). Plastiğin kalıp boşluğundaki akışı sırasında ısı değişiminin önemli olduğu dikkate alınarak yazılım mühendisleri, sıcaklık terimini Sonlu Elemanlarla hesaplamış, basınç ve hız değişimini ise Sonlu Farklar yöntemi ile hesaplamıştır.

Sonlu Elemanlar ve Sonlu Farklar yönteminin bir arada kullanıldığı ve Smith ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada, enjeksiyon ve basınçlı pres yöntemi ile üretilen plastik malzemelerin kalıplanmasında, ergimiş polimerin hacim boşluğuna

akışı, hassas analiz metoduyla analiz edilip, akış optimizasyonu yapılmıştır. Ergimiş plastiğin akışı, özdeş ısıda olmayan akış olup, Hele-Shaw akış modeli ile modellenmiştir. Basınç ve hız değişimleri Newton-Raphson yöntemi ile, kalıcı gerilme dağılımları ise, Galerkin Sonlu Elemanlar yöntemi ile hesaplanmıştır (49).

Sayısal çözümleme tekniğine dayalı analiz yöntemi ile yapılan hesaplama ile elde edilen akış parametreleri, basınç, hız ve sıcaklık dağılımları ve ayrıca, giriş yeri tespiti gibi enjeksiyonu etkileyen parametreler çalışılmıştır. Şekil 2.11' de verilen, kalıp boşluğundaki plastiğin akışının simülasyonu ve enjeksiyon parametrelerinin hesaplanması sonucu elde edilen değerler, optimizasyona tabi tutulmuş ve en uygun enjeksiyon parametreleri hesaplanmıştır (49).

Buna göre tek girişli bir kalıpta giriş bölgesinde 28 MPa' lık bir basınç oluşurken, optimize edilmiş çok girişli kalıptaki basınç 23,6 MPa olarak tespit edilmiştir. Daha düşük bir basınçla kalıp boşluğunu doldurmak, hem kalıplanan plastik parça üzerindeki kalıcı gerilmelerin az olması, hem de daha az enerjinin harcanması bakımından oldukça önemlidir.

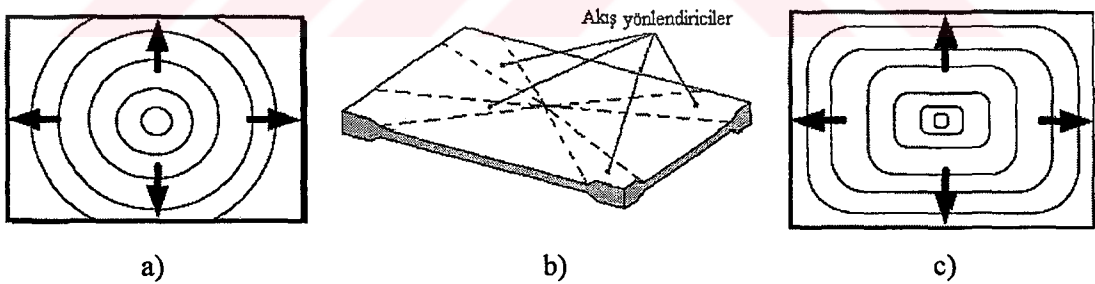


Şekil 2.11. a) Optimizasyon öncesi boşluk içindeki basınç dağılımları,
b) Optimizasyon sonrası boşluk içindeki basınç dağılımları (49).

Akış analizi ve simülasyonunun yanında, enjeksiyonu etkileyen akış parametreleri, girişin yeri ve sayısı da hesaplanan akış parametrelerinin optimizasyona tabi tutulması sonucu daha da hassaslaştırılmaktadır (43, 50-54). Hassaslaştırma ve optimizasyon ile enjeksiyon parametreleri giriş yeri, sayısı ve boyutlarının tespiti, en

uygun değerlerde elde edilmektedir. Ergimiş plastik kalıp boşluğunda akarken dengeli dolum olmadığı zamanlarda ve istenilen noktaya istenilen zamanda ulaşmadığı durumlarda, basınç farkı ve plastiğin sıkıştırılabilirliğinden dolayı plastik ürün üzerinde farklı gerilmeler oluşmaktadır. Bu durum, ürünün çarpılmasına veya farklı yoğunluk dağılımlarına sebep olmaktadır.

Bu bağlamda, Seow ve Lam yaptıkları çalışmada akış parametrelerini optimize ederek, akışı istenildiği gibi yönlendirmektedirler (54). Yapılan bu çalışmada, dikdörtgen biçimindeki bir kalıp boşluğu, ergimiş plastikte dolarken, boşluğun kesatine göre ilk önce girişe yakın yerler dolmaktadır. Şekil 2.12.a' da görüldüğü gibi akış ilk önce girişe yakın kenara ulaşmakta, daha sonra diğer yan yüzeylere ulaşmaktadır. Ergimiş plastik zamana bağlı olarak kalıp içerisinde hemen katılaşmaya başladığından, kalıbın bir kenarına ulaşan plastik, daha dolmayan bölgelerdeki ergimiş plastikten önce soğumaya başlayacaktır. Enjeksiyon işlemi bitmediğinden uygulanan basıncın etkisi ile, kalıp boşluğuna dolan bölgelerdeki akışkan üzerine gelen basınçla plastik sıkıştırılmış olmaktadır.



Şekil 2.12. Dikdörtgen şekilli kalıp boşluğunun dolum tipi. a) Dengesiz dolum tipi, b) Akış yönlendiricilerin uygulanması, c) Optimizasyon ve akış yönlendiricilerin uygulanması sonrası dengeli dolum tipi (54).

Akış simülasyonunda, akış parametrelerinin hesaplanması, akış burnunun tayininin doğru yapılmasına yetmemektedir. Kalıp boşluğu ergimiş plastikte doldurulurken, ergimiş plastiğin yoğunluğu boşluktaki havanın yoğunluğundan oldukça fazladır. Sayısal çözümlemelerde, hesaplanan kontrol hacmindeki düğüm noktaları veya alt bölgeler her iterasyonda dikkate alınarak çözüm yapılmaktadır (22, 23). Akışkanın ulaşmadığı bölgelerdeki düğüm noktaları da, her iterasyon yapıldığında dikkate

alındığından, bölgelerdeki hava da hesaplanmış olmaktadır (1, 4, 11, 15, 16, 22-24, 30-32). Havanın yoğunluğu ergimiş plastiğe göre çok düşük olduğundan, sayısal çözümlemelerde hesaplanan terim gerçek değerden oldukça farklı çıkabilmektedir. Sayısal çözümleme yöntemlerinin en önemli problemlerinden biri olan hava-akışkan ara yüzeyinin tayini, oldukça zor ve karmaşık bir prosedürdür. Akış parametrelerinin hesaplanması ve akış burnunun tespitindeki bu problemi aşmak için, sayısal ızgara oluşturma (Numerical grid generation) yöntemi kullanılmaktadır (15, 55-62). Subbiah ve arkadaşları (15) tarafından yapılan çalışmada olduğu gibi, akış burnunun hareketi, ızgara oluşturmak, her adımdaki ızgara profili, yeri ve zamanını belirlemek için temel denklemlerden türetilen eşitlikler kullanılmaktadır (15, 59, 63). Özellikle, düzensiz şekillerin analiz edilmesinde çok kullanışlı olan bu metotla, akış burnunun tayini adım adım yapılmaktadır. Her adımda yeniden oluşturulan ve kalıp boşluğu geometrisine bağlı olarak ızgara profili tespit edilmektedir (15, 60). Oluşturulan her ızgara geometrisinin ön kısmı, akışkanın geldiği noktayı temsil etmektedir. Böylece, düzensiz de olsa, hesaplanması çok zor olan geometrilerde bile uygulanabilen bu metotla, akışkanın nasıl ilerlediği tespit edilmektedir (60).

2.4. Isıl Özellikler ve Kalıcı Gerilmeler

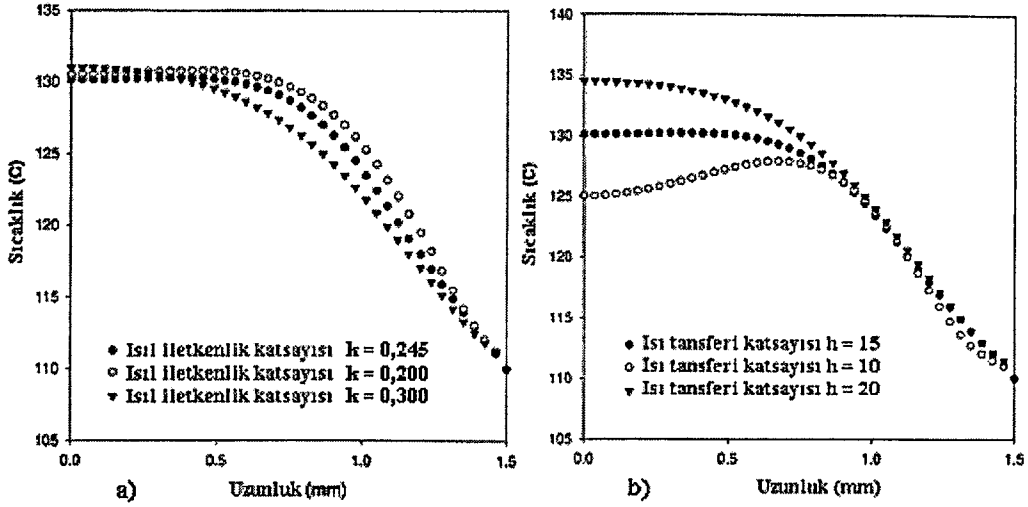
Enjeksiyon yönteminde, ergimiş plastik kendinden daha soğuk olan kalıp boşluğuna enjekte edildiğinden, kalıp içerisinde akarken, ergiyikten soğuk kalıp yüzeylerine doğru ısı akışı olmaktadır (1, 8-14, 15, 64-70). Yani ergimiş plastik kalıp boşluğunda akarken sıcaklığı azalmaktadır. Böylece, Newtonian olmayan akış özelliği gösteren ergimiş plastiğin akışını etkileyen en önemli parametrelerden biri olan sıcaklık, sürekli değişim halinde olmaktadır (76-78, 82). Sıcaklık değişimine bağlı olarak plastiğin viskozitesi ve yoğunluğu da değişmektedir.

Ayrıca, sıcaklık dağılımının kalıplanan plastik parçanın kalitesini de etkileyecek kalıcı gerilmelere sebep olduğu bilinmektedir (68-70). Sıcaklığın ve basıncın bir fonksiyonu olan yoğunluk, sıcaklık değişimine bağlı olarak değişmektedir. Plastiğin sıcaklığı, kalıp içerisinde akarken sürekli azalmakta, dolayısıyla yoğunluğu da buna bağlı olarak artmaktadır (70). Enjeksiyon işleminde kalıp boşluğu dolarken

uygulanan basınç sabit olduğundan, sabit basıncın gittikçe artan yoğunluğa sahip olan plastiği deformasyona uğratması gittikçe zorlaşmaktadır. Tutma basınçları safhasında, yoğunluğun belirli bir düzeyinden sonra, plastik akma yerine sıkışma davranışı göstermektedir. Özellikle, belirli sıcaklığın altındaki değerlerde, ergimiş plastik uygulanan gerilme karşısında, sadece akma davranışı yerine, sıkışma özelliği de gösterdiği bilinmektedir. Bu nedenle, sıcaklığın belirli bir değerin altında olduğu durumlarda, akma gerçekleşmemektedir. Akış sırasında, kalıp yüzeylerinde sıcaklığı düşen ve katılaştıran tabaka da benzer özellik göstermektedir.

Plastiklerde camsı geçiş sıcaklığı olarak da bilinen katı/sıvı faz değişiminin olduğu bu kritik sıcaklık değerine kadar düşen ergimiş plastik akma özelliğini kaybettiğinden, kalıp boşluğu dolmamışsa, eksik basım, kalıp boşluğu dolmuş ve tutma basınçları safhasında ise az sıkışma gerçekleşmektedir. Plastikler yüksek genleşme katsayısına sahip olduğundan, kalıp içerisinde katılaştıkça büzülmemektedir. Tutma basınçları safhasında, yeteri kadar sıkışma gerçekleşmediği takdirde, kalıplanan plastik parça enjeksiyondan çıktıktan sonra büzülme ve çarpılmalar meydana gelmektedir (64-67).

Viskoz akış özelliği gösteren plastiklerin akışını simüle ederken, her zaman biriminde hesaplanması gereken parametrelerden biri viskozitedir (1, 3, 14, 15, 70-78). Ağırlıklı olarak kayma hızına bağlı olan viskozite, aynı zamanda sıcaklık ve basınçla da değişmektedir. Akışa karşı gösterilen direnç olarak bilinen viskozite, sıcaklığın düşmesi ile artacağından, plastik akışını tam anlamıyla simüle edebilmek için, plastiğin sıcaklığının doğru hesaplanmasını gerektirmektedir. Nguyen ve Pystay tarafından yapılan çalışmada, sıcaklığın değişimi hesaplanmıştır (71). Sıcaklığın kalıp boşluğu içerisindeki ilerleme değişimini veren grafik, Şekil 2.13' de verilmiştir. Şekil 2.13.a' da görüldüğü gibi, sıcaklığın ısı iletkenlik katsayısına bağlı olarak değişimi farklılıklar gösterdiği belirtilmiştir.



Şekil 2.13. Kalıp içerisindeki sıcaklığın kalıp uzunluğuna göre değişimi, a) Sıcaklığın değişik ısı iletkenlik katsayısına göre değişimi, b) Sıcaklığın değişik ısı transferi katsayısına göre değişimi (71).

Yani kalıp içerisindeki sıcaklık aynı şartlarda farklı ısı iletkenlik katsayısına sahip malzemede farklılıklar göstermektedir. Isı iletkenlik katsayısı fazla olan ergiyik ısıyı daha kısa sürede iletmediğinden, kalıp içerisindeki aynı noktada sıcaklığın daha az değerde olduğu görülmektedir. Benzer şekilde, ısı transferi katsayısına bağlı olarak sıcaklığın değişimi Şekil 2.13.b' de verilmiştir. Buna göre, ısı transferi katsayısı sıcaklık değişiminde daha da etkili biçimde plastiğin sıcaklığını değiştirdiği görülmektedir. Isı transferi katsayısı, plastik malzemeye, kalıp plakasının kalınlığına ve soğutma tipine bağlı olarak değişmektedir. Soğutma sistemi olmayan kalıplardaki etkili ısı transferi katsayısı (h_{ef}), soğutma sisteminin kullanıldığı sistemlerden daha küçük olmaktadır. Bu durumda, soğutma sisteminin kullanıldığı kalıplardaki ısı transferi daha fazla olduğundan, kalıp içerisindeki aynı noktanın sıcaklığı, ısı transferi katsayısının yüksek olduğu duruma nazaran daha düşük değerde olmaktadır.

Sıcaklık değişimi, akışı etkileyen parametre olarak hesaplanan değerinin yanında, akışkanın konumunu tespit etmede de kullanılmaktadır. Luoma ve Voller tarafından yapılan çalışmada, akış burnunun tespitinde entalpi değişimi hesaplanarak, akış burnu tayini yapılmıştır (72). Akışkan kütlelerini hesaplarken basınç-hız ilişkisi,

$$u = -\nabla P$$

[2.69]

şeklinde ifade edilmiştir. Burada, S akışkanlık terimi, P ise basıncı temsil etmektedir. Akışkanlık terimi ise, Eş. 2.70' deki eşyönlü katılık oranını veren Darcy kanunu ve Eş. 2.71' de Hele-Shaw metoduna göre verilen eşitlikten bulunmaktadır.

$$S = \frac{k}{\varepsilon\mu} I \quad [2.70]$$

$$S = (m_0)^{(-1/n)} \left(\frac{b^{(2+I/n)}}{2 + I/n} \right) (\nabla P \cdot \nabla P)^{((1-n)/2n)} I \quad [2.71]$$

Eş. 2.70' deki k terimi geçirgenliği, μ viskoziteyi, ve I ise tanımlanan matrisi temsil etmektedir. Eş. 2.71' de ise, b plastik parça kalınlığının yarısını, m_0 ve n ise Üs yasası akışının sabit sayılarını temsil etmektedir. Entalpinin hesaplanmasında ise,

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \nabla \cdot (K \nabla T) \quad [2.72]$$

eşitliğinden yararlanılmaktadır (72). H , entalpiyi, T ise sıcaklığı temsil etmekte olup, H değişkeni ise, $H = C_p T + gL$ bağıntısından elde edilmektedir. C_p sabit ısınma ısısını, g sıvı kütleini ve L ise gizli ısıyı temsil etmektedir. Sıcaklığa bağlı akış analizinde, akışkanı etkileyen tüm parametreler hesaplanmış, en etkin parametrenin sıcaklık olduğu tespit edilmiştir. Entalpi hesaplanması ile akışkanın davranışlarının tespit edilebileceği belirtilmiştir.

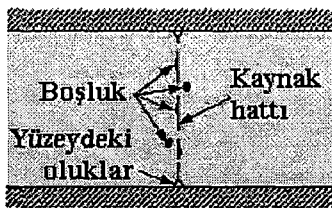
Ergimiş plastik ile kalıp yüzeyi arasındaki etkileşimde ısıl temas direnci olarak bilinen bu direnç, ergimiş plastikte kalıp duvarının temasındaki hesaplanması prensibine dayanmaktadır (73). Malzemenin ısınma ısısı, plastik parça kalınlığı ve özgül hacme bağlı olarak bulunan ısı, temas direnci ile ergimiş plastikten kalıp malzemesine geçen ısı miktarının hesaplanmasını sağlamaktadır.

Ergimiş plastiğin sıcaklığının değişimi hesaplanırken kullanılan ısı iletim katsayısı, genellikle sabit sayı olarak kullanılmaktadır. Fakat, gerçekte sıcaklığın bir fonksiyonu olan ısı iletim katsayısı, sıcaklık değişimine bağlı olarak bulunarak hesaplamalar daha hassas hale getirilebilmektedir (74). Nguyen ve Pystay tarafından yapılan çalışmada, ısı iletim katsayısı değiştikçe aynı noktadaki plastiğin sıcaklığı da

değişmektedir. Bu bağlamda, ısı iletim katsayılarının her zaman aralığında ve plastiğin kalıp içerisindeki her adımında hesaplanarak plastiğin sıcaklığı daha doğru olarak bulunmaktadır (74). Ayrıca, ısı iletim katsayısının yanında malzemelerin ısınma ısıları da, hem basıncın hem de sıcaklığın bir fonksiyonu olarak değişmektedir (75).

Sıcaklık değişiminden dolayı kalıplanan ürünlerde, hem basıncın etkisi hem de sıcaklığın etkisi olarak kalıcı gerilmeler oluşmaktadır (76-85). Oluşan kalıcı gerilmeler, kalıptan çıkan plastiğin çarpılmasına sebep olmaktadır (78, 79, 83). Bu nedenle, sıcaklık dağılımlarının hesaplanması ile farklı sıcaklığa sahip bölgelerdeki kalıcı gerilmeler tespit edilmektedir (76-80). Böylece, muhtemel çarpılmaların olmaması için ve sıcaklığın kalıp boşluğu içerisinde özdeş dağılması için, girişin yeri, kesiti, soğutma kanallarının uygun yerleştirilmesi ve özdeş soğutmanın sağlanması gibi enjeksiyon kalıbı tasarımını etkileyen parametreler gözden geçirilmektedir (77, 83, 84).

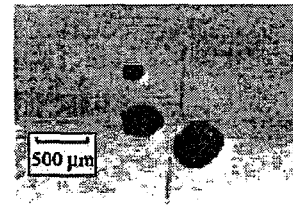
Plastiğin kimyasal yapısından kaynaklanan ve sıcaklıkla doğrudan ilgili olan camsı geçiş sıcaklığı, enjeksiyonla kalıplamada önemli bir parametredir. Özellikle, maçalı kalıplarda, birden fazla girişi bulunan kalıp boşluklarında veya uygun olmayan şekilde dolan kalıp boşluklarında oluşan kaynak hatlarının dayanımı, ergimiş plastiğin akış burunlarının bulunduğu yerdeki sıcaklığa bağlıdır (86-90). Şekil 2.14' de görüldüğü gibi, kaynak hattı iki farklı akış ucunun buluşmasından kaynaklanmakta olup, kaynak hattının yapısı normal yapıdan farklı olarak gözle görülür bir iz olarak gözlenebilmektedir.



a) Şematik gösterim



b) Kaynak hattı (yüzey)



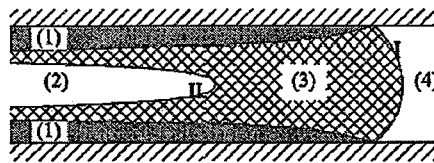
c) Boşluklar (kesit görünüş)

Şekil 2.14. Kaynak hattı oluşumu ve kaynak hattındaki hatalar (86).

Ergimiş plastiğin kalıp boşluğuna girişinden sonra, boşluk içerisindeki ilerlemesine bağlı olarak sürekli sıcaklığı azaldığından, oluşacak muhtemel kaynak hatlarındaki plastiğin akış burnundaki sıcaklığı da bir hayli azalmaktadır. Sıcaklığı nispeten düşerek karşılaşan akış burunları, basıncında etkisi ile birbirine kaynamakla beraber, plastiğin diğer bölgelerine göre daha düşük bir mukavemete sahip olmaktadırlar (91-95). Plastik ürünlerde kaynak hattı oluşumunun kaçınılmaz olduğu durumlarda, enjeksiyon parametrelerini değiştirerek veya girişin yeri, sayısı ve çapını değiştirerek istenilen bölgeye çekilmesi mümkündür (91, 92, 96-98). Kaynak hattına sahip bir üründe mukavemetin en zayıf olduğu bölge, kaynak hattı bölgesidir (91-98).

2.5. Gaz Destekli Enjeksiyonla Kalıplama Yöntemi

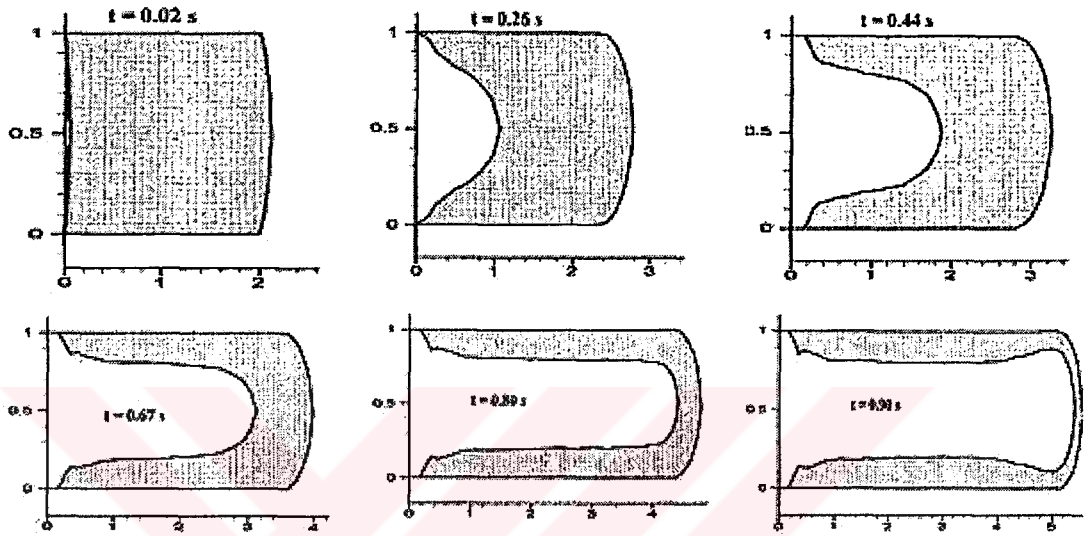
Enjeksiyon tekniği ile üretilen plastik parçalarda, ürünün kesiti genellikle 5 mm den daha azdır (64-67, 99-105). Plastik parçalar tasarlanırken bir çok parametre dikkate alınmaktadır. Plastik parçanın kalınlığı, tasarım aşamasında dikkate alınan en önemli parametrelerden biridir. Kalıplanan ürününün kalınlığının fazla olduğu durumlarda, kalıplama sonrası çökmeler ve çarpılmaların önüne geçmek hemen hemen imkansız gibidir (25). Parça kalınlığı ve geometrisinin değiştirilemediği durumlarda, plastik parçanın görünümünü ve fonksiyonunu etkilemeyecek bölgelerine, destekler (feder), kanallar veya oluklar açılarak, mukavemet artırıcı ve çarpılmaları önleyici tedbirler alınmaktadır. Özellikle dairesel kesitli olup çapın değiştirilemediği, parça kalınlığının ise normal koşullardan büyük olduğu durumlarda, plastik parça gaz destekli enjeksiyon kalıplama yöntemi ile üretilebilmektedir (98, 100).



Şekil 2.15. Gaz destekli enjeksiyonla kalıplama yönteminde gazın ergimiş plastik içerisindeki ilerlemesi (100).

Gaz destekli olarak yapılan enjeksiyon kalıplılığı, Şekil 2.15’ de görüldüğü gibi kalıp boşluğuna iki farklı kanaldan, akışkan enjeksiyonu yapılması prensibine dayanmaktadır (100, 104-118). Birinci kanaldan ergimiş plastik enjekte edilirken,

hemen ardından da basınçlı gaz enjekte edilmektedir. Eş zamanlı olarak yapılan iki akışkanın kalıp boşluğundaki ilerlemesi, Şekil 2.165' da görüldüğü gibi önde ergimiş plastik ve arkasında ise basınçlı gaz şeklinde gerçekleşmektedir.



Şekil 2.16. Ergimiş plastiğin içerisine gaz girişinin altı farklı zaman aralığındaki değişimi (102).

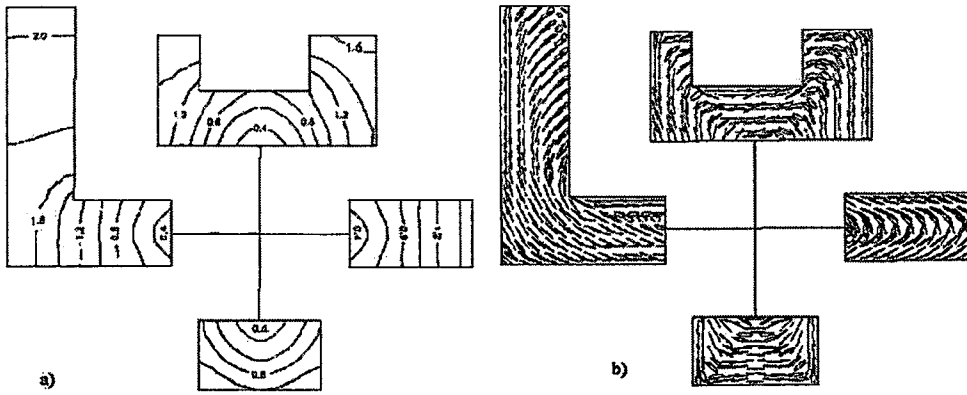
Akış analizi, klasik enjeksiyon kalıplarında yapılan işlemlerin aynısı olup, sadece hesaplama iki defa tekrarlanmaktadır. Birincisinde ergimiş plastiğin akışı ve akış parametreleri, ikincisinde ise yoğunluğu ergimiş plastiğe göre daha az olan basıncı yüksek, sıkıştırılabilir gaz dikkate alınarak hesaplamalar yapılabilmektedir (111-117). Gaz destekli enjeksiyon kalıplamada üretilen plastik parçalar, içi boş olduğundan hem hafif olmakta, hem de malzeme tasarrufundan dolayı maliyeti düşük olmaktadır (100, 104, 107, 111-116).

İçi boş ve boyutları büyük olan plastik parçalar, mekanik özellikler bakımından içi dolu plastik ürünlere göre daha mukavemetli olmaktadır. Bunun yanında, ergimiş plastik içerisine enjekte edilen gazın, plastik malzeme içerisinde oluşturduğu basınçtan dolayı, üründe çökme ve çarpılma gibi problemler en aza inmektedir (14-118). Gaz destekli enjeksiyonla kalıplamada gaz kanalının çapı, gaz ile plastiğin enjekte edilmesindeki eşzamanlı enjeksiyon, plastiğin ve gazın basıncı gibi

enjeksiyon parametrelerinin hesaplanması ve uygulanması bu yöntemi zorlaştıran en önemli parametrelerdir (116-118).

2.6. Elyaf Takviyeli Polimer Üretiminde, Kalıp Boşluğundaki Plastik Akışına Bağlı Olarak Elyaf Yönelimlerinin Tespiti

Enjeksiyon tekniği ile üretilen plastik esaslı kompozit parçaların, mekanik özelliklerinin belirlendiği en önemli parametrelerden biri, elyafların doğrultuları ve dağılımıdır (119-125). Matris malzemesi olarak polimerlerin kullanıldığı ve içerisine küçük elyafların takviye edilmesi ile elde edilen kompozit parçalarda, elyaf doğrultuları, ürünün mukavemetini oldukça önemli oranda etkilemektedir. Elyaf, bağlayıcı, taşıyıcı ve matris malzemesi olan plastik içerisinde ergitilir ve ekstrüzyon tekniği ile granül haline getirilir (121). Elyaf takviyeli plastik parçalar, içerisinde elyaf bulunan plastik hammadde enjeksiyon tezgahında, normal enjeksiyon kalıpcılığında uygulanan işlemlere göre üretilir. Elyaf takviyeli ergimiş plastik malzeme, kalıp boşluğuna dolarken gerçekleşen akış tipi ve kalıp boşluğunu doldurma şekli, elyafların yapı içerisindeki konumlarını ve dağılımlarını belirlemektedir (16, 118-120, 122-136).

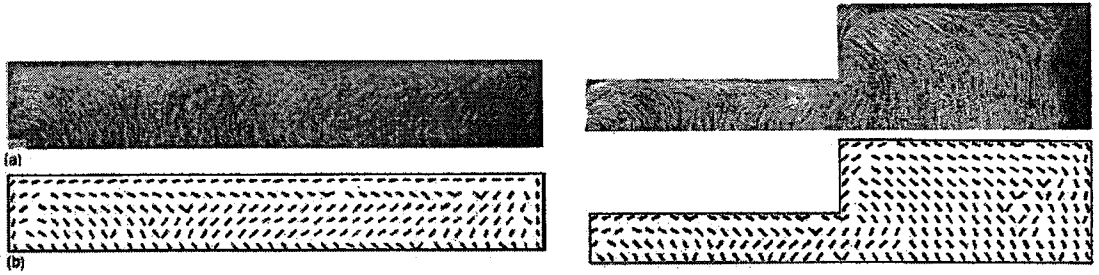


Şekil 2.17. Elyafların kalıp içerisindeki plastiğin akış doğrultusunda yönelimleri a) zamana bağlı olarak akışkanın ilerlemesi, b) Akış tipine bağlı olarak gerçekleşen elyaf yönelimleri (119).

Akış simülasyonunda, hesaplamalar sırasında gaz destekli enjeksiyonla kalıplama tekniğinde olduğu gibi akış parametrelerinin hesaplanmasında, elyaf malzemesi dikkate alınarak çözümleme yapılmaktadır. Elyaf takviye oranının önemli olduğu bu

analizde, elyafların akışı etkilediği fakat, elyaf yönelimlerinin akış doğrultusunda olduğu belirtilmektedir. Lee ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada, Şekil 2.17’de görüldüğü gibi dört gözlü bir kalıp boşluğuna kısa elyaf takviyeli plastiğin akış analizi, Hele-Shaw yaklaşımı kullanılarak yapılmıştır (119). Cross viskozite modelinin kullanıldığı bu çalışmada, yoğunluk değişimi, Tait eşitliğinden yararlanılarak hesaplanmıştır. Dördüncü dereceden Runge-Kutta sayısal çözümleme yöntemi ile cebirsel hale getirilip akış parametrelerinin hesaplandığı çalışmada, dengeli dolum, girişin yeri, giriş kesiti ve giriş sayısı gibi parametrelerin akış doğrultusuna olan etkileri incelenmiştir. Deneysel çalışma ile karşılaştırılan sayısal analiz sonuçlarının, deneysel sonuçlarla büyük oranda uyumlu olduğu çalışmada vurgulanmıştır.

Şekil 2.18’ de verilen iki farklı profil Kim, Park ve Jo tarafından incelenmiştir. Kalıp boşluğu şekli, enjeksiyon parametreleri ve elyaf takviye oranının elyaf yönelimleri üzerinde etkilerinin büyük olduğu, ve elyafların akış doğrultusunda yönlendirildiği vurgulanmıştır (120). Yapılan deneysel çalışma ile teorik çalışmanın sonuçları karşılaştırılmıştır. Şekil 2.18’ de görüldüğü gibi akış üretilen parçadan alınan fotoğraf görüntülerinden de anlaşılabacağı gibi her iki profilde de akış izleri ile simülasyonla elde edilen elyaf doğrultularının aynı olduğu, elyafların yönelimlerinin akış doğrultusunda gerçekleştiği tespit edilmiştir.



Şekil 2.18. İki farklı geometrideki akış izleri ile, teorik olarak elde edilen elyaf yönelimleri (120).

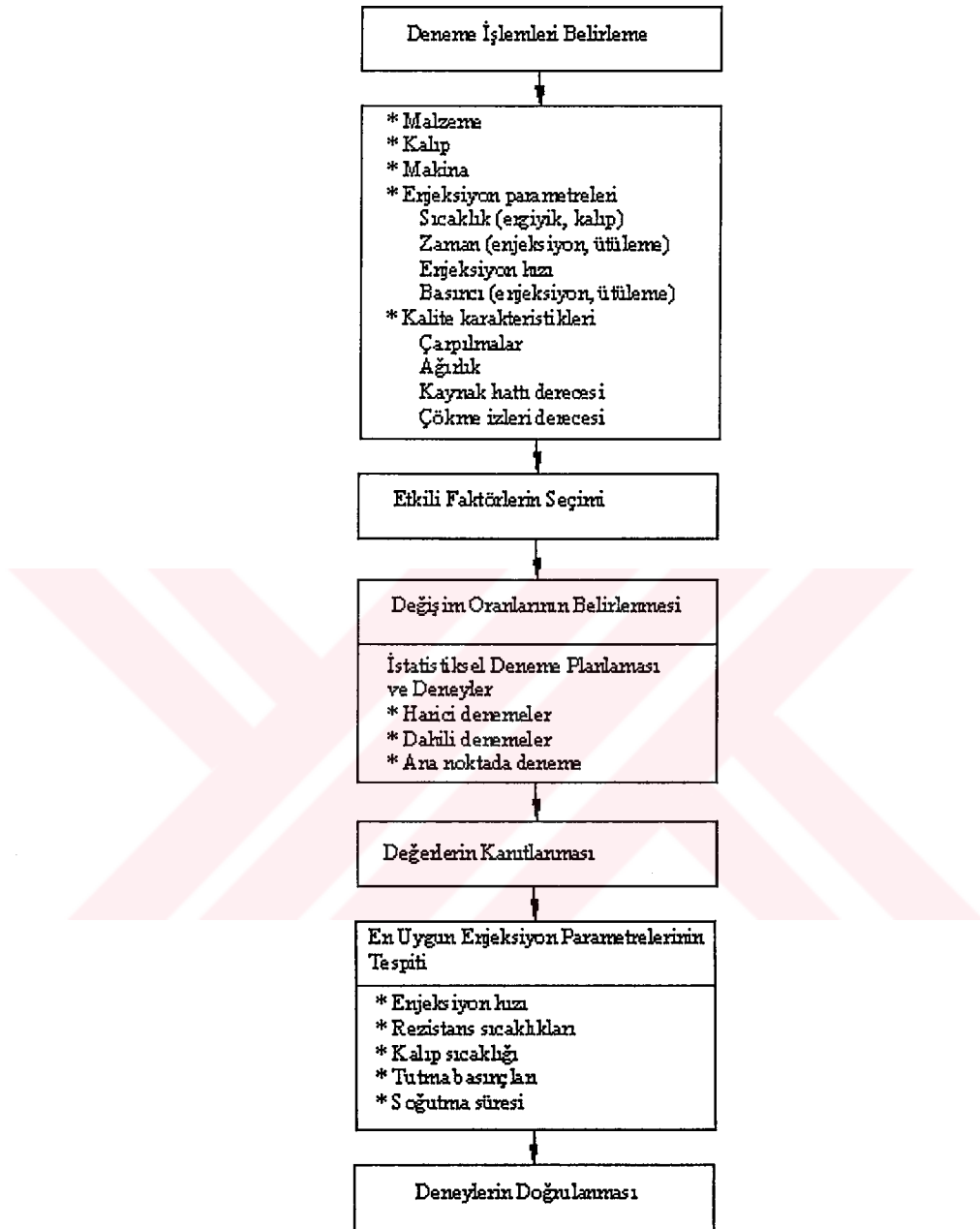
2.7. Yapay Zeka Yöntemleri Kullanılarak Enjeksiyon Parametrelerinin Tespit Edilmesi

Enjeksiyon kalıpcılığında ilk önce, üretilecek parça tasarlanır, parçaya göre kalıp tasarımı yapılır ve tasarımı yapılan kalıp üretildikten sonra, enjeksiyon tezgahında

plastik parça imalatı yapılır. Yani ilk olarak üretilecek plastik parça tasarımı yapılır, daha sonra parçanın üretilebilmesi için enjeksiyon kalıbı tasarlanıp, imal edilir. Enjeksiyon ise, plastik parça üretiminin son safhası olup, ürün elde edilir. En uygun parça üretimi için, bu safhaların tamamında da en uygun tasarımın yapılması gerekmektedir. Bazı durumlarda, kalıp tasarımı yapılırken, parçanın fonksiyonunu ve görünümünü etkilemeyecek değişiklikler yapılmaktadır. Bu nedenle, enjeksiyon kalıbı tasarlanırken, enjeksiyon sırasında nasıl bir problemle karşılaşılacağı, kalıbın boyutları, girişin yeri, sayısı, tipi ve boyutları, kalıbın kaç gözden (enjeksiyon çevrimi başına üretilen parça sayısı) oluşacağı, yolluğun ve dağıtıcı kanalların yerleşimi, itici sistem, soğutma kanalları ve kalıp ayırma çizgisi gibi bir çok parametre dikkate alınmaktadır (137, 138). Enjeksiyonla üretim sırasında, enjeksiyon basıncı, enjeksiyon sıcaklığı, enjeksiyon hızı, vidalı mil geri basıncı, tutma basınçları, ütüleme süresi vb. gibi bir çok enjeksiyon parametresi de hesaplanmakta ve tezgahta ayarlanmaktadır.

Bu kadar çok sayıda karmaşık ve birbirini etkileyen parametrelerin, kalıbın henüz tasarım aşamasında belirlenmesi için, çok çeşitli yöntemlerle hesaplamalar ve simülasyon yapılmaktadır. Simülasyonlar genellikle, sayısal analiz yöntemleri ile kütle ve ısı transferi hesaplamaları yapılarak gerçekleştirilmektedir. Enjeksiyon kalıbı tasarımı ve enjeksiyon parametrelerinin tespiti için, sayısal hesaplamaların yanında yapay zeka yöntemleri de kullanılmaktadır (137-152). Yapay zeka mantığına dayalı yöntemlerde, parçanın geometrik yapısı, kalıbın tasarımına ait bilgiler ve enjeksiyon parametreleri gibi bilgilerden en uygun değerler seçilerek kullanıcı yönlendirilmektedir (137, 139).

Deneysel Tasarım Yaklaşımı (Design of Experiment, DOE), İşlem Penceresi Yaklaşımı, Uzman Sistem, Yapay Sinir Ağları, Bulanık Mantık, Yapay Sinir Ağları ve Bulanık Mantığın birlikte kullanıldığı Karma Sistemler ve Genetik Algoritma gibi bir çok yapay zeka yöntemleri ile enjeksiyon parametreleri tespit edilebilmektedir (137-154). Enjeksiyon kalıpları tasarımı ve enjeksiyon parametrelerinin tespitinde, deneysel tasarım metotlarından en çok kullanılanı, Taguchi yöntemidir (86, 137, 148,



Şekil 2.19. Optimum enjeksiyon parametrelerinin belirlenmesinde, deneysel tasarım yaklaşımı modelinin işlem sırası (137).

Şekil 2.19’ da deneysel tasarım yöntemi ile en uygun enjeksiyon parametrelerinin belirlenmesine ait işlem sırası verilmiştir. Buradan anlaşılacağı gibi ilk önce deneysel olarak incelenip veri alt yapısı oluşturulacak parametreler belirlenmiştir. Bu parametrelerden etkin olanlar seçilip, bunların değişim oranları tespit edilmiştir. Elde edilen bu bilgilerin doğruluğu test edildikten sonra enjeksiyon için en uygun parametre değerleri seçilebilmektedir.

Enjeksiyon parametrelerinin hesaplanmasının geleneksel yollarla yapılması işlemlerinde, en uygun enjeksiyon parametreleri bulunana kadar deneme yanılma yolu ile üretim yapılmaktadır (14, 137, 148, 149). Fakat bu işlemler sırasında bir çok enjeksiyon parametresinin birbirini etkilediği ihmal edilmektedir. Gerçekte, bir çok enjeksiyon parametresi birbirleri ile etkileşim içerisinde olup, bu ilişkinin ihmal edilmesi yanlış sonuçların elde edilmesine sebep olmaktadır (137). Deneylere dayalı tasarım yöntemlerinden olan Taguchi yönteminde, işlemler, parametreler, hatalar ve dereceleri, işlemlerin ve parametrelerin öncelik sıraları ve parametreler arasındaki ilişki belirlenerek en uygun parametre seçimi yapılmaktadır (86, 137, 148, 149)

Diğer yapay zeka yöntemlerinde ise enjeksiyon parametreleri, imalat kuralları, kararlılık tabloları ve genel çerçeve bilgiler belirlenerek, deneysel ve teorik bilgi tabanı oluşturulur. Oluşturulan bu bilgi tabanlarına göre uzman sistem, yapay sinir ağları veya bulanık mantık metotlarından biri ile optimizasyon yapılarak mantıklı ve kesin sonuçlar çıkarılır (137, 142-154).

2.8. Basınç-Hacim-Sıcaklık (PVT) İlişkisi ve Viskozite Modelleri

Enjeksiyon işlemi, ergimiş plastiğin basınç ve hız altında kalıp boşluğuna enjekte edilmesi, plastiğin kalıp boşluğuna dolması, boşluğun şeklini alması, soğuyarak katılaşması ve kalıptan çıkması safhalarından oluşmaktadır (64-67). Doğrusal zincirler ve makro moleküllerden oluşan plastikler, yapıları gereği Newtonian olmayan akış özelliği göstermektedir (1, 14-16, 155-163). Plastiklerin büyük bir çoğunluğu Üs yasası akış özelliğine sahip olmakla beraber, bazıları Bingham akış olduğu kabul edilip analiz, yapılmaktadır (156-169). Binlerce çeşidi bulunan plastiklerin, reolojik özellikleri belirlenmekte ve akış simülasyonu yapılırken, kimyasal ve fiziksel özelliklerinden kaynaklanan farklılıklardan dolayı, gerilme-kayma hızı arasındaki ilişki değişim göstermektedir.

$$\tau = m \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^{n-1} \quad [2.73]$$

Üs yasası akışında gerilme terimi, Eş. 2.73' de verilen bağıntı ile hesaplanmaktadır (158). Burada, n Üs yasası sabiti, m ise kararlılık sayısı olup, her malzeme için sabit sayılar şeklinde veriler bulunmakla birlikte

$$m = A \exp(\Delta E / RT) \quad [2.74]$$

formülü ile de hesaplanabilmektedir (158). Bingham akışkan için gerilme, Eş. 2.75' de verilen bağıntı ile hesaplanmakta olup, gerilme değeri akma gerilimine eşit veya altında ise rijit katı özelliği, akma geriliminin üstünde ise, görünen viskozitenin altında bulunan akışkan olarak kabul edilir (157).

$$\tau \leq \tau_0 \Rightarrow \dot{\gamma} = 0, \quad \tau > \tau_0 \Rightarrow \tau = \eta_{app} \dot{\gamma} \quad [2.75]$$

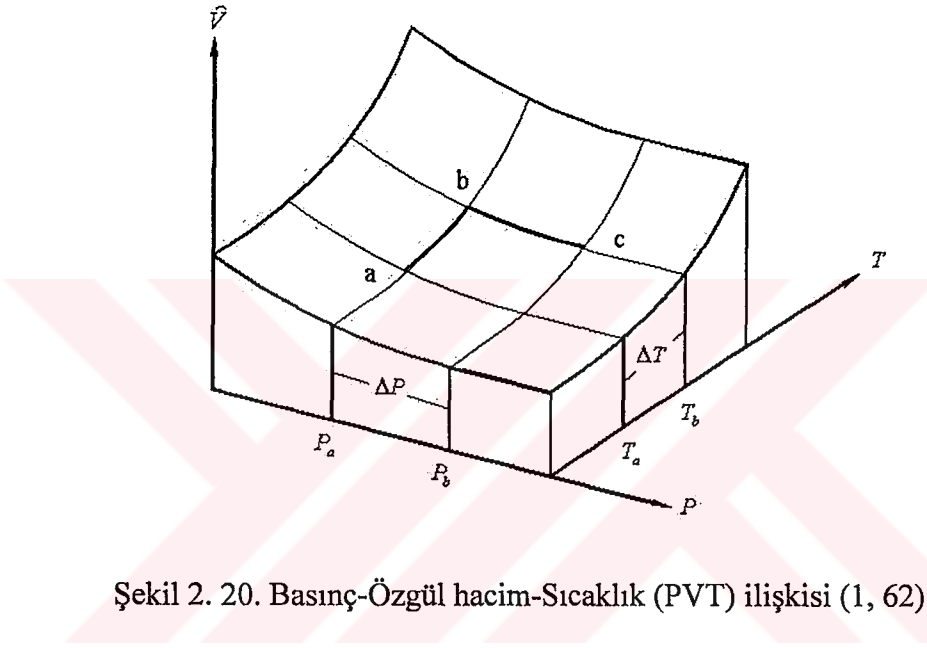
burada τ_0 akma gerilimini, $\dot{\gamma}$ uzama oranı tensörünü, η viskoziteyi temsil etmekte olup, görünen viskozite, $\eta_{app} = \eta + (\tau_0 / \dot{\gamma})$ formülü ile hesaplanmıştır (157).

2.8.1. Plastiklerde basınç-hacim ve sıcaklık (PVT) ilişkisi

Plastiklerin akış analizi ve simülasyon için, basınç-hacim-sıcaklık ilişkisini iyi bilmek gerekmektedir. Yapay zeka ile yapılan çalışmalarda, enjeksiyonla üretim tekniği, kalıp parametreleri, enjeksiyon parametreleri, enjeksiyon parametrelerinin birbirleri ile etkileşimi ve malzemenin reolojik özellikleri dikkate alınarak bilgi tabanı oluşturulmakta ve matematiksel olmayan yöntemle sonuç çıkarılabilmektedir. Yani yapay zeka yöntemleri ile tamamen deneysel veriler kullanılarak, matematiksel işlem yapmadan sonuca ulaşabilmek için, malzemenin fiziksel ve kimyasal özellikleri bilgi tabanı olarak değerlendirilmektedir. Plastiğin akışını bu kadar etkileyen ve matematiksel olmayan yöntemlerde bile kullanılan fiziksel özelliklerin, enjeksiyon parametreleri karşısındaki değişimleri, sayısal yöntemlerle analiz yapan modellerde de kullanılmaktadır.

Ergimiş plastiğin kalıp boşlundaki akışının doğru olarak modellenebilmesi için, kalıp boşluğundaki akışı sırasında ne gibi fiziksel değişim içerisinde olduğunun bilinmesi gerekmektedir. Newtonian olmayan akış özelliği gösteren ergimiş plastiklerin, ısıl genleşme katsayıları ve ısınma ısıları metallere göre yüksek, ısı iletim katsayıları ve

yoğunlukları oldukça düşüktür (170-172). Genleşme katsayılarının metallere göre yüksek olması ve sıcaklık karşısında çok fazla değişim göstermesi, plastiklerin akışının karmaşıklaşmasına olmasına sebep olmaktadır (1, 62, 173-175). Plastiklerin özgül hacimleri, Şekil 2.20' de görüldüğü gibi sabit basınçta sıcaklık artışına bağlı olarak artmakta, sabit sıcaklıkta ise basınç artışına bağlı olarak azalmaktadır.



Şekil 2. 20. Basınç-Özgül hacim-Sıcaklık (PVT) ilişkisi (1, 62)

Ergimiş plastiğin yoğunluğu, 1 bölü özgül hacim ($\rho = 1/V$) olarak elde edilmektedir (1, 62, 64, 155, 174-178). Sıcaklık ve basıncın bir fonksiyonu olan özgül hacim $V(T, P)$, ergimiş plastiğin kalıp boşluğuna dolması sırasında sürekli değişmektedir (1, 175, 176). Yapılan akış analizi çalışmalarında, yoğunluğun, sıcaklık ve basınç karşısındaki değişimini hesaplayabilmek için, Lennard-Jones, Hücre Teorisi, Flor-Orwoll-Vrij (VOF) Modeli, Prigogine' nin Dörtgen Hücre Modeli (CM), Dee ve Wals Hücre Modeli (MCM), Sanchez-Lacombe Kafes Akış Modeli, Simha-Somcynsky, ve Hhartman-Haque Modeli gibi bir çok teorik hesaplama yöntemleri kullanılmaktadır (1, 16, 62, 176). Ayrıca, yoğunluğun sıcaklık ve basınç karşısındaki değişimi, deneysel verilere dayalı ve çok sık kullanılan Tait eşitliği ile de hesaplanmaktadır (1, 7-9, 62, 78, 119, 126, 176). Bunların yanında, yoğunluğun, sıcaklık ile değişimini Buoyancy kuvveti yada Boussinesq yaklaşımı olarak bilinen metotla da hesaplanabilmektedir (179-182). Bölüm 4' de daha detaylı olarak verilen

Tait yöntemi ve Boussinesq yaklaşımı arasında çok önemli farklar bulunmaktadır. Tait modelinde, plastiğin sıvı ve katı faz halinde ayrı ayrı kullanılan deneysel verilere dayalı bir model olup, özgül hacmin basınç ve sıcaklık ile yoğunluk değişimi hesaplanabilmektedir. Boussinesq yaklaşımında ise, momentum denklemindeki yerçekiminin etkisinin temsil edildiği parametrenin (ρg); referans yoğunluk, malzemenin genleşme katsayısı ve sıcaklığına bağlı olarak hesaplanmasına dayanan bir yöntemdir (179-182).

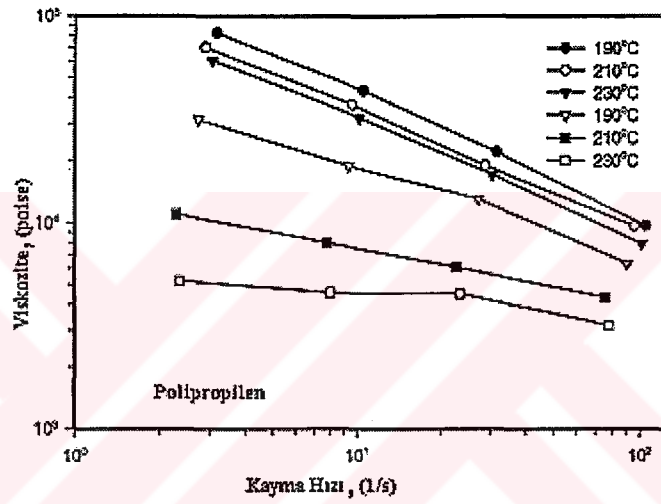
2.8.2. Viskozite modelleri

Plastikler, makromoleküllerden oluşan, doğrusal zincirlere sahip, polimer esaslı bir malzemedir (64-67, 155, 183-188). Yapıları gereği kayma hızı ile kayma gerilmesi arasında doğrusal bir ilişki olmadığından, Newtonian olmayan akış özelliğine sahip olup, hem viskoz hem de elastik özelliklerinden dolayı, viskoelastik akış olarak tanımlanmaktadır (64, 155, 183, 187, 188). Newtonian olmayan akışkanların akış analizleri yapıldığında, akış üzerinde en etkin parametre olan viskozite, sıcaklık, basınç ve kayma hızının bir fonksiyonudur.

Viskoziteyi hesaplamak için, geliştirilmiş yüzlerce model bulunmakla beraber, en çok Üs yasası, Carreau, Cross Model, Cross-WLF, Arrhenius, Birinci ve İkinci Dereceden Moldflow Viskozite Modelleri kayma hızı, sıcaklık, basınç gibi parametreler ve deneysel verilerden elde edilmiş sabit sayılara bağlı viskozite modelleri de kullanılmaktadır (1, 62, 64-67, 155, 187, 188-192).

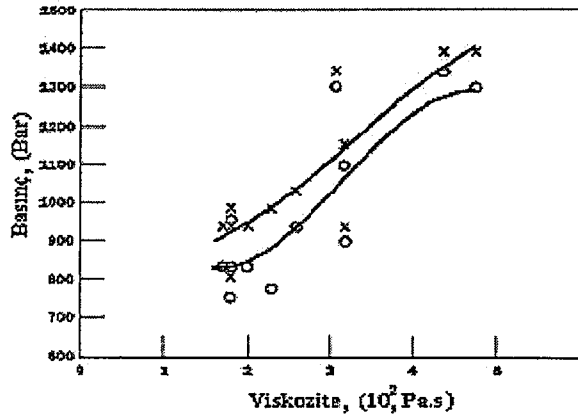
Viskozitenin bir çok tanımı bulunmasına karşın, en yaygın olarak kullanılan şekliyle, akışkanın üzerine uygulanan gerilme karşısında (akmaya zorlanması), akmaya karşı göstermiş olduğu direnç olarak tanımlanır (155). Bu tanımdan da anlaşılacağı gibi akmaya karşı gösterilen direnç olan viskozite, plastiğin akmasını kolaylaştıracak tüm parametreler karşısında azalmakta, akmayı zorlaştıran tüm akış parametreleri karşısında ise artmaktadır.

Ergimiş plastiğin akışı sırasında plastiğin sıcaklığının artması, doğrusal zincirlerden oluşan plastiğin moleküller arasındaki bağın zayıflamasına sebep olmaktadır (155, 183, 186). Bağ kuvveti zayıflayan plastik moleküllerinin, deformasyona uğraması daha kolay olmaktadır. Plastiğin sabit yük ve basınç altında akmaya zorlanması sırasında, sıcaklığın artması ile bağ kuvvetinin zayıflaması, akmayı kolaylaştırdığından, viskozite düşmektedir (155). Şekil 2.21’ de görüldüğü gibi, kayma hızının ve sıcaklığın artması ile viskozite değeri düşmektedir (189).



Şekil 2.21. Viskozitenin farklı sıcaklıklar altında kayma hızı ile değişimi (189)

Ayrıca, plastiklerin büyük bir çoğunluğunda bulunan başka bir fiziksel özellik, kayma hızının belirli bir değerinden sonra, plastiği oluşturan uzun doğrusal zincirler, akış doğrultusuna yöneldiklerinde, akışa karşı gösterilen iç direnç azalmaktadır. Enjeksiyonla kalıplama tekniğindeki akışlarda (enjeksiyon kalıp), türbülanslı akış olmadığından kayma incilmesi (shear thinning) olarak bilinen bu özellik, bir çok plastik malzemenin ortak karakteristiğidir (64-67,155,183-201). Bazı plastik türler ise, dilatant akış olarak bilinen akış özelliği göstermekte olup, kayma hızının belirli değerlere kadar yükselmesinden sonra, kayma kalınlaşması (shear thickening) durumu ortaya çıkmaktadır (64,155,183).



Şekil 2.22. Viskozitenin basınç karşısındaki değişimi (190)

Viskozite sadece kayma hızı ve sıcaklık parametreleri ile değişmemektedir. Bunların yanında, basınç, molekül ağırlığı, plastiğin kristallik derecesi gibi başka parametreler de viskoziteyi etkilemektedir (1, 64-67, 155, 183, 202-204). Plastiğin akışı sırasındaki yoğunlukta son derece önemlidir. Yoğunluk artışı viskozitenin artmasına sebep olmaktadır. Plastiğin akışında en önemli parametrelerden biri olan basınç, ergimiş plastiğin yoğunluğunu artırmaktadır. Bu nedenle, Şekil 2.22' de görüldüğü gibi, basınç artışına bağlı olarak viskozite de artmaktadır (202-204)

Akışkanların viskoziteleri, matematiksel yollarla hesaplanabildiği gibi, deneysel yollarla da tespit edilebilmektedir (155, 181-183, 194, 202, 205-207). Akışa etki eden parametrelerin, viskozite üzerindeki etkilerini deneysel olarak tespit etmek amacıyla yapılan viskozitemetreler, araştırılmak istenilen parametrelere göre, kılcal borulardan elektro-magnetik yapıda olanlara kadar çok değişik şekillerde tasarlanmışlardır (64, 155, 205-207). Deneysel yöntemlerle plastiklerin viskozitelerinin belirlenmesinde, akış sırasında oluşan tüm parametreler dikkate alınarak yapılabildiğinde en doğru sonuçlar elde edilebilmektedir.

2.9. Enjeksiyon Parametreleri ve Soğutmaya Bağlı Olarak Gerçekleşen Enjeksiyon Hataları

Enjeksiyon tekniği ile üretilen plastik parçalarda, enjeksiyon parametrelerine bağlı olarak bir çok hatalar meydana gelmektedir. Uygun olmayan enjeksiyon şartlarına

bağlı olarak gerçekleşen bu hataların başında, çarpılma, büzülme, eksik basım (kalıp boşluğunu tam dolduramama), çökmeler, yanmalar, kaynak hatları, akış izleri, çapaklanmalar gibi bir çok hatalar sayılabilir (64-67, 99, 173, 208-218). Enjeksiyon basıncının az veya plastiğin sıcaklığının yetersiz olması sonucu plastik, boşluğu dolduramadığı zaman eksik basım olmaktadır. Yapılan teorik analizler ile, en uygun enjeksiyon sıcaklığı, basıncı ve hızı tespit edilerek, bu problem çözülebilmektedir. En sık karşılaşılan diğer iki problem ise çarpılma ve büzülmedir (208-214). Çarpılma, kalınlığı fazla olan özellikle düzlemsel parçalarda sıklıkla görülmekte olup, sıcaklık ve basınç dağılımının farklı olması çarpılmayı etkilemektedir (208-210). Ayrıca, dengesiz soğutma işlemi de, çarpılmayı etkileyen diğer önemli bir parametredir (208-210, 215-217).

Plastik parçaların görünümünü ve fonksiyonunu etkileyen diğer bir hata ise büzülmedir (211-214). Büzülmede, plastik malzemenin genleşme katsayılarının yüksek olmasından dolayı, plastik, katılaşmaya başlayınca mutlaka küçülmektedir. Enjeksiyonla kalıplama tekniğinde, kalıp boşluğunun dolma safhasından sonra katılaşmaya başlaması sırasında, tutma basınçları safhası olarak bilinen safhada bir miktar daha plastik enjekte edilmektedir (64, 211). Plastik katılaşırken büzülmede, arkadan sürekli beslenen malzeme ile takviye edilerek, geometrik yapının korunması sağlanmaktadır. Bu işlem sırasında yetersiz basınç ve yetersiz malzeme enjekte edilmesi durumunda büzülme gerçekleşmektedir. Sayısal analiz ve simülasyonlarda, tutma basınçları safhasında plastikler genellikle sıkıştırılabilir akış olarak incelenmekte olup, enjeksiyon basıncı, sıcaklık dağılımı ve soğutma süreleri tespit edilmektedir (211, 215-217)

2.10. Ergimiş Plastiğin Kalıp Boşluğundaki Akışının Deneysel Yollarla Gözlenmesi

Ergimiş plastiğin kalıp boşluğundaki akışının nasıl olacağı, boşluğu doldurma tipi, doldurma süresi, kaynak hatlarının oluşumu vb. gibi bir çok parametre teorik olarak tespit edilip, elde edilen bilgiler ve değerler, kalıbın tasarım aşamasında ve enjeksiyon sırasında, enjeksiyon parametrelerinin ayarlanmasında kullanılmaktadır.

Fakat, teorik olarak yapılan hesaplamalarda (sayısal analiz ve simülasyon), çok karmaşık akış özelliği gösteren ergimiş plastiğin akışını modelleyip, simüle etmede kullanılan denklem takımlarının çözümü oldukça zordur. Temel denklemlerin çözülmesinin hem zor olması hem de bilgisayar yardımı ile çözümünün oldukça uzun zaman almasından dolayı, bir çok kabuller ve ihmaller yapılmaktadır. Yapılan bu kabuller ve ihmaller, plastiğin kalıp boşluğundaki akışını ancak yaklaşık değerlerle tespit edebilmektedir. Gerçekte kalıp boşluğu içerisindeki akışı, her şart altında tam ve doğru olarak simüle etmek, hemen hemen imkansız gibidir. Bu nedenle, plastiğin kalıp boşluğundaki gerçek akışının deneysel olarak tespit edilebilmesi için bir çok yöntem kullanılmaktadır (64-66, 84).

Bu yöntemlerin başında kısa basış (short shot) tekniği ilk sırayı almaktadır. Kısa basış tekniği, ergimiş plastiğin kalıp boşluğuna farklı oranlarda basılması ve çıkarılan eksik ürünün geometrisine bakılması prensibine dayanmaktadır (64-67). Plastiğin boşluk içerisindeki akışına ve boşluğu nasıl doldurduğuna dair bilgi edinilebilmektedir. Bu yöntemde, karşılaşılan problemler, boşluk içerisine enjekte edilen plastiğin miktarının adım adım hassas olarak tespit edilememesi, akışın yerçekimine doğru olduğu durumlarda, plastik enjekte edilmese dahi ergimiş plastiğin yerçekiminin etkisi ile bir miktar daha akabilmesi gibi problemler bu tekniği sınırlı kılmaktadır (64, 134, 218).

Diğer bir yöntem ise video kameralar ve algılayıcılarla tespit etme yöntemidir (134, 218-223). Bu yöntemde, basınç, hız ve sıcaklık değerlerinin tespit edilmesi için, termokupl, basınç ve hız ölçerler gibi donanımlar kalıp setine yerleştirilmektedir. Enjeksiyon işlemi sırasında elde edilen değerler akış sırasında var olan gerçek ve doğru akış parametrelerini verdiği için kesin değerler olarak kabul edilmektedir.

Ayrıca, Şekil 2.23' de verilen düzenekte görüldüğü gibi, kalıp bir tarafına çelik plaka, diğer tarafına ise cam plaka ve cam plakaya da belirli bir açıyla ayna yerleştirilmiştir. Kamera ayna vasıtasıyla ergimiş plastiğin kalıp boşluğundaki gerçek akışını kaydetmektedir. Böylece, kalıp boşluğu dolarken plastiğin nasıl aktığı, akış tipi ve doldurma süresi gerçek görüntülerle elde edilmiştir (219).

tipi gözlemlenmektedir. Kimyasal yapısı ve ısı-fiziksel değişimlerinden çok karmaşık akış özelliğine sahip olmasından dolayı, plastiklerin kalıp boşluğundaki akışını analitik olarak çözüp, doğru tahminlerde bulunabilmek neredeyse imkansız denecek kadar zordur. Deneysel yöntemlerle yapılan akış analizleri de, gerçekte akış analizi ve simülasyon mantığına uygun değildir. Analiz ve simülasyonun esas amacı, plastik ürünün ve kalıbın tasarım aşamasında kalıp tasarımı için gerekli olan bilgiler ve enjeksiyon parametrelerinin imalat öncesi tespit edilmesidir. Bu nedenle, kalıbı imal ettikten sonra yapılacak deneme yanılma, kısa basış hem zaman açısından hem de maliyet açısından ekstra yük olduğundan uygun değildir. Ama yine de, ilk ayarlamalarda, en uygun enjeksiyon parametrelerinin bulunması için uygulanan ve geçerli bir yol olup, benzer uygulamalar için de fikir verebilmektedir.

Termokupl, basınç ve hız ölçerler ve video kamera ile gözlemlene gibi deneysel yöntemler ise, genellikle pratikte sadece araştırma için uygulanmaktadır. Bu yöntemler kalıpta tahribat yapması, plastik parçanın geometrisini etkilemesi bakımından, imalatı yapılacak her parça için veya her kalıp için yapılması söz konusu değildir. Sadece, benzer uygulamalara ışık tutması, enjeksiyon parametrelerinin birbirleri ile etkileşiminin tespit edilmesi ya da araştırma amaçlı yapılan sayısal analiz ve simülasyon yöntemlerinin doğruluğunun test edilmesinde kullanılabilmektedir.

Yapay zeka mantığına dayalı yapılan çalışmalar da ise, deneysel verilere ihtiyaç duyulmaktadır. Giriş değerleri (sayısal değerler) ve enjeksiyon parametrelerin birbirleri ile ilişkilerine ait bilgiler, veri tabanında depolanıp, insan tecrübesinin uygulamada kullanılması gibi, önceden girilmiş tecrübeler dayalı verilerden sonuçlar çıkarılabilmektedir. Yöntemi sınırlı kılan ise, her plastik parça için yapılan kalıbın, kendine has geometrik şekil, boyut, konum ve özelliklerinin olmasıdır. Bu nedenle, sadece çok benzer uygulamalar ve yaklaşık bilgiler edinebilmek mümkün olmaktadır. Ancak, bir kalıp üzerinde yapılacak çalışmada enjeksiyon parametrelerinin birbirleri ile etkileşiminin bilinmesinden dolayı, üretimle eş zamanlı olarak, geri beslemeli parametre ayarlaması, kullanışlı ve başarılı olmaktadır.

Newtonian olmayan akış özelliğine sahip plastiklerin, kalıp içerisindeki akışının modellenmesi ve simülasyonunun sayısal yöntemlerle yapılması, temelde kütlenin korunumu, enerjinin korunumu ve momentum denklemlerinin çözümü ile yapılmaktadır. Yapılan çalışmalardan anlaşıldığı gibi, temelde kullanılan eşitlikler aynı olup, akışın safhaları, sınır şartları dikkate alınarak yapılan kabuller ve ihmaller ile farklı bağıntılar elde edilmektedir. Elde edilen diferansiyel formdaki denklemler genellikle, çok değişik Sonlu Farklar ve Sonlu Elemanlar yöntemleri ile cebirsel hale getirilip, iteratif metotlarla akış parametreleri hesaplanmaktadır.

Plastik parçaların, genellikle ince kesitli olduğu kabulünden hareketle, akışın iki boyuta indirgenmesi prensibine dayanan Hele-Shaw metodu, kalıp içerisindeki plastik akışının simülasyonunda yaygın olarak kullanılmaktadır. Denklem takımlarının çözümünü kolaylaştırmak için, değeri ve etkisi küçük olan parametrelerin ihmal edilmesi ve akışın sıkıştırılmaz olarak kabul edilmesi, bu metot kullanılarak elde edilen değerlerin, gerçek akıştan farklı olmasına sebep olmaktadır. Değişik şartlara göre nispeten başarılı olduğu araştırmacılar tarafından belirtilen bu yöntem, bir çok araştırmacının çalışmasında yetersiz ve hatta bazı enjeksiyon şartlarında hatalı simülasyona yol açan metot olarak eleştirilmektedir.

Çalışmalarda doğrusal olmayan diferansiyel formdaki temel denklemlerin sadeleştirilmesi ve kolay çözümlenebilmesi için, plastiğin kalıp boşluğu dolana kadar geçen sürede sıkıştırılmaz akış olarak kabul edilmektedir. Akış parametrelerinin bu şart altında hesaplanması, gerçek akış değerlerinin elde edilmesini neredeyse imkansızlaştırmaktadır. Ergimiş plastik kalıp boşluğunda ilerlerken, ergiyikten soğuk kalıp yüzeylerine ısı akışı olduğundan, plastiğin boşluk içerisindeki akışı sırasında zaman bağlı olarak sürekli sıcaklığı azalmaktadır. Genleşme katsayıları metallere göre çok daha yüksek olan plastiklerin, özgül hacimlerinde azalma meydana gelmektedir. Yoğunluk artışı olarak bilinen bu etkinin sonucu, ergimiş plastik kütlesinin üzerinde sabit olarak uygulanan enjeksiyon basıncı karşısında birim zamanda farklı yol almasına sebep olmaktadır. Sıcaklığın ve basıncın bir fonksiyonu olan yoğunluğun değişiminin ihmal edilmesi, kullanılan yöntemin hatalı sonuçlar vermesine sebep olmaktadır.

Navier-Stokes eşitliklerinin kullanılması ile yapılan çalışmalarda, ele alınan plastik molekülü üzerine gelen tüm kuvvetlerin dikkate alındığı ve ihmal edilmediği takdirde akış analizi, hem üçüncü boyutta birim kalınlık ile sınırlı olmamakta hem de tüm parametreler ihmal edilmeden hesaplanabilmektedir. Literatürde, Navier-Stokes eşitliklerinin kullanıldığı bazı çalışmalarda, dolum aşamasının sıkıştırılmaz olarak kabul edilerek çözüm yapılmıştır. Ayrıca, yapılan bu çalışmalarda sadece doldurma süresi ve tipinin incelendiği belirtilmektedir.

Yoğunluk değişimi için PVT ilişkisi kullanılmakta olup, yoğunluğun değişiminin hesaplanmasında en yaygın olarak kullanılan yöntem, Tait eşitliğidir. Tait eşitliği, sıcaklık ve basınca bağlı, deneysel olarak elde edilmiş sabit sayılardan oluşmaktadır. Burada, camsı geçiş sıcaklığının (T_g) altındaki değerlerde kullanılan sabit sayılar ile, T_g ' nin üstündeki sıcaklıklarda, farklı sabit sayılar kullanılmaktadır. Bu yöntem, deneysel verilerin bulunduğu durumlarda, uygulanmasının çok pratik olması ve PVT ilişkisini başarılı bir şekilde temsil etmesi bakımından çok sık kullanılmaktadır. Bu yöntemin kullanılabilir doğru sonuç vermesinin yanında, her malzeme için ayrı ayrı deneysel verilere dayalı sabitler kullanılmak zorunda oluşu yöntemi sınırlı kılmaktadır. Sadece sıcaklık terimi ve genleşme katsayısına bağlı olarak bulunan Boussinesq yaklaşımı ile yoğunluğun hesaplanması, uygulamada çok daha pratiktir. Ayrıca, sadece referans yoğunluk ve genleşme katsayısına bağlı olması, bu yöntemin kullanılmasını teşvik eden en önemli etkidir. Diğer taraftan bu yöntemin olumsuz bir diğer tarafı ise, basıncın etkisinin ihmal edilmemesi ve sadece sıcaklık değişiminin dikkate alınması olmaktadır.

Sayısal çözüm yöntemleri olarak da, Sonlu Elemanlar, Sonlu Farklar ve Spectral Analiz yöntemleri kullanılmaktadır. Sonlu Elemanlar son derece başarılı sonuçlar vermesinin yanında uygulanmasının zor oluşu, yöntemin tek olumsuz yönüdür. Bir çok Sonlu Farklar metodunun kullanıldığı analiz çalışmalarında, akış simülasyonunda en başarılı ve Sonlu Elemanlar yöntemine en yakın sonucu veren Sonlu Kontrol Hacmi yöntemi ve Runge-Kutta metotlarıdır. Sonlu Kontrol Hacmi yönteminde, klasik Sonlu Farklar metodundaki gibi düğüm noktalarına ayrılmış kontrol hacmi kullanılırken, diğer taraftan iki düğüm noktası arasında difüzyon alanı

tespit edilip, diferansiyel denklem bu alanda integre edilmektedir. Dolaylı olarak iki nokta arasındaki bölgenin integrasyonu olduğu için, çözüm daha hassas olmaktadır. Bunun yanında, Sonlu Kontrol Hacmi yöntemi içerisinde difüzyon terimlerinin hesaplanmasında, Upwind yönteminin kullanılması ile, akışın hangi taraftan geldiği dikkate alınmaktadır. Bu da, yöntemi başarılı kılan diğer bir özelliktir.

Newtonian olmayan akışlarda en önemli akış parametresi viskozitedir. Literatürde yüzlerce viskozite denklemi bulunmasına karşılık, en çok Üs yasası, Cross model, Cross-WLF, Carreau model gibi viskoziteyi kayma hızı, sıcaklık ve basıncın bir fonksiyonu olarak ele alan denklemler kullanılmaktadır. Hemen hemen tüm viskozite modellerinde, malzemeye ait deneysel olarak bulunan sabitler bulunmakla birlikte en az sabitin kullanıldığı model Üs yasası modeli olduğundan, en sık kullanılan viskozite modelidir. Enjeksiyon tekniğinde genellikle yüksek kayma hızı olduğundan, Üs yasası viskozite modeli oldukça uygun analiz sonuçları vermektedir. Fakat, hem yüksek hem de düşük kayma hızı değerlerinde kullanılan özellikle düşük kayma hızı değerlerinde oldukça iyi sonuçlar vermesi bakımından, Cross model, Cross-WLF, Carreau gibi viskozite modelleri de uygulamada sıklıkla kullanılmaktadır.

Gerçekleştirilen bu çalışmada, ergimiş plastiğin kalıp boşluğundaki akışının matematiksel modellenmesinde, Navier-Stokes denklemleri kullanılmış olup, doğrusal olmayan diferansiyel denklemler Sonlu Kontrol Hacmi yöntemi ile cebirsel hale getirilmiştir. İki boyutlu olarak ele alınan kontrol hacmi için, diferansiyel formdaki denklemlerde u , v , T , P , ϕ terimleri bulunmaktadır. Dört bilinmeyen için dört denklem bulunmasına karşın, basınç terimini veren denklem bulunmaması, çözüm için özel metotların geliştirilmesini gerektirmiştir. Bunun için basınç terimlerini yok eden akım çizgisi-vorticity, Sonlu Elemanlar vb. gibi ileri sayısal yöntemler bulunmaktadır. Ancak, sayısal akışkanlar mekaniğinde basitliği ve elde edilen sonuçların yeterliliği nedeniyle, geniş bir kullanım alanına sahip SIMPLE algoritması olarak bilinen bir metot kullanılmıştır. Bu yöntem, süreklilik denklemi ile

momentum denklemi birleştirilerek basınç denklemi haline dönüştürülmesi esasına dayanmaktadır.

Sıkıştırılabilir akış olarak modellenip cebirsel hale getirilen denklemler, diferansiyel terimlerin ayrıklaştırılması için Tam Implicit metoduna göre yapılmıştır. Difüzyon terimlerinin ayrıklaştırılması ve akışın hangi taraftan geldiğinin tespiti için ise, Upwind metodu kullanılmıştır. Viskozite modeli olarak, uygulamada basitliği ve tatmin edici sonuçlar vermesi bakımından Üs yasası metodu kullanılmıştır. Doktora kapsamında kullanılan plastik malzeme PETKİM ürünü olan Yüksek Yoğunluklu Polietilen (I 668) için Tait eşitliğinde kullanılan deneysel verilerin elde edilememesi nedeniyle yoğunluğun sıcaklık karşısındaki değişimi Boussinesq yaklaşımı ile hesaplanmıştır. Ayrıca, sıcaklık kaybından dolayı ergime sıcaklığı ile camsı geçiş sıcaklığı arasında katılık oranı (peltelik) tespit edilerek, akışın burnu ve kalıp yüzeyine temas ettiği yerlerde akışın olmadığı katılaşmış bölgelerde tespit edilebilmiştir.

Cebirsel hale getirilen denklem takımları PHOENICS programı kullanılarak çözümlenmiş ve dikdörtgen şeklindeki bir kalıp boşluğu için akış analizi yapılarak akış tipi, sıcaklık dağılımı, hız dağılımı ve kalıp boşluğunun nasıl ve ne kadar sürede dolduğunun tespit edilmiştir.

3. ERGİMİŞ PLASTİK AKIŞINI YÖNETEN EŞİTLİKLER VE AYRIKLAŞTIRILMASI

3.1. Temel denklemler

Ergimiş plastiğin kalıp boşluğundaki hareketinin simülasyonunun yapılabilmesi için kütle, momentum ve enerjinin korunumu ilkelerinden elde edilen hareket denklemleri kullanılmaktadır. Ergimiş plastiklerin sıkıştırma özelliği mevcut olup kütle, momentum ve enerjinin korunumu ilkesinin sıkıştırılabilir madde için verilen şeklini kullanmak zorunludur. Ergimiş plastiğin kalıp boşluğundaki akış simülasyonunu yapmak için kullanılan temel denklemler, Eş. 3.1-Eş. 3.4' de verilmiştir.

1- Süreklilik denklemi,

Sıkıştırılabilir akış olan ergimiş plastiğin akışının modellenmesinde kullanılan süreklilik denklemi Eş. 3.1' deki gibidir (23).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} = 0 \quad [3.1]$$

2- Momentum denklemleri

x-yönünde momentum denklemi

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x} + \eta \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad [3.2]$$

y-yönünde momentum denklemi

Momentum denklemlerinde bulunan yoğunluk teriminin sıcaklık karşısındaki değişiminin hesaplanabilmesi için Boussinesq yaklaşımı kullanılmıştır. Buna göre y-yönündeki momentum denklemi Eş. 3.3' deki gibi yazılır (182).

$$\rho_o \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) = - \frac{\partial p}{\partial y} - (\rho - \rho_o)g + \eta \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \quad [3.3]$$

Eş. 3.3' deki ρ_o referans sıcaklıkta (ergimiş plastiğin camsı geçiş sıcaklığı) ergimiş plastiğin yoğunluğu olup, akış bölgesi içinde aynı değerdedir. Buna karşılık, kütle kuvveti terimindeki ρ yine ergimiş plastiğin yoğunluğu olup, akış alanı içinde sıcaklığa bağlı olarak değişmektedir. Eşitlik 3.3' ün sağındaki ikinci terim yoğunluk dağılımından dolayı ergimiş plastiğe etki eden kaldırma (Bouyancy kuvveti) kuvvetidir. Plastiğin yoğunluğu sıcaklığa bağlı olarak değiştiği için $(\rho - \rho_o)$, sıcaklığın fonksiyonu olarak ifade edilebilir. Böylece, değişken olan yoğunluk terimi (ρ) denklemlerden düşürülmüş olur.

Yoğunluğun değişimini, sıcaklığın fonksiyonu olarak ifade etmek için, ergimiş plastiğin ısı genleşme katsayısı göz önüne alındığında genleşme katsayısı,

$$\beta = - \frac{1}{\rho_o} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p \quad [3.4]$$

şeklinde yazılır. Eş. 3.4' deki ifade yeniden yazılacak olursa,

$$\beta = - \frac{1}{\rho_o} \frac{\rho - \rho_o}{T - T_o} \quad [3.5]$$

Buradan, $\rho - \rho_o$ çekilirse,

$$\rho - \rho_o = \rho_o \beta (T_o - T) \quad [3.6]$$

şeklinde yazılabilir (23, 182). Bu eşitlikte, T_o referans sıcaklık olup, bu çalışmada plastiğin ergime sıcaklığı ile kalıp sıcaklığının ortalaması alınmıştır ($T_o = (T_e + T_k) / 2$). Eş. 3.6' da ki T ise kalıp boşluğu içerisindeki değişken sıcaklık dağılımını temsil etmekte ve enerji denkleminin çözülmesi ile elde edilmektedir. Eş. 3.6' da verilen bağıntı Eş. 3.3' de yerine konur ve yeniden düzenlenirse y-momentum denklemi,

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = - \frac{1}{\rho_o} \frac{\partial p}{\partial y} + g \beta (T - T_o) + \eta \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \quad [3.7]$$

şeklinde yazılır (23, 222, 223).

3- Enerji denklemi

Enjeksiyonla kalıplamada, enerji denklemindeki basınç ve viskoz yayılma değerinin sıcaklık üzerindeki etkisi çok az olduğu düşünüldüğünden bu terimler ihmal edilir. Böylece, enerji denklemi Eş. 3.8' deki gibi yazılır.

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{k}{\rho c_p} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad [3.8]$$

3.2. Denklemlerin Boyutsuzlaştırılması

Boyutsuz değişkenlere bağlı olarak ifade edilen denklemlerin çözümüyle elde edilen sonuçlar daha geniş bir uygulama alanına sahiptir. Bu nedenle, yukarıda elde edilen temel denklemler boyutsuz hale getirildikten sonra çözülmüşlerdir. Denklemleri boyutsuz hale dönüştürmek için, her bir değişken için bir referans değer belirlenmiş ve bu referans değerler kullanılarak önce değişkenler daha sonra da temel denklemler boyutsuz hale dönüştürülmüştür.

Referans Büyüklükler:

Referans Uzunluk,

$$X_{ref} = W \quad [3.9]$$

Referans Hız,

$$U_{ref} = \frac{\alpha_f}{W} \quad [3.10]$$

Referans Basınç,

$$P_{ref} = \frac{W^2}{\rho_{ref} \alpha_f^2} \quad [3.11]$$

Referans Sıcaklık,

$$T_{ref} = T_e - T_k \quad [3.12]$$

Referans zaman,

$$t_{ref} = \frac{W^2}{u_{ref}^2} \quad [3.13]$$

Boyutsuz değişkenler:

$$X = \frac{x}{W} \Rightarrow x = XW \quad [3.14]$$

$$Y = \frac{y}{W} \Rightarrow y = YW \quad [3.15]$$

$$U = \frac{uW}{\alpha_f} \Rightarrow u = \frac{U\alpha_f}{W} \quad [3.16]$$

$$V = \frac{vW}{\alpha_f} \Rightarrow v = \frac{V\alpha_f}{W} \quad [3.17]$$

$$\bar{p} = \frac{pW^2}{\rho_{ref}\alpha_f^2} \Rightarrow p = \frac{\bar{p}\rho_{ref}\alpha_f^2}{W^2} \quad [3.18]$$

$$\bar{t} = \frac{t\alpha_f}{W^2} \Rightarrow t = \frac{\bar{t}W^2}{\alpha_f} \quad [3.19]$$

$$\bar{\rho} = \frac{\rho}{\rho_{ref}} \Rightarrow \rho = \bar{\rho}\rho_{ref} \quad [3.20]$$

$$\phi = \frac{T - T_0}{T_e - T_k} \quad [3.21]$$

olarak dikkate alınmıştır (222, 223).

3.2.1. Süreklilik denkleminin boyutsuzlaştırılması

İki boyutlu ve sıkıştırılabilir akış için süreklilik denklemi,

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} = 0 \quad [3.22]$$

şeklinde yazılır. Eşitlik 3.14-Eş. 3.17' de verilen u , v , x ve y parametrelerinin boyutsuz değerleri Eş. 3.22' de yerlerine yazılır ve yeniden düzenlenirse,

$$\frac{\partial \bar{\rho} \rho_{ref}}{\partial (\bar{t} \frac{W^2}{\alpha_f})} + \frac{d \left(\bar{\rho} \rho_{ref} \frac{U \alpha_f}{W} \right)}{dXW} + \frac{d \left(\bar{\rho} \rho_{ref} \frac{V \alpha_f}{W} \right)}{dYW} = 0 \quad [3.23]$$

$$\rho_{ref} \frac{\alpha_f}{W^2} \frac{\partial \bar{\rho}}{\partial \bar{t}} + \rho_{ref} \frac{\alpha_f}{W^2} \frac{\partial (\bar{\rho} U)}{\partial X} + \rho_{ref} \frac{\alpha_f}{W^2} \frac{\partial (\bar{\rho} V)}{\partial Y} = 0 \quad [3.24]$$

elde edilir. Eş. 3.24' ün her iki tarafı $\rho_{ref} \frac{\alpha_f}{W^2}$ ile bölünürse süreklilik denklemi,

$$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial \bar{t}} + \left(\frac{\partial (\bar{\rho} U)}{\partial X} + \frac{\partial (\bar{\rho} V)}{\partial Y} \right) = 0 \quad [3.25]$$

boyutsuz olarak elde edilir.

3.2.2. Momentum denklemlerinin boyutsuzlaştırılması

3.2.2.1. X doğrultusundaki momentum denkleminin boyutsuzlaştırılması

Eşitlik 3.2' de verilen x momentum denkleminde, eşitliğin sol tarafındaki yoğunluk terimi yok etmek için, eşitliğin her iki tarafı yoğunluk terimi ile bölünür ve $\frac{\eta}{\rho} = \nu$

yerine konacak olursa,

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad [3.26]$$

elde edilir (1, 23, 222, 223). Hızların ve basıncın boyutsuz değerleri Eş. 3.26' da yerlerine yazılacak olursa,

$$\frac{\partial \left(\frac{U \alpha_f}{W} \right)}{\partial (\bar{t} \frac{W^2}{\alpha_f})} + \frac{U \alpha_f}{W} \frac{\partial \left(\frac{U \alpha_f}{W} \right)}{\partial XW} + \frac{V \alpha_f}{W} \frac{\partial \left(\frac{U \alpha_f}{W} \right)}{\partial YW}$$

$$= -\frac{1}{\bar{\rho} \rho_{ref}} \frac{\partial \left(\frac{p_b \rho_{ref} \alpha_f^2}{W^2} \right)}{\partial XW} + \nu \left[\frac{\partial^2 \left(\frac{U \alpha_f}{W} \right)}{\partial X^2 W^2} + \frac{\partial^2 \left(\frac{U \alpha_f}{W} \right)}{\partial Y^2 W^2} \right] \quad [3.27]$$

$$\frac{\alpha_f^2}{W^3} \frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\alpha_f^2}{W^3} \left(U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial U}{\partial Y} \right) = -\frac{1}{\bar{\rho}} \frac{\alpha_f^2}{W^3} \frac{\partial p_b}{\partial X} + \frac{\alpha_f}{W_3} \nu \left(\frac{\partial^2 U}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Y^2} \right) \quad [3.28]$$

Eşitlik 3.28' in her iki tarafı $\frac{W^3}{\alpha_f^2}$ ile çarpılır ve eşitliğin sağ tarafındaki her iki

terimde U_e ve W ile çarpılıp bölünür ve $\frac{\nu}{U_e W} = \frac{1}{Re}$ yerine konursa, x yönündeki boyutsuz momentum denklemi,

$$\frac{\partial U}{\partial \bar{t}} + U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial U}{\partial Y} = -\frac{1}{\bar{\rho}} \frac{\partial p_b}{\partial X} + \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial^2 U}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Y^2} \right) \quad [3.29]$$

şeklinde yazılır (222).

3.2.2.2. Y doğrultusundaki momentum denkleminin boyutsuzlaştırılması

Y doğrultusundaki momentum denkleminde sıcaklık terimi bulunduğundan, bu sıcaklık terimlerinin yerine Eş.3.21' deki boyutsuz sıcaklık değerindeki ifade kullanılır ve boyutsuz değerler Eş. 3.7' deki yerine yazılırsa,

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \left(\frac{V \alpha_f}{W} \right)}{\partial \left(\bar{t} \frac{W^2}{\alpha_f} \right)} + \frac{U \alpha_f}{W} \frac{\partial \left(\frac{V \alpha_f}{W} \right)}{\partial XW} + \frac{V \alpha_f}{W} \frac{\partial \left(\frac{V \alpha_f}{W} \right)}{\partial YW} \\ &= -\frac{1}{\bar{\rho} \rho_{ref}} \frac{\partial \left(\frac{\bar{p} \rho_{ref} \alpha_f^2}{W^2} \right)}{\partial YW} + g \beta \phi (T_e - T_k) + \nu \left[\frac{\partial^2 \left(\frac{V \alpha_f}{W} \right)}{\partial X^2 W^2} + \frac{\partial^2 \left(\frac{V \alpha_f}{W} \right)}{\partial Y^2 W^2} \right] \end{aligned} \quad [3.30]$$

$$\frac{\alpha_f^2}{W^3} \frac{\partial V}{\partial \bar{t}} + \frac{\alpha_f^2}{W^3} \left(U \frac{\partial V}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y} \right) = -\frac{1}{\bar{\rho}} \frac{\alpha_f^2}{W^3} \frac{\partial \bar{p}}{\partial Y} + g \beta \phi (T_e - T_k) + \frac{\alpha_f}{W^3} \nu \left(\frac{\partial^2 V}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial Y^2} \right) \quad [3.31]$$

elde edilir. Eşitlik 3.31 'in her iki tarafı $\frac{W^3}{\alpha_f^2}$ ile çarpılır ve eşitliğin sağ tarafındaki

ikinci ve üçüncü terimler U_e ve W ile hem çarpılıp hem de bölünür ve Bouyancy kaldırma kuvvetinde elde edilen değerler, kinematik viskozite ile hem çarpılıp hem

de bölünürse ve $\frac{\nu}{U_e W} = \frac{1}{\text{Re}}$ yerine konulursa,

$$\frac{\partial V}{\partial \bar{t}} + U \frac{\partial V}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y} = -\frac{1}{\bar{\rho}} \frac{\partial \bar{p}}{\partial Y} + \frac{1}{\text{Re}} \frac{g \beta (T_e - T_k) W^3}{\alpha_f \nu} + \frac{1}{\text{Re}} \left(\frac{\partial^2 V}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial Y^2} \right) \quad [3.32]$$

boyutsuz y-momentum denklemi elde edilmiş olur. Eş. 3.32' de

$$Ra = \frac{g \beta (T_e - T_k) W^3}{\alpha_f \nu} \quad [3.33]$$

tanımlamaları yapılır ve Eş. 3.32' de yerine konursa, y doğrultusundaki momentum denklemi,

$$\frac{\partial V}{\partial \bar{t}} + U \frac{\partial V}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y} = -\frac{1}{\bar{\rho}} \frac{\partial \bar{p}}{\partial Y} + \frac{1}{\text{Re}} \left(\frac{\partial^2 V}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial Y^2} \right) + \frac{1}{\text{Re}} Ra \phi \quad [3.34]$$

olarak yazılır (182, 222, 223).

3.2.3. Enerji denkleminin boyutsuzlaştırılması

Sıcaklık dağılımına etkisinin ihmal edilebilecek kadar az olduğu düşünülen basınç terimleri ve viskoz sürtünmeden dolayı açığa çıkan ısı terimleri düşürülerek, enerji denklemi basitleştirilmiştir. Buna göre enerji denklemi,

$$\frac{\partial T}{\partial \bar{t}} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{k}{\rho c_p} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad [3.35]$$

şeklinde yazılabilir (1-10, 15, 22-25, 222).

$$T_0 = \frac{T_e + T_k}{2} \text{ ve } T_0 = \text{sabit} \Rightarrow \frac{\partial T_0}{\partial x} = 0, \frac{\partial T_0}{\partial y} = 0, \frac{\partial^2 T_0}{\partial x^2} = 0, \frac{\partial^2 T_0}{\partial y^2} = 0 \quad [3.36]$$

$$\phi = \frac{T - T_0}{T_e - T_k} \Rightarrow T - T_0 = \phi(T_e - T_k) \Rightarrow T = \phi(T_e - T_k) + T_0 \quad [3.37]$$

Tanımlamaları yapılır ve ilgili boyutsuz parametreler yerlerine konursa,

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(\phi(T_e - T_k) + T_0)}{\partial(\bar{t} \frac{W^2}{\alpha_f})} + \frac{U\alpha_f}{W} \frac{\partial(\phi(T_e - T_k) + T_0)}{\partial XW} + \frac{V\alpha_f}{W} \frac{\partial(\phi(T_e - T_k) + T_0)}{\partial YW} \\ &= \frac{k}{\rho c_p} \left(\frac{\partial^2(\phi(T_e - T_k) + T_0)}{\partial X^2 W^2} + \frac{\partial^2(\phi(T_e - T_k) + T_0)}{\partial Y^2 W^2} \right) \end{aligned} \quad [3.38]$$

$$\begin{aligned} & \frac{\alpha_f}{W^2} \left(\frac{\partial(\phi(T_e - T_k))}{\partial \bar{t}} + \frac{\partial T_0}{\partial \bar{t}} \right) + \frac{\alpha_f}{W^2} U \left(\frac{\partial(\phi(T_e - T_k))}{\partial X} + \frac{\partial T_0}{\partial X} \right) + \frac{\alpha_f}{W^2} V \left(\frac{\partial(\phi(T_e - T_k))}{\partial Y} + \frac{\partial T_0}{\partial Y} \right) \\ &= \frac{k}{\rho c_p} \frac{1}{W^2} \left(\frac{\partial^2(\phi(T_e - T_k))}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 T_0}{\partial X^2} + \frac{\partial^2(\phi(T_e - T_k))}{\partial Y^2} + \frac{\partial^2 T_0}{\partial Y^2} \right) \end{aligned} \quad [3.39]$$

Eş. 3.36' da verilen kabuller ile Eş. 3.39' da ki bazı terimler yok edilir, eşitliğin her

iki tarafı $\frac{W^2}{\alpha_f}$ ile çarpılırsa,

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(\phi(T_e - T_k))}{\partial \bar{t}} + U \frac{\partial(\phi(T_e - T_k))}{\partial X} + V \frac{\partial(\phi(T_e - T_k))}{\partial Y} \\ &= \frac{k}{\rho c_p \alpha_f} \left(\frac{\partial^2(\phi(T_e - T_k))}{\partial X^2} + \frac{\partial^2(\phi(T_e - T_k))}{\partial Y^2} \right) \end{aligned} \quad [3.40]$$

elde edilir. Eşitliğin sağındaki $\frac{k}{\rho c_p \alpha_f}$ terimi K_r olarak tanımlanırsa,

$$(T_e - T_k) \left(\frac{\partial \phi}{\partial \bar{t}} + U \frac{\partial \phi}{\partial X} + V \frac{\partial \phi}{\partial Y} \right) = (T_e - T_k) K_r \left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial Y^2} \right) \quad [3.41]$$

olarak yazılır ve gerekli sadeleştirme yapılırsa boyutsuzlaştırılmış enerji denklemi,

$$\frac{\partial \phi}{\partial \bar{t}} + U \frac{\partial \phi}{\partial X} + V \frac{\partial \phi}{\partial Y} = Kr \left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial Y^2} \right) \quad [3.42]$$

şeklinde yazılır.

Tasarım aşamasında gerçekleştirilecek bu akış analizi için kullanılacak temel eşitlikler boyutsuzlaştırılarak elde edilen nihai diferansiyel denklemler, Eş. 3.43-Eş. 3.46' de verilmiştir.

$$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial \bar{t}} + \frac{\partial (\bar{\rho} U)}{\partial X} + \frac{\partial (\bar{\rho} V)}{\partial Y} = 0 \quad [3.43]$$

$$\frac{\partial U}{\partial \bar{t}} + U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial U}{\partial Y} = -\frac{1}{\bar{\rho}} \frac{\partial \bar{p}}{\partial X} + \frac{1}{\text{Re}} \left(\frac{\partial^2 U}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Y^2} \right) \quad [3.44]$$

$$\frac{\partial V}{\partial \bar{t}} + U \frac{\partial V}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y} = -\frac{1}{\bar{\rho}} \frac{\partial \bar{p}}{\partial Y} + \frac{1}{\text{Re}} \left(\frac{\partial^2 V}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial Y^2} \right) + \frac{1}{\text{Re}} Ra \phi \quad [3.45]$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial \bar{t}} + U \frac{\partial \phi}{\partial X} + V \frac{\partial \phi}{\partial Y} = Kr \left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial Y^2} \right) \quad [3.46]$$

Ergimiş plastiklerin akış analizlerini yapmak ve akış dinamiğini incelemek için kullanılan denklemler, Eş. 3.43 - Eş. 3.46' da görüldüğü gibi kısmi diferansiyel ifadeler şeklindedir. Bilindiği gibi, diferansiyel ifadelerin çözümlenebilmesi için denklemlerin ayrıklaştırılarak (diskritizasyon), cebirsel ifadeler şekline dönüştürülmesi gerekmektedir. Eş. 3.43' de verilen süreklilik denklemi, akışta süreklilik şartını sağlamak, Eş. 3.44 ve Eş. 3.45' de verilen x ve y momentum denklemleri ile hız bileşenleri ve basınç değerlerini, ve Eş. 3.46' da verilen enerji denklemi, ergimiş plastiğin akış sırasındaki sıcaklığını tespit etmek amacıyla kullanılmıştır.

3.3. Sınır Şartları

Eşitlik 3.43 - Eş.3.46' nın çözümü için sınır şartları aşağıdaki gibi düzenlenebilir.

Sol yüzeyde

$$U = V = 0, \quad \frac{\partial p}{\partial X} = \frac{\partial p}{\partial Y} = 0, \quad T = T_k \quad (3.47.a)$$

Sağ yüzeyde

$$U = V = 0, \quad \frac{\partial p}{\partial X} = \frac{\partial p}{\partial Y} = 0, \quad T = T_k \quad (3.47.b)$$

Üst yüzeyde

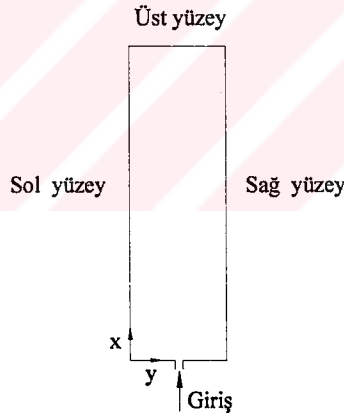
$$U = V = 0, \quad T = T_k \quad (3.47.c)$$

Alt yüzeyde

$$U = V = 0, \quad T = T_k \quad (3.47.d)$$

Alt yüzeyde giriş mecrasının bulunduğu kesitte

$$U = 0, \quad V = u_{giriş}, \quad p = p_{giriş}, \quad T = T_{giriş}, \quad \rho = \rho^0 \quad (3.47.e)$$



Şekil 3.1. Sayısal olarak akış analizi yapılacak çözüm bölgesi

Çözümleme sürecinde bütün sınır şartları sabit kalmaktadır.

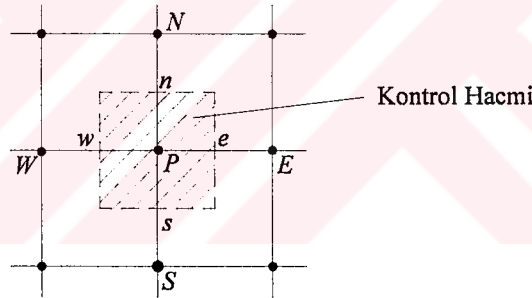
3.4. Sayısal Çözümleme

Plastik akışının incelenmesi ve akış davranışlarının belirlenmesi, deneysel veya teorik yöntemlerden biri ile gerçekleştirilmektedir. Bu araştırmada, birinci öncelik teorik incelemeye verilmiştir. Teorik inceleme, Analitik Yöntem ve Sayısal Yöntem olmak üzere iki yönetime ayrılmakta olup, bu çalışmada Sayısal Yöntem tercih edilmiştir. Sayısal yöntemler, Sonlu Farklar, Sonlu Kontrol Hacmi ve Sonlu

Elemanlar olmak üzere başlıca üç gruba ayrılmaktadır. Diferansiyel denklemler bu yöntemlerden biri ile ayrıklaştırılarak cebirsel hale getirilmektedir. Elde edilen cebirsel denklem sistemi çözülerek bağımlı değişken hesaplanmaktadır. Bu araştırmada sayısal çözümleme yöntemi olarak, literatürde çok sık kullanılan ve uygulamadaki pratikliği ve akış simülasyonlarında başarılı bir yöntem olması nedeniyle Sonlu Kontrol Hacmi (Finite Control Volume Method) yöntemi kullanılmıştır.

3.4.1. Sonlu Kontrol Hacmi Yöntemi

Sonlu Kontrol Hacmi yönteminde, diferansiyel denklemleri cebirsel şekle dönüştürebilmek için, çözüm bölgesi ızgaralara ayrılmakta ve buna göre denklemler sayısal çözüm için cebirsel forma dönüştürülmektedir.



Şekil 3.2. Diferansiyel denklemin integre edileceği kontrol hacmi

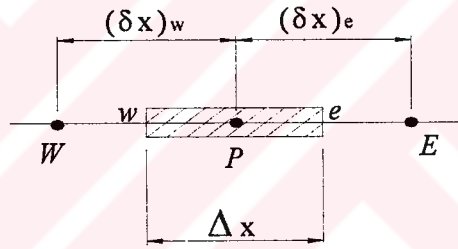
Şekil 3.2' de görülen kontrol hacminde, P , E , W , N ve S düğüm noktalarını, e , w , n ve s noktaları ise kontrol hacmi yüzeylerini temsil etmektedir. Herhangi bir değişkenin P noktasındaki değerini bulmak için, düğüm noktası etrafında oluşturulan kontrol hacminde (Şekil 3.2' de görülen taralı alan) diferansiyel denklemin integrali alınır. Kontrol Hacmi yöntemine göre yapılan ayrıklaştırma işleminde, skaler değişkenler (basınç, sıcaklık, yoğunluk, viskozite vs.) düğüm noktalarına atanır ve bu noktalara göre hesaplanmaktadır. Vektörel değişkenler (hız bileşenleri, u , v ve w) ise P noktasının etrafında oluşturulan kontrol hacmi yüzeylerine (e , w , n , s) atanarak hesaplanmaktadır.

3.4.2. Sonlu Kontrol Hacmi Yöntemi İle Kısmi Diferansiyel Eşitliklerin Ayrıklaştırılması

Sonlu Kontrol Hacmi yönteminde, bağımlı değişkenlerin bağımsız değişkenlere göre türevlerinin sonlu fark şeklinin yazılabilmesi için bazı kabullerin yapılması gerekmektedir. Eşitlik 3.48’ deki geçici, bir boyutlu ısı kondüksiyonu denklemi ele alınarak ayrıklaştırma açıklanabilir.

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad [3.48]$$

Eşitlik 3.48, w - e aralığında x değişimine göre ve $(t - (t + \Delta t))$ aralığında da zamana göre integre edilmektedir.



Şekil 3.3. Geçici, bir boyutlu ısı denkleminin integre edildiği bir boyutlu kontrol hacmi

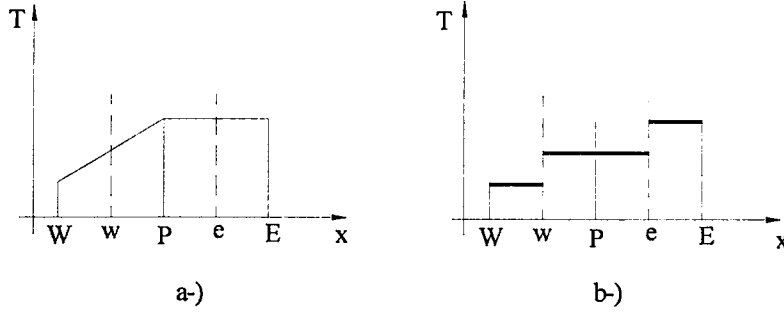
$$\rho c \int_w^e \int_t^{t+\Delta t} \frac{\partial T}{\partial t} dt dx = \int_w^e \int_t^{t+\Delta t} \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) dx dt \quad [3.49]$$

$$\rho c \int_w^e T \Big|_{T^o}^{T'} = \int_t^{t+\Delta t} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_e - k \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_w \right) dt \quad [3.50]$$

Bu aşamada, sıcaklığın x' e göre değişiminin $\left(\frac{dT}{dx} \right)$ sonlu fark şeklinin yazılabilmesi için, bir T profili kabulü yapmak gerekmektedir.

Şekil 3.4.a’ da görüldüğü gibi, sıcaklık profili w noktası için P ve W noktaları arasında ortalama bir değere sahip olup, anlamlı bir profildir. Şekil 3.4.b’ de ise basamaklı bir profil olup, w ve e noktaları için, aynı zaman diliminde iki farklı

değere sahiptir. Bu da, fiziksel olarak mümkün olmadığından Şekil 3.4.b' de verilen model anlamlı bir profil olarak kabul edilmemektedir. Şekil 3.4.a' da verilen parçalı doğrusal profile göre, Eş. 3.50' de verilen denklemin sağındaki terimler Eş. 3.51 ve Eş. 3.52' de ki gibi ifade edilebilir.



Şekil 3.4. Sıcaklık profilleri, a) Parçalı doğrusal profil, b) Basamak profil

$$\left. \frac{dT}{dx} \right|_e = \frac{T_E - T_P}{(\delta x)_e} \quad [3.51]$$

$$\left. \frac{dT}{dx} \right|_w = \frac{T_P - T_W}{(\delta x)_w} \quad [3.52]$$

Sıcaklığın zamana göre değişimi bilinmediğinden, sıcaklığın t anındaki değeri T^o ve $t + \Delta t$ anındaki değerinin de T' olduğunu kabul edilir. Burada, T^o bir önceki noktanın değeri ya da bir önceki iterasyonda elde edilen değer olacağından sayısal olarak değeri bilinmektedir. T' ise hesaplanması gereken sıcaklık değeri olduğundan bilinmemektedir. Buna göre, Eş. 3.50 yeniden düzenlenirse,

$$\rho c \int_w^e (T' - T^o) dx = \int_t^{t+\Delta t} \left[\frac{k_e (T_E - T_P)}{(\delta x)_e} - \frac{k_w (T_P - T_W)}{(\delta x)_w} \right] dt \quad [3.53]$$

şeklinde yazılabilir. Eş. 3.53' ün tamamlanabilmesi için T' ve T^o 'ın x ile nasıl değiştiği ve T_E , T_P , T_W 'nin zamana bağlı olarak nasıl değiştiğinin bilinmesi gerekmektedir. Burada, T' ve T^o 'ın x ile değişmediği ve T_P' ve T_P^o 'a eşit oldukları kabul edilmektedir. T_E , T_P ve T_W 'nin zamanla değişimi t ve $t + \Delta t$ anındaki değerlerin ağırlık fonksiyonu olarak ifade edilebilir. Buna göre,

$$T_P = f T_P' + (1-f) T_P^o \quad [3.54]$$

$$T_E = f T_E' + (1-f) T_E^o \quad [3.55]$$

$$T_W = f T_W' + (1-f) T_W^o \quad [3.56]$$

olarak yazılır. Burada f , ağırlık fonksiyonu olup değeri 0 ile 1 arasında değişmektedir. Bu kabullere uygun olarak yukarıdaki integral yeniden düzenlenirse,

$$\rho c \frac{\Delta x}{\Delta t} (T_P' - T_P^o) = f \left[\frac{k_e (T_E' - T_P')}{(\delta_x)_e} - \frac{k_w (T_P' - T_W')}{(\delta_x)_w} \right] + (1-f) \left[\frac{k_e (T_E^o - T_P^o)}{(\delta_x)_e} - \frac{k_w (T_P^o - T_W^o)}{(\delta_x)_w} \right] \quad [3.57]$$

olarak elde edilir. Yazımı kolaylaştırmak için “ ’ ” işareti kullanılmamış fakat, bu terimlerin değişkenlerin $t + \Delta t$ anındaki değerleri olduğu göz önünde bulundurulmalıdır. Buna göre, Eşitlik 3.57 yeniden düzenlenirse,

$$a_P T_P = a_E [f T_E + (1-f) T_E^o] + a_W [f T_W + (1-f) T_W^o] + [a_P^o - (1-f) a_E - (1-f) a_W] T_P^o \quad [3.58]$$

olarak yazılabilir. Burada,

$$a_E = \frac{k_e}{(\delta_x)_e}, \quad a_W = \frac{k_w}{(\delta_x)_w}, \quad a_P^o = \frac{\rho c \Delta x}{\Delta t} \text{ ve } a_P = f a_E + f a_W + a_P^o$$

olarak tanımlanmıştır.

3.4.3. Explicit yöntem

Explicit yöntemde, ağırlık fonksiyonu; f sıfır alınmaktadır. Buna göre, Eş. 3.58' de $f=0$ yazılırsa,

$$a_P T_P = a_E (0 T_E + (1-0) T_E^o) + a_W (0 T_W + (1-0) T_W^o) + [a_P^o - (1-0) a_E - (1-0) a_W] T_P^o \quad [3.59]$$

olur ve yeniden düzenlenerek

$$a_P T_P = a_E T_E^o + a_W T_W^o + (a_P^o - a_E - a_W) T_P^o \quad [3.60]$$

elde edilir. Kontrol hacmindeki W , E ve P noktalarında zaman adımının başındaki değerler (T_E^o, T_W^o, T_P^o) bilindiğinden, P noktasındaki T_P sıcaklığını bulmak için bu değerler kullanılmaktadır. Burada dikkat edilmesi gereken en önemli husus, cebirsel denklemin katsayılarının pozitif olmak zorunda olduğudur. Bu kuralın sağlanması için;

$$(a_p^0 - a_E - a_W) > 0 \quad [3.61]$$

$$\left(\rho c \frac{\Delta x}{\Delta t} - \frac{k_e}{(\delta_x)_e} - \frac{k_w}{(\delta_x)_w}\right) > 0 \quad [3.62]$$

$$\rho c \frac{\Delta x}{\Delta t} - 2 \frac{k}{\Delta x} > 0 \Rightarrow \Delta t < \frac{\rho c (\Delta x)^2}{2k} \quad [3.63]$$

olmalıdır. Burada, ρ , c ve k 'nin sabit olduğu ve $(\delta_x)_e$ ve $(\delta_x)_w$ 'nin Δx 'e eşit olduğu kabul edilmiştir.

3.4.4. Tam Implicit yöntem

Eşitlik 3.58' de "f" yerine 1 konursa,

$$T_p = f T_p' + (1 - f) T_p^0 \Rightarrow T_p = T_p' \quad [3.64]$$

olur. Buna göre,

$$a_p^0 T_p - a_p^0 T_p^0 = a_E T_E - a_E T_p - a_W T_p + a_W T_W \quad [3.65]$$

olarak yazılır ve benzer terimler bir araya getirilirse,

$$a_p T_p = a_E T_E + a_W T_W + b \quad [3.66]$$

elde edilir. Burada katsayılar,

$$a_E = \frac{k_e}{(\delta x)_e}, \quad a_W = \frac{k_w}{(\delta x)_w}, \quad a_p^0 = \frac{\rho c \Delta x}{\Delta t}, \quad b = a_p^0 T_p^0$$

$$a_p = a_E + a_W + a_p^0$$

şeklinde tanımlanmıştır.

3.4.5. Crank Nicolson yöntemi

Eşitlik 3.58' de "f" yerine 0.5 konur ve denklem yeniden düzenlenirse, Crank Nicolson yöntemi elde edilmektedir. Bu yöntemle elde edilen cebirsel ifade, hem bir önceki zaman diliminde elde edilen (üst indiste sıfır ile temsil edilmekte) değeri hem de mevcut zaman diliminde elde edilen (üst indiste " ' " ile temsil edilmekte) değeri içermektedir.

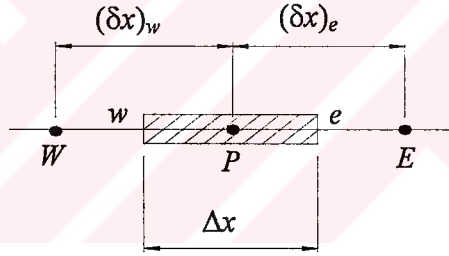
3.4.6. Sürekli, bir boyutlu konveksiyon ve difüzyon denkleminin ayrıklaştırılması

Sonlu Kontrol Hacmi yönteminin en çok uygulandığı alanlardan biri de difüzyon terimlerinin bulunduğu denklemlerdir. Bir boyutlu konveksiyon ve difüzyon denklemi,

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho u \phi) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) \quad [3.67]$$

şeklinde yazılır. Eşitliğin sol tarafındaki terimler konveksiyon terimleri sağ taraftaki terimler ise difüzyon terimlerini temsil etmektedir. Eş. 3.67, Şekil 3.5' de ki kontrol hacminde integre edilirse,

$$\int_w^e \frac{\partial}{\partial x}(\rho u \phi) dx = \int_w^e \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) dx \quad [3.68]$$



Şekil 3.5. Bir boyutlu konveksiyon ve difüzyon denkleminin integre edildiği bir boyutlu kontrol hacmi

$$\rho u \phi \Big|_e - \rho u \phi \Big|_w = \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} \Big|_e - \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} \Big|_w \quad [3.69]$$

yazılabilir ve birinci dereceden olan konveksiyon terimleri integral dışına çıkarılmış olur. Eşitlik 3.69' un sağındaki terimler ikinci bir işlem gerektirmektedir. Eşitlik 3.69' da ki $\frac{\partial \phi}{\partial x}$ teriminin w ve e kontrol hacmi yüzeylerindeki değerleri kendilerine komşu düğüm noktalarının değerlerinden elde edilir. Buna göre, Eş. 3.69 yeniden düzenlenirse,

$$\rho u \phi \Big|_e - \rho u \phi \Big|_w = \Gamma \frac{\phi_E - \phi_P}{(\delta x)_e} - \Gamma \frac{\phi_P - \phi_W}{(\delta x)_w} \quad [3.70]$$

olur. Böylece, birince mertebeden türev şeklinde olan difüzyon terimleri de tamamen integral dışına çıkarılmış olmaktadır. Yukarıdaki 3.70 eşitliğinin sol tarafındaki konveksiyon ifadesinde ϕ teriminin kontrol hacminin e ve w yüzeylerindeki değerleri, basit yaklaşımla ifade edilecek olursa,

$$(\rho u)_e \frac{\phi_E + \phi_P}{2} - (\rho u)_w \frac{\phi_P + \phi_W}{2} = \Gamma_e \frac{\phi_E - \phi_P}{(\delta x)_e} - \Gamma_w \frac{\phi_P - \phi_W}{(\delta x)_w} \quad [3.71]$$

elde edilir. Bazı büyüklükler katsayı kabul edilerek denklem tekrar yazılırsa;

$$\frac{F_e}{2} \phi_E + \frac{F_e}{2} \phi_P - \frac{F_w}{2} \phi_P - \frac{F_w}{2} \phi_W = D_e \phi_E - D_e \phi_P - D_w \phi_P + D_w \phi_W \quad [3.72]$$

olur. Bu eşitlikte bulunan katsayılar

$$F_e = (\rho u)_e, \quad F_w = (\rho u)_w$$

$$D_e = \frac{\Gamma_e}{(\delta x)_e}, \quad D_w = \frac{\Gamma_w}{(\delta x)_w}$$

şeklinde ifade edilir. Bu tanımlamalarda F/D oranı Peclet sayısı olarak bilinmektedir (Eş. 3.73).

$$Pec = \frac{F}{D} = \frac{\rho u}{\frac{\Gamma}{\delta x}} = \frac{\rho u \delta x}{\Gamma} = \frac{\rho u L}{\Gamma} \quad [3.73]$$

Eşitlik 3.72' deki benzer ifadeler bir araya getirilir ve denklem yeniden düzenlenirse,

$$\frac{F_e}{2} \phi_P - \frac{F_w}{2} \phi_P + D_e \phi_P + D_w \phi_P = D_e \phi_E - \frac{F_e}{2} \phi_E + D_w \phi_W + \frac{F_w}{2} \phi_W \quad [3.74]$$

olur. Yada

$$\left(D_e + \frac{F_e}{2} + D_w - \frac{F_w}{2} \right) \phi_P = \left(D_e - \frac{F_e}{2} \right) \phi_E + \left(D_w + \frac{F_w}{2} \right) \phi_W \quad [3.75]$$

şeklinde yazılabilir. Eşitlik 3.75' nin sol tarafı $\frac{F_e}{2}$ ve $\frac{F_w}{2}$ ile toplanıp çıkarılır ve

$$a_E = D_e - \frac{F_e}{2}, \quad a_W = D_w + \frac{F_w}{2}, \quad a_P = a_E + a_W + (F_e - F_w)$$

tanımlamaları yapılarak denklem yeniden düzenlenirse,

$$a_P \varphi_P = a_E \varphi_E + a_W \varphi_W \quad [3.76]$$

elde edilir. Böylece, Eşitlik 3.67' de diferansiyel ifade şeklinde verilen konveksiyon ve difüzyon denklemi, Eş. 3.76' da ki gibi cebirsel olarak ifade edilmektedir.

3.4.7. Upwind metodu

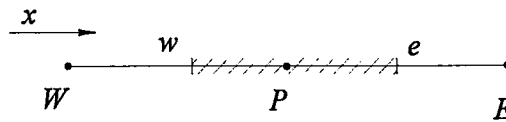
Basit bir yaklaşım olan merkezi farklar yönteminin akış problemlerine uygulanmasında görülen ciddi bir eksikliği, akışın geldiği yönün dikkate alınmamasıdır. Kontrol hacminin w yüzeyi hem W noktasından hem de P noktasından etkilenmektedir. Eğer akış, batıdan doğuya doğru (yani W den P ye doğru) gerçekleşiyorsa w yüzeyi P noktasına göre W noktasından daha fazla etkilenmektedir (Şekil 3.6). Bu nedenle bağımlı değişkenleri w yüzeyinin değerini en etkin olarak W noktası belirlemektedir. Bir boyutlu konveksiyon difüzyon denklemi ele alınırsa,

$$\int_w^e \frac{\partial}{\partial x} (\rho u \varphi) dx = \int_w^e \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) dx \quad [3.77]$$

$$\rho u \varphi \Big|_e - \rho u \varphi \Big|_w = \Gamma \frac{\partial \varphi}{\partial x} \Big|_e - \Gamma \frac{\partial \varphi}{\partial x} \Big|_w \quad [3.78]$$

$$F_e \varphi_e - F_w \varphi_w = D_e \varphi_E - D_e \varphi_P - D_w \varphi_P + D_w \varphi_W \quad [3.79]$$

şeklinde ayrıştırılır. φ ' nin kontrol hacmi yüzeylerindeki değeri, akışkanın o yüzeye geldiği taraftaki değere eşit olur. Şekil 3.6' da görüldüğü gibi, akışın batıdan doğuya doğru aktığı kabul edilirse,



Şekil 3.6. Akışkanın batıdan doğuya doğru aktığı bir boyutlu kontrol hacmi

$$F_e > 0, \Rightarrow \varphi_e = \varphi_P$$

$$F_w > 0, \Rightarrow \varphi_w = \varphi_W$$

olur ve Eşitlik 3.79' da yerlerine konursa,

$$F_e \varphi_P - F_w \varphi_W = D_e \varphi_E - D_e \varphi_P - D_w \varphi_P + D_w \varphi_W \quad [3.80]$$

şeklinde olur. Benzer terimler bir araya getirilirse,

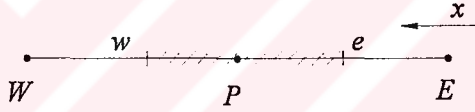
$$(D_w + D_e + F_e) \varphi_P = D_e \varphi_E + (D_w + F_w) \varphi_W \quad [3.81]$$

olur. Eşitliğin sol tarafına F_w eklenip çıkarılırsa,

$$[(D_w + F_w) + D_e + (F_e - F_w)] \varphi_P = D_e \varphi_E + (D_w + F_w) \varphi_W \quad [3.82]$$

elde edilir.

Akışkanın Şekil 3.7' de görüldüğü gibi doğudan batıya doğru aktığı kabul edilirse,



Şekil 3.7. Akışkanın doğudan batıya doğru aktığı bir boyutlu kontrol hacmi

$$F_e < 0, \Rightarrow \varphi_e = \varphi_E$$

$$F_w < 0, \Rightarrow \varphi_w = \varphi_P$$

şeklinde olur ve Eş. 3.79' da yerlerine yazılırsa,

$$F_e \varphi_E - F_w \varphi_P = D_e \varphi_E - D_e \varphi_P - D_w \varphi_P + D_w \varphi_W \quad [3.83]$$

olarak ifade edilir. Yine benzer terimler bir araya getirilir ve eşitlik yeniden düzenlenirse,

$$(D_e + D_w - F_w) \varphi_P = (D_e - F_e) \varphi_E + D_w \varphi_W \quad [3.84]$$

olur. Eşitliğin sol tarafı F_e ile hem toplanıp hem de çıkarılırsa,

$$[(D_e - F_e) + D_w + (F_e - F_w)] \varphi_P = (D_e - F_e) \varphi_E + D_w \varphi_W \quad [3.85]$$

elde edilir. Eşitlik 3.82 ve Eşitlik 3.85 birleştirilir ve gerekli düzenlemeler yapılırsa

$$a_P \varphi_P = a_E \varphi_E + a_W \varphi_W \quad [3.86]$$

elde edilir. Böylece, Eşitlik 3.77' de verilen bir boyutlu konveksiyon ve difüzyon denklemini cebirsel ifadeler şekline dönüştürülmüştür. Burada,

$$a_P = a_E + a_W + (F_e - F_w)$$

$$a_E = \begin{cases} F_e > 0, & F_w > 0 \Rightarrow D_e \\ F_e < 0, & F_w < 0 \Rightarrow D_e - F_e \end{cases}$$

$$a_W = \begin{cases} F_e > 0, & F_w > 0 \Rightarrow D_w + F_w \\ F_e < 0, & F_w < 0 \Rightarrow D_w \end{cases}$$

olup, $\llbracket A, B \rrbracket = \max(A, B)$ olarak tanımlanır. Programlama dillerinde $\max(A, B)$ şeklinde yapılan tanımlamada, A ve B değerlerinden hangisi büyükse o değer kullanılacağı bilinmektedir. Bu tanımlamaya bağlı olarak a_E ve a_W katsayıları yeniden yazılırsa,

$$a_E = D_e + \llbracket 0, -F_e \rrbracket, \quad a_W = D_w + \llbracket F_w, 0 \rrbracket$$

olur. Eş. 3.82 ve Eş. 3.85, $\max(A, B)$ dikkate alınarak yeniden yazılırsa,

$$\llbracket (D_e + \llbracket 0, -F_e \rrbracket) + (D_w + \llbracket F_w, 0 \rrbracket) + (F_e - F_w) \rrbracket \rho_P = (D_e + \llbracket 0, -F_e \rrbracket) \rho_E + (D_w + \llbracket F_w, 0 \rrbracket) \rho_W \quad [3.87]$$

elde edilir ve buradan yine Eşitlik 4.51' deki cebirsel ifade elde edilir.

3.4.8. Plastik Akışını Yöneten Boyutsuz Denklemlerin Cebirsel Hale Getirilmesi

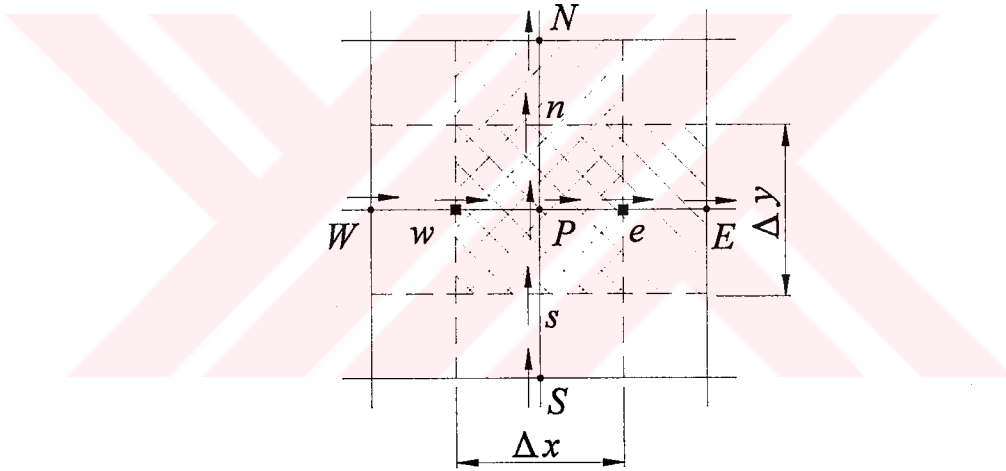
Boyutsuz parametrelerle elde edilen boyutsuzlaştırılmış temel denklemler, Sonlu Kontrol Hacmi yöntemine göre kontrol hacminde, konum ve zamana göre integre edilerek cebirsel şekle dönüştürülmektedir. Cebirsel ifadeler şekline dönüştürülen denklemler, iterasyon yöntemlerinden biri ile en doğru değer hesaplanıncaya kadar iterasyon yapılarak denklemlerdeki terimlerin değerleri hesaplanmaktadır. Eşitlik 3.43 - Eş. 3.45' de üstü çizili olarak verilen boyutsuz değişkenler yazım kolaylığı bakımından aşağıdaki eşitliklerde üstü çizili olarak yazılmamıştır.

3.4.8.1. Süreklilik denklemi

Eşitlik 3.43' de verilen sıkıştırılabilir akış için iki boyutlu süreklilik denklemi, Şekil 3.8' de ki kontrol hacminde x doğrultusunda w - e aralığında, y doğrultusu için s - n aralığında ve zamana göre değişimini hesaplamak için ise $(t - (t + \Delta t))$ aralığında Tam Implicit yöntemine göre integre edilirse,

$$\int_t^{t+\Delta t} \int_w^e \int_s^n \frac{\partial \rho}{\partial t} dx dy dt + \int_w^e \int_s^n \int_t^{t+\Delta t} \frac{\partial(\rho U)}{\partial X} dy dt dx + \int_s^n \int_w^e \int_t^{t+\Delta t} \frac{\partial(\rho V)}{\partial Y} dx dt dy = 0 \quad [3.88]$$

şeklinde yazılır Boyutsuz yoğunluk terimi, yazımı kolaylaştırmak için Eş. 88' deki gibi yazılmıştır.



Şekil 3.8. Süreklilik denkleminin integre edildiği kontrol hacmi (23)

Yukarıda verilen eşitlik, belirlenen aralıklarda integre edilirse,

$$(\rho_P - \rho_P^\circ) \Delta x \Delta y + (\rho U)_e \Delta y \Delta t - (\rho U)_w \Delta y \Delta t + (\rho V)_n \Delta x \Delta t - (\rho V)_s \Delta x \Delta t = 0 \quad [3.89]$$

elde edilir. Izgara sistemi oluşturulurken, $\Delta x = \Delta y$ olduğu kabul edilerek eşitliğin her iki tarafı $\Delta x \Delta t$ ile bölünür ve

$$(\rho U)_w = F_w \quad (\rho U)_e = F_e$$

$$(\rho V)_s = F_s \quad (\rho V)_n = F_n$$

olarak tanımlanırsa, süreklilik denklemi

$$\frac{\Delta x}{\Delta t}(\rho_p - \rho_p^o) + F_e - F_w + F_n - F_s = 0 \quad [3.90]$$

olur.

3.4.8.2. Momentum Denklemleri

X doğrultusundaki momentum denklemi

Eşitlik 3.44' de verilen diferansiyel denklemi Sonlu Kontrol Hacmi yöntemine göre cebirsel ifadeler şekline dönüştürme işleminde, ayırıklaştırma işleminin daha basit olabilmesi için benzer terimler bir araya getirilmektedir. Benzer terimlerin bir araya getirilirse.

$$\frac{\partial}{\partial X} \left(UU - \frac{1}{\text{Re}} \frac{\partial U}{\partial X} \right) + \frac{\partial}{\partial Y} \left(VU - \frac{1}{\text{Re}} \frac{\partial U}{\partial Y} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial X} - \frac{\partial U}{\partial t} \quad [3.91]$$

olur. Burada, $UU - \frac{1}{\text{Re}} \frac{\partial U}{\partial X}$ ve $VU - \frac{1}{\text{Re}} \frac{\partial U}{\partial Y}$ terimleri yeniden tanımlanırsa,

$$J_x = UU - \frac{1}{\text{Re}} \frac{\partial U}{\partial X} \quad [3.92]$$

$$J_y = VU - \frac{1}{\text{Re}} \frac{\partial U}{\partial Y} \quad [3.93]$$

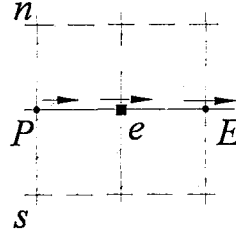
x-momentum denklemi, Eş. 3. 94' de görüldüğü gibi, en sade şeklini alır.

$$\frac{\partial J_x}{\partial X} + \frac{\partial J_y}{\partial Y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial X} - \frac{\partial U}{\partial t} \quad [3.94]$$

Eşitlik 3.94' de düzenlenerek yazılmış olan x doğrultusundaki momentum denklemi, Şekil 3.9' da verilen U kontrol hacminde, w-e, s-n ve t-(t+Δt) aralığında integre edilirse,

$$\int_t^{t+\Delta t} \int_w^e \int_s^n \frac{\partial J_x}{\partial X} dx dy dt + \int_w^e \int_s^n \int_t^{t+\Delta t} \frac{\partial J_y}{\partial Y} dx dy dt = -\frac{1}{\rho} \int_w^e \int_s^n \int_t^{t+\Delta t} \frac{\partial p}{\partial X} dx dy dt - \int_w^e \int_s^n \int_t^{t+\Delta t} \frac{\partial U}{\partial t} dx dy dt \quad [3.95]$$

şeklinde yazılabilir.



Şekil 3.9. X doğrultusundaki momentum denkleminin kaydırılmış ızgara sistemine göre integre edildiği U -kontrol hacmi

Diferansiyel denklem, Tam Implicit yöntemine göre integral dışına çıkarılırsa, x doğrultusundaki momentum denklemi,

$$J_E - J_P + J_n - J_s = \frac{1}{\rho}(p_P - p_E) - (U_e - U_e^o) \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad [3.96]$$

olur. Eşitlik 3.92 ve Eş. 3.93' de benzer terimler içeren konveksiyon ve difüzyon terimlerinin bir araya getirilmesiyle elde edilen J katsayısı içerisinde birden fazla terim bulunduğundan, integral dışına tek terim gibi çıkarılamaz. Bu nedenle, J ile temsil edilen ifadelerin integral dışına çıkarılabilmesi için, bazı tanımlamalar ve kabuller yapılması gerekmektedir. Eşitlik 3.43' de verilen süreklilik denklemi, Şekil 3.9' da ki kontrol hacminde yeniden integre edilirse,

$$\frac{\Delta x}{\Delta t}(\rho_e - \rho_e^o) + F_E - F_P + F_n - F_s = 0 \quad [3.97]$$

şeklinde yazılır (22, 23). Eşitlik 3.97, U_e ile çarpılır ve yeniden düzenlendikten sonra Eş. 3.96' dan çıkarılırsa,

$$\begin{aligned} J_E - J_P + J_n - J_s &= \frac{1}{\rho}(p_P - p_E) - \left(\frac{\Delta x}{\Delta t}U_e - \frac{\Delta x}{\Delta t}U_e^o\right) \\ F_E U_e - F_P U_e + F_n U_e - F_s U_e &= -\frac{\Delta x}{\Delta t}\rho_e U_e + \frac{\Delta x}{\Delta t}\rho_e^o U_e \\ \hline (J_E - F_E U_e) - (J_P - F_P U_e) + (J_n - F_n U_e) - (J_s - F_s U_e) \\ &= \frac{1}{\rho}(p_P - p_E) + \frac{\Delta x}{\Delta t}(U_e(-1 + \rho_e - \rho_e^o) + U_e^o) \end{aligned} \quad [3.98]$$

olarak elde edilir. Burada J içeren terimlerin yeniden düzenlenip, J' yi oluşturan terimler cinsinden yazılabilmesi için bazı tanımlamaların yapılması gerekmektedir.

Buna göre,

$$J^* = \frac{J\mu}{S} \quad J^* = J \text{ nin katsayı ile çarpılmış hali}$$

$$J^* = B\varphi_i - A\varphi_{i+1}$$

$$B = A + Pec \quad (A, B = \text{katsayı, } Pec = \text{Peclet sayısı})$$

$$J^* = (A + Pec)\varphi_i - A\varphi_{i+1}$$

$$J^* - Pec\varphi_i = A\varphi_i - A\varphi_{i+1} \quad [3.99]$$

tanımlamaları ve kabulleri yapılır ve Eş. 3.98' de ki bağıntının sol tarafındaki terimler Eş. 3.99' a göre yeniden tanımlanacak olursa, J terimleri,

$$J_E - F_E U_e = a_E (U_e - U_E) \quad [3.100]$$

$$J_P - F_P U_e = a_P (U_P - U_e) \quad [3.101]$$

$$J_n - F_n U_e = a_N (U_e - V_N) \quad [3.102]$$

$$J_s - F_s U_e = a_S (V_s - U_e) \quad [3.103]$$

şeklinde yazılabilir. Eşitlik 3.100 - Eş. 3.103' de tanımlanan J yi oluşturan terimler, Eş. 3.98' de yerlerine yazılır ve gerekli düzenleme yapılırsa, momentum denklemi

$$a_e U_e = a_E U_E + a_P U_P + a_N V_n + a_S V_s + \frac{\Delta x}{\Delta t} U_e^o + \frac{1}{\rho} (p_P - p_E) \quad [3.104]$$

olur. Burada,

$$F_e = (\rho U)_e \quad a_E = D_e A(|Pec_e|) + \left\| -F_e, 0 \right\|$$

$$F_P = (\rho U)_P \quad a_P = D_P A(|Pec_P|) + \left\| F_P, 0 \right\|$$

$$F_n = (\rho V)_n \quad a_N = D_n A(|Pec_n|) + \left\| -F_n, 0 \right\|$$

$$F_s = (\rho V)_s \quad a_S = D_s A(|Pec_s|) + \left\| F_s, 0 \right\|$$

$$a_e = a_E + a_P + a_N + a_S + \frac{\Delta x}{\Delta t} (1 - \rho_e - \rho_e^o)$$

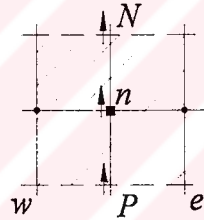
$$D_e = \frac{(\text{Re}^{-1})_e}{(\delta x)_{eE}} \quad D_P = \frac{(\text{Re}^{-1})_P}{(\delta x)_{eP}} \quad Pec_e = \frac{F_e}{D_e} \quad Pec_P = \frac{F_P}{D_P}$$

$$D_n = \frac{(\text{Re}^{-1})_n}{(\delta y)_{en}} \quad D_s = \frac{(\text{Re}^{-1})_s}{(\delta y)_{es}} \quad Pec_n = \frac{F_n}{D_n} \quad Pec_s = \frac{F_s}{D_s}$$

olarak tanımlanmıştır.

Y doğrultusundaki momentum denklemi

Eşitlik 3.45' de verilen Y doğrultusundaki boyutsuz momentum denklemi, X doğrultusundaki momentum denkleminde olduğu gibi, eşitliğin sağındaki ve solundaki benzer terimler bir araya getirilir. J_X ve J_Y tanımlamaları yapılarak denklem sadeleştirilip yeniden yazılır. Elde edilen eşitlik, Şekil 3.10' da verilen V kontrol hacminde $w-e$, $s-n$ ve $t-(t+\Delta t)$ aralığında integre edilir. X momentum denkleminde olduğu gibi, gerekli ara işlemler yapılırsa, y doğrultusundaki momentum denklemi,



Şekil 3.10. Y doğrultusundaki momentum denkleminin kaydırılmış ızgara sistemine göre integre edildiği V -kontrol hacmi

$$a_n V_n = a_E U_e + a_w U_w + a_N V_n + a_P V_P + \frac{\Delta y}{\Delta t} V_n^o + \frac{1}{\rho} (p_P - p_N) \quad [3.105]$$

olarak cebirsel ifadeler şekline dönüştürülmüş olur. Burada,

$$F_e = (\rho U)_e \quad a_E = D_e A(|Pec_e|) + \left\| -F_e, 0 \right\|$$

$$F_w = (\rho U)_w \quad a_w = D_w A(|Pec_w|) + \left\| F_w, 0 \right\|$$

$$F_n = (\rho V)_n \quad a_N = D_n A(|Pec_n|) + \left\| -F_n, 0 \right\|$$

$$F_P = (\rho V)_P \quad a_P = D_P A(|Pec_P|) + \left\| F_P, 0 \right\|$$

$$a_e = a_E + a_w + a_N + a_P + \frac{\Delta y}{\Delta t} (1 - \rho_n - \rho_n^o)$$

$$\begin{aligned}
D_e &= \frac{(\text{Re}^{-1})_e}{(\delta x)_{ne}} & D_w &= \frac{(\text{Re}^{-1})_w}{(\delta x)_{nw}} & Pec_e &= \frac{F_e}{D_e} & Pec_w &= \frac{F_w}{D_w} \\
D_n &= \frac{(\text{Re}^{-1})_n}{(\delta y)_{nN}} & D_p &= \frac{(\text{Re}^{-1})_p}{(\delta y)_{nP}} & Pec_n &= \frac{F_n}{D_n} & Pec_p &= \frac{F_p}{D_p}
\end{aligned}$$

olarak tanımlanmıştır.

3.4.8.3. Enerji denklemi

Sıcaklık dağılımının hesaplanmasında kullanılan ve Eş. 3.46' da verilen boyutsuz enerji denklemindeki benzer terimler, momentum denklemlerinde olduğu gibi bir araya getirilir ve gerekli düzenlemelerden sonra yeniden yazılırsa,

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial X} \left(U\phi - K_r \frac{\partial \phi}{\partial X} \right) + \frac{\partial}{\partial Y} \left(V\phi - K_r \frac{\partial \phi}{\partial Y} \right) = 0 \quad [3.106]$$

elde edilir. Burada, denklemi sadeleştirmek için J terimi yine tanımlanırsa,

$$J_x = U\phi - K_r \frac{\partial \phi}{\partial X} \quad [3.107]$$

$$J_y = V\phi - K_r \frac{\partial \phi}{\partial Y} \quad [3.108]$$

şeklinde olur. Eşitlik 3.107 ve Eş. 3.108' de verilen tanımlamalara göre enerji denklemi yeniden yazılırsa en sade şekliyle,

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{\partial J_x}{\partial X} + \frac{\partial J_y}{\partial Y} = 0 \quad [3.109]$$

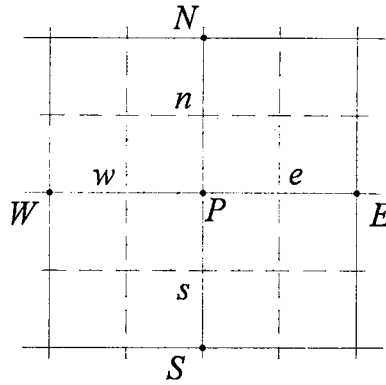
olur. Elde edilen Eş. 3.109, Şekil 3.11' de verilen kontrol hacminde $w-e$, $s-n$ ve $t-(t+\Delta t)$ aralığında integre edilirse,

$$(V_n - V_n^o) \frac{\Delta x}{\Delta t} + J_e - J_w + J_n - J_s = 0 \quad [3.110]$$

elde edilir. Momentum denklemlerinde uygulanan J terimlerinden oluşan ifadenin, kendisini oluşturan terimler cinsinden yazılabilmesi için süreklilik denklemi, Şekil 3.11' deki kontrol hacminde integre edilip, ϕ_p ile çarpılırsa,

$$\frac{\Delta x}{\Delta t}(\rho_p - \rho_p^o)\phi_p + F_e\phi_p - F_w\phi_p + F_n\phi_p - F_s\phi_p = 0 \quad [3.111]$$

bağıntısı elde edilir.



Şekil 3.11. Enerji denkleminin kaydırılmış ızgara sistemine göre integre edildiği kontrol hacmi

Eşitlik 3.111 Eş. 3.110' dan çıkarılırsa enerji denklemi,

$$\begin{aligned} J_e - J_w + J_n - J_s &= -\frac{\Delta x}{\Delta t}\phi_p + \frac{\Delta x}{\Delta t}\phi_p^o \\ F_e\phi_p - F_w\phi_p + F_n\phi_p - F_s\phi_p &= -\frac{\Delta x}{\Delta t}\rho_p\phi_p + \frac{\Delta x}{\Delta t}\rho_p^o\phi_p \\ \hline (J_e - F_e\phi_p) - (J_w - F_w\phi_p) + (J_n - F_n\phi_p) - (J_s - F_s\phi_p) \\ &= \frac{\Delta x}{\Delta t}(-1 + \rho_p - \rho_p^o)\phi_p + \frac{\Delta x}{\Delta t}\phi_p^o \end{aligned} \quad [3.112]$$

şeklinde yazılabilir. Eşitlik 3.99' da yapılan kabule göre, J terimleri yeniden tanımlanıp yazılırsa,

$$J_e - F_e\phi_p = a_E(\phi_p - \phi_E) \quad [3.113]$$

$$J_w - F_w\phi_p = a_W(\phi_w - \phi_p) \quad [3.114]$$

$$J_n - F_n\phi_p = a_N(\phi_p - \phi_N) \quad [3.115]$$

$$J_s - F_s\phi_p = a_S(\phi_s - \phi_p) \quad [3.116]$$

olarak yazılabilir. Yapılan bu tanımlamalar Eşitlik 3.112' de yerine yazılır ve gerekli düzenlemeler yapılırsa, enerji denklemi

$$a_p \phi_p = a_E \phi_e + a_w \phi_w + a_N \phi_n + a_S \phi_s + \frac{\Delta x}{\Delta t} \phi_p^o \quad [3.117]$$

olarak elde edilir. Eşitlik 3.112 - Eş. 3.117' deki katsayılar,

$$\begin{aligned} F_e &= (\rho U)_e & F_w &= (\rho U)_w & F_n &= (\rho V)_n & F_s &= (\rho V)_s \\ a_E &= D_e A(|Pec_e|) + \left\| -F_e, 0 \right\| & a_w &= D_w A(|Pec_w|) + \left\| F_w, 0 \right\| \\ a_N &= D_n A(|Pec_n|) + \left\| -F_n, 0 \right\| & a_S &= D_s A(|Pec_s|) + \left\| F_s, 0 \right\| \\ a_p &= a_E + a_w + a_N + a_S + \frac{\Delta x}{\Delta t} (1 - \rho_p - \rho_p^o) \\ D_e &= \frac{(K_r)_e}{(\delta x)_{Pe}} & D_w &= \frac{(K_r)_w}{(\delta x)_{Pw}} & Pec_e &= \frac{F_e}{D_e} & Pec_w &= \frac{F_w}{D_w} \\ D_n &= \frac{(K_r)_n}{(\delta y)_{Pn}} & D_s &= \frac{(K_r)_s}{(\delta y)_{Ps}} & Pec_n &= \frac{F_n}{D_n} & Pec_s &= \frac{F_s}{D_s} \end{aligned}$$

olarak tanımlanmıştır.

3.4.9. $A(|Pec|)$ fonksiyonunun çözüm yöntemine göre değişimi

Çizelge 3.1. $A(|Pec|)$ fonksiyonunun çözüm yöntemine göre değişimi (22, 23, 61)

Yöntem	$A(Pec)$ fonksiyonu
Merkezi Farklar	$1 - 0,5 Pec $
Upwind Metodu	1
Melez Metot (Hibrid)	$Max[0, 1 - 0,5 Pec]$
Üs Yasası Metodu (Power Law)	$Max[0, (1 - 0,1 Pec ^5)]$
Üstel Metod	$ Pe / [\exp(Pec) - 1]$

Momentum eşitliklerinin cebirsel ifadesinde “a” sayısını veren eşitlikte bulunan ve Peclet sayısına bağlı olan $A(|Pec|)$ fonksiyonu, çeşitli çözüm yöntemlerine göre

değişmektedir (22, 23, 61). Buna göre $A(|Pec|)$ fonksiyonunun değeri, seçilen yönteme göre Çizelge 3.1' de verilen değerler dikkate alınarak bulunmaktadır.

3.4.10. Geçici Akışlarda Basınç-Hız Çiftinin Çözüm Algoritması

Hareket denklemlerinin çözümü yapılırken genellikle akış alanındaki hız bileşenleri, akışı etkileyen diğer değişkenlerle birlikte eş zamanlı olarak çözüm sırasında elde edilmektedir. Elde edilen hız bileşenleri doğru olarak hesaplandığında kontrol hacminde süreklilik şartının sağlanması gerekmektedir (1, 22, 23, 57-61, 225-228). Temel denklemlerin çözümü sırasında iki yeni problemle karşılaşmaktadır. Bunlardan birincisi, non-lineer formdaki momentum eşitliğinin konveksiyon terimlerinin bulunması. İkincisi ise, x ve y yönlerindeki momentum denklemleri ve süreklilik denkleminin de aynı değişkenleri (hız bileşenlerini) içermesi. Ayrıca, çözümü çok zorlaştıran ve yeniden çözülmesi gereken basınç teriminin olması. Basınç terimi her iki momentum denkleminde de bulunmakta fakat, basınç terimini veren veya çözen herhangi bir hareket denklemi veya başka bir eşitlik bulunmamaktadır.

Basınç değişimi biliniyorsa, momentum denklemlerindeki hız bileşenlerinin ayrıklaştırılma işlemi kolaylaşır ve Merkezi Farklar, Upwind, Hybrid, Power Law vb. gibi yöntemlerle cebirsel hale getirilip çözümlenebilir. Basınç terimi, $p = p(\rho, T)$ durumundan hareketle yoğunluk ve sıcaklık terimlerinden elde edilir. Akış alanında birbiri ile ilişkili basınç dağılımının ve hız bileşenlerinin eş zamanlı çözümünde, düğüm noktalarındaki basınç değerleri doğru hesaplandığında buna bağlı olarak bulunan hız bileşenleri de süreklilik şartını sağlamaktadır.

Lineer olmayan diferansiyel formadaki momentum denklemlerinin çözümünde, ilk defa Patankar ve Spalding tarafından kullanılan SIMPLE algoritması ile iterasyon yapılarak, basınç terimleri ve hız bileşenleri hesaplanmıştır (22, 23, 55, 59). Hesaplamalarda iterasyona başlarken, tahmini basınç ve hız bileşenleri kullanılmaktadır. Basınç terimi, süreklilik denklemi ile momentum denkleminin iç

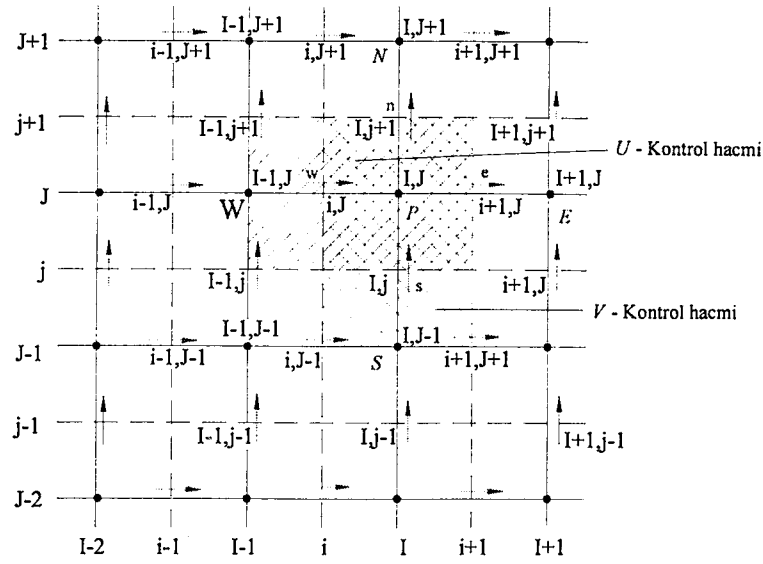
içe çözümlenmesinden elde edilen basınç denkleminde hesaplanmaktadır. Tahmini değerlerle başlayan iterasyon işlemi, düzeltilmiş basınç terimi ve hız bileşenleri bulununcaya kadar devam ettirilmektedir (22, 23).

3.4.11. Kaydırılmış ızgara sistemi

Sonlu Kontrol Hacmi yöntemi göre ayrıklaştırılan hareket denklemlerinin çözümlenebilmesi için, ilk önce hız bileşenlerinin hangi düğüm noktalarına atanıp hesaplanacağına karar verilir. Hız bileşenlerinin, basınç ve sıcaklık gibi skaler değişkenlerin atandığı noktalarda tanımlanıp, hesaplanması mantıklı görülebilir. Fakat, kontrol hacminin aynı noktalarında hız bileşenlerinin ve basınç terimlerinin hesaplanmasında, uniform olmayan basınç dağılımının, uniform basınç dağılımının bulunduğu alandaki özelliğe benzer özellik göstermesi gibi bir problem ile karşılaşmaktadır.

Eğer hız bileşenleri de, skaler değişkenlerin atandığı ızgara noktalarında hesaplanıyorsa, ayrıklaştırılan momentum denkleminde basınç sıfır veya anlamsız olmaktadır (22). Gerçek akış olayının fizikine aykırı gelişen ve sonuç olarak ortaya çıkan bu problemi aşmak için, hız bileşenlerinin bulunmasında *Kaydırılmış Izgara Sistemi* kullanılmaktadır. Bu sistemde yoğunluk, basınç ve sıcaklık gibi skaler değişkenler, ızgara sistemindeki düğüm noktalarında, hız bileşenleri de kontrol hacmi yüzeylerinde (difüzyon yüzeyi) hesaplanmaktadır. Bu düzenleme Şekil 3.12’de indis notasyonunda gösterilmiştir.

Buna göre, kontrol hacmi yüzeyine atanan U hız bileşenlerinin bulunduğu yüzeyler w ve e , V hızlarının bulunduğu yüzeyler ise s ve n olarak gösterilmektedir. Şekil 3.12’den anlaşıldığı gibi, U ve V hızlarının kontrol hacimlerinin, skaler kontrol hacimlerinden ve birbirlerinden farklı oldukları görülmektedir.



Şekil 3.12. İndis notasyonuna göre kontrol hacmi ve geri kaydırılmış ızgara sistemi (23).

Eşitlik 3.104 ve Eş. 3.105’ de verilen cebirsel formdaki momentum denklemleri indis notasyonuna göre sırasıyla yazılacak olursa,

$$a_{i,j} U_{i,j} = \sum a_{nb} U_{nb} + (p_{I-1,J} - p_{I,J}) A_{i,j} + b_{i,j} \quad [3.118]$$

$$a_{I,J} V_{I,J} = \sum a_{nb} V_{nb} + (p_{I,J-1} - p_{I,J}) A_{I,J} + b_{I,J} \quad [3.119]$$

elde edilir.

3.4.12. SIMPLE algoritması

“Semi Implicit Method for Pressure-Linked Equation” anlamına gelen SIMPLE algoritması, basınç ilişkili eşitlikler için yarı implicit yöntem anlamına gelmektedir. Bu algoritma, yukarıda bahsedilen kaydırılmış ızgara sisteminde basınç dağılımının bulunması için tahmin etme ve düzeltme işlemlerinden oluşmaktadır (22, 23). SIMPLE algoritmasında öncelikli olarak düğüm noktalarındaki basınç dağılımı (p^*) tahmin edilmektedir (rasgele bir değer atanır). Eşitlik 3.118 ve Eş. 3.119 ifadelerinde cebirsel olarak verilen momentum denklemleri, tahmin edilen basınç terimi kullanılarak U^* ve V^* hız bileşenleri aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$a_{i,j} U_{i,j}^* = \sum a_{nb} U_{nb}^* + (P_{i-1,j}^* - P_{i,j}^*) A_{i,j} + b_{i,j} \quad [3.120]$$

$$a_{i,j} V_{i,j}^* = \sum a_{nb} V_{nb}^* + (P_{i,j-1}^* - P_{i,j}^*) A_{i,j} + b_{i,j} \quad [3.121]$$

Gerçek basınç (p) değeri ile tahmin edilen basınç (p^*) değeri arasındaki fark, basınç düzeltme katsayısı (p') ile tanımlanmaktadır. Buna göre, düğün noktasının gerçek basınç değeri için aşağıdaki ifade yazılabilir.

$$p = p^* + p' \quad [3.122]$$

Benzer şekilde hız bileşenleri için de düzeltme katsayıları kullanılarak U ve V hızları da tahmin edilen U^* ve V^* hızlarına bağlı olarak yeniden yazılabilir.

$$U = U^* + U' \quad [3.123]$$

$$V = V^* + V' \quad [3.124]$$

Elde edilen doğru basınç değeri p , momentum denkleminde yerine konulduğunda doğru hız bileşenleri U ve V bulunmaktadır. Eşitlik 3.118 ve Eş. 3.119'da cebirsel olarak ifade edilen momentum denklemleri, doğru hız bileşenleri ve doğru basınç terimleri ile ilişkilendirilir. Eşitlik 3.120 ve Eş. 3.121 sırasıyla Eş. 3.118 ve Eş. 3.119' dan çıkarılırsa;

$$a_{i,j} (U_{i,j} - U_{i,j}^*) = \sum a_{nb} (U_{nb} - U_{nb}^*) + [(p_{i-1,j} - p_{i-1,j}^*) - (p_{i,j} - p_{i,j}^*)] A_{i,j} + b_{i,j} \quad [3.125]$$

$$a_{i,j} (V_{i,j} - V_{i,j}^*) = \sum a_{nb} (V_{nb} - V_{nb}^*) + [(p_{i,j-1} - p_{i,j-1}^*) - (p_{i,j} - p_{i,j}^*)] A_{i,j} + b_{i,j} \quad [3.126]$$

olarak yazılır. Eşitlik 3.122 - Eş. 3.124' deki basınç ve hız düzeltme formülleri Eş. 3.125 ve Eş. 3.126' da yerlerine yazılırsa;

$$a_{i,j} U_{i,j}' = \sum a_{nb} U_{nb}' + (P_{i-1,j}' - P_{i,j}') A_{i,j} + b_{i,j} \quad [3.127]$$

$$a_{i,j} V_{i,j}' = \sum a_{nb} V_{nb}' + (p_{i,j-1}' - p_{i,j}') A_{i,j} + b_{i,j} \quad [3.128]$$

ifadeleri elde edilir. Son iki eşitlikte bulunan $\sum a_{nb} U_{nb}'$ ve $\sum a_{nb} V_{nb}'$ ve b terimleri ihmal edilerek eşitlikten düşürülür. Eşitliklerdeki bu ihmal etme işlemi SIMPLE algoritmasının ana yaklaşımını oluşturmaktadır. Böylece sadeleştirilen formüller;

$$U'_{i,j} = d_{i,j} (p'_{i+1,j} - p'_{i,j}) \quad [3.129]$$

$$V'_{i,j} = d_{i,j} (p'_{i,j-1} - p'_{i,j}) \quad [3.130]$$

halini alır. Burada,

$$d_{i,j} = \frac{A_{i,j}}{a_{i,j}}, \quad d_{i,j} = \frac{A_{i,j}}{a_{i,j}} \quad [3.131]$$

kabul edilirse, Eş. 3.129 ve Eş. 3.130' de verilen düzeltme terimleri Eş. 3.123 ve Eş. 3.124' de verilen eşitliklerde yerlerine yazılırsa.

$$U_{i,j} = U_{i,j}^* + d_{i,j} (p'_{i-1,j} - p'_{i,j}) \quad [3.132]$$

$$V_{i,j} = V_{i,j}^* + d_{i,j} (p'_{i,j-1} - p'_{i,j}) \quad [3.133]$$

elde edilir. Benzer şekilde U ve V hızları $U_{i+1,j}$ ve $V_{i,j+1}$ düğüm noktalarına göre yazıldığında, (kaydırılmış ızgara sisteminde ileri nokta göz önüne alınarak hesap yapıldığında);

$$U_{i+1,j} = U_{i+1,j}^* + d_{i+1,j} (p'_{i,j} - p'_{i+1,j}) \quad [3.134]$$

$$V_{i,j+1} = V_{i,j+1}^* + d_{i,j+1} (p'_{i,j} - p'_{i,j+1}) \quad [3.135]$$

eşitlikleri elde edilir. Burada,

$$d_{i+1,j} = \frac{A_{i+1,j}}{a_{i+1,j}}, \quad d_{i,j+1} = \frac{A_{i,j+1}}{a_{i,j+1}} \quad [3.136]$$

olarak kısaltmaları yapılmıştır. Bu noktaya kadar sadece momentum denklemlerinin çözümü göz önünde bulundurulmuştur. Momentum denklemlerinin çözümünde yukarıda bahsedildiği gibi elde edilen hız bileşenlerinin, süreklilik denkleminde süreklilik şartını sağlayıp sağlamadığı kontrol edilerek, hızların doğruluğu tespit edilmektedir. Bu nedenle, Eş. 3.90' da verilen süreklilik denkleminin cebirsel formu, indis notasyonu için yazılırsa,

$$\frac{\Delta x}{\Delta t} (\rho_{i,j} - \rho_{i,j}^o) + [(\rho U A)_{i+1,j} - (\rho U A)_{i,j}] - [(\rho V A)_{i,j+1} + (\rho V A)_{i,j}] = 0 \quad [3.137]$$

olur. Eşitlik 3.134 ve Eş. 135' de verilen düzeltilmiş hızlar Eş. 137' de yerlerine yazılır ve düzenlenirse,

$$\begin{aligned}
& [(\rho dA)_{i+1,j} + (\rho dA)_{i,j} + (\rho dA)_{i,j+1} + (\rho dA)_{i,j-1}]p'_{i,j} = \\
& (\rho dA)_{i+1,j} p'_{i+1,j} + (\rho dA)_{i,j} p'_{i-1,j} + (\rho dA)_{i,j+1} p'_{i,j+1} + (\rho dA)_{i,j-1} p'_{i,j-1} \\
& + [(\rho U^* A)_{i,j} - (\rho U^* A)_{i+1,j} + (\rho V^* A)_{i,j} - (\rho V^* A)_{i,j+1}] + \frac{\Delta x}{\Delta t} (\rho_{i,j} - \rho_{i,j}^o) \quad [3.138]
\end{aligned}$$

olur. Yukarıdaki eşitlik p' sayısını hesaplamak için yeniden düzenlenerek yazılırsa;

$$a_{i,j} p'_{i,j} = a_{i+1,j} p'_{i+1,j} + a_{i-1,j} p'_{i-1,j} + a_{i,j+1} p'_{i,j+1} + a_{i,j-1} p'_{i,j-1} + b'_{i,j} \quad [3.139]$$

elde edilir. Bu eşitlikte,

$$a_{i,j} = a_{i+1,j} + a_{i-1,j} + a_{i,j+1} + a_{i,j-1}$$

$$a_{i+1,j} = (\rho dA)_{i+1,j}$$

$$a_{i-1,j} = (\rho dA)_{i,j}$$

$$a_{i,j+1} = (\rho dA)_{i,j+1}$$

$$a_{i,j-1} = (\rho dA)_{i,j}$$

$$b'_{i,j} = (\rho U^* A)_{i,j} - (\rho U^* A)_{i+1,j} + (\rho V^* A)_{i,j} - (\rho V^* A)_{i,j+1} + \frac{\Delta x}{\Delta t} (\rho_{i,j} - \rho_{i,j}^o)$$

olarak tanımlanmıştır. Eşitlik 3.139' da ayrıklaştırılan süreklilik denklemi basınç düzeltme p' sabiti eşitliğine dönüştürülmüştür. Bu eşitlikteki b' terimi tahmin edilmiş veya bir önceki iterasyonda elde edilen hızları (U^* ve V^*) içermektedir. Sadece Eş. 3.139' un çözümü ile basınç düzeltme katsayısı tüm noktalar için bulunur. Basınç düzeltme katsayısı ile Eş. 3.122' de yerine yazılarak düzeltilmiş basınç terimi ve Eş. 3.134 ve Eş. 3.135 formüllerinden de düzeltilmiş hız bileşenleri hesaplanmaktadır. Formülün türetilmesinde, $\sum a_{nb} U_{nb}$ gibi terimlerin ihmal edilmesi, sonucu etkilememektedir. Çünkü, $p^* = p$, $U^* = U$ ve $V^* = V$ şeklinde yakınsadığında basınç düzeltme ve hız düzeltme terimlerinin etkisi sıfır olmaktadır.

Basınç düzeltme eşitliğinde, düzeltme veya iyileştirme (under-relaxation) yapılmadığı zaman iterasyonda istenilen yakınsama gerçekleşmemektedir. Bu

nedenle, formül türetilirken Eş. 3.140' da verilen yeni geliştirilmiş basınçlar (p^{new}) kullanılmaktadır.

$$p^{new} = p^* + \alpha_p p' \quad [3.140]$$

Burada, α_p basınç formülü hassaslaştırma (under-relaxation) faktörüdür. $\alpha_p=1$ alındığında tahmin edilen basınç (p^*), p' ile düzeltilir. α_p ' nin değeri sıfıra eşit olduğunda basınç düzeltme faktörünün etkisi olmayacaktır. Bu da, istenmeyen bir durumdur. α_p ' nin değeri 0-1 arası alındığında basınç teriminin bulunmasında p' değerinin belli bir oranda etkisi olmaktadır. Yani, p' iterasyonda p^* ' a katkıda bulunarak, basınç teriminin geliştirilmesinde yeterli olmaktadır. Fakat, sadece basınç değerinin düzeltilmesi kararlı bir çözüm için yetersiz kalmaktadır. Bu nedenle, hız bileşenleri de hassaslaştırılmalıdır. Bu hassaslaştırma ile geliştirilen hız bileşenleri U^{new} ve V^{new} , Eş. 3.141 ve Eş. 3.144' deki gibi ifade edilebilir.

$$U^{new} = \alpha_u u + (1 - \alpha_u) U^{n-1} \quad [3.141]$$

$$V^{new} = \alpha_v v + (1 - \alpha_v) V^{n-1} \quad [3.142]$$

Burada, α_u ve α_v terimleri sırasıyla U ve V hızlarının hassaslaştırma katsayıları olup, değerleri 0-1 arasındadır. U ve V terimleri düzeltilmiş fakat hassaslaştırılmamış hızları temsil etmekte olup, U^{n-1} ve V^{n-1} bu hızların bir önceki iterasyondaki değeridir. Cebirsel ifadeler şekline dönüştürülmüş x ve y momentum denklemleri hassaslaştırma işlemi de dikkate alınarak yeniden yazılırsa,

$$\frac{a_{i,j}}{\alpha_u} U_{i,j} = \sum a_{nb} U_{nb} + (p_{I-1,j} - p_{I,j}) A_{i,j} + b_{i,j} + \left[(1 - \alpha_u) \frac{a_{i,j}}{\alpha_u} \right] U_{i,j}^{n-1} \quad [3.143]$$

$$\frac{a_{i,j}}{\alpha_v} V_{i,j} = \sum a_{nb} V_{nb} + (p_{I,j-1} - p_{I,j}) A_{i,j} + b_{i,j} + \left[(1 - \alpha_v) \frac{a_{i,j}}{\alpha_v} \right] V_{i,j}^{n-1} \quad [3.144]$$

olur. Basınç düzeltme eşitliği hassaslaştırılmış hızlardan da etkilenmekte ve bu etki basınç düzeltme eşitliğindeki d terimini

$$d_{i,j} = \frac{A_{i,j} \alpha_u}{a_{i,j}}, \quad d_{i+1,j} = \frac{A_{i+1,j} \alpha_u}{a_{i+1,j}}$$

$$d_{I,j} = \frac{A_{I,j} \alpha_v}{a_{I,j}}, \quad d_{I,j+1} = \frac{A_{I,j+1} \alpha_v}{a_{I,j+1}}$$

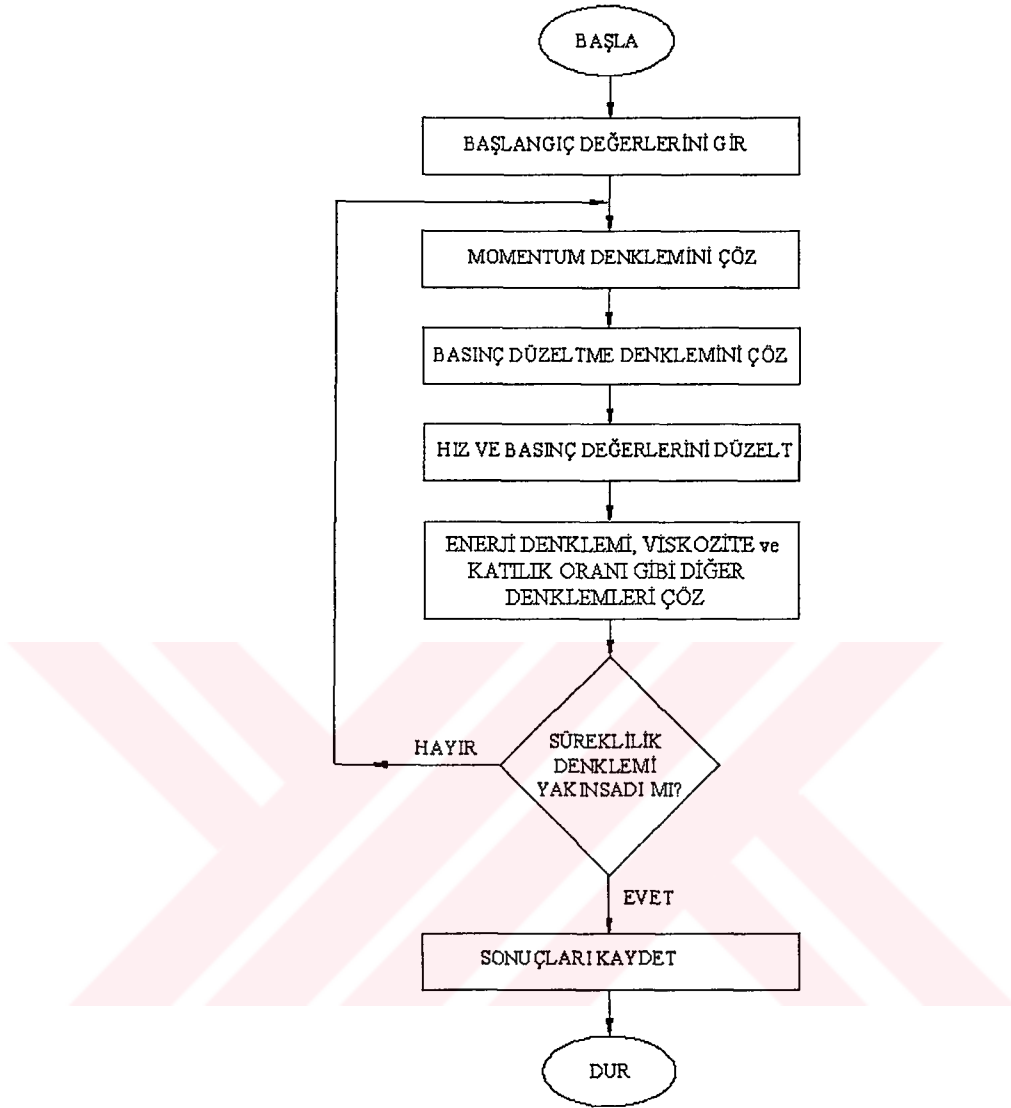
eşitliklerine dönüştürmektedir. Formüllerdeki $a_{i,j}$, $a_{i+1,j}$, $a_{I,j}$ ve $a_{I,j+1}$ terimleri P noktasının etrafındaki (i,j) , $(i+1,j)$, (I,j) ve $(I,j+1)$ noktalarında hız bileşenlerinin ayrıklaştırılmasından elde edilen katsayılardır.

Hassaslaştırma faktörünün α doğru seçilmesi, akış analizinin hassas ve doğru yapılabilmesi için gereken süreyi azaltmaktadır. α değerinin çok büyük alınması iterasyon sonucunun gerçek değerden sapmasına, küçük alınması ise gerçek değere yakınsamanın çok yavaş gerçekleşmesine sebep olmaktadır.

3.4.13. SIMPLE algoritmasının işlem sırası

Yönetici eşitliklerin sayısal çözümleme ile çözümlenmesinde kullanılan SKH ve SIMPLE algoritması esas alınarak elde edilen cebirsel denklemler, aşağıda belirtilen işlem sırasına göre çözülmektedir:

1. Ergiyik plastiğin dolduğu akış alanındaki basınç dağılımı olan p^* 'a tahmini değer atanır,
2. Atanan basınç değerlerine göre, akış alanındaki U^* ve V^* değerleri hesaplanır,
3. Atanan basınç değerlerine göre hesaplanan U^* ve V^* değerleri kullanılarak basınç düzeltme denklemi çözülür ve p' değeri elde edilir,
4. Basınç değeri, $p = p^* + p'$ ifadesi ile düzeltilir,
5. Düzeltilmiş basınç değerlerine göre hızlar yeniden hesaplanır,
6. Düzeltilmiş hızlar ve basınç değerleri esas alınarak, enerji denkleminde sıcaklık dağılımı hesaplanır,
7. Düzeltilmiş basınçlar yeni basınç alanı gibi kullanılarak, bu adımdan sonraki işlemler sonuçlar yakınsanıncaya kadar tekrarlanmaktadır.



Şekil 3.13. Phoenix programında uygulanan akış şeması

Temel denklemlerin çözümünde kullanılan Phoenix programı yukarıda belirtilen sıralamaya göre çözümleme yaparak, denklem takımlarını çözmekte ve akış parametreleri elde edilmektedir. Phoenix programının kullanılmasında uygulanan akış şeması, Şekil 3.13’ de verilmiştir. Her bir zaman dilimine göre elde edilen akış, hız, basınç, sıcaklık, viskozite, yoğunluk, kayma hızı, kayma gerilmesi gibi akış parametreleri ve katıluluk oranı kaydedilmektedir. Bununla beraber, Phoenix programı içerisinde bulunan Photon program modülü yardımı ile, elde edilen akış parametrelerine göre akış simülasyonu ve grafikler elde edilmektedir.

Kalıp boşluğunda ergimiş plastiğin akış burnu ile hava arasında çok belirgin bir yoğunluk farkı bulunmaktadır. Sayısal çözümlemenin temel mantığına göre, hesaplanması gereken noktanın etrafındaki noktaların değeri de dikkate alınmaktadır. Belirgin yoğunluk farkından dolayı akış burnunda ergiyik-hava arayüzeyi hesaplamalarda sanal hatalar oluşmaktadır. Bu nedenle Van Leer yöntemi kullanılarak sanal hatalar giderilebilmektedir (229).

3.4.14. Van Leer Sayısal Yöntemi

Upwind yöntemi ile yapılan hesaplamalarda oluşan hataların (sayısal çözümleme metodlarından kaynaklanan hatalar) giderilmesi ve ergimiş plastik ile hava arasındaki belirgin yoğunluk değişiminden kaynaklanan hataların giderilmesi için, Van Leer yöntemi dikkate alınmıştır. Akış burnunun ilerlediği yerde, ergiyik ile önündeki hava arasındaki yoğunluk farkı çok büyüktür. Bu nedenle, akış burnu bölgesinde çok düşük bir değer ile çok büyük bir değer bir arada olduğu için, bir sonraki noktanın değerinin hesaplanmasında sayısal difüzyon olarak bilinen bir hesaplama hatası oluşmaktadır. Upwind yönteminde seçilen fiziksel profilin sebep olduğu bu hataların telafisinde kullanılan bu yöntemi açıklamak için, bir boyutlu basit bir momentum denklemi ele alınacak olursa,

$$\frac{\partial}{\partial t} \int \rho u + \frac{\partial}{\partial x} \int \rho u u = 0 \quad [3.145]$$

şeklinde yazılabilir. Bu eşitlik tek boyutta konum ve zamana göre değişim dikkate alınarak integre edilirse,

$$\int_t^{t+\Delta t} \int_x^{x+\Delta x} \left(\frac{\partial}{\partial t} (\int \rho u) + \frac{\partial}{\partial x} (\int \rho u u) \right) dx dt = 0 \quad [3.1146]$$

olur. Eşitlik integral dışına çıkarılırsa,

$$F_e^{n+1} u_e^{n+1} = F_e^n u_e^n + F_w^n \varepsilon_p u_w^n - F_e^n \varepsilon_E u_e^n = 0 \quad [3.147]$$

olarak yazılır. Burada, $\varepsilon_p = \delta F_p / F_w^n$ olarak tanımlanmış olup, δF_p kütle akısı, F_w^n ise n zaman aralığında w yüzeyinden geçen kütle akısı olarak tanımlanmıştır. Upwind yönteminde $u_p = u_w$, $u \geq 0$ ve $u_E = u_p$, $u \geq 0$ yerine Van Leer yönteminde u_p ve u_E hızları,

$$u_p = u_w^n + \frac{1}{2}(1 - \varepsilon_p)D_p \quad [3.148]$$

$$u_E = u_e^n + \frac{1}{2}(1 - \varepsilon_E)D_E \quad [3.149]$$

şeklinde tanımlanmıştır. Burada, $D_p = c1(u_e^n - u_w^n)$ ve $D_E = c2(u_e^n - u_w^n)$ olarak kabul edilmiştir. Eşitlik 3.148 ve Eş. 3.149, Eş. 3.147' de yerine yazılır ve düzenleme yapılırsa,

$$u_e^{n+1} = A u_e^n + B u_w^n \quad [3.150]$$

olur. Burada, A ve B katsayıları Eş. 3.148 ve Eş. 3.149, Eş. 3.147 de yerlerine yazılıp düzenleme yapılırken elde edilmektedir. Örnek olarak, A katsayısı, $A = [(F_e^n(1 - \varepsilon_E)(1 - \varepsilon_E c1) + F_w^n \varepsilon_p(1 - \varepsilon_p) c2) / F_e^{n+1}]$ şeklinde yazılır. $c1$ ve $c2$ katsayıları belirli değerler alarak $A \geq 0$ ve $B \geq 0$ şartını sağlayıp, akış burnunun bulunduğu bölgelerdeki hesaplamalarda, ergimiş plastik-hava arayüzeyindeki belirgin yoğunluk farkından dolayı gerçekleşen sanal hatalar önlenmektedir.

Bu çalışmada, $c1$ ve $c2$ değerleri Van Leer tarafından önerildiği haliyle, $c1=c2=1$ olarak alınmıştır.

3.5. Gauss-Jordan Eliminasyon Yöntemi

SKH yöntemine göre cebirsel ifadeler şekline dönüştürülen diferansiyel denklemlerin bilgisayar yardımı ile çözümlenip, her bir terimin hesaplanması için bir iterasyon yönteminin kullanılması gerekmektedir. Bu nedenle, çok sayıda cebirsel

denklemlerden oluşan ve terim sayısı fazla olan sistemlerde, akış analizleri ve simülasyonlarda çok başarılı olarak uygulanabilen ve Thomas Algoritması yada TDMA (Tri-Diagonal Matrix Algorithm) olarak da bilinen Gauss-Jordan eliminasyon yöntemi kullanılmıştır. Gauss-Jordan yöntemi, tek boyutlu problemlerde direk çözüm yöntemidir. İki ve üç boyutlu problemlerde ise, satır satır çözümleme yapıp, noktanın değeri kendinden bir önceki ve bir sonraki düğüm noktalarının değerine göre bulunmaktadır. Gauss-Jordan eliminasyon yönteminin matris formunda yazılımı Eş. 3.151' de verilmiştir.

$$\phi_1 = C_1 \quad [3.151.a]$$

$$-\beta_2\phi_1 + D_2\phi_2 - \alpha_2\phi_3 = C_2 \quad [3.151.b]$$

$$-\beta_3\phi_2 + D_3\phi_3 - \alpha_3\phi_4 = C_3 \quad [3.151.c]$$

$$-\beta_4\phi_3 + D_4\phi_4 - \alpha_4\phi_5 = C_4 \quad [3.151.d]$$

$$\dots\dots\dots = \dots$$

$$-\beta_n\phi_{n-1} + D_n\phi_n - \alpha_n\phi_{n+1} = C_n \quad [3.151.e]$$

$$\phi_{n+1} = C_{n+1} \quad [3.151.f]$$

Yukarıdaki eşitliklerde bulunan ϕ_1 ve ϕ_{n+1} sınır değerleri olup, bilinen değerlerdir. Eşitlik 3.151.a - Eş. 3.151.f ' de verilen denklemlerden bir tanesi alınıp genel ifade şeklinde yazılırsa,

$$-\beta_j\phi_{j-1} + D_j\phi_j - \alpha_j\phi_{j+1} = C_j \quad [3.152]$$

elde edilmektedir. Eşitlik 3.151.a ve Eş. 3.151.f' de verilen bağıntılardaki ϕ değerleri çekilip tekrar yazılacak olursa,

$$\phi_2 = \frac{\alpha_2}{D_2}\phi_3 + \frac{\beta_2}{D_2}\phi_1 + \frac{C_2}{D_2} \quad [3.153.a]$$

$$\phi_3 = \frac{\alpha_3}{D_3}\phi_4 + \frac{\beta_3}{D_3}\phi_2 + \frac{C_3}{D_3} \quad [3.153.b]$$

$$\phi_4 = \frac{\alpha_4}{D_4} \phi_5 + \frac{\beta_4}{D_4} \phi_3 + \frac{C_4}{D_4} \quad [3.153.c]$$

$$\phi_n = \frac{\alpha_n}{D_n} \phi_{n+1} + \frac{\beta_n}{D_n} \phi_{n-1} + \frac{C_n}{D_n} \quad [3.153.d]$$

eşitlikleri elde edilir. Eşitlik 3.153.a 'da verilen ϕ_2 Eş. 3.153.b' de yerine yazılır ve gerekli düzenleme yapılırsa,

$$\phi_3 = \left(\frac{\alpha_3}{D_3 - \beta_3 \frac{\alpha_2}{D_2}} \right) \phi_4 + \left(\frac{\beta_3 \left(\frac{\beta_2}{D_2} \phi_1 + \frac{C_2}{D_2} \right) + C_3}{D_3 - \beta_3 \frac{\alpha_2}{D_2}} \right) \quad [3.154]$$

olur. Eşitlik 3.154' de verilen bağıntıyı sadeleştirmek için,

$$A_2 = \frac{\alpha_2}{D_2} \text{ ve } C'_2 = \frac{\beta_2}{D_2} \phi_1 + \frac{C_2}{D_2}$$

tanımlamaları yapılır ve Eş. 3.154' de yerine yazılırsa,

$$\phi_3 = \left(\frac{\alpha_3}{D_3 - \beta_3 A_2} \right) \phi_4 + \left(\frac{\beta_3 C'_2 + C_3}{D_3 - \beta_3 A_2} \right) \quad [3.155]$$

olur. Bu bağıntıyı genel ifade biçimine dönüştürmek için,

$$A_3 = \frac{\alpha_3}{D_3 - \beta_3 A_2} \quad C'_3 = \frac{\beta_3 C'_2 + C_3}{D_3 - \beta_3 A_2}$$

tanımlamaları yapılır ve denklem yeniden düzenlenirse,

$$\phi_3 = A_3 \phi_4 + C'_3 \quad [3.156]$$

elde edilir. Eşitlik 3.156' da verilen bağıntı genelleştirilecek olursa ϕ terimi,

$$\phi_j = A_j \phi_{j+1} + C'_j \quad [3.157]$$

şeklinde yazılır. Burada bulunan A ve C' terimleri ise,

$$A_j = \frac{\alpha_j}{D_j - \beta_j A_{j-1}} \text{ ve } C'_j = \frac{\beta_j C'_{j-1} + C_j}{D_j - \beta_j A_{j-1}}$$

şeklinde genelleştirilmiş ifadeler olarak yazılabilir. Eşitlik 3.157' deki A_j , ϕ_{j+1} ve C'_j katsayıları kullanılarak, ϕ_j terimi hesaplanmaktadır. Böylece, cebirsel forma

dönüştürülen diferansiyel ifadeler, sayısal çözümleme yöntemleri kullanılarak hesaplanmış olmaktadır.

3.6. Katılık Oranının Tespiti

Ergimiş plastik kalıp boşluğunu doldururken kalıp yüzeylerine temas eden bölgelerde ani sıcaklık düşüşü olmaktadır. Ergiyik haldeki plastiğin sıcaklığı, camsı geçiş sıcaklık değerinin altındaki değerlerde (Camsı geçiş sıcaklığı: Plastik moleküllerinin 1/40' ının serbest hareket edebildiği sıcaklık değeridir) tam katı özellik göstermektedir (64-67, 183). Sıvı fazdan katı faza geçen bu bölgeler, akış özelliğine sahip olmadığından akış alanında kesit daralmasına sebep olmaktadır. Özellikle kalıp boşluğu dolarken akışkanın kalıp içerisinde temas yüzeylerinde ve akış burnunda oluşan katı katmanların tespit edilip hesaplamalarda dikkate alınması gerekmektedir. Ergiyik haldeki akışkanın sıcaklık değerlerine göre belirlenen katılık oranı kullanılarak katılaşmış bölgeler hesaplanmaktadır. Katılık oranı Eş. 3.158' deki bağıntı ile hesaplanmaktadır.

$$f_s = \frac{T_g - T}{T_g - T_e} \quad [3.158]$$

Bu denklemde, T akış sırasında plastiğin sıcaklığı (hesaplanan sıcaklık), T_e plastiğin sıvı fazda olduğu sıcaklık (ergime sıcaklığı) ve T_g ise camsı geçiş sıcaklığını temsil etmektedir. Çözüm sırasında enerji denkleminin çözülmesi ile elde edilen sıcaklık değerleri kullanılarak katılık oranı belirlenmektedir. Katılık oranı sıfır olduğunda, o bölge tamamen katı, 1 ve daha büyük değerlerde ise tamamen akışkandır. Katılık oranını hesaplanması ile katılaşmış bölgeler tespit edilebilmektedir.

4. PLASTİKLERİN ÖZELLİKLERİ VE AKIŞ DAVRANIŞLARI

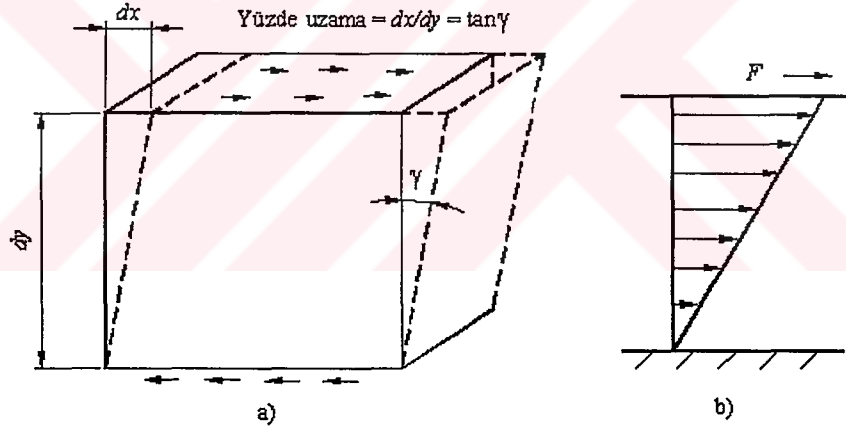
4.1. Plastiklerin Mekanik Özellikleri ve Deformasyon Davranışı

Plastikler, polimerlere kimyasal yöntemlerle plastikleştiriciler, dolgu maddeleri vb. gibi katkı maddelerinin katılması sonucu elde edilen ve yaygın olarak kullanılan bir malzeme türüdür. Plastikleştiriciler, polimer malzemesinin dayanım, sertlik, rijitlik gibi mekanik özelliklerini ve camsı geçiş sıcaklığı, viskozitesi, termal bozulma gibi reolojik (reoloji, malzemelerin uygulanan etkiler karşısında sergiledikleri tersinir veya tersinmez deformasyonları inceleyen bilim dalıdır) özelliklerini değiştirmektedir (64, 65, 67, 183). Polimerler, çok sayıda monomer olarak bilinen, en temel yapı taşlarının bir araya gelmesi ile oluşurlar. Çok sayıda monomerin bir araya gelmesi ile oluşan büyük miktarlardaki moleküller, makromolekül olarak da adlandırılmaktadır. Plastikler, termoplastikler ve termoset plastikler olarak ikiye ayrılır. Geri dönüşümsüz olarak adlandırılan termoset plastikler, katılaştıktan sonra ısıtıldıklarında ergimezler. Termoplastikler ise, tekrar ısıtıldıklarında ergiyip akışkan haline dönüşebilmektedirler. Termoplastikler, amorf yapıda olanlar ve yarı kristal yapıda olanlar olmak üzere ikiye ayrılırlar. Amorf yapıda olan plastiklerde moleküller düzensiz yapıda olup saydamdırlar. Yarı kristal plastiklerde ise moleküller yarı düzenli olup, saydam olmayan (opak) özellik göstermektedir (65, 67, 183).

Bu çalışmada teorik olarak sonuçların elde edilmesinde ihtiyaç duyulan bazı parametrelerin deneysel olarak bulunmasında, termoplastik malzeme grubundan olan Yüksek Yoğunluklu Polietilen (YYPE) malzemesi kullanılmış olup, mekanik ve reolojik özellikler, bu plastik grubuna göre verilmiştir. Plastik malzemeler enjeksiyonla kalıplamada ergitilerek şekillendirildiklerinden akış özelliklerinin iyi bilinmesi gerekmektedir. Enjeksiyonla kalıplamada, ergimiş plastik kalıp boşluğuna basınçlı bir şekilde enjekte edilmekte ve ergimiş plastik boşluk içerisinde katılaşarak şekillendirilmektedir. Katılaşma sırasında da bazı deformasyon özellikleri, üretilen plastik parçanın kalitesini etkilemektedir. Bu nedenle, mekanik özelliklere ve

deformasyon davranışlarına etki eden parametrelerin incelenmesi faydalı bulunmuştur.

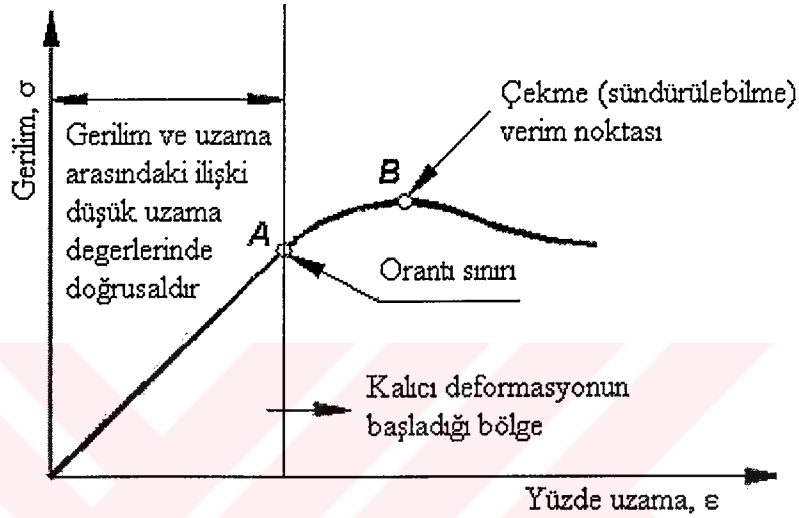
Plastiklerin mekanik davranışlarına ait veriler, öncelikle kullanım alanlarının belirlenmesi ve ayrıca işleme sırasında oluşabilecek zorlukların üstesinden gelebilmek için gerekmektedir. Bunun yanında, kalıp boşluğunun dolması, soğutma ve ütüleme (packing) safhalarının analizleri için, kalıplanacak plastiklerin fiziksel özelliklerine ait verilere ihtiyaç vardır (1, 5, 7). Malzemelerin dıştan gelen etkilere karşı göstereceği mekanik davranışlar, tersinir (elastik) veya tersinmez (viskoz) deformasyonları kapsamaktadır (2). Deformasyon ise malzemelerin bilinen bir gerilim alanında akması, akışkan davranış göstermesi veya boyut değiştirmesidir. Şekil 4.1' de görüldüğü gibi bir katının deformasyonu, boyutlarında değişme şeklinde olurken, sıvının deformasyonu ise akma şeklinde gerçekleşmektedir.



Şekil 4.1. Malzemelerin uygulanan yükler karşısındaki davranışı. a) Katıların deformasyonu, b) Sıvıların deformasyonu

Termoplastikler, moleküllerinin deforme olduğu hıza bağlı olarak belirli bir özgül ısı ve molekül ağırlığına sahip sıvı veya katı gibi davranış sergileyebilirler. Sıvı ve katı arasında olan bu davranışa, viskoelastik davranış denmektedir (1-3, 5, 8). Viskoelastik malzemelerin özellikleri, zamana, sıcaklığa ve deformasyon (yüzde uzama) hızına bağlı olmaktadır (1). Şekil 4.2' de görüldüğü gibi plastiklerde, orantı sınırına (A noktası) kadar gerilim ve uzama doğru orantılı olarak değişmektedir. Bu noktaya kadar elastik deformasyon gerçekleşmekte, bu noktadan sonra viskoz deformasyon gözlenmektedir. İdeal elastik davranış, plastik moleküllerinin

hareketleri yerine, molekülleri oluşturan atomlar arasındaki bağların ve bağ açılarının hareketliliği sonucu oluşmaktadır. Elastik deformasyon, bağ gerilmesi ve bağ açılarının tersinir olarak bozunması ile sınırlıdır. Uzamanın az olması halinde (A noktasına kadar), gerilim-uzama (gerinim) grafiğinin eğimi elastikiyet modülünü vermektedir.



Şekil 4.2. Plastikler için tipik gerilim-uzama (gerinim) grafiği

Plastiklerde ideal elastik davranış, sıcaklığa bağlıdır. Özellikle amorf yapıya sahip plastiklerde, moleküllerin $1/40$ ' nın serbest hareket edebilir hale geldiği sıcaklık olan camsı geçiş sıcaklığının altındaki sıcaklıklarda, moleküller hareketsizdir. Bu nedenle, zincir hareketleri kısıtlanmakta ve bundan dolayı plastik deformasyon gözlenmektedir (1, 2, 8). Camsı geçiş sıcaklığının üstünde ise, plastikler kauçuk gibi davranmakta ve elastikiyet modülü değerleri düşmektedir.

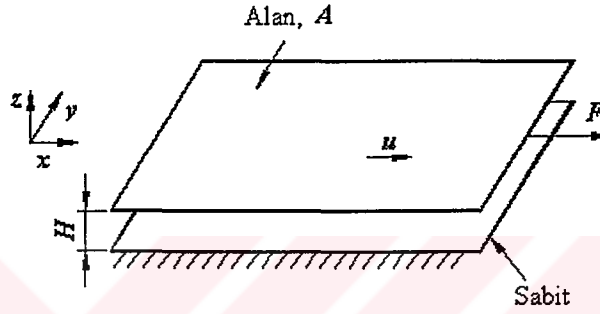
4.2. Plastiklerin Akış Davranışı

Şekil 4.3.'deki gibi aralarında " H " kadar mesafe olan, biri sabit diğeri " A " yüzey alanına sahip, x yönünde " F " kuvvetinin etkisinde " u " bağlı hızıyla hareket etmekte olan iki düzlem arasındaki akışkanın davranışı, kararlı basit kayma akışı olarak adlandırılmaktadır (7). Üst düzleme etki eden kayma gerilimi τ , birim alana etki eden kuvvet olarak aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\tau = \frac{F}{A} \quad [4.1]$$

Deneysel olarak kayma geriliminin, akışkanın hız değişimi (du/dz) ile orantılı olduğu belirlenmiştir. Bu orantı aşağıda belirtildiği şekilde ifade edilmektedir:

$$\tau_{zx} = \eta \frac{du}{dz} \quad [4.2]$$



Şekil 4.3. Kararlı basit kayma akışı

Eşitlik 4.2’de akışkanın viskozitesi η , orantı sabitini temsil etmektedir. Hız değişimi, du/dz kayma hızı γ olarak adlandırılmaktadır. Akışın katmanlardan oluştuğu düşünülürse, her bir katmanın hızı, farklı olduğundan, kayma hızı, katmanların birbiri üzerinden hangi hızla aktığının ölçümü olarak da ifade edilebilir. Buna göre kayma gerilimi, kayma hızına bağlı olarak Eş. 4.3’ deki gibi ifade edilmektedir:

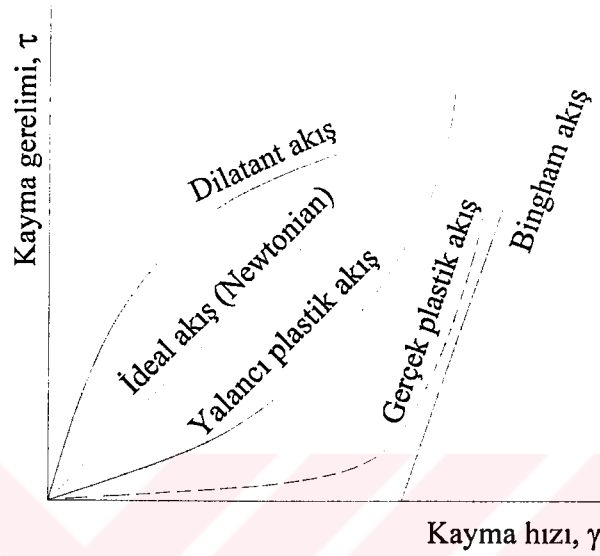
$$\tau_{zx} = \eta \gamma \quad [4.3]$$

Viskozite, kayma hızından bağımsız ise akışkan, ideal akışkan (Newtonian) özelliği gösterir. Plastikler, kayma gerilimi kayma hızının üstel değeri ile değiştiği ve viskoziteleri de kayma hızına bağlı olduğu için, ideal olmayan (Non-Newtonian) akışkan özelliği gösterirler. Bu durumda, plastikler için kayma gerilimi eşitliği, aşağıdaki gibi ifade edilmektedir (2-3, 5, 7-8) :

$$\tau_{zx} = \eta_0 \gamma^n \quad [4.4]$$

Eşitlik 4.4’teki n üstel değeri, kayma gerilimi-kayma hızı grafiğinin (Şekil 4.4) eğimidir. $n = 1$ olduğu durumlarda ideal akışkan, $n < 1$ veya $n > 1$ olduğu durumlarda

ise ideal olmayan akışkan özellikleri gözlenmektedir. İdeal akışkanların viskoziteleri, uygulanan basınç ve sıcaklık değişiminden etkilenmez, küçük moleküllerden oluşan plastiklerde de ideal akışkan özellikleri gözlenir (2, 8).



Şekil 4.4. Kayma gerilimi-kayma hızı grafiği (1,155, 183)

Eşitlik 4.4' de verilen denklemde eşitliğin her iki tarafının logaritması alındığında,

$$\log \tau = \log \eta_0 + n \log \gamma \quad [4.5]$$

şeklinde elde edilir (178, 230-232). $\log \tau - \log \gamma$ grafiği çizildiğinde elde edilen doğrusal denklemdeki sabit sayı sıfır kayma hızındaki viskoziteyi, kayma hızının önündeki değer ise Akış üssü sabitini veya Üs yasası sabitini (n) temsil etmektedir.

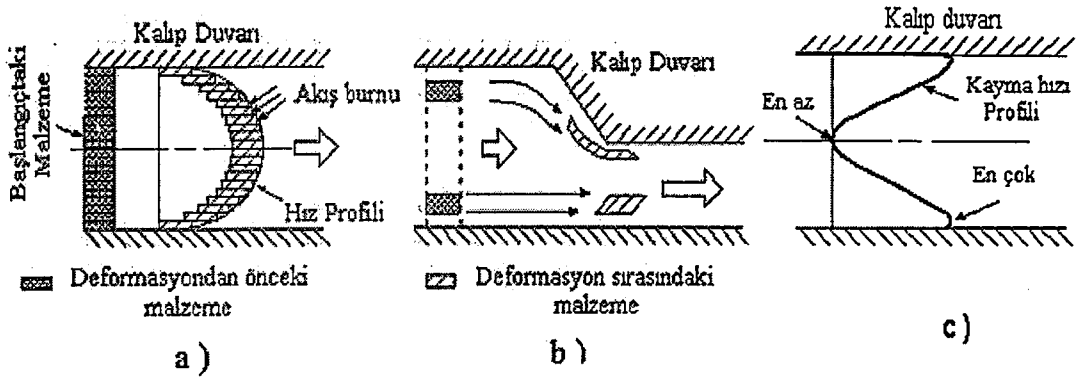
Küçük molekülü plastikler dışındaki diğer plastiklerin viskoziteleri, uygulanan kayma hızı, sıcaklık ve basınç ile değişim göstermektedir. Kayma gerilmesi ile kayma hızı arasındaki ilişki, doğrusal olarak değişiyorsa akış, ideal akış olarak adlandırılmaktadır. Dilatant akışta, akma gerilimi, kayma hızının artması ile ani olarak yükselir ve kayma hızının yükselmesi ile viskozite de artacağından sıvı, akmaya karşı büyük bir direnç göstermektedir. Dilatant akış özellikleri olan sıvılar, aynı zamanda hacim genişlemeleri de göstermektedir. Polimerlerde, nadir de olsa kayma kalınlaşması olarak bilinen bu davranış, özellikle pigment içeren boyalarda

görülmektedir. İdeal olmayan akışlarda görülen ve reolojik olarak tam plastik akış özelliği olmamakla birlikte, akma gerilimi ile kayma hızı arasındaki ilişki konkav şeklinde gerçekleşiyorsa bu tür davranış kayma incelmesi olarak adlandırılmaktadır.

Gerçek plastik için kayma gerilmesi-kayma hızı grafiği, Şekil 4.4' de görülen yalancı plastik akış ile Bingham akış doğrusu arasında kesik çizgi şeklinde verilen biçimde gerçekleşmektedir (67). Bu grafikte, kayma hızının artması ile akma gerilimi çok az değişmekte ve önce yavaş sonra daha hızlı artmaktadır. Plastik malzemelerin çoğunda görülen bu akma davranışında, polimer zincirler akma yönüne doğru yönelmektedir. Böylece, iç sürtünme en aza indiğinden dolayı, kayma gerilimi ve viskozite beklenenden düşük çıkmaktadır. Kayma hızının çok küçük olduğu yerlerde kayma incelmesi gösteren plastikler, ideal akış özelliğine benzer bir yapıda olmakla birlikte, bu durum kısa süreli gerçekleşmektedir.

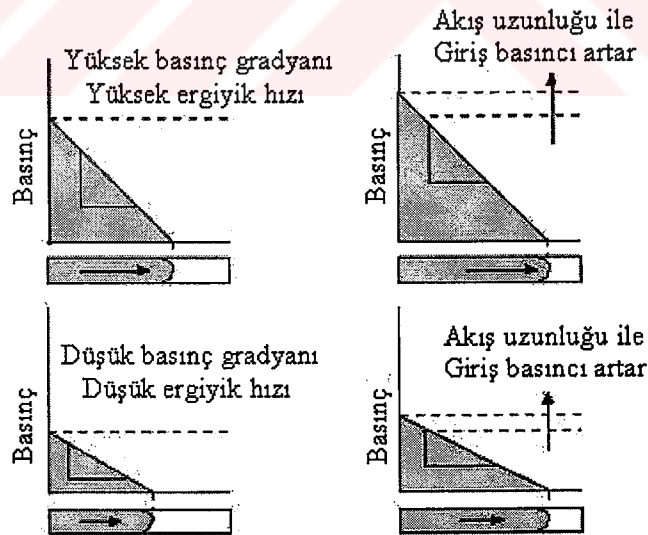
Enjeksiyonla kalıplama sırasında, ergimiş termoplastiklerin akışı, katmanların birbiri üzerinden kayması şeklinde olmaktadır (Şekil 4.5.a). Bununla birlikte, Şekil 4.5.b' de görüldüğü gibi, ergimiş termoplastikler, boyutsal değişimi fazla olan alanlardan (kesit daralması) geçerken uzama akışı gerçekleşmektedir (9). Kalıp boşluğu içerisindeki kayma hızı dağılımı ise, Şekil 4.5.c' de görüldüğü gibi, kalıp duvarları ile ergimiş plastiğin ara yüzeylerinde, kayma hızı en yüksek değerine ulaşmakta, akış merkezinde ise kayma hızının değeri sıfıra yaklaşmaktadır (8).

Enjeksiyonla kalıplamada, kalıp boşluğu dolarken, ergimiş plastiklerin akışa karşı gösterilen direnci yenen en önemli unsur basınçtır. Ergimiş plastikler, kalıp boşluğunda akarken yüksek basıncın etkisi altında olduğundan, basınçlı bölgeden atmosfer basıncına sahip bölgeye doğru akmaktadır. Enjeksiyon sırasında, ergimiş plastiğin akış dayanımını yenecek yüksek basınç enjeksiyon memesinde oluşur.



Şekil 4.5. Ergimiş plastiğin kalıp boşluğundaki akışı. a) Kalıp boşluğunun dolumu sırasındaki kayma akışı b) Kalıp boşluğu içindeki uzama akışı, c) Kalıp boşluğunun dolumu sırasındaki kayma hızı dağılımı (9)

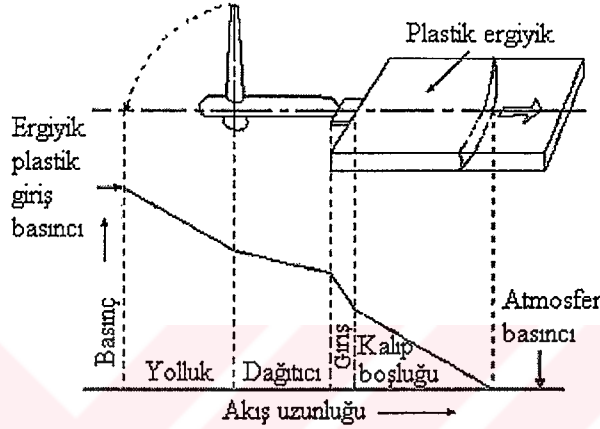
Basınç, akış boyunca ergiyik burnuna doğru yavaş yavaş azalmaktadır (Bu durum kalıp boşluğu içerisindeki havanın tahliye edildiği durumlar içindir). Girişteki yüksek basınç ve basınç değişiminin bileşkesi, ergiyik akışını hızlandırmaktadır. Bundan dolayı, Şekil 4.6'da görüldüğü gibi akış hızını korumak için, akış uzunluğuna göre basınç değeri ayarlanmalıdır.



Şekil 4.6. Basınç değişimi ile ergimiş plastiğin hızı arasındaki ilişki (9)

Kalıp boşluğu dolarken oluşan enjeksiyon basıncının dağılımı, ergimiş plastiğin akış yoluna sensör yerleştirildiğinde elde edilen basınç değişimi Şekil 4.7'deki gibidir. Kalıp boşluğu ergimiş plastik ile dolduğunda, kalıp boşluğu içerisindeki her bir

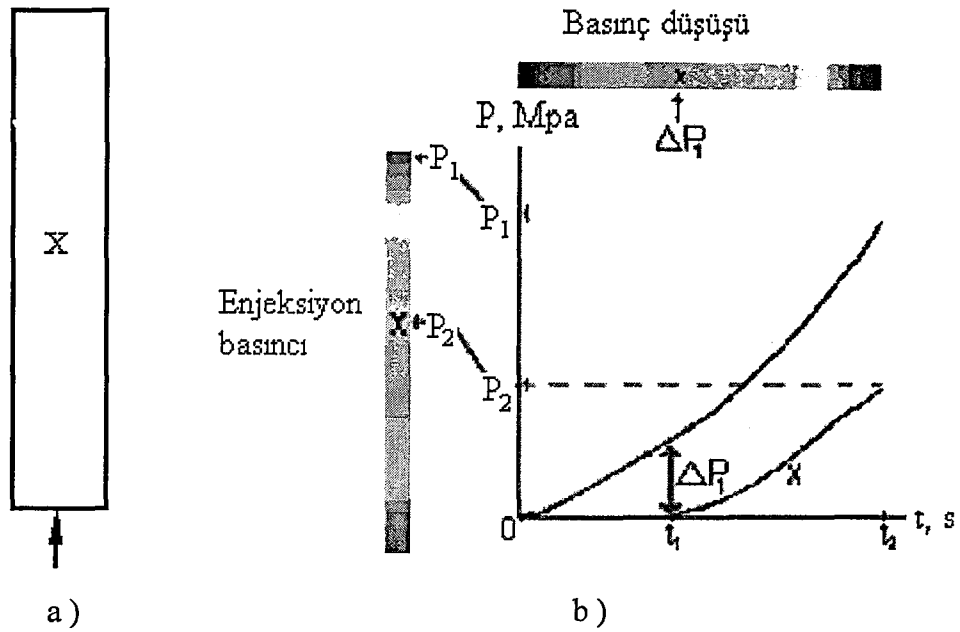
noktanın karakteristik bir basınç eğrisi bulunmakta ve bu eğri, zamana bağlı olarak o noktada basıncın nasıl değiştiği konusunda bilgi vermektedir (10). Şekil 4.8.a' da görüldüğü gibi, tek bir girişe sahip dikdörtgen şeklindeki basit bir parça üzerinde bir X noktası işaretlenip, akış analizi yapan yazılımlardan biri ile basınç dağılımı belirlendikten sonra, basıncın zamana göre değişimi Şekil 4.8.b' de ki gibi çizilebilir.



Şekil 4.7. Dağıtıcı sistem ve basınç dağılımı (9)

Bu grafiklerden elde edilen sonuçlara göre, basınç değerinin çok düşük olduğu yerlerde plastiğin akışı mümkün olmamaktadır. Dolayısıyla, basıncın düşük olduğu bölgeler eksik çıkmakta, buna karşılık basınç değerinin çok fazla olduğu bölgelerde ise, sıkıştırma işlemi gerçekleşmektedir. Bu nedenle, en uygun kalıplamanın yapılması için, uygun basınç değerinin tespit edilmesi gerekmektedir.

Plastiklerin reolojik özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan en önemli iki parametre viskozite ve ergime akış indeksidir. Malzemelerin reolojik özellikleri incelenirken baş vurulan ve en pratik yöntem kapilar reometre olarak da bilinen akış indeksi testi ile akış hızı ölçümüdür.



Şekil 4.8. Kalıp boşluğundaki basınç değişimi. a) Basınç dağılımı incelenen örnek parça, b) Basınç dağılımının zamana göre değişimi (10)

4.3. Ergime Akış İndeksi Değerinin Belirlenmesi

Plastik malzemelerin reolojik özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan bir çok yöntem vardır. Bunlar arasında en çok kullanılan akış indeksi testidir. Ergime Akış İndeksi (EAI), standart bir çaptan belirlenen sabit sıcaklık ve yük altında 10 dakikada akan ergimiş malzeme miktarı olarak ifade edilmektedir (67, 155). EAI değeri, hacimsel olarak $\text{cm}^3/10 \text{ dak}$, kütleli olarak da $\text{gr}/10 \text{ dak}$ cinsinden bulunur. Plastik malzemeler tarif edilirken yoğunlukla birlikte söylenen en öncelikli karakteristik reolojik özelliği EAI'dir. EAI değeri, hesaplanmasının basit ve pratik olması bakımından çok sık kullanılan bir tanımlama çeşididir. Fakat EAI değeri, plastik malzemenin sadece akıcılığı hakkında, sıcaklık ve basıncın etkisine bağlı ön bir bilgi vermektedir.

EAI değerinin sıcaklık ve basınç karşısındaki değişimini hesaplamak için Eş. 4.6 ve Eş. 4.7 deki bağıntılar kullanılmaktadır (178, 230, 231)

$$EAI = A_0 + A_1 T$$

[4.6]

$$EA\dot{I} = B_0 + B_1 p + B_2 p^2 \quad [4.7]$$

Buradaki A_0 , A_1 , B_0 , B_1 ve B_2 katsayıları malzemeye bağlı sabitler olup, deneysel olarak elde edilmektedir (230).

EAİ değeri malzemenin kalıplanabilirliği hakkında bilgi verir ama, aynı akış indeksi değerine sahip malzemelerin akış özellikleri çok büyük farklılıklar gösterebilmektedir (155, 183).

Viskozite ise, malzemeye ait hem fiziksel hem de kimyasal özellikleri de kapsayacak şekilde, molekül ağırlığı ve molekül uzunluğu da dahil tüm karakteristik parametrelerin etkilerinin incelenebildiği bir parametredir. Maddenin akmaya karşı gösterdiği ve sürtünme etkisi ile oluşan direnç olan viskozite, basıncın ve katkı maddesi oranının artması ile artmakta, sıcaklık ve akış iyileştiricilerin oranı ve molekül ağırlığının artması ile de azalmaktadır. Viskozite değerlerinin elde edilmesi, EAİ kadar basit olmadığından daha detaylı ve karmaşık deneylerle veya matematiksel olarak hesaplanmaktadır. Viskozite üzerinde en etkin parametre kayma hızı ve sıcaklık olmakla birlikte, basıncın ve kayma gerilmesi gibi akış parametrelerinin de dikkate değer bir etkisi vardır.

EAİ test cihazında akış hızı ölçümü esasına göre yapılan teste, silindir içerisinde akışa etki eden kuvvet ile ergimiş plastik akmaktadır. Uygulanan kuvvet ile birlikte silindir yüzeylerinde bir gerilme oluşmaktadır. Akış sırasındaki kayma gerilmesi olarak tanımlanan bu etki Eş. 4.7'deki formülle hesaplanmaktadır.

$$\tau (2\pi L) = (p_2 - p_1)(\pi r^2) \quad [4.7]$$

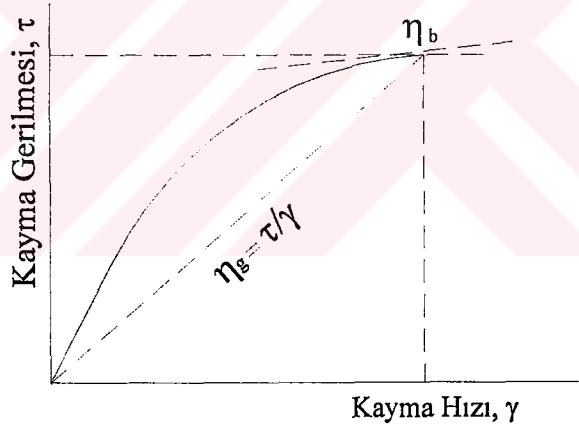
Burada, τ kayma gerilmesi, L kılcal reometre silindirinin uzunluğu, p basınç ve r ise silindir yarı çapıdır. Bu eşitlikten anlaşılabacağı gibi, kayma gerilimi ile silindir iç yüzeyinin alanının çarpımı, L uzunluğundaki silindirde gerçekleşen basınç düşmesi ile silindirin kesit alanının çarpımına eşittir. Eşitlik 4.7 yeniden düzenlenirse,

$$\tau = \frac{(p_2 - p_1)r}{2L} \quad [4.8]$$

şeklinde yazılır. Kılcal reometrenin silindirinin her iki ucundaki basıncın ölçülebildiği düzeneklerde hacimsel akış hızı Eş. 4.9 da verilen bağıntı ile hesaplanmaktadır.

$$Q = \frac{\pi(p_2 - p_1)r^4}{8\eta L} \quad [4.9]$$

Burada, Q hacimsel akış hızını, η ise viskoziteyi temsil etmektedir. Kayma Hızı ile kayma gerilmesi grafiğinde, secant doğrusu (arc tan) görünen viskoziteyi vermektedir. Kayma hızına karşı kayma geriliminin herhangi bir noktasında hesaplanacak viskozite ise bağıl viskozite olarak adlandırılır. Bağıl viskozite her zaman için görünen viskoziteden küçüktür.



Şekil 4.9. Görünür viskozite grafiği

Özellikle plastik gibi, ideal akış özelliğine sahip olamayan malzemeler akış davranışları incelenirken elde edilen kayma gerilmesi, kayma hızı ve viskozite değerleri görünür değerler olup düzeltilmelidir. Viskozite değeri kayma hızı ve kayma gerilmesinden elde edildiği için, bu değerlerin düzeltilmesi ile viskozite de düzeltilmiş olmaktadır. Düzeltmelerden birisi giriş düzeltmesi olup, akışkan kalıba girdiğinde belirli bir yöne yöneleceğinden böyle bir düzeltmeye ihtiyaç duyulmaktadır. Basınç değeri ölçülürken, basınç düşmesi ihmal edilerek, transduser tarafından akışa karşı ölçülmektedir. Bagley düzeltmesi olarak bilinen ve en yüksek

basınç ile kalıp içerisindeki basınç değişimi arasındaki ilişki belirlenip, düzeltilmiş kayma gerilmesi elde edebilmektedir (194). Literatürde plastik malzemelerde kayma gerilmesi düzeltme işlemi ile gerilme değerinin fazla değişmediği tespit edildiğinden dolayı bu düzeltme işlemi ihmal edilmektedir.

İkinci düzeltme işlemi ise, Rabinowitsch yöntemi olarak bilinen bağıntı ile yapılmaktadır (194). Eş. 4.10' da verilen bağıntıda $\frac{d \log \gamma_g}{d \log \tau}$ ifadesi Eş.4.4' de verilen bağıntıdaki Akış üssü olarak bilinen n değerdir.

$$\gamma_d = \frac{\gamma_g}{4} \left(3 + \frac{d \log \gamma_g}{d \log \tau} \right) = \frac{\gamma_g}{4} \left(3 + \frac{1}{n} \right) \quad [4.10]$$

Akış üssü, $\log \tau$ nin $\log \gamma$ karşı grafiğinin eğiminden bulunur. n değeri önceden bilinmediğinden, görünen kayma hızı ve gerilme değerlerinde elde edilmektedir. Eş. 4.10' da verilen bağıntı ile kayma hızı değerleri düzeltildikten sonra Eş. 4.11' deki denklemle gerçek viskozite değeri hesaplanmaktadır.

$$\eta = \frac{\tau}{\gamma_d} \quad [4.11]$$

Viskozite hesaplanmasında yüzlerce matematiksel model bulunmaktadır. Bunların büyük çoğunluğu kayma hızı ve sıcaklık terimlerini içermektedir. Ayrıca, viskozite sadece kayma hızı, kayma gerilmesi ve basınca bağlı olarak da bulunabilmektedir.

4.3.1. Sıcaklığın viskozite üzerindeki etkisi

Sıcaklığın viskozite üzerindeki etkisi oldukça büyüktür. Sıcaklık arttıkça viskozite değeri de düşmektedir. Plastik malzemelerin viskozitelerinin sıcaklığa bağlı olarak hesaplanmasında sıklıkla kullanılan model, Arrhenius modelidir. Arrhenius modeli, sıcaklığın aktivasyon enerjisine bağlı olarak bulunduğu bir modeldir (183, 230, 231). Bir plastiğin sıcaklık ile değişen viskozitesi, Eş. 4.12' deki denkleme göre ısı olarak aktive edilmiş bir olay olarak ele alınmaktadır (155, 178, 230-232).

$$\eta = A e^{(E_a / RT)} \quad [4.12]$$

Eş. 4.12' de verilen bu viskozite modeli, özellikle düşük kayma hızlarında çok başarılı olup, bu modelde bulunan ve referans sıcaklıktaki viskoziteyi (η_0) temsil eden A sabiti ve Aktivasyon enerjisi (E_a), $\ln(\eta)$ ile $(1/T)$ grafiğinden elde edilmektedir (67,183,230-232). Burada, R gaz sabiti, T ise sıcaklığı temsil etmektedir. Deneysel olarak elde edilen viskozite ve sıcaklık değerlerinden, $\ln(\eta)$ ile $(1/T)$ grafiği çizilmektedir. $\ln(\eta) - (1/T)$ grafiğinin eğimi $\tan \alpha = E_a/R$ a eşit olup, buradan plastiğin aktivasyon enerjisi hesaplanabilmektedir.

4.3.2. Basıncın viskozite üzerindeki etkisi

Basıncın viskozite üzerindeki etkisi, sıcaklık ve kayma hızı kadar olmasa da, yine de viskoz akış için aktivasyon enerjisi büyüdükçe, basınç değişimine duyarlılık da artmaktadır. Basınca bağlı viskozite Eş. 4.13 ile hesaplanabilmektedir (230).

$$\eta = A e^{C \cdot p} \quad [4.13]$$

Burada, A atmosferik ortamdaki viskoziteyi, p basıncı, C ise basınca bağlı katsayıyı temsil etmektedir.

4.3.3. Kayma hızı ve kayma gerilmesinin viskozite üzerindeki etkisi

Viskozite üzerinde en etkin parametre kayma hızıdır. Ergimiş plastik malzemelerin akışı sırasında, deformasyon hızına bağlı olarak moleküllerin deformasyonu değişmektedir. Plastik malzemelerin büyük bir çoğunluğu, makromoleküllü uzun zincirlerden oluştuğundan, moleküler yönelimler akış doğrultusunda olmaktadır. Moleküler yönelimlerin akış doğrultusunda olması, akışkan plastik tabakalarının birbiri üzerinden rahatça kaymasına sebep olmaktadır. Uygun moleküler yönelimlerinin sonucu, akış sırasında iç direnç azalmaktadır. Viskozite değerini düşüren bu etki akışın kolay olmasını sağlamaktadır. Viskozite sadece kayma hızına

ve kayma gerilmesine bağılı olarak hesaplandığında, Eş. 4.14 ve Eş. 4.15' deki bağıntılar kullanılmaktadır (230, 231).

$$\log(\eta) = A_0 + A_1 \log(\gamma) + A_2 \log(\gamma)^2 \quad [4.14]$$

$$\log(\eta) = B_0 + B_1 \log(\tau) + B_2 \log(\tau)^2 \quad [4.15]$$

Eş. 4.14 ve Eş. 4.15 deki bağıntılar, logaritmik olarak çizilen viskozite-kayma hızı ve viskozite-kayma gerilmesi grafiklerinden elde edilen, ikinci dereceden doğrusal bir ilişki ile tanımlanmaktadır. Buradaki katsayılar, kayma hızı ve kayma gerilmesine bağılı sayılar olup, deneysel verilerden elde edilmektedir. Eş. 4.14 ve Eş. 4.15'deki eşitliklerle, viskozitenin sadece bir akış parametresi ile değişimi hesaplanabilmektedir. Sadece bir parametreye bağılı olarak hesaplanan bu yöntemlerle elde edilen viskozite değerleri, plastiklerin enjeksiyonla kalıplama yada ekstrüzyonla üretilirken ön ayarların yapılmasında değerlendirilmektedir. Ergimiş plastiklerin akış davranışının belirlenmesi ve akış analizlerinde kullanılan viskozite modelleri, sadece bir akış parametresine bağılı olarak hesaplanmamaktadır. Genellikle, ideal olmayan akışlarda en fazla etken olan kayma hızı ve sıcaklık parametrelerini içeren viskozite modelleri kullanılmaktadır.

4.4. Akış Analizinde Kullanılan Teorik Viskozite Modelleri

Plastiklerin akış davranışlarının belirlenmesi ve akış simülasyonu için teorik olarak hesaplanan bir viskozite fonksiyonuna yada viskozite modeline ihtiyaç duyulmaktadır (7, 15, 54, 59, 62, 119, 155, 175, 176). Bu amaç doğrultusunda bir viskozite modeli, aşağıda belirtilen plastik malzemelere ait reolojik özellikleri temsil edebilmeli ve bu ihtiyaçları karşılamalıdır:

1. Viskozite/sıcaklık alanında
 - a. Viskozite, sıcaklığın artışıyla azalmalıdır
 - b. Artan sıcaklıkla, kayma hızı eğrileri azalan bir davranış sergilemelidir
 - c. Sıcaklık-kayma hızı eğrileri birbirini kesmemelidir
2. Viskozite/kayma hızı alanında
 - a. Viskozite, kayma hızının artışıyla azalmalıdır

- b. Artan kayma hızıyla, izoterm (isotherm) eğrileri azalan bir davranış sergilemelidir
- c. İzoterm eğrileri birbirini kesmemelidir

Bu amaçlar doğrultusunda ortaya konmuş bir çok viskozite modeli mevcut olmakla birlikte, tüm malzemeler için geçerli olan tek bir model bulunmamaktadır. Bu nedenle, analiz şartlarına uygun olarak hangi modelin seçileceği de önem arz etmektedir. Yaygın olarak aşağıdaki viskozite modellerinin kullanıldığı literatürden tespit edilmiştir (59, 62, 67, 155).

- Üs yasası (Power Law) modeli
- Moldflow ikinci dereceden viskozite modeli
- Carreau modeli
- Cross modeli
- Cross-WLF model
- Moldflow matris verileri
- Ellis model

4.4.1. Üs yasası modeli

Bu model,

$$\eta = m\gamma^{n-1} \quad [4.16]$$

eşitliği ile ifade edilmektedir. Burada, η viskozite fonksiyonu, γ kayma oranı (s^{-1}), m yoğunluk indeksi, n Üs yasası sabitidir (Power Law indeksi). Yoğunluk indeksi m ,

$$m = M_0 e^{-\alpha(T-T_0)} \quad [4.17]$$

eşitliği ile hesaplanabilmektedir (55, 59, 62, 67, 155). Eş. 4.17'deki M_0 sıcaklığa bağlı malzeme sabiti, α malzeme sabiti, T_0 ($^{\circ}C$) malzeme sabitlerinin hesaplandığı sıcaklık ve T ($^{\circ}C$) ise viskozitesi hesaplanacak ergiyiğin sıcaklığını temsil etmektedir.

Üs yasası viskozite modelinde, $m=\eta$ ve $n = 1$ olduğunda, ideal bir akışkan için viskozite fonksiyonu elde edilmektedir. Plastik ergiyikler için n sabiti, 0 ile 1

arasında değişmekte olup, logaritmik olarak çizilen kayma gerilmesi ($\log \tau$) ile kayma hızının ($\log \gamma$) eğimine eşittir. Eş. 4.18' de verilen eşitliğin her iki tarafının logaritmaları alındığında aşağıdaki eşitlik elde edilir (59, 62).

$$\ln(\eta) = \ln(m) + (n-1)\ln(\gamma) \quad [4.18]$$

$\ln(\gamma)$ ' na karşı çizilen $\ln(\eta)$ grafiği, γ ile η arasındaki ilişkiyi doğrusal olarak göstermektedir. Bu nedenle, Üs yasası modeli, ergimiş plastiklerin yüksek kayma hızı bölgesindeki davranışlarını ifade edebilmektedir. Deneysel sonuçların bu modele uydurulması kolaylaşmakta ve böylece m ve n sabitleri kolayca belirlenebilmektedir.

Bu modelin olumsuzluğu, düşük kayma hızı oranlarında istenilen sonucu verememesidir. Bu model ile, sıfır kayma hızındaki viskozite değeri olarak tanımlanan ideal (Newtonian) viskozite η_0 ' ın belirlenebilmesi mümkün olmamaktadır. Bu olumsuzluğa rağmen, model, enjeksiyonla kalıplamadaki akışın modellenmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle, kalıp boşluğunun dolumu safhasındaki kayma hızları, bu modelin kullanabileceği yeterli büyüklüktedir.

Sıcaklığa bağımlılık, Eş. 4.16'nın bir üstel terimle çarpımı sonucu elde edilmektedir ve buna göre sıcaklığa bağlı olarak Moldflow birinci dereceden viskozite modeli olarak da bilinen bağıntı, aşağıdaki gibi ifade edilmektedir (1, 62)

$$\eta = A\gamma^B \exp(cT) \quad [4.19]$$

Bu eşitlikte, T sıcaklık ($^{\circ}C$), A viskozite faktörü, B Üs yasası sabitine bağlı sabit ve c malzeme sabitidir.

4.4.2. Moldflow ikinci dereceden viskozite modeli

Düşük kayma hızı bölgelerinde viskozitenin gelişmiş bir şekilde anlatılabildiği bu model, Moldflow analiz yazılımında da kullanılmaktadır (62). Modelin matematiksel ifadesi,

$$\ln \eta = A_0 + A_1 \ln \gamma + A_2 T + A_3 (\ln \gamma)^2 + A_4 T \ln \gamma + A_5 T^2 \quad [4.20]$$

şeklindedir ve burada, η viskozite (Pa s), γ kayma hızı (s^{-1}), T sıcaklık ($^{\circ}C$) A_i ' ler ise deneysel olarak bulunan malzeme sabitleridir (59, 62). Bu modelde kullanılan sabit sayılar, deneysel sonuçlara bağlı olarak bulunmaktadır. İkinci dereceden viskozite modeli, polimer eriyiğin özellikle aşağıdaki niteliklerinin sağlanmasında kullanılmaktadır:

1. Artan sıcaklığa bağlı olarak kayma hızı eğrilerinin yakınsanması
2. Artan kayma hızına göre, izotermilerin (eş ısı eğrileri) yakınsanması
3. Kayma hızının artıp, viskozitenin azaldığı durumlardaki artan oranlar
4. Sıcaklığın artıp viskozitenin azaldığı durumlardaki azalan oranlar

Bu modelin de bazı olumsuz yönleri vardır. Bu olumsuzluklardan en önemlisi, aslında esnek bir model olmasına karşılık, ergimiş plastik davranışının reolojik hassasiyette ifade edilememesidir. Örneğin, artan kayma hızı ile viskozitenin artması mümkündür, yani $\partial\eta/\partial\gamma > 0$ olabilir. Bu da, kayma incelmeleri davranışının sergilendiği enjeksiyon kalıplama işlemi ile çelişmektedir. Bu durumun engellenmesi için, deneysel verilerin modele uydurulmasında oldukça dikkatli davranmak gerekmektedir.

4.4.3. Carreau modeli

Carreau modeli,

$$\eta = \frac{\eta_0}{\left[1 + \left(\frac{\eta_0 \gamma}{\tau^*}\right)^2\right]^{\left(\frac{1-N}{2}\right)}} \quad [4.21]$$

eşitliği ile ifade edilmektedir (15, 59, 62, 64-67, 155). Burada,

$$\eta_0 = B \exp\left(\frac{Tb}{T}\right) \exp(\beta p) \quad [4.22]$$

olarak tanımlanmıştır. Eş. 4.21'deki η viskozite (Pa.s), η_0 sıfır kayma hızındaki viskozite, γ Kayma oranı (s^{-1}), Eş. 4.22'deki T sıcaklık ($^{\circ}C$), p basınç (Pa)'ı temsil etmektedir. N, B, Tb, β, τ^* deneysel olarak bulunan sabitlerdir.

4.4.4. Cross modeli

Cross modeli,

$$\eta = \frac{\eta_0}{1 + \left(\frac{\eta_0 \dot{\gamma}}{\tau^*} \right)^{1-N}} \quad [4.23]$$

eşitliği ile ifade edilmektedir (54, 59, 62, 64, 119, 155). Buradaki η_0 sıfır kayma hızındaki viskozite olup,

$$\eta_0 = B \exp\left(\frac{Tb}{T}\right) \exp(\beta p) \quad [4.24]$$

eşitliğinden elde edilmektedir. Eş. 4.23' deki, γ kayma oranı (s^{-1}), N malzeme sabiti ve τ^* ideal (Newtonian) ve Üs yasası davranışı arasındaki geçişteki kayma gerilimini temsil etmektedir. Eş. 4.24'deki T sıcaklığı ($^{\circ}C$), p basıncı (Pa) temsil etmektedir. N, B, Tb, β, τ^* deneysel olarak bulunan sabitlerdir (59, 62, 67, 155).

4.4.5. Cross-WLF modeli

Cross-WLF modeli, Cross modeli ile aynı olup sadece sıfır kayma hızındaki viskozitesi farklı olarak hesaplanmaktadır. Sıfır kayma hızındaki viskozite η_0 ,

$$\eta_0 = D_1 \exp\left[\frac{-A_1(T - T^*)}{A_2 + (T - T^*)}\right] \quad [4.25]$$

olarak yazılır. Eşitlik 4.23'deki T^* sayısı basınca bağlı bir sayı olup,

$$T^* = D_2 + D_3 p \quad [4.26]$$

eşitliğinden hesaplanabilmektedir (59, 62, 67, 155). Eş. 4.25 ve Eş. 4.26'daki D_1, D_2, D_3, A_1 ve A_2 sayıları deneysel olarak bulunan sabitlerdir.

4.4.6. Düzeltilmiş Cross modeli

Cross modelde sıfır kayma hızının değeri, basınca ve malzeme sabitine bağlı olarak bulunan T^* parametresinin hesaplanmasında yapılan düzenlemeyle ortaya çıkmıştır. Sıfır kayma hızındaki viskozite, $T > T^*$ ise Eş. 4.27' de görüldüğü gibi hesaplanır, $T < T^*$ ise sıfır kayma hızındaki viskozite sonsuz olmaktadır. Buna göre,

$$\eta_0 = \begin{cases} D_1 \exp \left[\frac{-A_1(T - T^*)}{A_2 + (T - T^*)} \right] & \Rightarrow T > T^* \\ \infty & \Rightarrow T < T^* \end{cases} \quad [4.27]$$

$$T^* = D_2 + D_3 p \quad [4.28]$$

$$A_2 = \tilde{A}_2 + D_3 p \quad [4.29]$$

Eş. 4.27, Eş. 4.28 ve Eş. 4.29' daki katsayılar deneysel veriler olup, her malzeme için sabittir (7, 175).

4.4.7. Moldflow matris veri modeli

Bu model, deneylerden elde edilen kayma hızı, sıcaklık ve viskozite değerlerinin birleştirilmesini kolaylaştırmaktadır. Modelde, fonksiyonel bir bağımlılığın olmadığı kabul edilir ve bundan dolayı da birinci ve ikinci dereceden viskozite modellerindeki gibi, grafik eğrilerinin uydurulması işlemine ihtiyaç duyulmaz. Analiz programları, ayarlanan şartlardan bağımsız olarak, veri noktaları arasında doğrusal interpolasyon gerçekleştirir (62).

Matris veri modeli, daha çok sıvı kristal polimerlerde olduğu gibi, alışılmamış viskozite karakteristikleri gösteren ve diğer viskozite modelleri ile modellenemeyen malzemelerin davranışlarının belirlenmesi için uygundur. Ayrıca, bu modelin etkili bir şekilde kullanılabilmesi için, matris verileri mümkün olduğunca çok sayıda yapılan ölçümlerin sonucu olmalıdır.

4.4.8. Ellis modeli

Ellis modeli, viskoziteyi kayma geriliminin (τ) bir fonksiyonu olarak açıklar ve matematiksel olarak,

$$\frac{\eta_o}{\eta} = 1 + \left(\frac{\tau}{\tau_{1/2}} \right)^{\alpha-1} \quad [4.28]$$

şeklinde ifade edilir (59, 62, 67, 155).

4.5. Akış Analizinde Basınç-Hacim-Sıcaklık (PVT) ilişkisi

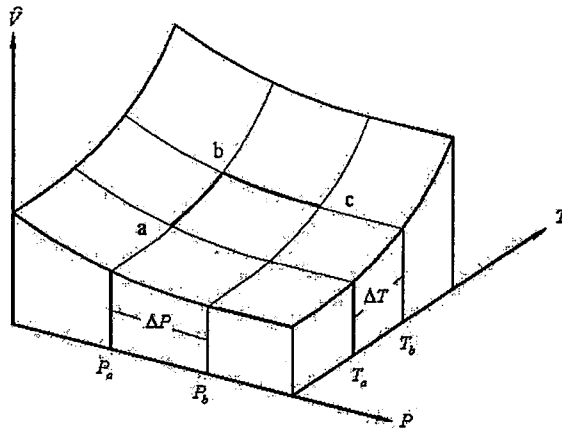
4.5.1. Basınç-hacim ve sıcaklık verilerinin kullanılması

Enjeksiyon kalıplama işleminde ergimiş polimerin kalıp boşluğuna akışının simülasyonu için, malzemelerin basınç, hacim ve sıcaklık (Pressure Volume Temperature, PVT) verilerinden elde edilebilen birkaç termodinamik özelliğe ihtiyaç duyulmaktadır (59,62,64-67,155,176). Bir hal denklemi, basınç p , özgül hacim V ve sıcaklık T olmak üzere, üç değişkenle ilişkilendirilmektedir ve herhangi bir malzeme için hal denklemi,

$$f(p, V, T) = 0 \quad [4.31]$$

olarak ifade edilmektedir. İki değişkenin bilinmesi ile, hal denklemi kullanılarak, aşağıdaki ifade gereği üçüncü değişken bulunabilmektedir (59).

$$V = g(p, T) = 0 \quad [4.32]$$



Şekil 4.10. Basınç-Özgül hacim-Sıcaklık (PVT) ilişkisi (1)

Eş. 4.32' de "g", belirli bir basınç ve belirli bir sıcaklık değerindeki özgül hacmi ifade eden fonksiyonu temsil etmektedir. Bu veri, grafiğe dönüştürüldüğünde Şekil 4.10' da görüldüğü gibi bir PVT diyagramı elde edilmektedir. Plastikler özgül hacimleri, Şekil 4.10' da görüldüğü gibi sabit basınçta, sıcaklık artışına bağlı olarak artmakta, sabit sıcaklıkta, basınç artışına bağlı olarak da azalmaktadır (1, 62, 64-67, 155, 175-177)

4.5.1.1. Sabit basınçta sıcaklığın özgül hacim üzerindeki etkisi

Sabit basınç altında tutulduğunda, sıcaklığı değişen T_a sıcaklığındaki bir malzeme ele alındığında, Şekil 4.10' daki şekilde gösterilen bu durum, a noktası ile b noktası arasındaki değişim, grafik olarak verilmiştir. T_a ' dan $T_a + \Delta T$ ' ye sıcaklık değişimi, $g(p_a, T_a + \Delta T) - g(p_a, T_a)$ kadar hacim değişimine sebep olmaktadır. Bundan dolayı, sıcaklık değişimiyle hacimde meydana gelen ortalama değişim,

$$\frac{\Delta V}{\Delta T} = \frac{g(p_a, T_a + \Delta T) - g(p_a, T_a)}{\Delta T} = \frac{V(p_a, T_a + \Delta T) - V(p_a, T_a)}{\Delta T} \quad [4.33]$$

eşitliği ile ifade edilir. $\Delta T \rightarrow 0$ için eşitliğin limiti alınır, malzemenin hacminin anlık değişimi elde edilir ve bu durum, $\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_p$ şeklinde gösterilir. Buradaki alt indis p , basıncın sabit tutulduğunu ifade etmektedir. Hacim genişleme katsayısı β , aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır:

$$\beta = \frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_p \quad [4.34]$$

Hacim genişleme katsayısı, malzemenin genişlenebilirliği olarak da adlandırılmaktadır ve birimi K^{-1} dir.

4.5.1.2. Sabit sıcaklıkta basıncın özgül hacim üzerindeki etkisi

Şekil 4.10'a göre sabit sıcaklıkta, basınç değişiminden dolayı hacimdeki değişim ele alınırsa bu durum, b ve c noktaları arasındaki değişimi kapsar. Basıncın değişimi ile hacimde meydana gelen ortalama değişim,

$$\frac{\Delta V}{\Delta p} = \frac{g(p_a + \Delta p, T_b) - g(p_a, T_b)}{\Delta p} = \frac{V(p_a + \Delta p, T_b) - V(p_a, T_b)}{\Delta p} \quad [4.35]$$

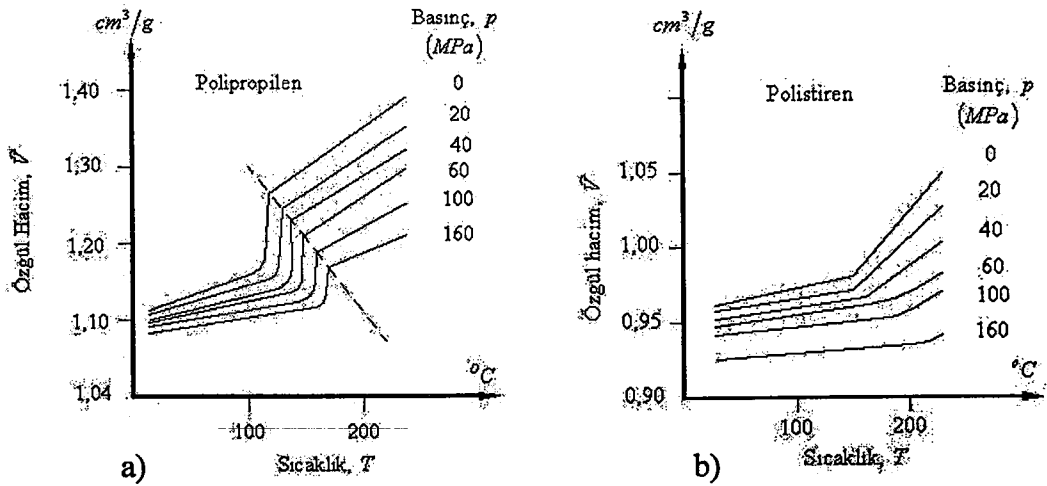
eşitliği ile ifade edilir. $\Delta p \rightarrow 0$ için eşitliğin limiti alınır, malzemenin hacmindeki anlık değişim elde edilir. Bu durum, $\left(\frac{\partial V}{\partial p}\right)_T$ ile gösterilir. Buradaki alt indis T , sıcaklığın sabit tutulduğunu ifade etmektedir. İzotermal (eş ısı) sıkıştırılabilirlik κ , aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır.

$$\kappa = -\frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial p} \right)_T \quad [4.36]$$

Özgül hacim hesaplamasında veriler, deneysel olarak elde edilmekte ve regrasyon analizi ile verilere uygun eğriler benzeştirilmektedir (1). Plastik malzemelerde PVT verileri, üç temel bölgeye ayrılmaktadır.

1. Düşük sıcaklık bölgesi
2. Geçiş sıcaklığı bölgesi
3. Yüksek sıcaklık bölgesi

Şekil 4.11’de yarı kristalli polipropilen (PP) ve amorf yapıya sahip polistiren (PS) malzemesine ait PVT ilişkisi görülmektedir.



Şekil 4.11. Yarı kristalin polipropilen ve polistiren’ e ait PVT diyagramı (59)

Şekil 4.11’de kesikli çizgi , ergiyik fazdan katı faza geçiş hattını göstermektedir. Bu kesikli çizgi ile belirtilen geçiş fazı sınırının solunda kalan eğriler katı fazı, sağında kalan eğriler ise, ergiyik fazı temsil etmektedir. Şekil 4.11’deki eğrileri oluşturan verilerin deneysel sonuçlara uydurulması için aşağıdaki eşitlikler kullanılmıştır:

- Düşük sıcaklık bölgesi için:

$$V = \frac{a_1}{a_4 + p} + \frac{a_2 T}{a_3 + p} + a_5 e^{a_6 T - a_7 p} \quad [4.37]$$

- Geçiş sıcaklığı bölgesi için:

$$p = b_1 + b_2 T \quad [4.38]$$

- Yüksek sıcaklık bölgesi için:

$$V = \frac{a_1}{a_4 + p} + \frac{a_2 T}{a_3 + p} \quad [4.39]$$

Eşitliklerdeki a_i ve b_i ’ lerin tamamı, regrasyon analizi ile belirlenmiş katsayılardır.

Plastikler yapılarından dolayı, sıcaklık ve basınç karşısında, diğer malzemelere (metaller, seramikler, ağaç vs.) göre hacimsel değişimi daha yüksek malzemelerdir. Sıcaklığın artması ile plastik malzeme genişlemektedir. Kütlesi sabit kalıp, hacminin büyümesinden dolayı, birim hacimdeki plastik malzeme yoğunluğu azalmaktadır. Benzer fakat ters ilişki olarak basınç karşısında da sıkışma olmaktadır. Plastikğin genişleme miktarı yüksek olduğundan, sıkışma miktarı da büyük olmaktadır. Bu nedenle, enjeksiyon kalıpcılığında akış analizi yapılırken, yoğunluğun sıcaklık ve basınç karşısındaki değişiminin dikkate alınması gerekmektedir. Plastiklerin yoğunluğu, molekül yapısından dolayı sıcaklık ve basıncın bir fonksiyonu olup, sıcaklığın artması ile yoğunluk azalmakta, basıncın artması ile basıncın sıkıştırma etkisinden dolayı yoğunluk artmaktadır.

Yoğunluk, malzemenin özgül hacminden elde edilmektedir (Eş. 4.40).

$$\rho = 1/V \quad [4.40]$$

Özgül hacim değerleri, her malzeme için ayrı ayrı deneyler yapılarak, sıcaklık ve basınç karşısındaki değişiminin tespit edildiği ve hem sıcaklığa bağlı hem de basınca

bağlı değişimin dikkate alındığı, çoklu regrasyon analizi ile elde edilmektedir. Ayrıca, özgül hacim değeri, yine deneysel bulgularla tespit edilen bazı parametrelere bağlı olarak, Tait eşitliğinden de elde edilebilmektedir.

4.6. Tait Eşitliği İle Yoğunluk Hesabı

Tait eşitliği, temelde deneysel bulgulara dayanan verilerle yapılan bir hesaplama yöntemidir. Tait yöntemine göre özgül hacim,

$$V = V_0(T) \left[1 - C \ln \left(1 + \frac{P}{B(T)} \right) \right] \quad [4.41]$$

Eş. 4.41' de bulunan $V_0(T)$ ve $B(T)$ değerleri camsı geçiş (T_g) sıcaklığına bağlı olarak hesaplanmaktadır (175, 176).

$$T > T_g \Rightarrow$$

$$V_0(T) = b_{1m} + b_{2m}(T - T_g) \quad [4.42]$$

$$B(T) = b_{3m} \exp[-b_{4m}(T - T_g)] \quad [4.43]$$

$$T < T_g \Rightarrow$$

$$V_0(T) = b_{1s} + b_{2s}(T - T_g) \quad [4.44]$$

$$B(T) = b_{3s} \exp[-b_{4s}(T - T_g)] \quad [4.45]$$

Eş. 4.41-Eş. 4.45' de ergimiş plastiğin sıcaklığı camsı geçiş sıcaklığından (polietilen için $T_g = 137^\circ\text{C}$) büyük ise $V_0(T)$ ve $B(T)$ değerleri b_{im} ile hesaplanır. Buradaki b değerleri, ergimiş plastiğin deneysel verileridir. $T < T_g$ olduğu durumlarda ise, b_{is} dikkate alınarak hesap yapılır. Buradaki deneysel veriler, plastik katı halde iken elde edilen değerlerdir (175, 176). Eş 4.41' deki C değeri, tüm plastikler için 0,0894 olup, sabit alınmaktadır. Basınç (p) değeri ise, özgül hacmi hesaplanacak plastiğin enjeksiyon basıncıdır.

Rodgers Tait Modeline göre Tait eşitliğinde kullanılan $V_0(T)$ ve $B(T)$ değerleri sıcaklığa bağlı olarak, 56 polimer türü için tespit edilmiştir (14). Buna göre, ısıl genleşme katsayısına bağlı olarak bulunan $V_0(T)$ değeri ve $B(T)$ Tait parametresi,

$$V_0(T) = V_0 \exp(\alpha T) \quad [4.46]$$

$$B(T) = B_0 \exp(-B_1 T) \quad [4.47]$$

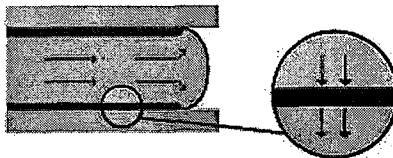
olarak yazılır. Rodgers Tait modeline göre elde edilen YYPE ve DYPE malzemelerine göre sıcaklığa bağlı $V_0(T)$ ve $B(T)$ değerleri Çizelge 4.1' de verilmiştir.

Çizelge 4.1. YYPE ve DYPE malzemeleri için Tait değerleri (176).

Polimer	$V_0(T)$	$B(T)$
YYPE	$1,1595+8,0394e-4T$	$1799\exp(-4,739e-3T)$
DYPE	$1,1944+2,841e-4T+1,872e-6T^2$	$2022\exp(-5,243e-3T)$
DYPE-A	$1,1484\exp(6,950e-4T)$	$1929\exp(-4,701e-3T)$
DYPE-B	$1,1524\exp(6,700e-4T)$	$1966\exp(-4,601e-3T)$
DYPE-C	$1,1516\exp(6,730e-4T)$	$1867\exp(-4,391e-3T)$
PET	$0,6883+5,90e-4T$	$3697\exp(-4,150e-3T)$
PS	$0,9287\exp(5,131e-4T)$	$2169\exp(-3,319e-3T)$
PC	$0,73565\exp(1,859e-5T^{3/2}), ^\circ K$	$3100\exp(-4,078e-3T)$
i-PP	$1,1606\exp(6,700e-4T)$	$1491\exp(-4,177e-3T)$
EVA18	$1,02391\exp(2,173e-5T+1,964e-6T^2), ^\circ K$	$1882\exp(-4,537e-3T)$
EVA25	$1,00416\exp(2,2449e-5T^{3/2}), ^\circ K$	$1844\exp(-4,734e-3T)$
PA6	$0,7597\exp(4,701e-4T)$	$3767\exp(-4,660e-3T)$
PA66	$0,7657\exp(6,600e-4T)$	$3164\exp(-5,040e-3T)$
SAN3	$0,9233+3,936e-4T+5,685e-7T^2$	$2398\exp(-4,376e-3T)$
SAN6	$0,9211+4,370e-4T+5,846e-7T^2$	$2269\exp(-4,286e-3T)$

4.7. Kalıp Boşluğunun Ergimiş Plastik İle Dolması

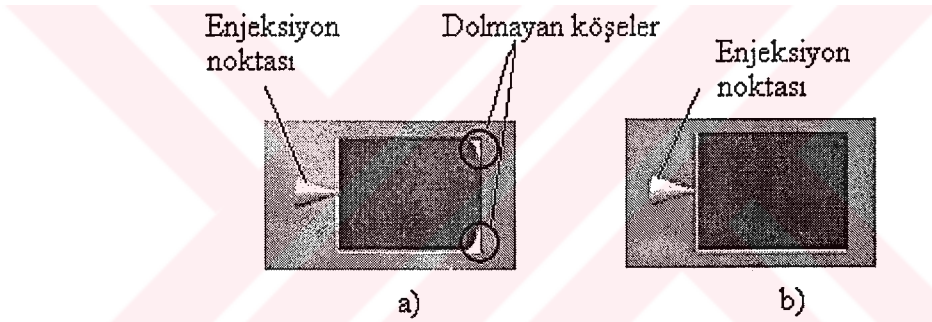
Enjeksiyonla kalıplama, dolum safhası, ütüleme (basınç altında tutuma) safhası ve geometrik boyutsal tamlığın tamamlanması safhası olmak üzere üç safhada gerçekleşmektedir (1, 3-5, 7, 9-10). Dolum safhasında, ergimiş plastik, kalıp boşluğu tamamen doluncaya kadar kalıp boşluğu içerisine enjekte edilmektedir.



Şekil 4.12. Dolum safhasında ergiyeğin ilerlemesi ve katılaştıran katman (10)

Ergimiş plastik, kalıp boşluğu içerisine akarken kalıp duvarları ile temas ettiği anda hızla soğuyup katılaşmakta ve böylece ergiyik plastik ile kalıp duvarları arasında, kesit daralmasına sebep olan katılaşmış bir katman (Şekil 4.12) oluşmaktadır.

Kalıp boşluğu içerisinde, ergimiş plastiğin akış tipine kayma ve uzama akışlarının birleşimi olan fıskiye (fountain) akışı adı verilmektedir. Fıskiye akışı veya fıskiye etkisi, sıcak polimer ergiyiğin kalıp duvarına yapışıp katılaşması sonucu meydana gelir. Bu akış tipinin, parça yüzeyindeki fiber yönelimleri ile moleküler yönelimler üzerinde doğrudan bir etkisi vardır. Bundan dolayı, üniform yüzey yönelimi ve daha kaliteli bir yüzey için kalıp boşluğunun dolumunda, sabit ergiyik akış burnu hızı kullanılmaktadır (9).



Şekil 4.13. Dolum ve ütüleme safhaları sonrası kalıp boşluğu (10)

Ütüleme safhası, kalıp boşluğu dolar dolmaz başlamaktadır. Dolum safhasında tüm boşluğun dolması gerekmesine rağmen, kalıp boşluğunun kenar ve köşe kısımları dolmaz. Kalıp boşluğunun tamamen dolması için, ütüleme safhasında bir miktar ergimiş plastik daha kalıp boşluğuna enjekte edilir. Şekil 4.13’de dolum safhasının sonu ile, ütüleme safhasının sonu, şematik olarak ifade edilmektedir.

Plastiklerin hacimsel çekmeleri (küçülme, büzülme) çok yüksektir ve ergiyik halden katı hale gelinceye kadar ortalama olarak % 25 dolayında çekme oluşmaktadır. Bu nedenle, ergimis plastiğin soğumasıyla oluşan çekmeyi gidermek ya da dengelemek için kalıp boşluğuna, kalıp boşluğunu doldurmak için gerekli olan ergimiş plastik miktarından daha fazla plastiğin enjekte edilmesi gerekmektedir. Bu süreç dengeleme safhası olarak adlandırılmaktadır (10).

5. MATERYAL VE METOD

Üretilen plastik parçaların boyut tamlığı, kalitesi, estetik görünümü ve mekanik özellikleri ve akış üzerinde etkili olan enjeksiyon parametrelerinin en uygun değerlerinin seçimi ile kontrol altına alınabilmektedir. Ergimiş plastiğin kalıp boşluğunu doldurması sırasındaki akış tipi, ürünün mekanik, estetik gibi bir çok özelliğini doğrudan etkilediğinden, enjeksiyon parametrelerinin akışa etkilerinin önceden bilinmesi gerekmektedir.

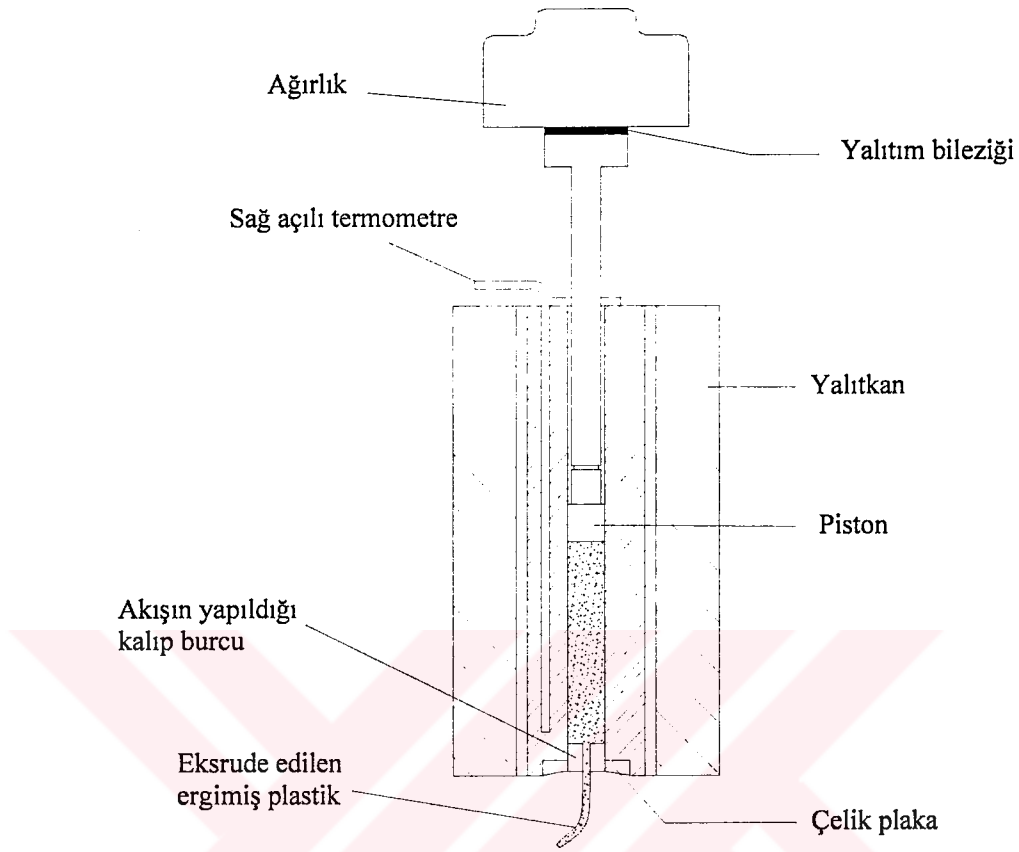
Plastiğin kalıp içerisindeki davranışlarını tespit etmek için yapılan akış analizi için plastik malzemeye ait bir takım akış parametrelerinin bilinmesi gerekmektedir. Bu bilgilerin hammadde üreticileri tarafından hazırlanan kataloglardan temin edilmesi genellikle yeterli olmamaktadır. Ayrıca, akış üzerinde en önemli etkiye sahip viskozitenin teorik olarak hesaplanması sırasında, bazı sabit sayılara ve bağıntılara ihtiyaç duyulmaktadır. Hammadde üretimi sırasında en ufak bir çevre şartı değişiminde bile fiziksel ve kimyasal özellikleri değişen plastik malzemeler için, genel olarak verilen değerlerin kullanılması yanılgılara sebep olmaktadır. Bu nedenle, en doğru akış analizinin yapılabilmesi için, her malzemenin bazı reolojik değerlerinin deneysel olarak tespit edilmesi gerekmektedir.

Bir çok akış analizi yapan yazılımlarda kapalı olarak verilen viskozite değişiminin bu çalışma kapsamında deneysel olarak incelemesi yapılmıştır. Farklı basınç ve sıcaklıklarda nasıl bir viskozite değişiminin olduğu bir malzeme türü için elde edilmiştir. Doktora çalışması kapsamında kullanılan PETKİM ürünü Yüksek Yoğunluklu Polietilen (I 668) malzemesinin bazı fiziksel ve akış özelliklerinin belirlenmesi için, Ergiyik Akış İndeksi (EAI, MFI) cihazı ile reolojik özellikler tespit edilmiştir. Ayrıca, ergimiş plastiklerin kalıp boşluğu içerisindeki akışını gözlemlemek için bir enjeksiyon kalıbını ihtiva eden deney seti hazırlanmıştır.

5.1. Yüksek Yoğunluklu Polietilen Malzemesinin Ergiyik Akış İndeksi Cihazı İle Bazı Reolojik Özelliklerinin Belirlenmesi

Endüstride ve pratikte plastik malzemelerin akış özelliklerinin belirlenmesinde en basit ve en sık başvurulanan yöntem, *Ergiyik Akış İndeksi*-EAİ testidir (183, 196, 197, 205, 231, 232). Basit olmakla birlikte, hem uygulanmasının kolaylığı hem de pratik oluşu sebebiyle, plastik malzemelerin sınıflandırılması ve tanımlanmasında sıklıkla kullanılan bir yöntemdir. EAİ değeri, özellikle plastik hammadde üreticileri tarafından plastiklerin fiziksel, kimyasal ve termomekanik özellikleri belirlenirken veya katalog oluşturulurken yoğunluktan sonra verilen en önemli akış özelliği olmuştur (183, 235). EAİ değeri, plastik malzemenin reolojik özellikleri hakkında ilk bakılacak özelliklerden olup, tek başına değerlendirilmesi yeterli değildir. Bu değer sadece, akışkanlık hakkında ön bilgi vermekte olup, malzemenin akış oranının düzenliliğini ölçmede birincil olarak kullanılmaktadır (178,183).

Ergiyik akış indeksi genellikle ergiyik akış oranı olarak bilinir. EAİ testi, önerilen sıcaklık ve yükleme koşulları altında özel olarak belirlenmiş uzunluk ve kesitlerden geçen, plastik malzemenin kütsel veya hacimsel miktarını ölçmektedir. Ergiyik akış indeksi, polimerin farklı sınıflara ayrılmasına da yardımcı olmaktadır (178, 234, 237). Termoplastikler için test standardı, ASTM D1238 ve TSE 1323 ile tanımlanmıştır (233, 234). Şekil 5.1’de EAİ test cihazı şematize edilmiştir.



Şekil 5.1. ASTM D1238 ve TSE 1323 standardına göre yapılan EAİ testi şematik resmi (233, 234)

ASTM D1238 ve TSE 1323 standardına göre yapılan testi, belirli sıcaklık ve yük altında kapiler reometre olarak tanımlanan silindir içerisinde ergimiş plastiğin 10 dakikada ekstrude edilmesidir. EAİ test cihazında, içerisinde plastik malzemenin ergitildiği ve etrafı yalıtılmış 9,5504 mm ($\pm 0,0076$) çapında, 162 mm yüksekliğinde ve 200 °C’ de 60-65 RC sertliğini koruyabilecek özellikte, SAE 52100 malzemesinden üretilmiş bir silindir, silindire uygun toleransla geçen ve üzerine yük konabilen bir piston, ısıtma sistemi, ölçü aletleri ve kalıp burcundan oluşmaktadır. Silindir içerisine yerleştirilen ve ergimiş plastiğin içerisinde akıtıldığı 2,095 mm ($\pm 0,0051$) çapında ve 8 mm ($\pm 0,025$) yüksekliğindeki tungsten karbürden yapılmış bir burç kullanılmaktadır. Bu testte granül haldeki plastik malzeme piston silindirine konduktan sonra 6-8 dakika bekletilmekte ve bu sürede silindir içerisindeki ergiyen plastik, piston üzerinde konulan ağırlık (bu ağırlıkta piston ağırlığı da dikkate alınmaktadır) yardımı ile kalıp burcundan ekstrude edilmektedir. EAİ değeri, 10

dakikada akan plastiğin kütleli (gr/10 dak) veya hacimsel (cm³/10 dak) akma miktarı olarak tanımlamaktadır (64-67, 155, 183).

EAİ testleri ASTM standardına göre, Test A ve Test B olmak üzere iki farklı şekilde yapılmaktadır. Kesme yöntemi olarak da bilinen Test A yönteminde, kalıp ağzında akan plastik belirli zaman aralıklarında kesilip tartılarak EAİ değeri ölçülebilmektedir. Test B yönteminde ise, sistem tamamen bilgisayar kontrolünde olup, pistonun belirlenen yük altındaki ilerlemesi yer değiştirme transduseri (displacement transducer) vasıtasıyla ölçülmekte ve 10 dakikada akan miktar, yazılımlar vasıtasıyla tespit edilmektedir. Bu yöntemin avantajı, kesme metodunda görülen ve kesme sırasındaki hataların azaltılması ve insan faktörünün devre dışı bırakılması olmuştur. Ayrıca, kalıp ağzında akan ergimiş plastik malzemenin başka ekipmanlara gerek kalmadan, hacimsel değer olarak da bulunması sağlanmaktadır. EAİ değeri, Eş. 5.1' deki formülle hesaplanmaktadır.

$$EAİ = (426 \times L \times \rho) / t \quad [5.1]$$

Burada,

L = Kalibrelenmiş piston kursunun uzunluğu, mm

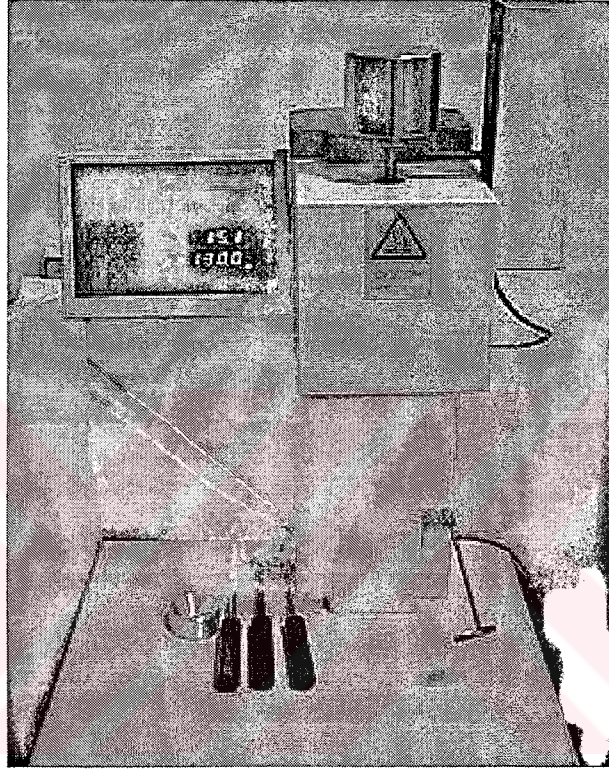
ρ = Test sıcaklığındaki reçinenin özkütlesi, gr/cm³

t = Piston kurs hareketinin zamanı, s ' dir.

5.2. EAİ Testinin Yapılışı

Çalışma kapsamında kullanılan EAİ test cihazı, Şekil 5.2' de görüldüğü gibi Davenport marka test cihazı olup, bilgisayar kontrollüdür. Ayrıca, ısıtıcı sistem 0,1 °C hassasiyetindedir. Cihaz hem elle hem de bilgisayardan kumanda edilebilmektedir. EAİ deneyleri kesme yöntemine göre yapıldığında, cihaza elle kumanda edilebilmektedir. B tipi test uygulandığında ise, sadece plastik malzeme yüklemesi elle yapılmakta olup, geriye kalan tüm işlemler Nexygen Davenport yazılımı desteği ile bilgisayar kontrollü olarak yönetilmektedir. Gerçekleştirilen

Çalışma kapsamında yapılan EAİ deneyleri B tipi test olup, tamamen bilgisayar destekli yapılmıştır. EAİ deney cihazındaki akış ağız kalıbı safirden, plastik malzemenin ergitildiğı silindir ise, polimerlerle kimyasal reaksiyona girmeyen ve korozyon etkisi oluşturmeyen malzemeden üretilmektedir.



Şekil 5.2. Bilgisayar kontrollü EAİ deney cihazı

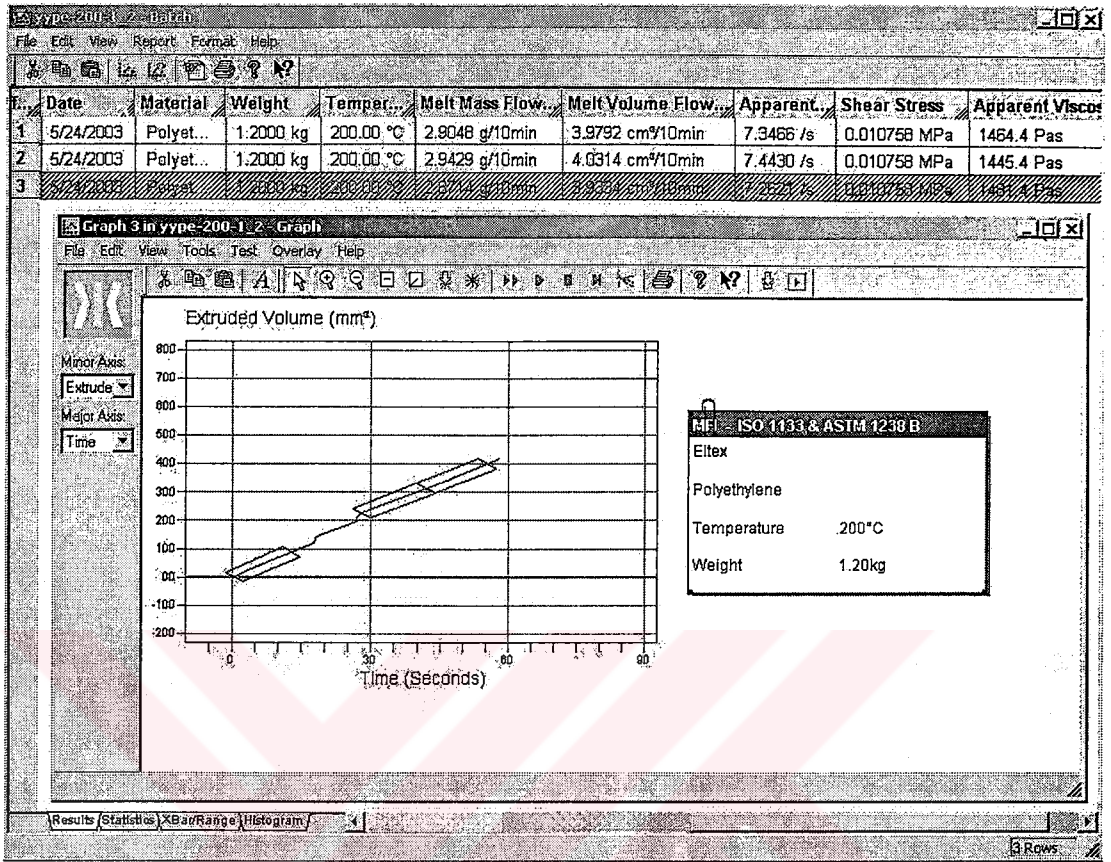
Granül haldeki YYPE malzemesi, standardına uygun olarak (standart değeri 3-8 gr arasında olup, bu çalışmada 5 gr kullanılmıştır), özel huni yardımı ile silindire doldurulmaktadır. Kademeli olarak doldurulan plastik malzeme, özel bir baskı aparatı ile silindir içerisinde sıkıştırılarak arada kalan boşluklar en aza indirilmektedir. Üzerine ağırlık konulan piston, özel bölüntülere ayrılmış olup, bölüntünün ilk kademesine kadar olan seviyeye kadar tampon aleti ile sabitlenmektedir. ASTM D 1238 ve TSE'1323' e göre akış özelliklerinin sağlıklı olarak ölçülebilmesi için plastik malzeme, ısıtıcılar vasıtasıyla 6 dakika süresince ısıtılıp, ayarlanan sıcaklıkta bekletilmektedir. Bekleme süresi sırasında, silindire konulan fazla malzeme piston üzerine konulan ağırlık yardımı ile kalıp ağzından akmakta ve böylece piston ilk bölüntü hizasına gelerek deneye başlama noktası

sürekli sabit tutulmaktadır. Tampon kaldırıldığında ağırlık vasıtasıyla piston aşağı doğru inerek, ergimiş plastiği 2,095 mm çapındaki kalıp ağzından dışarı atmaktadır. EAI değeri 10 dakikada dışarı atılan malzemenin ağırlığına eşit olarak elde edilmektedir.

10 dakikada ekstrüde edilerek dışarı atılan malzemenin miktarını tespit edebilmek amacıyla deney cihazına monte edilmiş AFRT olarak tanımlanan yer değiştirme transduseri kullanılmaktadır. Yer değiştirme transduseri, pistonu sabitlenmekte ve pistonun hareketini zamana bağlı olarak tespit edilmektedir. Bilgisayar kontrollü olarak yapılan deneylerde, Nexygen Davenport yazılımıyla, Şekil 5.3' de görüldüğü gibi piston hareketi üzerinde üç değer okunmaktadır. Böylece, her bir deneyde üç değer okunarak bu üç değerın aritmetik ortalaması alınmaktadır.

Bilgisayar kontrollü deneyde pistonun hareketinin doğrusal bir şekilde değişmesi gerekmektedir. Silindir içerisinde plastik malzeme yüklemesi sırasında, yeterli sıkıştırma yapılmadığı takdirde, ergiyik içerisinde hava kabarcıkları kalmaktadır. Bu da, ergimiş malzemenin ekstrüzyonu esnasında piston, hava kabarcığının bulunduğu noktaya geldiğinde, aniden aşağı ineceği için okunan değerler de hataya yol açmaktadır. Davenport yazılımı, birim zamandaki piston yer değiştirme miktarının kontrolünde, aniden inen bölgeleri dikkate almamaktadır. Böylece, kesme tipi test yönteminde ciddi hatalara yol açan hava kabarcıklarının etkisi yok edilmektedir. Ayrıca, her deneyde okunan üç değer arasındaki fark % 15' i geçtiğinde, Nexygen Davenport yazılımı deneyi iptal edip sonuçları geçersiz saymaktadır.

Deneylerde 165,4 Pa (1,2 kg), 298,2 Pa (2,16 kg), 524 Pa (3,8), 689,5 Pa (5 kg), 987,36 Pa (7,16 kg), 13799 Pa (10kg), 1546,4 Pa (11,2 kg) ve 1677,86 Pa (12,16 kg) olmak üzere toplam 8 farklı basınç, 180 °C, 190 °C, 195 °C 200 °C, 205 °C, 210 °C, 215 °C, 220 °C, 225 °C ve 230 °C olmak üzere 10 farklı sıcaklık kullanılmıştır. Her yük için 10 farklı sıcaklık altındaki EAI değeri tespit edilmiş ve her bir deney üç defa tekrarlanmıştır. Her deneyde 3 değer okunduğundan, her şart için 9 değerın aritmetik ortalaması alınmış olmaktadır.



Şekil 5.3. Nexygen Davenport yazılımı ile yapılan EAİ deneylerinde, yazılım ekran görüntüsü

Davenport yazılımı EAİ değerini hem kütsel hem de hacimsel olarak vermektedir. Ayrıca, viskozite değerini, kayma hızını ve kayma gerilmesini de vermektedir. Böylece, EAİ' nin viskozite ve kayma hızı, sıcaklık ve basınç karşısındaki değişimleri tespit edilebilmektedir. Deneyisel bulgular neticesinde, YYPE' nin, kayma hızı-kayma gerilmesi grafiğinden *Üs Yasası Sabitini* (n), viskozitenin doğal logaritması ($\ln$ (viskozite)) – ($1/T$) grafiğinden *Aktivasyon Enerjisi* (E_a) değerleri elde edilmektedir.

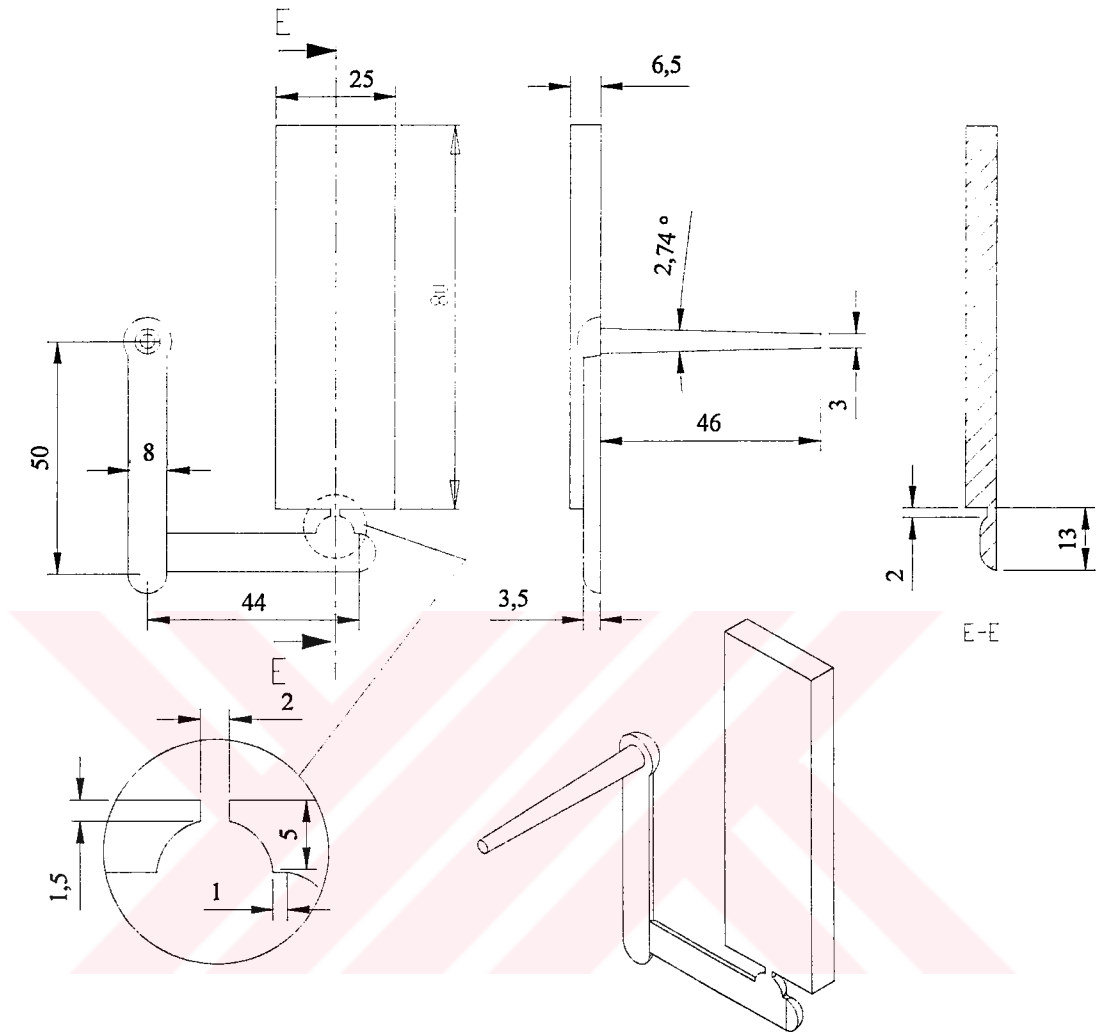
5.3. Ergimiş Plastiğin Kalıp Boşluğundaki Gerçek Akışının Deneyisel Olarak Gözlenmesi İçin Deney Setinin Tasarımı ve Üretimi

Teorik olarak yapılan analizler ve simülasyonlar, belirli kabuller ve ihmaller neticesinde elde edilip yapılmaktadır. Denklemlerin kolay çözümlenebilmesi için

yapılan bu kabuller ve ihmaller, akış analizlerinde bir takım sapmalara ve hatalara sebep olmaktadır. Sayısal çözümleme yöntemlerinin karakteristik özelliklerinden biri olan kesme hataları ve iterasyonlar neticesinde var olan en küçük hata, kendinden sonraki tüm değerler içinde geçerli olduğundan sonucu etkilemektedir. Ayrıca, teorik analizlerde, sıcaklık, basınç gibi akış parametrelerinin giriş değerleri, gerçeği her zaman yansıtmamaktadır. Yukarıda sayılan ve daha bir çok nedenlerden dolayı, ergimiş plastiğin kalıp boşluğundaki gerçek akışı ile, simülasyon programları ve sayısal analizlerden elde edilen akış simülasyonları bazen farklı olmaktadır. Gerçekleştirilen bu doktora çalışmasında elde edilen akış görüntülerinin doğruluğunu tespit edebilmek için, bir tarafına cam plaka yerleştirilmiş enjeksiyon kalıbı tasarlanmış ve üretimi gerçekleştirilmiştir.

5.3.1. Parça geometrisi

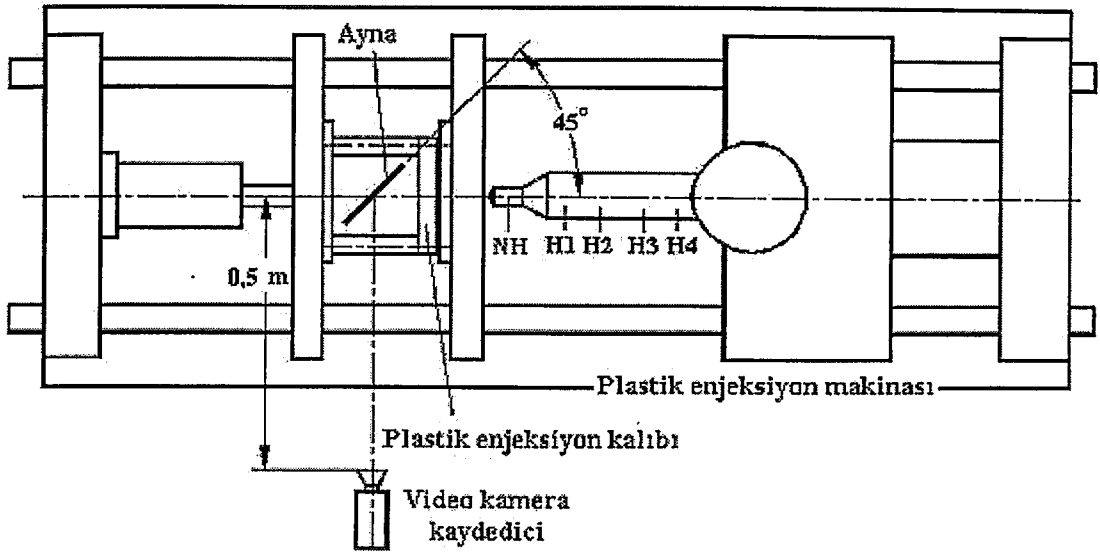
Bazı enjeksiyon parametrelerinin ergimiş plastik akışını nasıl etkilediğini ve kalıp boşluğunu nasıl dolduğunu incelemek amacıyla, Şekil 5.4' de görülen kalıp boşluğu geometrisi seçilmiştir. En büyük ölçüleri 25x80 mm olan dikdörtgen şeklindeki parça, 6 mm kalınlığında yapılmış olup, akış iki boyutlu olarak incelenmiştir. Ergimiş plastiğin, dağıtıcı kanallardan kalıp boşluğuna geçişi için, 2,5 mm genişliğe ve 2 mm derinliğine sahip 1,5 mm uzunluğundaki standart giriş tipi kullanılmıştır. Dağıtıcı kanallar, 8 mm' lik konik küresel uçlu parmak freze çakısıyla 3,5 mm derinlikte oluşturulmuştur (Şekil 5.4). Kesit alanı $21,2 \text{ mm}^2$ olan dağıtıcı kanallar, düzeltilmiş yarım daireye yakın bir profilde olup, ergimiş plastiğin akışını en az etkileyecek bir profildir.



Şekil 5.4. Parça geometrisi ve boyutları

5.3.2. Kalıp tasarımı ve üretimi

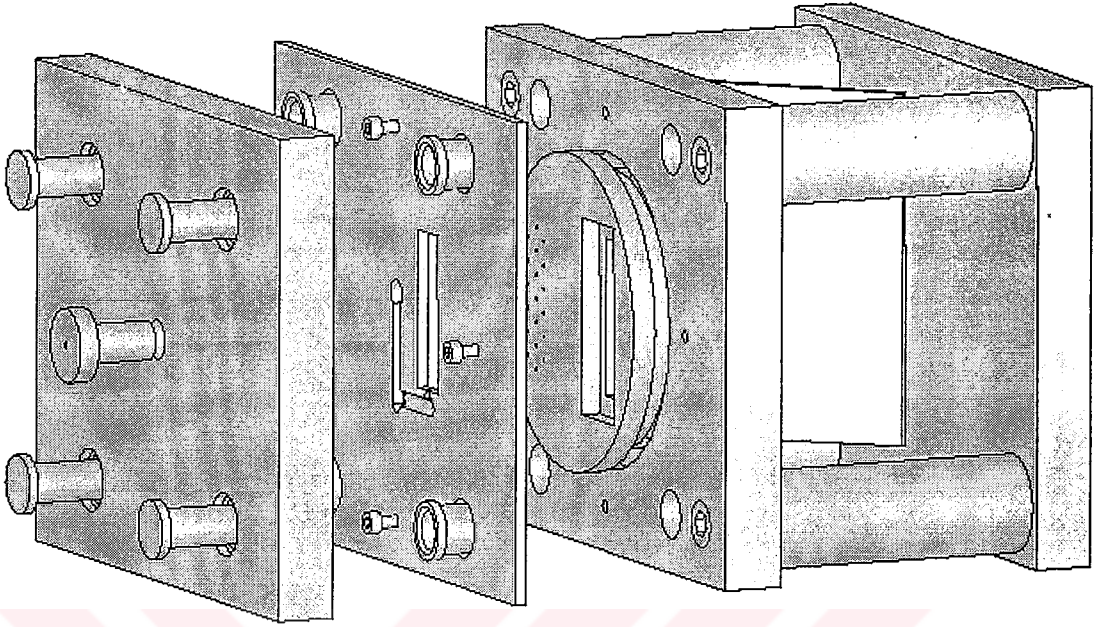
Şekil 5.5' de şematik görünüşü verilen deney düzeneği tasarlanmış ve üretimi gerçekleştirilmiştir. Kalıp boşluğunun bir tarafı, 42 x 102 mm ebatlarında 10,5 mm derinliğinde boşaltılmış ve bu boşluğa da temperlenmiş 10 mm kalınlığındaki cam plaka yerleştirilmiştir. Camın enjeksiyon basıncı ve mengene kapanma kuvveti ile metal plakalar arasında sıkışıp kırılmasını önlemek amacıyla Klingirit conta kullanılmıştır. Ergimiş plastiğin kalıp boşluğunu doldurması ve akışın görüntülenebilmesi için deney düzeneğinde camın bulunduğu tarafa 45° açılı düz ayna yerleştirilmiştir.



Şekil 5.5. Deney düzeneğinin şematik görünüşü

Kalıp boşluğunda akış burnu oluşumunun görüntülenebilmesi için yüksek çözünürlüklü Canon MV5i markalı dijital video kamera kaydedici cihaz kullanılmıştır. Şekil 5.5’ de görüldüğü gibi, aynaya 45° ve kalıp boşluğuna dik olarak yerleştirilen video kamera kayıt cihazı ile, kalıp boşluğundan aynaya yansıyan görüntüler kaydedilmiştir.

Üç boyutlu katı model görüntüsü Şekil 5.6’ da verilen plastik enjeksiyon kalıbı, Ç1050 malzemesinden imal edilmiştir. Dişi kalıp 6 mm kalınlığında ve 240 x 240 mm ebatlarında Ç 1020 plakadan olup, kalıp boşluğunu oluşturan profil 1 μ m hassasiyetinde tel erozyon tezgahında üretilmiştir. Yolluk burcu da, girişte 3 mm çapında, 46 mm boyunda, $2,74^\circ$ açılı olacak şekilde ve Ç1.2080 çelik malzemedan tel erozyon tezgahında üretilmiştir.



Şekil 5.6. Deneyde kullanılmak üzere imal edilen plastik enjeksiyon kalıbı

Kalıp alt ve üst plakaları, 30 mm kalınlığında Ç1050 malzemesi kullanılarak üretilmiş ve taşlanmıştır. Kalıp üst plakasının kapanma yüzeyi (kalıp boşluğunun kapalı kısmına gelen yüzey) sırasıyla, 600-800-1000 ve 1200 taneli zımpara ile parlatılarak yüzey kalitesi artırılmıştır. Kalıp sıcaklığı, kalıp alt plakası üzerine yerleştirilen bir adet termometre ile kontrol edilmiş ve kalıp sıcaklığı ortalama 40°C (+/-2°C) değerinde tutulmuştur. Gözlem aynası (düz ayna) istenilen açıda ayarlanabilen bir destek üzerine oturtularak kalıp setine yerleştirilmiştir. Aynaya 45° konumlu ve aynadan 0,5 m uzaklıkta yerleştirilen video kamera kayıt cihazı, kalıp setine 45° açıyla yerleştirilen düz aynaya yansıyan görüntüleri alıp kaydedilebilmektedir.

5.3.3. Deneylerin Yapılışı

Kalıp seti üretilip montajı yapıldıktan sonra, enjeksiyon tezgahına bağlanmıştır. Deneyler, DKLEQUEN HEMIDY-110-MULTI PROCESSOR marka bilgisayar kontrollü, 225 gr plastik enjeksiyon kapasiteli enjeksiyon tezgahı ile yapılmıştır. Deneylerin yapıldığı bu enjeksiyon tezgahı, 110 MPa mengene kapama kuvvetine, 220 MPa enjeksiyon basıncına, 115 mm/s enjeksiyon hızına sahiptir. Dördü

enjeksiyon silindirinde ve biri de enjeksiyon nozulunda (NH) olmak üzere, toplam beş adet ısıtma bölgesi (H1, H2, H3, H4, H5) bulunmaktadır. Plastik enjeksiyon tezgahının 1' inci, 2' inci, 3' üncü ve 4' üncü ısıtma bölgelerindeki ve nozul çıkışındaki sıcaklık değerleri sırasıyla 210 °C, 215 °C, 220 °C, 220 °C ve 220 °C olarak ayarlanmıştır.

5.4. Video Kamera İle Görüntülerin Kaydedilmesi

Kayıt sırasında kamera ve ayna arasındaki mesafe 0,5 m olarak ayarlanmış ve 1,7x lens ile optik büyütme ve dijital olarak ayarlanabilen 200x yakınlaştırma (zoom) kullanılarak çekim yapılmıştır. Video kamera ile kaydedilen hareketli görüntülerden fotoğraf elde edilebilmesi için, Delphi 6.0 programlama dili ile bir Video Capture adlı program yazılmıştır. Bu programın yazılımında “.avi” veya “.mpeg” formatındaki hareketli görüntülerdeki resimler (frame) tespit edilmiştir. Hareketli görüntü, belirli limitte form üzerinde oynatılmış ve form üzerindeki “visible” özelliği “false” yapılmış olan bir “image” nesnesine “copyrect” komutu ile o andaki gösterilen kare kopyalanmıştır. Kopyalanan resimler, “save to file” komutu ile açılan klasöre “.bmp” ve “.jpg” uzantılı olarak kaydedilmiştir.

6. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA

Enjeksiyon yöntemi ile plastik parça üretimi, toplam plastik parça üretiminin yaklaşık 1/3' ünü kapsadığından, enjeksiyon yöntemi bir çok araştırmacı tarafından inceleme konusu olmuştur. Plastikler, katkı maddeleri, plastikleştiriciler ve dolgu malzemeleri gibi bileşenlerin polimerlere katılmaları ile elde edilmektedirler. Temel yapı taşı monomer olan polimerler, üretim yöntemleri ve üretim şartlarına göre aynı malzemedен olmalarına rağmen, farklı özelliklere sahip olabilmektedirler.

Plastikler, viskoelastik malzemeler olduklarından, uygulanan yük karşısında sergiledikleri deformasyon davranışları, yapıları gereği hem katılara hem de sıvılara ait özellikleri içermektedir. Birçok plastik türü ve oda sıcaklığında katı halde olan termoplastikler, talaş kaldırma yöntemlerinin dışında bir yöntemle şekillendirildiklerinde, belirli basınç altında ısıtılıp ergitilmeleri gerekmektedir. Ergimiş plastikler, akmaya karşı zorlandıklarında ilk önce elastik özellik göstermekte, artan kuvvet karşısında ise akmaya başlayarak şekil değiştirmektedirler.

Plastik malzemeler, türüne göre değeri değişen ve camsı geçiş sıcaklığı denilen belirli bir sıcaklığa kadar katı fazda olup akma davranışı sergilemezler. Sıcaklığı artan plastikler ergime noktasına ulaştıklarında tamamen sıvı, ergime noktası ile camsı geçiş noktası arasında hem sıvı hem de katı özellikler göstermektedir. Çok büyük moleküllü ve doğrusal zincirler şeklinde teşekkül etmiş olan plastik malzemeler ısıtıldıklarında, moleküller arasındaki bağ kuvveti zayıfladığından akma işlemi kolaylaşmaktadır.

Katmanların birbirleri üzerinde kayması şeklinde gerçekleşen akış, doğrusal zincirler birbirlerine dolandıklarında daha zor gerçekleşmektedir. Bazı plastik türlerinde doğrusal ve uzun moleküllü zincirler, akma yönünde yönlendirildiklerinde iç sürtünme azalmakta ve buna bağlı olarak da akmaya karşı olan direnç de azalmaktadır. Özellikle kayma hızının artışıyla görülen bu durum, kayma incelenmesi olarak bilinmektedir. Plastiklerin enjeksiyon yöntemiyle üretilmeleri sırasında

genellikle yüksek kayma hızları olduğundan, kalıp boşluğundaki akış analizi yapılırken çok önemli olan bu özellik dikkate alınmalıdır.

Çalışma kapsamında tüm plastiklerin genellenip değerlendirilmesi mümkün olmadığından sadece YYPE (Pektim ürünü, I 668) malzemesi ele alınıp, çalışma materyali olarak değerlendirilmiştir. Ticari kayıtlar açısından YYPE malzemesine ait özelliklere bakıldığında, üreticilerine göre yüzlerce farklı türüyle karşılaşılmakta ve yoğunluk değerleri $0,7-1,1 \text{ kg/dm}^3$ aralığında değişme göstermektedir. YYPE' nin yoğunluk değişim aralığının bu derece geniş olması, kıyaslamaya dayalı çalışmalarda zorluk teşkil etmektedir.

Plastiklerin üretici firmaları tarafından verilen yoğunluk ile ilgili en önemli verilerden biri, akış davranış sabiti olarak da adlandırılan Ergiyik Akış İndeksi (EAI)' dir. Ergimiş haldeki YYPE malzemesinin akıcılığı hakkında ilk ve ön bilgi vermesi bakımından oldukça önemli olan EAI değeri, bu çalışma kapsamında deneysel olarak incelenmiştir. Akış analizi yazılımlarında kullanılan viskozite gibi bazı akış parametreleri, EAI değerine göre hesaplanmaktadır. Bu nedenle, EAI değerlerinin belirlenebilmesi için, EAI, viskozite, kayma hızı ve kayma gerilmesi arasındaki ilişkiler EAI testine dayalı olarak tespit edilmiştir. Bu bağlamda, YYPE I-668 malzemesinin akış özelliklerinin belirlenmesi için ergiyik akış indeksi cihazı ile ASTM D1238 ve TSE 1323' e uygun olarak deneysel veri toplama işlemi uygulanmıştır.

6.1. Ergiyik Akış İndeksi değerlerinin deneysel olarak belirlenmesi

Gerçekleştirilen bu çalışmada, YYPE I-668 nin akıcılık özellikleri deneysel olarak incelenerek tespit edilmiştir. Ergiyik akış özelliklerinin araştırıldığı bu safhada, EAI' nin sıcaklık, basınç, kayma hızı, ve kayma gerilmesi karşısındaki değişimleri tespit edilmiştir. Ayrıca, matematiksel modellemede viskozitenin sıcaklık ve basınç karşısındaki değişimini belirlemek için kullanılan ve bir çok viskozite modellerinde bulunan Akış indeksi değeri (n) ve Aktivasyon enerjisi (E_a) değerleri de tespit edilmiştir.

Ergiyik akış indeksi cihazı ile yapılan ve akıcılığın araştırıldığı deneysel incelemede, 180-230 °C arasında 10 farklı sıcaklık, 1,2 - 12,16 kg arasında 8 farklı ağırlık kullanılmıştır. Çizelge 6.1’ de görüldüğü gibi, her sıcaklık için ağırlıklar değiştirilerek reolojik inceleme yapılmıştır. Yapılan deneylerde elde edilen değerler, hammadde üretici firmasının YYPE I-668 malzemesi için (190 °C de ve 2,16 kg ağırlık için) yayımladığı değerler aralığında (EK 14) kaldığı tespit edilmiştir. Kütsel akış hızı olarak, gr/10 dk cinsinden alınan EAI değerlerinin, sıcaklığın ve basıncın artması ile arttığı literatüre uygun olarak tespit edilmiştir (230 – 232).

Çizelge 6.1. Farklı yükler altında elde edilen EAI - sıcaklık değişimi değerleri

		Uygulanan Yükler							
		1,2 kg (165,4 Pa)	2,16 kg (298,2 Pa)	3,8 kg (524 Pa)	5 kg (689,5 Pa)	7,16 kg (987,4 Pa)	10 kg (1379 Pa)	11,2 kg (1545 Pa)	12,16 kg (1678 Pa)
Sıcaklıklar °C	180	2,670712	5,440934	12,84633	19,47326	32,05242	56,40536	68,53634	93,24357
	190	3,185494	6,461486	15,29343	23,02388	38,91747	67,28955	81,85021	108,7258
	195	3,564757	7,546818	16,82868	24,94826	41,66659	72,26604	87,05224	119,6835
	200	3,853898	8,194410	17,98641	27,63737	45,54150	80,81638	96,96456	127,8050
	205	4,313698	8,939190	19,20512	29,47560	49,50642	88,64460	105,0667	140,0309
	210	4,456769	9,600334	20,69100	31,85494	54,66102	92,97930	130,9510	154,4734
	215	4,782888	10,23660	22,44308	34,22461	57,11297	101,1560	138,0271	165,3828
	220	5,006206	10,87161	24,46330	36,71914	60,94722	106,9930	144,7354	174,2303
	225	5,055670	11,16685	25,89884	38,51769	63,58598	110,8747	152,2470	183,0391
	230	5,398246	12,24714	27,12723	39,62702	67,84518	122,0358	169,3516	211,9920

EK 1’ de verilen ve EAI-Sıcaklık değişimini gösteren grafikte de görüldüğü gibi EAI, sıcaklık arttıkça doğrusal olarak artmaktadır. EAI-sıcaklık değişimi için elde edilen grafiklerde eğri benzeştirme yöntemi ile elde edilen doğrusal çizginin denklemi, Eş. 6.1’ de verilmiştir. Eş. 6.1’ de verilen doğru denklemiindeki A_0 ve A_1 katsayıları, değişik basınçlar için farklı değerler almakta olup, sayısal değerleri EK 1’ de verilmiştir.

$$EAI = A_0 + A_1 T \quad (6.1)$$

EAI-sıcaklık değişimine ait denklemdeki katsayılar, R^2 nin 0,97 ve daha büyük korelasyon katsayısına sahip eğri benzeştirme ile elde edilmiş olup, kabul edilebilir hassaslıktadır. Deneysel olarak incelenen YYPE malzemesinin EAI değeri, farklı basınçlar için sıcaklık karşısındaki değişimi bir bağıntı ile temsil edilmekte olup, bu

bağıntıdaki katsayılar değişik basınç için, farklı olmaktadır. Sayısal olarak akış analizi yapan yazılımlarda (Moldflow), bu katsayılara bağlı olarak istenilen sıcaklıktaki $EA\dot{I}$ değeri hesaplanabilmektedir.

Sıcaklık artışı, moleküller arasındaki bağ kuvvetini zayıflattığından, ergimiş plastiğin akmaya karşı gösterdiği direnç azalmaktadır. Artan sıcaklıkla beraber, iç enerjisi artan ergimiş plastik, daha akıcı hale gelmektedir. İç enerjisi artan ve viskozitesi azalan ergiyiğin artan sıcaklığa bağlı olarak $EA\dot{I}$ değeri doğrusal olarak artmaktadır. Bu çalışma kapsamında $EA\dot{I}$ ile ilgili yapılan deneysel çalışmada, sıcaklık artışına bağlı olarak kayma hızının da arttığı tespit edilmiştir. $EA\dot{I}$ -kayma hızı arasındaki bu ilişki, sıcaklık artışının ergimiş plastiğin deforme olmasını kolaylaştırdığından kaynaklandığı düşünülmektedir. Bundan dolayıdır ki, ergimiş plastik malzemelerin kalıp boşluğunda ilerlemesi sırasında, artan sıcaklığa bağlı olarak daha kolay aktığı bilinmektedir.

Ayrıca, ergimiş plastiğin sabit basınç altında sıcaklık artışına bağlı olarak kayma hızı da artmaktadır. Böylece, ince kesitli plastik parçaların üretiminde, ince detayların doldurulması veya girişten uzak bölgelerin daha az basınç ile doldurulabilmesi mümkün olmaktadır. Ergimiş plastiğin kalıp boşluğuna yüksek basınçla enjeksiyonu ve boşluk dolduktan sonraki tutma basınçları safhasında uygulanan basıncın da fazla olması, kalıplama sonrası ürün üzerinde kalıcı şekil bozukluklarına sebep olmaktadır. Kalıplanan ürünün kalitesini ve geometrik yapısını etkileyen bu istenmeyen durumun ortadan kaldırılabilmesi veya en aza indirilebilmesi, sıcaklığın en uygun değere ayarlanması ile mümkün olabilmektedir.

EK 2 de görüldüğü gibi $EA\dot{I}$ ' nin basınç karşısındaki değişimi parabolik eğri şeklindedir. $EA\dot{I}$ değeri, artan basınca bağlı olarak ikinci dereceden artan bir fonksiyon şeklindedir. Çizilen grafiklerden eğri benzeştirme yöntemi ile elde edilen parabolün denklemi Eş. 6.2' de verilmiştir. $EA\dot{I}$ ' nin basınç karşısındaki değişimi ikinci dereceden bir denklem olup, EK 2' de verilen B_0 , B_1 ve B_2 katsayıları ile hesaplanmaktadır. Deneysel olarak bulunan bu katsayılar, farklı sıcaklıklar için sabit olmayıp, her sıcaklık için değişik değerlere sahip oldukları tespit edilmiştir.

$$EAI = B_0 + B_1 p + B_2 p^2 \quad (6.2)$$

Ergimiş plastiğin akışkanlığı üzerinde, basıncın etkisi de en az sıcaklık artışı kadar önemlidir. Artan sıcaklık, plastik molekülleri arasındaki bağ kuvvetlerinin zayıflamasına sebep olduğundan, ergiyik daha akıcı hale gelirken, basınç ise deformasyon üzerinde büyük bir etki yapmaktadır. Katı cisimlerde, elastik deformasyon sınırına kadar olan deformasyonlar tersinir olup, uygulanan yük kalktığında katı cisimler tekrar eski şekillerine geri dönmektedir. Sıvıların ise, üzerlerine uygulanan yük karşısında akmaya başladığı görülmektedir. Sıvılara uygulanan basıncın miktarı arttıkça deformasyon miktarı yani kayma hızı da artmaktadır.

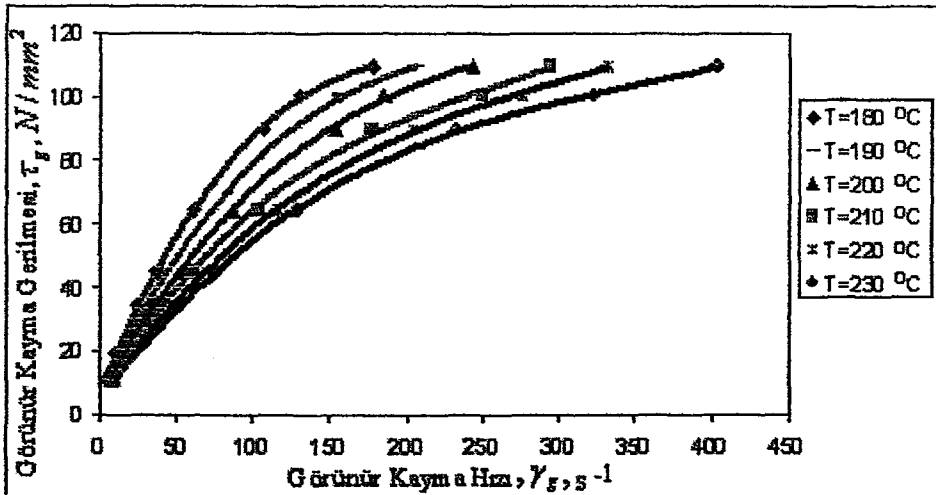
Basınç, kayma hızı üzerinde sıcaklıktan daha etkili olduğundan, uygulanan basıncın büyüklüğü akış miktarını daha fazla etkilemektedir. Ayrıca, basıncın artması ile kayma hızının artması, uzun doğrusal zincirler halinde ergimiş plastik akışını yönlendirildiğinden, molekül zincirlerinin akışa karşı gösterdikleri direnç azalmakta ve plastik malzemelerin akışı kolaylaşmaktadır. Sıvılardaki akışın tabakaların birbirleri üzerinden kayması şeklinde olduğu düşünülürse, uzun doğrusal zincirlerin birbirlerine az dolanması akışı kolaylaştırmaktadır. Dolayısıyla akışı kolaylaştırmak veya aynı yolu daha kısa sürede almak için, kayma hızının artırılması özellikle enjeksiyon kalıpcılığında sıkça kullanılan bir yöntemdir.

EAI' nin sıcaklık ve basınç karşısındaki değişimleri ayrı ayrı incelenmiş olup, her iki parametreye bağlı değişim denklemi de, regrasyon analizi yapılarak tespit edilmiştir. Yapılan regrasyon analizine göre en yüksek korelasyon katsayısının ($R^2 = 0,979$) elde edildiği eşitlik modeli Eş. 6.3' de verilmiştir. Sıcaklık ve basıncın doğal logaritma değerleri ile EAI değerleri kullanılarak Eş. 6.3 bulunmuştur. Üstel fonksiyon olarak bulunan bu denklemle hem basınç hem de sıcaklık değerlerinin birlikte yazılması ile EAI değeri hesaplanabilmektedir.

$$EAI = \exp(-23,319 + 3,176 \ln T + 1,508 \ln p) \quad (6.3)$$

EK 3' de verilen EAI-kayma hızı grafiğinden görüldüğü gibi, kayma hızı ile ergiyik akış hızı doğrusal olarak değişmektedir. Kayma hızının artması, akışkanlığı da artırdığından, EAI test cihazının nozulundan 10 dakikada geçen plastik malzeme miktarı da artmaktadır. EAI ile kayma gerilmesi arasındaki ilişki ise, parabolik olarak değişmektedir. EK 4' de verilen grafikte görüldüğü gibi, kayma gerilmesindeki artış, EAI değerinin de parabolik olarak artmasını sağlamaktadır. Kayma gerilmesi değeri, uygulanan basınç değerinden elde edilmektedir. Gerilme değerleri doğru hesaplandığında, kayma gerilmesinin EAI üzerindeki etkisinin basıncın etkisi ile benzer şekilde olması beklenmektedir. EK 2 ve EK 4' deki grafiklere bakıldığında, EAI' deki değişimin benzer şekilde gerçekleştiği görülmektedir. Enjeksiyon yöntemiyle plastik parça üretiminde, türbülans oluşturmamak kaydıyla yüksek kayma hızı istenilen bir durum olup, kalıbın daha kısa sürede dolmasını sağlamaktadır.

Ergiyik akış indeksi cihazı ile yapılan deneylerden elde edilen kayma hızı, kayma gerilmesi ve viskozite değerleri, görünen değerler olup düzeltme ihtiyacı duyulmaktadır. Şekil 6.1' de verildiği gibi, deneysel olarak elde edilen değerlere göre çizilen kayma hızı - kayma gerilmesi grafiği parabolik olup, literatürdeki (64, 67, 155, 183, 189, 190, 196, 206, 230-232) ideal olmayan akış özelliğine sahip akışkanların grafiğiyle bu sonucun uyumlu olduğu tespit edilmiştir. Kayma hızı-kayma gerilmesi grafiğinin secant değeri viskoziteyi vermektedir.



Şekil 6.1. Kayma gerilmesi-kayma hızı grafiği (T=220 °C)

Bölüm 4' de Şekil 4.9' da verilen grafikte görüldüğü gibi, parabolik bir eğriden doğrusal bir viskozite değeri hesaplanmaktadır. Parabolik eğri ile doğru arasındaki fark ise hesaplanan viskozitenin sapma değeridir. Viskozite değerinin gerçek değere yaklaştırılabilmesi için kayma hızı ve kayma gerilmesi değerlerinin düzeltilmesi gerekmektedir. Düzeltilmemiş kayma hızı ve kayma gerilmesi değerleri, görünen kayma hızı ve kayma gerilmesi değerleri olarak tanımlanmaktadır.

Viskozite değeri de düzeltilmemiş kayma hızı ve kayma gerilmesi değerlerinden hesaplandığı zaman, görünen viskozite olarak adlandırılmaktadır. Viskozite değeri, düzeltilmiş değerlerden hesaplandığı zaman, gerçek değere (parabolik eğriye) yaklaştırılmış olmaktadır. Bu nedenle, kayma hızını düzeltmek için Rabinowitsch yöntemi, kayma gerilmesini düzeltmek için ise, Bagley eşitliği kullanılmaktadır. Kılcal reometrede, silindir girişindeki basınç ile silindir çıkışındaki basıncın aynı olmadığı, sürtünme kayıplarından dolayı basınç kaybı olduğu bilinmektedir. Bu kayıptan dolayı yapılan düzeltme işleminde, silindirin iki ucundaki basınç değerlerinin deneysel olarak ölçülmesi ve iki uç arasındaki basınç farkına göre düzeltme yapılması gerekmektedir. Bagley eşitliği ile kayma gerilmesinde yapılan düzeltme işleminde, pratikte basınç kaybının ölçülmesinin zorluğu ve düzeltme işleminin gerilim değeri üzerinde ihmal edilebilecek kadar küçük olması nedeniyle, düzeltme işlemi genellikle ihmal edilmektedir (231). Yapılan bu çalışmada, sadece kayma hızı değerleri düzeltilip, düzeltilmiş kayma hızı ve düzeltilmiş viskozite değerleri hesaplanmıştır. EK 5' de farklı basınç ve sıcaklık değerlerine göre elde edilen görünür ve düzeltilmiş kayma hızı ve viskozite değerleri verilmiştir. Deney donanımının uygun olmayışı sebebiyle kayma gerilmesi üzerinde Bagley düzeltme prosedürü uygulanamamıştır.

Kayma hızı-kayma gerilmesi grafiğinin eğimi, viskozite modellerinde yer alan akış üssü sabitini (n) vermektedir. Literatürde yapılan yüzlerce çalışmaya temel teşkil eden ve ergimiş plastik ve metal akış analizi yazılımlarında kullanılan viskozite modelinde yer alan bu sabit değer elde edilebilmesi için, kayma hızı-kayma gerilmesi grafiğinin ($\dot{\gamma} - \tau$) eğimi hesaplanmaktadır (64, 183).

6.2. Kayma Gerilmesi –Kayma Hızı Değişimi ve Akış Üssü Sabiti

Akışkanların, ideal akışkan veya ideal olmayan akışkan olup olmadıkları kayma gerilmesi ile kayma hızı arasındaki ilişki ile elde edilmektedir (178,230-232). Kayma gerilmesi-kayma hızı arasındaki ilişki, doğrusal ise akışkan ideal akışkandır denilmektedir. Şekil 6.1’ de verilen grafikte görüldüğü gibi, $\tau - \gamma$ ilişkisi doğrusal değilse, ideal olmayan (Non-Newtonian) akış denilmektedir. Plastik malzemelerin büyük bir çoğunluğu bu akış davranışına sahiptir. İdeal olmayan akışkan malzemelerin akışı sırasında oluşan kayma gerilmesi, Eş. 5.4 ile hesaplanmaktadır. Bu bağıntıdan da anlaşıldığı gibi, kayma gerilmesi, kayma hızının üstel değeri ile sıfır kayma hızındaki viskozitenin (η_0) çarpımından elde edilmektedir. Kayma hızının üstel değeri olan ve akış üssü olarak bilinen sabit sayı (n), kayma gerilmesi-kayma hızı grafiğinin eğiminden elde edilmiştir.

Plastiklerin hemen hemen hepsinde $\tau - \gamma$ grafiği, Şekil 6.1’ de verilen grafikte benzer yapıdadır (64, 183, 230-232). Grafikten de görüldüğü gibi, akış üssü sabitinin hesaplanabilmesi için, parabolün eğimini almak hem zordur, hem de her noktada farklı bir değeri bulunmaktadır. $\tau - \gamma$ grafiğinin eğiminin hesaplanmasında, parabolün eğiminin hesaplaması yerine, her iki değerinde logaritmaları alınarak aralarındaki ilişkinin doğrusal hale getirilmesi pratiklik kazandırmaktadır. Böylece, $\tau - \gamma$ ilişkisini veren grafiğin eğimi tek olmakta ve doğrunun eğimi daha sağlıklı olarak hesaplanmaktadır. $\log \tau - \log \gamma$ grafiğinden elde edilen akış üssü sabiti, bilimsel çalışmalarda yaygın olarak dikkate alınan ve Eş. 4.4’ de verilen kayma gerilmesi hesaplamasında, üs yasası viskozite modeli ve diğer bir çok viskozite modelinde kullanılmaktadır. Ayrıca, Eş. 4.10’ da verilen Rabinowitsch düzeltme yönteminde de $\log \tau - \log \gamma$ grafiğinden elde edilen akış üssü sabiti kullanılmaktadır. Gerçekleştirilen bu çalışmada, farklı sıcaklık ve basınç değişimlerine göre yapılan akış davranışları deneysel olarak incelenmiş ve kayma gerilmesi-kayma hızı değişimlerine dayalı olarak, Çizelge 6.2’ de verilen n sabitleri, Eş. 6.4’ de verilen bağıntıdaki gibi $\log \tau$ ve $\log \gamma$ ’ nin değişimi hesaplanarak elde edilmiştir.

$$n = \frac{d \log \tau}{d \log \gamma} \quad (6.4)$$

Çizelge 6.2. YYPE malzemesi için, farklı sıcaklıklarda akış davranış üssü değerleri

Sıcaklık (°C)	Akış Davranış Üssü (n)	R^2
180	0,6604	0,9945
190	0,6641	0,9955
195	0,6728	0,9945
200	0,6699	0,9954
205	0,6717	0,9941
210	0,6542	0,9935
215	0,6555	0,9937
220	0,6568	0,9949
225	0,6514	0,9953
230	0,6403	0,9923

Ergimiş plastiğin akış davranışlarını incelemek üzere yapılan sayısal akış analizinde, viskozite değerinin hesaplanması için üs yasası viskozite modeli kullanılmıştır. Üs yasası viskozite modelinde kullanılan akış üssü sabitinin değeri, deneysel olarak elde edilen ve Çizelge 6.2’ de verilen n değerleri dikkate alınarak seçilmiştir. Literatürde YYPE malzemesi için n değeri, 0,59 - 0,71 aralığında verilmiştir (64, 67, 155, 188, 238). Deneysel olarak elde edilen n değerlerinin literatürde verilen aralıkta kaldığı görülmüştür.

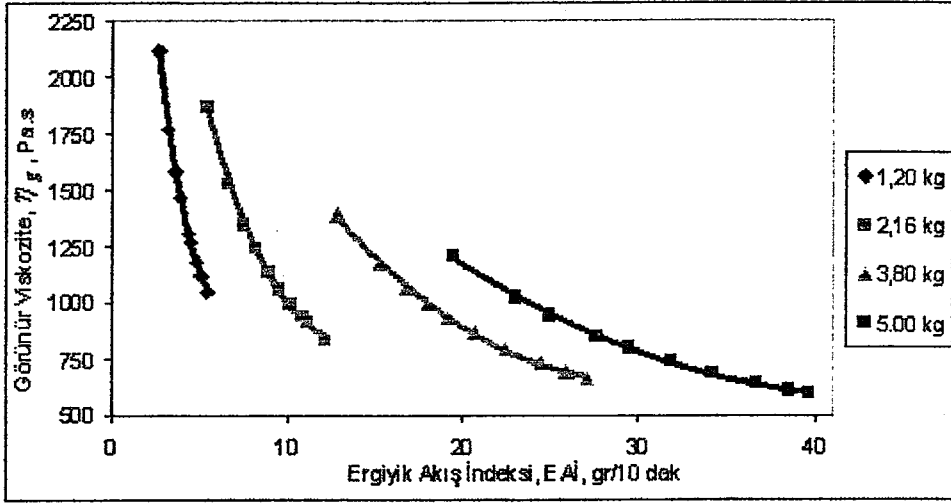
Akış üssü sabiti, malzemedan malzemeye göre değişmekte ve hatta Çizelge 6.2’ den anlaşılaçağı gibi, aynı malzeme için bile farklı sıcaklıklarda da farklı değer alabilmektedir. Çizelge 6.2’ deki n değerlerinin elde edildikleri farklı sıcaklıklar için çizilen $\log \tau - \log \gamma$ grafikleri, $y = a + bx$ gibi bir doğrunun denklemi ile temsil edilmekte olup, doğruların eğimi ve doğru denklemleri EK 6’ da verilmiştir. Bu denklemlerde a ile temsil edilen sabit sayı, Eş. 4.5’ de verilen $(\log \tau = \log \eta_0 + n \log \gamma)$ bağıntıdaki $\log \eta_0$ ’ ı temsil etmekte olup, sıfır kayma hızındaki viskozite (η_0) değeridir. Bağımsız değişkenin önünde b ile temsil edilen katsayı ise, doğrunun eğimi olup, akış üssü sabitini (n) temsil etmektedir (230 - 232).

10 farklı sıcaklık için yapılan deneylerde, her sıcaklık için n sabiti ayrı ayrı tespit edilmiştir.

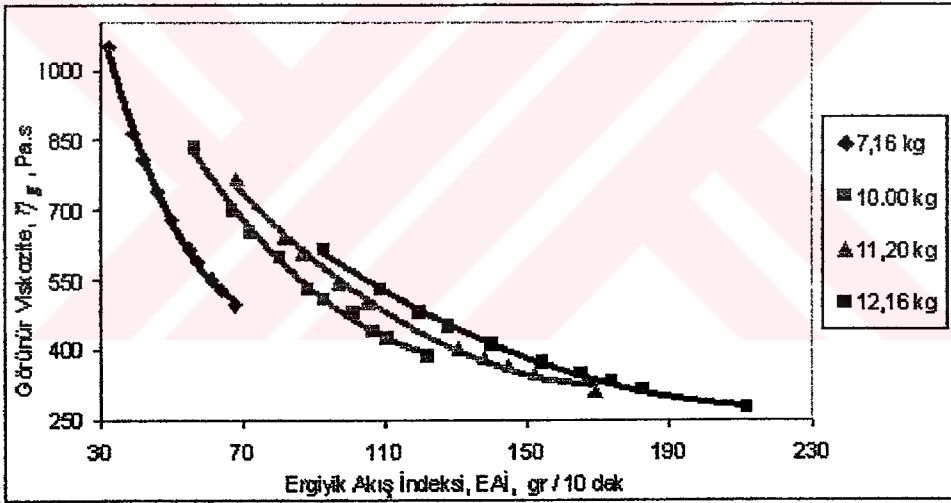
6.3. Viskozitenin EAI, Kayma Hızı, Basınç ve Sıcaklık İle Değişimi, Aktivasyon Enerjisi

YYPE malzemesinin akış özelliklerinin belirlenmesi için yapılan deneyler sonucunda, EAI değerleri bulunmuştur. Akış indeksi değeri hesaplanırken kullanılan akış indeksi cihazı bilgisayar kontrollü olup, ergimiş plastiğe basınç uygulayan piston hareketi, yer değiştirme transduseri ile kontrol edilmektedir. Transduser vasıtası ile piston hareketleri zamana bağlı olarak değerlendirilerek hız değişimi tespit edilmekte ve buna göre de ergiyiğin farklı sıcaklık ve basınçlarda kayma hızı değeri bulunmaktadır. Uygulanan basınca bağlı olarak hesaplanan gerilme değeri de kullanılarak viskozite değerleri de belirlenebilmektedir. Böylece, yapılan akış indeksi değerleri ölçümü sırasında sadece EAI değerleri tespit edilmeyip, beraberinde kayma hızı, kayma gerilmesi ve viskozite değerlerinin sıcaklık ve basınç ile değişimleri de tespit edilmiştir.

Deneylerden elde edilen EAI-viskozite değişimi ($EAI-\eta_g$) belirlenmiş olup, $EAI-\eta_g$ değişimini veren grafikler Şekil 6.2 ve Şekil 6.3’ de verilmiştir. 8 farklı yük için ayrı ayrı elde edilen grafiklerden görüldüğü gibi viskozite değeri, artan EAI değeri ve artan basınç değeri ile azalmaktadır. Bu grafiklerden de anlaşılabileceği gibi, EAI değeri ile görünür viskozite değişimi 2. dereceden bir fonksiyonla ifade edilebilmekte olup, EAI değeri arttıkça, viskozite değeri de çok keskin bir şekilde azalmaktadır. Enjeksiyon yöntemi ile plastik parça üretiminde plastik malzeme seçimi yapılırken, hammaddeye ait kataloglarda genellikle yoğunluk ve EAI değeri verildiğinden, EAI değeri yüksek olan malzemelerin viskoziteleri düşük olup daha az kuvvet ile kalıplanabileceği dikkate alınmaktadır. Yani aynı işlevleri görece ve diğer özellikleri istenilen aralıklarda olan iki malzemedan, akıcılığı yüksek olan malzemenin seçilmesi doğru olmaktadır.



Şekil 6.2. 1,2-5 kg yükler için, ergiyik akış indeksi-görünür viskozite grafiği



Şekil 6.3. 7,16-12,16 kg yükler için, ergiyik akış indeksi-görünür viskozite grafiği

Viskozite, sıcaklık ve basınç artışına bağlı olarak parabolik bir şekilde azalmaktadır (EK 7, EK 8). EK 7' de verilen grafiklerde görüldüğü gibi, farklı yükler için elde edilen viskozite-sıcaklık grafiği, sıcaklık artışıyla viskozitenin de parabolik olarak azaldığı görülmektedir. Sıcaklık, ergiyiğin moleküler bağ kuvvetini zayıflattığından akışa karşı gösterilen iç direnç de azalmaktadır. İç direncin azalması viskozitenin azalması anlamına geldiği için, viskozite değeri sıcaklık artışına bağlı olarak azalmaktadır. Benzer şekilde, basıncın artması da akma yönünde itici bir güç oluşturduğundan, makro moleküllü zincirlere sahip plastik malzemeler akış

doğrultusunda yönlendirilmektedir. Doğrusal zincirlerin akış doğrultusunda yönlendirilmeleri akışı kolaylaştıracağı için viskozite değeri de düşmektedir. İncelen akış olarak da bilinen bu durum esasında Newtonian olmayan akış özelliğini temsil etmektedir. Yapılan deneylerde farklı sıcaklık ve yükler için viskozite değerleri bulunmuştur (Çizelge 6.3)

$$\eta_g = \eta_0 e^{C p} \quad (6.5)$$

Viskozite ile basınç terimi Eş. 6.5 deki gibi üstel bir fonksiyon olarak tanımlanabilir. Eşitlik 6.5' in her iki tarafının da doğal logaritmaları alındığında,

$$\ln \eta_g = \ln \eta_0 + C p \quad (6.6)$$

eşitliği elde edilir. EK 9' da, $\ln$ (viskozite) – basınç değişimini veren grafikler verilmiştir. Bu grafiklerden elde edilen ve Eş. 6.6' da ki C ve η_0 katsayılarının farklı sıcaklıklara göre değişen değerleri, EK 9' da sunulmuştur. Buradaki η_0 değeri sıfır kayma hızındaki viskozite, C ise basınç sabitidir.

Çizelge 6.3. Değişik basınç ve sıcaklıklar için görünür viskozite değerleri

Uygulanan Basınç (Pa)	Sıcaklık (°C)									
	180	190	195	200	205	210	215	220	225	230
165,40	2114,7	1772	1583,9	1463,8	1309	1266,3	1180,4	1127,8	1116,5	1045,6
298,20	1866,4	1525	1345,4	1239,6	1136,1	1057,9	991,82	934,07	909,34	829,14
524,00	1390,8	1168,2	1061,9	993,12	930,19	863,31	795,96	730,26	689,73	658,47
689,50	1207	1021,3	942,06	850,45	797,43	737,82	686,95	640,13	610,2	593,22
987,36	1050	865,17	807,86	739,03	679,95	615,94	589,38	552,31	529,33	496,17
1379,00	833,38	699,03	650,56	598,93	530,27	505,61	479,36	439,35	424,19	385,35
1545,40	767,16	643,21	604,8	543,57	501,13	402,1	381,5	363,79	345,85	310,89
1677,86	615,47	527,74	479,32	448,87	409,54	371,45	346,79	329,26	313,31	273,09

Viskozite kayma hızı ve kayma gerilmesi ilişkisinden elde edildiği için, viskozite modellerinde, kayma hızı ve kayma gerilmesi değişiminden viskozite ihmal edilemeyecek derecede etkilenmektedir. EK 10' da görünür viskozitenin kayma hızı ile değişimini, EK 11' de ise görünür viskozitenin kayma gerilmesi ile değişimini veren grafikler hazırlanmıştır. Viskozite, hem kayma hızının hem de kayma gerilmesinin değişimiyle, logaritmik olarak değişmektedir. Bu bağlamda elde edilen grafiklerde en yüksek R^2 değerinin temsil edildiği ve logaritmik eğri benzeştirme

yöntemi ile elde edilen denklem, kayma hızı için Eş. 6.7' de ve kayma gerilmesi için Eş. 6.8' de verilmiştir. Bu eşitliklerdeki C ve D ile temsil edilen katsayılar deneysel olarak bulunmuş ve değerleri EK 10 ve EK 11' de listelenmiştir.

$$\eta_g = C_0 + C_1 \ln(\gamma) \quad (6.7)$$

$$\eta_g = D_0 + D_1 \ln(\tau) \quad (6.8)$$

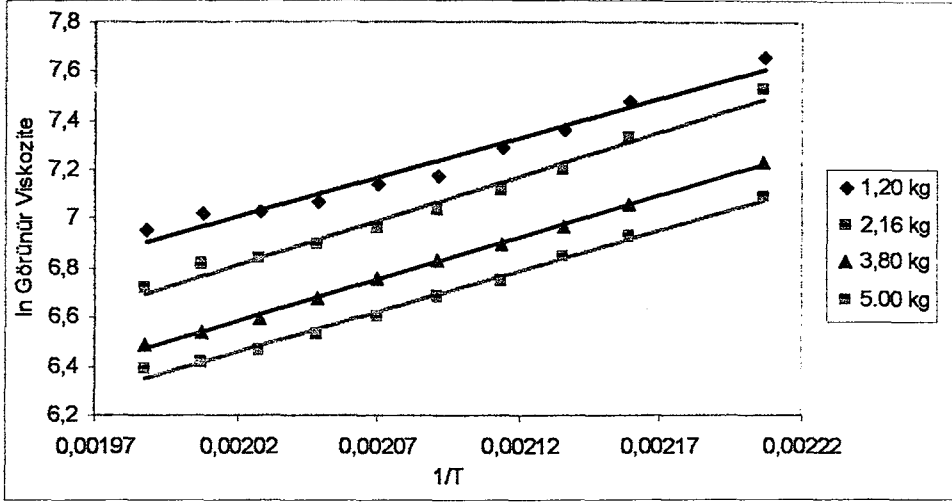
Viskozite modellerinden biri olan Arrhenius modelinde kullanılan Aktivasyon enerjisi, viskozite-($1/T$) grafiğinden elde edilmektedir. Eşitlik 4.12' de verilen bu viskozite modelinde, eşitliğin her iki tarafının doğal logaritması alınırsa,

$$\ln \eta_g = \ln A + \frac{E_a}{R} \frac{1}{T} \quad (6.9)$$

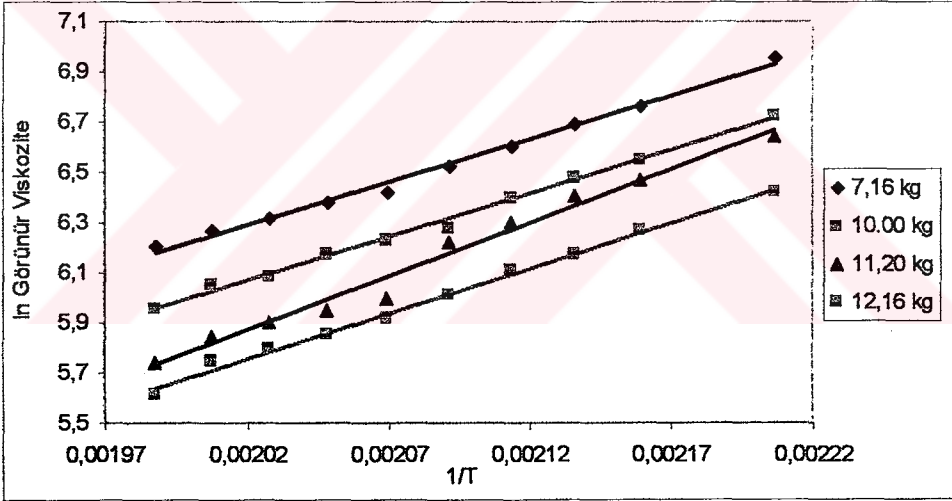
olarak bulunur.

Eşitlik 6.9' da ki R , gaz sabiti olup, değeri 8,314 J/mol K dir. $\ln A$, Şekil 6.4 ve Şekil 6.5' de verilen grafiklerden elde edilen doğru denklemindeki sabit sayıdır. $\frac{E_a}{R}$ ise grafikteki doğrunun eğimi olup, elde edilen doğru denklemindeki bağımsız değişkenin önündeki katsayıdır.

Şekil 6.4 ve Şekil 6.5' de verilen grafiklerde $\ln \eta_g$ ' nin ($1/T$) ye karşı değişimleri verilmiştir. Her bir basınç için ayrı ayrı olarak elde edilen grafiklerin eğimi, E_a/R ' yi vermekte olup, Aktivasyon enerjisi (E_a) değeri buradan hesaplanmaktadır. Çizelge 6.4' de değişik yükler için Aktivasyon enerjisi değerleri ve Arrhenius viskozite modelindeki A katsayısı değerleri hesaplanmıştır.



Şekil 6.4. 1,2-5 kg arası yükler için, ln Görünür Viskozite – (1/T) grafiği



Şekil 6.5. 7,16-12,16 kg arası yükler için, ln Görünür Viskozite – (1/T) grafiği

Çizelge 6.4. Farklı basınçlar için, Aktivasyon Enerjisi ve A sabiti değerleri

Uygulanan Basınç (Pa)	E_a (J/mol K)	A	R^2
165,40	26,54	1,758	0,973
298,20	29,88	0,640	0,985
524,00	28,62	0,690	0,997
689,50	27,86	0,729	0,992
987,36	28,38	0,547	0,992
1379,00	28,83	0,391	0,994
1545,40	35,61	0,062	0,981
1677,86	30,01	0,216	0,994

Çizelge 6.4' de verilen deneysel değerler kullanılarak, ideal olmayan akış özelliğine sahip ergimiş plastiklerin akış analizi ve simülasyonunda sıcaklığa bağlı viskozitenin değişimi hesaplanabilmektedir (188, 232). Arrhenius viskozite modeli viskozitenin sıcaklık ile değişimine duyarlı olmakla birlikte Çizelge 6.4' de görüldüğü gibi, E_a ve A değerleri, uygulanan basınca göre farklı değerler almaktadır. Akış simülasyonu yapılırken, artan basınca göre değişen bu katsayıların değişimi dikkate alındığında, viskozite değeri hesaplanırken sıcaklık değişimi ile birlikte basınç değişiminin de etkisi kullanılmış olmaktadır.

Akış davranışlarını teorik olarak inceleyebilmek için, akışı tam anlamıyla temsil eden matematiksel bağıntılara ihtiyaç duyulmaktadır. Kullanılan bu matematiksel ifadeler, akışa karşı zorlanan malzemenin yoğunluğu, viskozitesi, ısınma ısısı, ısı iletim kapasitesi gibi o polimere has özellikleri, akış sırasında gerçekleşen hız, sıcaklık ve basınç gibi akış parametrelerini içermelidir. Bu çalışma kapsamında yer alan matematiksel bağıntılar kullanılarak akış parametreleri incelenmeli, parametrelere dayalı akış analizi yapılarak kalıp tasarımı gerçekleştirilmelidir.

6.4. Sayısal Çözümleme İle Elde Edilen Akış Analizleri

Akış analizi için yapılan teorik çalışmalar, temelde iki gruba ayrılmaktadır. Bunlardan birincisi analitik çözümleme diğeri ise, sayısal çözümleme yöntemidir. Analitik çözümler genellikle tek boyutlu problemlere başarılı bir şekilde uygulanabilmektedir. Fakat, karmaşık akış özelliğine sahip ve genellikle üç boyutlu olan plastik parçaların akış simülasyonlarında bu yöntemi kullanmak oldukça zordur ya da mümkün değildir.

Bundan dolayı ergimiş plastiklerin akışının analizi ve simülasyonunda, sıcaklık, basınç, hız, viskozite ve yoğunluk terimlerinin dikkate alındığı bir matematiksel modele ihtiyaç duyulmaktadır. Sonlu farklar, sonlu elemanlar ve sonlu kontrol hacmi gibi sayısal çözümleme yöntemleri kullanılarak diferansiyel formdaki matematiksel ifadeler cebirsel hale getirilmekte, elde edilen cebirsel denklem takımları

araştırmacının kendisi tarafından geliştirilen veya hazır bir algoritmaya sahip yazılımlarla çözümlenmektedir.

Araştırmacılarca geliştirilen yazılımların çok sınırlı bir kullanıma sahip olması, çözüm algoritmasının uluslar arası geçerliliğe sahip bulunmayışı ve çözümlerin literatürde yapılan çalışmalarla kıyaslamada ciddi problemler doğurması dolayısıyla; bu çalışma kapsamında elde edilen cebirsel ifadelerin çözümlenmesinde Phoenixics hazır algoritmasının (22, 23) tercih edilmesini sağlamıştır. Çözümlenen denklemlerden elde edilen değerlerden ergimiş plastiğin akış sırasındaki basınç, hız ve sıcaklık verileri hesaplanabilmektedir. Bulunan bu değişkenler yardımı ile ergiğin yoğunluğu, viskozitesi, kayma hızı, kayma gerilmesi, gibi gerekli akış parametreleri de hesaplanarak akışın nasıl gerçekleştiği tespit edilebilmektedir.

Yapılan bu çalışmada, ergimiş plastik akışını tam anlamıyla temsil ettiği düşünülen Navier-Stokes denklemleri kullanılmıştır.

Literatürde yer alan çoğu çalışmada bulunan kabulün tersine yoğunluk değişimi ihmal edilmeyerek, akışın sıkıştırılabilir olduğu, matematiksel ifadelerde temsil edilmiştir. Akışa ait basınç ve hız terimleri momentum denklemlerinden, sıcaklık terimleri ise enerji denkleminde hesaplanmaktadır. Her bir zaman adımında, bulunan bu değerlere bağlı olarak akışa ait diğer parametreler hesaplanmaktadır. Ergimiş plastik kalıp boşluğunda akarken, ergiyik plastik ile kalıp yüzeyleri arasında ısı transferi gerçekleşmektedir. Gerçekleşen bu ısı akışından dolayı akışkanın sıcaklığı azalmakta, buna bağlı olarak viskozitesi ve yoğunluğu da değişmektedir. Viskoelastik akış özelliğine sahip ergimiş plastiklerin akış analizi yapılırken, viskozite terimleri akışa ait en önemli parametrelerden biri olarak kabul edilmektedir.

Viskozitenin hesaplanmasında kullanılan yüzlerce modelin bulunduğu literatürden bilinmektedir (1, 64, 155, 159, 178, 183, 187). Bu viskozite modellerinin bazıları sadece viskozite üzerinde bir terimi etkin kabul ederek, bazıları ise birden fazla akış parametresini dikkate alarak oluşturulmuştur. Bu çalışma kapsamında, literatürde en fazla kullanıldığı tespit edilen ve Eş. 2.16' da verilen Üs yasası viskozite modeli tercih edilmiştir. Plastiklerin akış analizleri yapılırken, viskozite teriminin

hesaplanmasında en etkin parametrenin kayma hızı olduğu, bu konuda çalışan araştırmacıların ortak kanısıdır (15, 23, 230-232). İdeal olmayan akışın önemli etkilerinden biri, kayma hızı ile viskozitenin değişimidir. Kayma hızının değişiminden dolayı gerçekleşen viskozite değişiminin, sıcaklık değişimine daha büyük bir etki yaptığı bilinmektedir. Eşitlik 4.16' da bulunan m terimi, Eş. 4.17' de verilen bağıntı ile hesaplanmakta olup, sıcaklığın viskozite üzerindeki etkisini temsil etmektedir.

Literatürde Carreau, Cross modelleri, Ellis model, Moldflow ikinci dereceden viskozite modelleri gibi viskozite modelleri sıklıkla kullanılmaktadır. Bu modellerde bulunan basınç terimleri, Moldflow ve C-Mold gibi analiz ve simülasyon programları ve literatürdeki bir çok çalışmada sıfır değerindedir. Viskozite üzerinde en büyük etki kayma hızı ve sıcaklık olduğundan, viskozite değeri hesaplanırken kullanılacak modelin bu iki terimi içermesi, gerçek akışa yakın simülasyonlar elde etmek için son derece önemlidir.

Ergimiş plastiklerin akışında, ihmal edilmesi büyük sapmalara neden olan sıkıştırılabilirlik önemli bir etkiye sahip olmaktadır. Momentum denklemlerinde ve enerji denkleminde bulunan yoğunluk terimi, sıcaklık ve basınç karşısında değişen bir akış parametresidir. PVT ilişkisi, plastik akışlarında çok önemli bir yer tutmaktadır. Metallere göre birkaç kat daha fazla genleşme kapasitesine sahip olan plastikler ergitilerek şekillendirildiklerinden kalıplanırken yüksek sıcaklıktan dolayı, genleşmektedir. Kütlesi sabit kalıp hacmi değişen ergiyik malzemenin özgül hacmi hesaplanarak yoğunluk değişimi bulunabilmektedir. Sıcaklığın artması genleşme, basıncın artması da sıkıştırma etkisi yaptığından, yoğunluk değişiminde sıcaklık ile basıncın ters etki yaptığı, Bölüm 4' deki Şekil 4.10' da verilen PVT grafiğinden açıkça görülmektedir. Tait eşitliği olarak bilinen ve yaygın olarak da kullanılan ve Eş. 4.41 - Eş. 4.45' de verilen bağıntılarla yoğunluk değişimi hesaplanabilmektedir. İçerisinde bir çok deneysel verilere dayalı katsayıların bulunması ve her malzemeye göre değişim göstermesinden dolayı, Tait eşitliği yoğunluk değişiminin hesaplanmasında kullanılmamıştır.

Bu çalışmada, yoğunluk değişimi hesabında Boussinesq yaklaşımı kullanılarak sadece sıcaklık değişimi dikkate alınmıştır. Boussinesq yaklaşımında referans sıcaklıktaki yoğunluk dikkate alınarak Bouyancy kuvveti hesaplanmıştır. Referans yoğunluk ise hammaddeyi üreten firma tarafından verilen yoğunluk değeri olup, camsı geçiş sıcaklığındaki yoğunluk değeridir. Bouyancy kuvvetinde genleşme katsayısının sabit basınç altındaki tam diferansiyeli alınarak bulunan değerinden hesaplanan yeni eşitlikte referans sıcaklık değeri kullanılmıştır. Kullanılan bu referans sıcaklık değeri, ergimiş plastiğin sıcaklığı ile kalıp sıcaklığının ortalaması olarak alınmıştır.

Bir çok araştırmacı tarafından hassasiyetinin yüksek olması sebebiyle kullanılmakta olan Sonlu elemanlar (SE), kontrol hacminin alt bölgelere ayrılması esasına dayanmakta olup, uygulanmasının zorluğu nedeniyle problemlerin çözümünde tercih edilmemektedir. Sonlu farklar (SF) yöntemi ise, farklı yaklaşımları bulunan bir model olup, çözüm alanının ızgaralara ayrılması ve akış parametrelerinin bu belirlenen ızgaralardaki düğüm noktalarında hesaplanması prensibine dayanmaktadır.

Sonlu kontrol hacmi (SKH) yöntemine göre integrasyon yapılırken, ağırlık fonksiyonu bir alınarak ($f=1$) Tam Implicit yöntemi kullanılmıştır. Basit yaklaşım olarak bilinen merkezi farklar yönteminin akış problemlerindeki en ciddi olumsuzluğu, akışın hangi taraftan geldiğinin bilinmemesidir. Sayısal iterasyonlar yapılarak gerçekleştirilen hesaplamada, bir noktanın değeri kendinden önceki ve sonraki noktaların değerleri dikkate alınarak hesaplanmaktadır. Akışın hangi taraftan geldiğinin bilinmemesi çözüm sırasında hangi yöntün daha etkin olduğunun bilinmemesi problemini doğurmaktadır. Bu problemini aşmak için SKH yönteminde çok başarılı bir şekilde uygulanabilen Upwind metodu kullanılmıştır. Upwind metodunda akışın hangi taraftan olduğu değerlerinin büyüklüğünden anlaşılmakta olup, cebirsel ifadeler bu doğrultuda elde edilmektedir.

Denklemlerin tüm profil ve büyüklüklerde geçerli olmasını sağlamak için referans büyüklük ve değerler kullanılarak boyut ve birimden arındırma işlemi, diferansiyel eşitliklere uygulanmıştır. Boyutsuzlaştırılan diferansiyel ifadeler daha sonra cebirsel

forma dönüştürülmüştür. Belirli katsayılar şeklinde elde edilen cebirsel ifadeler kullanılarak çözüme gidilmiştir. Cebirsel ifadelerin değerlerinin hesaplanması için bir iterasyon metoduna ihtiyaç vardır. Bu nedenle, Thomas Algoritması veya TDMA (Tri-Diagonal Matrix Algorithm) olarak da bilinen Gauss-Jordan eliminasyon metodu kullanılmıştır. İteratif çözüm yöntemlerinin ortak özelliği olan iterasyona başlarken tahmini değerler verilerek çözüme başlanır. Başlangıçta, giriş şartlarının haricinde kalan düğüm noktalarında basınç ve hız değerleri bilinmediği için rasgele değerler verilerek çözümleme yapılmaktadır.

Birbirlerine bağlı basınç ve hız değerleri doğru olmadığı sürece gerçek değerleri bulmak mümkün olmamaktadır. Sıcaklık terimi enerji denkleminde, hız terimleri momentum denklemlerinden elde edilmektedir. Hızların doğru olup olmadığı ise süreklilik denkleminde sürekliliği sağlayıp sağlamadıkları kontrol edilerek hesaplanmaktadır. Basıncın bulunacağı herhangi bir denklem bulunmadığı için, SIMPLE algoritması kullanılarak momentum denklemi basınç denklemine dönüştürülmüştür. Elde edilen basınç denkleminde önce tahmini basınçlar hesaplanmış, tahmini basınçlara göre hız değerleri hesaplanarak iterasyonlar devam ettirilmiştir. Tahmini olarak elde edilen hız ve basınç değerlerinin belirli düzeltme katsayıları ile çarpılması, iterasyon sırasında en sık karşılaşılan ıraksama ihtimalini en aza indirmiştir.

Vektörel bir büyüklük olan hız bileşenlerinin skaler değişkenlerle aynı düğüm noktalarında hesaplanması bazı problemleri beraberinde getirmektedir. Hız bileşenleri ile basınç terimleri aynı noktalarda hesaplandığı durumlarda özellikle özdeş akış bölgelerinde, basıncın değeri sıfır veya anlamsız olabilmektedir. Gerçek akışın fiziğine aykırı olan bu problemi çözmek için hız değişkenlerinin hesaplandığı noktalar kaydırılmış ızgara sistemi kullanılarak düğüm noktalarında kontrol hacmi yüzeylerinin bulunduğu noktalara kaydırılmıştır. Hız bileşenlerinin değerleri, iki ana düğüm noktası arasında bulunan bu yüzeylerde hesaplanmıştır (Şekil 3.9, Şekil 3.10).

Kararsız akış olan ergimiş plastiğin kalıp boşluğundaki akışı analiz edilirken, iteratif olarak yapılan sayısal çözümlemede akış burnunu bulunduğu yüzeylerde ergiyik ile

hava arasında çok keskin bir yoğunluk farkı bulunmaktadır. Tam Implicit metodunda, cebirsel yöntemde hesaplanan noktanın etrafındaki tüm değerler dikkate alınarak çözümleme yapılmaktadır. Akış burnunun bulunduğu yerde hesaplanması gereken noktanın arkasında ergimiş plastik, önünde ise hava bulunmaktadır. Çok yüksek yoğunluk farkının bulunduğu bu ara yüzeyde sapmaları önleyip, hesaplama hatasını en aza indirmek için Van Leer yöntemi kullanılmıştır. Akış burnu profilinin bulunduğu yerlerde Tam Implicit yerine Explicit metodun uygulanması olan bu yöntemle, literatürde sayısal difüzyon olarak tanımlanan hesaplama hatası (181, 229) yok edilmeye çalışılmıştır.

Plastiklerde, camsı geçiş sıcaklığı olarak bilinen değer ile ergime sıcaklığı arasındaki sıcaklıklarda, hem sıvı hem de katıya ait deformasyon özellikleri görülmektedir. Katı ve sıvı faz arasında yarı katı yarı sıvı faz durumunda yani tam ergime sıcaklığı değeri ve üstündeki sıcaklıklarda plastik tam sıvı olduğu için, ergiyik uygulanan basınç ile akmaktadır. Ergime sıcaklığının altındaki sıcaklıklarda camsı geçiş sıcaklığına kadar olan değerlerde bir miktar akış olmakla beraber, ergime sıcaklığından camsı geçiş sıcaklığına doğru gidildikçe katı özellikleri artmaktadır. Ergimiş plastiğin kalıp içerisindeki akışı sırasında özellikle kalıba temas eden yüzeylerde ve akış burnunda katılaşmış veya katıya yakın özellik gösteren katmanlar bulunmaktadır. Akış parametreleri hesaplanırken elde edilen sıcaklık değerlerine göre Eş. 3.158' deki bağıntı ile katılık oranı (f_s) tespit edilmiştir. Ergime noktasının altındaki sıcaklıklar ile camsı geçiş sıcaklığı arasındaki sıcaklık değeri 10 eşit parçaya bölünerek, doğrusal bir ilişki ile 0-1 arasında katılık oranı katsayısı belirlenmiştir. Bu katılık oranına göre akışın olmadığı katmanlar belirlenmiştir.

Akış simülasyonu, akış parametrelerinin hesaplanması sırasında düğüm noktalarındaki yoğunluk değişimi dikkate alınarak yapılmıştır. Kalıp boşluğuna ergimiş plastik dolmadan önce hava bulunduğundan dolayı düğüm noktalarındaki yoğunluk sıfır kabul edilmektedir. Hesaplamalar sırasında zamana bağlı olarak düğüm noktalarındaki yoğunluklar hesaplandığında hava-ergiyik akışkan ara yüzeyi elde edilmektedir. Ergiyik-hava ara yüzeyi akış burnunun bulunduğu noktayı

vermektedir. Zamana göre ergiyik-hava ara yüzeylerinin grafik olarak çizilmesi ile akış simülasyonu görüntüleri elde edilmiştir.

Momentum, enerji ve süreklilik denklemlerinin SKH yöntemine göre ayrıştırılmasından sonra cebirsel forma dönüştürülen denklemler Phoenix programı yardımı ile çözümlenmiştir. Navier Stokes denklemlerini çözebilen Phoenix algoritması çok genel program olup, akış analizine uyarlanması gerekmektedir. Bu nedenle, viskozite, katılık oranı gibi genel denklemler içerisinde hesaplanamayan terimlerin elde edilmesi için Fortran programlama dilinde kodlar yazılıp modül (Ground) olarak Phoenix programına tanıtılmıştır. Sınır ve giriş şartlarının tanımlanması, kalıp boşluğu geometrisinin tanımlanması, çözüm hassasiyetini belirleyen ızgara ve zaman aralıkları gibi sayısal çözümün yapılabilmesi için gerekli tanımlamalar “q1” dosyası olarak yazılıp programa tanıtılmıştır. Programın hangi işlemi yapacağı, değişkenlerin ne olduğu ve hangi parametrelerin hesaplanacağını tanımladığı “q1” dosyası, EK 12 ‘de ve “Ground” dosyası EK 13’ de verilmiştir.

Temel denklemlerde bulunan genleşme katsayısı, ısınma ısısı gibi değerler YYPE malzemesi için literatürde verilen değerler olarak alınmıştır. Çizelge 6.5’ de sayısal çözümleme için gerekli bazı veriler, giriş parametreleri verilmiştir. Bu değerler kullanılarak cebirsel hale dönüştürülen denklemlerdeki terimlere ilk değer atanmaktadır. Çözüm sırasında giriş şartları olarak verilen bu değerler sürekli sabit olup, giriş şartının değişmediği dikkate kabul edilmektedir. Ayrıca, katılık oranının belirlenmesinde kullanılan camsı geçiş sıcaklığı ve ergime sıcaklığı YYPE için sabit değer olup, hammadde üreticisi tarafından verilen sıcaklık değerleri kullanılmıştır (EK 14).

Yapılan sayısal analizlerde 7 farklı giriş şartı kullanılmıştır. Kullanılan giriş parametreleri Çizelge 6.6’ da verilmiştir. Her bir şart için ayrı ayrı yapılan hesaplamalar sonucu akış parametrelerinin değerleri elde edilmiştir.

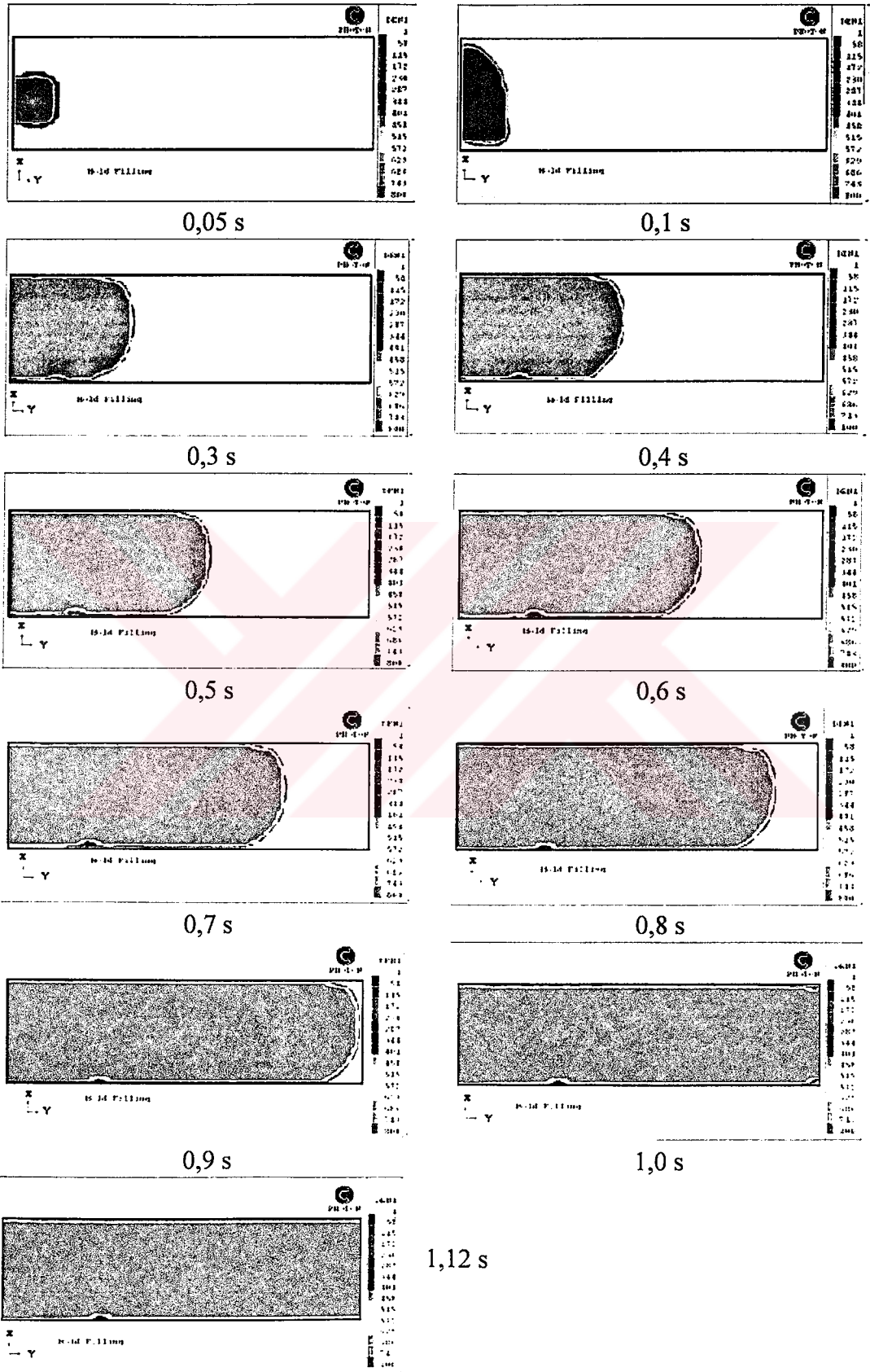
Çizelge 6.5. YYPE (I-668) malzemesi için giriş şartları ve sayısal çözümleme için gerekli parametre değerleri

Parametrenin	Sembolü	Değeri	Birimi
Enjeksiyon sıcaklığı	$T = T_{giriş}$	220	°C
Ergime sıcaklığı	T_e	167	°C
Camsı geçiş sıcaklığı	T_g	137	°C
Ürünü Kalıptan çıkarma sıcaklığı	$T_{çıkış}$	110	°C
Referans sıcaklık	T_{ref}	130	°C
Kalıp sıcaklığı	T_k	40	°C
Enjeksiyon basıncı	$p = p_{giriş}$	5	MPa
Yoğunluk	ρ	968	kg/m ³
Enjeksiyon sıcaklığındaki yoğunluk	ρ	800	kg/m ³
Isı iletim katsayısı	k	0,211	W/m ² °C
Hacimsel genleşme katsayısı	β	152×10^{-6}	°C ⁻¹
Isıl yayınım sabiti	α_f	$1,57 \times 10^{-7}$	m ² /s
Isınma ısısı (sabit basınçta)	$c_{(p)}$	2600	J/kg °C
Izgara aralığı	$\Delta x, \Delta y, \delta x, \delta y$	1×10^{-6}	m
Düzeltilme faktörü (u ve v hızı için)	α_u, α_v	0,5	
Düzeltilme faktörü (basınç için)	α_p	0,7	
Upwind Metodu için Peclet sayısı	$A(Pec)$	1	
İterasyon zaman aralığı	Δt	1×10^{-3}	s

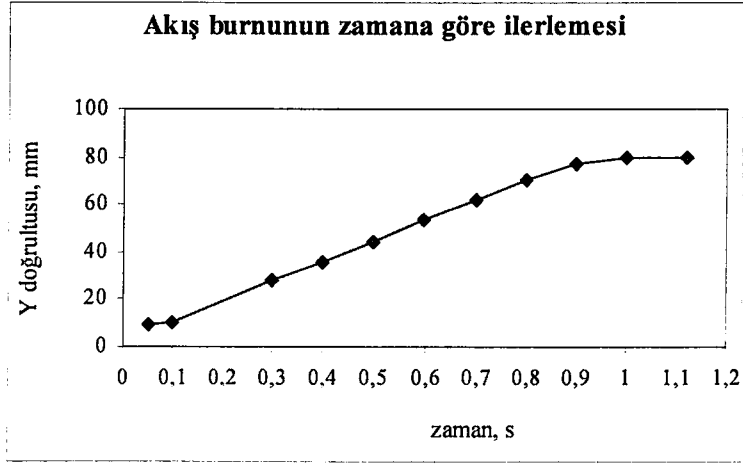
Çizelge 6.6. Teorik hesaplamada kullanılan değişik şartlardaki enjeksiyon parametreleri

	I. Grup	II. Grup	III. Grup	IV. Grup	V. Grup	VI. Grup	VII. Grup
Enj. Sıcaklığı, °C	220	220	220	220	220	220	220
Enj. Basıncı, MPa	5	5	4	5	5	5	5
Enj. Hızı, m/s	0,25	0,45	0,25	0,1	0,35	0,55	0,25
Giriş kesiti, (grid aralığı)	8-15						10-12

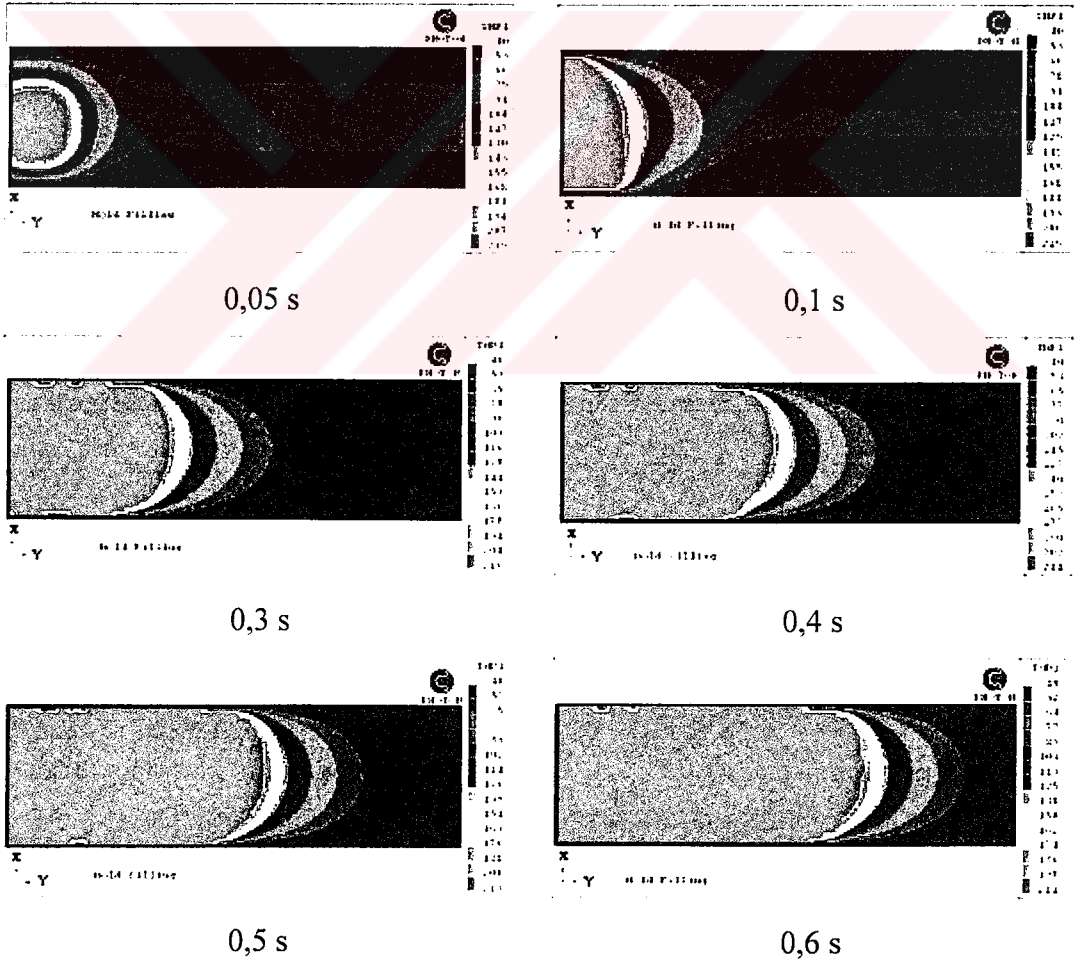
I. grup enjeksiyon şartlarına göre yapılan analizde ergimiş plastiğin kalıp boşluğundaki zamana göre ilerlemesi ve kalıp boşluğunu doldurma tipi Şekil 6.6' da verilmiştir.



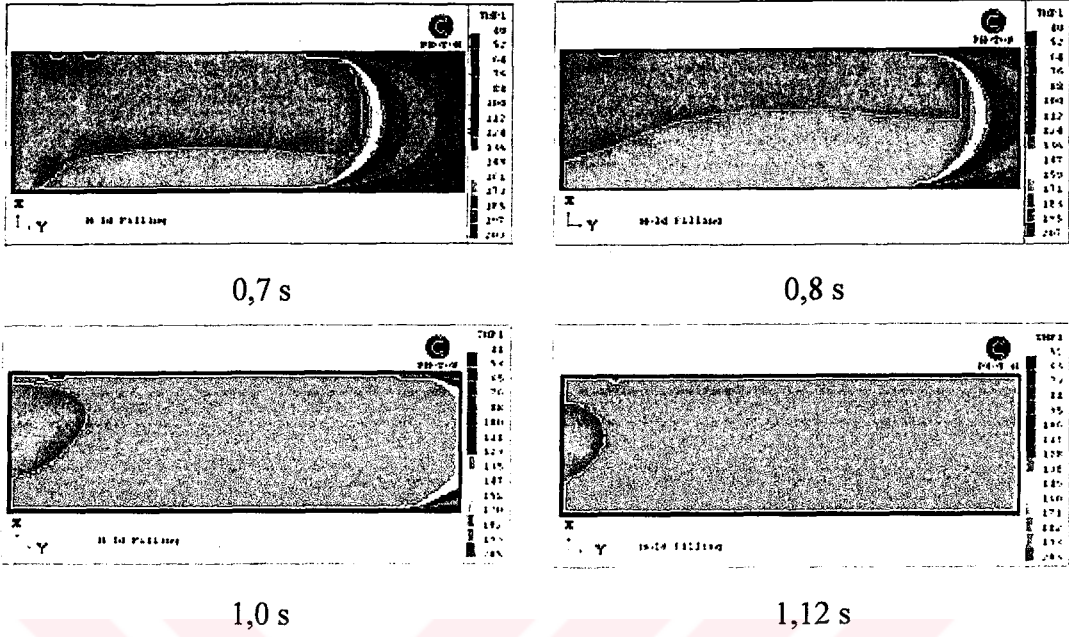
Şekil 6.6. I. Grup enjeksiyon parametreleri için, sayısal analiz sonucu elde edilen ergimiş plastiğin kalıp boşluğunu doldurma tipi görüntüleri



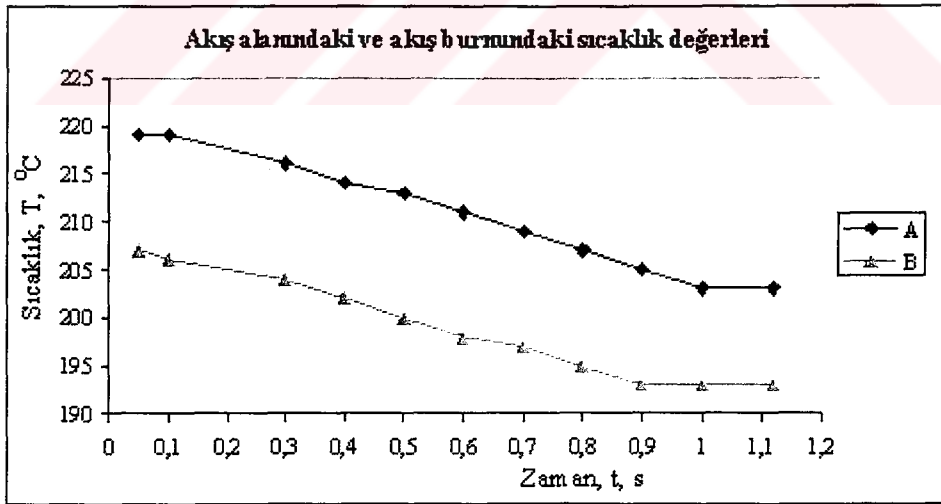
Şekil 6.7. I. grup enjeksiyon parametreleri için, akış burnunun Y doğrultusunda zamana göre ilerlemesi



Şekil 6.8. I. Grup analiz sonucu akış burnundaki ve kalıp boşluğundaki sıcaklığın zamana göre değişimi



Şekil 6.8. I. Grup analiz sonucu akış burnundaki ve kalıp boşluğundaki sıcaklığın zamana göre değişimi (devam)



Şekil 6.9. I. grup enjeksiyon parametreleri ile yapılan analizde, akış alanındaki ve akış burnunda zamana göre sıcaklık dağılımı (A: Akış alanının sıcaklığı, B: akış burnuna yakın bölgenin sıcaklığı)

Çizelge 6.7. I. grup enjeksiyon parametreleri ile yapılan analizde, akış alanı ve akış burnundaki sıcaklığın zaman göre dağılımı

	Zaman aralığı ,s										
	0,05	0,1	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,09	1,0	1,12
	Sıcaklık değerleri, °C										
Akış alanı	219	219	216	214	213	211	209	207	205	203	203
Akış burnu	207	206	204	202	200	198	197	195	193	193	193

Çizelge 6.5' de verilen parametreler kullanılarak yapılan üç grup teorik analizde, I. grupta Çizelge 6.6' da verilen enjeksiyon parametreleri kullanılmıştır. Yapılan bu analiz sonucu ergimiş plastiğin kalıp boşluğundaki akış tipi ve akış burnu profili Şekil 7.6' da verilmiştir. 25 mm genişliğinde 80 mm uzunluğunda bir kalıp boşluğunun 1.12 s' de dolduğu tespit edilmiştir. Ergimiş plastiğin kalıp boşluğuna ilk giriş noktasında fışkırtma tipi akış gerçekleşmiş, 0,5' inci saniyeden sonra kalıp içerisine giren akışkan kalıp kenarlarına doğru dolmuştur. Enjeksiyonla kalıplamada gerçek akış görüntülerinin incelendiği çalışmadan elde edilen video görüntülerinden de benzer akış mekanizması tespit edilmiştir. İnce bir kesitten önü açık ve daha geniş bir alana ergimiş plastik basınçlı bir şekilde enjekte edildiğinde ilk önce fışkırmaya benzer bir yapı oluşmaktadır. Daha sonraki aşamada ise arkadan gelen ergiyik önündeki plastiği iterek kalıp boşluğu dolmaktadır. Kalıp enjeksiyon tezgahına bağlanırken boşluğun uzun kenarı yer düzlemine dik olacak şekilde konumlandığından, hız profilinden akış burnu merkezlerde daha ilerde gerçekleşmiştir. İdeal olmayan akış özelliği gösteren ergimiş plastiklerin genel karakteristik akış davranışı olan bu akış tipi, yapılan bu çalışmada da gözlenmiştir.

Şekil 6.7' de verilen akış burnunun zamana göre ilerlemesi grafiğinden görüldüğü gibi, plastik kalıp boşluğuna girdiğinde 0,05 saniyede yaklaşık 9 mm' lik yol almıştır. Fakat 0,1' inci saniyede alınan yol ise 10 mm dir. İlk 0,5 saniyelik zaman diliminde alınan yol daha sonraki aynı zaman diliminde alınan yoldan çok fazladır. Akışkan ilk önce fışkırtma akış sonra ise kenarlara doğru dolma tipinde gerçekleştiğinden ikinci 0,5 saniyelik zaman diliminde y doğrultusunda fazla yol

almamıştır. 0,1 saniyelik zaman dilimden sonraki her zaman aralığında yaklaşık 7-9 mm arasında yol alınmış olup, toplam dolum süresinin yarısında alınan yol 53 mm civarındadır. Toplam dolum süresinin diğer yarısında alınan yolun ilk yarım dolum süresinde alınan yoldan daha az olmasının sebebi, ısı transferinden dolayı sıcaklığı düşen plastiğin daha viskozitesinin yükselmesidir. Viskozitesi artan ergimiş plastik akışa karşı daha fazla direnç gösterdiğinden, sabit enjeksiyon basıncında aynı zaman aralığında farklı miktarlarda yol almaktadır.

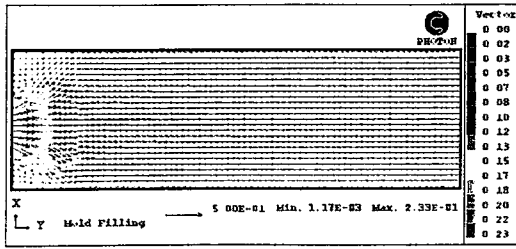
Bir çok akış analizinin yapıldığı çalışmalarda ve akış analizi ve simülasyon yapan paket programlarda, kalıp boşluğu dolana kadar akışkanın sıkıştırılmaz akış kabul edildiği literatür çalışmalarında görülmektedir (1-17). Sıkıştırılabilir akış olarak incelenen bu çalışmaya göre, dolum safhasında ergimiş plastiğin sıcaklık kaybına bağlı olarak yoğunluk değişiminin dikkate alınmasının oldukça önemli olduğu anlaşılmıştır. Yoğunluk değişiminin ihmal edilmesi denklem takımlarının sadeleşmesi ve çözümünün kolaylaşmasına karşılık akış analizi ve dolum süresinin belirlenmesinde bir takım yanlılıkları da beraberinde getirmektedir.

Akış alanındaki sıcaklık ile akış burnundaki sıcaklık da farklı olup, camsı geçiş sıcaklığının altındaki bölgeler katı tabakalar şeklinde farklı renk (yeşil) ile gösterilmiştir. Katılık oranının tespit edilmesi ile akış sırasında katılık derecesi belirlenerek, ergime sıcaklığı ile camsı geçiş sıcaklığı arasındaki sıcaklık değerleri 10 farklı aralığa bölünüp 0 ila 1 arasında değer atanarak katı tabakaların yeri tespit edilmiştir. Sıcaklık değerine dayalı olarak bulunan katılaşmış tabakaların ergimiş plastiğin kalıp yüzeylerine temas eden her bölgesinde ve akış burnunda olduğu tespit edilmiştir.

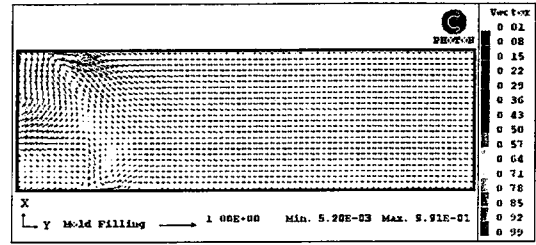
Kalıp boşluğuna giriş noktasında, 220 °C de olan ergimiş plastiğin, boşluk içerisinde ilerlerken her bir zaman aralığında sıcaklığı değişmektedir. Şekil 6.8' de görüldüğü gibi, ergimiş plastiğin sıcaklığı zaman arttıkça düşmüştür. Şekil 6.9 ve Çizelge 6.7' de görüldüğü gibi, akışkanın viskozitesinin giderek artmasına sebep olan sıcaklık, ilk giriş noktasına göre akış alanında 17 °C, akış burnuna yakın bölgede ise, 27 °C civarında azalmıştır. Akış burnuna yakın bölgelerdeki sıcaklık ile akış alanındaki

sıcaklık arasında yaklaşık 10 °C lik bir fark olduğu, hava-plastik ara yüzeyinde ise, katı tabaka oluşacak kadar sıcaklığın düştüğü tespit edilmiştir.

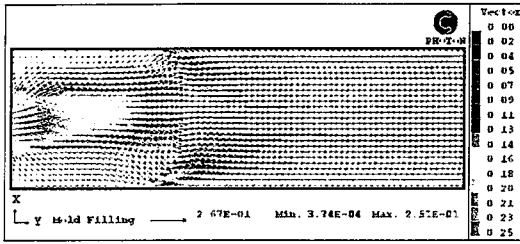
Akış sırasında ergimiş plastiğin sıcaklığının zamana göre hemen hemen doğrusal bir şekilde azaldığı Şekil 6.9' daki grafikten anlaşılmaktadır. Yapılan bu çalışmada, kalıp malzemesinin sıcaklığının değişmediği ve sıcaklığının 40 °C olarak sabit olduğu kabul edilerek hesaplama yapılmıştır. Bu nedenle, ergimiş plastik kalıp içerisinde akarken sıcaklığı doğrusal olarak azalmıştır. Ayrıca, her malzeme için farklı olan ısınma ısısı, ısı iletim katsayısı, genleşme katsayısı gibi parametrelerin sıcaklık ile değişiminin dikkate alınması yapılan analizin daha hassas olmasını sağlayacaktır. Deneysel olarak bulunan bu parametrelerin YYPE I-668 malzemesi için sıcaklık ile değişimi bilinemediğinden yapılan bu çalışmada dikkate alınmamıştır. Akış alanında I. grup enjeksiyon parametreleri ile yağılan teorik analiz ile elde edilen ve zamana göre değişen hız profillerinin vektörel olarak değişimi Şekil 6.10' da verilmiştir.



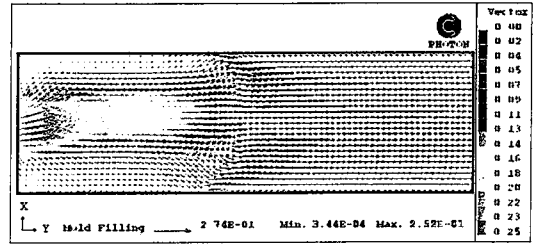
0,05 s



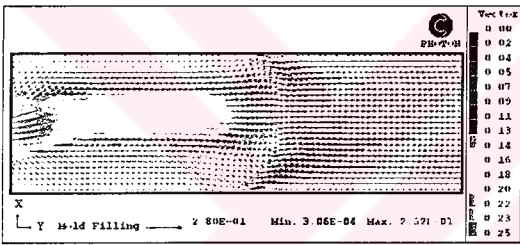
0,1 s



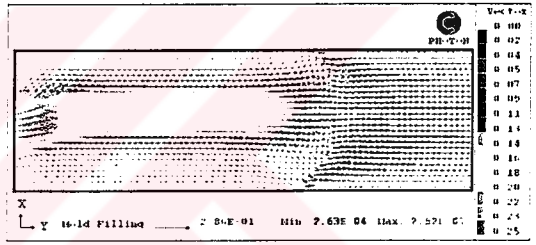
0,3 s



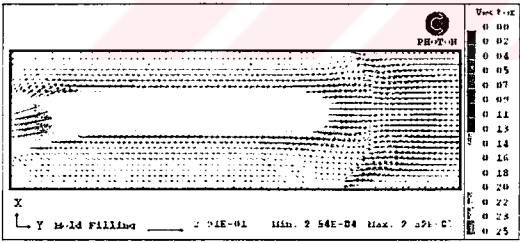
0,4 s



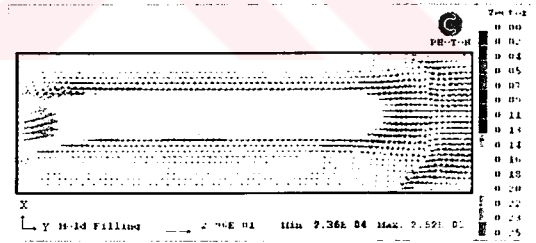
0,5 s



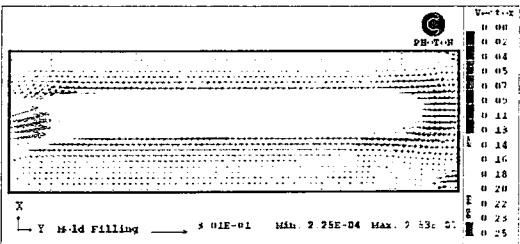
0,6 s



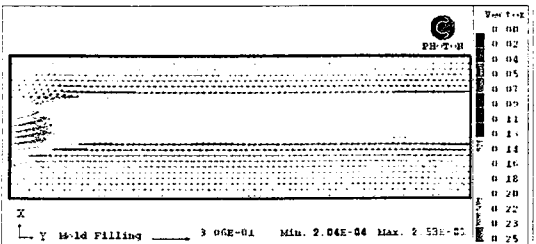
0,7 s



0,8 s

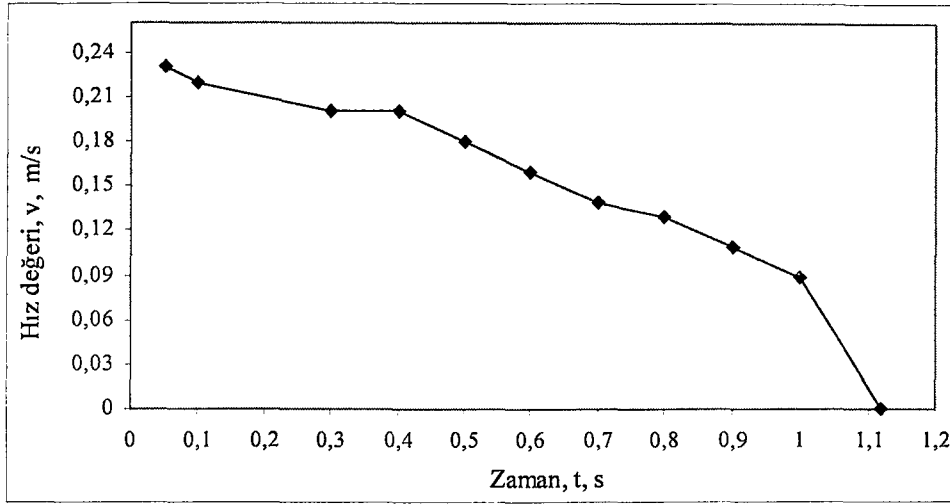


1,0 s



1,12 s

Şekil 6.10. I. Grup analizden elde akış alanındaki hız vektörleri



Şekil 6.11. I. grup enjeksiyon parametrelerine göre akış alanında oluşan zamana göre hız değişimleri

Şekil 6.10' da görüldüğü gibi, hız profilleri genellikle akış burnu profili şeklinde gerçekleşmiştir. Ergimiş plastiğin kalıp boşluğuna girdiği ilk bölgede fişkırmaya akış türü bir akış profili gerçekleştiği için, hız profili de akış alanı içerisine doğru uzanmıştır. Çizelge 6.8' de ergimiş plastiğin kalıp boşluğunu doldurması sırasında oluşan akış burnundaki hız değerleri verilmiştir. 0,05' inci saniyedeki hız profilinin akış burnundaki değeri, 0,23 m/s olarak gerçekleşmiştir.

Çizelge 6.8. I. grup enjeksiyon parametreleri ile yapılan analizde, akış alanı ve akış burnundaki hız değerinin zaman göre değişimi

Dolum süresi, s	Akış burnundaki hız değerleri, m/s
0,05	0,23
0,1	0,22
0,3	0,20
0,4	0,20
0,5	0,18
0,6	0,16
0,7	0,14
0,8	0,13
0,9	0,11
1,0	0,09
1,12	0,00

0,25 m/s' lik giriş hızına sahip ergimiş plastiğin 0,1' inci saniyede hız değeri 0,01 m/s' ye düşmekle birlikte, akışın yönü ağırlıklı olarak yanal yüzeylere doğru

gerçekleşmiştir. İlerleyen zaman dilimlerinde hız profili akış burnu profiline uygun olarak gerçekleşmiştir. Şekil 7.11' de verilen grafikte akış burnundaki hız değerlerinin zamana göre değişimi görülmektedir. Akış burnundaki hız değerleri sürekli azalan şekilde gerçekleştiği ve akışkanın boşluğun sonuna geldiği noktada yüzeye temas ettiğinde sıfır değerinde olduğu görülmektedir. Gerçek akış mantığına uygun olan bu hız profili bu çalışma kapsamında yapılan teorik analiz sonucu da tespit edilebilmiştir.

Akışkan kalıp boşluğunu doldururken, boşluk içerisindeki havayı da iterek ilerlemektedir. Başlangıçta atmosfer basıncında olan havanın sonlara doğru tahliye edilebilirliğine göre basıncında değişme gözlenebilmektedir. Şekil 6.10' da verilen şekillerden de görüleceği gibi akış hızı, giriş bölgesinde en yüksek değerdedir. Plastiğin kalıp içerisindeki ilerlemesi sırasında ise merkezlerde yüksek değerde, kalıp yüzeylerine yaklaştıkça parabolik olarak azalmakta ve tam yüzeylerde ise sıfır değerinde olmaktadır.

Dolum aşamasında kalıp içerisindeki hava, ergimiş plastik-hava ara yüzeyinde var olan ince katı bir tabaka tarafından gerçekleştirilmektedir. İnce katı tabakanın arkasında sürekli beslenen ergiyik haldeki belirli bir basınç, sıcaklık ve hıza sahip olan plastik hem kalıbı doldurmakta hem de havayı tahliye etmektedir. Ergimiş plastiğin kalıp boşluğundaki ilerlemesi sırasında adım adım tahliye edilen hava sıkıştığında, akışa ters yönde bir basınç da uygulamaktadır. Ergimiş plastiğin sıcaklık kaybına bağlı olarak yoğunluğunun ve viskozitesinin akışı zorlaştıracak biçimde değişmesi, hız ve basınç değerlerini düşürmektedir. Bunların yanında akış sırasında hız ve basıncın düşmesine, az da olsa etkisi olduğu düşünülen havanın ters yöndeki etkisi yol açmaktadır.

Kalıp içerisindeki hava, genellikle kalıp ayırma hattında metal plakalar arasındaki ara yüzeyden dışarı atılmaktadır. Havanın ayırma yüzeylerinden tahliye olamadığı durumlarda ya kalıp içerisinde belirli bir bölgede sıkışıp kalmakta ya da havanın tahliye olabileceği boşluklar açılmaktadır. Boşluk içerisinde sıkışıp kalan ve tahliye olamayan havadan dolayı, ürün eksik çıkmakta ve sıkışan havanın bulunduğu

bölgede yanma izi gibi lekeler oluşmaktadır. Moldflow ve benzeri yazılımlarla akış analizleri sırasında ergimiş plastiğin kalıp boşluğunu doldurması sırasında tahliye edilemeyen ve yapı içerisinde sıkışıp kalan havanın yerleri tespit edilebilmektedir. Sıkışıp boşluk içerisinde kalan ve bulunduğu bölgeye plastiğin dolmasını engelleyen havanın dışarı atılabilmesi için iki yöntem kullanılmaktadır. Birincisi, enjeksiyon parametrelerinin değiştirilmesi ile dolum tipinin ayarlanması ve akış burnunun istenilen profilde gerçekleşmesi ve havanın sıkışmayarak kalıptan dışarı atılması sağlanmaktadır. Enjeksiyon parametreleri ile dolum tipinin istenildiği gibi değiştirilemediği durumlarda, kalıp üzerinde fiziki değişikliklerin yapılması gerekmektedir. İkinci yöntem olan bu tip düzenlemede, dağıtıcı kanallardan kalıp boşluğuna geçiş olan girişin yeri, boyutları ve sayısının değiştirilmesi çözüm olarak kullanılabilir. Bununla da istenildiği gibi sonuç elde edilemediğinde kalıbın yapısında değişikliğe gidilerek belirlenen yerlerde gözenekli yapıya sahip çelik kalıp malzemesi kullanılarak sıkışan havanın dışarı atılması sağlanmaktadır.

II. grup enjeksiyon parametrelerine göre yapılan akış analizinde, enjeksiyon sıcaklığı 220 °C, enjeksiyon basıncı 5 MPa ve enjeksiyon hızı 0,45 m/s olarak alınmıştır. Enjeksiyon hızının değişiminin incelendiği bu analiz safhasında, hız değeri 0,25 m/s' den 0,45 m/s' ye çıkarılmıştır. Buna göre, elde edilen dolum tipi ve doldurma süreleri Şekil 7.12' de görülmektedir. Akışkanın kalıp boşluğuna ilk giriş tipinin tamamen fışkırtma (jet) akış olarak adlandırılan bir akış görüntüsünde olduğu tespit edilmiştir. II. grup enjeksiyon parametrelerine göre yapılan analizde, ergimiş plastiğin kalıp boşluğunu doldurma süresi 0,63 s olarak gerçekleşmiştir. Hız değerinin 0,25 den 0,45 m/s ' ye çıkarılması sonucu kalıp boşluğu % 47,5 daha kısa sürede dolmuştur. Ergimiş plastik, boşluk içerisinde 0,05' inci saniyede 17 mm, 0,1' inci saniyede ise 4,5 mm' lik artışla 21,5 mm yol almıştır. I. grup enjeksiyon parametrelerine göre yapılan analizde, 0,05' inci saniye ile 0,1' inci saniyelerde doldurulan mesafenin sırasıyla 9 mm ve 10 mm dir. Her iki grup analizden elde edilen sonuçlarda ilk 0,1' inci saniyede, birinci grupta doldurulan kalıp içerisinde ulaşılan mesafe 10 mm iken ikinci grup enjeksiyon değerleri ile yapılan analizde 21,5 mm yol alındığı görülmektedir. Yani, I. grup enjeksiyon parametreleri ile yapılan sayısal analizde 0,05' inci saniyede kalıp boşluğunun %11,25' i, 0,1' inci saniyede ise % 12,5' i

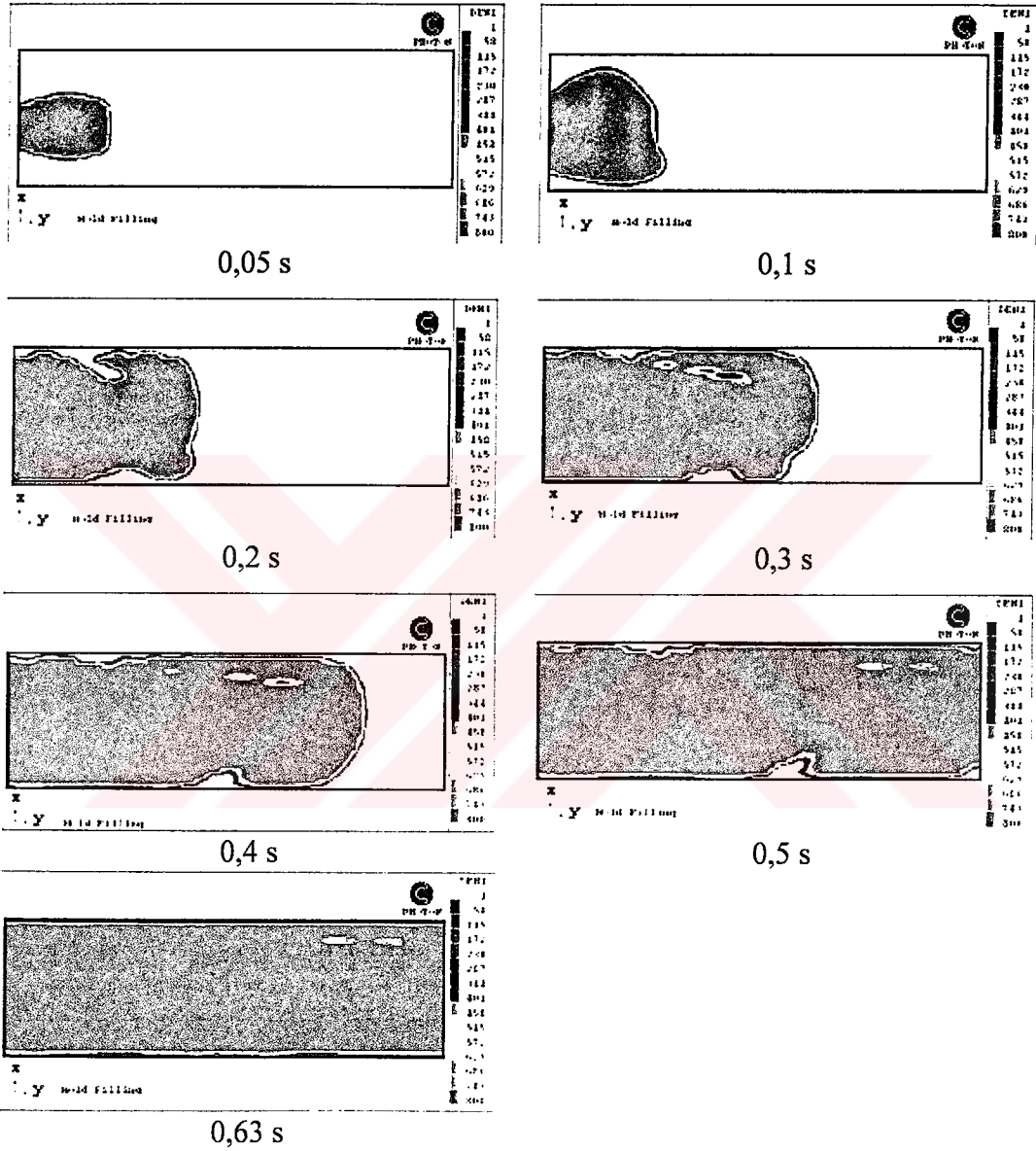
dolarken, hızın 1,8 kat artırılması sonucu 0,05' inci saniyede kalıp boşluğunun yaklaşık % 21' i, 0,1' inci saniyede ise yaklaşık % 27' si dolmuştur. 0,3' üncü saniyede ise, I. grup sayısal analizde 28 mm' lik kısım doldurulurken II. grup sayısal analizde ise 50 mm' lik bölge ergimiş plastik ile doldurulmuştur. Buradan da anlaşıldığı gibi, enjeksiyon hızının kalıp boşluğunu dolum süresi üzerinde etkisinin birincil derecede öneme sahip olduğu anlaşılmaktadır.

Enjeksiyon hızının artırılması ile kalıp boşluğunun daha kısa sürede doldurulabilmesine rağmen, akışın kalıp boşluğunda düzgün bir şekilde ilerleyip havayı tahliye edebilmesi ve hava kabarcıklarının yapı içerisinde kalması tehlikesi dikkatten kaçmamalıdır. Şekil 6.12' de 0,2' inci saniyedeki akış görüntüsünden anlaşılabileceği gibi önce ilerleyen ve sonra gerideki plastik ile birleşen bölgede kaynak hattı oluşumu kaçınılmazdır. Plastik parçaların mekanik mukavemetlerini olumsuz etkileyen bu kaynak hattı oluşumu, enjeksiyon işleminde mümkün olduğunca kaçınılması gereken bir durumdur.

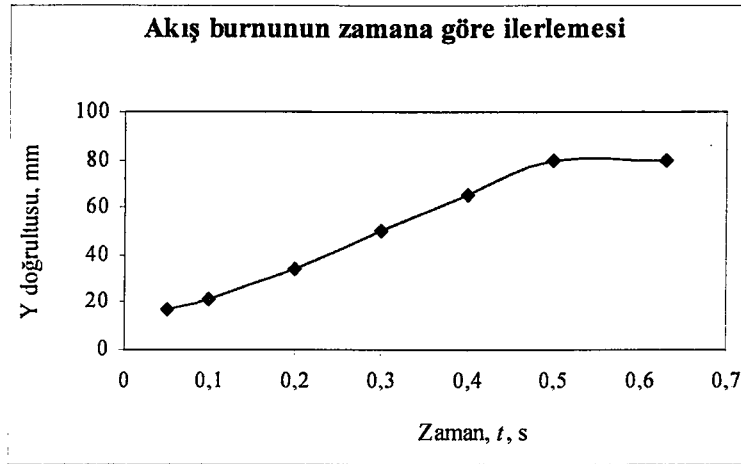
Enjeksiyon hızının yüksek olması ile kalıp boşluğunun daha kısa sürede doldurulabildiği Şekil 6.12' de verilen analiz görüntülerinden anlaşılmaktadır. Literatürdeki enjeksiyon hızı ile dolum süresi arasındaki ilişkinin de aynı doğrultuda olduğu bilinmektedir (7, 25, 35, 54, 64-67). I. grup enjeksiyon parametrelerinin kullanıldığı analizde 1,12 saniyede dolan kalıp boşluğu II. grupta enjeksiyon hızının 0,25 m/s' den 0,45 m/s' ye çıkması ile 0,63 saniyede dolmuştur. Literatüre uygun olarak gerçekleşen, II. grup enjeksiyon parametreleri ile yapılan akış analizinden anlaşıldığı gibi enjeksiyon hızı artışına bağlı olarak kalıp boşluğu daha kısa sürede dolmuştur (Şekil 6.13).

Akış sırasında ergimiş plastik kalıp içerisinde akarken sürekli ısısını kaybetmektedir. I. grupta akış burnundaki sıcaklık 193 °C' ye kadar düşmüştür. İkinci grup analizde ise Şekil 6.14 ve Şekil 6.15' de görüldüğü gibi akış burnundaki sıcaklık 201 °C' ye düşmüştür. Sadece enjeksiyon hızının 0,2 m/s artması ile akış burnundaki sıcaklığın 7 °C daha fazla olduğu görülmektedir. Bu çalışma kapsamında ele alınan 25x80 mm

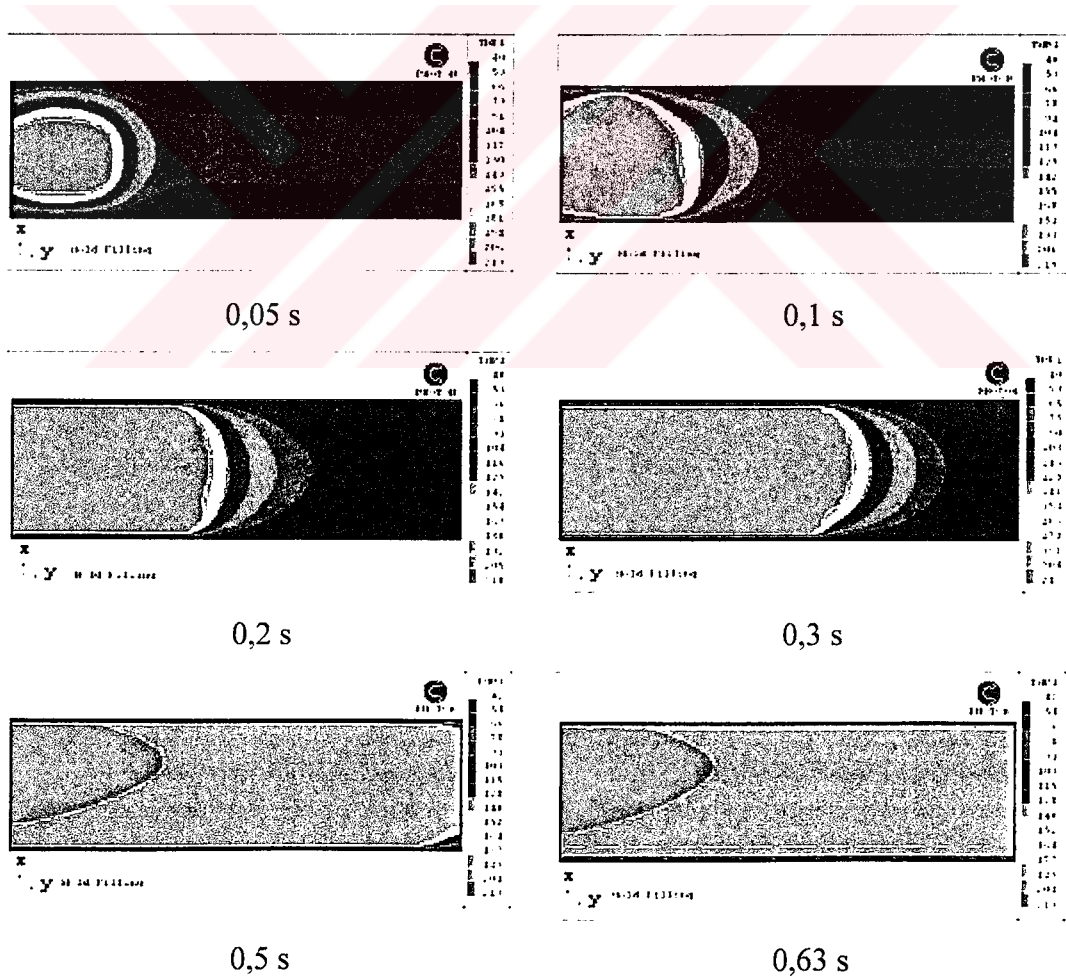
boyutlarındaki dikdörtgen şeklindeki kalıp boşluğunda yaklaşık 7 °C' lik bir fark, büyük boyutlu ve karmaşık parçalarda büyük önem kazanmaktadır.



Şekil 6.12. II. Grup enjeksiyon parametreleri için, sayısal analiz sonucu elde edilen ergimiş plastiğin kalıp boşluğunu doldurma tipi görüntüleri



Şekil 6.13. II. grup enjeksiyon parametreleri için, akış burnunun Y doğrultusunda zamana göre ilerlemesi



Şekil 6.14. II. Grup analiz sonucu akış burnundaki ve kalıp boşluğundaki sıcaklığın zamana göre değişimi

Şekil 6.15' de ki grafikte görüldüğü gibi, akış alanındaki sıcaklık ile akış burnundaki sıcaklıklar arasında yaklaşık 10 °C lik bir fark olduğu görülmektedir. Akış burnu sürekli olarak kendinden daha soğuk hava ile temas etmekte ayrıca, arkadan gelen ve sürekli besleme yapan ergiyiğin ısı da her bir zaman adımında düşmektedir. Bu nedenle ergiyiğin hava-ergiyik plastik arayüzündeki sıcaklık değeri, akış alanındaki değerden daha düşüktür. Kalıp içerisine akan ve boşluğu dolduran ergiyik ile kalıp malzemesi arasındaki sıcaklık aynı değerde olup, kararlı hale gelinceye kadar zamana bağlı olarak ısı transferi gerçekleşmektedir. Enjeksiyon hızının artması ile kalıp boşluğu daha kısa sürede dolduğundan zamana bağlı olarak gerçekleşen ısı transferinde daha az ısı kaybı olmaktadır. Böylece, kalıp boşluğu dolana kadar geçen sürede sıcaklık kaybı en az olduğunda, kalıp boşluğu başarılı bir şekilde doldurulmaktadır.

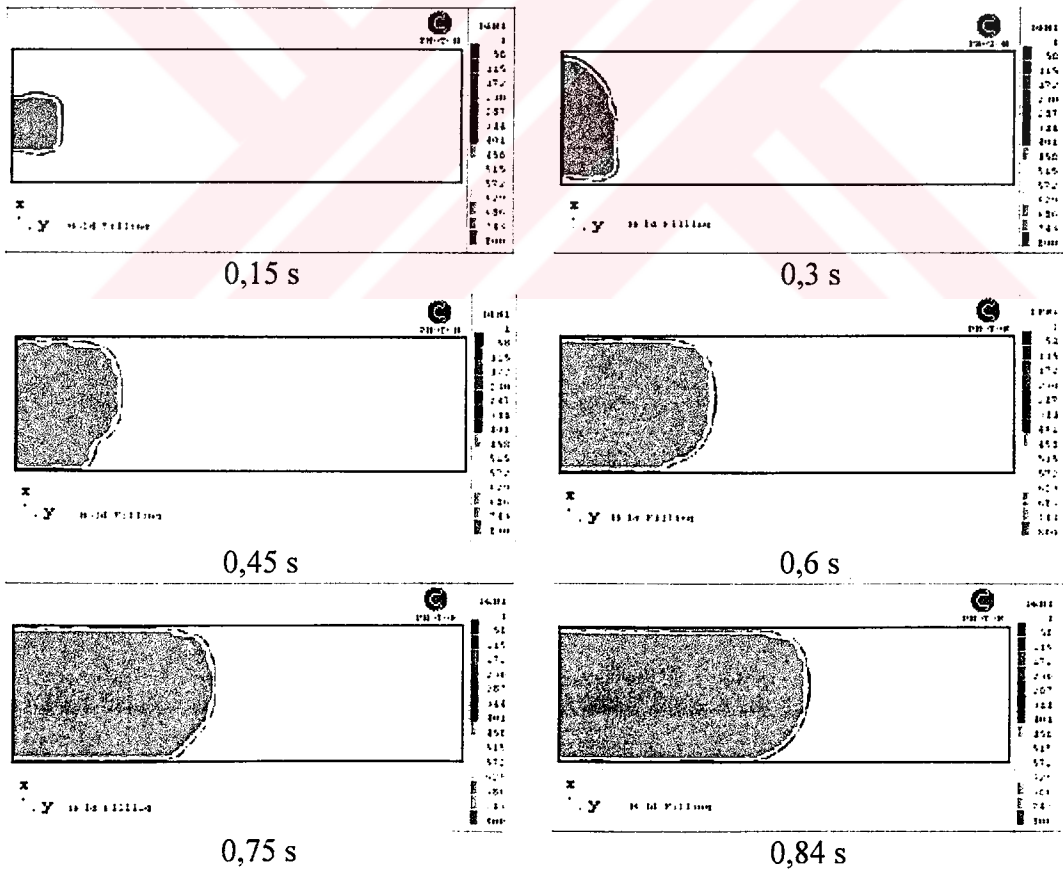


Şekil 6.15. II. grup enjeksiyon parametreleri ile yapılan analizde, akış alanındaki ve akış burnunda zamana göre sıcaklık dağılımı (A: Akış alanının sıcaklığı, B: akış burnuna yakın bölgenin sıcaklığı)

Çizelge 6.9. II. grup enjeksiyon parametreleri ile yapılan analizde, akış alanı ve akış burnundaki sıcaklığın zaman göre dağılımı

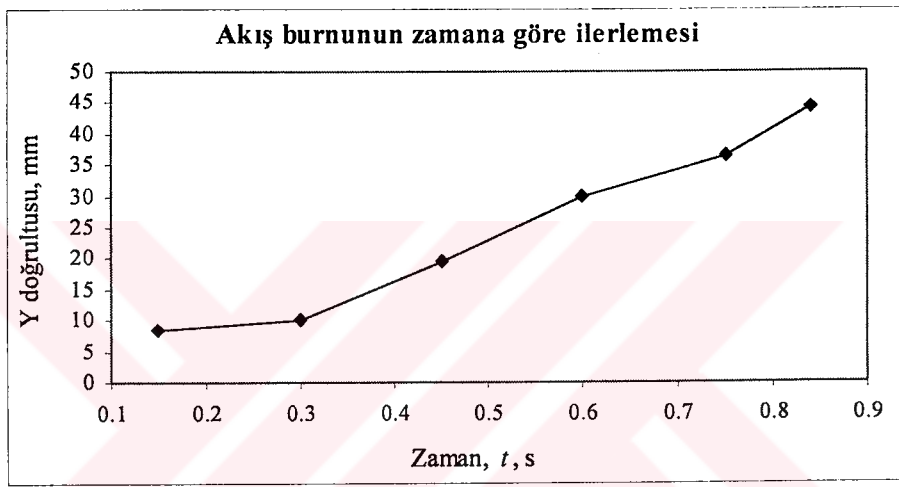
	Zaman aralığı, s						
	0,05	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,63
	Sıcaklık değerleri, °C						
Akış alanı	219	219	218	216	215	213	213
Akış burnu	206	206	205	204	202	201	201

III. grup enjeksiyon parametreleri ile yapılan akış analizinde enjeksiyon basıncı 5 MPa' dan 4 MPa' a düşürülmüştür. Buna göre elde edilen akış görüntüleri Şekil 6.16' da verilmiştir. Akış tipinin fazla değişmediği fakat 0,84' üncü saniyeye kadar kalıp boşluğunun yaklaşık yarısı dolduktan sonra kalıp boşluğunda akışın olmadığı tespit edilmiştir. Akış sırasında, ergimiş plastiğin sıcaklığı azalınca akışkanlığını kaybedip akışa karşı direnç gösterdiği ve katılaştığı belirlenmiştir. Eksik basım olarak bilinen bu enjeksiyon hatası düşük enjeksiyon parametrelerinin seçilmesi sonucu oluşmaktadır. Bu tür problemlerin giderilebilmesi için ya enjeksiyon basıncı/enjeksiyon hızı değerlerinin artırılması ya da enjeksiyon sıcaklığının artırılması kaçınılmazdır. Bu değerlerin fazla olması durumunda ise çapaklanma ve kalıcı gerileme gibi problemler oluşmaktadır. Bu nedenle en uygun enjeksiyon parametrelerinin seçilmesi gerekmektedir.



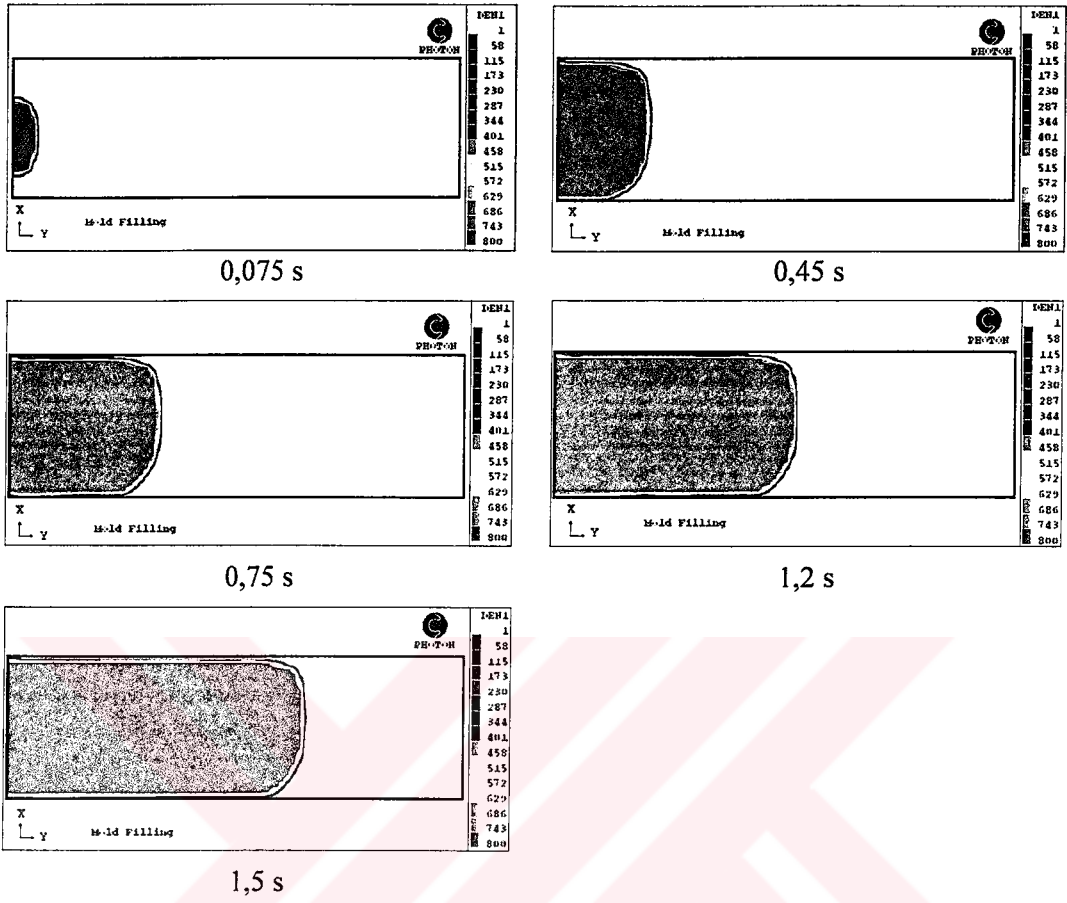
Şekil 6.16. III. grup enjeksiyon parametreleri için, sayısal analiz sonucu elde edilen ergimiş plastiğin kalıp boşluğunu doldurma tipi görüntüleri

Ergimiş plastiğin kalıp boşluğunda zamana göre ilerlemesini veren grafik Şekil 6.17’ de görülmektedir. Buna göre, dolumun ilk üç saniyesindeki grafiğin eğimi daha sonraki zaman dilimlerine ait grafiğin eğiminden daha düşüktür. Bunun muhtemel sebebi olarak ilk girişte hem kalıbın ısınması hem de akışkanın kalıp boşluğuna doğru fişkırdıktan sonra ileri doğru gitme yerine yanlara doğru akması olduğu düşünülmektedir.



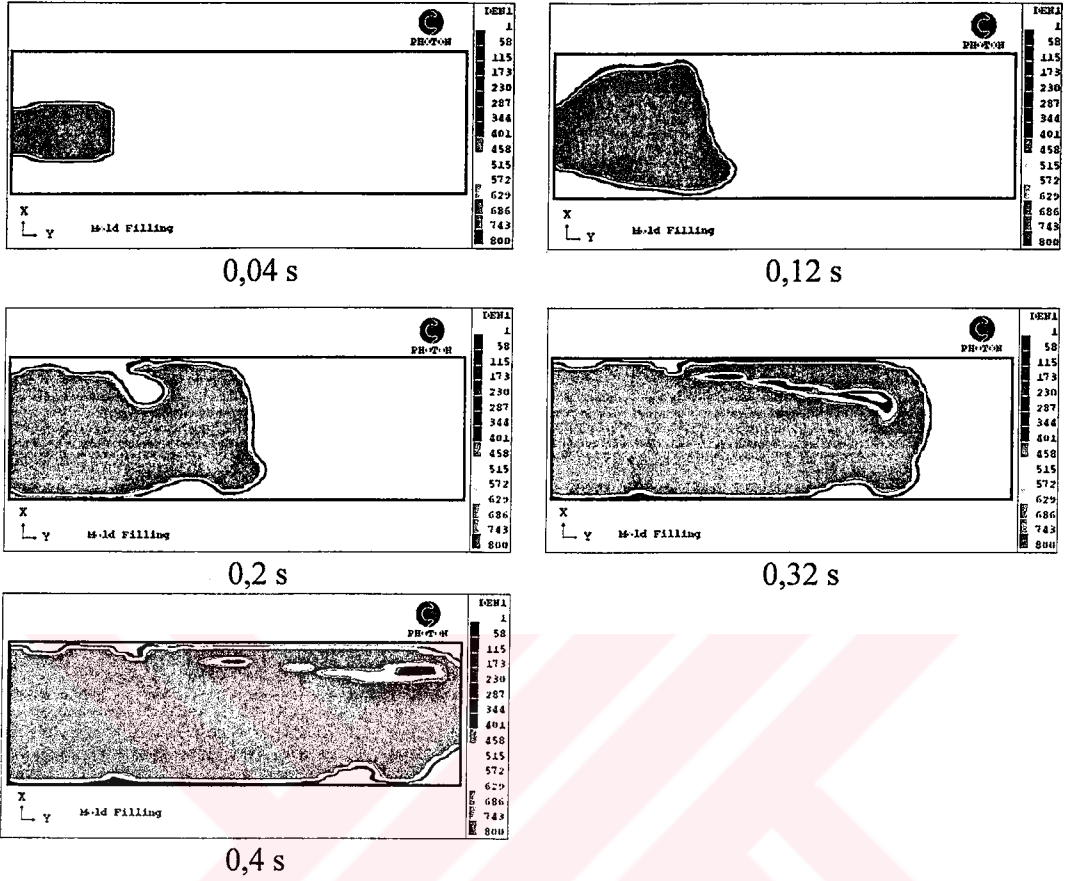
Şekil 6.17. III. grup enjeksiyon parametreleri için, akış burnunun Y doğrultusunda zamana göre ilerlemesi

Enjeksiyon hızı olarak 0,1 m/s, 5MPa basınç ve 220 °C ergiyik sıcaklığına göre yapılan akış analizi sonucuna göre kalıp boşluğu 2,3 s’ de dolmuştur (Şekil 6.18). Kalıp boşluğunun dolum tipi, I. ve II. Grup akış analizindeki dolum tipine benzer bir yapıda olduğu görülmektedir. Enjeksiyon hızının 0,25’ den 0,1 m/s’ ye düşürülmesi (enjeksiyon hızı % 40 düşürülmüştür) sonucu kalıp boşluğu yaklaşık iki kat (% 105) daha uzun sürede dolmuştur.



Şekil 6.18. IV. grup enjeksiyon parametreleri için, sayısal analiz sonucu elde edilen ergimiş plastiğin kalıp boşluğunu doldurma tipi görüntüleri

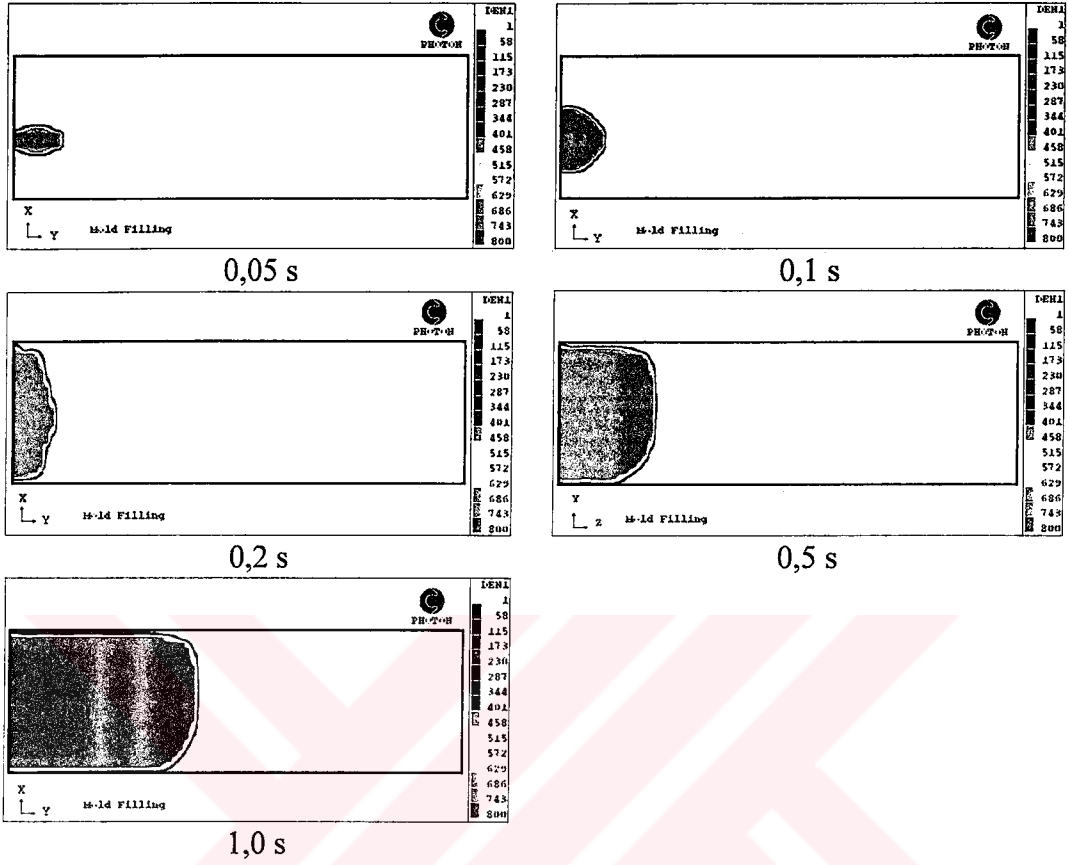
VI. grup akış analizinde elde edilen akış görüntüleri Şekil 6.19' da verilmiştir. Enjeksiyon hızı olarak 0,55 m/s' nin kullanıldığı bu akış analizinde Şekil 6.19' da görüldüğü gibi 0,04' üncü saniyedeki akış, fişkırmaya şeklinde gerçekleşmiştir. Hızın etkisi ile kalıp içerisine doğru fişkıran ergimiş plastik 0,1' inci saniyeden sonra yanlara doğru akmaktadır. Özellikle 0,2' inci saniyedeki akış burnunu veren görüntüden anlaşıldığı gibi, kalıp boşluğuna yüksek bir hızla giren akışkan, kalıp içerisinde istenmeyen düzensiz bir akış tipine (türbülans) sahiptir. Enjeksiyon hızının 0,55 m/s olarak seçilmesi ile kalıp boşluğu 0,41 saniye gibi düşük bir sürede doldurmasına rağmen, gerçekleşen akış burnu tipinin istenmeyen bir profilde olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 6.19. VI. grup enjeksiyon parametreleri için, sayısal analiz sonucu elde edilen ergimiş plastiğin kalıp boşluğunu doldurma tipi görüntüleri (devam)

VII. grup akış analizinde giriş kesitinin $\frac{1}{2}$ oranında daraltılmasıyla yapılan akış analizinde kalıp boşluğu 2,4 saniyede dolmuştur. Kesitin daralması nedeniyle giriş kısmında fişkırtma tipi akış daha belirgin olarak gerçekleşmiştir. Ergiyiğin kalıp boşluğuna ilk giriş anlarından sonraki zaman dilimlerinde akış tipi I, III, IV ve V' inci grup analizlerdeki akış tipine benzer bir yapıda olduğu tespit edilmiştir.

7 farklı grup olarak yapılan sayısal analiz sonuçlarına göre, kalıp boşluğunun dolum süreleri Çizelge 6.10' da verilmiştir. Enjeksiyon hızı değişimine göre kalıp boşluğunun dolum süreleri ise Çizelge 6.11' de verilmiştir.



Şekil 6.20. VII. grup enjeksiyon parametreleri için, sayısal analiz sonucu elde edilen ergimiş plastiğin kalıp boşluğunu doldurma tipi görüntüleri

Çizelge 6.10. Farklı enjeksiyon şartlarına göre yapılan analizlerde kalıp boşluğunun dolun süreleri

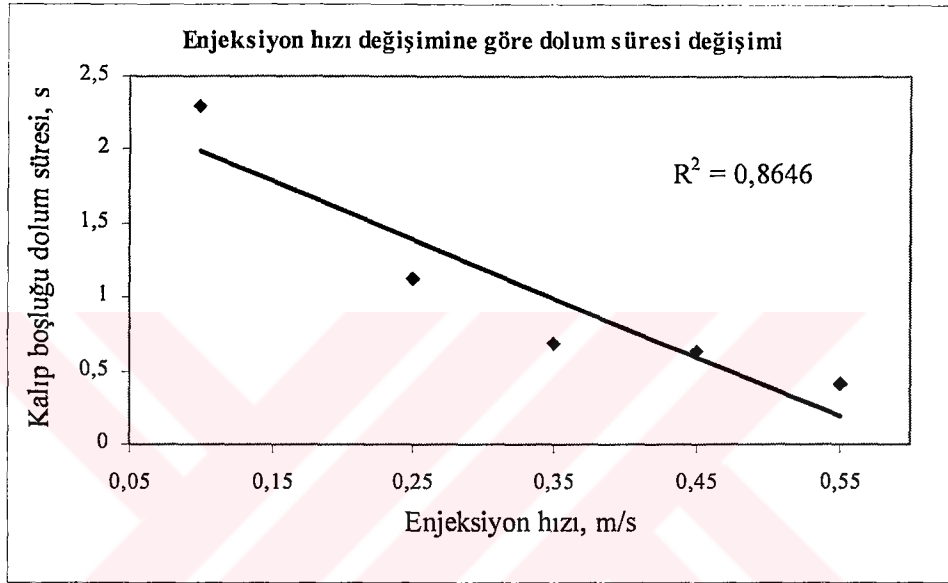
	I. Grup	II. Grup	III. Grup	IV. Grup	V. Grup	VI. Grup	VII. Grup
Enjeksiyon hızı, m/s	0,25	0,45	0,25	0,1	0,35	0,55	0,25
Kalıp boşluğu dolun süreleri, s	1,12	0,63	0,84	2,3	0,69	0,41	2,4

Çizelge 6.11. Enjeksiyon hızına göre kalıp boşluğunun dolun

Enjeksiyon hızı, m/s	0,1	0,25	0,35	0,45	0,55
Kalıp boşluğu dolun süreleri, s	2,3	1,12	0,69	0,63	0,41

Enjeksiyon basıncı, $p = 5 \text{ MPa}$, Enjeksiyon sıcaklığı, $T = 220 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Şekil 6.21’ de verilen grafikte enjeksiyon hızı değişimine göre kalıp boşluğu dolum süreleri arasındaki ilişki verilmiştir. Grafikten anlaşılabileceği gibi, enjeksiyon hızı arttıkça dolum süresi doğrusal olarak azalmaktadır ($R^2 = 0,8646$). Buna göre, endüstriyel anlamda bir ürünün elde edilebilmesi için gerekli olan üretim süresi, enjeksiyon hızının artırılması ile azalmaktadır.



Şekil 6.21. Enjeksiyon hızı değişimine göre kalıp boşluğu dolum süreleri grafiği

Fakat, enjeksiyon hızının artması sonucu kalıp içerisindeki ergimiş plastiğin akışı düzensiz ve dalgalı olduğundan yapı içerisinde kaynak hattı, hava kabarcığı kalması vb. gibi istenmeyen enjeksiyon hataları oluşabilmektedir. Ayrıca, hava kabarcığının tahliye olamadığı ve belirli bölgelerde sıkışıp kaldığı durumlarda, havanın bulunduğu bölgeye plastik giremeyeceğinden eksik basım olarak bilinen kalıplama hatası oluşmaktadır. Endüstriyel uygulamalarda en uygun dolum tipi, ergimiş plastik kalıp içerisinde ilerlerken beraberinde önündeki havayı da düzenli bir şekilde süpürerek dışarı attığı durumlarda gerçekleşmektedir. Yüksek enjeksiyon hızı ve yüksek basınç değerlerinde kalıp boşluğu kısa sürede dolmakla birlikte, akışın istenmeyen tipte olmasından dolayı kalıplanan ürünün görünümü, kalitesi ve mekanik mukavemetleri düşmektedir.

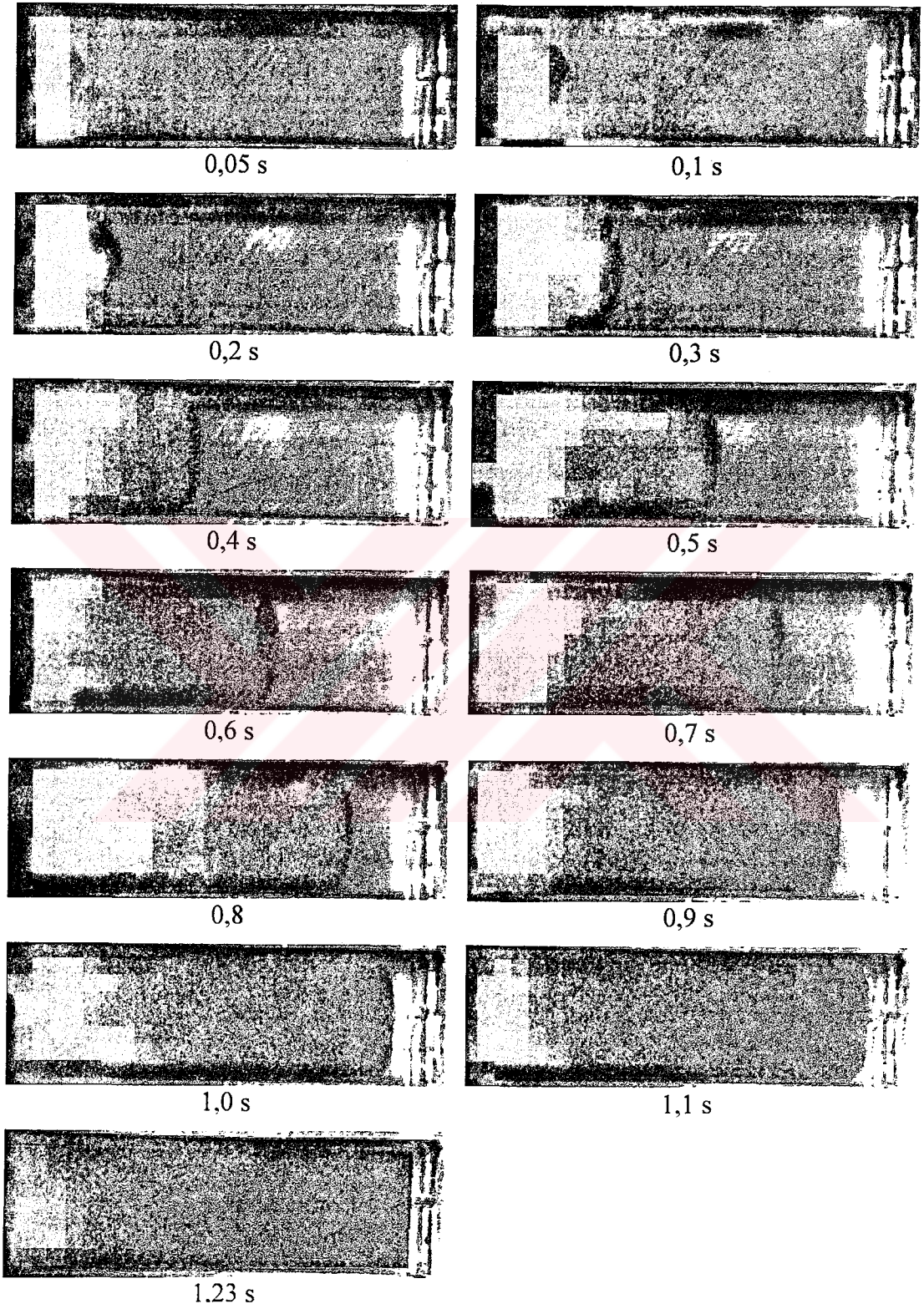
Navier-Stokes denklemlerinin SKH yöntemi ile çözümlenmesi ile elde edilen akış analizinin ve dolum tipinin gerçek akış görüntüleri ile karşılaştırılabilmesi için bir

deney düzeneği tasarlanıp imal edilmiştir. Bir tarafına cam plaka yerleştirilen kalıplama boşluğu içindeki akışın nasıl gerçekleştiğini gözlemleyebilmek için, deney setine bir ayna yerleştirilmiş ve aynaya yansıyan görüntüler dijital video kamera ile kayıt edilmiştir. Çizelge 6.12' de verilen enjeksiyon şartlarında, dört farklı grup deney yapılarak gerçek akış görüntüleri elde edilmiştir.

Deneylerin yapıldığı bilgisayar kontrollü olan enjeksiyon tezgahında, basınç, sıcaklık ve enjeksiyon vida hızı bilgisayardan ayarlanabilmektedir. Enjeksiyon sırasında ergimiş plastiğin kalıp boşluğundaki gerçek akışı, video kamera ile kaydedilmiştir. Video kamera görüntüleri Delphi programlama dilinde hazırlanan bir program vasıtasıyla .jpg ve .bmp formatında dönüştürülmüştür. Elde edilen görüntülerden kalıp boşluğundaki gerçek akışın nasıl geliştiği ve dolum süreleri tespit edilmiştir.

Çizelge 6.12. Gerçek akış görüntülerinin elde edildiği deneysel akış analizinde kullanılan değişik şartlar altındaki enjeksiyon parametreleri

Enjeksiyon parametresi	I. Grup	II. Grup	III. grup	VI. grup
Enjeksiyon sıcaklığı (nozul sıcaklığı)	220 °C	220 °C	220 °C	225 °C
Enjeksiyon basıncı	5 MPa	5 MPa	4 MPa	5 MPa
Enjeksiyon vida hızı	47 mm/s	55 mm/s	47 mm/s	47 mm/s

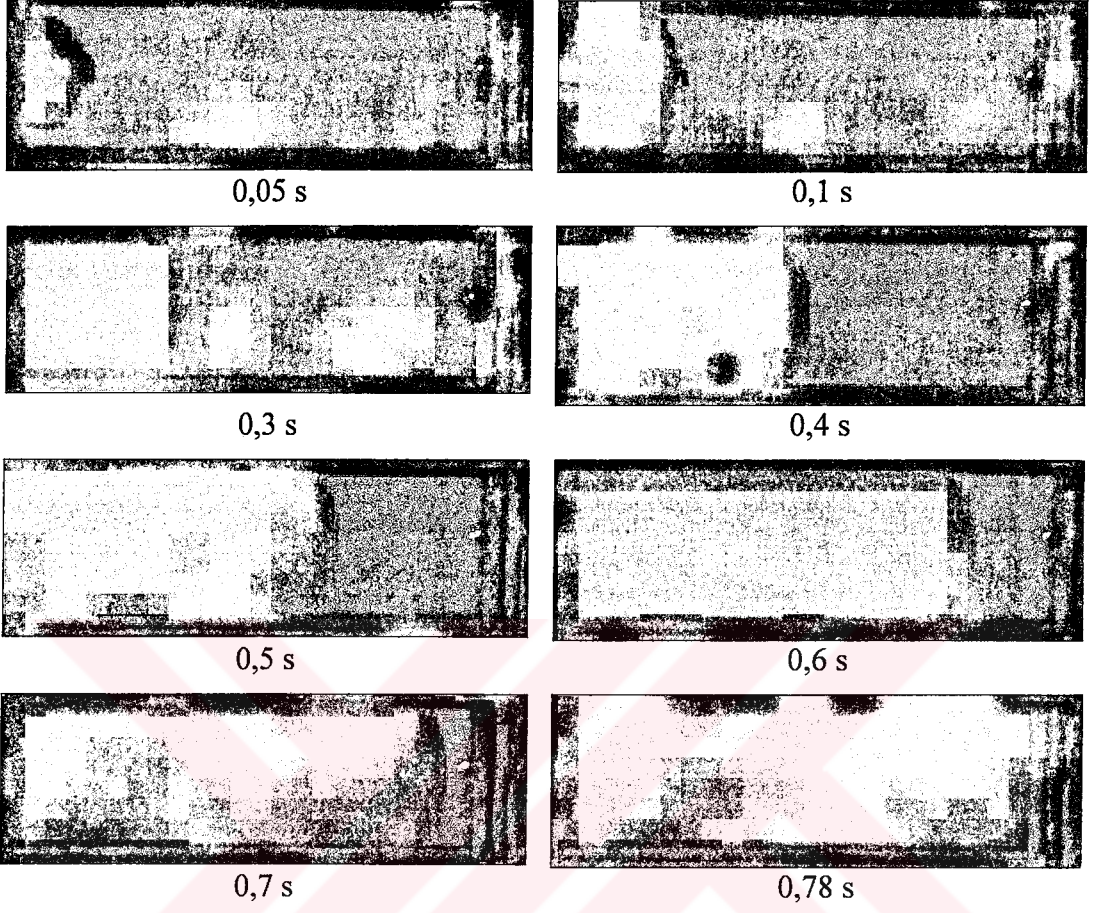


Şekil 6.22. I. grup deneylerden elde edilen, YYPE malzemesinin kalıp boşluğundaki gerçek akış görüntüleri ($T = 220\text{ }^{\circ}\text{C}$, $p = 5\text{ MPa}$. Vida hızı= 47 mm/s)

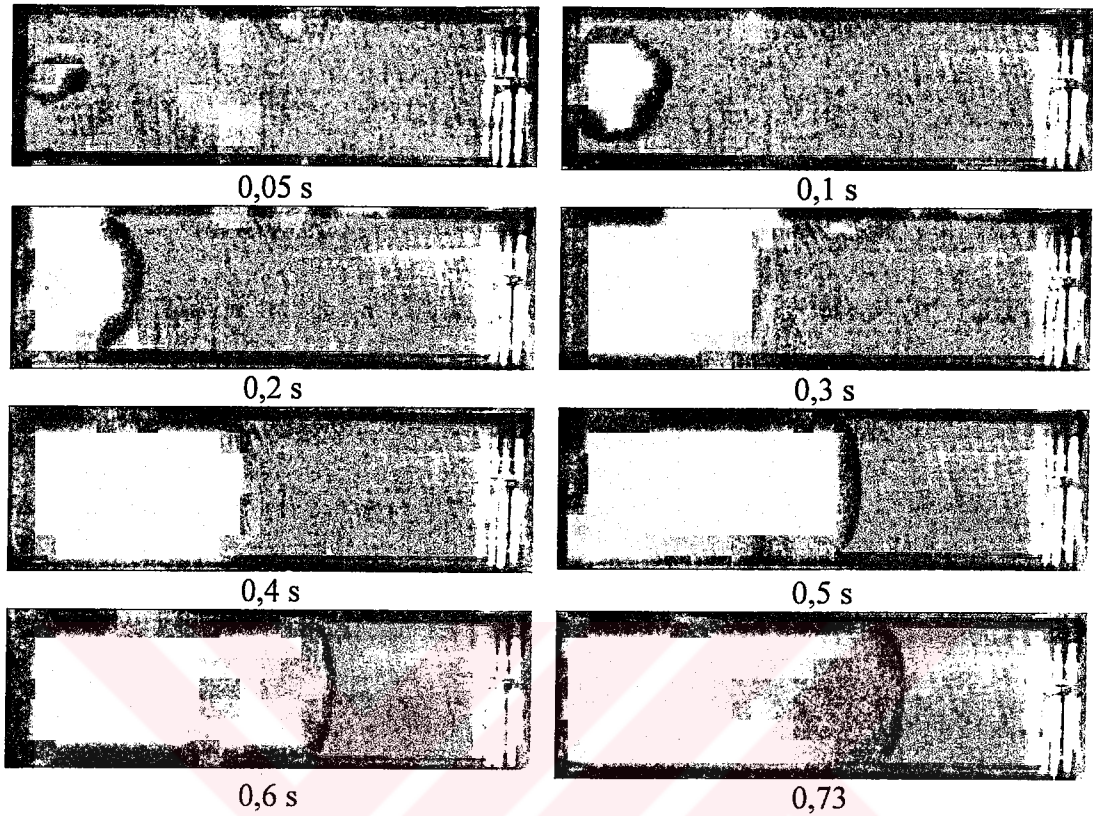
I. grup enjeksiyon parametreleri olarak Çizelge 6.12' de görüldüğü gibi, enjeksiyon sıcaklığı 220 °C, enjeksiyon basıncı 5 MPa ve enjeksiyon vida hızı 47 mm/s olarak ayarlanmıştır. Deneme baskılarıyla kalıp sıcaklığı kararlı hale geldikten sonra, yapılan enjeksiyon işleminde elde edilen akış görüntüleri Şekil 6.22' de verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi, kalıp boşluğu 1,23 saniyede dolmuştur. Aynı enjeksiyon şartları için yapılan teorik analizde, kalıp boşluğunun 1,12 saniyede dolduğu Şekil 6.6' da görülmektedir. Gerçek akış ile teorik olarak elde edilen akış analizinde, dolum süreleri arasında 0,11 saniyelik bir fark bulunmakta olup, hata payının % 9,16 olduğu tespit edilmiştir.

Bu fark, teorik analizde temel denklemlerin çözümlenebilmesi için bazı parametrelerde kabuller ve ihmaller yapılmasından kaynaklanmaktadır. Ayrıca, sıcaklık ve basınç karşısındaki değişim miktarı bilinmeyen ısı transferi katsayısı, ısı iletim katsayısı, ısınma ısısı ve yoğunluğun basınç karşısındaki değişim miktarı gibi bazı parametrelerin değerinin sabit kabul edilmesi bu sapmaya sebep olabilmektedir. Dolum sürelerinin bir miktar sapma göstermesine karşın, teorik olarak elde edilen akış analizi ile gerçek akış görüntülerindeki akış burnu profilinin büyük oranda benzediği görülmektedir. Gerçek akışta kalıp boşluğunun bir tarafında cam plaka olduğu için, ısı transferi olayının farklı gerçekleşmesi, yolluk ve dağıtıcı kanallardan geçen ergiyeğin basıncının ve hızın azalması, dolum sürelerinin farklı olmasına etki eden faktörler olduğu düşünülmektedir.

II. grup deneysel çalışmada enjeksiyon vida hızının 55 mm/s 'ye çıkarılması ile elde edilen kalıp boşluğundaki gerçek akış görüntüleri Şekil 6.23' de verilmiştir. Enjeksiyon vida hızının artmasıyla kalıp boşluğunun dolum süresi, I. grupta yapılan deneylerdeki dolum süresinden yaklaşık % 63 daha kısa sürede gerçekleşmiştir. Şekil 6.22' deki görüntülerle Şekil 6.23' deki görüntüler karşılaştırıldığında, akış tiplerinin benzediği fakat, dolum sürelerinin farklı olduğu tespit edilmiştir.



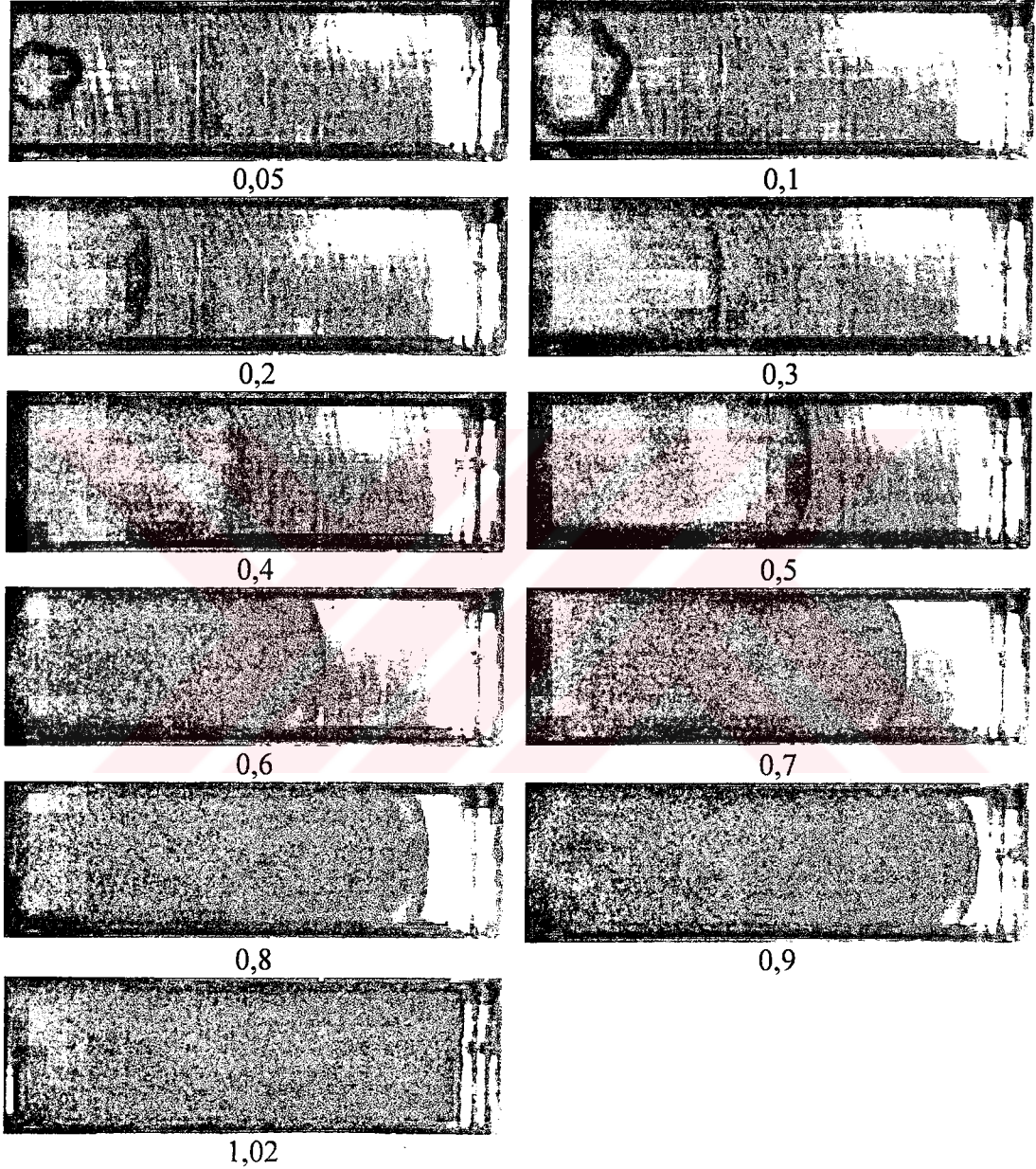
Şekil 6.23. II. grup deneyden elde edilen, YYPE malzemesinin kalıp boşluğundaki gerçek akış görüntüleri ($T=220\text{ }^{\circ}\text{C}$, $p=5\text{ MPa}$, $V_{\text{ida}}=55\text{ mm/s}$)



Şekil 6.24. III. grup deneyden elde edilen, YYPE malzemesinin kalıp boşluğundaki gerçek akış görüntüleri ($T = 220\text{ }^{\circ}\text{C}$, $p = 4\text{ MPa}$, Vida hızı= 47 mm/s)

III. grup deneylerde enjeksiyon parametreleri, I. grupta olduğu gibi enjeksiyon sıcaklığı $200\text{ }^{\circ}\text{C}$, enjeksiyon vida hızı 47 mm/s olarak ayarlanmıştır. Enjeksiyon basıncı ise 4 MPa olarak seçilmiştir. Enjeksiyon basıncının değişiminin gözlemlendiği bu grup deneylerde elde edilen akış görüntüleri Şekil 6.24’ de verilmiştir. Şekil 6.24’ den anlaşıldığı gibi, enjeksiyon basıncının 4 MPa ’ a düşürülmesi ile yapılan enjeksiyon işleminde gerçek akış görüntülerinin Şekil 6.16’ da verilen sayısal analiz sonucu elde edilen akış görüntülerinin benzediği görülmektedir. Deneysel olarak yapılan analizde ergimiş plastiğin kalıp boşluğuna $0,73$ ’ üncü saniyeye kadar dolduğu ve daha sonra akışın durduğu ve kalıp boşluğunun dolmadığı tespit edilmiştir. Teorik olarak elde edilen akış simülasyonunda ise $0,84$ ’ üncü saniyeye kadar kalıp içerisinde akışın gerçekleştiği ve bu aşamadan sonra akışın durduğu tespit edilmiştir. Eksik basınç olarak adlandırılan bu işlem bir enjeksiyon hatası olarak bilinmektedir. Gerçekleştirilen bu çalışmaya göre, eksik basınç hatası olarak bilinen kalıp boşluğunun dolmamasında sayısal analiz

sonucu elde edilen akış görüntüsü ile (Şekil 6.16) gerçek akış görüntülerinin (Şekil 6.24) oldukça uyum içinde oldukları tespit edilmiştir.



Şekil 6.25. IV. grup deneyden elde edilen, YYPE malzemesinin kalıp boşluğundaki gerçek akış görüntüleri ($T=225\text{ }^{\circ}\text{C}$, $p=5\text{ MPa}$, $V_{\text{ida}}=47\text{ mm/s}$)

VI. grup deneylerde ise, enjeksiyon basıncı 5 MPa ve enjeksiyon hızı 47 mm/s olarak ayarlanmış olup, enjeksiyon sıcaklığı $220\text{ }^{\circ}\text{C}$ ' den $225\text{ }^{\circ}\text{C}$ ' ye çıkarılmıştır. Şekil 6.25' de akış görüntüleri verilen bu deneysel sonuçlara göre, sıcaklık değerinin $5\text{ }^{\circ}\text{C}$

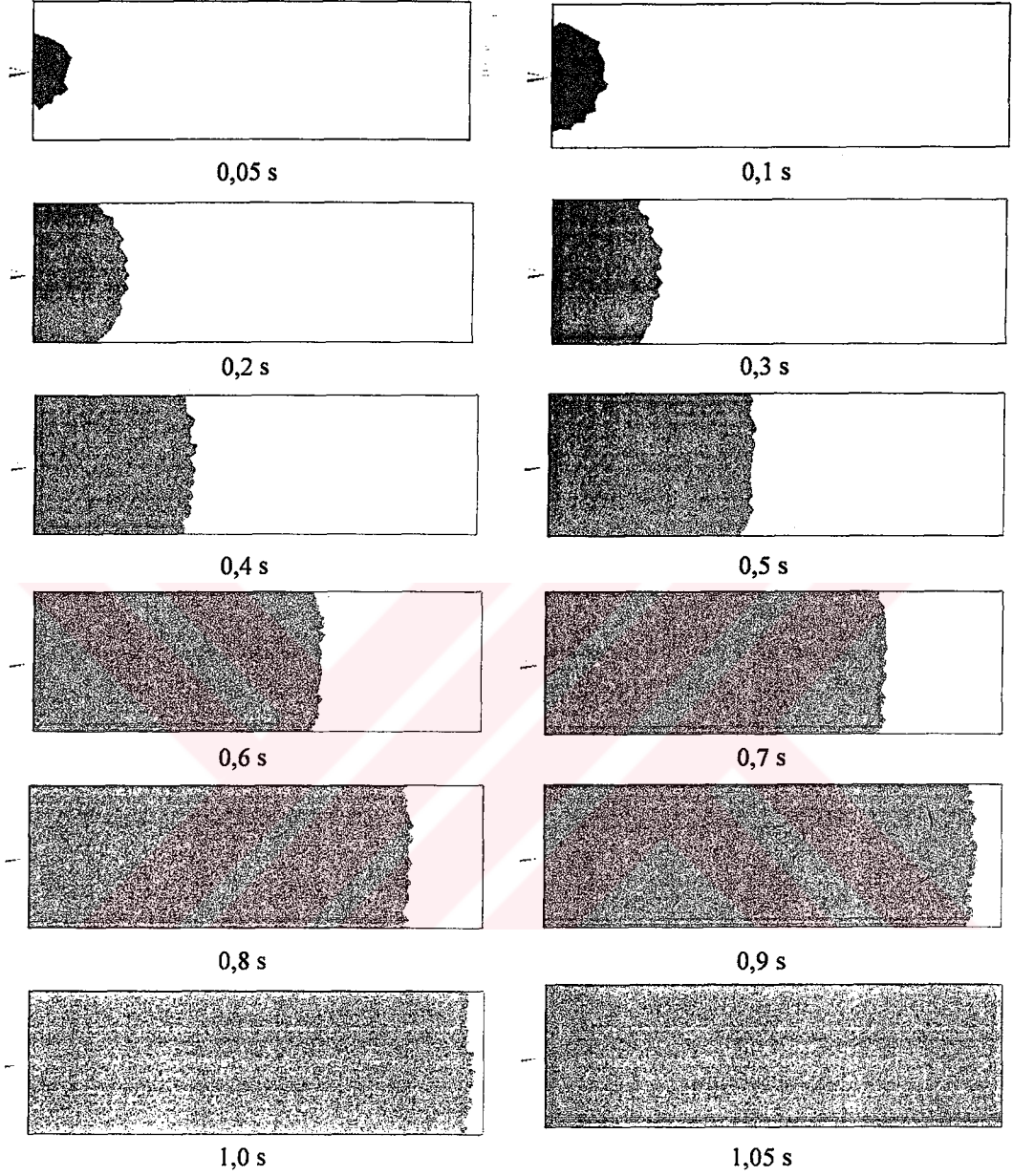
artırılması ile kalıp boşluğunun 1,02 saniyede dolduğu tespit edilmiştir. Enjeksiyon sıcaklığının 220 °C olduğu I. grup deneysel çalışmada, aynı basınç ve enjeksiyon vida hızı değerleri kullanılarak yapılan akış analizinde, kalıp boşluğu 1,23 saniyede doldurulmuştur. Sıcaklık değerinin 5 °C artması sonucu ergiyeğin akıcılığı artarak akışkan üzerinde uygulanan basınç ile farklı deformasyon hızları ortaya çıktığından, kalıp boşluğu % 17 daha kısa sürede dolmuştur.

Teorik çalışmalardan elde edilen akış analizi görüntüleri ile akış simülasyonu yapan ticari paket programların akış görüntülerinin kıyaslanabilmesi için Moldflow ve C-Mold paket programları ile de akış simülasyonu yapılmıştır. Üç değişik enjeksiyon şartı için Moldflow programında analizler yapılmıştır. Çizelge 6.13' de Moldflow ve C-Mold' da akış analizinde kullanılan enjeksiyon parametreleri verilmiştir.

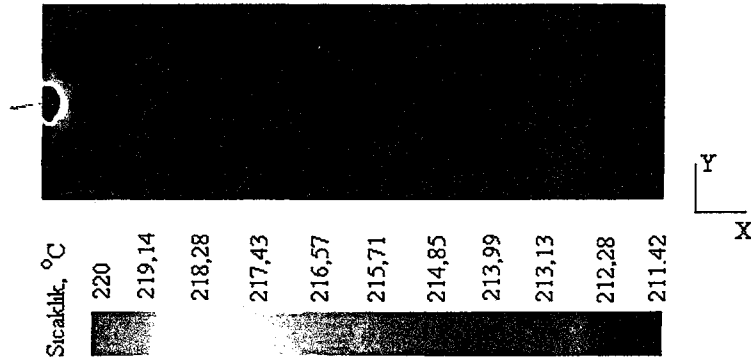
Çizelge 6.13. Moldflow ve C-Mold paket programları ile yapılan akış analizinde kullanılan enjeksiyon parametreleri

Enjeksiyon parametresi	Moldflow için			C-Mold için
	I.Grup	II. Grup	III. Grup	
Enjeksiyon sıcaklığı,	220 °C	220 °C	220 °C	220 °C
Enjeksiyon basıncı.	5 MPa	4 MPa	6,5 MPa	5 MPa

Moldflow 6.0 paket programı ile yapılan akış analizinden elde edilen I. grup akış simülasyonu görüntüleri, Şekil 6. 26' da verilmiştir. 1,05 saniyede kalıp boşluğunun dolduğu akış görüntüleri ve akış tipi, Navier Stokes denklemlerinin çözümlenmesi ile elde edilen akış simülasyonu ve deneysel olarak elde edilen akış görüntülerinin birbirlerine çok benzediği tespit edilmiştir. Fakat gerçek akışta 1,23 s olarak gerçekleşen akış, Moldflow da 1,05 s olarak hesaplanmaktadır. Ayrıca, Şekil 6.27' de akış alanındaki sıcaklık dağılımı verilmiştir. Buna göre, kalıp boşluğu tam dolduğu sıradaki akış alanındaki sıcaklığın yaklaşık 211 °C olduğu görülmektedir.

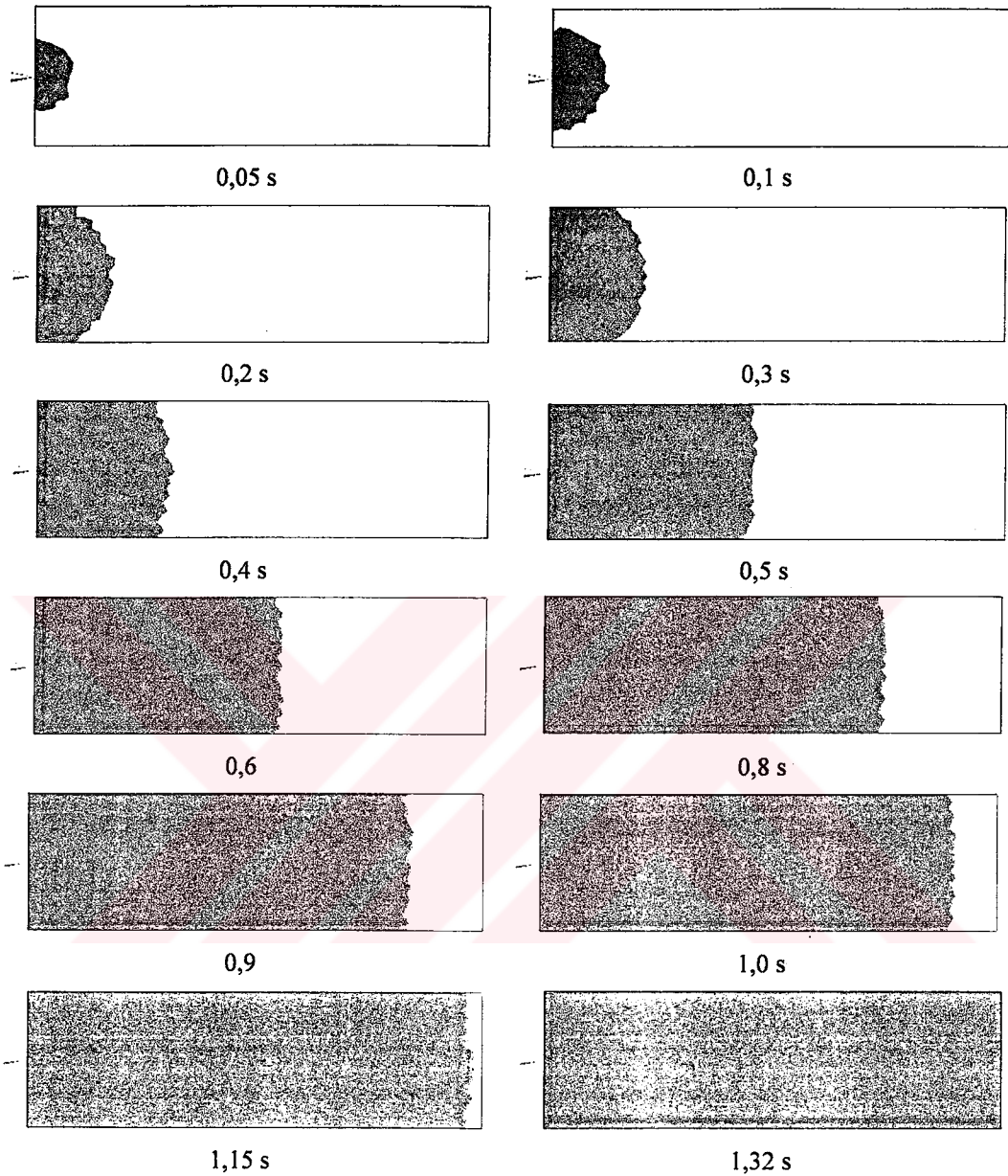


Şekil 6.26. Moldflow ile yapılan I. grup analizlerden elde edilen, YYPE malzemesinin kalıp boşluğundaki akış simülasyonu ($T= 220\text{ }^{\circ}\text{C}$, $p= 5\text{ Mpa}$)



Şekil 6.27. Moldflow ile yapılan I. grup analizde, YYPE malzemesinin kalıp boşluğundaki akışında elde edilen sıcaklık dağılımı

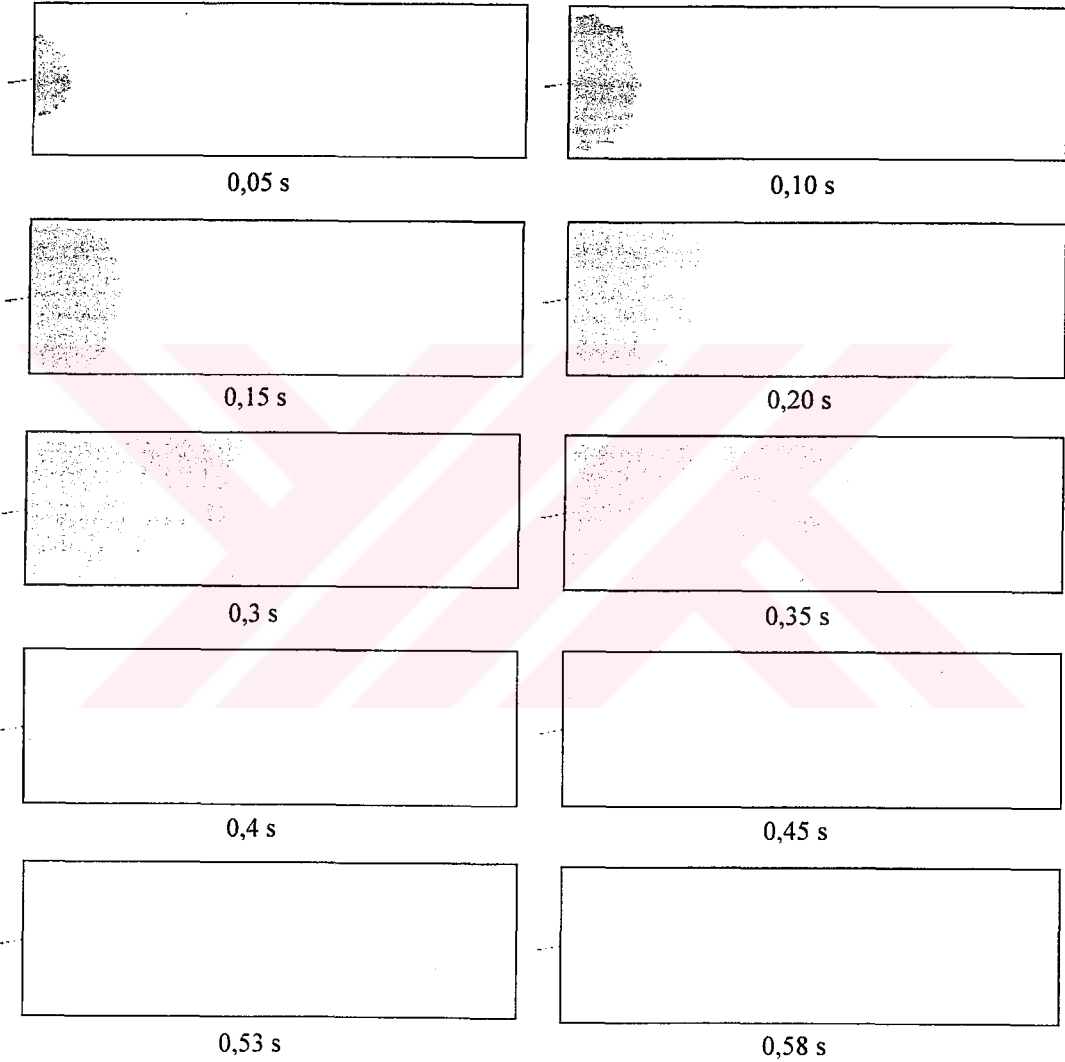
Moldflow ile yapılan II. Grup deney görüntüleri Şekil 6.28’ de verilmiştir. Enjeksiyon basıncının 4 MPa’ a çıkarıldığı analizde, kalıp boşluğunun 1,32 saniyede dolduğu tespit edilmiştir. Akış burnu profillerinin 5 MPa için yapılan analizden elde edilen sonuçlarla çok benzerlik gösterdiği farkın sadece dolum sürelerinde olduğu tespit edilmiştir. Aynı şartlar altında ($p = 4$ MPa) yapılan Şekil 6.16 da verilen sayısal analiz görüntüleri ve Şekil 6.24 de verilen gerçek akış görüntülerinden anlaşıldığı gibi kalıp boşluğu tam dolmamaktadır. Moldflow yazılımı ile yapılan ve Şekil 6.28’ da verilen dolum analizinde dolum süresi uzun olmakla birlikte başarılı bir şekilde doldurmaktadır. Endüstride sıkça karşılaşılan bir problem olan eksik dolum, düşük enjeksiyon hızı, enjeksiyon basıncı veya düşük sıcaklık değerlerinin kullanıldığı durumlarda gerçekleşmektedir. Navier-Stokes denklemlerinin kullanıldığı sayısal analiz ile uygun olmayan enjeksiyon parametrelerinin kullanılması sonucu eksik basım gibi çok önemli bir hatanın simülasyonu yapılabilmektedir.



Şekil 6.28. Moldflow ile yapılan I. grup analizlerden elde edilen, YYPE malzemesinin kalıp boşluğundaki akış simülasyonu ($T = 220\text{ }^{\circ}\text{C}$, $p = 4\text{ Mpa}$)

Kalıpcılık sektöründe enjeksiyon parametrelerinin akışa etkisi özellikle ilk baskılarda deneme yanılma yolu ile tespit edilmektedir. Bu çalışma kapsamında yapılan sayısal analiz sonuçlarına göre, deneme yanılmaya gerek kalmaksızın gerçeğe en yakın enjeksiyon parametrelerinin ayarlanabilmesi mümkün görülmektedir. Kalıp boşluğunun tam dolmamasının muhtemel sebebi, düşük basınç ve sıcaklık kaybından

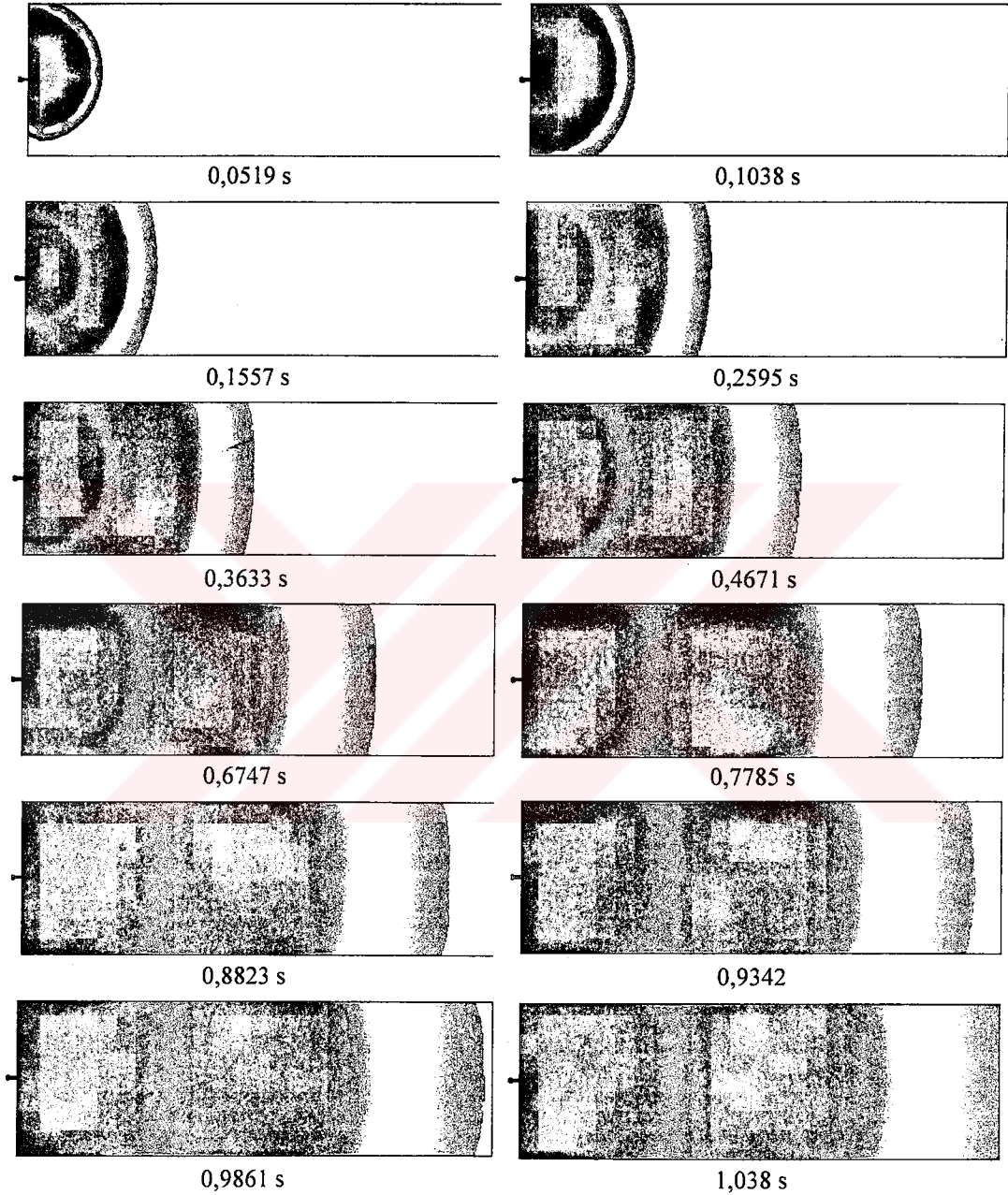
dolayı artan viskozite ve yoğunluktur. Bir çok ticari yazılım gibi, Moldflow plaklet programı da kalıp boşluğu tam dolana kadar yoğunluğun değişmediğini varsayarak hesaplama yaptığından, kritik bazı enjeksiyon değerlerinde eksik basım gibi olumsuz durumları tespit etmekte yetersiz kalmaktadır.



Şekil 6.29. Moldflow ile yapılan II. grup analizden elde edilen, YYPE malzemesinin kalıp boşluğundaki akış simülasyonu ($T = 220^{\circ}\text{C}$, $p = 6,5 \text{ Mpa}$)

Moldflow ile yapılan III. grup deney görüntüleri Şekil 6.29' da verilmiştir. Enjeksiyon basıncının $6,5 \text{ MPa}$ olarak ayarlandığı analizde, kalıp boşluğunun $0,58$ saniyede dolduğu tespit edilmiştir. Üçüncü grup analizden elde edilen sonuca göre,

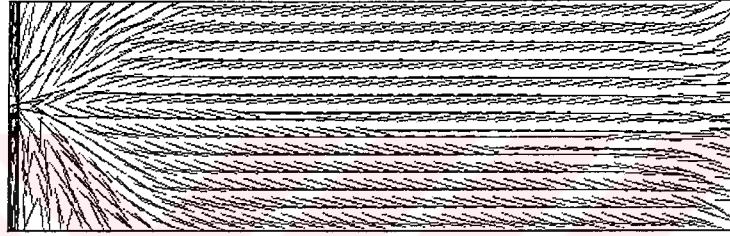
enjeksiyon basıncının kalıp boşluğunun dolum süresi üzerinde çok büyük bir etkisi olduğu görülmektedir.



Şekil 6.30. C-Mold ile yapılan analizden elde edilen, YYPE malzemesinin kalıp boşluğundaki akış simülasyonu ($T=220\text{ }^{\circ}\text{C}$, $p=5\text{ MPa}$)

C-Mold paket programı ile yapılan analizde, kullanılan enjeksiyon parametreleri, enjeksiyon sıcaklığı $220\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve enjeksiyon basıncı 5 MPa olarak ayarlanmıştır. C-Mold ile yapılan akış analizinden elde edilen simülasyon görüntüleri Şekil 6.30' da akış çizgileri ise Şekil 6.31' de verilmiştir. C-Mold programı ile yapılan akış

analizinde kalıp boşluğunun 1,038 saniyede dolduğu, ilk giriş noktasındaki profil hariç, kalıp boşluğundaki akış tipinin gerçek akış tipine çok benzediği görülmektedir. C-Mold ile elde edilen akış burnu profili sayısal analizle elde edilen akış burnu profili kalıba giriş kısmında fazla benzerlik göstermese bile, ilerleyen aşamalarda benzer olduğu tespit edilmiştir. Ergimiş plastiğin kalıp içerisindeki akışının gerçek akış profiline çok benzemesine rağmen dolum süresi açısından bakıldığında 0,192 s'lik bir sapmanın (% 15,6 gerçek akıştan farklı) olduğu tespit edilmiştir.



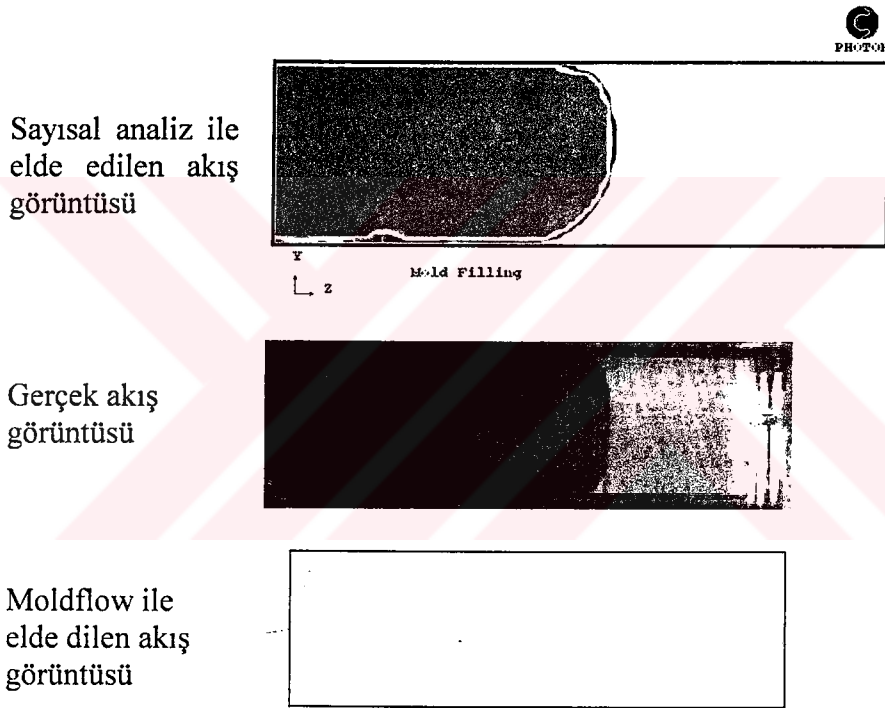
Şekil 6.31. C-Mold ile yapılan analizden elde edilen, YYPE malzemesinin kalıp boşluğundaki akış çizgileri

Şekil 6.31' de verilen ve C-Mold programında analiz sonucunda uzun zincirlerden oluşan plastik moleküllerinin akış sırasındaki yönelimlerinin gösterildiği akış çizgileri verilmiştir. Bu şekle göre doğrusal uzun zincirlerin akış doğrultusunda düzgün bir şekilde yönlendirildiği görülmektedir.

Akım çizgilerinin, girişe yakın bölgede merkezden yanlara doğru olduğu, kalıbın son bölgesinde ise yine kalıp yüzeyinin tamamını kapsayacak şekilde yanlara doğru genişleyen bir yol izlediği tespit edilmiştir. Moldflow paket programı ile yapılan analizlerde akış doğrultularını temsil eden akım çizgileri grafiği verilmemektedir. Gerçekleştirilen bu çalışmada sayısal analizde elde edilen ve Şekil 6.10' da zaman adımına göre verilen hız profilleri aynı zamanda akım çizgilerini temsil etmektedir. Yapılan bu çalışma ile akışın burun kısmındaki profilinin belirlenmesinin yanında arka taraftan besleme yapan ergimiş plastiğin akış türünü de tespit etmek mümkün olmuştur. C-Mold programının sonuç çıktıları arasında bulunan akım çizgileri grafiği, kalıp boşluğunun dolduğu sıradaki akım çizgilerini temsil etmektedir. Bu

nedenle, zaman adımlarına göre akış çizgilerinin nasıl bir yol izlediği hakkında her hangi bir bilgi elde edebilmek mümkün olmamıştır.

Ergimiş plastiğin kalıp içerisindeki hareketi ile oluşan akış burnu profilinde sayısal difüzyondan kaynaklanan hatalar oluşmaktadır. Şekil 6.32’ de sayısal analiz ile elde edilen akış burnu profili, gerçek akış burnu ve Moldflow ile elde edilen akış burnu profilleri karşılaştırılmıştır.

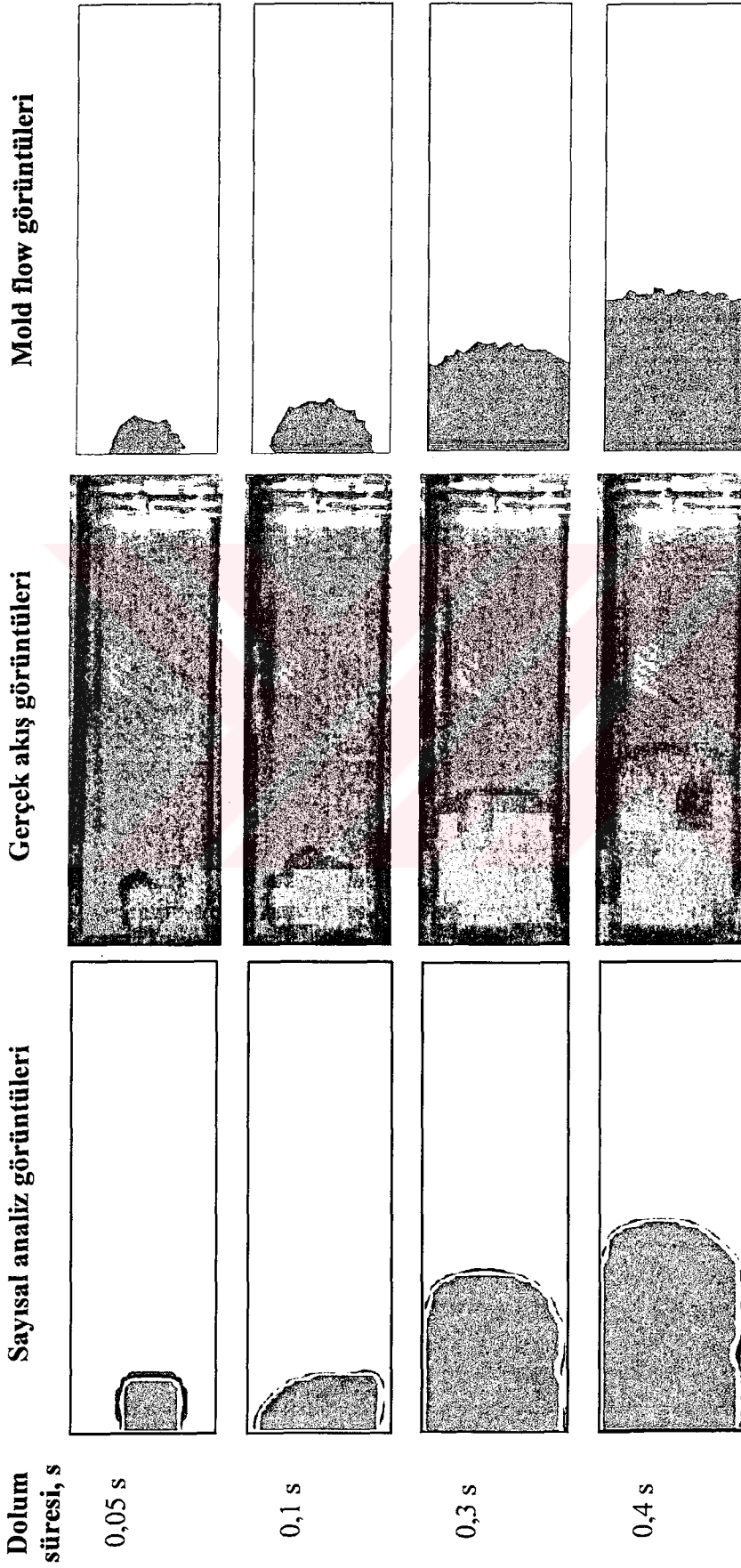


Şekil 6.32. Sayısal analiz, gerçek akış görüntüsü ve Moldflow elde edilen akış burnu profillerinin karşılaştırılması

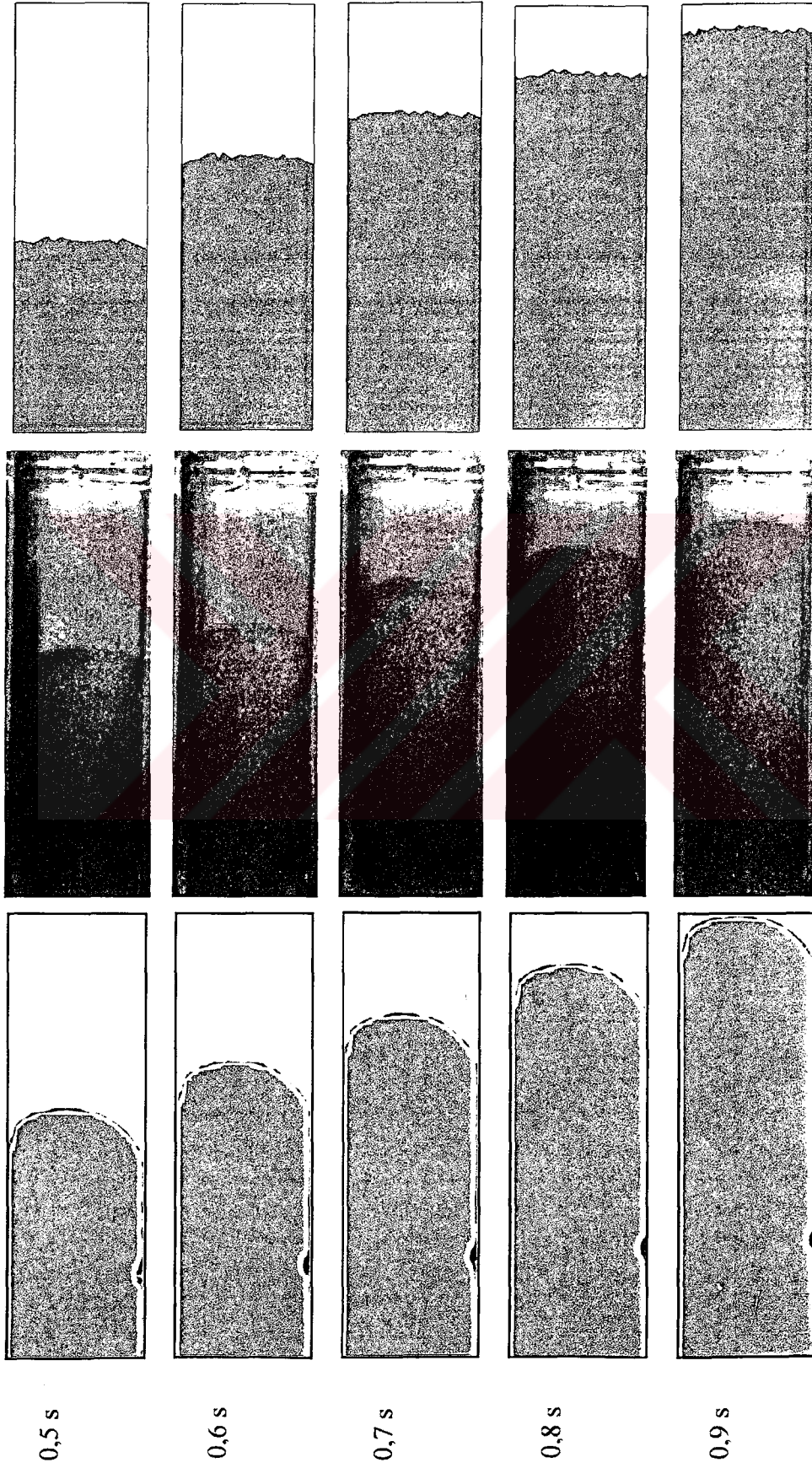
Şekil 6.32 de görüldüğü gibi, sayısal analiz ile elde edilen akış burnu profilinin, gerçek akış burnu profiline en yakın olduğu görülmektedir. Akış burnunun, gerçek akış görüntüsünde olduğu düzgün bir eğri şeklinde olması, Van Leer yöntemi ile sayısal difüzyon hatalarının giderilmesi sonucu elde edilmiştir. Moldflow ile yapılan analizde elde edilen görüntüde ise sayısal difüzyondan kaynaklanan akış burnundaki kesikli yüzey gerçek akışa benzememektedir.

Şekil 6.33' de aynı şartlardaki enjeksiyon parametreleri ($T = 220\text{ }^{\circ}\text{C}$, $p = 5\text{ MPa}$) ile yapılan sayısal analiz, gerçek akış görüntüsü ve Moldflow analiz sonuçları karşılaştırılmıştır. Şekilden de anlaşıldığı gibi sayısal analiz ile elde edilen akış simülasyonunda kalıp boşluğu 1,12' s de dolarken, Moldflow 1,05 s' de doldurmuştur. Aynı şartlar için yapılan deneysel çalışmada ise, kalıp boşluğunun 1,23 saniyede dolduğu görülmektedir. Buradan anlaşılabileceği gibi sayısal analiz sonuçları ile gerçek akış sonuçları arasında % 8,9' luk bir fark bulunurken, Moldflow sonuçlarının % 14,6' lık bir sapma gösterdiği tespit edilmiştir. Sayısal analiz sonucunun gerçek akış dolum analizinden daha uzun sürede doldurmasının muhtemel sebebi, Navier-Stokes denklemleri ve enerji denkleminin çözümlenebilmesi için yapılan bazı tanımlamalar ve kabuller olduğu düşünülmektedir. Bu kabuller, ısı transferi ve ısı iletim katsayısı gibi değerlerin sıcaklık ile değişiminin dikkate alınmaması ve kalıp sıcaklığının $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ de sabit kabul edilmesi sayılabilir. Fakat, sayısal analiz ile elde edilen ergimiş plastiğin kalıp içerisindeki ilerlemesindeki akış burnu, gerçek akışta ki akış burnu profili ile oldukça uyum içerisinde olduğu görülmektedir(Şekil 6.33).

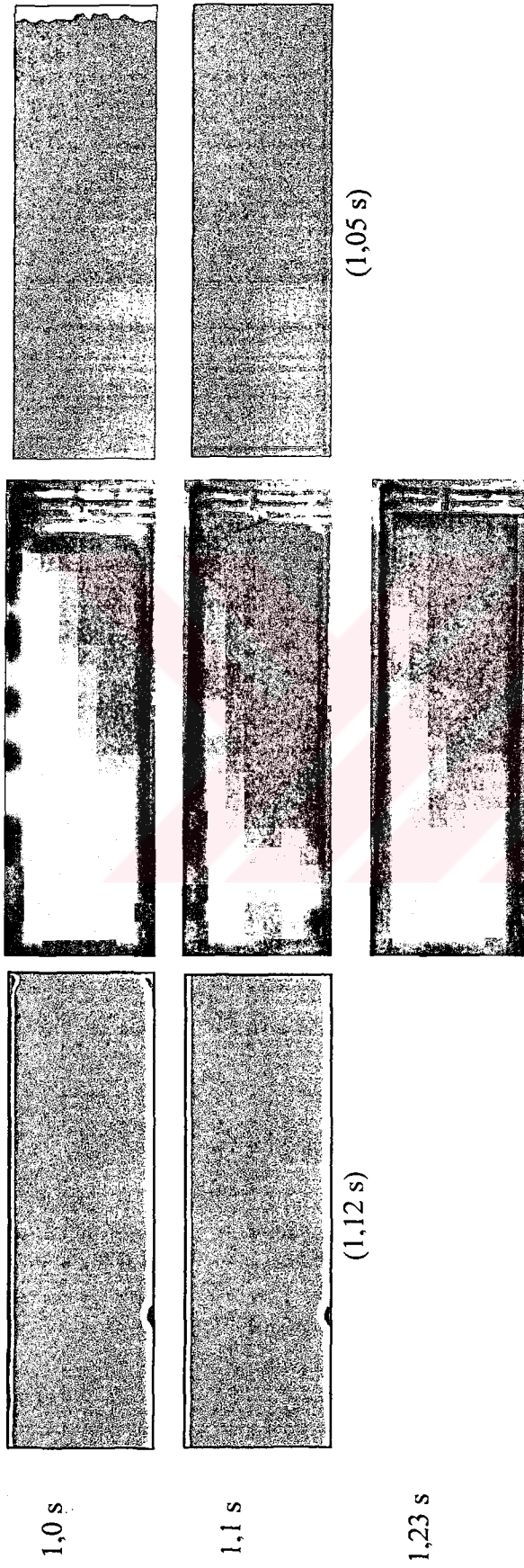
Moldflow ile yapılan analizlerde sıcaklık ve basınç değerinin değiştirilmesi ile akış burnu profilinin fazla değişmediği, sadece dolum sürelerinin değiştiği tespit edilmiştir. Özellikle kalıp boşluğunun yarısı dolduktan sonra akış burnunun parabolik değil yaklaşık dikey konumda olduğu Şekil 6.33' de görülmektedir. Ayrıca, gerçek akıştan farklı olarak akış burnunda sayısal difüzyon hataları olarak bilinen girintili çıkıntılı bir profilin bulunduğu görülmektedir.



Şekil 6.33. Sayısal analiz ile elde edilen akış görüntüsü, gerçek akış görüntüsü ve Moldflow simülasyon görüntülerinin karşılaştırılması
($T = 220\text{ }^{\circ}\text{C}$, $p = 5\text{ MPa}$)



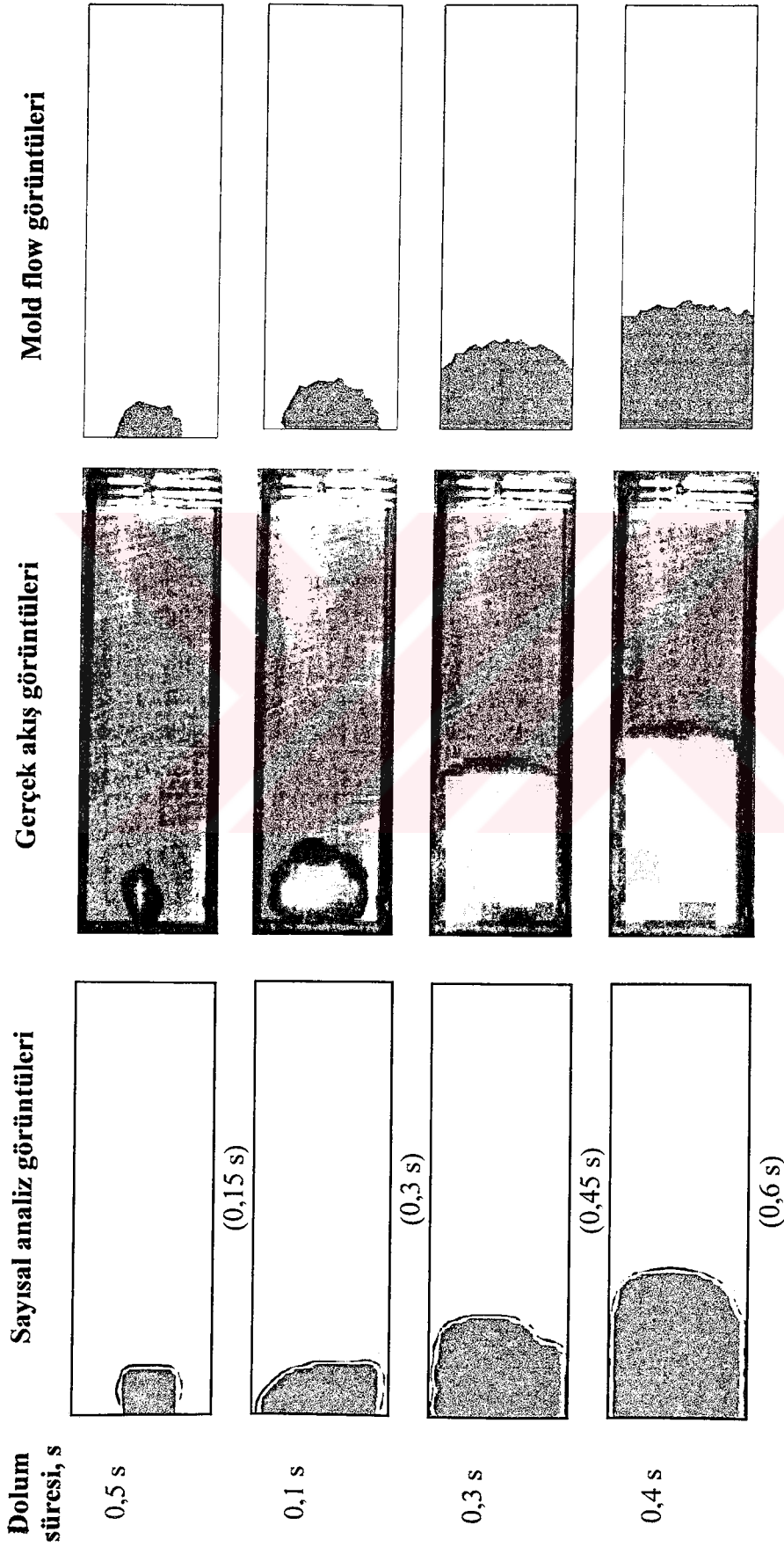
Şekil 6.33. Sayısal analiz ile elde edilen akış görüntüsü, gerçek akış görüntüsü ve Moldflow simülasyon görüntülerinin karşılaştırılması (T= 220 °C, p = 5 MPa) (devam)



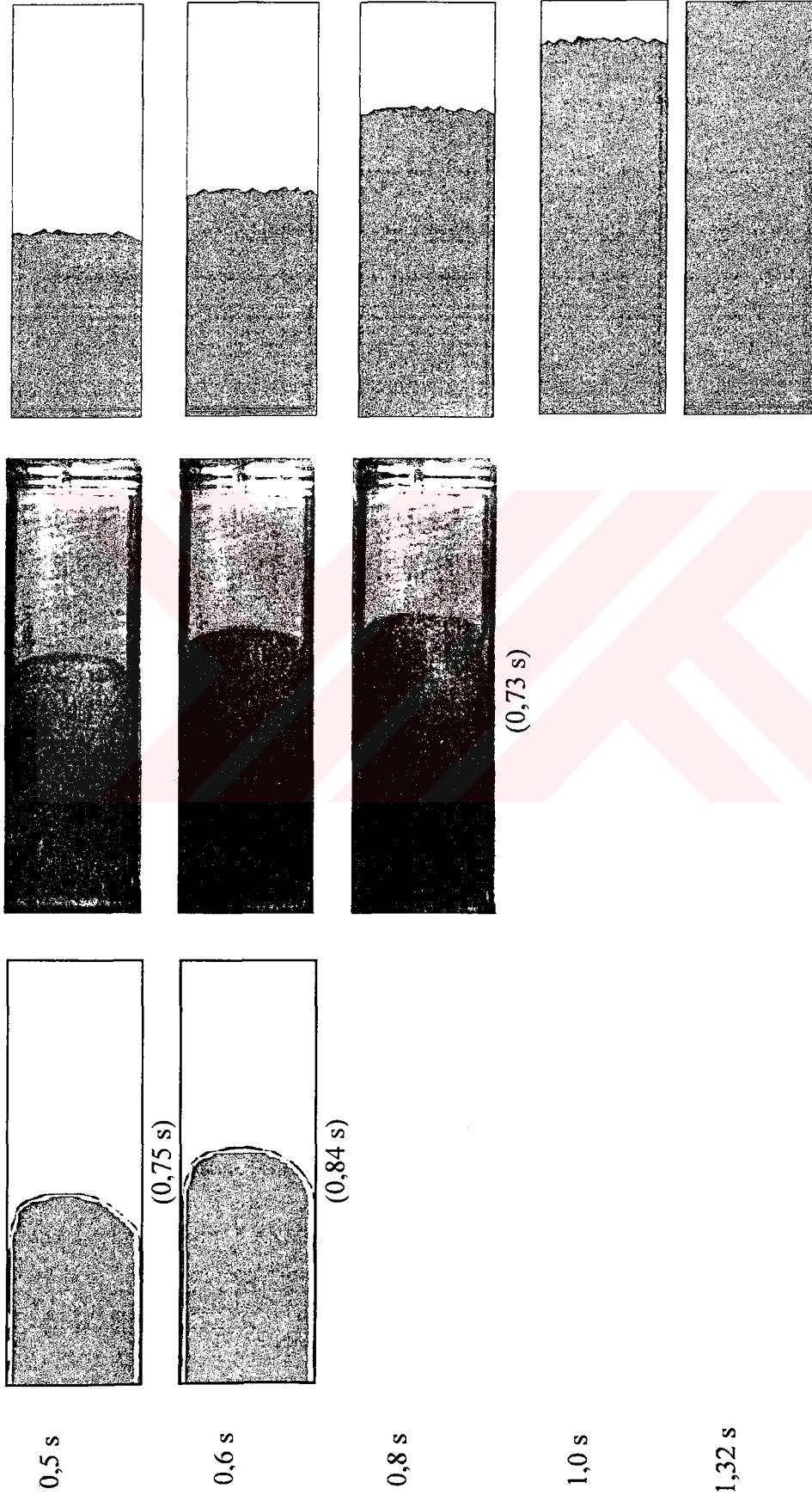
Şekil 6.33. Sayısal analiz ile elde edilen akış görüntüsü, gerçek akış görüntüsü ve Moldflow simülasyon görüntülerinin karşılaştırılması
($T=220\text{ }^{\circ}\text{C}$, $p=5\text{ MPa}$) (devam)

Şekil 6.34' de enjeksiyon basıncının 4 MPa' a düşürülmesi ile yapılan analiz sonuçları karşılaştırılmıştır. Sayısal analiz ile gerçek akış görüntülerinde anlaşıldığı gibi, kalıp boşluğu belirli bir sürenin sonunda dolmayıp eksik basım gerçekleşmiştir. Sayısal analizde 0,84' üncü saniyede, gerçek akış görüntülerinde ise 0,73' üncü saniyede akış durmuştur. Sayısal analiz sonucu ile gerçek akış görüntüsü arasında % 15 lik bir fark olmasına karşılık, sayısal analiz sonucunun da endüstride çok sık karşılaşılan bu problemi temsil edebilmesi oldukça önemlidir. Sayısal analizin aksine Moldflow paket programı ile yapılan akış simülasyonunda ise, kalıp boşluğunun 1,32 saniyede tam olarak dolduğu görülmektedir. Gerçekte var olan ve Moldflow ile simüle edilemeyen bu eksik basım hatasının tespit edilememesinin en büyük sebebi, Moldflow' un akışı sıkıştırılmaz olarak kabul edip çözüm yapmasıdır.

Navier-Stokes eşitliklerinin çözümlenmesi ile yapılan akış analizinde fışkırma akış ve eksik basım gibi enjeksiyon yöntemiyle üretimde çok sık karşılaşılan akış tipi ve problemlerin tespit edilip simüle edilebilmesi bu yöntemin başarılı olduğunu göstermektedir.



Şekil 6.34. Sayısal analiz ile elde edilen akış görüntüsü, gerçek akış görüntüsü ve Moldflow simülasyon görüntülerinin karşılaştırılması
($T = 220\text{ }^{\circ}\text{C}$, $p = 4\text{ MPa}$)



Şekil 6.34. Sayısal analiz ile elde edilen akış görüntüsü, gerçek akış görüntüsüne ve Moldflow simülasyon görüntülerinin karşılaştırılması
($T = 220\text{ }^{\circ}\text{C}$, $p = 4\text{ MPa}$) (devam)

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

7.1. Sonuç

Enjeksiyon yöntemi ile üretilen plastik parçaların maliyetinin ve kalitesinin enjeksiyon parametrelerinin yanında, kalıba da bağlı olması bu işlemi oldukça karmaşık kılmaktadır. Kalıp tasarımı yapılırken ergimiş plastiğin kalıp içerisindeki akışının önceden bilinmesi ve simüle edilmesi; hem kalıp tasarımcılarına hem de plastik parça tasarımcılarına yol göstermekte, plastik parça ve kalıp tasarımında harcanan zamanı önemli ölçüde azaltmakta ve hatalı kalıp imalatından doğan ciddi maddi kayıpları engellemektedir. Diğer taraftan, yolluk, dağıtıcı kanallar, girişin yeri, kesiti ve sayısı gibi kalıp parametrelerinin de akışı etkilemesi, akış analizini zorunlu hale getirmektedir.

Ergimiş plastiğin kalıp boşluğundaki akışının simülasyonunda, tüm akış parametrelerini temsil etmesi ve üç boyutlu akışları da kapsamasından dolayı, Navier-Stokes denklemleri kullanılmıştır. Akışı temsil eden diferansiyel formdaki temel denklemlerin çözümünde, iki ve üç boyutlu akışların analizleri ve simülasyonunda analitik yöntemlerin başarısız olması nedeniyle diferansiyel formdaki denklem takımları sayısal çözümleme yöntemi ile çözümlenmiştir. Sayısal çözümleme yöntemi olarak uygulamasının pratikliği ve kütle ve ısı transferi denklemlerinde çok sık kullanılan SKH yöntemi tercih edilmiştir. Akış alanının ızgaralara bölünmesi ile elde edilen düğüm noktalarındaki akış parametrelerinin hesaplanması yöntemine dayanan bu metot da, düğüm noktasının etrafındaki tüm noktaların dikkate alındığı Tam Implicit metodu uygulanmıştır. Akışın hangi yönden geldiğinin belirlenmesi için de, Upwind metodu kullanılmıştır.

Ayrıca, akış burnunda ergiyik ile hava arasında çok büyük bir yoğunluk farkı bulunduğundan, Tam Implicit yönteminde sayısal difüzyon olarak bilinen hatalar ve sapmalar meydana gelmektedir. Bu nedenle, akış burnunda Van Leer metodu kullanılarak akışın bu bölgesi Explicit yöntem gibi çözümlenmiştir. Cebirsel forma dönüştürülen denklemler Gauss-Jordan eliminasyon yöntemi kullanılarak çözümleme yapan Phoenix programı yardımı ile çözümlenmiştir. Uluslararası çalışmalarda

araştırmacıya özgü çözüm yazılımları; sınırlı kullanımı, ispat edilemeyen ve onaylanmayan güvenilirliği ve doğruluğu dolayısıyla kabul görmemektedir. Literatürde ortak bir çözüm ortamı olarak tercih edildiği bilinen Phoenixics algoritması, cebirsel hale dönüştürülen diferansiyel eşitliklerin çözümlenmesinde tercih edilmiştir. Phoenixics' den elde edilen akış parametrelerini kullanan grafik çıktı ünitesi Photon modülü ile, akış parametreleri grafiğe dönüştürülmüştür. Akış ve sınır şartlarının tanımlandığı q1 dosyası ile giriş sınır şartı ve parametrelerine göre problem tanımlanıp hesaplamalar gerçekleştirilmiştir.

Çalışmanın bir diğer aşamasında, Pektim ürünü I-668 YYPE' nin viskozite ve kayma gerilmesinin hesaplanmasında kullanılan akış davranış üssü (n) deneysel olarak tespit edilmiş ve akış davranış analizinde kullanılmıştır. Ergiyik akış indeksi metodu ile YYPE malzemesinin reolojik incelemesi yapılmıştır. 10 farklı sıcaklık ve 8 farklı basınç için yapılan testlerde, EAI, viskozite ve kayma hızının sıcaklık ve basınç karşısındaki değişimleri incelenmiştir. Elde edilen görünür kayma hızı ve görünür viskozite düzeltme işleminden geçirilerek gerçek değere yaklaştırılmış ve sonuçlar hassaslaştırılmıştır. Kayma hızı ve kayma gerilmesi grafiklerinden akış davranış üssü, viskozitenin doğal logaritması- $(1/T)$ grafiklerinde ise, Arrhenius viskozite modeline göre hesaplamada kullanılan Aktivasyon enerjileri tespit edilmiştir. Fakat, düşük kayma hızlarında elde edildikleri için bu çalışmada viskozite modeli olarak yüksek kayma hızlarında da çok başarılı bir şekilde uygulanan Üs yasası viskozite modeli tercih edilmiştir.

Teorik analiz sonunda elde edilen akış simülasyonunun gerçeği ne kadar temsil ettiğini belirlemek amacıyla, elde edilen simülasyon sonuçları, deneysel olarak elde edilen gerçek akış görüntüleri ayrıca Moldflow ve C-Mold gibi ticari yazılımların simülasyon çıktılarıyla karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma yöntemi, uluslararası yayınlarda da kabul görmesi ve yapılan araştırmanın geçerliliğinin kıyaslanmasına imkan sağlaması bakımından uygun ve yeterli görülmüştür. Gerçekleştirilen bu çalışmaya göre elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde özetlenmiştir.

1. Yapılan reolojik çalışmada, kayma hızı - kayma gerilmesi grafiği, literatüre uygun olarak (1, 64, 67, 155, 183, 230-232, 236) ideal olmayan akış özelliğine sahip yapıda gerçekleştiği tespit edilmiştir (Şekil 6.1)
2. log kayma hızı - log kayma gerilmesi grafiğinden akış davranış üssü değerleri tespit edilmiştir. Buna göre, akış davranış sabitlerinin sıcaklık değişimine bağlı olarak değiştiği tespit edilmiş olup, n değerlerinin 0,67-0,64 arasında olduğu belirlenmiştir (Çizelge 6.2). Sayısal akış analizinde bu deneysel akış davranış üssü kullanılmıştır.
3. Literatüre uygun olarak, EAI' nin sıcaklık ve kayma hızı artışı ile doğrusal olarak arttığı, basınç ve kayma gerilmesinin artışı ile de parabolik olarak arttığı tespit edilmiştir (230-232, 236). Ayrıca, EAI viskozite artışıyla birlikte parabolik olarak azalmaktadır (Şekil 6.2, Şekil 6.3).
4. Yapılan reolojik incelemeye göre, viskozitenin sıcaklık, basınç, kayma hızı ve kayma gerilmesi artışı ile parabolik olarak azaldığı tespit edilmiştir (EK 7, EK 8, EK 10 ve EK 11).
5. Sayısal çözümlemelerde, akış burnunda ergimiş plastik-hava ara yüzeyindeki belirgin yoğunluk farkından dolayı oluşan sayısal difüzyon hatalarını önlemek için Van Leer yöntemi kullanılmıştır.
6. Sayısal analiz için yapılan matematiksel modellemede, yoğunluğun sıcaklık ile değişimi Boussinesq yaklaşımı kullanılarak hesaplanmıştır.
7. Hesaplamalar sırasında akış alanında katılık oranı tespit edilerek ergime sıcaklığı ile camsı geçiş sıcaklığı arasındaki sıcaklık dağılımları tespit edilerek akışın olmadığı bölgeler bulunmuştur.
8. Enjeksiyon parametreleri olarak basıncın 5MPa, sıcaklığın 220 °C ve hızın 0,25 m/s olarak seçildiği I. grup sayısal analizde, kalıp boşluğu 1,12 saniyede dolmuştur. Enjeksiyon hızının 1,8 kat artırılıp 0,45 m/s ' ye çıkarılması sonucu kalıp boşluğu % 47,5 daha kısa sürede (0,63 s) dolmuştur (Şekil 6.12).
9. I. grup sayısal analizde kullanılan enjeksiyon parametreleriyle Moldflow ve C-Mold programlarında da simülasyon yapılmıştır. Yapılan bu simülasyonlarda kalıp boşluğu Moldflow' da 1,05 saniyede, C-Mold' da ise 1,038 saniyede dolmuştur. Buna göre aynı şartlarda yapılan analizde, sayısal analiz ile kalıp boşluğu gerçek akıştan % 8,9 daha fazla sürede doldururken, Moldflow ve C-Mold programları sırasıyla % 14,63 ve % 15,61 daha uzun sürede doldurmuştur.

10. Enjeksiyon basıncının 5 Mpa ‘ dan 4 MPa’ a düşürülmesi ile yapılan sayısal analizde 0,84’ üncü saniyeden sonra akışın durduğu ve kalıp boşluğunun tam dolamadığı tespit edilmiştir. Aynı enjeksiyon şartlardaki gerçek akış görüntülerinde de akışın 0,73’ üncü saniyeden sonra durduğu ve eksik basım gerçekleştiği tespit edilmiştir. Sayısal analiz sonu ile gerçek akış arasında % 15’ lik bir fark bulunmasına karşılık, akış simülasyonu yapan diğer programlarla tespit edilemeyen ve endüstride çok sık karşılaşılan eksik basım simüle edilebilmiştir.
11. Eksik basım hatalarının sayısal analiz ile tespit edilip Moldflow ile tespit edilememesinin muhtemel sebebi, yoğunluk değişiminin dikkate alınmış olması olduğu düşünülmektedir.
12. Şekil 6.19 ve Şekil 6.20’ de verilen dolum analizlerinde görüldüğü gibi, yüksek enjeksiyon hızlarında ve dar giriş kesitlerinde giriş bölgesinde fışkırma (jet) akış tipi dolum gerçekleşmiştir. Enjeksiyon kalıpcılığında sıkça görülen bu durum da simüle edilebilmiştir.
13. Aynı şartlarda yapılan analizlerde gerçek akış ile sayısal analiz ve ticari yazılım sonuçlarının farklı olduğu fakat, Moldflow ve C-Mold yazılımlarına göre gerçek akışa en yakın değerlerin sayısal analizle elde edilen sonuçlar olduğu tespit edilmiştir. Dolum sürelerinin farklı olmasının muhtemel sebebi olarak teorik analizlerde bir çok akış parametresinin ihmal edilmesi veya bazı kabullerin yapılması, kalıp sıcaklığının sabit olmaması, kalıp yüzeylerinin akışı etkilemesi ve malzemenin o anki kimyasal yapısının etkilemesi olarak düşünülmektedir.
14. Sayısal analiz ile elde edilen dolum analizi sonuçlara göre, basınç ve hız arttıkça kalıp boşluğu daha kısa sürede dolmaktadır. Enjeksiyon hızının artışına bağlı olarak dolum süresi de doğrusal olarak azalmaktadır (Şekil 6.21).
15. Çalışmada uygulanan akış analiz yöntemleri ve çözümleri sayesinde, deneysel akış analizinden elde edilen görüntülerle tam uyumlu sonuçlar elde edilmiştir. Diğer taraftan akış analiz yazılımlarıyla yapılan kıyaslamada, yazılımlardan elde edilen görüntülerin yeterli derecede doğru sonuçlar vermediği ortaya konmuştur. Plastik ürün tasarımı ve imalatı üzerine çalışan ulusal ve uluslar arası firmalarca yaygın olarak tercih edildiği gözlenen ve maliyeti oldukça yüksek bazı yazılımların, gerçek sonuçları vermediği sadece yol gösterici mahiyette olduğu tespit edilmiştir.

16. Ergiyik plastik akışının önceden doğru olarak bilinmesi, hem kalıp hem de plastik parça tasarımı ve imalatı açısından son derece önem arz etmektedir. Hatalı kalıp tasarımı ve imalatının sektörde ciddi maddi kayıplara yol açtığı, bitmiş bir kalıbın tekrar yapımının çok uzun süre aldığı dikkate alınır, akış analiz görüntülerinin doğru olarak elde edilmesinin ne derece önemli olduğu daha iyi anlaşılacaktır. Deneysel akış analiz görüntüleri ve sayısal akış analiz prosedüründen elde edilen görüntüler, önerilen yaklaşımın son derece doğru sonuçlar verdiğini ortaya koymuştur.
17. Çalışmada önerilen sayısal analiz prosedürünün, gerçek akış davranışı ile benzer görüntüler vermesinde, literatürde gözlenen yaklaşımlardan farklı olarak;
 - Plastik akışının sıkıştırılabilir bir akış olarak incelenmesinin ve dolayısıyla yoğunluk değişiminin dikkate alınmasının,
 - Akış davranış üssü değerinin deneysel olarak tespit edilerek, viskozite ve kayma gerilmesinin hesaplanmasında kullanılmasının,
 - Akış burnu yönlenmesinin doğru tespitinde Van Leer yönteminin uygulanmasının,
 etkili olduğu tespit edilmiştir.

7.2. Öneriler

1. Ergimiş plastiklerin kalıp boşluğundaki akışının simülasyonunda, temel denklemler çözümlenirken ısınma ısı ve ısı iletim katsayısı gibi sabit kabul edilen parametrelerin sıcaklık karşısındaki değişiminin hesaplanması, akış analizini gerçek akışa daha yaklaştıracaktır.
2. Enjeksiyon kalıplarındaki akış analizi yapılırken, kalıp sıcaklığındaki değişim dikkate alınması analizin daha doğru olmasını sağlayabilir.
3. Yoğunluğun sadece sıcaklık ile değişimin değil aynı zamanda basınç ile değişiminin de dikkate alınması akış simülasyonunu gerçeğe daha yaklaştıracaktır.
4. Karmaşık sınır şartlarının tanımlanmasında başarılı bir şekilde uygulanabilen ızgara üretme yönteminin kullanılması ile karmaşık geometriye sahip plastik parçaların da akış simülasyonu yapılabilir.

5. Akış analizinde deneysel verilere dayalı sıcaklık, basınç ve yüksek kayma hızlarını da temsil eden viskozite modellerinin kullanılması ile daha hassas akış analizinin yapılabilmesi mümkün olabilir.



KAYNAKLAR

1. Kennedy, P., "Flow Analysis of Injection Molding", *Hanser/Gardner Publications*, Cincinnati, USA, 1-222 (1995).
2. Bikas, A., Pantelelis, N., Kanarachos, A., "Computational tools for the optimal design of the injection moulding process", *Journal of Materials Processing Technology*, 122: 112-126 (2002).
3. Jiang, B., Zhong, J., Huang, B., Ui, X., Li, Y., "Element modeling of FEM on the pressure field in the powder injection mold filling process", *Journal of Materials Processing Technology*, 137: 74-77 (2003).
4. Garcia, D., Courbebaisse, G., Jourlin, M., "Image analysis dedicated to polymer injection molding", *Image Anal Stereol*, 20: 143-148 (2001).
5. Gilbert, R.P., Fang, M., "Nonlinear systems arising from non-isothermal, non-Newtonian Hele-Shaw flow in the presence of body forces and sources", *Material and Computer Modeling*, 35: 1425-1444 (2002).
6. Shelley, M.J., Tian, F., Wlodarski, K., "Hele-Shaw flow and pattern formation in a time- dependent", *Nonlinearity*, 10: 1471-1495 (1997).
7. Lee, H. S., "In-plane deformation analysis of plastics parts in the injection molding process", *Journal of Injection Molding Technology*, 3 (1): 11-20 (1999).
8. Chiang, H. H., Hieber, C. A., Wang, K. K., "A unified simulation of the filling and postfilling stages in injection molding. part I: formulation", *Polymer Engineering and Science*, 31 (2): 116-124 (1991).
9. Chiang, H. H., Hieber, C. A., Wang, K. K., "A unified simulation of the filling and post filling stages in injection molding. part II: experimental verification", *Polymer Engineering and Science*, 31 (2): 125-138, (1991).
10. Kietzmann, C.V.L., Walt, J.P., Morsi, Y.S., "A free-front tracking algorithm for a control-volume-based Hele-Shaw methods", *International Journal For Numerical Methods in Engineering*, 41: 253-269 (1998).
11. Goldstein, R., Pesci, A., Shelley, M., "Instabilities and singularities in Hele-Shaw flow", *Physics of Fluids*, 10 (11): 2701-2723 (1998).
12. Nie, Q., Tian, F.R., "Singularities in Hele-Shaw flows", *Society For Industrial and Applied Mathematics*, 58 (1): 34-54 (1998).
13. Huh, Y.J., "A knowledge-based design system for injection molding", *Journal of The Microelectronics & Packaging Society*, 8 (3): 11-17 (2001).

14. Folch, R., Casademut, J., Machado, A.H., "Phase-field model for Hele-Shaw flows with arbitrary viscosity contrast II. Numerical study", *Physical Review E*, 60 (2): 1734-1741 (1999).
15. Subbiah, S., Trafford, D. L., Güçeri, S. I., "Non - isothermal flow of polymers into two-dimensional, thin cavity molds: A numerical grid generation approach", *International Journal Heat Mass Transfer*, 32 (3) 415-434 (1989).
16. Hieber, C. A, Shen, S.F., "A finite-element/finite-difference simulation of the injection-molding filling process", *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 7: 1-32 (1980).
17. Chen, S.C., Chen Y.C., Peng, H.S., "Simulation of injection-compression molding process. II. influence of process characteristics on part shrinkage", *Journal of Applied Polymer Science*, 75: 1640-1654 (1999).
18. Alves, M.A., Pinto, F.T., Oliveria, P.J., "Effect of a high-resolution differencing scheme on finite-volume predictions of viscoelastic flows", *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 93: 287-302 (2000).
19. Wachs, A., Clermont, J.R., "Non-isothermal viscoelastic flow computations in an axisymmetric contraction at high weissenberg numbers by a finite volume method", *Journal Of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 95: 195-207 (2000)
20. Xue, S.C., Phan-Thien, N., Taner, R.I., "Fully tree-dimensional, time-dependent numerical simulations of Newtonian and viscoelastic swirling flows in a confined cylinder. part i. method and steady flows", *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 87: 337-351 (1999).
21. Xue, S.C., Phan-Thien, N., Taner, R.I., "Upwinding with deferred correction (UPDC) an effective implementation of higher-order convection schemes for implicit finite volume methods", *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 108: 1-24 (2002).
22. Patankar, S.V., "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow", *Hemisphere Published Corporation*, New York, USA, 12-149 (1980).
23. Versteeg, H.K., Malalasekera, W., "An Introduction to Computational Fluid Dynamics, The Finite Volume Method", *Addison Wesley Longman Limited*, England, 48-280 (1995).
24. Seo, D., Young, J.R.Y., Tucker, C.L., "Numerical simulation of mold filling in foam reaction injection molding", *International Journal For Numerical Methods in Fluids*, 42: 1105-1134 (2003).

25. Shen, Y.K., The Study on Polymer Melt Front, Gas Front and Solid Layer in Filling Stage of Gas-Assisted Injection Molding, **International Heat and Mass Transfer**, Vol. 28, No: 1, 139-148, (2001).
26. Yung, K.L., Xu, Y., Lau, K. H., "Simulation of transient process in melting section of reciprocating extruder", *Polymer*, 43: 983-988 (2002).
27. Tang, D., Yang, C., Kobayashi, S., Ku, D.N., "Experiment-based numerical simulation of unsteady viscous flow in stenotic collapsible tubes", *Applied Numerical Mathematics*, 36: 299-320 (2001).
28. Yiğitler, K., "Numerical modeling of cyclone separators laminar swirling flow", Msc. Thesis, *Boğaziçi University Science and Engineering* (1995).
29. Pouillet, P., "Staggered incremental unknowns for solving Stokes and generalized Stokes problems", *Applied Numerical Mathematics*, 35: 23-41 (2000).
30. Maliska, C., Flavia, J., "Vasconcellos, an unstructured finite volume procedure for simulating flows with moving fronts", *Computer Methods in Applied Mechanics Engineering*, 182, 401-420 (2000).
31. Fairlie, R., "A numerical study of loading on plate structures due to transient compressible flows", *Applied Numerical Mathematics*, 34: 381-403 (2000).
32. Guo, D.X., "A second order scheme for the Navier-Stokes equations: application to the driven-cavity problem", *Applied Numerical Mathematics*, 35: 307-322 (2000).
33. Ertürk, V.S., "iki boyutlu düzlemde Newtonian olmayan akışkanların zamandan bağımsız hareketlerinin özellikleri", Doktora Tezi, *Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Samsun (2000).
34. Sasmal, G.P., "A finite volume approach for calculation of viscoelastic flow through an abrupt axisymmetric contraction", *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 56: 15-47 (1995).
35. Kumar, A., Ghoshdastidar, P.S., Muryu, M.K., "Computer simulation of transport process during Injection mold-filling and optimization of the molding conditions", *Journal of Materials Processing Technology*, 120: 438-449 (2002).
36. Bose, A., Carey, G.F., "Least-squares P-R finite element methods for incompressible non-Newtonian flows", *Computer Methods in Applied Mechanics Engineering*, 180: 431-458 (1999).
37. Pillai, K.M., Tucker, C.L., Phelan, F.R., "Numerical simulation of injection/compressible liquid composite molding. part 2: Perform compression", *Composites: Part A*, 32: 207-220 (2001).

38. Connelly, R.K., Kokini, J.L., "2-d numerical simulation of differential viscoelastic fluids in a single-screw continuous mixer: application of viscoelastic finite element methods", *Advanced in Polymer Technology*, 22 (1): 22-41 (2003).
39. Anturkar, N.T., "Petrov-Galerkin finite element analysis for advancing flow front in reaction injection molding", *Computer & Fluids*, 24 (1): 55-62 (1995).
40. Georgiou, G.C., "The time-dependent, compressible poiseuille and extrudate-swell flows of a Carreau fluid with a wall", *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 109: 93-114 (2003).
41. Lee, A.G., Shaqfeh, E.S., Khomami, B., "A study of viscoelastic free surface flows by the finite element method: Hele-Shaw and slot coating flows", *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 108: 327-362 (2002).
42. Holm, E.J., Langtangen, H.P., "A unified element method model for the injection molding process", *Computer Methods in Applied Mechanics Engineering*, 178: 413-429 (1999).
43. Pichelin, E., Coupez, T., "A Taylor discontinuous Galerkin method for the thermal solution in 3d mold filling", *Computer Methods in Applied Mechanics Engineering*, 178: 153-169 (1999).
44. Sepe P. M., "Dynamic mechanical analysis for plastics engineering", *Plastics Design Library*, Norwich, 38-237 (1998).
45. Barriere, T., Gelin, J.C., Liu, B., "Improving mould design and injection parameters in metal injection moulding by accurate 3d finite element simulation", *Journal of Materials Processing Technology*, 125: 518-524 (2002).
46. Chen, S.C., Hsu, K.F., "Numerical simulation and experimental verification of melt front advancements in coinjection molding process", *Numerical Heat Transfer: An International Journal of Computation and Methodology; Part A: Applications*, 28 (4): 503-513 (1995).
47. Tang, L.Q., Chassapis, C., Manoochehri, "Optimal cooling system design multi-cavity injection molding", *Finite Element Analysis and Design*, 26: 229-251 (1997).
48. Wang, Y., Guo, B., "Petrov-Galerkin methods for non-linear systems without monotonicity", *Applied Numerical Mathematics*, 33: 57-78 (2001).
49. Smith, D. E., Tortorelli, D. A., Tucker III, C. L., "Analysis and sensitivity analysis for polymer injection and compression molding", *Computer Methods in Applied Mechanics Engineering*, 167: 325-344 (1998).

50. Lee, B.H., Kim, B.B., "Optimization of part wall thickness to reduce warpage of injection-molded parts based on the modified complex method", *Polymer Plastics Technology Engineers*, 35: 791-815 (1995).
51. Kang, S., Hieber, C.A., Wang, K.K., "Optimal design of process condition to minimize residual stress in injection-molded parts", *Annual Technical Meeting, Society of Plastics Engineers*, 991-995 (1995).
52. Pandelidis, I., Zou, O., "Optimization of injection molding design. Part I: Gate location optimization", *Polymer Engineering Science*, 3: 873-882 (1990).
53. Pandelidis, I., Zou, O., "Optimization of injection molding design. Part II: Molding condition optimization", *Polymer Engineering Science*, 3: 883-892 (1990).
54. Seow, L. W., Lam, Y. C., "Optimizing flow in plastic injection molding", *Journal of Materials Processing Technology*, 72: Pp 333-341 (1997).
55. Pozrikidis, C., "Introduction to Theoretical and Computational Fluid Dynamics", *Oxford University Press*, New York, USA (1997).
56. Paternoster, B., "A phase-fitted collocation-based Runge-Kutta-Nyström method", *Applied Numerical Mathematics*, 35: 339-355 (2000).
57. Kennedy, C.A., Carpenter, M.H., Lewis, R.M., "Low-storage, explicit Runge-Kutta schemes for the compressible Navier-Stokes equations", *Applied Numerical Mathematics*, 35: 177-219 (2000).
58. Street, R.L., Watters, G.Z., Vennard, J.K., "Elementary Fluid Mechanics 7. Ed.", *John Wiley & Sons Inc.*, USA (1996).
59. Crochet, M.J., Davides, A.R., Walters, K., "Numerical Simulation of Non-Newtonian Flow 3. Ed.", *Elsevier Rheology Series 1*, Amsterdam, Netherlands, 1-130 (1991).
60. Leal, L.G., "Laminar Flow and Convective Transport Processes: Scaling Principles and Asymptotic Analysis", *Butterworth-Heinemann In Chemical Engineering*, Stoneham, Ma, USA (1992).
61. Welty, J.R., Wicks, C. E., Wilson, R.E., "Fundamentals of Momentum, Heat and Mass Transfer 3.Ed.", *John Wiley & Sons Inc.*, USA, 15-193 (1984).
62. Moldflow, <http://www.moldflow.com/stp>, (2004).
63. Warsi, Z.U.A., "Numerical grid generation in arbitrary surface through a second-order differential-geometric model", *Journal of Computational Physics*, 64: 82-96 (1986).

64. Rosato, D. V., Rosato, D. V., "Injection Molding Handbook 2nd Edition", **Kluwer Academic Publishers**, Boston/London, 1-1101 (1999).
65. Buckleitner, E. V., "Plastics Mold Engineering Handbook 5th Edition", **Chapman & Hall**, An International Thomson Publishing Company, 1-239 (1995).
66. Pye, R. G. W., "Injection Mold Design 4th Edition", **Longman Scientific & Technical John Wily & Sons Inc.**, New York, 74-254 (1998).
67. Osswald, A. T., "Polymer Processing Fundamentals", **Hanser / Gardner Publications, Inc.**, Cincinnati, 1-139 (1998).
68. Ngo, N.D., Tamma, K.K., "Non-isothermal '2-d flow/3d thermal' developments encompassing process modeling of composites: Flow/thermal/cure formulations and validations", **International Journal For Numerical Methods In Engineering**, 50: 1559-1585 (2001).
69. Shen, Y.K., "Study on moving boundary problems of injection molding", **International Com. Heat and Mass Transfer**, 25 (5): 701-710 (1998).
70. Kabanemi, K.K., Hetu, J.F., "Modeling and simulation of nonisothermal effects in injection molding of rigid fiber suspensions", **Journal of Injection Molding Technology**, 3 (2): 80-87 (1999).
71. Nguyen, K.T., Prystay, M., "An inverse method for estimation of the initial temperature profile and its avolution in polymer processing", **International Journal of Heat and Mass Transfer**, 42: 1969-1978 (1999).
72. Luoma, J.A., Voller, V.R., "An explicit scheme for tracking the filling front during polymer mold filling", **Applied Mathematical Modeling**, 24: 575-590 (2000).
73. Sridhar, L., Sedlak, B.M., Narh, K.A., "Parametric study of heat transfer in injection molding-effect of thermal contact resistance", **Journal of Manufacturing Science Engineering**, 122: 698-705 (2002).
74. Weber, E.H., Clingerman, M.L., King, J.A., "Thermally conductive nylon 6,6 and polycarbonate based resins II. modeling", **Journal of Applied Polymer Science**, 88: 123-1130 (2003).
75. Edvwards, S.A., Provatas, M., Ginic-Markovic, M., Choudhury, N.R., "Probing the interface behaviour of injection molded thermoplastics by micro-thermal analysis and temperature-modulated differential scanning calorimery", **Polymer**, 44: 3661-3670 (2003).

76. Lee, Y.B., Kwon, T.H., "Modeling and numerical simulation of residual stress and birefringence in injection molded center-gated disks", *Journal of Materials Processing Technology*, 111: 214-218 (2001).
77. Kansal, G., Rao, P.N., Atreya, S.K., "Study: temperature and residual stress in a injection moulded gear", *Journal of Materials Processing Technology*, 108: 328-337 (2001).
78. Rezayat, M., Stafford, O. R., "A thermoviscoelastic model for residual stress in injection molded thermoplastics", *Polymer Engineering and Science*, 31 (6): 393-398 (1991).
79. Tamma, K.K., Dowler, B.L., Railcar, S.B., "Computer aided applications to injection molding transfinite element thermal/stress response formulations", *Polymer Engineering and Science*, 28 (7): 421-428 (1988).
80. Wilchinsky, A.V., Faria, S.H., Hutter, K., "Thermodynamic modeling of polymer solutions with molecular form birefringence", *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 99: 57-77 (2001).
81. Wong, A.C., Liang, K.Z., "Thermal effects on the behaviour of pet film used in the in-mould-decoration process involved in plastics injection moulding", *Journal of Materials Processing Technology*, 63: 510-513 (1997).
82. Li, C.L., "A feature-based approach to injection mould cooling system design", *Computer-Aided Design*, 33: 1073-1090 (2001).
83. Lozano-Gonzalez, M.J., Santoz, E.A.G., Johnson, A.F., Tsui, S.W., "Improvement of dimensional stability of nylon-6 block copolymer using phenolic resin by reaction injection molding", *Journal of Applied Polymer Science*, 70: 1811-1816 (1998).
84. Debey, D., Bluhm, R., Habets, N., Kurz, H., "Fabrication of thermocouples for real-time measurements of temperature profiles in polymer melts", *Sensors and Actuators A*, 58: 179-184 (1997).
85. Goyal, S. K., Chu, E., Kamal, M. R., "Non-isothermal radial filling of center-gated disc cavities with viscoelastic polymer melts", *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 28 (3): 373-406 (1988).
86. Chang, T. C., Faison, E., "Optimisation of weld line quality in injection molding using an experimental design approach", *Journal of Injection Molding Technology*, 3 (2): 61-66 (1999).
87. Chung, Y.H., Kato, K., Otake, N., "Melt front stability and welding-defect generation in ceramic injection molding", *Journal of Materials Processing Technology*, 111: 219-224 (2001).

88. Fellahi, S., Meddad, A., Fisa, B., Favis, B.D., "Weldlines in injection-molded parts: A review", *Advances In Polymer Technology*, 14 (3): 169-195 (1995).
89. Hashemi, S., Gara, G., Stanworth, B., "Influence of weld-lines on the tensile strength of short-glass-fibre-and talc-filled polypropylene", *Plastics, Rubber and Composites Processing and Applications*, 22 (2) 105-113 (1994).
90. Liu, S.J., Wu, J.Y., Chang, J.H., "An experimental matrix design to optimize the weld line strength in injection molded parts", *Polymer Engineering and Science*, 40 (5): 1256-1262 (2000).
91. Karaağaç, R., Özdemir, A., GÜltaş, A., "Enjeksiyonla elde edilen plastik ürünlerde oluşan kaynak hattına etki eden enjeksiyon parametrelerinin deneysel olarak incelenmesi", *Gazi Ün. Fen Bilimleri Dergisi*, 15 (3): 717-726 (2002).
92. Karaağaç, R., "Enjeksiyonla elde edilen plastik ürünlerde oluşan kaynak hattına etki eden enjeksiyon parametrelerinin deneysel olarak incelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara (2000).
93. Garcia, G.M.C., Rveda, D.R., Balta, F.J., Kuehnert, I., Menning, G., "Microhardness study across the weld line in doubly injection – molded glassy polymers", *Journal of Materials Science Letters*, 18 (15): 1237–1238 (1999).
94. Kim, J.K., Song, J.H., Chung, S.T., Kwan, T.H., "Morphology and mechanical properties of injection molded articles with weld-lines", *Polymer Engineering and Science*, 37 (1): 228–241 (1997).
95. Mielewski, D.F., Bauer, D.R., Schmitz, P.J., Van Oere, H., "Weld line morphology of injection molded polypropylene", *Polymer Engineering and Science*, 38 (12): 2020–2028 (1998).
96. Selden, R., "Effect of processing on weld line strength in five thermoplastics", *Polimer Engineering and Science*, 37 (1): 205–218 (1997).
97. Dairanieh, I.S., Haufe, A., Wolf, H.J., Mennig, G., "Computer simulation of weld lines in injection molded poly methyl methacrylate", *Polymer Engineering and Science*, 36 (15): 2050-2057 (1996).
98. Rabello, M. S. Ve White, J. R., "Photodegradation of polypropylene mouldings containing weld lines: mechanical properties and surface cracking", *Plastics, Rubber and Composites Processing and Applications*, 25 (5): 237-248 (1996).
99. Menges, G., Mohren, P., "How to Make Injection Molding", *Hanser Publication*, New York, 89-126 (1995).

100. Zhou, H., Li, D., "Filling simulation and gas penetration modeling for gas-assisted injection molding", *Applied Mathematical Modelling* 27 (11): 849-860 (2003).
101. Yaman, G., İren, M., "İnce kesitli bir kanal içerisindeki akımın incelenmesi için $2\frac{1}{2}$ -boyutlu formülasyon", *Makina Tasarım ve İmalat Dergisi*, 4 (2): 78-88 (2001).
102. Khayat, R.E., Elsin, W., Kim, K., "An adaptive boundary element approach to transient free surface flow as applied to injection molding", *International Journal For Numerical Methods in Fluids*, 33: 847-868 (2000).
103. Dimakopoulos, Y., Tsamopoulos, J., "Transient displacement a viscoplastic material by air in straight and suddenly constricted tubes", *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 112: 43-75 (2003).
104. Castany, F.J., Serraller, F., Claveria, I., Javierre, C., "Methodology in gas assisted of plastics", *Journal of Materials Processing Technology*, 143-14: 214-218 (2003).
105. Chung, S.C., Hu, S.Y., Cheein, R.D. Huang, J.S., "Integrated simulation of structure performance, molding process, and warpage for gas-assisted injection molded parts I. Analysis of part structural performance", *Journal of Applied Polymer Science*, 68: 417-428 (1998).
106. Chen, S. C., Cheng, N. T., Chang, M. J., "Investigation of the skin melt formation during gas-assisted injection molding", *Mechanics Research Communication*, 24 (1): 49-56 (1997).
107. Chang, Y.P., Hu, S.Y., Chen, S.C., "Simulation of gas-assisted injection mold-cooling process using line source model approach for gas channel", *International Comm. Heat and Mass Transfer*, 25 (7): 989-998 (1998).
108. Yang, S Y., Liou, S.J., Liou, W.N., "Flow visualization of the gas-assisted injection molding process", *Advances in Polymer Technology*, 16 (3): 175-183 (1997).
109. Wu, J.S., Lee, M.J., "Studies on gas counter pressure and low pressure structural foam molding, part 1: process design and effect of processing conditions on surface quality of molded parts", *Plastics, Rubber and Composites Processing and Applications*, 21 (3), 163-171 (1994).
110. Chen, S.C., Cheng, N.T., Jeng, M.C., "Simulation of polymer melt and gas flow during gas assisted injection moulding of uniform thick part", *Plastics, Rubber and Composites Processing and Applications*, 25 (1): 23-28 (1996).

111. Becker, O., Koelling, K., Altan, T., "Influence of various gas nozzle design upon the gas bubble distribution and the pressure development in gas-assisted injection molding", *ANTEC'97, Conference Proceedings, Society of Plastics Engineers*, 1: 610-614 (1997).
112. Soh, Y.S., Chung, C.H., "Flow directions in the gas assisted injection molding technology", *Antec'97*, 603-609 (1997).
113. Chang, R.Y., "On the dynamics of gas-assisted injection molding process", *ANTEC'97, Conference Proceedings, Society of Plastics Engineers*, 1: 598-602 (1997).
114. Becker, O., Karsoni, D., O. Koelling, K., Altan, T., "Gas-assisted injection molding of long glass fiber reinforced thermoplastics", *ANTEC'97, Conference Proceedings, Society of Plastics Engineers*, 1: 615-619 (1997).
115. Chen, S.C., Hu, S.H., Jong, W.R., Jeng, M.C., "Structural analysis, process simulation and warpage calculation for gas-assisted injection molded part using a unified CAE model", *ANTEC'97, Conference Proceedings, Society of Plastics Engineers*, 1: 620-624 (1997).
116. Gao, D.M., Garcia-Rejon, A., Salloum, G., "Design optimization of gas channels for an air cleaner assembly using CAE simulation", *ANTEC'97, Conference Proceedings, Society of Plastics Engineers*, 1: 625-629 (1997).
117. Lim, K.H., Soh, Y.S., "The diagnosis of flow direction under fan shaped geometry in gas assisted injection molding", *Journal of Injection Molding Technology*, 3 (1): 31,38 (1999).
118. Wang, T.J., "Computer simulation and experimental verification of gas-assisted injection molding", *Journal of Injection Molding Technology*, 2 (3): 120,127 (1998).
119. Lee, S. C., Yang, D. Y., Ko, J., Youn, J. R., "Effect of compressibility on flow field and fiber orientation during the filling stage of injection molding", *Journal of Materials Processing Technology*, 70: 83-92 (1997).
120. Kim, E.G, Park, J.K., Jo, S.H., "A study on fiber orientation during the injection molding of fiber-reinforced polymeric composites (comparison between image processing result and numerical simulation)", *Journal of Materials Processing Technology*, 111: 225-232 (2001).
121. Özdemir, E., "Polipropilen (PP) ve naylon 6 (PA 6) plastiklerine katılan cam elyafın mekanik özelliklere etkisinin deneysel araştırılması", Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara (2001).

122. R. Mendoza, G. Régnier, W. Seiler and J. L. Lebrun, "Spatial distribution of molecular orientation in injection molded IPP: Influence of processing conditions", *Polymer*, 44: 3363-3373 (2003).
123. Martin, G.S., Schmidt, F., Devos, P., Levaillant, C., "Voids in short fibre-reinforced injection moulded parts: Density control vs. mass control", *Polymer Testing*, 22 (8): 947-953 (2003).
124. Han, K.H., Im, Y.T., "Numerical simulation of three-dimensional fiber orientation in short-fiber-reinforced injection-moulded parts", *Journal of Materials Processing Technology*, 124: 366-371 (2002).
125. Shen, Y.K., Yeh, P.H., Wu, J.S., "Numerical simulation for thin wall injection molding of fiber-reinforced thermoplastics", *International Comm. Heat and Mass Transfer*, 28 (8): 1035-1042 (2001).
126. Chen, S.C, Chen, Y.C, Peng, H.S., "Simulation of injection-compression-molding process II. Influence of process characteristics on part shrinkage", *Journal of Applied Polymer Science*, 75: 1640-1654 (2000).
127. Svetec, D.G., "Mechanical properties of polypropylene fibers produced from the binary polymer blends of different molecular weights", *Journal of Applied Polymer Science*, 75: 1211-1220 (2000).
128. Ho, K.C., Leng, M.C., "Tribological characteristics of short glass fibre reinforced polycarbonate composites", *Wear*, 205: 60-68 (1997).
129. Skourlis, T. P., Pochiraju, K., Chassapis, C., Manoochchri, S., "Structure-modulus relationship for injection-molded long fiber-reinforced polyphthalamides", *Composites Part B 29B*, 1: 309-320 (1998).
130. Young, W.B., "Resin flow analysis in the consolidation of multi-directional laminated composites", *Polymer Composites*, 16 (3): 250-257 (1995).
131. Berg, J.M., Voller, V.R., "An identification and control strategy for a liquid composite molding process", *Applied Mathematical Modelling*, 22: 207-218 (1998).
132. Grene, J.P., "Numerical analysis of injection molding of glass fiber reinforced thermoplastics. Part 2: Fiber orientation", *Polymer Engineering and Science*, 37 (6): 1019-1035 (1997).
133. Hung, F.C., Shen Y. K. "Numerical simulation of fiber orientation in injection mold filling", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 22 (6): 791-802 (1995).

134. Bickerton, S., Advani, S. G., "Experimental investigation and flow visulation of the resin-transfer mold-filling process in a non-planar geometry", *Composites Science And Technology*, 57: 23-33 (1997).
135. Ho, K.C., Jeng, M.C., "Fibre orientation of short glass fibre reinforced polycarbonate composites under various injection□ moulding conditions", *Plastics, Rubber and Composites Processing and Applications*, 25 (10): 469-476 (1996).
136. Trochu, F., Boudreault, J.F., Gao, D.M., Gauvin, R., "Three-dimensional flow□ simulations for the resin transfer molding process", *Materials and Manufacturing Processes*, 10 (1): 21-26 (1995).
137. Mok, S.L., Kwong, C.K., "Review of research in the determination of process parameters for plastic injection molding", *Advanced in Polymer Technology*, 18, (3): 225-236 (1999).
138. Galantucci, L.M, Spina, R., "Evaluation of filling condition of injection molding by integrating numerical simulations and experimental test", *Journal of Materials Processing Technology*, 141 (2): 266-275 (2003).
139. Kikuchi, A., Higuerey, E., Coulter, J., "Experimental investigation of resin flow□ sensing during molding processes", *Journal of Engineering Materials and Technology, Transaction of The ASME*, 117: 86-93 (1995).
140. Nardin, B., Kuzman, K., Kampus, Z., "Injection moulding simulation result as an input to the injection moulding process", *Journal of Materials Processing Technology*, 130 & 131: 310-314 (2002).
141. Demirci, H.H., Coulter, John P., Gucer, S.I., "Numerical and experimental investigation of neural network-based intelligent control of molding processes", *Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME*, 119 (1): 88-94 (1997).
142. We, H., Zhang, Y.F., Lee, K.S., Fuh, J.Y.H., Nee, A.Y.C, "Automated process parameter restting for injection moulding: a fuzz-neuro approach", *Journal of Intelligent Manufacturing*, 9 (1): 17-27 (1998).
143. He, W., Zhang, Y.F., Lee, K.S., "Development of a fuzz-neuro system for parameter resetting of injection molding", *Journal of Engineering Materials and Technology, Transaction of The ASME*, 123: 110-118 (2001).
144. Sulaiman, S., Keen, T.C., "Flow analysis along the runner and gating system of casting process", *Journal of Materials Processing Technology*, 63: 690-695 (1997).

145. Lau, H.C.W., Wong, T.T., Pun, K.F., "Neural-fuzzy modeling of plastic injection molding machine for intelligent control", *Expert System With Application*, 17: 33-43 (1999).
146. Yarlagadda, P.K.D.V., "Development of an integrated neural network system for prediction of process parameters in metal injection molding", *Journal of Materials Processing Technology*, 130 & 131: 315-320 (2002).
147. Yarlagadda, P.K.D.V., Khong, C.A.T., "Development of a hybrid network system for prediction of process parameters in injection moulding", *Journal of Materials Processing Technology*, 118: 110-116 (2001).
148. Liu, S.J., Lin, C.H., Wu, Y.C., "Minimizing the sinkmarks in injection-molded thermoplastics", *Advanced In Polymer Technology*, 20 (3): 202-215 (2001).
149. Yeung, V.W.S. Lau, K.H., "Injection molding, C-Mold CAE package, process parameter design and quality function deployment: a case study of intelligence materials processing", *Journal of Materials Processing Technology*, 63: 481-487 (1997).
150. Mathur, R., Fink, B.K., Advani, S.G., "Use of genetic algorithm to optimize gate and vent locations for the resin transfer molding process", *Polymer Composites*, 20 (2): 167-178 (1999).
151. Kim, S.J., Lee, K., Kim, Y.L.K., "Optimization of injection molding condition using genetic algorithm", *Proc SPIE*, 264: 173-180 (1996).
152. Bozdana, A.T., Eyercioglu, Ö., "Development of an expert system for the determination of injection moulding parameters of thermoplastic materials: Expimm", *Journal of Materials Processing Technology*, 128: 113-122 (2001).
153. He, W., Zhang, Y.F., Lee, K.S., Fuh, J.Y.H., Nee, A.Y.C., "Automated process parameter resetting for injection moulding: A fuzzy-neuro approach", *Journal of Intelligent Manufacturing*, 9 (1): 17-27 (1998).
154. Lee, B.H., Kim, B.H., "Automated design for the runner system of injection molds based on packing simulation", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 22 (2): 179-188 (1995).
155. Carreau, P.J., Kee, D.C.R.D., Chhabra, R.P., "Rheology of polymeric system", *Hanser/Gardner Publications*, Cincinnati, 1-132 (1997).
156. Matsoukas, A., Mitsoulis, E., "Geometry effect in squeeze flow of bingham plastics", *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 109: 231-240 (2003).

157. Alexandrou, A., Duc, E., Entov, V., "Inertial, viscos and yield stress effect in bingham fluid filling of a 2-d cavity", *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 96: 383-403 (2001).
158. Wu, P.C., Huang, C.F., Gogus, C., "Simulation of the mold-filling process", *Polymer Engineering and Science*, 14 (3): 223-230 (1974).
159. Hill, D., "Further studies of the injection moulding process", *Applied Mathematical Modelling*, 20: 719-720 (1996).
160. Nakamura, M., Sawada, T., "Numerical study on the laminar pulsatile flow of slurries", *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 22: 191-206 (1987).
161. Stevenson, J.F., "A simplified method for analyzing mold filling dynamics: part I: Theory", *Polymer Engineering and Science*, 18 (7): 577-582 (1978).
162. Kang, M.K., Lee, W.I., "Analysis of resin transfer/compression molding", *Polymer Composites*, 20 (2): 293-304 (1999).
163. Gao, D.M., Reymond, S., Garcia-Rejon, A., "Modeling of the effect of mold venting on the injection molding process", *Journal of Injection Molding Technology*, 2 (3): 136-140 (1998).
164. Lam, Y.C., Seow, L.W., "Cavity balance for plastic injection molding", *Polymer Engineering and Science*, 40 (6): 1273-1280 (2000).
165. Chen, X., Gao, F., "A study of packing profile on injection molded part quality", *Materials Science and Engineering*, 136: 1-9 (2003).
166. Garcia, J.A., Gascon, L., Chinesta, F., "A fixed mesh numerical method for modeling the flow in liquid composites moulding process using a volume of fluid technique", *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 192: 877-893 (2003).
167. Verbeeten, W., M.H., Peters, G.W.M., Baaijens, P.T., "Viscoelastic analysis of complex polymer melt flows using the extended pom-pom model", *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 108: 301-326 (2002).
168. Khayat, R., E., "Transient two-dimensional coating flow of a viscoelastic fluid film on a substrate of arbitrary shape", *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 95: 199-233 (2000).
169. Khayat, R., E., "Boundary element analysis of planar drop deformation in confined flow. Part II. Viscoelastic fluid", *Engineering Analysis With Boundary Element*, 22: 291-306 (1998).

170. Hulsen, M.A., Peters E.A.J.E., Brule, B.H.A.Aa., "A new approach to the deformation field for solving complex flow using integral constitutive equations", *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 98: 201-221 (2001).
171. Garcia, N., Gonzalez, E., Baselga, J., Bravo, J., "Critical thickness estimation in iso-mc card injection using CAE tools", *Journal of Materials Processing Technology*, 143-144: 491-494 (2003).
172. Chen, X., Gao, F., "A study of packing profile on injection molded part quality", *Materials Science and Engineering*, 136: 1-9 (2003).
173. Min, B.H., "A study on quality monitoring of injection-molded parts", *Journal of Materials Processing Technology*, 136: 1-6 (2003).
174. Yamaguchi, M., Gogus, D.T.C.G., "Rheological properties of LDPE processed by conventional processing machines", *Advances in Polymer Technology*, 22 (3): 179-187 (2003).
175. Sheth, H., Nunn, R.E., "Temperature based adaptive holding control using injection molding machine generated PVT data", *ANTEC'97, Conference Proceedings, Society of Plastics Engineers*, 1: 551-557, (1997).
176. Rodgers, P.A., "Pressure-volume temperature relationship for polymeric liquids: A review of equations of state and their characteristics parameters for 56 polymers", *Journal of Applied Polymer Science*, 48: 1061-1080 (1993).
177. Zuidema, H., Peters, G.W.M., Meijer, H.E.H., "Influence of cooling rate on PVT-data of semicrystalline polmer", *Journal of Applied Polymer Science*, 82: 1170-1186 (2001).
178. Tang, C.Y., Liang, J.Z., "A study of the melt flow behaviour of ABS/CaCO₃ composites", *Journal of Materials Processing Technology*, 136: 1-3 (2003).
179. Zimmerman, E., Acharya, S., "Free convection heat transfer in a partially divided vertical enclosure with conducting end walls", *International Heat and Mass Transfer*, 30 (2): 319-331 (1987).
180. Mat, M.D., Altınışık, K., Karakoç, F., Kaplan, Y., "Mathematical modeling of fraction during the mold filling of semi-solid metal slurries", *Journal of Engineering and Environmental Science*, 23: 381-388 (1999).
181. Mat, M.D., "A two-fluid model of buoyancy driven mixing in a closed cavity", Phd Thesis, *Northeastern University*, Boston, Massachusetts (1997).
182. Küçük, M.İ.A., "Duvarlarında kanatçılar bulunan kapalı hacimlerde doğal konveksiyon ısı transferinin sayısal analizi", Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara (1998).

183. Akovalı, G. (Ed.), "Temel Uygulamalı Polimer", Polimer Yaz Okulu Ders Notları, *Temel ve Uygulamalı Makromoleküller K. Araştırma Ünitesi*, ODTÜ, Ankara, 89-425 (1984).
184. Herbert, R., "Mold Engineering", *Hanser Publication*, Munich Vienna New York, 1-250 (1995).
185. Douglas, M. B., "Termoplastic Troubleshooting For Injection Molders", *SPE Series*, 1-182 (1991).
186. Michaeli, G., Kaufmann, V., "Training in Plastic Technology", *Hanser/Gardner Publications Inc.*, Cincinnati, 1-65 (1995).
187. Mark, F., Bikales, M., Overberger, G., Menges, G., "Encyclopedia of Polymer Science and Engineering", *Wiley Interscience*, New York, 1-308 (1989).
188. Cappelletti, R. M., "International Plastics Handbook 3rd Edition", *Hanser/Gardner Publications Inc.*, Cincinnati, 1-340 (1995).
189. Kadota, M., Cakmak, M., Hamada, H., "Structural hierarchy developed in co-injection molded polystyrene/polypropylene parts", *Polymer*, 40: 3119-3145 (1999).
190. Sanden, L.V.D., "Flow length versus injection pressure for PBT engineering plastics", *AMP Journal of Technology*, 2: 76-80 (1992).
191. Hetu, J.F., Gao, D.M., Garcia-Rejon, A., Salloum, G., "3D finite element method for the simulation of the filling stage in injection molding", *Polymer Engineering and Science*, 38 (2): 223-236 (1998).
192. Williams, G., Lord, H.A., "Mold-filling studies for the injection molding of thermoplastic materials. part I: The flow of plastic materials in hot- and cold-walled circular channels", *Polymer Engineering and Science*, 15 (8): 553-567 (1975).
193. Huang, B., Liang, S., Qu, X., "The rheology of metal injection molding", *Journal of Materials Processing Technology*, 137: 132-137 (2003).
194. Tao, Z., Huang, J.C., "Observation of melt fracture of polypropylene resin in capillary flow", *Polymer*, 44: 719-727 (2003).
195. Goutille, Y., Carrot, C., Majeste, J.C., Prochazka, F., "Crosslinking in the melt of EVA using tetrafunctional silane: Gel time from capillary rheometry", *Polymer*, 44: 3165-3171 (2003).

196. Abraham, D., George, K.E., Francis, D.J., "Flow behaviour of LDPE and its blend with LLDPE I and II: A comparative study", *Journal of Applied Polymer Science*, 62: 59-65 (1996).
197. Namhata, S., Guest, M.J., Aerts, L.M., "Blend morphology development during melt flow correlation of a model concept based on dynamic phase volume with practical observations", *Journal of Applied Polymer Science*, 71: 311-318 (1999).
198. Wnag, Y., Xiao, Y., Zhang, Q., Gao, X.L., Fu, Q., "The morphology and mechanical properties of dynamic packing injection molded PP/PS blends", *Polymer*, 44: 1469-1480 (2003).
199. Grillet, A.M., Bogaerds, C.B., Peters, G.W.M., Baaijens, P.T., "Stability analysis of constitutive equations for polymer melts in viscometric flows", *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 103: 221-250 (2002).
200. Mitsoulis, E., "Numerical simulation of entry flow of the IUPAC-LDPE melt", *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 97: 13-30 (2001).
201. Nakken, T., Tande, M., Elgsaeter, A., "Measurement of polymer induced drag reduction and polymer scission in Taylor flow using standart double-gap sample holders with axial symmetry", *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 97: 1-12 (2001).
202. Poitou, A., Ammar, A., Marco, Y., Chevalier, L., Chaouche, M., "Crystallization of polymer under strain: From moleculer properties to macroscopic models", *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 192 (28-30): 3245-3264 (2003).
203. Binding, D.M., Couh, M.A., Walters, K., "The pressure dependence of the shear and elongational", *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 79: 137-155 (1998).
204. Liang, J.Z., "Pressure effect of viscosity for polymer fluids in die", *Polymer*, 42: 3709-3712 (2001).
205. Royer, J.R., Gay, Y.J., Adam, M., Desimone, J.M., Khan, S.A., "Polymer melt rheology with high-pressure CO₂ using a novel magnetically levitated sphere rheometer", *Polymer*, 43: 2375-2383 (2002).
206. Maia, J.M., Covas, J.A., Nobrega, J.M., Dias, T., Alves, F.E., "Measuring uniaxial extensional viscosity using a modified rotational rheometer", *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 80: 183-197 (1999).

207. Apone, S., Bongiovanni, R., Braglia, M., Scalia, D., Priola, A., "Effects of thermomechanical treatments on HDPE used for TLC ducts", **Polymer Testing**, 22: 275-280 (2003).
208. Huang, M.C., Tai, C.C., "The effective factors in the warpage problem of an injection-molded part with a thin shell feature", **Journal of Materials Processing Technology**, 110: 1-9 (2001).
209. Akay, M., Ozden, S., "Prediction of process-induced warpage in injection molded thermoplastics", **Polymer Engineering and Science**, 36 (13): 1839-1846 (1996).
210. Jaworski, M.J., Using CAE Injection Molding Simulation to Predict Overpack, Voids and Sink, **ANTEC'97, Conference Proceedings, Society of Plastics Engineers**, 3: 3642-3646, (1997).
211. Çakır, Y., Özdemir, A., GÜltaş, A., "Plastik ürünlerde çekme miktarına etki eden enjeksiyon parametrelerinin incelenmesi", **Teknoloji**, 1-2: 19-29 (2001).
212. Zhang, S.X., Khayat, R.E., "A low-dimensional spectral approach for transient free-surface flow inside thin cavities of symmetric shape", **International Journal For Numerical Methods in Fluids**, 39: 719-741 (2002).
213. Pazos, M., Baselga, J., "Limiting thickness estimation in polycarbonate lenses injection using CAE tools", **Journal of Materials Processing Technology**, 143-144: 438-441 (2003).
214. Lai, C.L., Young, W.B., "The effects of performing induced variable permeabilities on the RTM molding flow", **Polymer Composites**, 20 (2): 225-239 (1999).
215. Lin, J.C., "Optimum cooling system design of a free-form injection mold using an abductive network", **Journal of Materials Processing Technology**, 120: 226-236 (2002).
216. Tang, L.Q., Chassapis, C., Manoochehri, S., Optimal cooling system design for multi-cavity injection molding, **Finite Element in Analysis and Design**, 26: 229-251 (1997).
217. Wang, H., Prystay, M., Hetu, J.F., Cao, B., Jen, C.K., "Gap between mold and part and its effect on cooling of injection-molded plastics", **Antec'96, Conference Proceedings, Society of Plastics Engineers**, 1: 1049-1053 (1996).
218. Uluer, O., "Plastik enjeksiyonla kalıplamada polimer ergiyeğin kalıp boşluğuna akışında akış burnu oluşumunun deneysel incelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara (2002).

219. Yang, W.M., Yokoi, H., "Visual analysis of the flow behavior of core material in a fork portion of plastic sandwich injection molding", *Polymer Testing*, 22: 37-43 (2003).
220. Yokoi, H., Masuda, N., Mitsuhashi, H., "Visulation analysis of flow front behavior during filling process of injection mold cavity by two-axis tracking system", *Journal of Materials Processing Technology*, 130 & 131: 328-333 (2002).
221. Tredoux, L., Satoh, I., "Investigation of wave-like flow marks in injection molding: flow visulation and micro-geometry", *Polymer Engineering and Science*, 39 (11): 2233-2241 (1999).
222. Kikuchi, A., Higuerey, E., Coulter, J., "An experimental investigation of resin flow sensing during molding process", *Journal of Engineering Materials and Technology, Transaction of The ASME*, 117: 8693 (1995).
223. Coyle, D.J., Blake, J.W., Macosko, C.W., "The kinematics of fountain flow in mold-filling", *AIChE Journal*, 33 (7): 1168-1177 (1987).
224. Umur, H., "Akışkanlar Mekaniği", *Alfa Basım Yayın Dağıtım*, İstanbul, 1-457 (1998)
225. Pozrikidis, C., "Introduction to Theoretical and Computational Fluid Dynamics", *Oxford University Press*, New York, USA (1997).
226. Wendt, J.F., "Computational Fluid Dynamics and Introduction 2. Ed.", *Springer*, Berlin, Germany, 1-350 (1996).
227. Schlichting, H., "Boundary-Layer Theory", *McGraw-Hill Book Company* 17. Ed., USA, 1-375 (1979).
228. White, F.M., "Fluid Mechanics 4th Ed.", *McGraw-Hill Inc.*, New York, USA, 24-273 (1994).
229. Van Leer, B., "Towards the ultimate conservative difference scheme IV. A new approach to numerical convection", *Journal of Computational Physics*, 23: 276-299 (1977).
230. Kim, Y.S., Chung, C.I., Lai, S.Y., Hyun, K.S., "Melt rheological and thermodynamic properties of polyethylene homopolymers and poly(ethylene/α-olefin) copolymers with respect to molecular composition and structure", *Journal of Applied Polymer Science*, 59: 125-137 (1996).
231. Liang, J.Z., Li, R.K.Y., Tjong, S.C., Effects of pressure and temperature on the melt density and the melt flow rate of LDPE and glass bead-filled LDPE composite, *Journal of Materials Processing Technology*, 91: 167-171 (1999).

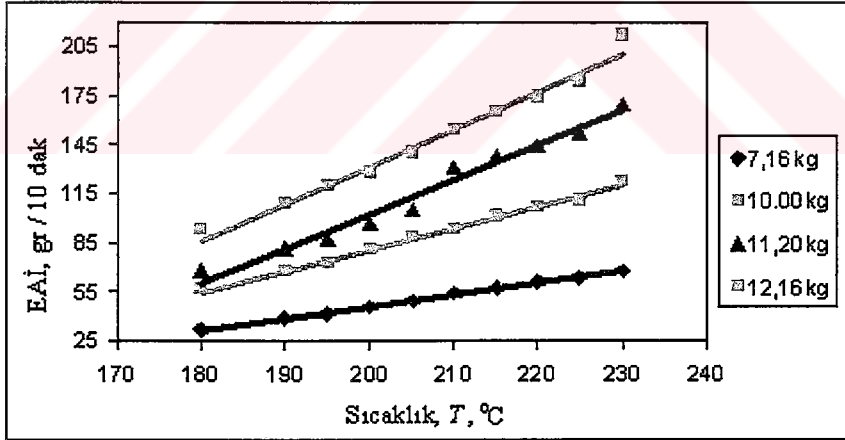
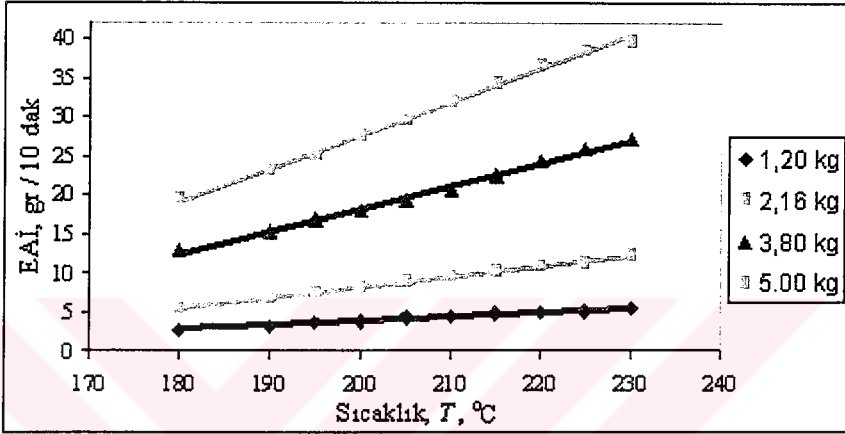
232. Koçer, A., “Seramik endüstrisinde kullanılan çeşitli polimerik bağlayıcı besleme stoklarının hazırlanması ve reolojik özelliklerinin incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara (2001).
233. ASTM D 1238, Standart Test Method For Melt Flow Rates of Thermoplastics by Extrusion Plastomer¹, *Annual Book of ASTM Standart*, 08.01: 265-276 (2001).
234. **TSE 1323**, Plastikler-Termoplastikler-Kütlesel Erime Akış Hızı (MFR) ve Hacimsel Erime Akış Hızı (MVR)’ nin Tayini, TSE, Ankara (1993).
235. Petkim, <http://www.petkim.com.tr>, 2003.
236. Basu, D., Data, C., Banerjee, A., “Biodegradability, mechanical properties, melt flow index, and morphology of polypropylene/amylose/amylose-ester blends”, *Journal of Applied Polymer Science*, 85 (7): 1434-1442 (2002).
237. Nexygen Davenport Plastik Test Software user manuel, *Nexygen Davenport* (2002).
238. Material properties, <http://www.material.com>, 2004.



EKLER

EK 1

Farklı Yükler İçin, EAI - Sıcaklık Grafiği ve EAI-Sıcaklık İlişisine Ait Sabitler

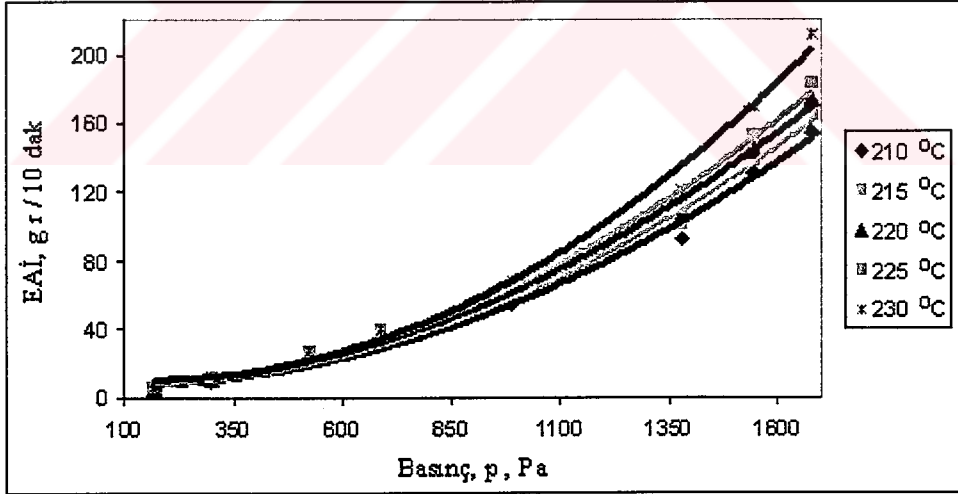
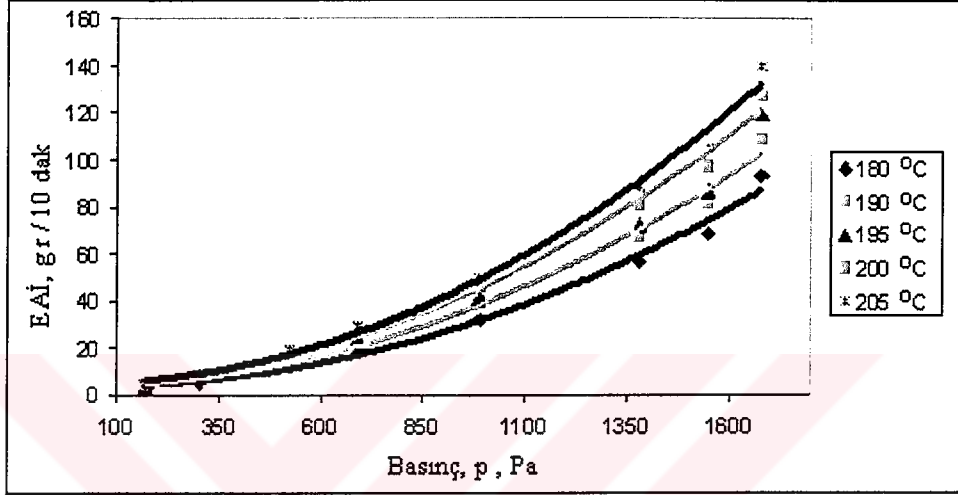


EAI-sıcaklık ilişkisine ait sabitler

Ağırlık (kg)	A_0	A_1	R^2
1,2	-7,1724	0,0551	0,984
2,16	-18,578	0,1337	0,995
3,8	-40,356	0,2929	0,994
5	-57,490	0,4253	0,996
7,16	-98,768	0,7244	0,997
10	-179,300	1,3007	0,994
11,2	-316,120	2,0947	0,973
12,16	-322,160	2,2706	0,978

EK 2

Değişik Sıcaklıklar İçin, EAI - Basınç Grafiği Ve EAI- Basınç İlişkisine Ait Sabitler

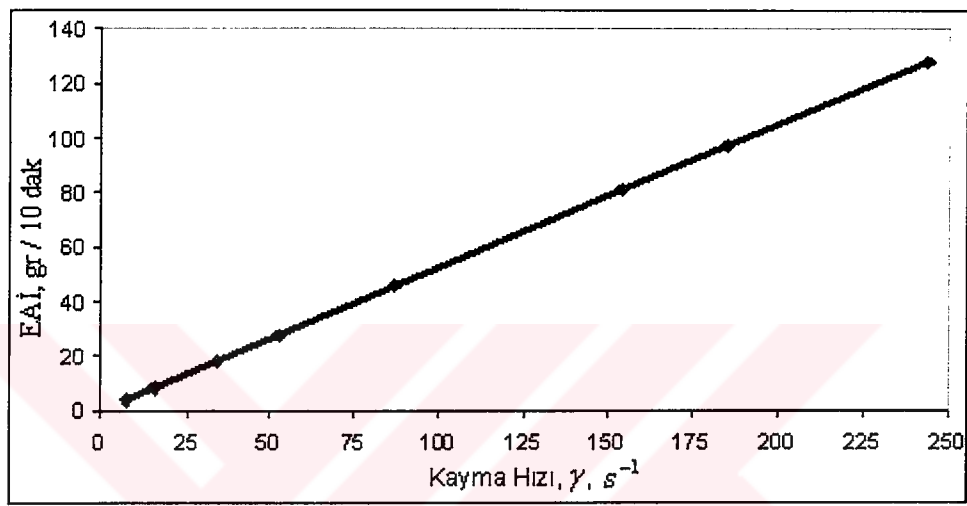


EAI- basınç ilişkisine ait sabitler

Sıcaklıklar (oC)	B_0	B_1	B_2	R^2
180	3,841	-0,0024	0,0003	0,988
190	3,758	0,0007	0,0003	0,991
195	5,194	-0,0027	0,0004	0,986
200	4,328	0,0017	0,0004	0,992
205	5,044	0,0001	0,0005	0,991
210	6,530	-0,0062	0,0005	0,994
215	7,148	-0,007	0,0006	0,995
220	7,054	-0,0045	0,0006	0,995
225	7,622	-0,0059	0,0006	0,994
230	12,409	-0,0257	0,0008	0,992

EK 3

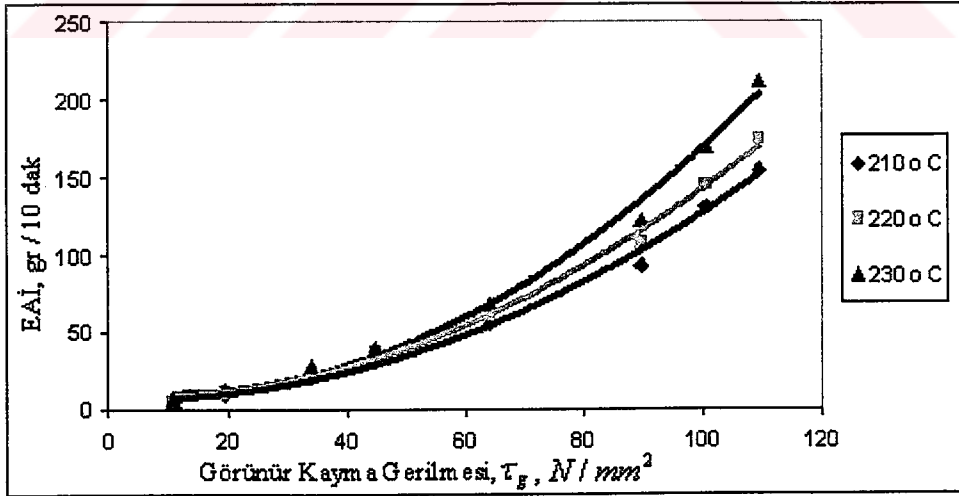
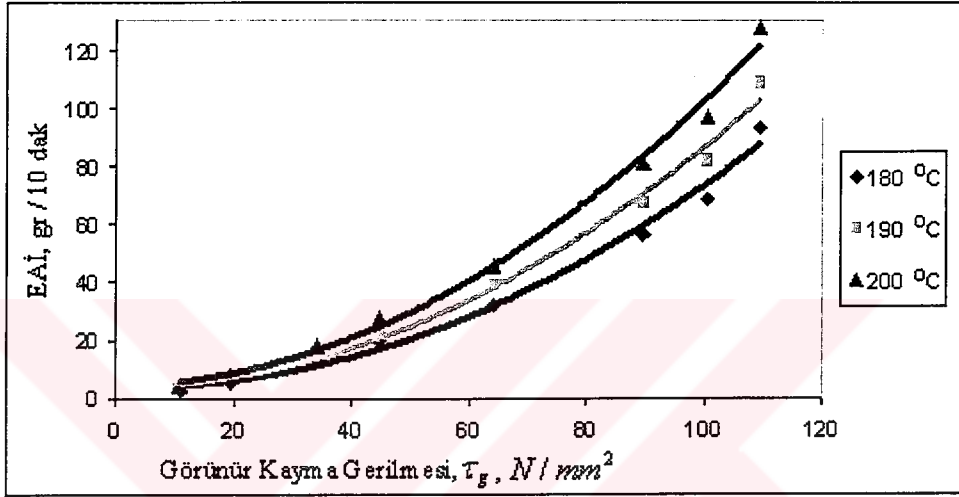
EAl-Görünür Kayma Hızı Grafiği



T=200 °C

EK 4

Değişik Sıcaklıklar İçin, Ergiyik Akış İndeksi-Görünür Kayma Gerilmesi Grafiği



EK 5

**Görünür ve Düzeltilmiş Kayma Hızı ve Viskozite Değerleri ve ASTM 1238 ve
TSE 1323 Standartlarına Göre Kullanılan Ağırlıklar ve Kapiler Silindirde
Oluşturdukları Basınç Değerleri**

Ağırlık	Sıcaklıklar	Görünür	Düzeltilmiş	Görünür	Düzeltilmiş
kg	°C	γ_g	γ_d	η_g	η
1,2	180	5,0939	5,749	2114,7	1871,359
1,2	190	6,0758	6,844	1772	1571,869
1,2	195	6,7991	7,626	1583,9	1410,748
1,2	200	7,3506	8,256	1463,8	1303,033
1,2	205	8,2276	9,233	1309	1165,177
1,2	210	8,5005	9,624	1266,3	1117,853
1,2	215	9,1224	10,321	1180,4	1042,343
1,2	220	9,5483	10,785	1127,8	997,534
1,2	225	9,6428	10,933	1116,5	984,003
1,2	230	10,296	11,742	1045,6	916,199
2,16	180	10,378	11,712	1866,4	1653,407
2,16	190	12,705	14,312	1525	1353,104
2,16	195	14,394	16,144	1345,4	1199,514
2,16	200	15,629	17,554	1239,6	1103,146
2,16	205	17,05	19,133	1136,1	1012,108
2,16	210	18,311	20,731	1057,9	934,121
2,16	215	19,525	22,090	991,82	876,627
2,16	220	20,735	23,420	934,07	826,867
2,16	225	21,299	24,149	909,34	801,911
2,16	230	23,359	26,640	829,14	726,926
3,8	180	24,503	27,653	1390,8	1232,015
3,8	190	29,17	32,859	1168,2	1036,839
3,8	195	32,097	35,999	1061,9	946,377
3,8	200	34,305	38,531	993,12	884,196
3,8	205	36,629	41,105	930,19	828,835
3,8	210	39,464	44,679	863,31	762,528
3,8	215	42,805	48,429	795,96	703,482
3,8	220	46,66	52,701	730,26	646,453
3,8	225	49,397	56,006	689,73	608,312
3,8	230	51,74	59,006	658,47	577,377

EK 5 (Devam)

Ağırlık	Sıcaklıklar	Görünür	Düzeltilmiş	Görünür	Düzeltilmiş
kg	°C	γ_g	γ_d	η_g	η
5	180	37,141	41,916	1207	1069,454
5	190	43,914	49,467	1021,3	906,202
5	195	47,584	53,369	942,06	839,939
5	200	52,713	59,207	850,45	757,127
5	205	56,218	63,087	797,43	710,555
5	210	60,757	68,786	737,82	651,690
5	215	65,276	73,852	686,95	606,980
5	220	70,035	79,103	640,13	566,692
5	225	73,465	83,294	610,2	538,179
5	230	75,582	86,197	593,22	520,054
7,16	180	61,133	68,992	1050	930,425
7,16	190	74,227	83,613	865,17	767,728
7,16	195	79,471	89,133	807,86	720,181
7,16	200	86,861	97,561	739,03	657,965
7,16	205	94,424	105,962	679,95	605,804
7,16	210	104,26	118,038	615,94	543,827
7,16	215	108,93	123,242	589,38	520,861
7,16	220	116,24	131,291	552,31	488,931
7,16	225	121,28	137,506	529,33	466,831
7,16	230	129,4	147,573	496,17	434,984
10	180	107,58	121,410	833,38	738,438
10	190	128,34	144,569	699,03	620,149
10	195	137,83	154,588	650,56	579,956
10	200	154,14	173,129	598,93	517,847
10	205	169,07	189,729	530,27	472,538
10	210	177,34	200,775	505,61	446,540
10	215	192,93	218,279	479,36	410,732
10	220	204,08	230,504	439,35	388,948
10	225	211,48	239,774	424,19	373,911
10	230	232,75	265,438	385,35	337,759

EK 5 (Devam)

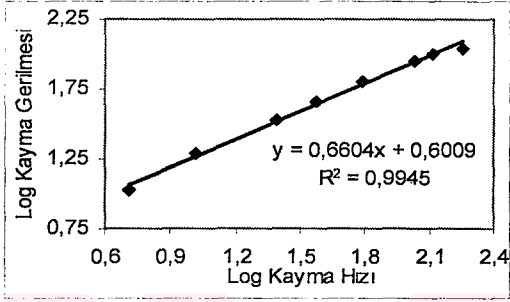
Ağırlık	Sıcaklıklar	Görünür	Düzeltilmiş	Görünür	Düzeltilmiş
kg	°C	γ_g	γ_d	η_g	η
11,2	180	130,72	147,525	767,16	680,630
11,2	190	156,11	175,850	643,21	570,998
11,2	195	166,03	186,216	604,8	539,212
11,2	200	184,94	207,723	543,57	483,385
11,2	205	200,39	224,876	501,13	446,513
11,2	210	249,76	282,765	402,1	355,101
11,2	215	263,26	297,849	381,5	337,117
11,2	220	276,05	311,792	363,79	322,041
11,2	225	290,38	329,230	345,85	304,985
11,2	230	323	368,363	310,89	272,585
12,16	180	177,84	200,703	615,47	544,985
12,16	190	207,38	233,603	527,74	468,230
12,16	195	228,28	256,035	479,32	427,208
12,16	200	243,77	273,800	448,87	399,489
12,16	205	267,07	299,703	409,54	364,961
12,16	210	294,63	333,564	371,45	327,913
12,16	215	315,44	356,885	346,79	306,485
12,16	220	332,31	375,337	329,26	291,418
12,16	225	349,11	395,817	313,31	276,340
12,16	230	404,34	461,126	273,09	237,202

Bu çizelgede verilen ve ASTM 1238 ve TSE 1323 standartlarına göre belirlenen yükler ve pistonun ağırlığının kapiler silindirin de oluşturdukları basınç değerleri aşağıdaki gibidir.

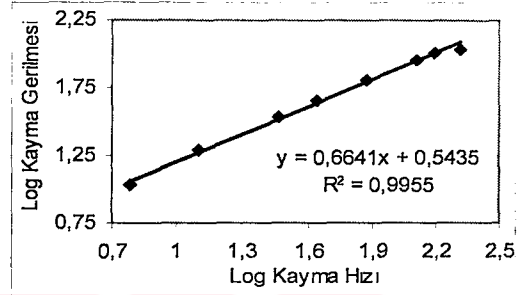
Ağırlık, kg	Basınç değeri, Pa
1,20	165,40
2,16	298,20
3,80	524,00
5,00	689,50
7,16	987,36
10,00	1379,00
11,20	1545,40
12,16	1677,86

EK-6

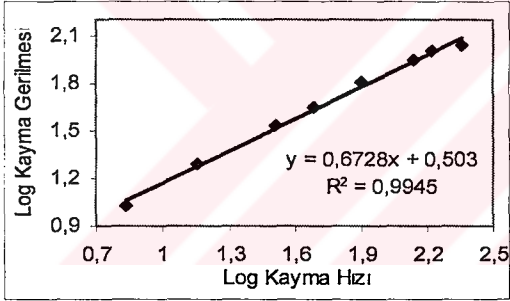
Farklı Sıcaklıklar İçin log Kayma Gerilmesi-log Kayma Hızı Grafiği



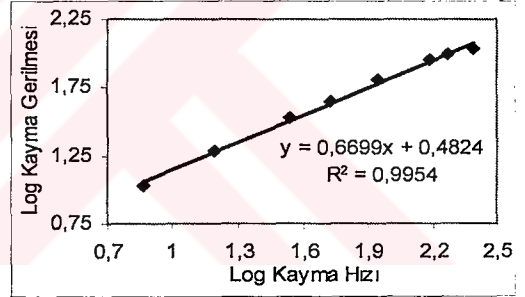
180 °C



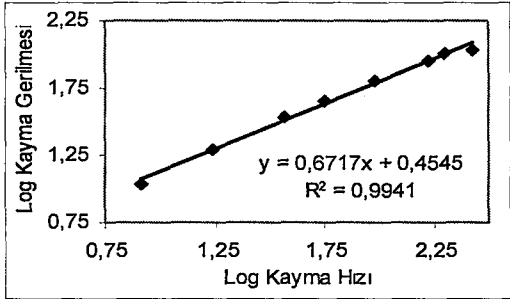
190 °C



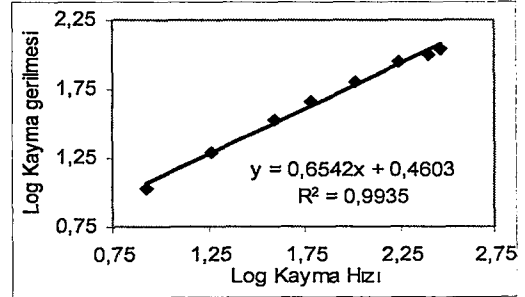
195 °C



200 °C

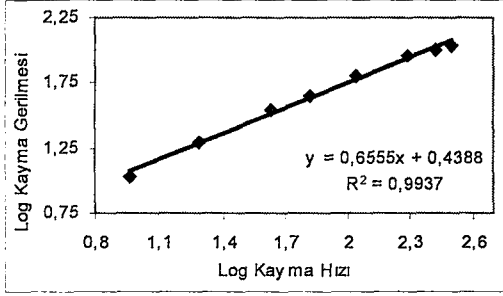


205 °C

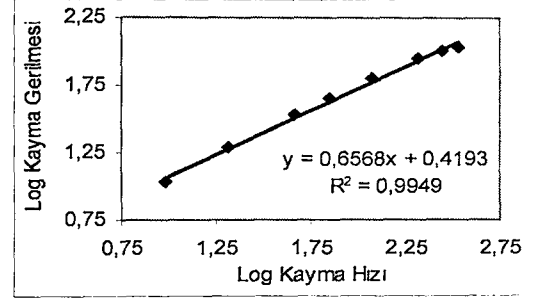


210 °C

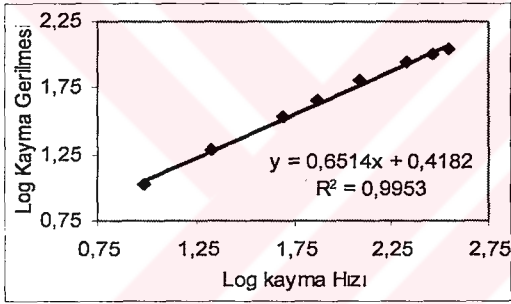
EK-6 (Devam)



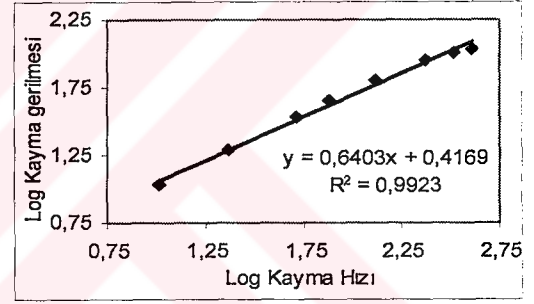
215 °C



220 °C



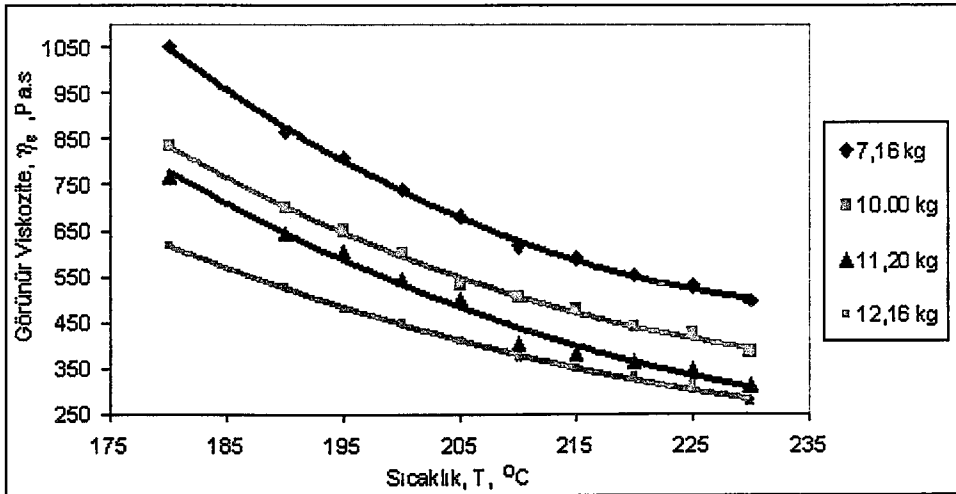
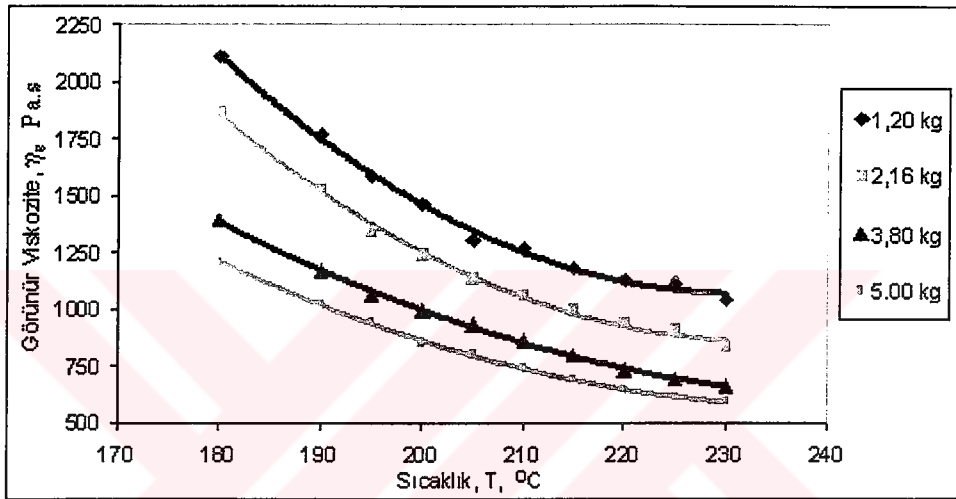
225 °C



230 °C

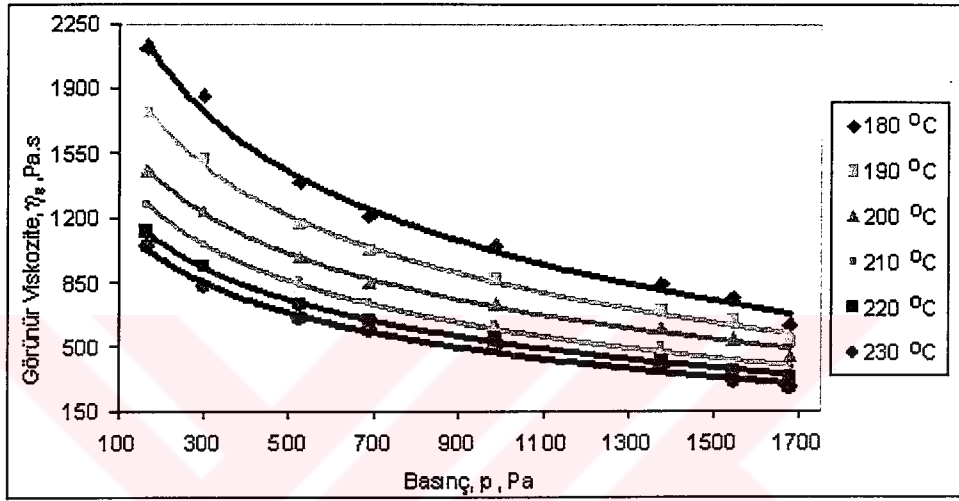
EK 7

Değişik Yükler İçin Görünür Viskozite-Sıcaklık Grafiği



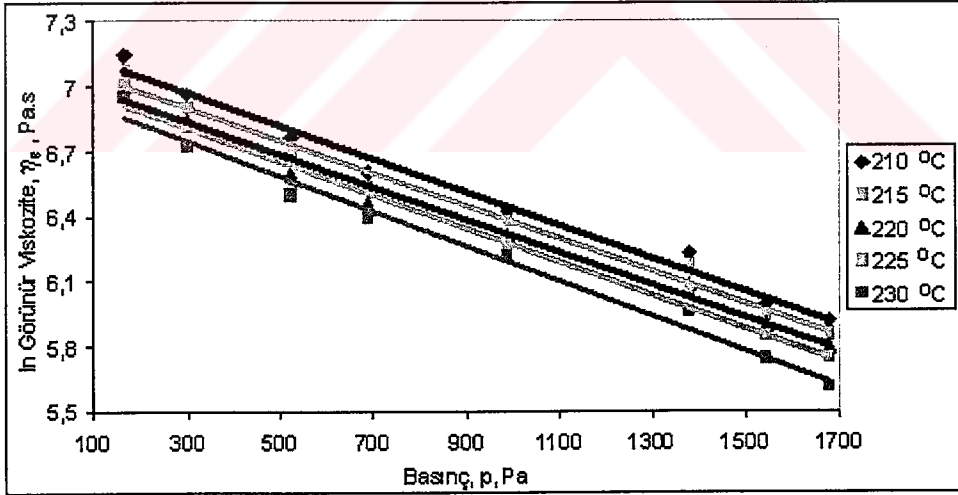
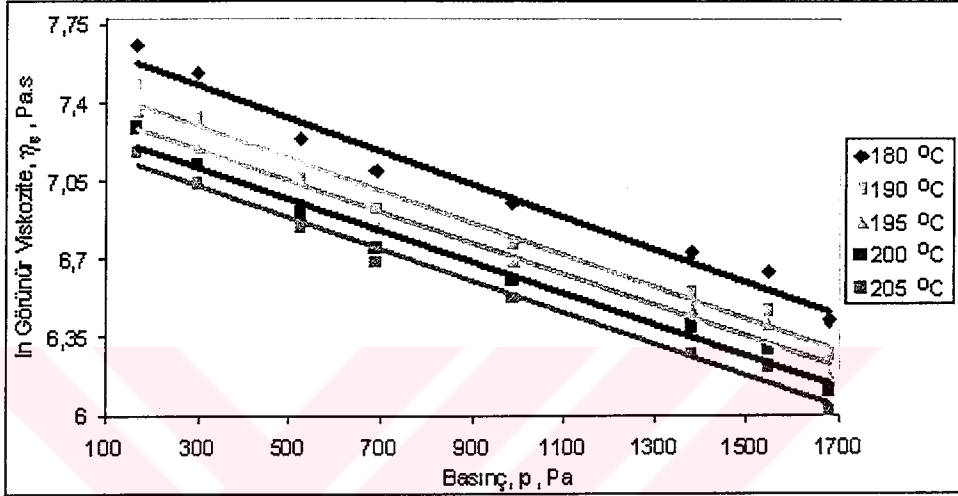
EK 8

Değişik Sıcaklıklar İçin, Görünür Viskozite-Basınç Grafiği



EK 9

Değişik Sıcaklıklar İçin $\ln$ Görünür Viskozite- Basınç Grafiği ve
 $\ln$ Görünür Viskozite-Basınç Değişimini Veren Denkleme Ait Sabitler

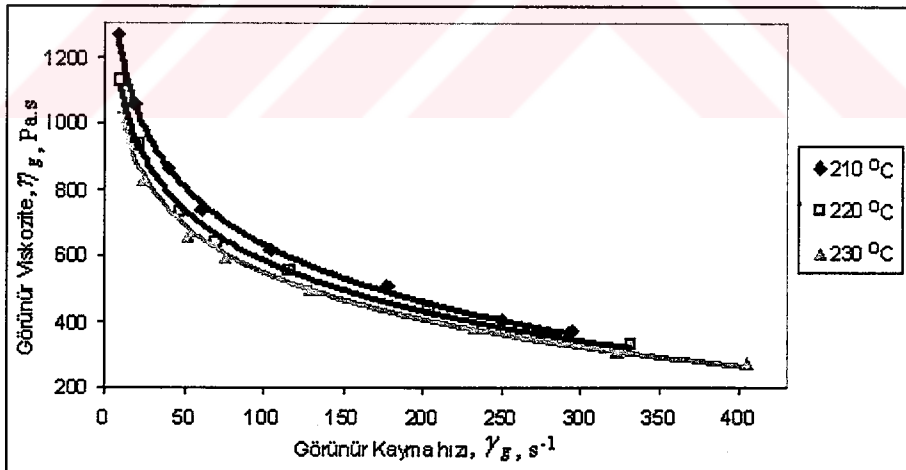
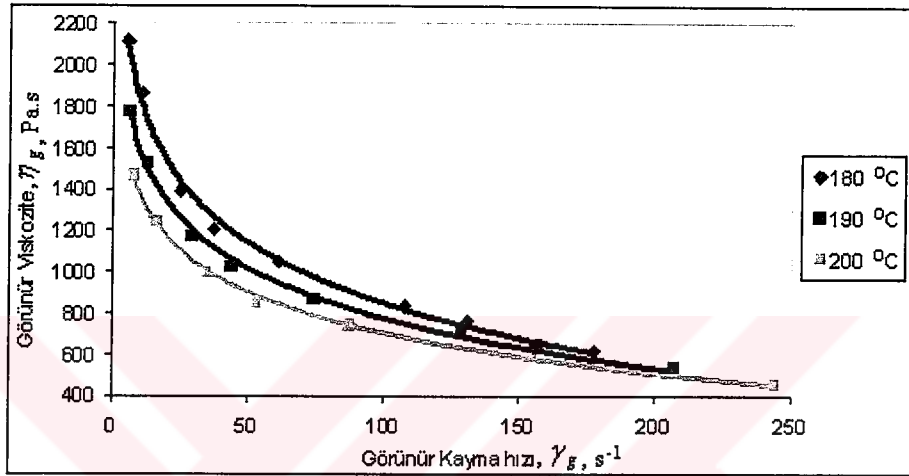


$\ln$ görünür viskozite-basınç değişimini veren denkleme ait sabitler

Sıcaklık	C	η_0	R^2
180 °C	-0,0007	2215,648	0,9739
190 °C	-0,0007	1864,267	0,9768
195 °C	-0,0007	1648,604	0,9757
200 °C	-0,0007	1510,657	0,9783
205 °C	-0,0008	1388,667	0,9866
210 °C	-0,0008	1335,418	0,9865
215 °C	-0,0008	1242,275	0,9843
220 °C	-0,0008	1163,746	0,9821
225 °C	-0,0008	1132,972	0,9750
230 °C	-0,0008	1085,395	0,9838

EK 10

Değişik Sıcaklıklar İçin Görünür Viskozite-Görünür Kayma Hızı Grafiği

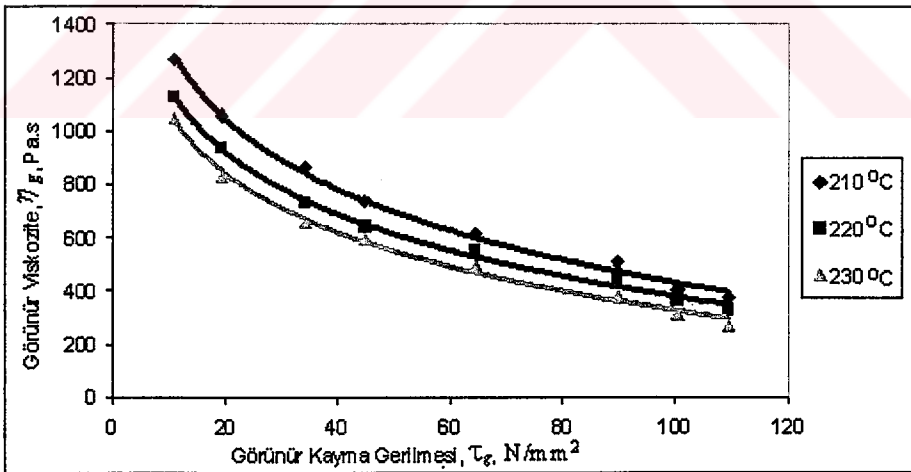
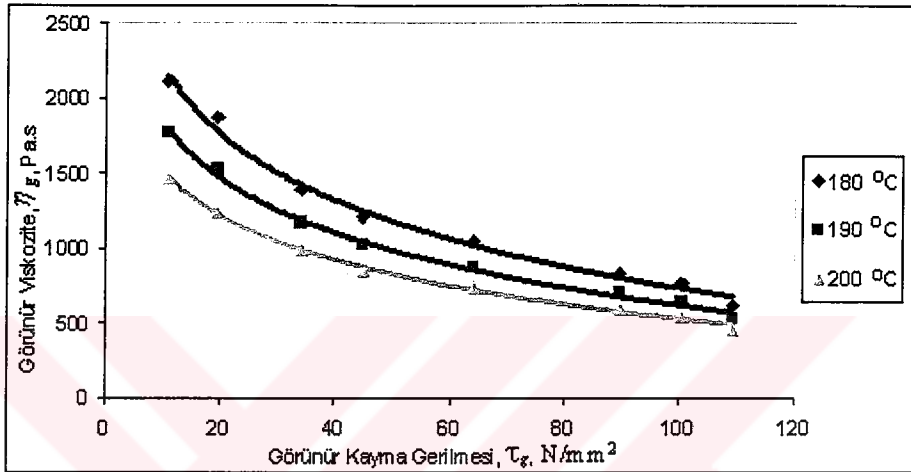


Görünür Viskozite-Görünür Kayma Hızı Denklemine Ait Sabitler

Sıcaklık	C_0	C_1	R^2
180	2796,5	-422,83	0,9943
190	2387,4	-350,34	0,9961
200	2015,6	-284,85	0,9972
210	1789,7	-250,94	0,9986
220	1606,1	-221,66	0,9966
230	1491,8	-204,82	0,9954

EK 11

Değişik sıcaklıklar için Görünür Viskozite-Görünür Kayma Gerilmesi grafiği



Görünür Viskozite-Görünür Kayma Gerilmesi denklemine ait sabitler

Sıcaklık	D_o	D_I	R^2
180	3671,3	-637,41	0,9908
190	3042,3	-526,13	0,9954
200	2482,9	-423,94	0,9957
210	2189	-381,68	0,9952
220	1928,6	-336,62	0,9965
230	1793,3	-318,44	0,9941

EK 12**PHOENICS YAZILIMI q1 DOSYASI**

TALK=F;RUN(1, 1);VDU=X11-TERM

GROUP 1. Run title and other preliminaries

TEXT(Mold Filling)

REAL(VIN,CPLIQ,TIN,TOUT,HCOF)

REAL(TSUL,GRHO)

VIN=.25

CPLIQ=1005.;HCOF=10.

TIN=40.;TOUT=40.

TSUL=220.

GRHO=800.

GROUP 2. Transience; time-step specification

STEADY=F;LSTEP=1000;TFRAC(1)=-LSTEP;TFRAC(2)= 0.001

GROUP 3. X-direction grid specification

GROUP 4. Y-direction grid specification

GRDPWR(Y,25,0.025,1.0)

GROUP 5. Z-direction grid specification

GRDPWR(Z,80,0.08,1.0)

GROUP 6. Body-fitted coordinates or grid distortion

GROUP 7. Variables stored, solved & named

STORE(DEN1,PRPS,TMP1)

STORE(ENUL,SFR)

SOLVE(VFOL,SURN)

SOLUTN(P1,Y,Y,Y,N,N,N)

SOLUTN(V1,Y,Y,Y,N,N,N)

SOLUTN(W1,Y,Y,Y,N,N,N)

SOLVE(H1)

STORE(C5,C6,C7)

NOTE C5=DUDX, C6=DVDY, C7=GAMA

STORE(DVO1)

GROUP 8. Terms (in differential equations) & devices

GALA=T

GENK=T

STORE(BTAU,LGEN1)

terms(vfol,n,n,n,n,p,p)

TERMS(SURN,N,N,N,N,N,P,P)

GROUP 9. Properties of the medium (or media)

RHO1=GRND10; ENUL=GRND

DVO1DT=GRND10

CP1=GRND10

PRNDTL(H1)=1.0

TMP1=GRND2;TMP1A=0.;TMP1B=1./CPLIQ

GROUP 11. Initialization of variable or porosity fields

FIINIT(P1)=0.0;FIINIT(V1)=0.0

FIINIT(W1)=0.0;FIINIT(SURN)=0.0

FIINIT(DEN1)=100.00

FIINIT(H1)=CPLIQ*(TIN+20.)

FIINIT(SFR)=0.0

FIINIT(TMP1)=TIN

FIINIT(ENUL)=1.E-6

FIINIT(PRPS)=0

GROUP 13. Boundary conditions and special sources

PATCH(IFLO,LOW,1,NX,8,15,1,1,1,LSTEP)

COVAL(IFLO,P1,FIXFLU,VIN*GRHO)

COVAL(IFLO,W1,ONLYMS,VIN)

COVAL(IFLO,H1,ONLYMS,CPLIQ*TSUL)

COVAL(IFLO,SURN,FIXFLU,VIN)

COVAL(IFLO,VFOL,ONLYMS,1.0/GRHO)

PATCH(GRAV,PHASEM,1,NX,1,NY,1,NZ,1,LSTEP)

COVAL(GRAV,W1,FIXFLU,-9.81)

PATCH(REFP,CELL,1,NX,1,NY,NZ,NZ,1,LSTEP)

COVAL(REFP,P1,FXP,0.0)

PATCH(TCON,CELL,1,NX,1,NY,1,NZ,1,LSTEP)
COVAL(TCON,SURN,GRND,GRND)

WALL(NWAL,NORTH,1,NX,NY,NY,1,NZ,1,LSTEP)
WALL(SWALL,SOUTH,1,NX,1,1,1,NZ,1,LSTEP)
PATCH(NW1,NORTH,1,NX,NY,NY,1,NZ,1,LSTEP)
COVAL(NW1,H1,HCOF,CPLIQ*TOUT)
PATCH(SW1,SOUTH,1,NX,1,1,1,NZ,1,LSTEP)
COVAL(SW1,H1,HCOF,CPLIQ*TOUT)

PATCH(DARCY,VOLUME,1,NX,1,NY,1,NZ,1,LSTEP)
COVAL(DARCY,V1,GRND,0.0)
COVAL(DARCY,W1,GRND,0.0)

GROUP 15. Termination of sweeps
LSWEEP=10

GROUP 16. Termination of iterations
RESREF(P1)=1.E-8;RESREF(V1)=1.E-8
RESREF(W1)=1.E-8

GROUP 17. Under-relaxation devices
RELAX(V1,FALSDT,0.1);RELAX(W1,FALSDT,0.1)
RELAX(H1,FALSDT,0.01)

GROUP 19. Data communicated by satellite to GROUND
68:TIN-LEAD ALLOY, 0:AIR
IPRPSA=68;IPRPSB=0
INIFLD=F;SURF=T
VARMIN(SURN)=0.0;VARMAX(SURN)=1.0
RLOLIM=0.3;RUPLIM=0.7
CSG1=N
IDISPA=LSTEP/20

GROUP 22. Spot-value print-out
ECHO=T;NTPRIN=LSTEP/2
TSTSWP=-1

GROUP 23. Field print-out and plot control
OUTPUT(P1,Y,Y,Y,Y,Y);OUTPUT(V1,Y,Y,Y,Y,Y)
OUTPUT(W1,Y,Y,Y,Y,Y);OUTPUT(SURN,Y,Y,Y,Y,Y)
OUTPUT(DEN1,Y,Y,Y,Y,Y)

STOP

EK 13

PHOENICS YAZILIMI GROUND DOSYASI

```

C.... FILE NAME GROUND.FTN-----230597
SUBROUTINE GROUND
  INCLUDE '/phoenics/d_includ/satear'
  INCLUDE '/phoenics/d_includ/grdloc'
  INCLUDE '/phoenics/d_includ/grdear'
  INCLUDE '/phoenics/d_includ/grdbfc'
  COMMON/GENI/NXNY,IGFIL1(8),NFM,IGF(21),IPRL,IBTAU,ILTLS,IGFIL(15),1
ITEM1,ITEM2,ISPH1,ISPH2,ICON1,ICON2,IPRPS,IRADX,IRADY,IRADZ,IVFOL
  COMMON/DRHODP/ITEMP,IDEN/DVMOD/IDVCGR
CXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX USER SECTION STARTS:
C
C 1 Set dimensions of data-for-GROUND arrays here. WARNING: the
C   corresponding arrays in the MAIN program of the satellite
C   and EARTH must have the same dimensions.
  PARAMETER (NLG=100, NIG=200, NRG=200, NCG=100)
C
  COMMON/LGRND/LG(NLG)/IGRND/IG(NIG)/RGRND/RG(NRG)/CGRND/
CG(NCG)
  LOGICAL LG
  CHARACTER*4 CG
C
C 2 User dimensions own arrays here, for example:
C   DIMENSION GUH(10,10),GUC(10,10),GUX(10,10),GUZ(10)
C
C 3 User places his data statements here, for example:
C   DATA NXDIM,NYDIM/10,10/
C
C 4 Insert own coding below as desired, guided by GREX examples.
C   Note that the satellite-to-GREX special data in the labelled
C   COMMONs /RSG/, /ISG/, /LSG/ and /CSG/ can be included and
C   used below but the user must check GREX for any conflicting
C   uses. The same comment applies to the EARTH-spare working
C   arrays EASP1, EASP2,....EASP20. In addition to the EASPs,
C   there are 10 GRound-earth SPare arrays, GRSP1,....GRSP10,
C   supplied solely for the user, which are not used by GREX. If
C   the call to GREX has been deactivated then all of the arrays
C   may be used without reservation.
C
C*****
C
  IXL=IABS(IXL)
  IF(IGR.EQ.13) GO TO 13
  IF(IGR.EQ.19) GO TO 19
  GO TO (1,2,3,4,5,6,25,8,9,10,11,12,13,14,25,25,25,25,19,20,25,
121,23,24),IGR
25 CONTINUE
  RETURN
C
C*****
C

```

```

C--- GROUP 1. Run title and other preliminaries
C
  1 GO TO (1001,1002,1003),ISC
C
1001 CONTINUE
C
C * -----GROUP 1 SECTION 3 -----
C--- Use this group to create storage via MAKE, GXMAKE etc which it is
C   essential to dump to PHI (or PHIDA) for restarts
C   User may here change message transmitted to the VDU screen
      IF(.NOT.NULLPR.AND.IDVCGR.EQ.0)
  1 CALL WRYT40('GROUND file is GROUND.F of: 230597 ')
C
      RETURN
C * -----GROUP 1 SECTION 3 -----
C--- Use this group to create storage via GXMAKE which it is not
C   necessary to dump to PHI (or PHIDA) for restarts
C
1003 CONTINUE
      GO TO 25
1002 CONTINUE
      RETURN
C*****
C
C--- GROUP 2. Transience; time-step specification
C
  2 CONTINUE
      RETURN
C*****
C
C--- GROUP 3. X-direction grid specification
C
  3 CONTINUE
      RETURN
C*****
C
C--- GROUP 4. Y-direction grid specification
C
  4 CONTINUE
      RETURN
C*****
C
C--- GROUP 5. Z-direction grid specification
C
  5 CONTINUE
      RETURN
C*****
C
C--- GROUP 6. Body-fitted coordinates or grid distortion
C
  6 CONTINUE
      RETURN
C*****
C * Make changes for this group only in group 19.
C--- GROUP 7. Variables stored, solved & named
C*****
C

```

C--- GROUP 8. Terms (in differential equations) & devices
C
8 GO TO (81,82,83,84,85,86,87,88,89,810,811,812,813,814,815,816)
1,ISC
81 CONTINUE
C * ----- SECTION 1 -----
C For U1AD.LE.GRND--- phase 1 additional velocity. Index VELAD
RETURN
82 CONTINUE
C * ----- SECTION 2 -----
C For U2AD.LE.GRND--- phase 2 additional velocity. Index VELAD
RETURN
83 CONTINUE
C * ----- SECTION 3 -----
C For V1AD.LE.GRND--- phase 1 additional velocity. Index VELAD
RETURN
84 CONTINUE
C * ----- SECTION 4 -----
C For V2AD.LE.GRND--- phase 2 additional velocity. Index VELAD
RETURN
85 CONTINUE
C * ----- SECTION 5 -----
C For W1AD.LE.GRND--- phase 1 additional velocity. Index VELAD
RETURN
86 CONTINUE
C * ----- SECTION 6 -----
C For W2AD.LE.GRND--- phase 2 additional velocity. Index VELAD
RETURN
87 CONTINUE
C * ----- SECTION 7 --- Volumetric source for gala
RETURN
88 CONTINUE
C * ----- SECTION 8 --- Convection fluxes
C--- Entered when UCONV =.TRUE.; block-location indices are:
C LD11 for east and north (accessible at the same time),
C LD12 for west and south (accessible at the same time),
C LD2 for high (which becomes low for the next slab).
C User should provide INDVAR and NDIREC IF's as appropriate.
RETURN
89 CONTINUE
C * ----- SECTION 9 --- Diffusion coefficients
C--- Entered when UDIFF =.TRUE.; block-location indices are LAE
C for east, LAW for west, LAN for north, LAS for
C south, LD11 for high, and LD11 for low.
C User should provide INDVAR and NDIREC IF's as above.
C EARTH will apply the DIFCUT and GP12 modifications after the user
C has made his settings.
C
RETURN
810 CONTINUE
C * ----- SECTION 10 --- Convection neighbours
RETURN
811 CONTINUE
C * ----- SECTION 11 --- Diffusion neighbours
RETURN
812 CONTINUE
C * ----- SECTION 12 --- Linearised sources

```

      RETURN
813 CONTINUE
C * ----- SECTION 13 --- Correction coefficients
      RETURN
814 CONTINUE
C * ----- SECTION 14 --- User's own solver
      RETURN
815 CONTINUE
C * ----- SECTION 15 --- Change solution
      RETURN
816 CONTINUE
C * ----- SECTION 16 --- Change DVEL/DPs
      RETURN
C
C * See the equivalent section in GREX for the indices to be
C   used in sections 7 - 16
C
C * Make all other group-8 changes in GROUP 19.
C*****
C
C--- GROUP 9. Properties of the medium (or media)
C
C The sections in this group are arranged sequentially in their
C order of calling from EARTH. Thus, as can be seen from below,

C the temperature sections (10 and 11) precede the density
C sections (1 and 3); so, density formulae can refer to
C temperature stores already set.
  9 GO TO (91,92,93,94,95,96,97,98,99,900,901,902,903,904,905),ISC
C*****
900 CONTINUE
C * ----- SECTION 10 -----
C For TMP1.LE.GRND----- phase-1 temperature Index TEMP1
  RETURN
901 CONTINUE
C * ----- SECTION 11 -----
C For TMP2.LE.GRND----- phase-2 temperature Index TEMP2
  RETURN
902 CONTINUE
C * ----- SECTION 12 -----
C For EL1.LE.GRND----- phase-1 length scale Index LEN1
  RETURN
903 CONTINUE
C * ----- SECTION 13 -----
C For EL2.LE.GRND----- phase-2 length scale Index LEN2
  RETURN
904 CONTINUE
C * ----- SECTION 14 -----
C For SOLVE(TEM1)----- phase-1 specific heat
  RETURN
905 CONTINUE
C * ----- SECTION 15 -----
C For SOLVE(TEM2)----- phase-2 specific heat
  RETURN
91 CONTINUE
C * ----- SECTION 1 -----
C For RHO1.LE.GRND--- density for phase 1    Index DEN1

```

[illegible]

```

C * ----- SECTION 8 -----
C For PHINT( ).LE.GRND--- interface value of first phase
C                               Index FII1
  RETURN
99 CONTINUE
C * ----- SECTION 9 -----
C For PHINT( ).LE.GRND--- interface value of second phase
C                               Index FII2
  RETURN
C*****
C
C--- GROUP 10. Inter-phase-transfer processes and properties
C
  10 GO TO (101,102,103,104,105),ISC
  101 CONTINUE
C * ----- SECTION 1 -----
C For CFIPS.LE.GRND--- inter-phase friction coeff.
C                               Index INTFRC
  RETURN
  102 CONTINUE
C * ----- SECTION 2 -----
C For CMDOT.EQ.GRND- inter-phase mass transfer Index INTMDT
c  l0mdt=l0f(intmdt)
c  l0c2=l0f(c2)
c  l0r1=l0f(9)
c  l0vol=l0f(LVOL)
c  do i=1,nx*ny
c    f(l0mdt+i)= - cmdta * (phint(c2) - f(l0c2+i)) *
c  1          f(l0r1+i) * f(l0vol+i)
c  enddo
  RETURN
  103 CONTINUE
C * ----- SECTION 3 -----
C For CINT( ).EQ.GRND--- phase1-to-interface transfer coefficients
C                               Index COI1
  RETURN
  104 CONTINUE
C * ----- SECTION 4 -----
C For CINT( ).EQ.GRND--- phase2-to-interface transfer coefficients
C                               Index COI2
  RETURN
  105 CONTINUE
C * ----- SECTION 5 -----
C For CVM.EQ.GRND--- virtual mass coefficient
C                               Index LD12
  RETURN
C*****
C
C--- GROUP 11. Initialization of variable or porosity fields
C                               Index VAL
  11 CONTINUE
  RETURN
C*****
C
C--- GROUP 12. Convection and diffusion adjustments
C
  12 CONTINUE

```

```

      RETURN
C*****
C
C--- GROUP 13. Boundary conditions and special sources
C          Index for Coefficient - CO
C          Index for Value      - VAL
      13 CONTINUE
      GO TO (130,131,132,133,134,135,136,137,138,139,1310,
      11311,1312,1313,1314,1315,1316,1317,1318,1319,1320,1321),ISC
      130 CONTINUE
C----- SECTION 1 ----- coefficient = GRND
      IF(NPATCH.EQ.'DARCY') THEN
      IF(INDVAR.EQ.V1.OR.INDVAR.EQ.W1) THEN
      L0CO=L0F(CO)
      L0SF=L0F(LBNAME('SFR'))
      L0DEN=L0F(DEN1)
      NXNY=NX*NY
      DO 2300 ICL=1,NXNY
      GVAL=1.E4
      F(L0CO+ICL)=0.0
      CSLF=F(L0SF+ICL)
      IF(F(L0DEN+ICL).GT.2000.0.AND.CSLF.GT.0.35) THEN
      F(L0CO+ICL)=GVAL*F(L0SF+ICL)
      ENDIF
      2300 CONTINUE
      ENDIF
      ENDIF

      RETURN
      131 CONTINUE
C----- SECTION 2 ----- coefficient = GRND1
      RETURN
      132 CONTINUE
C----- SECTION 3 ----- coefficient = GRND2
      RETURN
      133 CONTINUE
C----- SECTION 4 ----- coefficient = GRND3
      RETURN
      134 CONTINUE
C----- SECTION 5 ----- coefficient = GRND4
      RETURN
      135 CONTINUE
C----- SECTION 6 ----- coefficient = GRND5
      RETURN
      136 CONTINUE
C----- SECTION 7 ----- coefficient = GRND6
      RETURN
      137 CONTINUE
C----- SECTION 8 ----- coefficient = GRND7
      RETURN
      138 CONTINUE
C----- SECTION 9 ----- coefficient = GRND8
      RETURN
      139 CONTINUE
C----- SECTION 10 ----- coefficient = GRND9
      RETURN

```

```

1310 CONTINUE
C----- SECTION 11 ----- coefficient = GRND10
      RETURN
1311 CONTINUE
C----- SECTION 12 ----- value = GRND
      RETURN
1312 CONTINUE
C----- SECTION 13 ----- value = GRND1
      RETURN
1313 CONTINUE
C----- SECTION 14 ----- value = GRND2
      RETURN
1314 CONTINUE
C----- SECTION 15 ----- value = GRND3
      RETURN
1315 CONTINUE
C----- SECTION 16 ----- value = GRND4
      RETURN
1316 CONTINUE
C----- SECTION 17 ----- value = GRND5
      RETURN
1317 CONTINUE
C----- SECTION 18 ----- value = GRND6
      RETURN
1318 CONTINUE
C----- SECTION 19 ----- value = GRND7
      RETURN
1319 CONTINUE
C----- SECTION 20 ----- value = GRND8
      RETURN
1320 CONTINUE
C----- SECTION 21 ----- value = GRND9
      RETURN
1321 CONTINUE
C----- SECTION 22 ----- value = GRND10
      RETURN
C*****
C
C--- GROUP 14. Downstream pressure for PARAB=.TRUE.
C
14 CONTINUE
      RETURN
C*****
C* Make changes to data for GROUPS 15, 16, 17, 18 GROUP 19.
C*****
C
C--- GROUP 19. Special calls to GROUND from EARTH
C
19 GO TO (191,192,193,194,195,196,197,198,199,1910,1911),ISC
191 CONTINUE
C * ----- SECTION 1 ---- Start of time step.
      RETURN
192 CONTINUE
C * ----- SECTION 2 ---- Start of sweep.
      RETURN
193 CONTINUE
C * ----- SECTION 3 ---- Start of iz slab.

```

```

      RETURN
194 CONTINUE
C * ----- SECTION 4 ---- Start of iterations over slab.
      RETURN
1911 CONTINUE
C * ----- SECTION 11---- After calculation of convection
C                        fluxes for scalars, and of volume
C                        fractions, but before calculation of
C                        scalars or velocities
      RETURN
199 CONTINUE
C * ----- SECTION 9 ---- Start of solution sequence for
C                        a variable
      RETURN
1910 CONTINUE
C * ----- SECTION 10---- Finish of solution sequence for
C                        a variable
      RETURN
195 CONTINUE
C * ----- SECTION 5 ---- Finish of iterations over slab.
      RETURN
196 CONTINUE
C * ----- SECTION 6 ---- Finish of iz slab.
      L0TEM=L0F(LBNAME('TMP1'))
      L0V1=L0F(V1)
      L0W1=L0F(W1)
      L0SF=L0F(LBNAME('SFR'))
      L0DEN=L0F(DEN1)
      NXNY=NX*NY
      TLIQ=160.
      TEUT=137.

      DO 3540 ICL=1,NXNY
      GSF=(TLIQ-F(L0TEM+ICL))/(TLIQ-TEUT)
      IF(GSF.GE.1.0) GSF=1.0
      IF(GSF.LE.0) GSF=0.0
      F(L0SF+ICL)=GSF

3540 CONTINUE

      USFR=1.0
      DO 3545 ICL=1,NXNY
      IF(F(L0SF+ICL).GE.USFR.AND.F(L0DEN+ICL).GT.2000.) THEN
        F(L0V1+ICL)=1.E-10
        F(L0W1+ICL)=1.E-10
      ENDIF
3545 CONTINUE

      RETURN
197 CONTINUE
C * ----- SECTION 7 ---- Finish of sweep.
      RETURN
198 CONTINUE
C * ----- SECTION 8 ---- Finish of time step.
C
      RETURN
C*****

```

```

C--- GROUP 20. Preliminary print-out
C
  20 CONTINUE
  RETURN
C*****
C--- GROUP 21. Special print-out to screen
  21 CONTINUE
  GO TO 25
C*****
C* Make changes to data for GROUP 22 only in GROUP 19.
C*****
C
C--- GROUP 23. Field print-out and plot control
  23 CONTINUE
  RETURN
C*****
C
C--- GROUP 24. Dumps for restarts
C
  24 CONTINUE
  END

```

EK 14

YYPE I-668 malzemesine ait bazı teknik veriler (Petkim)

Adı	Sembolü	Değeri	Birimi
Yoğunluk	ρ	0,968	kg/dm ³
Ergiyik akış indeksi ()	$EA\dot{I}$	5,4-6	g/10 dak
Termal iletkenlik	k	0,211	W/m °C
Isınma ısısı	Cp	2600	J/kg °C
Ergime sıcaklığı	T_e	167	°C
Camsı geçiş sıcaklığı	T_g	137	°C
Enjeksiyon sıcaklığı	T_{enj}	220	°C
Enjeksiyondan çıkarma sıcaklığı	$T_{çık}$	100	°C
Kalıp sıcaklığı (tavsiye edilen)	T_k	30-70	°C
Enjeksiyon basıncı	p_{enj}	63-110	MPa

ÖZGEÇMİŞ

1971 yılında Malatya’da doğdu. İlk, orta ve lise tahsilini aynı şehirde tamamladı. 1989 yılında İnönü Üniversitesi Malatya Meslek Yüksek Okulu Makina Bölümünü kazandı ve 1991 yılında mezun oldu. 1992 yılında Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Talaşlı Üretim Anabilim Dalını kazandı ve 1995 yılında mezun oldu. Aynı yıl Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Eğitimi Anabilim Dalında Yüksek Lisans öğrenimine başladı. Mart 1996 da Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsüne Araştırma Görevlisi olarak girdi. 1 yıl sonra Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Kalıpcılık Öğretmenliği Anabilim Dalında Araştırma Görevlisi olarak göreve başladı. 1998 yılında Yüksek Lisans öğrenimini tamamlayıp aynı Anabilim Dalında Doktora programına kaydoldu. Halen aynı Anabilim dalında Araştırma Görevlisi olarak çalışmaya devam eden Abdulmecit GÜLDAŞ, evli ve iki çocuk babasıdır.