ENJEKSİYONLA KALIPLAMADA ÜÇ BOYUTLU POLİMER ERGİYİK AKIŞLARIN SAYISAL ANALİZİ VE DENEYSEL İNCELENMESİ

Onuralp ULUER

DOKTORA TEZİ
MAKİNE EĞİTİMİ

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

OCAK 2009
ANKARA

Onuralp ULUER tarafından hazırlanan ENJEKSİYONLA KALIPLAMADA ÜÇ BOYUTLU POLİMER ERGİYİK AKIŞLARIN SAYISAL ANALİZİ VE DENEYSEL İNCELENMESİ adlı bu tezin Doktora tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Ahmet ÖZDEMİR …….
Tez Danışmanı, Makine Eğitimi Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Makine Eğitimi Anabilim Dalında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Bekir Zühtü UYSAL …….
Kimya Mühendisliği, Gazi Üniversitesi
Prof. Dr. Ahmet ÖZDEMİR …….
Makine Eğitimi, Gazi Üniversitesi
Prof. Dr. Kürşat DÜNDAR …….
Makine Eğitimi, Gazi Üniversitesi
Doç. Dr. Zafer TEKİNER …….
Makine Eğitimi, Gazi Üniversitesi
Doç. Dr. Yasin KİŞİOĞLU …….
Makine Eğitimi, Kocaeli Üniversitesi

Tarih: 23/01/2009

Bu tez ile G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Doktora derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Nail ÜNSAL …….
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada orijinal olmayan her türlü kaynağa eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Onuralp ULUER

ENJEKSİYONLA KALIPLAMADA ÜÇ BOYUTLU POLİMER ERGİYİK AKIŞLARIN SAYISAL ANALİZİ VE DENEYSEL İNCELENMESİ

(Doktora Tezi)

Onuralp ULUER

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Ocak 2009

ÖZET

Bu tez çalışmasında, enjeksiyonla kalıplama sırasında ergiyik polimerin kalıp boşluğundaki üç boyutlu akış davranışı, deneysel olarak görüntülenmiş ve sayısal analizi gerçekleştirilmiştir. Polimer olarak Alçak yoğunluklu Polietilen (A.Y.PE), Yüksek Yoğunluklu Polietilen (Y.Y.PE) ve Polistiren (PS) plastik malzemelerinin kullanıldığı çalışmada, kalıp boşluğundaki üç boyutlu akış davranışı, kalıp boşluğuna yerleştirilen üç adet temperlenmiş cam ile görüntülenebilir hale gelmiştir. Görüntüler, video kamera ile kayıt edilmiş ve video görüntülerinden fotoğraf kareleri elde edilmiştir. Sayısal analizler, FLUENT yazılımı ortamında gerçekleştirilmiştir. Sayısal analizlerden daha gerçekçi sonuçların alınabilmesi için, A.Y.PE, Y.Y.PE ve PS malzemelerinin viskozite, yoğunluk ve ısı iletim katsayısı gibi fiziksel ve reolojik özellikleri deneysel olarak tespit edilmiş ve elde edilen sonuçlar modellenerek temel akış denklemlerinde kullanılmıştır. Viskozite kayma hızı ve sıcaklığa bağlı, yoğunluk ve ısı iletim katsayısı ise sıcaklığa bağlı olarak modellerde ifade edilmiştir. Basınca dayalı çözüm algoritmasının kullanıldığı analizlerde basınç SIMPLE algoritması ile elde edilmiştir. Akış cephesi, akışkan hacmi (VOF) yöntemi ile tespit edilmiştir. Deneysel görüntüler ile, fiziksel ve reolojik özelliklerin sabit alındığı ve deneysel veriler kullanılarak oluşturulan modellerin kullanıldığı

simülasyon çıktıları kıyaslanmıştır. Akış cephesi profillerinin her üç sonuçta da benzer olduğu, fakat dolum süreleri dikkate alındığında fiziksel ve reolojik özellik modellerinin kullanıldığı simülasyon çıktılarının gerçeğe çok daha uygun olduğu tespit edilmiştir.

Bilim Kodu : **708.3.015**
Anahtar Kelimeler : **Enjeksiyonla kalıplama, Üç boyutlu polimer akışı, Reolojik özellikler, Sonlu kontrol hacmi yöntemi, VOF yöntemi**
Sayfa Adedi : **172**
Tez Yöneticisi : **Prof. Dr. Ahmet ÖZDEMİR**

NUMERICAL ANALYSIS AND EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THREE DIMENSIONAL POLYMER FLOWS IN INJECTION MOLDING

(Ph.D. Thesis)

Onuralp ULUER

GAZİ UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY
January 2009

ABSTRACT

In this thesis study, three dimensional flow behaviour of the molten polymer in the mould cavity during the injection moulding is visually recorded and numerically analysed. In this study, which includes the Low Density Polyethylene (LDPE), High Density Polyethylene (HDPE) and Polystyrene (PS) as polymer, the three dimensional flow behaviour in the mould cavity, is become visually recordable by tempered three glasses located into the mould cavity. Images are recorded by a video camera and the frames are obtained from the records. Numerical analyses are reached by using the FLUENT software. To obtain the more realistic results from the analysis, the physical and the rheological properties of the LDPE, HDPE and PS are experimentally obtained and the obtained data are modelled and the models are taken into account in the governing equations. Viscosity is expressed depending on the shear rate and the temperature; the density and the thermal conductivity are expressed depending on the temperature. In the analyses, where the pressure based solution algorithm is preferred, the pressure is obtained with the SIMPLE algorithm. The flow front is determined according to the volume of fluid (VOF) method. The analyses result which includes the constant physical and rheological properties and the analyses result which includes the physical and rheological property models are compared with the experimental images. It is obtained that

the flow front profiles are the same with each other but, if the filling times are considered, the analysis results obtained using the physical and rheological property models are more realistic.

Science Code : **708.3.015**
Key Words : **Injection molding, Three dimensional polymer flow, Rheology, Finite control volume method, VOF method**
Page Number : **172**
Adviser : **Prof. Dr. Ahmet ÖZDEMİR**

TEŞEKKÜR

Tez çalışmamda yardımlarını ve desteğini esirgemeyen danışmanım Sayın Prof. Dr. Ahmet ÖZDEMİR'e teşekkür ederim. Tez süresince yapılan tez isleme komisyonu toplantılarında bilgi ve tecrübelerinden faydalandığım Sayın Prof. Dr. Bekir Zühtü UYSAL ve Sayın Prof. Dr. Kürşad DÜNAR'a teşekkür ederim. Deney cihazının yapımında çeşitli vesilerle yardımlarını esirgemeyen Doç. Dr. Zafer Tekiner, Öğr. Gör. Dr. Abdulmecit GÜLDAŞ, Araş. Gör. Dr. Fırat KAFKAS, Araş. Gör. Dr. Alaattin KACAL ve Araş. Gör Kamil BAŞARAN'a teşekkür ederim.

Doktora çalışmasına 07/2005-31 kodlu projeyi destekleyerek verdiği maddi katkıdan dolayı, Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri'ne teşekkür ederim. Sayısal analizlerin yapıldığı FLUENT yazılımının kullanımı konusunda lisans desteğinden faydalandığım TEMENAR'a teşekkür ederim

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

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET iv

ABSTRACT vi

TEŞEKKÜR viii

İÇİNDEKİLER ix

ÇİZELGELERİN LİSTESİ xii

ŞEKİLLERİN LİSTESİ xiii

RESİMLERİN LİSTESİ xix

SİMGELER VE KISALTMALAR .....*xx*

1. GİRİŞ 1

2. KAVRAMSAL BİLGİLER 7

2.1. Plastik Malzemeler ve Özellikleri 7

2.2.Enjeksiyonla Kalıplama Çevrimi 9

2.3. Ergiyik Plastiğin Kalıp Boşluğunda Akışı 11

3. LİTERATÜR ÖZETİ 16

4. MATERYAL VE METOD 43

4.1. Plastik Malzemelerin Özelliklerinin Deneysel Olarak elde Edilmesi 44

4.1.1. Ergiyik plastik viskozitesinin belirlenmesi 44

4.1.2. Ergiyik plastik yoğunluğunun belirlenmesi 48

4.1.3. Ergiyik plastik ısı iletim katsayısının belirlenmesi 51

4.2. Ergiyik Plastiğin Üç Boyutlu Gerçek Akış Davranışının Görüntülenmesi.....56

4.2.1. Enjeksiyonla kalıplama deneylerinin yapılması 59

Sayfa

4.2.2. Akış görüntülerinden fotoğrafların elde edilmesi 59

5. DOLUM ANALİZİ İÇİN TEMEL DENKLEMLER 61

5.1. Temel Akış Denklemleri 62

5.1.1. Kütlenin korunumu (Süreklilik Denklemi) 63

5.1.2. Momentumun korunumu.....63

5.1.3. Enerjinin korunumu 63

5.2. Ergimiş Plastiklerin Fiziksel ve Relojik Özelliklerinin Matematiksel ifadesi 64

5.2.1. Viskozite modeli 64

5.2.2. Yoğunluk modeli.....65

5.2.3. Isı iletim katsayısı modeli 66

5.3. Temel Akış Denklemlerinin Ayrıklaştırılması ve Çözülmesi 66

5.3.1. Temel denklemlerin ayrıklaştırılması 67

5.3.2. Basınca dayalı çözücü sayısal yöntemi 72

5.4. Akış Cephesi Tespiti 74

5.5. Akış Alanı Modeli ve Çözüm Ağı (grid) yapısı.....77

5.6. Sınır Şartları 81

6. BULGULAR VE TARTIŞMA 83

6.1. Plastik Malzemelerin Özelliklerinin Modellenmesi.....84

6.1.1. Deneysel verilerden viskozite modellerinin türetilmesi 84

6.1.2. Deneysel verilerden yoğunluk modellerinin türetilmesi 100

6.1.3. Deneysel verilerden ısı iletim katsayısı modellerinin türetilmesi 102

6.2. Üç Boyutlu Akış Davranışının Tespit Edilmesi.....106

Sayfa

6.2.1. A.Y.PE için sayısal dolum analizi sonuçları 107

6.1.2. Y.Y.PE için sayısal dolum analizi sonuçları.....116

6.1.3. PS için sayısal dolum analizi sonuçları.....125

6.3. Deneysel Dolum Analizi Sonuçları.....133

7. SONUÇLAR 138

7.1. Sonuçlar ve Tartışma.....138

7.2. Öneriler 148

KAYNAKLAR 150

EKLER.....158
EK-1 FLUENT programının yapısı ve çalışma adımları 159
EK-2 A.Y.PE, Y.Y.PE ve PS malzemelerinin ısı iletim katsayıları için yazılan kullanıcı tanımlı fonksiyonlar 162
EK-3 A.Y.PE, Y.Y.PE ve PS malzemelerinin deneysel elde edilen viskozite değerleri 164
EK-4 A.Y.PE, Y.Y.PE ve PS malzemelerinin deneysel elde edilen yoğunluk değerleri 169
EK-5 A.Y.PE, Y.Y.PE ve PS malzemelerinin deneysel elde edilen ısı iletim katsayısı değerleri 170

ÖZGEÇMİŞ 171

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 4.1. A.Y.PE viskozitesinin elde edildiği deney şartları 48

Çizelge 4.2. Teflon (P.T.F.E) malzemesinin özellikleri 56

Çizelge 5.1. Under-relaxation parametreleri 71

Çizelge 5.2. Hücre sayısının dolum süresine etkisi (T=170^{o}C, p=3 MPa) 81

Çizelge 6.1. 220^{0}C için görünür ve düzeltilmiş kayma hızı ve viskozite değerleri 89

Çizelge 6.2. A.Y.PE, Y.Y.PE ve PS malzemelerinin viskozitelerine sıcaklık ve basıncın etkilerinin istatistiksel incelenmesinde kullanılan faktörler 94

Çizelge 6.3. A.Y.PE malzemesinin viskozitesi için varyans analizi sonuçları 94

Çizelge 6.4. Y.Y.PE malzemesinin viskozitesi için varyans analizi sonuçları 95

Çizelge 6.5. PS malzemesinin viskozitesi için varyans analizi sonuçları 96

Çizelge 6.6. Power Law viskozite modeli katsayıları 98

Çizelge 6.7. Ergiyik yoğunluk modeli katsayıları 102

Çizelge 6.8. A.Y.PE ve Y.Y.PE için ısı iletim katsayısı modeli katsayıları 105

Çizelge 6.9. PS için ısı iletim katsayısı modeli katsayıları 106

Çizelge 6.10. Deneysel çalışmada kullanılan enjeksiyon parametreleri 134

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 2.1. Termoplastiklerin moleküler zincir yapısı ve sıcaklık etkisi 8

Şekil 2.2. Bir enjeksiyon presinin genel yapısı 9

Şekil 2.3. Enjeksiyonla kalıplama çevrimi 10

Şekil 2.4. Kayma gerilmesi ile birlikte gerçekleşen kayma akışı 12

Şekil 2.5. Kayma hızı viskozite ilişkisi 12
a) Akış eğrisi (ölçülür)
b) Viskozite eğrisi (hesaplanır)

Şekil 2.6. Ergiyik plastiğin kalıp boşluğundaki akışı 13

Şekil 2.7. Dolum sırasında kalıp boşluğu kesitindeki sıcaklık profili 13

Şekil 3.1. Akış alanının iki boyutlu kabuk çözüm ağında incelenmesi ve kalınlık yönünde akış alanının katmanlara ayrılması 18

Şekil 3.2. Analizi yapılan "T" biçimli kalıp boşluğu 21
a) Çözüm ağı yapısı
b) Optimizasyon için kullanılan düğüm noktaları

Şekil 3.3. Düğüm noktalarına atanan kontrol hacimleri 26

Şekil 3.4. Kontrol hacmi yönteminde akış cephesinin adım adım ilerlemesi 27

Şekil 3.5. Çekme deney numunesi biçimindeki kalıp boşluğu 27

Şekil 3.6. "C" biçimindeki kalıp boşluğu 28

Şekil 3.7. Sayısal çözüm ağı oluşturarak akış cephesinin ilerlemesi 32

Şekil 3.8. Bir tarafına cam yerleştirilen deney düzeneğinin şematik görünümü 36

Şekil 3.9. Kurulan görüntüleme düzeneği 37

Şekil 3.10. Akış cephesi nu kaydeden dinamik hareketli düzenek 38

Şekil 3.11. Sıvı ve gaz destekli akış görüntüleme düzeneği ve sonuçlar 38

Şekil 3.12. Deneysel görüntüleme düzeneğinin şematik resmi 40

Şekil **Sayfa**

Şekil 4.1. Görünür viskozite-kayma hızı grafiğinden en uygun enjeksiyon hızının belirlenmesi 45

Şekil 4.2. Nexygen Davenport yazılımı çıktı ekranı 47

Şekil 4.3. Isıtıcı sistem 52
a) Sistemin görünümü
b) Yüzeydeki homojen sıcaklık dağılımı (FLUENT)

Şekil 4.4. Bakır parçanın ısı iletim katsayısının sıcaklıkla değişimi..... 54

Şekil 4.5. Üç boyutlu akış davranışının görüntülenmesinde kullanılacak plastik parça geometrisi 56

Şekil 4.6. Akış görüntüleme için tasarlanan plastik enjeksiyon kalıbının bilgisayar destekli modeli 57

Şekil 4.7. Fotoğraf yakalama programı arayüzü 60

Şekil 5.1. φ için ayrıklaştırmanın yapıldığı üç boyutlu kontrol hacmi 68

Şekil 5.2. Basınca dayalı çözüm yöntemi ayrık çözüm algoritması 72

Şekil 5.3. Kalıp boşluğunda ergiyik plastiğin ilerlemesi 74

Şekil 5.4. Ergimiş plastik ve hava fazlarının dolum sırasında durumu..... 76

Şekil 5.5. Ara yüzey bulma için kullanılan interpolasyon yöntemine örnekler..... 77
a) Gerçek ara yüzey
b) Geometric reconstruction
c) Donor-acceptor

Şekil 5.6. Analizlerde kullanılan plastik parça modeli 78

Şekil 5.7. Akış alanının sonlu hacimlere bölünmesi ve çözüm ağı..... 79
a) Akış alanının dört yüzlü (tetra hedral) hücrelere bölünmesi
b) Dört yüzlü hücrelerin 8 yüzlü polyhedral hücrelere döndürülmesi.

Şekil 5.8. Çözüm ağındaki hücrelerin çarpıklık analizi sonucu..... 80
a) Boyutsal çarpıklık b) Açısal çarpıklık

Şekil 5.9. Çözüm ağındaki hücrelerin kenar uzunluklarıoranı analizi sonucu..... 80

Şekil 5.10. Sayısal çözümde kullanılan sınır şartları 82

Şekil **Sayfa**

Şekil 6.1. A.Y.PE plastik malzemesine ait akış eğrileri..... 85

Şekil 6.2. Y.Y.PE plastik malzemesine ait akış eğrileri..... 86

Şekil 6.3. PS plastik malzemesine ait akış eğrileri 87

Şekil 6.4. A.Y.PE malzemesinin viskozitesinin kayma hızı ve sıcaklıkla değişimi 91

Şekil 6.5. Y.Y.PE malzemesinin viskozitesinin kayma hızı ve sıcaklıkla değişimi 92

Şekil 6.6. PS malzemesinin viskozitesinin kayma hızı ve sıcaklıkla değişimi 93

Şekil 6.7. A.Y.PE malzemesinin viskozitesine basınç ve sıcaklığın etkisi..... 94

Şekil 6.8. Y.Y.PE malzemesinin viskozitesine basınç ve sıcaklığın etkisi..... 95

Şekil 6.9. PS malzemesinin viskozitesine basınç ve sıcaklığın etkisi..... 96

Şekil 6.10. A.Y.PE için Power Law Modelinden elde edilen ve deneysel elde edilen viskozite verilerinin kıyaslanması 98

Şekil 6.11. Y.Y.PE için Power Law Modelinden elde edilen ve deneysel elde edilen viskozite verilerinin kıyaslanması 98

Şekil 6.12. PS için Power Law Modelinden elde edilen ve deneysel elde edilen viskozite verilerinin kıyaslanması 99

Şekil 6.13. Power Law viskozite modeli için, viskozite değerinin sınırlandırılması 99

Şekil 6.14. A.Y.PE malzemesinin yoğunluğunun sıcaklıkla değişimi..... 100

Şekil 6.15. Y.Y.PE malzemesinin yoğunluğunun sıcaklıkla değişimi..... 101

Şekil 6.16. PS malzemesinin yoğunluğunun sıcaklıkla değişimi..... 101

Şekil 6.17. Y.Y.PE malzemesinin ısı iletim katsayısının sıcaklıkla değişimi..... 103

Şekil 6.18. A.Y.PE malzemesinin ısı iletim katsayısının sıcaklıkla değişimi..... 105

Şekil 6.19. PS malzemesinin ısı iletim katsayısının sıcaklıkla değişimi..... 106

Şekil **Sayfa**

Şekil 6.20. A.Y.PE için akış cephesi davranışı ve fiziksel ve reolojik özellik değişimi (Basınç etkisi; $T_{enj} = 170^{o}\text{C},\ p_{enj} = 3$ MPa)..... 108

Şekil 6.21. A.Y.PE için akış cephesi davranışı ve fiziksel ve reolojik özellik değişimi (Basınç etkisi; $T_{enj} = 170^{o}\text{C},\ p_{enj} = 4$ MPa)..... 109

Şekil 6.22. A.Y.PE için akış cephesi davranışı ve fiziksel ve reolojik özellik değişimi (Basınç etkisi; $T_{enj} = 170^{o}\text{C},\ p_{enj} = 5$ MPa)..... 110

Şekil 6.23. A.Y.PE için akış cephesi davranışı ve fiziksel ve reolojik özellik değişimi (Sıcaklık etkisi; $T_{enj} = 170^{o}\text{C},\ p_{enj} = 3$ MPa)..... 113

Şekil 6.24. A.Y.PE için akış cephesi davranışı ve fiziksel ve reolojik özellik değişimi (Sıcaklık etkisi; $T_{enj} = 190^{o}\text{C},\ p_{enj} = 3$ MPa)..... 114

Şekil 6.25. A.Y.PE için akış cephesi davranışı ve fiziksel ve reolojik özellik değişimi (Sıcaklık etkisi; $T_{enj} = 210^{o}\text{C},\ p_{enj} = 3$ MPa)..... 115

Şekil 6.26. A.Y.PE için dolum süresinin basınç ve sıcaklığa bağlı değişimi 116

Şekil 6.27. Y.Y.PE için akış cephesi davranışı ve fiziksel ve reolojik özellik değişimi (Basınç etkisi; $T_{enj} = 170^{o}\text{C},\ p_{enj} = 3$ MPa)..... 117

Şekil 6.28. Y.Y.PE için akış cephesi davranışı ve fiziksel ve reolojik özellik değişimi (Basınç etkisi; $T_{enj} = 170^{o}\text{C},\ p_{enj} = 4$ MPa)..... 118

Şekil 6.29. Y.Y.PE için akış cephesi davranışı ve fiziksel ve reolojik özellik değişimi (Basınç etkisi; $T_{enj} = 170^{o}\text{C},\ p_{enj} = 5$ MPa)..... 119

Şekil 6.30. Y.Y.PE için akış cephesi davranışı ve fiziksel ve reolojik özellik değişimi (Sıcaklık etkisi; $T_{enj} = 170^{o}\text{C},\ p_{enj} = 3$ MPa)..... 122

Şekil 6.31. Y.Y.PE için akış cephesi davranışı ve fiziksel ve reolojik özellik değişimi (Sıcaklık etkisi; $T_{enj} = 190^{o}\text{C},\ p_{enj} = 3$ MPa)..... 123

Şekil 6.32. Y.Y.PE için akış cephesi davranışı ve fiziksel ve reolojik özellik değişimi (Sıcaklık etkisi; $T_{enj} = 220^{o}\text{C},\ p_{enj} = 3$ MPa)..... 124

Şekil 6.33. Y.Y.PE için dolum süresinin basınç ve sıcaklığa bağlı değişimi 125

Şekil **Sayfa**

Şekil 6.34. PS için akış cephesi davranışı ve fiziksel ve reolojik özellik değişimi (Basınç etkisi; $T_{enj} = 170^{o}\text{C},\ p_{enj} = 3$ MPa)..... 126

Şekil 6.35. PS için akış cephei davranışı ve fiziksel ve reolojik özellik değişimi (Basınç etkisi; $T_{enj} = 170^{o}\text{C},\ p_{enj} = 4$ MPa)..... 127

Şekil 6.36. PS için akış cephesi davranışı ve fiziksel ve reolojik özellik değişimi (Basınç etkisi; $T_{enj} = 170^{o}\text{C},\ p_{enj} = 5$ MPa)..... 128

Şekil 6.37. A.Y.PE için akış cephesi davranışı ve fiziksel ve reolojik özellik değişimi (Sıcaklık etkisi; $T_{enj} = 170^{o}\text{C},\ p_{enj} = 3$ MPa)..... 130

Şekil 6.38. A.Y.PE için akış cephesi davranışı ve fiziksel ve reolojik özellik değişimi (Sıcaklık etkisi; $T_{enj} = 190^{o}\text{C},\ p_{enj} = 3$ MPa)..... 131

Şekil 6.39. A.Y.PE için akış cephesi davranışı ve fiziksel ve reolojik özellik değişimi (Sıcaklık etkisi; $T_{enj} = 210^{o}\text{C},\ p_{enj} = 3$ MPa)..... 132

Şekil 6.40. PS için dolum süresinin basınç ve sıcaklığa bağlı değişimi 133

Şekil 6.41. A.Y.PE için sayısal akış cephesi ve gerçek akış cephesi davranışı ($T_{enj} = 170^{o}\text{C},\ p_{enj} = 3$ MPa) 135

Şekil 6.42. Y.Y.PE için sayısal akış cephesi ve gerçek akış cephesi davranışı ($T_{enj} = 170^{o}\text{C},\ p_{enj} = 3$ MPa) 136

Şekil 6.43. PS için sayısal akış cephesi ve gerçek akış cephesi davranışı ($T_{enj} = 170^{o}\text{C},\ p_{enj} = 3$ MPa) 137

Şekil 7.1. A.Y.PE malzemesi için dolum sürelerinin kıyaslanması (Basınç etkisi, sabit sıcaklık) 144

Şekil 7.2. A.Y.PE malzemesi için dolum sürelerinin kıyaslanması (Sıcalık etkisi, sabit baınç)..... 144

Şekil 7.3. Y.Y.PE malzemesi için dolum sürelerinin kıyaslanması (Basınç etkisi, sabit sıcaklık) 145

Şekil 7.4. Y.Y.PE malzemesi için dolum sürelerinin kıyaslanması (Sıcalık etkisi, sabit baınç)..... 145

Şekil **Sayfa**

Şekil 7.5. PS malzemesi için dolum sürelerinin kıyaslanması (Basınç etkisi, sabit sıcaklık) 145

Şekil 7.6. PS malzemesi için dolum sürelerinin kıyaslanması (Sıcaklık etkisi, sabit basınç) 146

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim **Sayfa**

Resim 2.1. Ergiyik plastiğin nozuldan sonra izlediği akış yolu 10

Resim 3.1. Deney düzeneğinin resmi 36

Resim 3.2. Kabuk malzemenin farklı işleme şartlarında davranışı 36

Resim 3.3. Değişik akış hızlarında özdeki malzemenin akışı 37

Resim 3.4. Deneylerden elde edilen görüntüler 38

Resim 4.1. Lloyd marka EAİ cihazı 46

Resim 4.2. EAİ cihazının ergiyik yoğunluğu ölçümü için düzenlenmesi 49

Resim 4.3. Granül haldeki plastik ve deney sonunda silindirden çıkan çubuk plastik deney numunesi 49

Resim 4.4. Sıcaklığa bağlı ısı iletim katsayısı ölçme düzeneği 52

Resim 4.5. PID sıcaklık denetleyicisi 53

Resim 4.6. Isı iletim katsayısı ölçüm düzeneğinin iç yapısı 54

Resim 4.7. Isı iletim katsayısının ölçümünde kullanılan plastik numune 55

Resim 4.8. Plastik numunelerin üretildiği plastik enjeksiyon kalıbı 55

Resim 4.9. Akış görüntüleme için imal edilen enjeksiyon kalıbı 57

Resim 4.10. Akış görüntüleme kalıbına yerleştirilen temperlenmiş cam plakalar 58

Resim 4.11. Akış görüntüleme deney düzeneği 58
a) Deney düzeneğinin genel görünümü
b) Kalıp içindeki akışı görüntüleme düzeneği

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklama
A	Alan, m^2
c_p	Sabit basınçta ısınma ısısı (özgül ısı), J/kg ^oC
F	Kuvvet, N
g_x	Yerçekimi ivmesinin x bileşeni, m/s^2
g_y	Yerçekimi ivmesinin y bileşeni, m/s^2
g_z	Yerçekimi ivmesinin z bileşeni, m/s^2
k	Suyun birim-hacim kütlesi, g/cm^3
k	Isı iletim katsayısı, W/m^2 °C
L	Nozul uzunluğu, m
n	Akış davranış üssü (Power-Law)
p	Basınç, N/m^2 (Pa)
p_{atm}	Atmosfer basıncı, N/m^2 (Pa)
p_{enj}	Enjeksiyon basıncı, N/m^2 (Pa)
R	Nozul yarıçapı, m
S	Akışkanlık terimi
t	Zaman, s
T	Sıcaklık, °C
T_{dd}	Kalıp dış duvarının sıcaklığı, °C
T_{enj}	Enjeksiyon sıcaklığı, °C
T_g	Camsı geçiş sıcaklığı, °C
T_{id}	Kalıp iç duvarının sıcaklığı, °C
u	Hızın x yönündeki bileşeni, m/s
v	Hızın y yönündeki bileşeni, m/s
w	Hızın z yönündeki bileşeni, m/s

Simgeler	**Açıklama**
ρ	Akış davranış üssü (Power-Law)
η	Dinamik viskozite, Ns/m^2 (Pa s)
η_g	Görünür viskozite, Ns/m^2 (Pa s)
η_d	Düzeltilmiş viskozite, Ns/m^2 (Pa s)
γ	Kayma hızı, s^{-1}
γ_d	Düzeltilmiş kayma hızı, s^{-1}
γ_g	Görünür kayma hızı, s^{-1}

Kısaltmalar	**Açıklama**
A.Y.PE	Alçak Yoğunluklu Polietilen
CVM	Kontrol Hacmi
EAİ	Ergiyik Akış İndeksi
FAN	Akış Analiz Ağları
MAC	İşaretleyici ve Hücre Tanecikler
MHRIC	Düzenlenmiş yüksek çözünürlüklü ara yüzey yakalama interpolasyon yöntemi
PID	Oransal Alansal ve Türevsel
PLC	Programlanabilen mantık denetleyicisi
PS	Polistiren
PVT	Basınç Özgül Hacim Sıcaklık
SSR	Katı Hal Rolesi
VOF	Akışkan Hacmi
Y.Y.PE	Yüksek Yoğunluklu Polietilen

1. GİRİŞ

Plastik, içinde dolgu maddesi, antioksidan, renklendirici, plastikleştirici gibi katkılar bulunduran polimer malzemenin; kalıplanarak işlenmiş ve kullanıma hazır hale getirilmiş son şekline denilmektedir [1]. 19. yüzyılın sonlarında Alexsander PARKES tarafından bulunan plastikler, özellikle 2. Dünya savaşından sonra daha da geliştirilmiş ve binlerce çeşidi ile endüstride ve günlük hayatımızın hemen her alanında hızla artan bir şekilde kullanılmaya başlanmıştır. Dünyada yaklaşık 80 milyon ton/yıl plastik ürün kullanılmaktadır. Bu kadar fazla miktarda kullanımı olan plastik ürünlerin kişi başına düşen yıllık kullanım miktarı, ülkelerin gelişmişlik ölçütlerinden biri olarak değerlendirilmektedir. Ülkemizde kişi başına 70 kg'a ulaşan tüketim rakamı ve 4,6 milyon tonu aşan işleme büyüklüğü ile plastik endüstrisi olarak Avrupa'da ilk beşe girmektedir [2-4].

Plastik malzemeler için yoğunluklarının düşük olması, ısıtıldıklarında akıcı hale gelebildikleri için en karmaşık geometriye sahip ürünlerin bile tek bir kalıplama işlemi ile üretilebilir olması önemli tercih nedenleridir. Ayrıca, katkı, dolgu ve takviye elemanlarının katılmasıyla istenilen özelliklerin kazandırılabilmesi, düşük ısı iletim katsayıları ve elektrik iletmeme gibi özellikler, plastik malzemelerin alternatif diğer malzemelerin yerine tercih edilmesini sağlamaktadır. Bundan dolayı, son yıllarda başta ambalaj ve özellikle de gıda ambalajı olmak üzere, uzay ve havacılık sanayinden elektronik, medikal, otomotiv sanayine kadar endüstrinin her alanında ve günlük hayatta plastikten üretilen ürünlerin kullanımında belirgin bir artış gerçekleşmiştir. Plastik ürünlerin kullanım alanlarının ve kullanım miktarının giderek artması, üretim için gerekli yöntemlerin de artmasını ve gelişmesini beraberinde getirmiştir.

Plastik ürünler sahip oldukları özelliklere göre genellikle ısıtarak ergiyik hale getirme, basınç uygulayarak şekillendirme (kalıplama) ve soğutularak kullanıma hazır son şeklini alma aşamalarından oluşan kalıplama yöntemlerinden biri tercih edilerek üretilmektedir. Enjeksiyonla kalıplama, plastik ürünlerin üretiminde en fazla paya sahip yöntemlerin başında gelmektedir [5-10]. Yüksek sipariş miktarlarında

plastik ürün üretimi gereken durumlarda, alternatif diğer üretim yöntemlerine göre önemli avantajları bulunmaktadır. Enjeksiyonla kalıplama yöntemiyle, yüksek sipariş miktarlarındaki plastik ürünler hızlı, tam detayları ile birlikte bir çevrimde, düşük üretim maliyetleri ile ve en önemlisi tekrarlanabilir özelliklerde üretilebilmektedir. İlk parçanın üretimi, doğal olarak kapsamlı, zaman alıcı ve maliyetli bir süreçtir. Bu süreçte ürün tasarımı, kalıp tasarımı ve imalatı, malzeme seçimi ve plastik parça üretimi bulunmaktadır. Bu adımlar gerçekleştirildikten sonra, aynı parçanın devam eden üretimi, ilk parçaya oranla daha kısa sürede ve daha düşük maliyetlerde gerçekleştirilebilmektedir.

İstenilen özelliklere sahip plastik parçaları üretilebilmek için, öncelikle üretilebilir ve uygun bir ürün tasarımı gerçekleştirilmelidir. Ürün tasarımı, üretim sürecinin temelini oluşturmaktadır. Üretilecek ürünün kullanım yerine ve şartlarına göre sahip olması gereken nitelikler, hangi kalıplama yöntemi kullanılarak üretileceği ve birim maliyeti gibi ölçütler, ürün tasarımında dikkat edilmesi gereken hususların başında gelmektedir. Üretilecek ürün için bu ölçütler göz önünde bulundurularak yapılan plastik malzeme seçimi ve üretim yöntemini belirleme çalışmalarından sonra, diğer bir önemli adım olan kalıp tasarımına geçilmektedir.

Kalıp, plastik parça üretim sürecindeki en önemli araçtır. Kalıp tasarımında, üretilecek parçanın estetik görünümünün yanı sıra kullanılacak plastik malzemenin özelliklerine bağlı akış davranışı da dikkate alınmalıdır. Günümüzde, en karmaşık geometrili kalıp boşlukları dahi, geleneksel ve geleneksel olmayan talaş kaldırma yöntemleri kullanılarak rahatlıkla üretilebilmektedir. Buna karşılık, üretilen kalıp boşluklarında istenilen özelliklere ve geometriye sahip plastik ürünlerin üretiminde, ergiyik plastiklerin karmaşık akış davranışlarından dolayı zorluklar yaşanmaktadır. Bu nedenle çok karmaşık geometriye sahip kalıp boşluklarının üretilmiş olması, istenilen kalitede bir kalıp üretildiği anlamına gelmemektedir. İstenilen özellikleri taşıyan bir kalıp üretimi, kalıplama sırasında ergiyik halde olan plastiğin akış davranışının bilinmesi, bilinen bu akış davranışına bağlı olarak kalıp tasarımının yapılması ve yapılan tasarıma uygun kalıp üretimi ile gerçekleşmektedir. Ergiyik plastiğin akış davranışının bilinmesi ile uygun yolluk, dağıtıcı kanallar ve giriş kanalı

tasarlanabilmekte ve bunlara bağlı olarak da uygun enjeksiyon parametreleri (enjeksiyon basıncı, kalıp sıcaklığı, ergiyik sıcaklığı gibi) belirlenebilmektedir.

Birden fazla giriş kanalının bulunmasını gerektiren ürünlerin kalıplanması sırasında veya kalıp boşluğu içerisinde maça olarak adlandırılan ve akışı engelleyen unsurların bulunduğu durumlarda, ergiyik plastik birden fazla akış cephesine sahip olarak akmaktadır. Dolum sırasında bu akış burunlarının birleşmesi, mekanik olarak mukavemeti zayıf olan ve kaynak hattı olarak adlandırılan bölgelerin ürün üzerinde oluşmasına sebep olmaktadır [5, 7-10]. Akış davranışının biliniyor olması, kaynak hatlarının yerlerinin tespit edilebiliyor olması anlamına da gelmektedir.

Ergiyik plastiklerin akış davranışını belirleyen en önemli özellik viskozitedir. Viskozite akmaya karşı gösterilen direnç olup, Newtonian olmayan akış özelliğine sahip olan ergiyik plastiklerin viskozitesi kayma hızı, basınç ve sıcaklığa bağlı olarak değişmektedir [1, 5-9, 11-20]. Dolum sırasında zamana sürekli değişen kayma hızı, basınç ve sıcaklık değerleri, ergiyik plastiğin viskozitesinin değişken olmasına ve dolayısı ile akış davranışının da oldukça karmaşık hale gelmesine sebep olmaktadır. Bundan dolayı, bilgisayar destekli dolum analizlerinde, ergiyik plastiğin viskozite değişimini veren bir viskozite modeline ihtiyaç duyulmaktadır. Dolum sırasında ergiyik plastik soğuk kalıp duvarlarına temas ettiğinden, ergiyik plastikten soğuk kalıp duvarlarına ısı akısı olmaktadır. Bu ısı alış verişi sırasında kalıp duvarlarına temas eden ergiyik plastik, hemen soğuyarak katılaşmakta ve kalıp yüzeyine yapışmaktadır. Bunun sonucunda kalıp boşluğu içerisinde viskozitenin yanı sıra farklı yoğunluk ve ısı iletim katsayısı özelliklerine sahip katmanlar da meydana gelmektedir [5-8, 13, 14]. Bu farklı katmanlar, akış sırasındaki basınç dağılımının değişmesinde büyük rol oynamaktadır. Bu sebeple bilgisayar destekli akış analizi yapan yazılımlardan gerçekçi sonuçların elde edilebilmesi için, ergiyik plastiğin bütün fiziksel ve reolojik özelliklerine ait matematiksel modellere ihtiyaç duyulmaktadır.

Viskozite, ısı iletim katsayısı, özgül ısınma ısısı, yoğunluk gibi fiziksel ve reolojik özellikler, ancak deneysel olarak belirlenebilmektedir. Deney düzeneklerinin

kurulması, deneylerde kullanılacak numunelerin üretilmesi ve deneylerden elde edilen sonuçlar kullanılarak fiziksel ve reolojik özelliklere ait matematiksel modellerin türetilmesi, oldukça pahalı ve zaman alıcıdır. Hammadde üretimi yapan firmaların ürün kataloglarında plastik ürünün fiziksel ve reolojik özellikleri ile ilgili sadece genel şartlar için yapılmış deneylerden elde edilmiş sabit değerler bulunmaktadır. Bu sabit değerler de genellikle ön bilgilendirme amaçlı olup kalıp tasarım aşamasında bu değerlerin faydalanılan bilgisayar destekli analiz yazılımlarında girdi parametreleri olarak kullanılmaları, analiz sonuçlarının hatalı elde edilmesine sebep olabilmektedir.

Ergiyik plastiğin akış davranışı dikkate alınarak yapılan kalıp boşluğu, dağıtıcı kanallar ve giriş kanalı tasarımından sonra sıra, kalıp boşluğuna dolmuş olan ergiyik plastiğin soğutularak ürüne dönüştürülmesi için uygun soğutma kanallarının tasarımına gelmektedir. Enjeksiyonla kalıplama yönteminin en zaman alıcı aşaması, soğutma aşamasıdır. Kalıp boşluğunda dolumdan sonraki sıcaklık dağılımının bilinmesi, kalıp üzerine açılması gereken soğutucu kanalların da uygun boyutlarda ve en uygun konumlarda yapılması konularında tasarımcıya bilgi vermektedir. Ayrıca, sıcaklık dağılımının bilinmesi ile çevrim süresinin en zaman alıcı aşaması olan soğuma süresinin ne kadar olması gerektiği konusunda da bilgi edinilmektedir. Plastik parça maliyetine ihmal edilemeyecek derecede etkisi olan bir çevrimden elde edilen plastik parça sayısının artışı, üretilen birim parça maliyetini azaltmaktadır. İstenilen özellikleri sağlayan plastik ürünlerin düşük maliyetle üretilmesi, küreselleşen dünya pazarındaki rekabet nedeni ile oldukça önemlidir.

Akış davranışı ve sıcaklık dağılımı ile ilgili bilgiler, temel akış denklemleri (süreklilik denklemi, momentum denklemi, enerji denklemi) içinde, deneysel olarak elde edilmiş olan fiziksel ve reolojik özelliklere ait matematiksel modeller kullanılarak oluşturulan denklem takımlarının çözülmesiyle elde edilmektedir. Doğrusal olmayan formdaki eşitliklerin, özellikle karmaşık geometrili kalıp boşlukları için çözülmeleri oldukça zordur [5, 6, 14]. Günümüzde, ergiyik plastiğin kalıp boşluğundaki akışının analizini yapabilen ticari ve akademik yazılımlar mevcuttur. Ticari yazılımlar kullanılarak ütüleme, soğutma, üründe meydana

gelebilecek hacimsel küçülmeler, çarpılma ve yapısal analizler yapılabilmektedir. Bu analizlerin kalıp üretilmeden daha tasarım aşamasında gerçekleştirilmesi, daha düşük maliyetli kalıp üretimini beraberinde getirmektedir. Aksi halde, sadece tecrübeye dayalı olarak üretilen kalıpların istenilen niteliklerde olup olmadığına ya da bu kalıplarla üretime başlanıp başlanamayacağına, ancak deneme yanılma yöntemine göre yapılacak enjeksiyon baskıları ve bu deneme baskılarından elde edilen ürünlerin istenilen özellikleri taşıyıp taşımadığının kontrol edilmesinden sonra karar verilebilecektir. Bu da oldukça zaman alıcı ve masraflı bir süreçtir. Deneme yanılma sırasında, enjeksiyon baskılarından elde edilen ürünler, ticari bir değer taşımadığı için hammadde ve kaynak kaybı doğmaktadır. Ayrıca, deneme yanılma sırasında fazladan enerji tüketilmekte ve aynı zamanda zaman kaybı olmaktadır. Ülkemizin plastik ürün üretiminde dünyada altıncı ve Avrupa'da beşinci sırada, hammadde ihtiyacı sırasında ise birinci sırada olduğu [2-4] göz önüne alındığında, deneme üretiminden kaynaklanan kayıp daha anlamlı hale gelmektedir.

Diğer taraftan, bilgisayar destekli analiz yazılımlarının tek başına kullanılmasının yeterli olmayacağı ve üretimde tek başına başarıyı getirmeyeceği de ortadadır. İstenilen kaliteye, yazılımlardan elde edilen analiz sonuçlarının iyi yorumlanıp değerlendirilmesi ve bu bilgileri tecrübeyle birleştirerek ulaşılabilecektir. Bilgisayar destekli analiz yazılımları, bir doktorun hastalık teşhisi için kullandığı röntgen ya da tomografi taramasına benzetilebilir [5]. Röntgenden elde edilen filimler ya da tomografi taraması sonuçları, sadece hastalığın durumu hakkında bilgi verirler. Tedavi, elde edilen bilgilerin ve doktorların tecrübelerinin birleşimine göre yapılacak uygulamalar ile gerçekleştirilebilmektedir.

Ayrıca, mevcut bulunan yazılımların her biri farklı bir yaklaşım (bir boyutlu, iki boyutlu, Hele-shaw modeli, üç boyutlu kabuk modeller) ve farklı bir sayısal yöntem (sonlu farklar, sonlu elemanlar, sonlu hacimler) kullanarak temel akış denklemlerini çözmektedir. Bu nedenle, analiz sonuçlarının yorumlanmasında, kullanılan çözüm yöntemleri hakkında bilgi sahibi olan nitelikli insan gücüne de ihtiyaç duyulmaktadır.

Yapılan bu doktora çalışması, enjeksiyonla kalıplamada üç boyutlu ergiyik plastik akış davranışı ile ilgili deneysel çalışma ve sayısal analiz olmak üzere iki aşamadan oluşmaktadır. Çalışmada, aşağıda belirtilen amaçlar gerçekleştirilmiştir:

- Alçak Yoğunluklu Polietilen (A.Y.PE), Yüksek Yoğunluklu Polietilen (Y.Y.PE) ve Polistiren (PS) malzemelerinin viskozite, yoğunluk ve ısı iletim katsayısı gibi fiziksel ve reolojik özelliklerini deneysel olarak belirleyerek malzemelerin karakterize edilmesi,
- Yapılan deneylerden elde edilen veriler kullanılarak, fiziksel ve reolojik özelliklere ait matematiksel modellerin elde edilmesi,
- Elde edilen fiziksel özelliklere ait matematiksel modelleri temel akış denklemlerinde kullanarak, kalıp boşluğunun üç boyutlu dolumu için sonlu hacimler yöntemine göre sayısal analizleri gerçekleştirmek,
- Üç boyutlu kalıp boşluğundaki gerçek akış davranışını kamera ile görüntülemek ve sayısal analizlerden elde edilen sonuçlarla kıyaslamak.

Çalışma mevcut hali ile üç boyutlu bir kalıp boşluğundaki gerçek akış davranışının görüntülenebildiği ilk deneysel çalışma olma özelliğini taşımaktadır. Ayrıca, ısı iletim katsayısı ölçümü için üretilen cihaz, mevcut bulunan deney sistemlerinden farklı bir yaklaşımla çalışmaktadır. Mevcut cihazlarda ısı akısı, elektrik gerilimi ve elektrik akımı kontrolü ile sağlanmaktadır. Dolayısı ile deney yapılacak sıcaklık değerlerine ısı akısı değiştirilerek, deneme yanılmaya dayalı ulaşılmaktadır. Çalışma kapsamında üretilen cihazda ise, PID kontrollü sıcaklık denetleyicisi ile deney yapılacak sıcaklık değerine ulaşıldığında, ısıtıcı sistem üzerinde bulunan bakır plakanın iki yüzeyinden ölçülen sıcaklık değerleri ve bakır plakanın sıcaklığa bağlı değişimi bilinen ısı iletim katsayısı kullanılarak o anda gerçekleşen ısı akısı hesaplanmaktadır. Bu sayede, deney yapılacak sıcaklık değeri, daha hassas ayarlanabilmektedir.

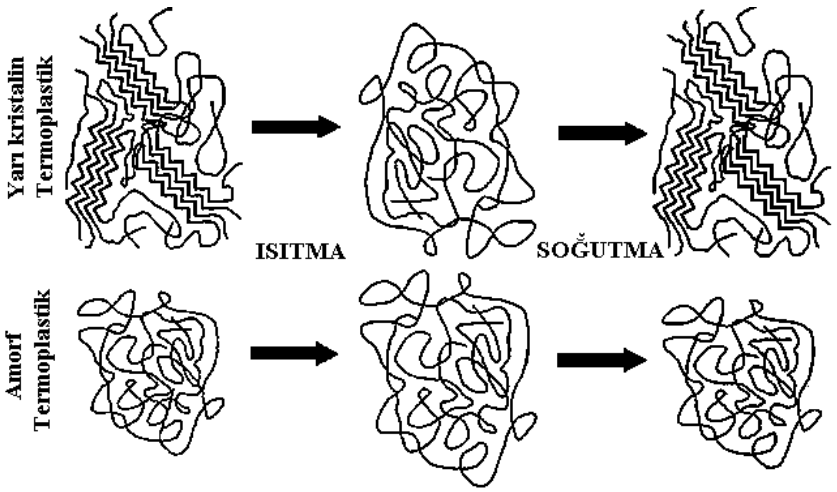
2. KAVRAMSAL BİLGİLER

2.1. Plastik Malzemeler ve Özellikleri

Plastikler, termoplastikler ve termoset plastikler olarak ikiye ayrılmaktadır. Geri dönüşümsüz olarak bilinen termoset plastikler, pişirilerek bir kez ürüne dönüştürüldükten sonra kimyasal yapılarında değişim meydana geldiğinden ısıtıldıklarında tekrar ergiyik hale gelmezler ve ikinci bir kez kullanılamazlar. Termoplastikler ise ürün haline dönüştükten sonra bile tekrar ısıtıldıklarında sadece fiziksel özelliklerinde değişim meydana gelip kimyasal yapılarında çok az değişim (oksidasyon, ısıl bozulma) meydana geldiğinden, ergiyip akışkan hale gelerek ikinci bir kez kullanılabilmektedirler [1, 8, 9, 14-16].

Termoplastikler polimer zincirlerinin yapısına göre amorf, yarı kristalin ve sıvı kristalin yapıda olanlar olmak üzere üç gruba ayrılmaktadırlar [8, 9, 14, 15, 21]. Amorf yapılı termoplastiklerin moleküler yapıları düzensizdir ve moleküller rasgele bir dizilişe sahiptir. Ayrıca, amorf yapılı termoplastikler saydamdırlar. Yarı kristalin termoplastiklerin moleküler yapıları ise yarı düzenlidir. Yarı kristalin yapıdaki termoplastikler mattırlar (opak) [1, 21]. Şekil 2.1'de görüldüğü gibi, ısıtıldıklarında amorf yapılı termoplastiklerin karmaşık olan moleküler yapısında bir değişim meydana gelmemektedir. Buna karşılık, sıcaklık artışı molekülleri birbirinden uzaklaştırdığından malzeme akıcı hale gelmektedir. Yarı kristalin yapılı termoplastikler ısıtıldıklarında ise polimer içerisindeki kısmen düzenli yapı (kristalin yapı) bağ açılarının değişmesi ile yönlenmekte ve malzeme amorf yapılı termoplastiklerin yapısına dönmektedir. Amorf yapılı termoplastikler soğutulduklarında, molekülleri arasındaki bağlar birbirlerine tekrar yakınlaşmaktadır. Yarı kristalin termoplastiklerde ise soğutma ile yapı içerisinde tekrar kristalin yapılı bölgeler oluşmaktadır. Kristalin yapılı molekül miktarı, tamamen soğutma hızına bağlı olarak değişmektedir. Bu işlemin bir sonucu olarak, yarı kristalin yapılı termoplastiklerde kristalin yapı oranının artışı, amorf yapılı termoplastiklerden daha fazla hacimsel küçülmenin (çekme) meydana gelmesine sebep olmaktadır. Bu

özellik, kalıp boşluklarının boyutsal tasarım ve imalatında oldukça önemli bir parametre olup plastik ürünün boyutlarını doğrudan etkilemektedir [10, 15, 17, 19].

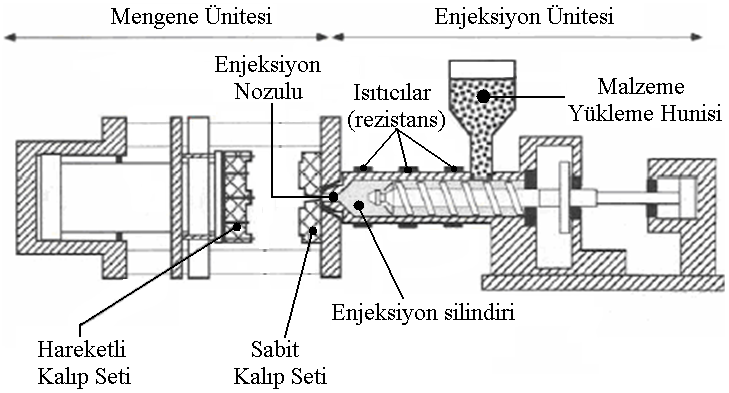


Şekil 2.1. Termoplastiklerin moleküler zincir yapısı ve sıcaklık etkisi [19]

Çalışma kapsamında termoplastik malzemeler kullanılmış olup bu malzemelerden Alçak Yoğunluklu Polietilen (A.Y.PE) ve Yüksek Yoğunluklu Polietilen (Y.Y.PE) yarı kristalin yapıdadırlar. A.Y.PE ve Y.Y.PE poliolefin grubunda yer alan termoplastiklerdir. A.Y.PE, polimerizasyonda ilk elde edilen etilen polimeridir. Yapısında % 0,01 oksijen bulunduran A.Y.PE, yüksek basınçlarda (1000-3000 atm) ve otoklavda (basınçlı su buharıyla doymuş ortam, düdüklü tencere gibi) hazırlanmaktadır. Oksijen, polimerleşmeyi başlatmakta etkili olmaktadır. A.Y.PE'nin yapısının % 50-60'ı kristalin yapıdadır. Y.Y.PE ise % 90 civarında kristal içermektedir. A.Y.PE ile Y.Y.PE arasındaki en büyük fark, A.Y.PE'nin kristal derecesinin daha az oluşudur. Diğer farklarda bu özelliklerinden kaynaklanmaktadır [1, 21]. Kalıplanabilen termoplastik maddelerin içinde en ucuz olanı Polistiren (PS)'dir. PS, saydam özellikte olup kolay işlenebilen bir polimerdir. 100 ^{o}C'nin üzerinde yumuşamakta ve sıcaklık biraz daha artırıldığında ise akıcı hale gelmektedir. Mekaniksel ve ısıl özellikleri oldukça iyidir. PS, doğrusal ve ataktik (rasgele dizilimli, düzensiz yapılı) bir polimer olup amorf yapıdadır [1, 21].

2.2. Enjeksiyonla Kalıplama Çevrimi

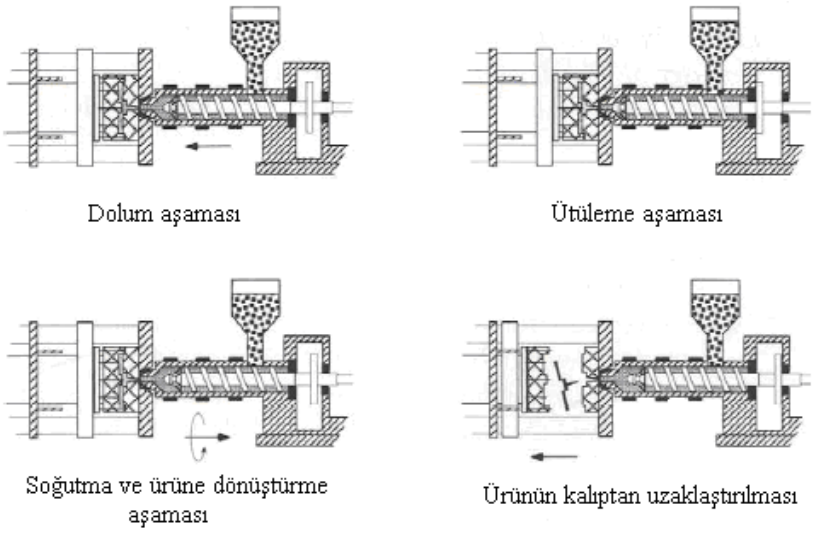
Enjeksiyonla kalıplama yöntemi ile plastik ürün üretiminde en genel ve tanıtıcı ifade, ergiyik haldeki plastik malzemenin kalıp boşluğuna basınç ile itilmesi olarak verilebilir. Kalıp boşluğu ergiyik plastik ile dolduktan sonra, ergiyik plastik soğutularak plastik ürün haline dönüştürülmektedir. Şekil 2.2'de bir enjeksiyon presinin (makinasının) genel kısımları görülmektedir.



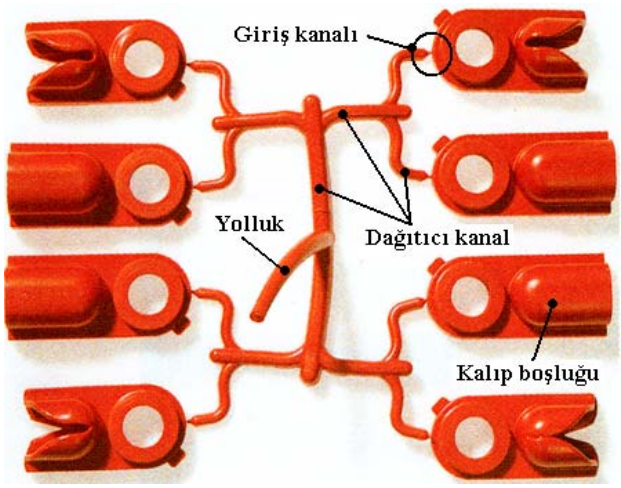
Şekil 2.2. Bir enjeksiyon presinin genel yapısı [22]

Şekil 2.3'te adımları şematik olarak görülmekte olan enjeksiyonla kalıplama çevrimi, küçük tanecikler (granül) halindeki plastik hammaddenin malzeme yükleme hunisine konulmasıyla başlamaktadır. Enjeksiyon silindiri içerisindeki vida dönmeye başladığında (malzeme alma aşaması) aynı zamanda geriye doğru da hareket ederek granül halindeki plastik hammaddeyi enjeksiyon silindiri içerisine almaktadır. Vidanın dönme hareketi ile vida ile ergiyik plastik arasındaki sürtünmeden kaynaklanan ısı (viskoz ısınma) ve silindir etrafındaki rezistanslar sayesinde, granüller enjeksiyon silindiri içerisinde ergimeye başlamaktadır. Ergiyik hale gelen plastik malzeme, vidanın dönme hareketinden dolayı enjeksiyon nozulunun hemen arkasında birikmektedir. Ayarlanan miktardaki malzemenin enjeksiyon silindiri içerisine alınmasından sonra, vidanın dönme hareketi durmaktadır. Üretimin en başında, bu safha sadece malzeme alma (mal alma) aşaması iken, üretimin seri hale gelmesi ile birlikte malzeme alma aşaması soğuma süresi içinde yer alan bir adım haline gelmektedir.

Dönme hareketi duran vida, nozulun hemen arkasında birikmiş olan ergiyik plastiğin kalıp boşluğuna akışını sağlamak için bir piston gibi ileriye doğru hareket etmektedir. Bu safha, dolum aşaması olarak adlandırılmaktadır. Dolum aşamasında nozuldan çıkan basınçlı ergiyik plastik Resim 2.1'de görüldüğü gibi önce yolluğa, yolluktan geçtikten sonra dağıtıcı kanallara ve daha sonrada giriş kanalları vasıtası ile kalıp boşluğuna akmaktadır.



Şekil 2.3. Enjeksiyonla kalıplama çevrimi [22]



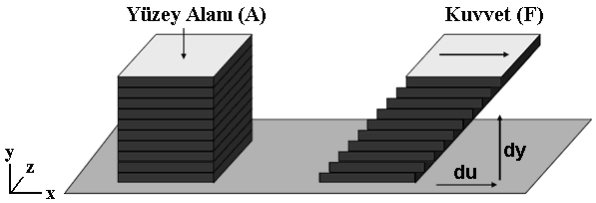
Resim 2.1. Ergiyik plastiğin nozuldan sonra izlediği akış yolu [5]

Kalıp boşluğu dolduktan sonra, fazladan bir miktar ergiyik plastik daha kalıp boşluğuna enjekte edilmektedir. Parçanın hacimsel küçülme telafisinin yapıldığı, ısıl artık gerilmeler nedeni ile meydana gelebilecek çarpılmaların en aza indirildiği ve ergiyik plastiğin akmakta zorlandığı, kesiti küçük unsurların dolabildiği bu safhaya ütüleme aşaması denilmektedir.

Ütüleme aşaması bittiğinde, ergiyik plastiğin plastik ürün haline dönüştürüldüğü soğutma aşaması başlamaktadır. Soğutma aşaması süresi içinde, vida tekrar dönmeye başlayarak ikinci enjeksiyon baskısı için gerekli olan hammaddenin silindir içerisine alınmasını sağlamaktadır. Bu sırada kalıp üzerindeki soğutma kanallarından soğuk su akışı olmaktadır. Belirlenen soğutma süresinin bitmesinden sonra enjeksiyon presinin hareketli kısmı hareket ettirilerek kalıp açılmaktadır. Kalıbın açılmasından sonra itici olarak adlandırılan kalıp elemanlarının hareketi ile ürüne dönüşmüş olan plastik, kalıp boşluğundan çıkarılmaktadır. Böylece, bir plastik enjeksiyon çevrimi tamamlanmış olmaktadır. Enjeksiyon presinin hareketli kısmının tekrar hareket etmesi ile kalıp kapanmakta ve bir sonraki parçanın üretimi için yeni bir çevrim başlatılmış olmaktadır.

2.3. Ergiyik Plastiğin Kalıp Boşluğunda Akışı

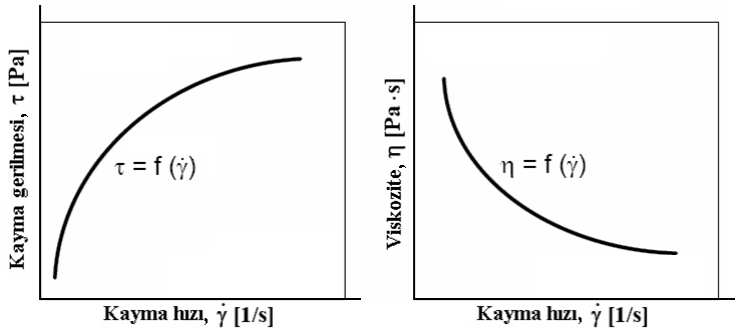
Kayma gerilmesi uygulandığında, katı malzemeler şekil değiştirerek deforme olurken, sıvı malzemeler akmaya başlamaktadır. Enjeksiyonla kalıplama sırasında, vidanın önündeki ergiyik plastik üzerine vidanın bir piston gibi ileri hareketi ile uygulanan basınç, kayma gerilmesi meydana getirmektedir. Kayma gerilmesi, ergiyik plastik üzerine uygulanan basınç etkisiyle, Şekil 2.4'de görüldüğü gibi katmanların birbiri üzerinden kayması şeklinde gerçekleşen akışta, katmanlar arasında meydana gelen gerilimdir ve bu tip akışlar kayma akışı olarak adlandırılmaktadır [5-8, 11, 12, 23]. Kayma akışında, üst düzleme uygulanan kuvvet ile katmanlar arasından aktarılan bir momentum akısı meydana gelmektedir . Bu akış sırasında meydana gelen deformasyon, kayma hızı olarak adlandırılmaktadır. Kayma akışında her katmanın hızı birbirinden farklı olduğundan, kayma hızı, katmanların hangi hızla birbiri üzerinden aktığının ölçümü olarak da tanımlanmaktadır [24].



Şekil 2.4. Kayma gerilmesi ile birlikte gerçekleşen kayma akışı [14]

Üst düzleme etki eden kayma gerilmesi ($\tau_{xy} = \frac{F}{A}$) ile kayma hızı ($\dot{\gamma} = \frac{\partial u}{\partial y}$) arasında bir oran vardır. Bu oran viskozite olarak bilinmektedir. Akma mekaniğinin bir göstergesi de sayılan viskozite, malzemenin deformasyona karşı gösterdiği iç ve dış sürtünmelerden kaynaklanan direnç sonucu ortaya çıkmaktadır. Ergiyik plastiklerde akma hiçbir zaman tam anlamıyla viskoz olmaz. Bunun nedeni, ergiyik polimerlerde moleküller arası etkileşim karmaşıklığının sürmesidir [1, 11, 12].

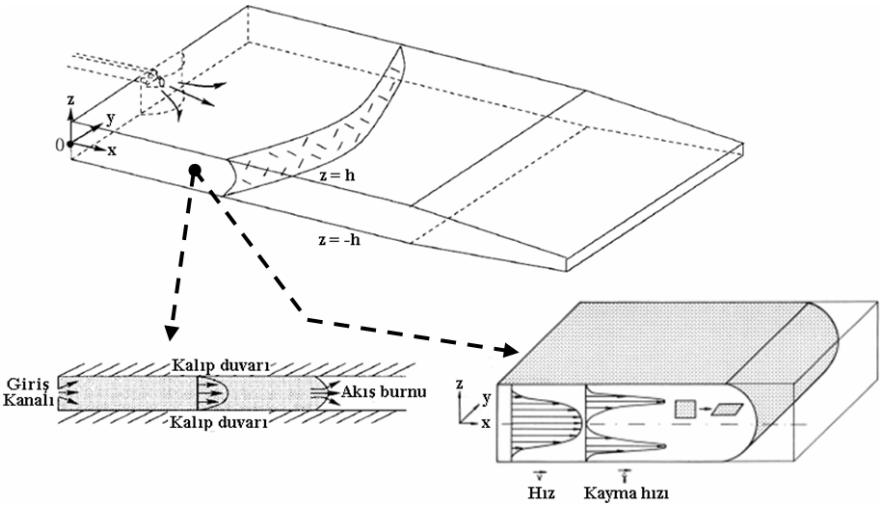
Ergiyik plastiklere uygulanan kayma gerilmesi ile meydana gelen kayma hızı (deformasyon) arasındaki ilişki doğrusal olmayıp, Şekil 2.5'de görüldüğü gibi gerçekleşmektedir. Kayma gerilmesinin artışı ile deformasyon artmakta, viskozite azalmakta ve kayma incelmesi denilen davranış meydana gelmektedir. Kayma hızı ve kayma gerilmesi arasındaki doğrusal olmayan bu ilişki, ergiyik plastiklerin Newtonian olmayan ve kayma incelmesi sergileyen akışkanlar sınıfına girdiklerinin bir göstergesidir.



a) b)

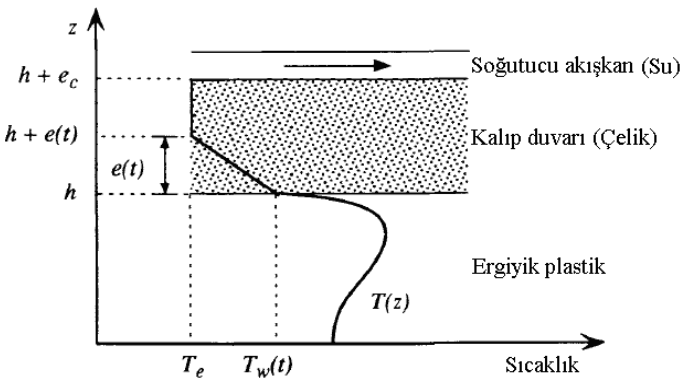
Şekil 2.5. Kayma hızı viskozite ilişkisi [20]
a) Akış eğrisi (ölçülür)
b) Viskozite eğrisi (hesaplanır)

Nozuldan çıktıktan sonra yolluk, dağıtıcı kanal ve giriş kanalından geçerek kalıp boşluğuna ulaşan ergiyik plastik, dolum aşamasında kalıp boşluğu içerisinde Şekil 2.6'da görüldüğü gibi akmaktadır. Ergiyik plastik, kesit doğrultusunda fıskiye tipi denilen bir akış karakteristiği sergilemektedir [5-8, 22].



Şekil 2.6. Ergiyik plastiğin kalıp boşluğunda akışı [22]

Fıskiye akışı, dolum sırasında soğuk kalıp duvarlarına temas sırasındaki sıcaklık kaybı nedeni ile katılaşan katmanın oluşması ve buna bağlı olarak akışın gerçekleştiği kesitin daralmasından kaynaklanmaktadır. Dolum sırasında meydana gelen sıcaklık profili Şekil 2.7'de görülmektedir. Fıskiye akış tipi, özellikle katkı elemanlarının ürün içerisindeki dağılımını ve yönlenmelerini belirleyen en önemli etkendir.



Şekil 2.7. Dolum sırasında kalıp boşluğu kesitindeki sıcaklık profili [22]

Ergiyik plastiğin kalıp boşluğuna dolumu sırasında, akış davranışını belirleyen en önemli özellik olan ergiyik plastiğin viskozitesi üzerinde, sıcaklığın etkisi oldukça büyüktür. Sıcaklık arttıkça viskozite değeri de düşmektedir. Plastik malzemelerin viskozitelerinin sıcaklığa bağlı olarak hesaplanmasında sıklıkla kullanılan model, Arrhenius modelidir. Arrhenius modeli, viskozitenin sıcaklığa bağlı olarak değişim gösteren aktivasyon enerjisine bağlı olarak bulunduğu bir modeldir. Bir plastiğin sıcaklık ile değişen viskozitesi, Eş. 2.1'deki denkleme göre ısıl olarak aktive edilmiş bir olay olarak ele alınmaktadır [1, 11, 12, 14].

$$\eta = A e^{(E_a / RT)} \tag{2.1}$$

Eş. 2.1'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 [1, 11, 12, 14]. Burada, R gaz sabitidir ve 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.

Basıncın viskozite üzerindeki etkisi, sıcaklık ve kayma hızı kadar değildir. Fakat aktivasyon enerjisindeki artış, basınç değişimine duyarlılığı da artırmaktadır. Viskozitenin basınca bağlı değişimi, Eş. 2.2 ile hesaplanabilmektedir [1, 11, 12, 14].

$$\eta = A e^{C p} \tag{2.2}$$

Burada, A atmosferik ortamdaki viskoziteyi, p basıncı, C ise basınç katsayısını temsil etmektedir.

Viskozite üzerinde sıcaklıktan sonra en etkin parametre kayma hızıdır. Ergiyik haldeki plastik malzemelerin akışı sırasında, deformasyon hızına bağlı olarak

moleküllerin deformasyonu değişmektedir. Plastik malzemelerin büyük bir çoğunluğu, makro moleküllü uzun zincirlerden oluştuğundan, moleküler yönelimler akış doğrultusunda olmaktadır. Moleküler yönelimlerin akış doğrultusunda olması, akışkan plastik tabakalarının birbiri üzerinden rahatça kaymasına sebep olmaktadır. Uygun molekül yönelimlerinin sonucu, akış sırasında iç direnç azalmaktadır. Viskozite değerini düşüren bu etki akışın kolay olmasını sağlamaktadır.

Sadece kayma hızına, sadece sıcaklığa ya da sadece basınca bağlı olarak hesaplanan viskozite değerleri, plastiklerin enjeksiyonla kalıplama ya da ekstrüzyonla üretilirken ön ayarların yapılmasında değerlendirilmektedir. Ergimiş plastiklerin akış davranışının belirlenmesi ve akış analizlerinde kullanılan viskozite modelleri, sadece bir akış parametresine bağlı olarak hesaplanmamaktadır. Genellikle, Newtonian olmayan akışlarda en fazla etken olan sıcaklık ve kayma hızı parametrelerini içeren viskozite modelleri kullanılmaktadır. Bu amaçlar doğrultusunda ortaya konmuş birçok 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. Enjeksiyonla kalıplama sırasındaki akış davranışının analizinde yaygın olarak Üs yasası (Power Law) viskozite modeli, Moldflow ikinci dereceden viskozite modeli, Carreau viskozite modeli, Cross viskozite modeli, Cross-WLF viskozite modeli, Moldflow matris viskozite modeli ve Ellis viskozite modelinin kullanıldığı görülmektedir [5, 6].

3. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Oldukça karmaşık geometriye sahip plastik ürünlerin tek bir kalıplama işlemiyle doğrudan kullanılabilir özelliklerde ve seri olarak üretilebilir olması, enjeksiyonla kalıplama yönteminin diğer plastik parça üretim yöntemlerinden daha çok tercih edilmesini sağlamıştır. Ayrıca, ikincil işlemlere ihtiyaç duyulmaması ve aynı kalıpta aynı plastik üründen çok sayıda üretilebilir olması ya da aynı ürüne ait farklı plastik parçaların aynı kalıpta ve aynı kalıplama çevriminde üretilebilir olması, birim parça üretim maliyetlerini oldukça azaltmaktadır. Bu nedenle, plastiklerin enjeksiyonla kalıplama yöntemiyle üretimi, birçok araştırmacının ilgisini çekmiştir.

Enjeksiyonla kalıplama yönteminde, üretilen plastik ürünlerin estetik görünümleri, mekanik mukavemetleri ve hedeflenen üretim kaliteleri gibi özelliklerine ait ölçütler, ancak bu ölçütler dikkate alınarak tasarlanmış ve imal edilmiş plastik enjeksiyon kalıplarıyla sağlanabilmektedir. İstenilen niteliklere sahip plastik ürünlerin üretiminde, imal edilen kalıp en önemli unsur olmasına rağmen, enjeksiyonla kalıplama parametrelerinin (ergiyik plastik sıcaklığı, enjeksiyon basıncı, enjeksiyon hızı ve kalıp sıcaklığı gibi) de istenilen ölçütleri sağlayacak şekilde ayarlanması gerekmektedir. Bu nedenle, uygun bir kalıp tasarımının yapılıp imal edilebilmesi ve üretim sırasındaki enjeksiyonla kalıplama parametrelerine ait en uygun değerlerin ayarlanabilmesi için kalıp boşluğunda hareket eden ergiyik plastiğin akış davranışının çok iyi bilinmesi gerekmektedir.

İşlem adımları oldukça basit gibi görünen enjeksiyonla kalıplama yönteminde en karmaşık olay ergiyik plastiğin akışıdır. Newtonian olmayan ergiyik plastiğin akış davranışının belirlenmesi, plastiklerin yapılarından da kaynaklanan karmaşıklıklardan dolayı oldukça zordur. Dolum sırasında ve dolum sonrası ütüleme ve soğutma aşamalarında, dinamik olarak malzeme yapısında meydana gelen değişimler ve malzemelerin moleküler yapılarının özellikleri, akış davranışının karmaşık olmasının en önemli sebebidir. Ergiyik plastiğin kalıp boşluğunda sergilediği akış davranışının bilinmemesi durumunda deneme yanılma yöntemi ile imal edilen kalıplar ve yine deneme yanılma ile tespit edilen enjeksiyonla kalıplama

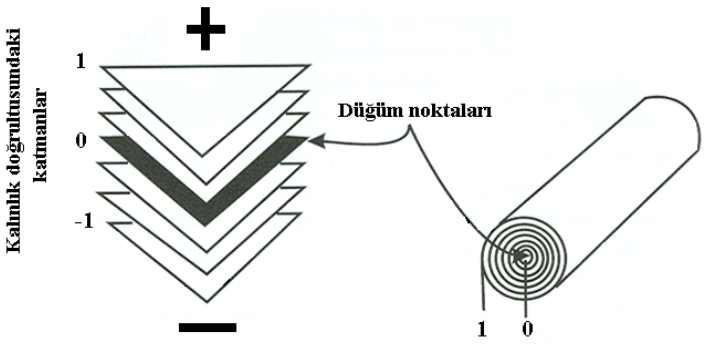
parametrelerinin kullanılması gündeme gelmektedir. Bu da, en başta zaman olmak üzere enerji, plastik malzeme ve hatta hatalı imal edilen kalıpların tekrar onarımları nedeniyle kalıp çelikleri ve kalıpların imalatında kullanılan kesici takımların israflarına sebep olacaktır. Dolayısıyla, birim parça üretim maliyetleri artacaktır. Bu nedenle, araştırmacıların da üzerinde yoğunlaştıkları en önemli konunun ergiyik plastiğin akış davranışı olduğu görülmektedir.

Özellikle, karmaşık geometrili plastik ürünlerin enjeksiyonla kalıplama yöntemi ile üretimi sırasında ergiyik plastiğin kalıp boşluğundaki akış davranışının tespit edilebilmesi, el ile yapılan hesaplamalarla mümkün olmadığından bilgisayar kullanımını gerektirmektedir. Bu nedenle birçok çalışmada, deneme yanılma yönteminin yerini alacak etkili ve verimli dolum analizi yazılımları geliştirilmeye odaklanıldığı görülmektedir [25]. Başlangıçta temel bazı geometrilerdeki (dairesel kesitli, dikdörtgen kesitli) akış için temel denklemlerinin çözümünü yaparak genel bilgiler veren yazılımlarda akış tipinin tam gelişmiş, bir boyutlu ve akışkanın Newtonian özelliklerde kabul edildiği görülmektedir [5, 26]. Son zamanlarda bilgisayar donanımlarındaki gelişmelere paralel güçlü yazılımlar geliştirilmiş ve bu yazılımlar, daha karmaşık problemlerin çözümlerinde kullanılabilir hale gelmişlerdir

Bilgisayar donanımlarındaki gelişmeye paralel olarak geliştirilen ve dolum analizi yapan ilk yazılımlarda, ergiyik plastiğin akışının çözümü için, plastik ürünün üzerindeki unsurların açınımı alınmaktaydı. Açınım üzerindeki her parça ayrı ayrı değerlendirilerek akış davranışı basite indirgenmiş bölgeler için yapılan çözümlerden elde edilmekteydi. Daha sonra bu çözümler tekrar birleştirilerek ürün için dolum analizi elde edilmeye çalışılmaktaydı. Bu yönteme akışın dallandırılması denilmektedir [27]. Yöntemin, ilerleyen zamanlarda birçok araştırmacı tarafından kabul görmediği görülmektedir. Akış problemlerine ısıl analizlerin de eklenmesiyle birlikte soğutma aşaması için de çözümler elde edilmeye başlanmıştır. Bu ana kadar yapılan çalışmalarda analiz sonuçları, tamamen sayısal değerlerden oluşmakta olup grafik çıktısı alınamamaktadır. 1980'li yılların başından itibaren 2,5 boyutlu akış analizleri yapılabilir hale gelmiş ve ilk kez analiz sonuçları grafiksel olarak ta sunulabilir hale gelmiştir. 2,5 boyutlu analizlerde yaygın olarak Hele-Shaw modeli

kullanılmaktadır. Plastik ürünlerin et kalınlıkları genellikle 5 mm'den daha incedir. Hele-Shaw modeli de özellikle ince kesitli kalıp boşluklarındaki akış davranışlarını başarılı olarak temsil edebilmektedir [5, 6, 8, 14, 28].

Hele Shaw modeli, temel akış denklemlerinin bazı kabuller yapılarak sadeleştirilmesiyle elde edilmektedir [6, 14]. Hele-Shaw modelinde akışkan, genelleştirilmiş Newtonian özelliklerde ve sıkıştırılamaz kabul edilmektedir. Ayrıca, Hele-Shaw modelinde, atalet kuvvetleri ve kalınlık doğrultusundaki (z yönü) hız değişimi ihmal edilmektedir. Bu kabuller ile temel akış denklemleri tek bir Poisson tipi denkleme dönüşerek basitleşmektedir [5, 6, 27]. Sadece enerji denkleminin çözümünde kalınlık doğrultusu için bu doğrultuda oluşturulan katmanlar hesaba katılarak ısıl analiz üç boyutlu olarak yapılmaktadır. Kalınlık doğrultusunda oluşturulan katmanlar (Şekil 3.1) arasında hız ve basınç değişimi olmadığı kabul edilerek katmanlar arasında sadece enerji denklemi çözülmektedir. Bu nedenle Hele-Shaw modeline, 2,5 boyutlu akış modeli denilmektedir. Ayrıca, ısı iletim katsayısı da sabit kabul edilmektedir [5, 6, 27].



Şekil 3.1. Akış alanının iki boyutlu kabuk çözüm ağında incelenmesi ve kalınlık yönünde akış alanının katmanlara ayrılması [5]

Hele-Shaw modelinde akışkanlık terimi (S) dikkate alınarak ve süreklilik denklemi yardımıyla bir basınç denklemi elde edilmektedir. Elde edilen bu denklem, basınç dağılımının belirlenmesinde kullanılmaktadır [6]. Hele-Shaw modelinde kullanılan sonuç denklemler Eş. 3.1-3.8'de verilmiştir [6, 27, 29].

Kütlenin korunumu (Süreklilik denklemi):

$$\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}+\frac{\partial w}{\partial z}=0 \qquad (3.1)$$

Momentumun x bileşeni:

$$\frac{\partial p}{\partial x}=\frac{\partial}{\partial z}\left(\eta\frac{\partial u}{\partial z}\right) \qquad (3.2)$$

Momentumun y bileşeni:

$$\frac{\partial p}{\partial y}=\frac{\partial}{\partial z}\left(\eta\frac{\partial w}{\partial z}\right) \qquad (3.3)$$

Momentumun z bileşeni:

$$\frac{\partial p}{\partial z}=0 \qquad (3.4)$$

Enerji denklemi:

$$\rho c_p\left(\frac{\partial T}{\partial t}+u\frac{\partial T}{\partial x}+v\frac{\partial T}{\partial y}+w\frac{\partial T}{\partial z}\right)=\eta\dot{\gamma}^2+k\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \qquad (3.5)$$

Enerji denklemindeki (Eş. 3.5) kayma hızı ifadesi ($\dot{\gamma}$), Eş. 3.6'da verildiği gibidir.

$$\dot{\gamma}=\sqrt{\left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)^2+\left(\frac{\partial v}{\partial z}\right)^2} \qquad (3.6)$$

Basınç denklemi:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(S\frac{\partial p}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(S\frac{\partial p}{\partial y}\right)=0 \qquad (3.7)$$

Basınç eşitliğindeki (Eş. 3.7) akışkanlık terimi (S), Eş. 3.8'de verildiği gibidir.

Akışkanlık terimi:

$$S = \frac{1}{2}\left\{ \int_{h^-}^{h^+} \frac{z^2}{\eta} dz - \frac{\left(\int_{h^-}^{h^+} \frac{z}{\eta} dz \right)^2}{\int_{h^-}^{h^+} \frac{dz}{\eta}} \right\} \quad (3.8)$$

1980'li yılların ortalarına doğru analizlerde dolumun tam olarak gerçekleşmediği bölgeler tespit edilebilmeye başlanmıştır. 1980'li yılların sonunda ise analizler 2,5 boyutlu, hacimsel küçülme (çekme) ve ısıl gerilmeler nedeni ile plastik üründe oluşabilecek çarpılmaların da tespit edilebilmesine olanak sağlayacak şekilde geliştirilmiştir. 1990'lı yılların ortalarına doğru fiber yönlenmelerinin analizini de yapabilecek yetenekler kazanan yazılımlar, 1990'lı yılların sonuna doğru üç boyutlu akış alanlarının kabuk şeklinde temsil edilerek Hele-Shaw modelinin üç boyutlu akış alanlarına daha kolay uygulanabilmesine kadar gelmiştir. Günümüzde yazılımlar, akış alanlarını tüm kalınlıkları da dikkate alarak üç boyutlu çözebilecek yetenektedirler.

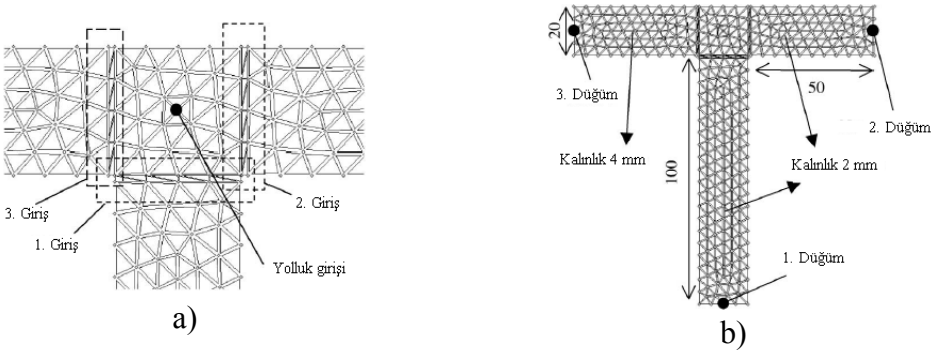
Hele-Shaw modelinin ticari yazılımlarda kullanılmasının en önemli sebebi, denklemlerin kabuk çözüm ağı üzerinde çözülüyor olması ve denklemlerin Poisson tipi denkleme dönüştürülmüş olması nedeni ile analiz sonuçlarının kısa sürede elde edilebiliyor olmasındandır. Gerçek üç boyutlu çözümler, Hele-Shaw modeline göre çok daha uzun sürede elde edilebilmekte ve daha yüksek işlem yapabilme kapasiteli bilgisayarlara ihtiyaç duyulmaktadır. Hele-Shaw modelinin dikkate alındığı çalışmalarda, diferansiyel denklemlerin ayrıştırılmasında daha çok sonlu elemanlar yönteminin tercih edildiği görülmektedir [6, 27]. Sonlu hacimler yönteminin ise çözümlerde nispeten daha az yer aldığı görülmektedir. Enerji denkleminin ayrıklaştırılması ise hemen hemen bütün çalışmalarda, sonlu farklar yöntemi ile gerçekleştirilmektedir [6].

Bu tarihsel gelişim içinde, araştırmacıların birçoğuna Kamal ve arkadaşlarının yaptığı çalışmalar temel teşkil etmiştir [26, 30-32]. Temel akış denklemlerinin

ergiyik plastiğin Newtonian olmayan akış davranışı dikkate alınarak dolum, ütüleme ve soğuma aşamaları için çözüldüğü çalışmada, sayısal analizler yarım dairesel kesitli bir kalıp boşluğunda radyal yöndeki akış dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir [26]. Karmaşık geometrili ve ince kesitli kalıp boşluğundaki akış için sayısal analizler, Hele-Shaw modeli ve enerji denklemi birlikte kullanılarak gerçekleştirilmiştir [30].

Dairesel kesitli akış kanallarında kullanılmak üzere Williams ve arkadaşları tarafından bir sonlu farklar yöntemi geliştirilmiştir [33]. Geliştirilen bu sonlu fark yöntemi, Lord ve arkadaşları tarafından polimerler için yaygın kullanılan viskozite, kayma hızı ve sıcaklık ilişkilerini de hesaba katacak şekilde genişletilmiş ve enjeksiyonla kalıplama sırasında ergiyik plastiğin kalıp boşluğundaki akışının analizlerinde kullanılmıştır [34].

Bikas ve arkadaşlarının Hele-Shaw modelini kullandıkları çalışmada, diferansiyel denklemler sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak ayrıklaştırılmıştır [35]. Araştırmacılar, geliştirdikleri NASPLAN adlı yazılımda Cross WLF viskozite modelini tercih etmişlerdir. Çalışmada, geliştirilen yazılım aracılığıyla Şekil 3.2'de görülen "T" biçimli kalıp boşluğunun dolum analizi yapılmıştır. Analiz sonuçları üç farklı optimizasyon yöntemi ile değerlendirilerek enjeksiyon parametrelerinin en uygun değerleri, giriş kanalının en uygun yeri ve kaç giriş kullanılması gerektiği tespit edilmeye çalışılmıştır.



Şekil 3.2. Analizi yapılan "T" biçimli kalıp boşluğu [35]
c) Çözüm ağı yapısı b) Optimizasyon için kullanılan düğüm noktaları

Garcia ve arkadaşları, Hele-Shaw modelini dikkate aldıkları çalışmada, giriş kanalı yerinin ve giriş kanalı sayısının doluma etkilerini incelemişlerdir. Analizlerde, "dikdörtgen", "kare", "L" ve "dairesel" biçimli kalıp boşlukları kullanılmıştır. Kalıp boşluğu geometrisinin akış parametreleri üzerinde önemli rol oynadığı sonucunu vurgulamışlardır. Yaptıkları optimizasyon çalışmalarında en başarılı sonuçları, dairesel kesitli kalıp boşluğu için elde etmişlerdir [36].

Jian ve arkadaşları, içinde seramik tanecikler bulunan ergiyik plastiğin akışını Hele-Shaw modeliyle analiz etmişlerdir. Diferansiyel denklemlerin sonlu elemanlar yöntemiyle ayrıklaştırıldığı çalışmada, özellikle akışkanlık teriminin (S) analiz sonuçlarına etkileri incelenmiştir. Hele-Shaw modelinin en önemli eşitliği olan ve akışkanlık teriminin dikkate alınmasıyla süreklilik denkleminden türetilen basınç eşitliğinin çözümünden basınç dağılımının doğru elde edilebilmesi, akışkanlık teriminin doğru olarak ifade edilmesine bağlıdır. Akışkanlık teriminin doğru ifade edilmesi ise akışkan için en uygun viskozite modelinin kullanılmasına bağlıdır. Bu nedenle, yapılan çalışmada ısı iletim katsayısı, yoğunluk gibi fiziksel ve reolojik özellikler sabit alınmalarına rağmen, viskozite sabit alınmayarak bağlayıcı ve besleyicinin viskozitelerini de dikkate alan modeller kullanılmıştır. Çalışmada, katılaşan katman kalınlığı da hesaplanmış ve analizlerde bu katılaşan katmanın akışa etkisi de dikkate alınmıştır. Katılaşan katman kalınlığı, camsı geçiş sıcaklığı (T_g) dikkate alınarak tespit edilmiştir [37]. Camsı geçiş sıcaklığı, polimer moleküllerinin 1/40'ının hareket edebildiği sıcaklık değeridir [11, 12].

Chen ve arkadaşları, Hele-Shaw modelini kullanarak yaptıkları çalışmada basınç ve sıcaklık değişiminin akış üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Dolum sırasında ergiyik plastik sıkıştırılamaz özellikte kabul edilmiştir. Ütüleme aşamasında sıcaklığın yoğunluk üzerinde etken rol oynadığı ve soğutma aşamasında katılaşma ile birlikte hacimsel küçülmelerin de gözlendiği tespit edilmiştir [38].

Enjeksiyonla kalıplama yöntemi ile üretimden önce, ergiyik plastik akış analizinin yapılma gerekçelerinden bir tanesi analiz sonuçlarının (basınç dağılımı, hız dağılımı,

sıcaklık dağılımı vb.) elde edilen plastik ürüne etkilerini belirlemektir. Bu nedenle, Simith ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada, Hele-Shaw modeli kullanılarak basınç ve hız dağılımları elde edilmiştir. Elde edilen basınç ve hız dağılımlarının, ürün üzerinde çarpılmalara sebep olan artık (kalıcı) gerilmelere etkisi ise sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak araştırılmıştır [39].

Harry ve Parrot, ve Bergen ve Gogos sıcaklık ve basıncın viskozite üzerindeki etilerini tanımlamak için uygun bünye denklemleri geliştirmişlerdir [40, 41]. Bazı araştırmacılar, karmaşık geometrili ince kalıp boşluklarında polimer akışlarını çalışmışlardır [42-44]. Sonlu elemanlar yöntemi ve özellikle de Galerkin Formülasyonu polimerik malzemelerin viskoelastik davranışını tanımlamak ve simülasyonunu gerçekleştirmek için birçok araştırmacı tarafından kullanılmıştır [45-47]. Viskoelastiklik polimer işlemeciliğinde çok önemli bir parametredir ve integral bünye denklemleri ile belirtilmektedir. İntegral bünye denklemleri ile birlikte temel akış denklemlerinin çözümünde yüksek performanslı bilgisayarlara ihtiyaç duyulmaktadır.

Bazı avantajları nedeni ile ticari yazılımlarda da tercih sebebi olan Hele-Shaw vb. gibi basitleştirilmiş akış modellerinin bazı sınırlılıkları bulunmaktadır. Hele-Shaw modelinde akış alanına ait geometrik modelin orta düzleminden geçen kabuk elemanlar kullanılmaktadır. Özellikle karmaşık geometrili akış alanları için orta düzleme ait kabuk elemanların oluşturulması oldukça zor ve zaman alıcı olmaktadır. Bu durum maçaların etrafı, federlerin bulunduğu bölgeler, kalınlık değişimlerinin bulunduğu bölgeler veya fiskiye akış etkilerinin olduğu akış cephesi gibi önemli üç boyutlu akış bölgelerinde de görülmektedir. Bu bölgeler, çözüm ağının oluşturulacağı kabuk orta düzlemin karmaşık olması anlamına gelmekle birlikte ayrıca, basınç, ısı transferi veya gerilim değerlerinin belirlenmesinde de güçlüklere sebep olabilmektedir. Özellikle dişli çarklar, bağlantı elemanları gibi kalınlığın etken olduğu durumlarda Hele-Shaw modeli hatalı sonuçlar verebilmektedir.

Sadece orta düzlemin oluşturulması için geçen süreden kazanmak için değil, aynı zamanda kalın kesitli parçaların dolum analizleri için de gerçek üç boyutlu analiz

modellerine gerek duyulmaktadır. Gerçek üç boyutlu analizler gerçekleştirilerek fiberlerin yönlenmesi, artık gerilmeler ve üretilen ürünün mikro yapısı hakkında daha fazla bilgi edinmek mümkün olabilmektedir.

Analizi yapılacak olan parçanın kalınlığının artması, homojen bir soğutmanın sağlanamaması, atalet ve yerçekimi kuvvetlerinin etken olduğu durumlarda Hele-Shaw modeli ile gerçekleştirilen analiz sonuçlarının, deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlarla uyumlu olmadığı görülmektedir [48]. Bu gibi durumlarda Navier Stokes eşitliklerinin ihmaller yapılmadan çözülmesi, daha doğru sonuçların elde edilmesini sağlamaktadır [49-52]. Navier-Stokes eşitliklerinin dikkate alındığı çalışmalarda, ele alınan plastik molekülü (kontrol hacmi) üzerine gelen kuvvetlerin hiçbiri ihmal edilmeyerek gerçekleştirilen akış analizlerde, hem üçüncü boyutta birim kalınlık ile sınırlı olmamakta hem de tüm parametreler ihmal edilmeden hesaplanabilmektedir [52-56].

Ergiyik plastiğin akışı için Navier-Stokes denklemleriyle oluşturulan matematiksel modellerde, diferansiyel denklemlerin ayrıştırılması, daha çok sonlu hacimler yöntemine göre yapılmaktadır [58-68]. Navier-Stokes denklemleri kullanılarak yapılan modellemelerde de, enerji denkleminin ayrıklaştırılması için sonlu farklar yönteminin daha yaygın tercih edildiği görülmektedir [6].

Üç boyutlu ve karmaşık geometrili akış alanları için Navier-Stokes denklemleriyle oluşturulan modeller üzerinde yapılan analizlerde, çözüm ağı (mesh) için seçilen hücre boyutları bilgisayarda çözüm zamanını oldukça etkilemektedir. Küçük seçilen hücre boyutları çözüm hassasiyetini artırırken çözüm süresinin uzamasına sebep olmaktadır. Bu olumsuzluk genellikle Implicit yöntemler kullanılarak giderilmeye çalışılmaktadır [55].

Kumar ve arkadaşları, silindirik biçimli kalıp boşluğuna ergiyik A.Y.PE'nin sabit enjeksiyon hızı ile dolumunu, izotermal olmayan şartlar için analiz etmişlerdir [69]. Sayısal çözümlemeden elde edilen sonuçlar ile analitik çözümlerden elde edilen

sonuçların kıyaslandığı çalışmada, Power Law viskozite modeli kullanılmış ve Navier-Stokes eşitlikleri çözülmüştür.

Pichelin ve Coupez, Galerkin sonlu elemanlar yöntemini kullanarak yaptıkları analiz çalışmasında viskozite modeli olarak hem Power Law viskozite modelini hem de Carreau viskozite modelini kullanmışlardır [61]. Çalışmada, sürtünmelerden kaynaklanan viskoz ısı üretimi de hesaba katılmıştır.

Yapılan çalışmalar değerlendirildiğinde, kullanılan akış modellerindeki diferansiyel denklemlerin ayrıklaştırılması için sonlu elemanlar, sonlu farklar ve spectral analiz yöntemleri daha yaygın olarak tercih edilmişlerdir. Sonlu elemanlar son derece başarılı sonuçlar vermesinin yanında uygulanmasının zor oluşu, yöntemin tek olumsuz yönüdür. Değişik sonlu farklar metotlarının tercih edildiği analiz çalışmalarında, akış simülasyonunda en başarılı ve sonlu elemanlar yöntemine en yakın sonucu veren yöntemin sonlu kontrol hacmi olduğu görülmektedir. Sonlu kontrol hacmi yönteminde de, klasik sonlu farklar yöntemindeki gibi düğüm noktalarına ayrılmış kontrol hacmi kullanılmaktadır. Farkı, iki düğüm noktası arasında difüzyon alanının tespit edilip, diferansiyel denklemlerin bu alanda integralinin alınmasıdır. Ayrıklaştırma, iki nokta arasındaki bölgenin integrali olduğu için, çözüm daha hassas olmaktadır. Ayrıca, sonlu kontrol hacmi yöntemi içerisinde difüzyon terimlerinin hesaplanmasında, Upwind yönteminin kullanılarak, akışın hangi taraftan geldiği dikkate alınmaktadır. Bu da, yöntemi başarılı kılan diğer bir özellik olarak vurgulanmaktadır.

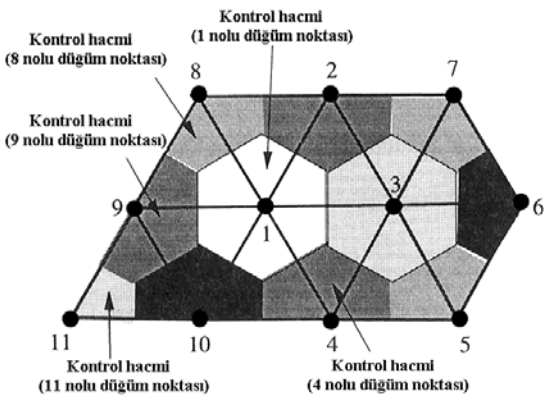
Enjeksiyonla kalıplama sırasında ergiyik plastiğin kalıp boşluğundaki akış davranışı serbest yüzeyli akış problemi gibi değerlendirilerek, akış cephesinin hareketi ve geometrik yapısı tespit edilmeye çalışılmaktadır [6, 70-72]. Akış cephesinin tespit edilmesi başta kaynak hatlarının oluşacağı yerlerin tespit edilmesi olmak üzere özellikle, çoklu kalıplama boşluğu (çoklu göz sayısı) bulunan kalıplarda yapılan yolluk tasarımına göre her kalıp boşluğunun dengeli (eş zamanlı dolum) dolup dolamayacağı konusunda da bilgi vermektedir. Ayrıca, akış cephesinin tespit edilebilir olması, çoklu malzeme kullanılarak yapılan kalıplamalarda ve su ve gaz

takviyeli enjeksiyonla kalıplama operasyonlarında ikinci malzemelerin akış alanı içinde nasıl bir dağılım göstereceğinin de belirlenebilmesine imkân vermektedir.

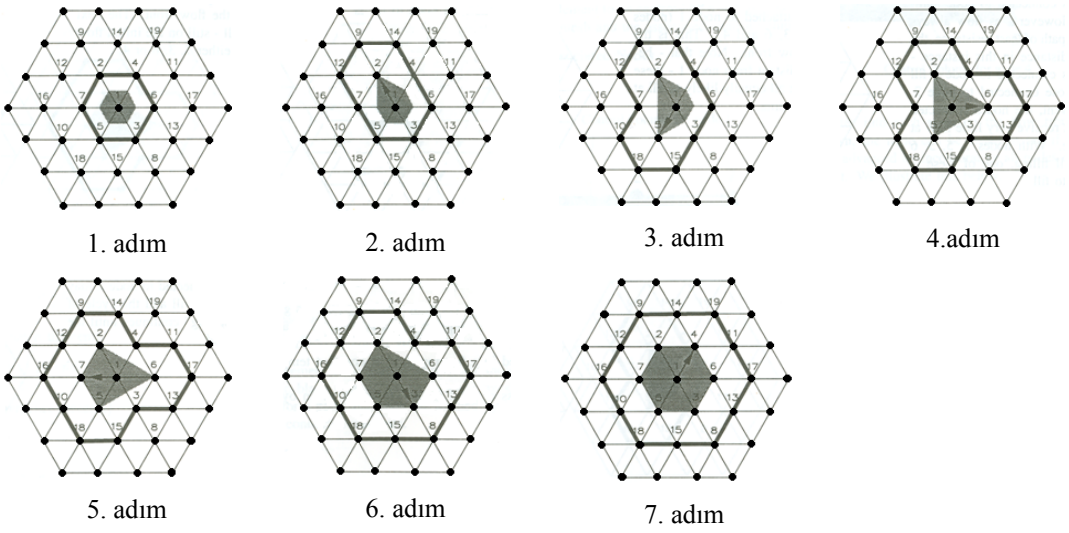
Akış cephesinin konum ve şekil analizinde kullanılan ilk yöntemlerden birisi, akışın dallandırılması da denilen yaklaşımdır. Fakat bu yöntem birçok araştırmacı tarafından kabul görmediğinden kullanımı ile ilgili çalışmalar çok az sayıda kalmıştır [27]. Akış cephesinin tespiti için, kontrol hacmi yöntemi (CVM), akış analiz ağları oluşturma (FAN), işaretleyici tanecikler yöntemi (MAC), sayısal çözüm ağı oluşturma (numerical grid generation) ve akışkan hacmi (VOF) gibi yöntemlerin geliştirilip kullanıldığı görülmektedir.

Kontrol hacmi yönteminde, akış alanı içerisindeki her düğüm noktasına bir kontrol hacmi atanmaktadır. Bu kontrol hacimleri Şekil 3.3'de görüldüğü gibi çokgen şeklindedir. Akış cephesinin ilerlemesi, kontrol hacmi atamasının yapılacağı düğüm noktası merkezde kalacak şekilde, komşu hücre merkezleri birleştirilerek elde edilmektedir [6].

Basınç dağılımı bulunduktan sonra, akış cephesinin yerini ve şeklini belirleyebilmek için, düğüm noktasındaki akı (debi) hesaplanabilmektedir. İçinde bulunulan zaman adımı bilindiğinden bu zaman adımında düğüm noktasının akışkan ile dolup dolmadığı test edilerek akış cephesinin ilerlemesi Şekil 3.4'de görüldüğü gibi, komşu düğüm noktaları da birlikte dikkate alınarak gerçekleştirilmektedir [6].

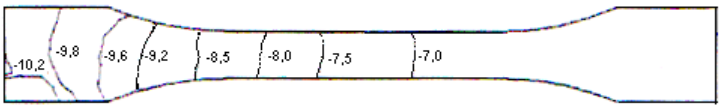


Şekil 3.3. Düğüm noktalarına atanan kontrol hacimleri [6]

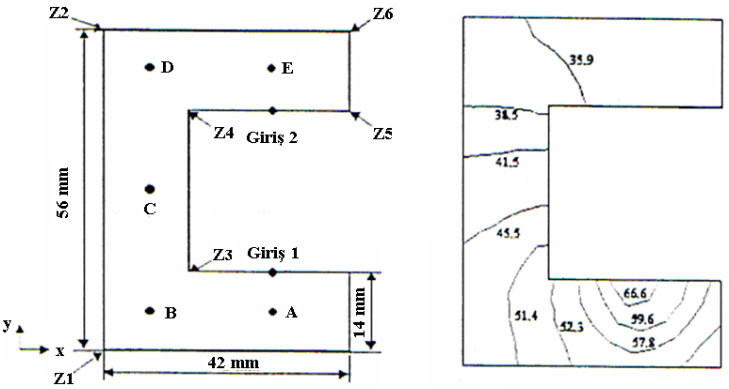


Şekil 3.4. Kontrol hacmi yönteminde akış cephesinin adım adım ilerlemesi [6]

Lee tarafından yapılan çalışmada, kalıp boşluğunun dolum aşaması ve dolum sonrası ütüleme aşamaları incelenmiştir. Farklı konumlarda giriş noktaları bulunan ve Şekil 3.5-3.6' da görülen "çekme çubuğu" ve "C" biçiminde kalıp boşlukları için analizler Hele-Shaw modelinin sonlu elemanlar yöntemiyle ayrıklaştırılmasından elde edilen doğrusal denklem takımlarının çözülmesiyle gerçekleştirilmiştir. Düzeltilmiş Cross viskozite modelinin kullanıldığı çalışmada, ütüleme aşaması için yapılan analizlerde, ergiyik plastik sıkıştırılabilir özellikte kabul edilmiştir. Sıkıştırılabilirlikten kaynaklanan yoğunluk değişimi, Tait eşitliği [5, 6] yardımıyla hesaplanmıştır. Basınç dağılımı ve ısıl artık (kalıcı) gerilmeler, sonlu elemanlar yöntemiyle analiz edilirken akış cephesinin tespitinde kontrol hacmi yöntemi tercih edilmiştir. Analizler sonucunda, ilk iki saniyeden sonra kalıp boşluğundaki basınç değerinin azaldığı ve en yüksek basıncın kalıp boşluğuna giriş noktalarında olduğu tespit edilmiştir [73].



Şekil 3.5. Çekme deney numunesi biçimindeki kalıp boşluğu [73]



Şekil 3.6. "C" biçimindeki kalıp boşluğu [73]

MAC yöntemi, Harlow ve Welch tarafından, akış cephesinin tespiti için geliştirilen diğer bir yöntemdir. Bu yöntem, başlangıçta, hidrolikte akışkanın sıkıştırılamaz kabul edildiği, zamana bağlı viskoz akış problemlerinde akış cephesinin tespiti için kullanılmıştır. Yöntem daha sonraları geliştirilerek, basit geometrili kalıp boşluklarında fıskiye tipi akış davranışının simülasyonu için kullanılmıştır [74]. MAC yönteminde sabit Eulerian çözüm ağı yapısı ve hesaplamalarda sonlu fark ayrıklaştırma yöntemlerinden elde edilen doğrusal denklem takımları kullanılmaktadır. Akış cephesi ise Lagrangian markör (işaretleyici) partiküller ile belirlenmektedir. Bu yöntemde, partiküllere ait veriler sürekli olarak kaydedilerek saklanmak zorundadır. Bu durum özellikle karmaşık geometrili kalıp boşluklarının dolum analizinde büyük kapasiteli disklere ve yüksek performanslı bilgisayarlara ihtiyacı artırmaktadır.

Thompson ve arkadaşları, MAC yöntemini sonlu farklar yöntemi ile ayrıklaştırarak akış cephesinin ilerlemesini belirlemeye çalışmışlardır [75]. Yapılan çalışmada, akış cephesi akışkan bulunan hücrelere akışkanın bulunduğu konumda akışkanın hızı ile aynı hızda hareket eden markör taneciklerin yayılması ile tespit edilmiştir.

Kietzman yaptığı çalışmada, izotermal olmayan viskoelastik etkiler ve fıskiye akış tipi dikkate alınarak yapılan modellemede MAC yöntemini tercih etmiştir [27]. İzotermal olmayan kristallenme modelleri de bu modele eklenerek, ergiyik plastiğin kalıp duvarlarına teması halinde meydana gelen katılaşma incelenmiştir. Özellikle

takviyeli plastiklerde, dolum sırasında takviye elemanlarının akış alanındaki dağılımı ve yönlenmelerinin tespit edilmesinde önemli olan fıskiye tipi akış davranışı ve kalıp boşluklarının dolumunun da çok sayıda araştırmacı tarafından incelendiği görülmektedir.

Bazı çalışmalarda kullanılan formülasyon, iki boyutlu kalıp boşluklarına uygulanmıştır. Şeklinin ve konumunun bilinmesi zor olan akış cephesi, iki adımlı Explicit yöntemle (predictor-corrector, belirleyici-düzeltici) tespit edilmiştir. Yöntem daha çok kaynak hatlarının belirlenmesinde kullanılmıştır.

Hieber ve Shen yaptıkları çalışmada, ince kesitli ve karmaşık geometrili kalıp boşluğunda ergiyik plastik akışının analizini gerçekleştirmişler ve akışı deneysel olarak da incelemişlerdir [76]. Dolum aşamasının incelendiği çalışmada; basınç terimi sonlu elemanlar yöntemi ile sıcaklık dağılımı sonlu farklar yöntemi ile ayrıklaştırılıp çözülmüştür. Power-Law viskozite modelinin kullanıldığı çalışmada, akış cephesinin yeri her bir hücrede akışkan olup olmadığının kontrol edilmesiyle tespit edilmiştir. İki boyutlu kalıp boşluğunun dolum aşamasında akışkan, sıkıştırılamaz kabul edilmiş ve yoğunluk sabit alınmıştır. Ayrıca, özgül ısı (c_p) ve ısı iletim katsayısı (k) gibi fiziksel özelliklerde sabit alınmıştır. Analiz sonuçlarından ve deneylerden elde edilen basınç değerleri, kısa basış yönteminden ve analizlerden elde edilen akış burunları kıyaslanmıştır. Ergiyik akış cephesinin tespiti için, sonlu eleman ve sonlu fark ayrıklaştırmalarından oluşan iki adımlı belirleyici ve düzeltici (predictor and corrector) prosedürünü kullanmışlardır.

Greene yaptığı çalışmada, fiber takviyeli Polipropilen (PP) malzemenin enjeksiyonla kalıplanması sırasındaki enjeksiyon basıncı değişimini sayısal olarak hesaplamış ve sonuçlarını deneysel verilerle kıyaslamıştır [77]. Sayısal çözümde akış, iki boyutlu izotermal olmayan serbest yüzeyli akış olarak değerlendirilmiş; sıcaklık, basınç ve fiber konsantrasyonuna bağlı olarak elde edilen yeni viskozite modeli bu akış davranışı içine adapte edilmiştir. Hareket denklemleri sonlu farklar yöntemiyle ayrıklaştırıldıktan sonra çözülmüştür. Akış cephesi ise MAC yöntemiyle

belirlenmiştir. Kıyaslamalar sonucunda, kalıplama süresince hem takviyeli hem de takviyesiz PP malzemelerin akışında gerçekleşen basınç düşmeleri ile ölçülen basınç düşmelerinin uyumlu olduğu görülmüştür. Özellikle yavaş dolumlarda takviyesiz malzeme için yapılan sayısal analiz ve deney sonuçları oldukça uyumludur. Dolum hızı arttıkça sapmaların gözlendiği rapor edilmiştir. Takviyeli malzemenin dolumunda bütün hızlarda teorik ve deneysel sonuçlar uyumludur. Hesaplamalar, Flow3D yazılımı ortamında yapılmıştır. Explicit yöntem kullanıldığı için çözüm süresi oldukça uzun olmuştur.

Walt ve arkadaşları Hele-Shaw modelini kullanıldıkları çalışmada, akış cephesinin konum ve şeklini, FAN yaklaşımıyla belirlemişlerdir [78]. Bu yöntem, Reynolds sayısı düşük akış problemleri için MAC yönteminin genişletilmiş bir türevidir. FAN yönteminde akış cephesinin yeri, MAC yöntemindeki markör partiküller yerine kontrol hacmi (hücre) sınırlarında akıların hesaplanmasıyla her bir hücredeki dolum oranları kontrol edilerek tespit edilmektedir. Bu kontrol hacmi yönteminin tek sınırlaması, akış cephesinin bir zaman adımında kontrol hacminin sadece bir katmanını geçmesini sağlamak için zaman adımlarının kontrol edilmesinin gerekliliğidir. Zaman adımlarının korelasyonu ve akış cephesi kontrol hacimleri, FAN yaklaşımına Broyer tarafından eklenmiştir [79]. Küresel koordinat sisteminin kullanılması ve çok boyutlu problemlerde indissel ifadenin sonlu fark yöntemi bağlamında kullanılması kalıp boşluğu dolum analizlerinde iki büyük probleme sebep olmaktadır. Birinci problem, üç boyutlu akış alanı geometrilerinin iki boyutlu düzlemlerde açılımlarının alınmasının zorluğudur. İkincisi ise, akış alanını oluşturan yüzeylerin birbirine temas eden kenarlarındaki düğüm noktalarında oldukça fazla miktarda ilave verilere ihtiyaç duyulmasıdır.

Kalıp tasarımının yapılabilmesi için özel olarak geliştirilmiş olan FAN yöntemi, Broyer ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada kalıp boşluğunun dolum analizi simülasyonu gerçekleştirilebilecek duruma getirilmiştir [80]. Yapılan analizlerde, Hele-Shaw modelindeki diferansiyel terimlerin ayrıklaştırılmaları için sonlu elemanlar yöntemi tercih edilmiştir. Akış cephesi davranışı FAN yöntemi ile tespit edilmiş ve çözüm ağındaki her bir dikdörtgen hücrede akış cephesi geometrisi, sabit

grid ve skaler ϕ parametresi ile tanımlanmıştır. Bu parametre hücredeki akışkan miktarı ile hücrenin toplam hacmi arasındaki oranı vermektedir.

Wang ve Hieber, üç boyutlu kalıp boşluğunun dolum analizini yaptıkları çalışmada, akış cephesinin konumunu ve şeklini Hele- Shaw modelini FAN yaklaşımıyla birleştirerek belirlemişlerdir. Hele-Shaw modelindeki Basınç için türetilen eşitlik sonlu elemanlar yöntemiyle, enerji denklemi ise sonlu farklar yöntemiyle ayrıklaştırılıp çözülmüştür [81].

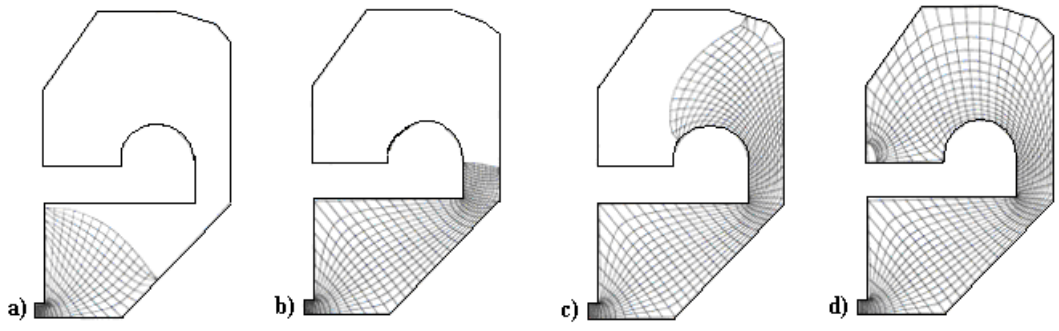
MAC yönteminin aksine akış cephesi tespitinde daha az veri depo etme ihtiyacı olan VOF yöntemi Hirt ve Nichols tarafından geliştirilmiştir [79]. Bu yöntem de FAN yaklaşımıyla aynı mantıksal temele dayanmaktadır. Her bir kontrol hacmindeki konsantrasyon durumunu tanımlamak için tek bir değişken kullanılmaktadır. Bu değişken için 1 ve 0 değerlerini alan bir fraksiyonel hacim fonksiyonu tanımlanmaktadır. Foksiyonun değeri 1 ise hücre dolu, 0 ise hücre boş anlamına gelmektedir. Kontrol hacmi içinde fonksiyonun ortalama değeri akışkanın hücre içindeki durumunu göstermektedir. Fonksiyonun değerinin 1 ile 0 arasında olması, hücrede akış cephesinin olduğu anlamına gelmektedir. VOF yöntemi, MAC yöntemi ile benzer sonuçları vermesine karşılık, MAC yönteminde bir hücrede çok fazla sayıda işaretleyici tanecik yerine her hücrede sadece bir değişken olduğundan dolayı daha az veri depolanmasına ihtiyaç duyulmaktadır [27].

VOF yöntemindeki fraksiyonel hacim fonksiyonu için taşınım denklemi, genellikle iki farklı yaklaşımla çözülmektedir: geometrik ve cebirsel olarak. Geometrik yaklaşımda temel akış denklemleri sadece dolu alanlar içinde çözülmektedir. Akışa ait hız ve basınç gibi büyüklükler ve akış cephesindeki sınır şartlarını belirlemek için her kısmi dolu hücrede akış cephesi yeniden yapılandırılmaktadır. Cebirsel yaklaşımda, boş ve dolu alanlar dahil olmak üzere hız dağılımı kalıp boşluğunun tamamında hesaplanmaktadır. Hareketli akış cephesi, fraksiyonel hacim fonksiyonu için hiperbolik taşınım denkleminin doğrudan çözümüyle belirlenmektedir.

Bir çok araştırmacı, orijinal VOF yönteminin geliştirilmesi için çalışmalar yapmıştır [27, 79, 82-86]. Rider hem akış alanında hem de zamana bağlı ikinci dereceden yeniden yapılandırma (reconstruction) problemini yapısal olmayan çözüm ağları (unstructured mesh) için türetmiştir [82]. Gao, bu yöntemi döküm sırasında kalıp boşluğunun dolum simülasyonu için sonlu elemanlar yöntemi ile birleştirmiştir [83].

Narazaki ve Mizukami, MOLDIA-F adlı bir dolum analiz yazılımı geliştirmişlerdir. Geliştirdikleri yazılımda, Hele-Shaw modeli sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak çözülmektedir [87]. Yazılımın veri tabanında dört sabit malzeme modeli bulunmaktadır. Akış cephesi VOF yöntemi ile tespit edilmektedir.

Subbiah ve arkadaşları [88] ince kesitli ve karmaşık geometrili kalıp boşluğunun dolum analizini Hele-Shaw modelini kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Sayısal çözümleme, sonlu farklar ve sayısal çözüm ağı (grid) oluşturma yöntemlerini birleştirerek geliştirdikleri TGMOLD adlı yazılım ortamında yapılmıştır. Carreau viskozite modelinin kullanıldığı çalışmada, enerji denklemi üç boyutlu çözülerek, katılaşan katman tespiti de yapılmıştır. Akış cephesinin ilerlemesi, Şekil 3.7'de görüldüğü gibi her bir zaman adımında yeni sayısal çözüm ağı oluşturularak elde edilmiştir.



Şekil 3.7. Sayısal çözüm ağı oluşturarak akış cephesinin ilerlemesi [88]

Yapılan bu çalışmada, enjeksiyonla kalıplama sırasındaki üç boyutlu dolum simülasyonu için Implicit sonlu hacimler yöntemi tercih edilmiştir. Tercih edilen yönteme göre oluşturulan model; sıkıştırılamaz, yüksek viskoziteli ve hareketli akış

cephesine sahip Newtonian akışkanların üç boyutlu izotermal akışını dikkate almaktadır. Navier-Stokes eşitliklerinin ayrıklaştırılması ve çözümü için sonlu hacimler yöntemi ve SIMPLE ayrık çözücü algoritması birlikte kullanılmıştır. Bunlara ilave olarak, Eulerian sistemde akış cephesinin tespit edilebilmesi için "BCHRD-bounded compresive high resolution differencing" yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem, bilgisayarda çözüm süresi ve bilgileri hafızada depo etme bakımından oldukça verimli bir yöntemdir. İki ve üç boyutlu birkaç örnek uygulama, yaklaşımın doğrulanması için gösterilmiştir. Bu yöntemle enjeksiyonla kalıplama sırasındaki üç boyutlu akış davranışının, Hele-Shaw modeline nazaran daha doğru olarak elde edildiği görülmektedir [88].

Akış cephesinin tespit edildiği çalışmalarda diferansiyel denklemlerin ayrıklaştırılmasında sonlu fark ve sonlu eleman yöntemleri yaygın kullanıldığı görülmektedir. Sonlu fark yöntemleri, en etkili ve en basit sayısal yöntemlerden biri olmasına rağmen, uygulama alanı sadece düzenli akış alanlarıyla sınırlıdır. Bu sınırlamanın üstesinden gelmek için sonlu farklar yöntemleri genellikle sınırlara uyumlu koordinat sistemi (boundary fitted coordinate system) ile birleştirilmektedir. Gelişi güzel sınırlara sahip fiziksel alanlarda kullanılabilme esnekliği, sonlu elemanlar yönteminin polimer işlemeciliği alanına da adapte edilmesini sağlamıştır. Bununla birlikte bu yöntemde ayrıklaştırma sırasında büyük yapılı matrisler oluştuğundan çözümde yüksek performanslı bilgisayarlara ihtiyaç duyulmaktadır. Son yıllarda SIMPLE algoritması gibi basınç düzeltme prosedürlerine dayalı sonlu hacim yöntemleri geliştirilmiş ve geleneksel hesaplamalı akışkanlar dinamiği uygulamalarında kullanılmaya başlanmıştır [89, 90]. Ayrıca, son yıllarda sınırlara uyumlu koordinat sistemi olmadan da karmaşık geometriler, yapısal olmayan çözüm ağlarında formüle edilebilir hale gelmiştir. Polimer işlemeciliğinde sonlu hacimler yöntemi sonlu elemanlar yönteminden daha kararlı sonuçlar vermekte ve daha az bilgisayar kapasitesine ihtiyaç duymaktadır.

Enjeksiyonla kalıplama sırasında kalıp boşluğundaki ergiyik akışının simülasyonunu yapabilen Moldflow, CadMould, Moldex, C-Flow, gibi sonlu eleman-sonlu fark yöntemleri ile yazılmış birçok ticari yazılım mevcuttur. C-Flow, Moldflow, Moldex

ve CadMould sadece enjeksiyonla kalıplama yöntemine özel ticari yazılımlar olduğundan, ütüleme ve soğutma aşamalarının simülasyonunu da yapabilmektedirler. Bu yazılımlarda, akış cephesinin ilerlemesi, katmanlı iki boyutlu akış yaklaşımı kullanarak yapmaktadır ve geometriyi sonlu eleman çözüm ağına bölmektedirler.

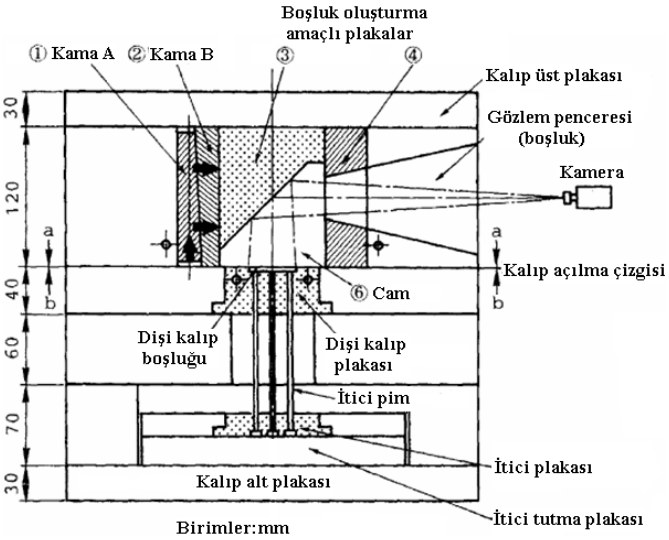
Ergiyik plastiğin kalıp boşluğundaki akışının başarılı olarak temsil edilebilmesi için uygun matematiksel modelin uygun ayrıklaştırma yöntemlerinden biri ile ayrıklaştırılarak çözülmesinin yanında malzemenin reolojik özelliklerinin de iyi temsil edilmesi gerekmektedir. Ergiyik plastiğin yoğunluk değişiminin tespit edilebilmesi için genellikle basınç-özgül hacim-sıcaklık (PVT) ilişkisi kullanılmaktadır. Yoğunluk değişimi en yaygın olarak Tait eşitliği ile hesaplanmaktadır. Tait eşitliği, sıcaklık ve basınca bağlı, deneysel olarak elde edilmiş sabit sayılardan oluşmaktadır. Bu eşitlikte, 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 yaygın olarak tercih edilmektedir [6, 14]. Bu yöntemin kullanılabilir doğru sonuç vermesinin yanında, her malzeme için ayrı ayrı deneysel verilere dayalı sabitlerin bulunma zorunluluğu, yöntemi sınırlı kılmaktadır. Sadece sıcaklık terimi ve genleşme katsayısına bağlı olarak bulunan Boussinesq yaklaşımı ile yoğunluğun hesaplanması, uygulamada kabul görmeye başlamıştır. Ayrıca, sadece referans yoğunluk ve genleşme katsayısına bağlı olması, bu yöntemin kullanılmasını teşvik eden en önemli etkendir. Diğer taraftan bu yöntemin olumsuz bir diğer tarafı ise, basıncın etkisinin ihmal edilmesi ve sadece sıcaklık değişiminin dikkate alınması olmaktadır [14].

Newtonian olmayan akışlarda en önemli akış parametresi viskozitedir [1, 5-9, 11, 12]. Literatürde yüzlerce viskozite denklemi bulunmasına karşılık, ağırlıklı olarak Power Law, Cross, Cross-WLF, Carreau gibi viskoziteyi kayma hızı, sıcaklık ve basıncın bir fonksiyonu olarak ele alan viskozite modelleri kullanılmaktadır. Hemen hemen tüm viskozite modellerinde, malzemeye ait deneysel verilerden elde edilen sabitler bulunmakla birlikte en az sabitin kullanıldığı model Power Law modeli

olduğundan, en çok tercih edilen viskozite modelidir. Enjeksiyonla kalıplama sırasında genelllikle yüksek kayma hızlarına ulaşıldığından, Power Law viskozite modeli analizlerde oldukça uygun sonuçların elde edilmesini sağlamaktadır. Hem yüksek hem de düşük kayma hızı değerlerinde kullanılabilen ama özellikle düşük kayma hızı değerlerinde oldukça iyi sonuçlar verdiğinden Cross, Cross-WLF, Carreau gibi viskozite modelleri de analiz uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır [5, 6, 14].

Matematiksel ve malzeme verilerine ait reolojik modellerin yanında, diferansiyel denklemlerin ayrıklaştırılması için seçilen sayısal yöntemin; ergiyik plastik akışını ve akış cephesinin ilerlemesini ne derece iyi temsil ettiği, ancak yapılacak deneysel çalışmalar ile test edilerek belirlenebilmektedir. Akış cephesinin ilerlemesi deneysel olarak en pratik olarak kısa basış yöntemi ile belirlenebilmektedir. Fakat bu yöntemde hangi zaman diliminde nasıl bir değişimin meydana geldiğini belirleyebilmek mümkün değildir. Bu nedenle, kalıp içindeki akışın görüntülenebilmesine izin veren düzenekler kurularak akış cephesi oluşumlarının incelendiği çalışmalara yönlenilmiştir. Bu yöntemlerde, genellikle basit geometrili kalıp boşluklarının bir tarafına cam yerleştirilmiş ve bu camlı kısımdan kalıp içindeki akış davranışı hızlı çekim yapabilen kameralar ile kaydedilmiştir.

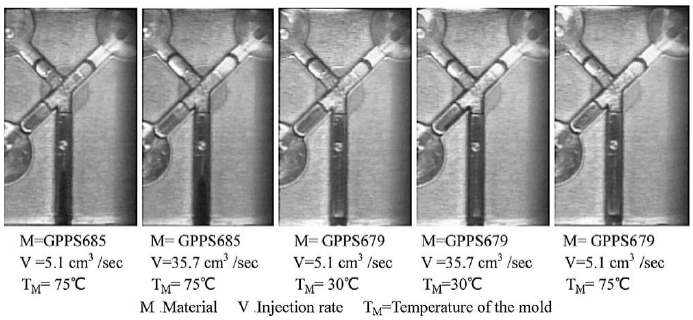
Yang ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, çift malzemeli enjeksiyon kalıplama ile üretilen plastik ürünlerde öz kısmında kalan malzeme ile yüzeyde kalan malzeme akışı çalışılmıştır. Özde kalan malzemenin akışı dinamik olarak görüntülenmiştir. Görüntüleme, Şekil 3.8'de şematik yapısı ve Resim 3.1'de gerçek görüntüsü görülen deney düzeneğinde yapılmıştır. Deneyler sonunda kalıp sıcaklığının ve öz kısmında bulunan malzeme özelliklerinin (viskozite) akış cephesi oluşumu üzerinde etkilerinin fazla olduğu tespit edilmiştir (Resim 3.2-Resim 3.3). Ayrıca, enjeksiyon hızının da akış cephesini doğrudan etkilediği tespit edilmiştir [91].



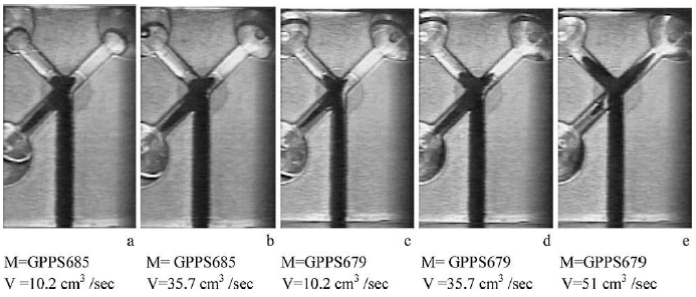
Şekil 3.8. Bir tarafına cam yerleştirilen deney düzeneğinin şematik görünümü [91]



Resim 3.1. Deney düzeneğinin resmi [91]

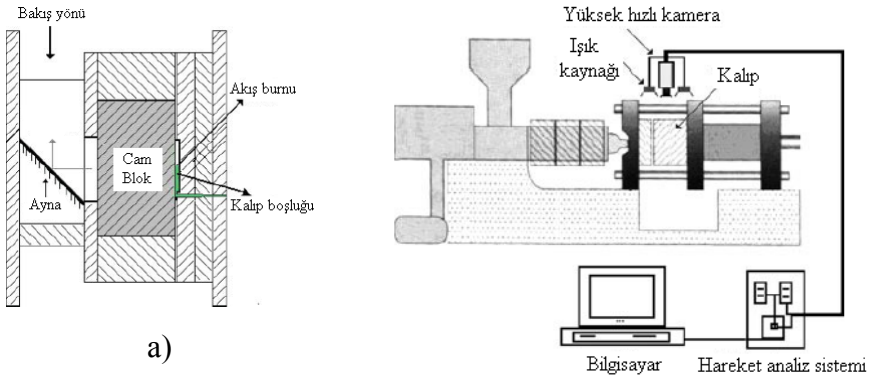


Resim 3.2. Kabuk malzemenin farklı işleme şartlarında davranışı [91]

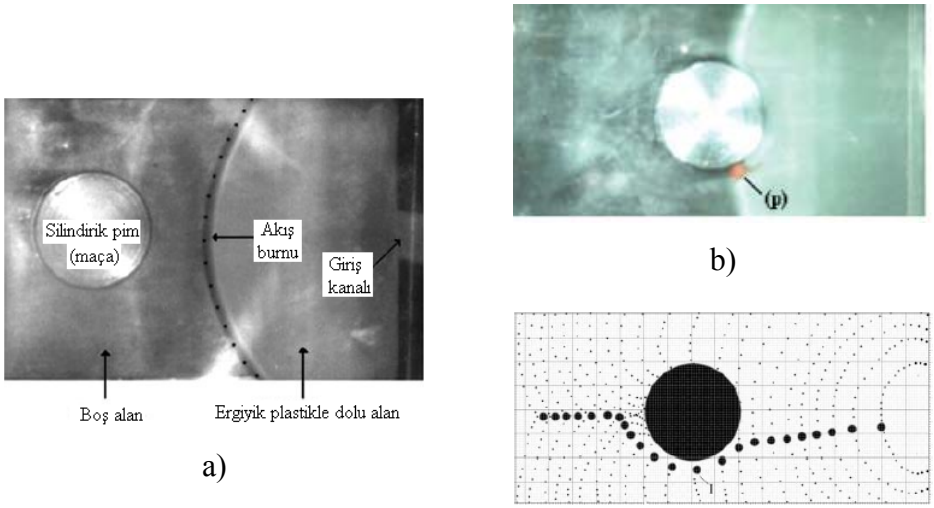


Resim 3.3. Değişik akış hızlarında özdeki malzemenin akışı [91]

Fathi ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, akış cephesi kinematiği deneysel olarak belirlenmiştir [92]. Deneysel çalışma, akış cephesi davranışının görüntülenmesi, kaydedilen görüntülerin işlenmesi ve akış cephesi kinematiğinin hesaplanması adımlarından oluşmaktadır. Ergiyik plastiğin akışı, bir tarafına cam yerleştirilmiş olan dikdörtgen kesitli kalıp boşluğu için görüntülenmiştir (Şekil 3.9). Kalıp boşluğuna bir adet silindirik pim (maça) yerleştirilerek dolum aşamasında bu pimin akış cephesine etkileri de incelenmiştir (Resim 3.4). Anlık debi değişimi, akış cephesi alanının değişimi ve ortalama akış cephesi hızı zamana bağlı olarak ölçülmüştür. Akış cephesinin hareketini belirleme çalışmaları için bir partikül yolu hız ölçer (PTV) ile gerçekleştirilmiştir. Böylece, zamana bağlı olarak akış cephesindeki partiküllerin hız bileşenleri bulunabilmiştir.

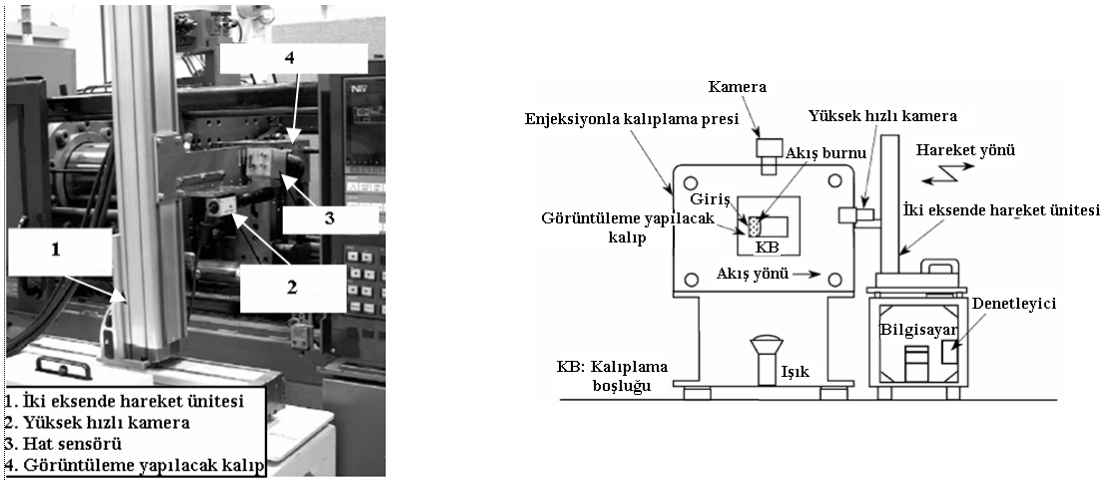


Şekil 3.9. Kurulan görüntüleme düzeneği [92]



Resim 3.4. Deneylerden elde edilen görüntüler [92]

Yokoi ve arkadaşları, akış cephesinin konumunu dinamik olarak ölçen ve takip eden kamera sistemi kurmuşlardır. Çalışmada, akış cephesi alanı da elde edilmiştir. İki eksende hareket edebilen görüntüleme sistemi, akış cephesi davranışını akış cephesi hızı 0,35 m/s hızına olana kadar kayıt edebilmektedir (Şekil 3.10). Akış izlerinin yanında "silver streaks" larda ilk kez bu çalışma ile tespit edilmiştir [93].

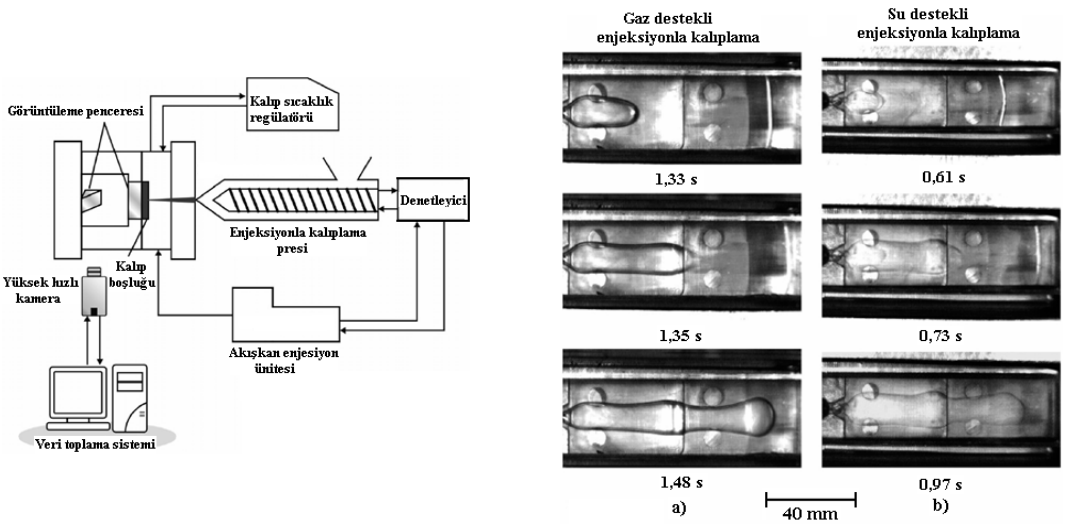


Şekil 3.10. Akış cephesini kaydeden dinamik hareketli düzenek [93]

Han ve arkadaşları, bir tarafı cam olan ve üzerinde adımları 50 ve 100 μm olan "V" biçimli kanallar bulunan kalıp boşluğundaki dolumu yüksek hızlı kamera ile başarılı bir şekilde görüntülemişlerdir [94]. Görüntüleme için cam plakanın karşısına açılı olarak yerleştirilmiş ayna kullanmışlardır. 100 μm adımlı "V" kanallarının bulunduğu kalıp boşluğu, 50 cm^3/s enjeksiyon hızında, çok kısa bir sürede tamamen dolmasına rağmen, aynı hızda adımı 50 μm olan kalıp boşluğunda "V" kanalların dolum oranı azalmıştır. Kalıp sıcaklığı ve kalıp boşluklarının kalınlığının da dikkate alındığı çalışmada, adım artışının dolum hızı ve oranını artırdığı sonucuna varılmıştır.

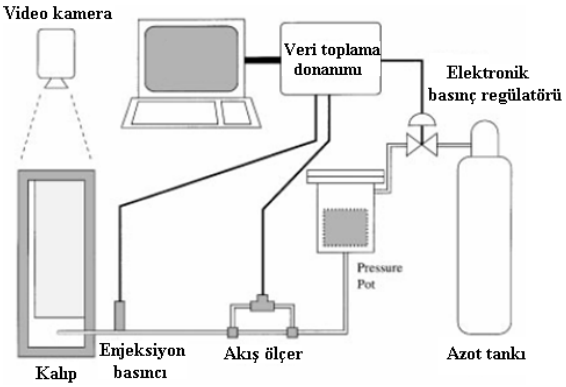
Liu ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, akışkan destekli enjeksiyonla kalıplamada dolum aşaması dinamik olarak görüntülenmiştir. Deneylerde gaz ve su enjekte edebilen 80 tonluk enjeksiyon presi kullanılmıştır. Plastik malzeme olarak yarı kristalin yapıya sahip PP kullanılmıştır. Kalıplama boşluğu dikdörtgen biçimli olan ve farklı kalınlıkta kesitler içeren özel üretilmiş kalıpla (Şekil 3.11) dolum aşaması görüntülenebilir hale getirilmiştir [95].

Düz dikdörtgen, iki farklı kalınlığa sahip dikdörtgen, üzerinde simetrik iki dikdörtgen feder bulunan dikdörtgen ve üzerinde balıksırtı feder bulunan dikdörtgen biçimli kalıp boşluklarının dolumu su ve gaz destekli olarak gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneyler kamera ile kayıt edilmiştir. Elde edilen görüntüler, su ve gaz destekli enjeksiyon sonuçlarının kıyaslanmasında kullanılmıştır. Su destekli akış deneylerinde polimer ve su arasındaki ara yüzeyin daha düzgün olduğu dolayısı ile daha düzgün boşlukların elde edildiği görüntülenmiştir [95].



Şekil 3.11. Sıvı ve gaz destekli akış görüntüleme düzeneği ve sonuçlar [95]

Bickerton ve arkadaşları, önceden fiber döşenmiş kalıp boşluğuna reçine transferi yapılarak kompozit malzeme üretimi sırasında oluşan akış cephesi davranışını görüntülemişlerdir. Çalışmada, belirli et kalınlığına sahip dikdörtgen kutu biçimli üç boyutlu kalıp boşluğu kullanılmıştır (Şekil 3.12). Kalıplar ve akışkan oda sıcaklığında tutulmuştur. Deneysel sonuçlar, yapılan sayısal analiz sonuçları ile kıyaslanmıştır [96].



Şekil 3.12. Deneysel görüntüleme düzeneğinin şematik resmi [96]

Kaynak araştırmalarının genel bir değerlendirmesi yapıldığında, plastik ürünlerin üretiminde avantajları nedeni ile en fazla kullanılan enjeksiyonla kalıplama yöntemini içeren ve özellikle ergiyik plastiğin akışı ile ilgili oldukça fazla çalışma

yapıldığı görülmüştür. Çalışmaların daha çok akış davranışının simülasyonu, malzeme özelliklerinin akışa etkileri üzerine olduğu görülmüştür. Simülasyon ve analiz çalışmaları analitik yöntemlerden ziyade sayısal olarak çözümlemeler ile elde edilmiştir. Sayısal analiz yöntemi olarak daha çok sonlu elemanlar yönteminin tercih edildiği görülmektedir. Karmaşık geometrili alanlara bile kolaylıkla uygulanabilme esnekliği (özellikle sayısal çözüm ağı oluşturmada), bu yöntemin en büyük avantajı olarak görülmektedir. Sonlu elemanlar yönteminden sonra en fazla sonlu kontrol hacmi yöntemi uygulama alanı bulmuştur. Süreklilik ve momentum denklemlerinin çözümlenmesi için sonlu elemanlar ve sonlu kontrol hacmi yöntemleri seçilmesine rağmen, enerji denkleminin çözümünde, sonlu farklar yöntemi yaygın olarak kullanılmıştır.

Enjeksiyonla kalıplama sırasında basınç ve hız dağılımı gibi verilerin yanı sıra ergiyik plastiğin akış davranışının tespiti için kalıp boşluğundaki hava ve ergiyik plastik arasındaki ara yüzeyin (akış cephesi) tespiti de literatürde araştırılmış ve birçok yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntemlerin esasını, elde edilen hız ve basınç dağılımlarını kullanarak ilgili zaman diliminde üzerinde, hesaplamanın yapıldığı hücrede akışkan olup olmadığının kontrolü ve eğer akışkan varsa, hangi oranda olduğunun tespit edilmesi oluşturmaktadır. Doluluk oranları için bazı fonksiyonlar belirlenmiş ve bu fonksiyonların aldıkları değerlere göre komşu hücrelerdeki doluluk oranlarını değerlendiren interpolasyonlar yapılarak, akış cephesinin şekli tespit edilmeye çalışılmıştır.

Deneysel yöntemler en büyük oranda malzeme özelliklerinin tespitinde kullanılmış olup diğer deneysel yöntemler daha çok kullanılan malzeme verilerinin, sayısal yöntemlerin ve kabulleri doğrulanması için yapılan görüntüleme üzerinde yoğunlaşmıştır. Deneysel görüntüleme genellikle, dikdörtgen kesitli kalıp boşluklarında kalıp boşluğunun bir tarafına cam plaka yerleştirilerek kurulan deney setlerinde akış davranışının hızlı kameralar aracılığıyla kayıt edilmesiyle gerçekleştirilmiştir.

Yapılan bu çalışmada; A.Y.PE, Y.Y.PE ve PS olmak üzere üç farklı malzemenin reolojik özellikleri deneysel olarak tespit edilmiş ve malzemelerin fiziksel ve reolojik özelliklerine ait matematiksel modeller oluşturulmuştur. Oluşturulan modeller, akış analizlerinin gerçekleştirildiği genel amaçlı bir akışkanlar dinamiği çözücüsü olan FLUENT yazılımından faydalanılarak üç boyutlu bir akış alanında dolum analizi için kullanılmıştır. Hareketli akış cephesi, VOF yöntemi kullanılarak tespit edilmiştir. Ayrıca, literatürde ilk kez üç boyutlu akış davranışının görüntülenebileceği deney kalıbının tasarımı ve üretimi gerçekleştirilerek, akış cephesinin üç boyutlu oluşumu görüntülenmiştir.

4. MATERYAL VE METOD

Ergiyik haldeki plastiğin kalıp boşluğunda sergilediği akış davranışına ait analizlerinin gerçeğe yakın olabilmesi, öncelikle malzemenin viskozite, yoğunluk ve ısı iletim katsayısı gibi fiziksel ve reolojik özelliklerinin matematiksel anlamda kabul edilebilir şekilde temsil edilmesine bağlıdır. Malzemelerin fiziksel ve reolojik özelliklerini tanımlayan modellerin temel akış denklemlerinde kullanılması, diferansiyel denklem takımlarını ergiyik plastiklerin akışını temsil edebilir hale getirecektir. Bu diferansiyel ifadelerin sayısal çözümü için oluşturulan çözüm ağı yapısı (mesh), düğüm noktalarında değerleri hesaplanan değişkenlerin hücre yüzeylerindeki değerlerinin elde edilmesi için kullanılan interpolasyon yöntemleri gibi çözüm araçları ise akış davranışının tespitinde diğer önemli unsurlardır.

Plastik malzemelerin fiziksel özelliklerine ait bilgilerin genellikle hammadde üreticileri tarafından sağlanıyor ya da sağlanmış olması gerekmesine rağmen, üretici firma kataloglarında bu özelliklerin sadece belirli sabit şartlar için verilmiş değerleri bulunmaktadır. Oysaki gerçek üretim şartlarında, akış alanı içerisindeki herhangi bir noktada, zamana bağlı olarak sürekli değişen sıcaklık, basınç ve kayma hızı; viskozite, yoğunluk ve ısı iletim katsayısı gibi malzeme özelliklerinin de sürekli olarak değişmesine sebep olmaktadır. Bu nedenle, ergiyik plastiğin fiziksel ve reolojik özelliklerin sabit alınması, analiz sonuçlarına olumsuz olarak yansıyacak ve bunun sonucunda da tasarımcının yanlış kararlar vermesine sebep olabilecektir.

Deneysel olarak elde edilen malzeme özelliklerine ait matematiksel modeller (viskozite, yoğunluk ve ısı iletim katsayısı modelleri) genellikle, regresyon analizi kullanılarak elde edilmektedirler. Elde edilen viskozite, yoğunluk ve ısı iletim katsayısı gibi fiziksel ve reolojik özellikleri veren modellerin, ergiyik plastiğin akış davranışını ne derece iyi temsil ettiği, en gerçekçi ve kabul edilebilir anlamda ancak deneysel yöntemlerle test edilebilir. Bu deneysel yöntemlerin başında gerçek zamanlı kalıp boşluğu görüntüleme düzeneklerinin kurulması ve kullanılması gelmektedir. Gerçek zamanlı görüntüleme düzenekleri ile kesin sonuçlar alınabilmesine karşılık, uygulanmaları oldukça güçtür. Kalıp boşluklarının gerçek zamanlı görüntülenmesi

ile ilgili çalışmalara literatürde rastlanmış olmakla birlikte bu çalışmaların sadece iki boyutlu gözlemleme ile sınırlı olduğu görülmüştür.

Bu bilgiler doğrultusunda, doktora çalışması kapsamında yapılan deneysel çalışmalar:

1. Plastik malzemelerin bilgisayar destekli analize temel teşkil eden özelliklerinin (reolojik ve termal özellikler) detaylı belirlenmesi,
2. Elde edilen fiziksel ve reolojik özelliklerin matematiksel modellerinin FLUENT yazılımında kullanılarak, üç boyutlu bir geometri için dolum analizlerinin elde edilmesi,
3. Ergiyik plastiğin kalıp boşluğundaki üç boyutlu gerçek akış davranışının gözlenmesi,

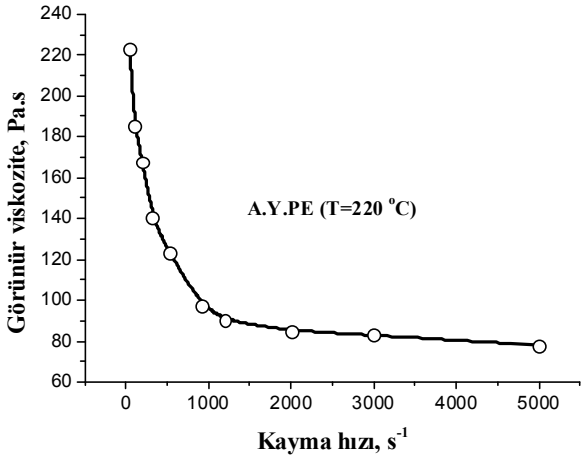
olmak üzere üç ana başlıkta toplanmıştır. Deneylerde, endüstride yaygın kullanım alanı bulan A.Y.PE (Alçak Yoğunluklu Polietilen), Y.Y.PE (Yüksek Yoğunluklu Polietilen) ve PS (Polistiren) plastik malzemeleri kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan A.Y.PE ve Y.Y.PE malzemeleri, yarı kristalin yapıya sahip olup sırasıyla Carmel Olefins firmasının ürettiği IPETHANE adlı ürün ve RASCO firmasının ürettiği ürünlerdir. PS malzemesi ise amorf yapıdadır ve BASF firmasının ürettiği V 185 kodlu üründür.

4.1. Plastik Malzemelerin Özelliklerinin Deneysel Olarak Elde Edilmesi

4.1.1. Ergiyik plastik viskozitesinin belirlenmesi

Reoloji, malzemenin uygulanan gerilme altında deformasyonunu inceleyen bilim dalıdır [11, 12]. Malzemelerin reolojik özelliklerinin en önemlisi, viskozitedir. Viskozite, malzemenin akmaya karşı gösterdiği direnci ifade etmektedir ve ergiyik plastiğin kalıp boşluğuna dolumunda en önemli rolü oynamaktadır.

Ergiyik plastiklerin viskozitesi, birinci derecede sıcaklıktan etkilenmektedir. Sıcaklığın artışı viskozitenin azalmasını sağlamaktadır. Enjeksiyon sırasındaki hız artışı da ergiyik plastiklerin viskozitesini azaltmaktadır. Yüksek enjeksiyon hızlarında ergiyik plastik daha fazla deforme olmakta ve viskozitesi azaldığı için daha kolay akmaktadır. Hız kaynaklı bu deformasyona "*kayma hızı*" denilmektedir. Kayma hızı, enjeksiyon hızı ile doğru orantılı olarak değişmektedir. Şekil 4.1'de verilen viskozite-kayma hızı grafiğinde, ergiyik plastikler için tipik bir kayma incelmesi davranışı görülmektedir. Bu grafikte, viskozite eğrisinin düzelmeye başladığı nokta en uygun enjeksiyon hızı değerini temsil etmektedir [5].

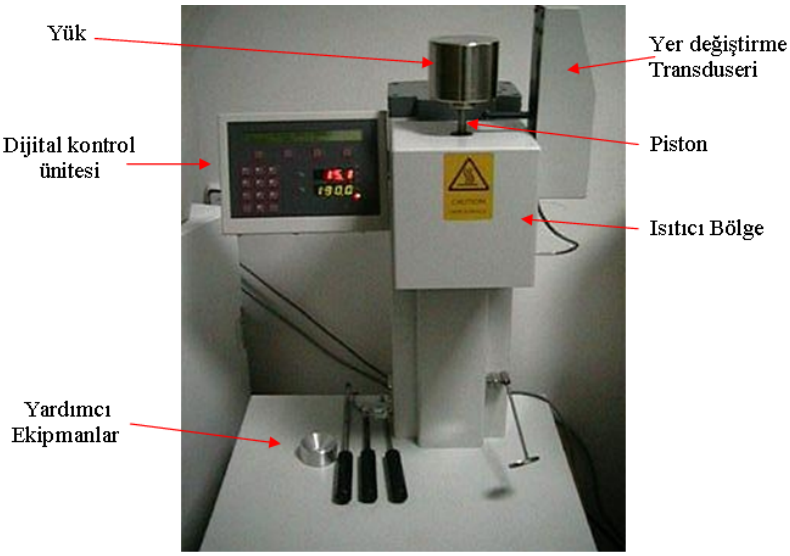


Şekil 4.1. Görünür viskozite-kayma hızı grafiğinden en uygun enjeksiyon hızının belirlenmesi [5]

Şekil 4.1'de görüldüğü üzere, ergiyik plastiğin viskozitesi başlangıçta uygulanan kayma hızı ile ani bir düşüş göstermektedir. Daha sonra eğim azalarak viskozitenin kayma hızı ile değişimi hemen hemen doğrusal bir yapıya dönüşmektedir. Bu noktadan sonra ergiyik plastik, Newtonian bir akışkan gibi davranmaya başlamaktadır. Viskozitenin düşük değerlerinde ergiyik plastiklerin şekillendirilmeleri daha kolaydır. Ayrıca, viskozitenin düşük olması, kalıp boşluğunun daha kolay dolacağı anlamına da gelmektedir.

Bu çalışmada, A.Y.PE, Y.Y.PE ve PS malzemelerinin viskoziteleri, Şekil 4.2'de görülen bilgisayar kontrollü Lloyd marka Ergiyik Akış İndeksi (EAİ) cihazı

kullanılarak belirlenmiştir. EAİ cihazı genel olarak ısıtıcı sistem, silindir, yer değiştirme transduseri, orifis, piston ve yüklerden oluşmaktadır (Resim 4.1). Çalışmada kullanılan EAİ cihazının ısıtıcı sistemi 0,1^{o}C hassasiyetindedir ve cihaz hem elle hem de bilgisayar ile kumanda edilebilir özelliktedir. Basınç için kullanılan yükler kalibrasyon sertifikasına sahiptir.

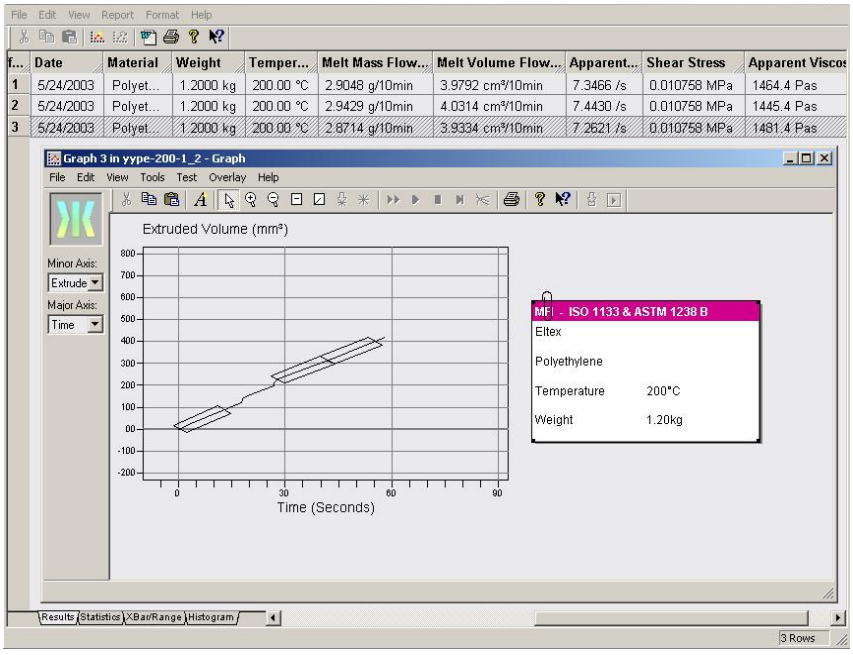


Resim 4.1. Lloyd marka EAİ cihazı

İçerisinde plastik malzemenin ergitildiği ve etrafı yalıtılmış 9,55 mm (± 0,0076 mm) çapında, 162 mm yüksekliğinde ve 200^{o}C'de 60-65 HRC sertliğini koruyabilecek özellikte silindirik haznesi olan EAİ cihazı, SAE 52100 malzemesinden üretilmiştir. Piston, silindire kaygan geçme toleransında geçmektedir. Pistonun üzerine yük konulan kısmında, pistondaki ısının yüke geçmesini önleyen bir yalıtım bileziği bulunmaktadır. Orifisin çapı 9,5 mm ve yüksekliği 8 mm olup tugsten karbür malzemesinden üretilmiştir. Orifis üzerinde bulunan ve ergimiş plastiğin içerisinden geçerek aktığı delik (nozul) silindirik kesitli olup 2,095 mm (± 0,0051 mm) çapındadır.

Viskozite değerlerinin belirlenmesi için granül haldeki plastik malzemeler (A.Y.PE, Y.Y.PE ve PS), testin yapılacağı sıcaklık değerine ayarlanmış olan silindir içerisine konulduktan sonra ASTM D 1238 (TS 1323) standardına göre altı (6) dakika ön

ısıtmaya tabi tutulmuşlardırlar. Ön ısıtmanın amacı, granül haldeki plastik malzemelerin homojen olarak ergimesini sağlamaktır. Bu süre zarfında silindir içerisindeki malzemelerin üzerinde piston ve pistonun üzerinde de yük bulunmaktadır. Ön ısıtma süresince ergiyik hale gelen plastiğin yükün etkisi ile akmasını önlemek için pistonun hareketi bir destek ile engellenmiştir. Bu sırada, ergiyik plastiğin akış hızını ve pistonun yer değiştirme miktarını tespit etmek üzere yer değiştirme transduseri, piston üzerindeki yüke mıknatıs yardımıyla temas etmektedir. Ön ısıtma süresinin tamamlanmasının ardından pistonun hareketini engelleyen destek bulunduğu konudan uzaklaştırılarak pistonun hareket etmesi ve ergiyik plastiğin nozuldan akması sağlanmaktadır. Pistonun hareket etmesi ile birlikte yer değiştirme transduserinin topladığı veriler, RS-232 bağlantısıyla bilgisayardaki Nexygen Davenport yazılımına (Şekil 4.2) aktarılarak viskozite, kayma gerilmesi, kayma hızı, ergiyik akış indeksi ve hacimsel debi değerlerine dönüştürülmektedir.



Şekil 4.2. Nexygen Davenport yazılımı çıktı ekranı.

Çalışma kapsamında, A.Y.PE, Y.Y.PE ve PS malzemelerinin viskoziteleri, Çizelge 4.1'de verilen şartlarda elde edilmiştir.

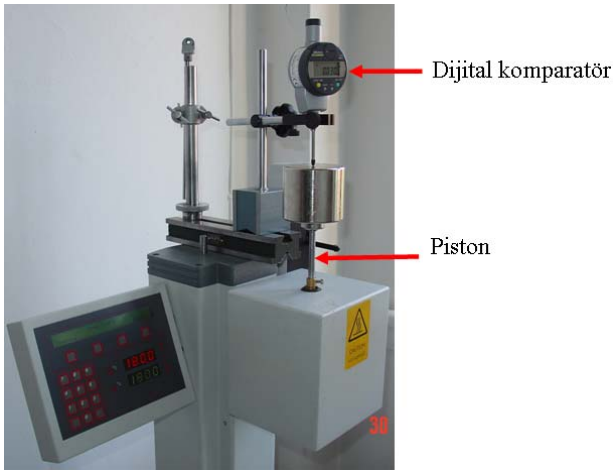
Çizelge 4.1. A.Y.PE, Y.Y.PE ve PS için viskozitelerin elde edildiği deney şartları

Malzeme	Sıcaklık, ^{o}C	Basınç, kPa					
A.Y.PE Y.Y.PE PS	180	165,6	298,2	524	689,5	987,36	1379,9
	200	165,6	298,2	524	689,5	987,36	1379,9
	220	165,6	298,2	524	689,5	987,36	1379,9
	240	165,6	298,2	524	689,5	987,36	1379,9
	260	165,6	298,2	524	689,5	987,36	1379,9
	280	165,6	298,2	524	689,5	987,36	1379,9

4.1.2. Ergiyik plastik yoğunluğunun belirlenmesi

Birim hacimdeki kütle miktarı olarak tanımlanan yoğunluk, dolum sırasında önemli rol oynamaktadır. Sıcaklığa bağlı olarak, ergiyik haldeki plastiğin hacmi genişlemekte ve yoğunluğu azalmaktadır. Bu durum başlangıçta iyi gibi (hacimsel genleşme nedeni ile daha az malzeme ile daha büyük hacimlerin doldurulabilmesi) gözükse de sonuçları itibarı ile bir takım önlemlerin alınması gerektirmektedir. Dolum sırasındaki hacimsel genleşme miktarı, plastikleşme süresince yapılan soğutma etkisi ile tekrar hacimsel küçülme olarak kendini gösterecek ve plastik ürünün istenilen boyutlardan küçük olmasına sebep olacaktır. Ergiyik plastikler sıkıştırılabilir özellikte olduklarından, meydana gelen hacimsel küçülmenin telafisi, ütüleme olarak adlandırılan safhada kalıp boşluğu içerisine yüksek basınç ile ilave ergiyik plastik enjekte edilerek yapılmaktadır. Sıkıştırılabilirlik sınırlı olduğu için, ütülemeye rağmen meydana gelebilecek küçülmelerin önüne, kalıp boşluğunun meydana gelebilecek hacimsel küçülme oranı kadar büyük yapılması ile geçilmektedir. Ayrıca, dolum sırasında soğumanın etkisi ile meydana gelen faz değişimleri, akış alanı içinde farklı yoğunluk değerlerine sahip katmanların olduğunu göstermektedir. Temel akış denklemleri çözülürken bu durumun dikkate alınması analiz sonuçlarını daha gerçekçi kılacaktır. Bu nedenle bu durum, ergiyik yoğunlunun sıcaklığa bağlı değişimini içeren yoğunluk terimi ile sağlanabilecektir. Bunun için, ergiyik plastiğin sıcaklığa bağlı yoğunluk değişimi deneysel olarak tespit edilmiştir.

Ergiyik plastiğin yoğunluğu, kütlesi belli olan malzemenin uygulanan sıcaklığın etkisiyle hacmindeki değişim miktarının tespit edilmesi prensibi temel alınarak belirlenmiştir. EAİ cihazı, üzerine yardımcı donanımlar (dijital komparatör, pistonun konumlarını işaretleme için bilezikler, akışı engelleyen silindirik parça) ilave edilerek ergiyik plastiğin yoğunluğu, temel alınan prensibe göre ölçülebilecek şekilde düzenlenmiştir (Resim 4.2).



Resim 4.2. EAİ cihazının ergiyik yoğunluğu ölçümü için düzenlenmesi

Deneylerde kullanılacak granül haldeki plastik malzemeler, öncelikle, 70^{o}C sıcaklığındaki fırında iki (2) saat bekletilmiş ve üzerlerindeki nem uzaklaştırılmıştır. Nemden arınan granül plastikler daha sonra hassas terazi (± 0,001 g) kullanılarak belirli kütle miktarlarında (~ 4-6 g) tartılmış ve deney numuneleri Resim 4.3'de görüldüğü gibi ayrı ayrı paketlenmiştir. Hazırlanan numuneler, EAİ cihazının 170^{o}C sıcaklığındaki silindiri içerisine boşaltılarak granüllerin tamamen ergiyik hale gelmesi için altı (ASTM D 1238 standardı) dakika ön ısıtmaya tabi tutulmuşlardır. Ergiyik haldeki plastiğin EAİ cihazı silindirinin içinden akmasını engellemek için, silindirin alt ucunda yer alan ve üzerinde delik bulunan standart orifisin yerine, üzerinde delik bulunmayan ve orijinal orifis ile aynı ölçülere sahip silindirik bir parça imal edilmiştir. Akışı önlemek üzere İmal edilen bu silindirik parça, granül malzemeler EAİ silindiri içerisine konulmadan önce EAİ cihazına yerleştirilmiştir. Ergiyik hale gelen malzemenin üzerine piston ve pistonun üzerine de 2,16 kg'lık yük

yerleştirilmiştir. Yükün üst noktasına, EAİ cihazının silindiri ile eş merkezli ve aynı doğrultuda temas edecek şekilde Mitutoyo markalı ve ±0,001 mm hassasiyetli dijital bir komparatör yerleştirilmiştir (Resim 4.2). Bu dijital komparatör, ısıl genleşme nedeni ile pistonun doğrusal yer değiştirme miktarını tespit etmek için kullanılmıştır. Elde edilen yer değiştirme miktarlarından, hacimsel genleşmelerin hesaplanmasında faydalanılmıştır.



Resim 4.3. Granül haldeki plastik ve deney sonunda silindirden çıkan çubuk plastik deney numunesi

Deneylere başlamadan önce, ön ısıtma süresince ergiyik plastik homojenleşmeye devam ederken meydana gelen hacimsel genleşme dijital komparatörün göstergesinden takip edilmiştir. Hacimsel genleşmenin durduğu an, piston üzerine daha önceden yerleştirilmiş olan bilezik yardımıyla pistonun EAİ silindirinin üst yüzeyinin hizasına gelen konumu işaretlenmiştir. Bu işaretlenen konum yardımıyla, silindir içerisindeki ergiyik malzemenin 170^{o}C'deki hacmi hesaplanabilmiştir.

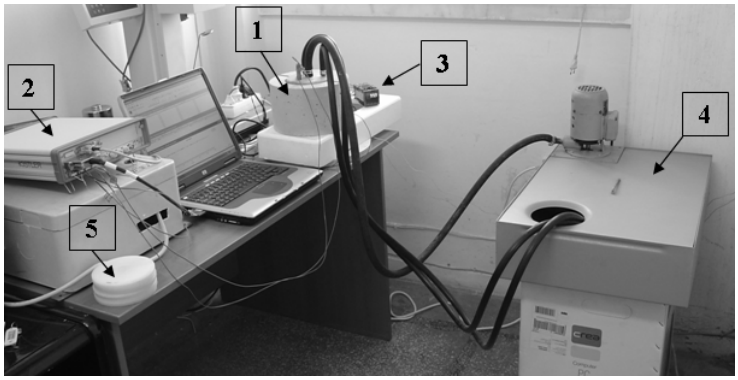
EAİ silindirinin içerisinde hiç malzeme yok iken, piston silindir içerisine yerleştirildiğinde pistonun silindirin üst yüzeyi hizasına gelen konumu da sabit bir işaretleme bileziği ile daha önceden işaretlenmiş olduğundan 170^{o}C'deki hacim kolayca hesaplanabilmiştir. Bilinen hacim ve bilinen kütle değerleri kullanılarak ergiyik plastiğin 170^{o}C'deki yoğunluğu tespit edilmiştir. Referans sıcaklıktaki (170^{o}C) hacim ve deney yapılan sıcaklıkta meydana gelen hacimsel değişimler kullanılarak ergiyik plastiğin istenilen sıcaklıktaki yoğunluğu hesaplanarak

bulunmuştur. Bu işlem adımlar, çalışmada kullanılan tüm malzemeler için gerçekleştirilmiştir.

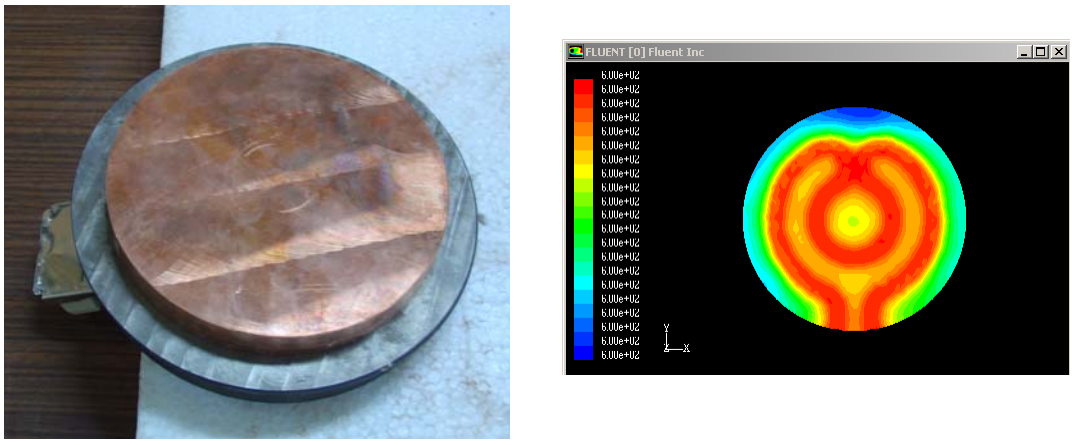
4.1.3. Ergiyik plastik ısı iletim katsayısının belirlenmesi

Kalıp boşluğunun dolumu sırasında sürekli olarak kalıp duvarlarına temas eden ergiyik plastik soğumakta ve kalıp duvarlarına yapışarak katı hale gelmektedir. Bu durum akış içerisinde farklı fazların oluşmasına sebep olmaktadır. Oluşan bu farklı fazlar, soğutulan kalıp duvarları ile sıcak ergiyik plastik arasında ısı transferini karmaşık hale getirmektedir. Kalıp duvarlarına yapışarak katılaşan faz hem olumlu hem de olumsuz özellikleri beraberinde getirmektedir. Olumlu özellik, katılaşan tabakanın ergiyik plastik ile kalıp duvarı arasında yalıtım vazifesi görerek ergiyik plastiğin sıcaklığını kaybetmesini önlemesidir. Olumsuz özelliği ise, katışan tabakanın özellikle ince kesitli plastik ürünlerin kalıplanması sırasında akışı engelleyecek kadar kalınlaşarak eksik ürün elde edilmesine sebep olmasıdır. Bunun için farklı fazların ısı iletim katsayılarının bilinmesi, analizlerden daha doğru sonuç alınmasını sağlayacaktır.

Bu çalışmada, A.Y.PE, Y.Y.PE ve PS malzemelerinin sıcaklığa bağlı ısı iletim katsayıları deneysel olarak tespit edilmiştir. Deneyler, Resim 4.4'de görülen ve ASTM C 177 (Guarded Hot Plate) standardı [97] referans alınarak imal edilen sıcaklığa bağlı ısı iletim katsayısı ölçme cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.6'dan da görüldüğü üzere sistem ölçüm merkezi ve yalıtım duvarı (1), veri toplama sistemi (2), PID kontrollü ısıtıcı sistem (3), soğutucu sistem (4), silindirik deney numuneleri (5) ve yalıtım duvarları içerisine yerleştirilmiş olan ve ısıtıcı sistemden oluşmaktadır. Isıtıcı sistem 1000 W gücünde olup Şekil 4.3-a'da görülmektedir. Isıtıcı sistem içindeki rezistanslar sistemin yüzeyinde homojen sıcaklık sağlayacak şekildedir (Şekil 4.3-b).



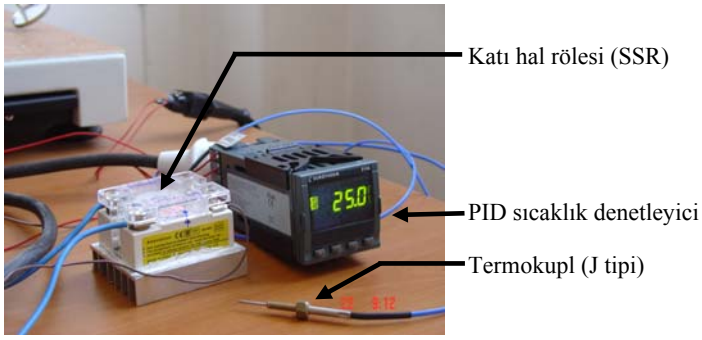
Resim 4.4. Sıcaklığa bağlı ısı iletim katsayısı ölçme düzeneği



a) b)

Şekil 4.3. Isıtıcı sistem
a) Sistemin görünümü, b) Yüzeydeki homojen sıcaklık dağılımı

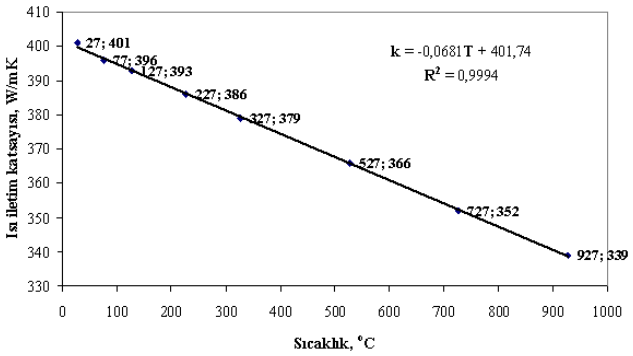
Kurulan düzenekte, istenilen sıcaklık değeri, Resim 4.5'de görülen Eurotherm 2216 marka PID (Proportional Integral Derivative) sıcaklık denetleyicisi kullanılarak sağlanmıştır. PID sıcaklık denetleyicisi ayarlanan sıcaklık değerinin ± 0,1^{o}C hassasiyetle sabit kalmasını sağlayabilmektedir. PID cihazına bağlanan bir adet J tipi termokupl, ısıtıcı sistem üzerine yerleştirilmiş olan silindirik bakır plakanın plastik numune ile temas edecek yüzeyinin 2 mm altına yerleştirilmiştir. Bakır plaka-ısıtıcı sistem ara yüzeyi ayarlanan sıcaklık değerine ulaştığında PID sistem buradaki sıcaklığı sisteme bağlı olan katı hal rolesi (SSR, solid state role) yardımıyla sabit sıcaklık değerinde tutmaktadır.



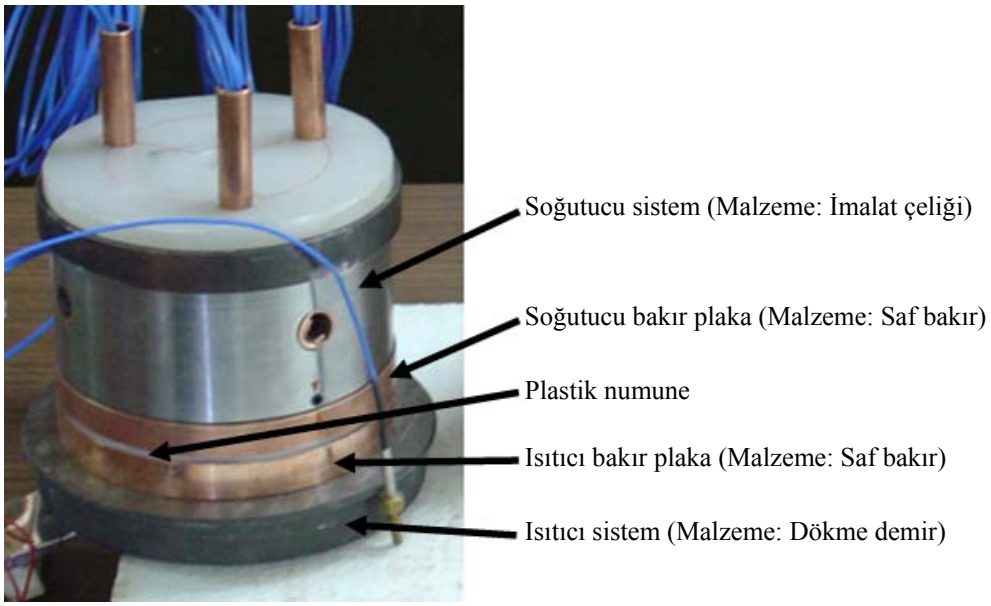
Resim 4.5. PID sıcaklık denetleyicisi

İmal edilen sistemde ısı akısı doğrudan ayarlanamamaktadır. Ayarlanan sıcaklık değerinde gerçekleşen ısı akısı, ısıtıcı sistem üzerindeki silindirik bakır plakanın iki alın yüzeyinden okunan sıcaklık değerleri kullanılarak elde edilmektedir. Bakır plakanın alt ve üst yüzeylerinden elde edilen sıcaklık değerleri ile bulunan sıcaklık gradyanı, kullanılan bakır plakanın sıcaklığa bağlı ısı iletim katsayısının değişimine ait fonksiyonun bilinmesi ve bakır plakanın boyutları (kalınlık, yüzey alanı) Fourier ısı iletim denkleminde yerlerine yazılarak ayarlanan sıcaklıktaki ısı akısı hesaplanarak bulunmaktadır. Bakır plakanın sıcaklığa bağlı ısı iletim katsayısı Şekil 4.4'de verilmiştir. Enerjinin korunumu prensibine göre, elde edilen ısı akısı tüm sistem için aynı alınarak, numunelerin ilgili sıcaklıktaki ısı iletim katsayılarının bulunmasında kullanılmıştır. Numunelerin ısı iletim katsayıları da Fourier ısı iletim denkleminden elde edilmiştir.

Sistemde ısı akısının tek yönde olmasını sağlamak ve problemin bir boyutlu olarak değerlendirilebilmesi için, numunelerin ısıtılan yüzeylerinin karşısına soğutma sistemi yerleştirilmiştir. Sistemin genel yapısı Resim 4.6'da görülmektedir. Deneylerdeki ölçümler, sistem kararlı hale geldikten sonra yapılmıştır. Sistemin kararlı hale gelmiş olduğuna, soğutma sistemine giren ve çıkan su sıcaklıklarının aynı olmasına, veri toplama sisteminden numunelerin ısıtılan ve soğutulan yüzeylerine ait sıcaklık değerlerinin değişmemesine bakılarak karar verilmiştir.



Şekil 4.4. Bakır parçanın ısı iletim katsayısının sıcaklıkla değişimi

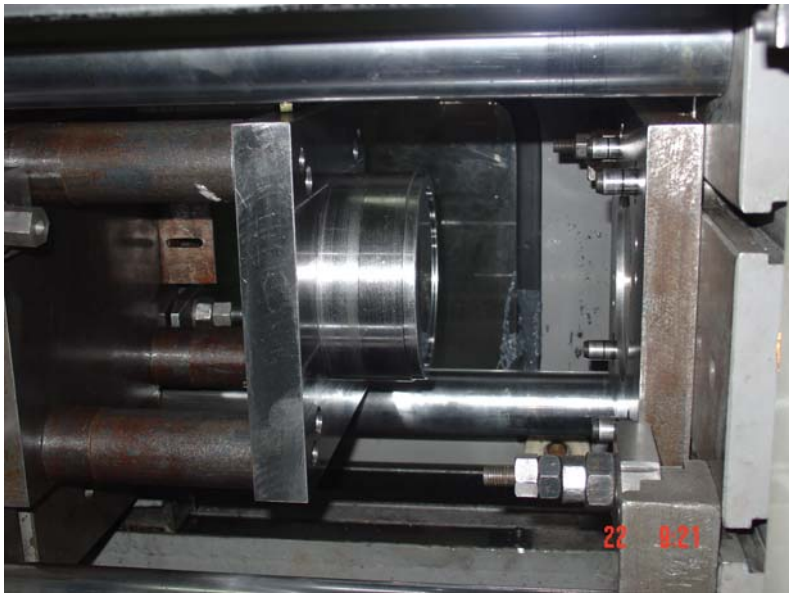


Resim 4.6. Isı iletim katsayısı ölçüm düzeneğinin içyapısı

Deneylerde kullanılan plastik numuneler Ø 124 mm dairesel kesitlidir ve kalınlıkları 5 mm'dir (Resim 4.7). Plastik numuneler, imal edilen plastik enjeksiyon kalıbında (Resim 4.8) ve enjeksiyonla kalıplama yöntemi ile üretilmişlerdir. Enjeksiyon kalıbı imalat çeliğinden (Ç 1050) yapılmıştır. Isı iletim katsayısı ölçümü sırasında radyal yönde ısı akısı kayıplarının en aza indirilmesi için numunelerin çap ve kalınlık değerleri arasındaki oran yüksek tutulmuştur. Böylece dik yüzey alanı ve yanal alan arasındaki oran 6,2 olup deneylerden kaynaklanabilecek hata oranı azaltılmıştır.



Resim 4.7. Isı iletim katsayısı ölçümünde kullanılan plastik numune



Resim 4.8. Plastik numunelerin üretildiği plastik enjeksiyon kalıbı

Bir yüzeyi ısıtıcı bakır levhaya temas eden plastik numune, düşük sıcaklıklarda bakır plaka yüzeylerine %100 temas etmemiş olabileceği (bakır plaka ve plastik numunelerin yüzey pürüzlülük değerlerinden kaynaklı) için düşük sıcaklılardaki değerler ısıl direnç değerini de içermektedir. Yüksek sıcaklıklar için yapılan deneylerde plastik ergiyik hale geçtiği için ısıtıcı bakır plaka ile numune arasında %100 temas sağlanmıştır. Plastik numunenin bir tarafında ısıtıcı sistem diğer tarafında ise ısı akısının tek yönlü olmasını sağlamak için soğutma sistemi bulunmaktadır. Bütün bu sistem elemanları ısı iletim katsayısı düşük olan ve

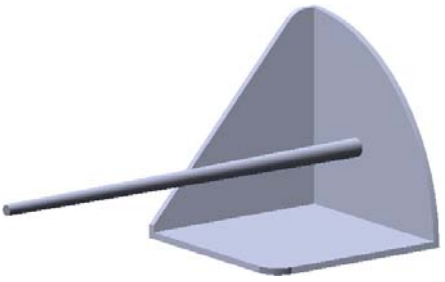
özellikleri Çizelge 4.2'de verilen Teflon malzemeden imal edilen yalıtım duvarı içerisine yerleştirilmiştir. Böylece, radyal yönden olabilecek ısı kayıpları için bir önlem daha alınarak ölçüm sonuçlarının daha güvenilir olması sağlanmıştır.

Çizelge 4.2. Teflon (P.T.F.E) malzemesinin özellikleri

Özellik	**Birim**	**Değer**
Özgül ağırlık	g/cm^3	2,13-2,23
Kullanım sıcaklığı	^oC	-250/+250
Ergime sıcaklığı	^oC	325-330
Isıl iletkenlik	kcal/cm ^oC	0,035
Tutuşma sıcaklığı	^oC	530

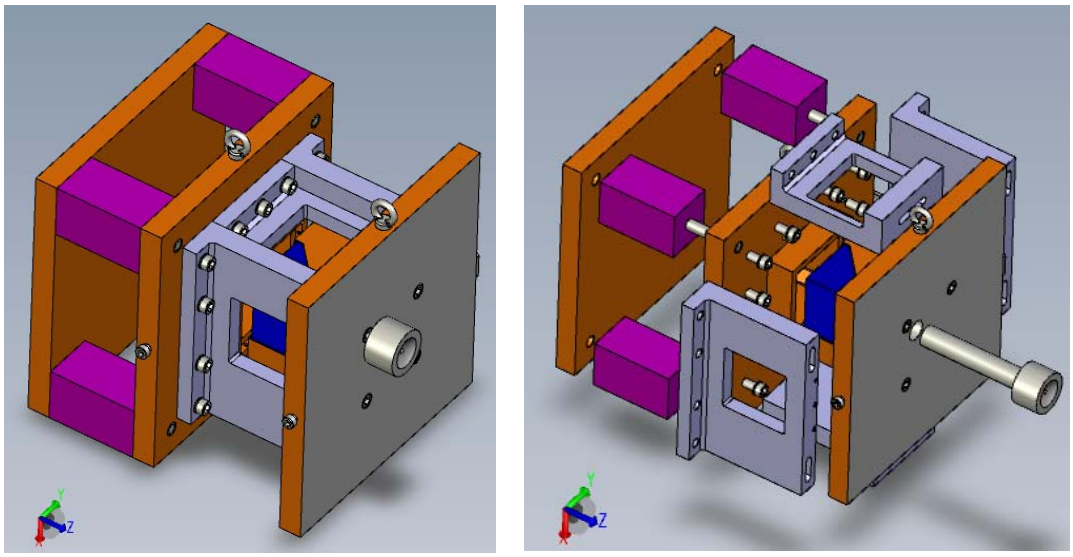
4.2. Ergiyik Plastiğin Üç Boyutlu Gerçek Akış Davranışının Görüntülenmesi

Ergiyik plastiğin üç boyutlu akış davranışının görüntülenebilmesi için, doğrudan giriş tipine sahip olan ve Şekil 4.5'de görülen plastik parça tasarlanmıştır. Tasarlanan plastik parçanın, farklı geometrilere sahip ve birbirine dik üç ayrı yüzeyi bulunmaktadır. Her üç yüzeyde de farklı geometrilerin olmasının sebebi, farklı geometrilerdeki akış davranışının da görüntülenebilmesi içindir. Kullanılan doğrudan giriş yolluk tipi özellikle geniş yüzey alanına sahip ve tek ürünün kalıplanacağı kalıplarda tercih edilen bir yolluk tipi olup özellikle basınç düşmelerine sebep olduğundan çok fazla tercih edilmemektedir. Bu çalışmada yolluk tipinin akış davranışına etkileri dikkate alınmadığı için, kullanılan plastik ürünün kalıp boşluğundan rahat çıkabilmesi için bu yolluk tipi kullanılmıştır.

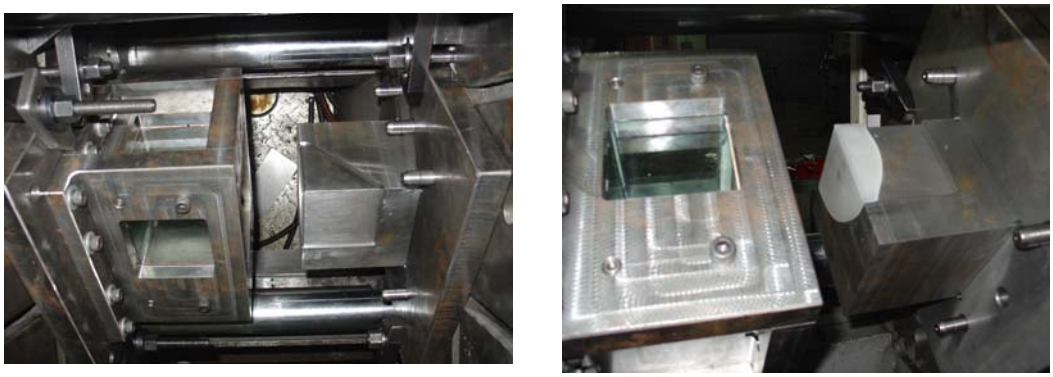


Şekil 4.5. Üç boyutlu akış davranışının görüntülenmesinde kullanılacak plastik parça

Tasarlanan parçanın enjeksiyonla kalıplama yöntemi ile üretilebilmesi için kalıp tasarımı Şekil 4.6'da görüldüğü gibi yapılmış ve Resim 4.9'da görülen hali ile imal edilmiştir. Kalıp, Ç1050 malzemesinden üretilmiştir.

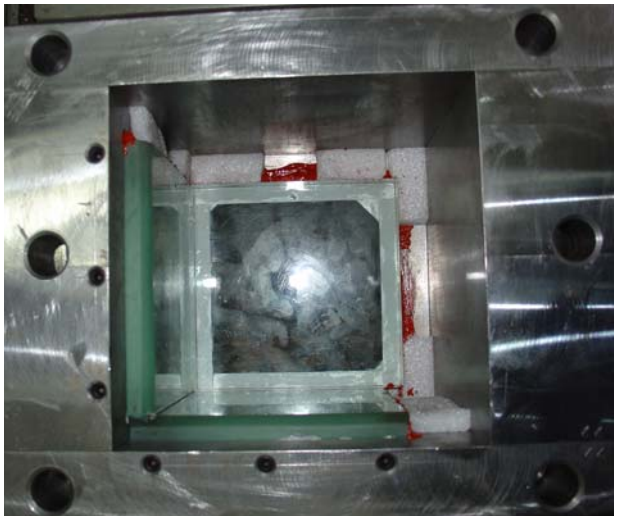


Şekil 4.6. Akış görüntüleme için tasarlanan plastik enjeksiyon kalıbı.

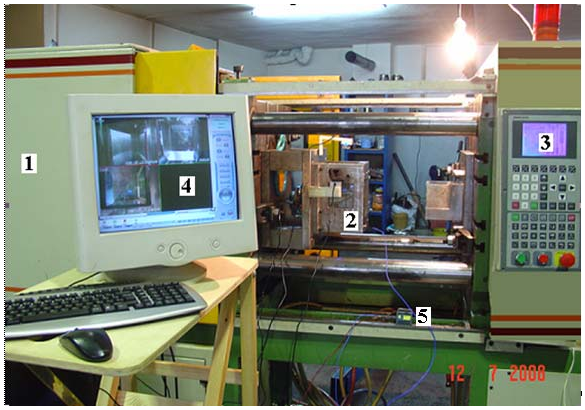


Resim 4.9. Akış görüntüleme için imal edilen enjeksiyon kalıbı

İmal edilen kalıbın üç yüzeyine kalıp boşluklarının karşında olacak şekilde, kalınlığı 20 mm olan ve temperlenmiş dikdörtgen biçimli cam plakalar yerleştirilmiştir (Resim 4.10). Bu cam plakalar vasıtası ile kalıp boşluğu görüntülenebilir hale gelmiştir. Akış davranışı, kalıp üzerine ve cam plakaların tam karşısına 15 cm mesafede ve yüzeye dik olarak yerleştirilen üç adet kamera ile görüntülenmiştir. Akış davranışının görüntülenmesi için tasarlanan düzenek Resim 4.11'de görülmektedir.

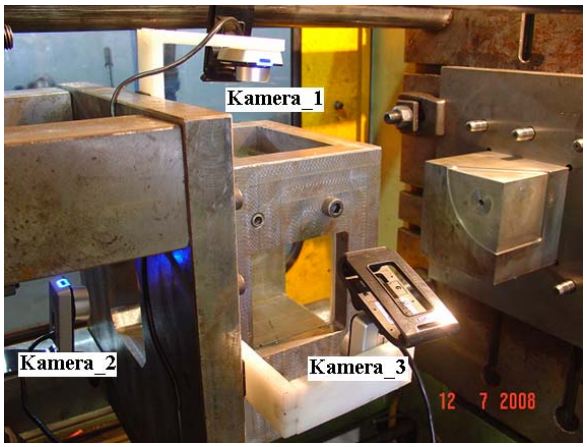


Resim 4.10. Akış görüntüleme kalıbına yerleştirilen temperlenmiş cam plakalar



1. Plastik enjeksiyon presi (EKİN)
2. Akışın görüntüleneceği kalıp
3. PLC kontrol ünitesi (Mikro Star)
4. Görüntü toplama ve işleme sistemi
5. Kalıp sıcaklığı kontrol sistemi

a)



b)

Resim 4.11. Akış görüntüleme deney düzeneği
a) Deney düzeneğinin genel görünümü
b) Kalıp içindeki akışı görüntüleme düzeneği

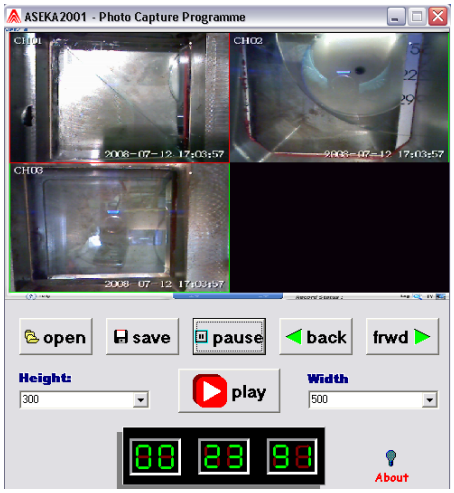
4.2.1. Enjeksiyonla kalıplama deneylerinin yapılması

Deneyler Ekin marka PLC (mikro star marka) kontrollü plastik enjeksiyon tezgahında yapılmıştır. Plastik enjeksiyon tezgahının silindiri üzerinde üç bölge kontrollü olarak ısıtılabilmektedir. Tezgah, 100 Mpa basıncına kadar 250 gr plastiği enjekte etme kapasitesine sahiptir.

Deneyler sırasında kalıp sıcaklığı, kalıp üzerine yerleştirilen sıcaklık ölçme düzeneği ile (Eurotherm sıcaklık göstergesi ve J tipi termokupl) kontrol edilerek kalıp sıcaklığının $35^{o}C$-$40^{o}C$' arasında kalması sağlanmıştır. Bu kalıp sıcaklık değeri tavsiye edilen kalıp sıcaklık değerinin en alt seviyesi olup, literatüre uygun olarak alınmıştır [5, 7, 8]. Bunun amacı, kalıp boşluğuna yerleştirilen cam plakalar ile kalıp malzemesinde meydana gelecek ısıl genleşmelerden kaynaklanabilecek problemlerin en aza indirilmesi içindir. Geometrik koşullar nedeni ile kalıp üzerine soğutma kanalları eklenemediği için sabit kalıp sıcaklığı, kalıp plakaları üzerine yerleştirilen ısıl çiftlerden okunan sıcaklık değerleri dikkate alınarak sağlanmıştır. Kalıp boşluğuna ardı ardına basımlar yapılarak sıcaklığının $35^{o}C$-$40^{o}C$ olması sağlanmış ve bu anda yapılan deneme baskıları video ile kayıt edilmiştir. Sıcaklığın arttığı durumlarda, deneyler durdurularak kalıbın doğal konveksiyonla soğuması sağlanmıştır.

4.2.2 Akış görüntülerinden fotoğrafların elde edilmesi

Video kayıtları, saniyede 90 kare (yazılım destekli 90 fps, gerçek 30 fps) fotoğraf yakalayabilme kapasitesine sahip Philips SP1300NFC marka ve 1.3 MP gerçek çözünürlüğe sahip üç adet dijital kamera ile gerçekleştirilmiştir. Elde edilen ve ".avi" uzantılı akış görüntüleri, Delphi ile hazırlanmış olan ve Şekil 4.7'de ara yüzü görülen video görüntüsü yakalama programı yardımıyla fotoğraf karelerine dönüştürülmüştür.



Şekil 4.7. Fotoğraf yakalama programı ara yüzü

5. DOLUM ANALİZİ İÇİN TEMEL DENKLEMLER

Bir akış probleminin çözümünde, bağımlı değişkenin (sıcaklık, hız, basınç, konsantrasyon, vb.) problem alanı içindeki dağılımı ve sistemin çevresi ile olan etkileşiminin belirlenmesi amaçlanmaktadır. Genel olarak bu tip problemlerin çözümünde deneysel, analitik ya da sayısal yöntemlerden birinin kullanılması gerekmektedir [89].

Deneysel çalışmalar, güvenilir sonuçlar vermelerine karşılık deney düzeneklerinin kurulması oldukça pahalı olmakta ve ayrıca bazı fiziksel olayların laboratuar şartlarında gerçeğine uygun olarak oluşturulması mümkün olamayabilmektedir. Analitik yöntemlerde, bağımlı değişkenin problem alanı içerisindeki dağılımı bir sürekli fonksiyon ile ifade edilmektedir. Bu fonksiyondaki katsayılara istenilen değerler verilerek, o değerlere karşılık gelen bağımlı değişkenin değeri tam olarak hesaplanabilmektedir. Fakat temel akış denklemlerinin, karmaşık geometriye sahip problem alanlarında analitik olarak çözülmesi ve bağımlı değişkeni temsil eden bir sürekli fonksiyonun elde edilmesi oldukça zordur. Bu nedenle, analitik yöntemler daha çok doğrusal problemlerin çözümünde tercih edilmektedir. Sayısal yöntemlerde, problem alanı sonlu sayıda noktaya (grid) ayrılır. Bağımlı değişkenin değeri, problem alanı içindeki bu sonlu sayıdaki noktada elde edilir. Problem alanı içindeki nokta sayısının artırılması, daha hassas çözümlerin elde edilmesini sağlayabilmesine karşılık çözümleme uzun bilgisayar hesaplama süresi gerektirmektedir [89, 90, 98].

Fiziksel bir problem, sayısal olarak çözülürken başlıca aşağıda sayılan işlemler gerçekleştirilmektedir [89, 90].

1. Fiziksel problem, matematiksel terimlerle ifade edilir (Matematiksel modelleme). Bunun sonucunda, bir veya daha fazla diferansiyel denklem takımı elde edilir.
2. Problem alanı, sonlu sayıda küçük hesap alanlarına (hücre) ayrılarak çözüm ağı oluşturulur.

3. Fiziksel probleme ait sınır şartları kullanılarak diferansiyel denklemler çözüm alanı içindeki hücrelerde cebirsel olarak ifade edilirler. Bu işlem, ayrıklaştırma olarak adlandırılmaktadır. Diferansiyel ifadelerin ayrılaştırılması için birçok ayrıklaştırma yöntemi bulunmaktadır. Sonlu Farklar Yöntemi, Sonlu Kontrol Hacmi Yöntemi, Sonlu Elemanlar yöntemi bunlardan bazılarıdır.
4. Ayrıklaştırma sonunda elde edilen denklem sistemi doğrusallaştırılır. Doğrusallaştırılan cebirsel denklem sistemi, *İteratif Yöntemlerle* (Jacobi iterasyon yöntemi, Gauss Seidel İterasyon yöntemi, vb.) ya da *Doğrudan Yöntemlerle* (Gauss eliminasyon yöntemi, Gauss Jordan eliminasyon yöntemi, Matrisin tersini alma, vb.) çözülür ve bağımlı değişkenin değeri sonlu sayıda noktada elde edilir.

Bu çalışmada, ergiyik plastiğin kalıp boşluğundaki akış davranışı, temel akış denklemleri sayısal olarak çözülerek analiz edilmiştir. A.Y.PE, Y.Y.PE ve PS malzemelerinin deneysel olarak elde edilmiş olan fiziksel ve reolojik özellikleri, sıcaklık ve kayma hızına bağlı birer matematiksel model olarak temel akış denklemlerinde kullanılmıştır. Sayısal çözümlemeler, Sonlu Kontrol Hacmi ayrıklaştırma yöntemi için uygun çözümleme yapan FLUENT yazılımı ile gerçekleştirilmiş olup FLUENT çalışma adımları EK-1'de verilmiştir.

5.1. Temel Denklemler

Üç boyutlu bir kalıp boşluğunda ergimiş plastik akış davranışının belirlenmesi için sayısal çözümlemeler, FLUENT yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. FLUENT yazılımı, bütün akış problemleri için kütle ve momentum korunum denklemlerini çözmektedir. Isı transferi ya da sıkıştırılabilirliğin de önemli olduğu problemlerde enerjinin korunumu denklemi de çözülebilmektedir. Çalışmada çözülen temel akış denklemleri Eş.5.1-5.5'de verilmiştir.

Ergimiş plastiklerin fiziksel ve reolojik özellikleri için, yapılan deney sonuçlarından elde edilen matematiksel modeller kullanılmıştır. Viskozite ve yoğunluk modellerine ait katsayılar, FLUENT malzeme özellikleri menüsünden seçilen uygun modellere

(sırasıyla non Newtonian Power Law ve Polynominal) girilerek; ısı iletim katsayıları ise deneysel verilerden elde edilen modele ait kullanıcı tanımlı fonksiyonlar (UDF, EK-2) yazılarak FLUENT yazılımında kullanılmıştır.

Dolum sırasında, kalıp boşluğunda ergiyik plastik ile hava arasındaki ara yüzeyin konumu (akış cephesi), VOF yöntemi kullanılarak tespit edilmiştir.

5.1.1. Kütlenin korunumu (Süreklilik denklemi)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x}(\rho u)+\frac{\partial}{\partial y}(\rho v)+\frac{\partial}{\partial z}(\rho w)=0 \tag{5.1}$$

5.1.2. Momentumun korunumu

Momentumun x bileşeni:

$$\rho\left(\frac{\partial u}{\partial t}+u\frac{\partial u}{\partial x}+v\frac{\partial u}{\partial y}+w\frac{\partial u}{\partial z}\right)=-\frac{\partial P}{\partial x}+\eta\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 u}{\partial z^2}\right)+\rho g_x \tag{5.2}$$

Momentumun y bileşeni:

$$\rho\left(\frac{\partial v}{\partial t}+u\frac{\partial v}{\partial x}+v\frac{\partial v}{\partial y}+w\frac{\partial v}{\partial z}\right)=-\frac{\partial P}{\partial y}+\eta\left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 v}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 v}{\partial z^2}\right)+\rho g_y \tag{5.3}$$

Momentumun z bileşeni:

$$\rho\left(\frac{\partial w}{\partial t}+u\frac{\partial w}{\partial x}+v\frac{\partial w}{\partial y}+w\frac{\partial w}{\partial z}\right)=-\frac{\partial P}{\partial z}+\eta\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 w}{\partial z^2}\right)+\rho g_z \tag{5.4}$$

5.1.3. Enerjinin Korunumu

Ergiyik plastik kalıp boşluğu içerisinde akarken sürekli olarak kalıp duvarlarına temas ettiğinden sıcaklığını kaybetmekte ve kalıp boşluğu içerisinde, aynı konumda

zamana bağlı olarak değişen sıcaklığın etkisi ile birlikte birçok değişim de meydana gelmektedir. Bu değişimlerinin dikkate alınması için FLUENT yazılımında enerji denklemi aktif hale getirilmiş ve enerji denkleminin çözülmesi sağlanmıştır Eş. 5.5'de enerjinin korunumu denklemi görülmektedir. Bu ifadede, dolum aşamasında ergiyik plastik sıkıştırılamaz kabul edildiği, dolayısı ile sıkıştırmanın etkisi ile sıcaklık değişiminin olmadığı varsayıldığı için ilgili terimler eşitlikten düşürülerek elde edilmiştir.

$$\rho C_p\left(\frac{\partial T}{\partial t}+u\frac{\partial T}{\partial x}+v\frac{\partial T}{\partial y}+w\frac{\partial T}{\partial z}\right)=\eta\dot{\gamma}^2+k\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right) \tag{5.5}$$

5.2. Ergimiş Plastiklerin Fiziksel ve Reolojik Özelliklerinin Matematiksel İfade Edilmesi

Temel akış denklemlerinde bulunan, ergimiş plastiklerin yoğunluk, viskozite ve ısı iletim katsayısı gibi fiziksel ve reolojik özellikleri bu çalışmada sabit kabul edilmemiştir. Viskozite, sıcaklık ve kayma hızına; yoğunluk ve ısı iletim katsayıları ise sıcaklığa bağlı olacak şekilde yapılan deneylerden elde edilmiştir. Bu veriler, plastik malzemelerin viskozite, yoğunluk ve ısı iletim katsayılarına ait matematiksel modeller elde etmek için regresyon analizinde kullanılmıştır. Modeller, FLUENT yazılımına tanıtılmış ve temel akış denklemleri içerisinde kullanılmaları sağlanmıştır.

5.2.1. Viskozite modeli

Enjeksiyonla kalıplamada ergiyik plastiğin kalıp boşluğunu doldurma tipinin sayısal olarak analizi için bir viskozite modeline ihtiyaç duyulmaktadır. Viskoziteye ait model ile kayma hızı ve kayma gerilmesi arasındaki ilişki daha belirgin hale gelmekte ve Newtonian olmayan bir akışkanın gerçek akış davranışına yakın analizler için hesaplamaların yapılması sağlanabilmektedir.

Enjeksiyonla kalıplama için dolum simülasyonu yapan yazılımlar (Moldflow, CadMould, vb.) Power Law, Ellis, Cross WLF, Carreau gibi birçok viskozite

modelini bünyelerinde barındırmaktadırlar [5, 6]. Bu çalışma kapsamında yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar, sıcaklığın da etkisini içerecek şekilde, kullanımı ve katsayılarının tespit edilmesi diğer viskozite modellerine göre daha kolay olan Power Law viskozite modeline (Eş. 5.6) uydurulmuş ve model temel akış denklemlerinde kullanılmıştır.

$$\eta(\dot{\gamma},T) = m\dot{\gamma}^{n-1}\exp^{(cT)} \tag{5.6}$$

5.2.2. Yoğunluk modeli

Ergimiş plastiklerin hacimsel genleşme katsayıları oldukça yüksektir. Bu durum, sıcaklık değişimiyle yoğunluğun da değiştiği anlamına gelmektedir. Bu kadar yüksek genleşme miktarları, kalıp boşluğu dolduktan sonra ergiyik plastiğin soğuması sırasında aşırı miktarda hacimsel olarak küçülmelere sebep olacaktır. Bu durumu önlemek için, ergimiş plastiklerin sıkıştırılabilirlik özellikleri kullanılarak kalıp boşluğu içerisine hacimsel küçülme miktarı kadar ergiyik plastik giriş kanalları katılaşıncaya kadar kalıp boşluğundaki basıncın devamlılığını sağlamak için enjekte edilmeye devam edilmektedir [5, 8]. Genleşme değerinin bilinmesi, ne kadar ilave ergiyik plastiğin daha kalıp boşluğuna ilave edilmesi gerektiği hakkında ön bilgi vermektedir. Ayrıca, dolum sırasında gerçekleşen faz değişimleri, kalıp duvarı ve ergiyik arasında yoğunluk değeri sürekli değişen katmanların oluşması anlamına da gelmektedir. Bu nedenle yoğunluğun gerçek akışta olduğu gibi sabit alınmaması analizden daha güvenli sonuçların alınmasını sağlayacaktır.

Yoğunluk için yapılan deneylerden elde edilen veriler, ergiyik plastiğin (A.Y.PE, Y.Y.PE ve PS) yoğunluğu ile sıcaklık arasında ters orantılı doğrusal bir ilişki olduğunu göstermiştir. Bu nedenle, elde edilen veriler Eş. 5.7'de verilen doğrusal modele uydurulmuştur. Çalışmada dolum anı incelendiği için, ergiyik plastiğin sıkıştırılabilirlik özelliği, dolayısıyla basıncın yoğunluk değişimine etkisi dikkate alınmamış, sadece dolum sırasında sıcaklık değişimine bağlı faz değişimlerinin analiz sonuçlarına etkisi, elde edilen yoğunluk modeli ile yansıtılmıştır.

$$\rho(T) = D_0 + D_1 T \tag{5.7}$$

5.2.3. Isı iletim katsayısı modeli

Ergiyik plastiklerin ısıl iletkenlikleri sıcaklık, polimerin kristallenme derecesi ve moleküllerin yönlenme miktarına bağlı olarak değişim göstermektedir. Bu nedenle deneysel olarak elde edilmeleri oldukça güçtür. Bu çalışma kapsamında üretilen ısı iletim katsayısı tespit düzeneği ile ergiyik plastiklerin sıcaklığa bağlı ısı iletim katsayıları deneysel olarak tespit edilmiştir.

Çalışmada kullanılan A.Y.PE ve Y.Y.PE malzemeleri yarı kristalin, PS ise amorf yapıda olduğu için farklı karakteristikte eğriler elde edilmiştir. Elde edilen veriler PS malzemesi için ikinci dereceden bir polinom şeklindeki modele (Eş. 5.8), A.Y.PE için $40^oC \leq T \leq 130^oC$ aralığında ve Y.Y.PE $40^oC \leq T \leq 150^oC$ aralığında doğrusal bir modele (Eş. 5.9) uydurulmuştur.

$$k(T)_{PS} = C_0 + C_1 T + C_2 T^2 \tag{5.8}$$

$$k(T)_{AYPE,YYPE} = C_0 + C_1 T \tag{5.9}$$

A.Y.PE ve Y.Y.PE için doğrusal modele uydurulan sıcaklık sınırları dışında kalan bölgeler için ısı iletim katsayıları sabit kabul edilmiştir.

5.3. Temel Denklemlerin Ayrıklaştırılması ve Çözülmesi

FLUENT yazılımı, temel akış denklemlerinin çözümü için "Basınca Dayalı Çözücü (Pressure based solver)" ve "Yoğunluğa Dayalı Çözücü (Density based solver)" olmak üzere iki farklı sayısal çözüm yöntemi kullanmaktadır. Enjeksiyonla kalıplamada dolum sırasında, yüksek viskoziteye sahip ergimiş plastiğin Reynolds sayısı küçük olduğundan ve dolum sırasında ergiyik plastik sıkıştırılamaz kabul edildiğinden, analizlerde "Basınca dayalı çözücü" kullanılmıştır.

Basınca dayalı çözüm yaklaşımında, momentum ve süreklilik denklemlerinin birlikte kullanılmasından elde edilen bir basınç düzeltme denklemi çözülerek basınç dağılımı elde edilmektedir. FLUENT yazılımında, aksi belirtilmedikçe momentum denklemi katsayıları kullanılarak hücre yüzeyleri arasında basınç değerlerinin interpolasyonu yapılmaktadır [98]. Bu çalışma kapsamında basınca dayalı çözücü ve ayrık çözüm algoritması kullanılmış olup çözüm yöntemine ait bilgiler bu doğrultuda verilmiştir.

5.3.1. Temel denklemlerin ayrıklaştırılması

FLUENT, diferansiyel formdaki temel akış denklemlerini cebirsel hale getirmek için sonlu kontrol hacmi yöntemini kullanmaktadır. Kontrol hacmi yönteminde akış alanı, sonlu sayıda küçük hacimlere ayrılır. Temel akış denklemlerinin kontrol hacminde integrali alınarak her bir hücrede bağımlı değişkene ait denklem sistemi elde edilir.

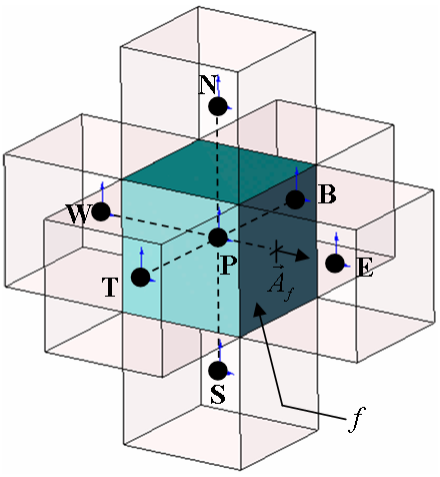
Elde edilen cebirsel ifadeler, doğrusal olmayan formdadırlar. Çözüm için, doğrusal formda olmayan bu cebirsel ifadelerin doğrusallaştırılması gerekmektedir. Basınca dayalı çözücü ayrık çözüm algoritmasında, elde edilen cebirsel denklem takımının doğrusallaştırılması, IMPLICIT yöntem kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Her bir hücre için elde edilen doğrusal denklem takımları Gauss-Seidel yöntemi ile çözülmektedir.

Bir skaler φ değişkeni için denklemlerin integralleri alınarak ayrıklaştırılması, Eş. 5.10' da verilen kararsız taşınım denklemi üzerinde açıklanabilir.

$$\int_V \frac{\partial \rho\varphi}{\partial t} dV + \oint \rho\varphi \vec{v}.d\vec{A} = \oint \Gamma_\varphi \nabla\varphi.d\vec{A} + \int_V S_\varphi dV \tag{5.10}$$

Burada; φ skaler değişkeni, ρ yoğunluğu (kg/m^3), $\vec{v}$ hız vektörünü (m/s), $\vec{A}$ yüzey alan vektörünü, Γ_φ φ' nin difüzyon katsayısını, $(\nabla\varphi)$ φ' nin gradyanını, S_φ birim hacim başına φ için kaynak terimini (φ üretimi), t zamanı (s) ve V rasgele seçilen bir hücrenin hacmini temsil etmektedir.

Eş. 5.10, akış alanındaki bütün kontrol hacimlerine (hücrelere) uygulanmaktadır. Ayrıklaştırma için Eş. 5.10, Şekil 5.1'de görülen üç boyutlu kontrol hacminde integre edildiğinde Eş. 5.11'de görülen ayrıklaştırılmış ifade elde edilir.



P: Hesap yapılan hücre merkezi

E, W, N, S, B, T: Komşu hücre merkezleri

f : Komşu hücreler arasındaki yüzey

$\vec{A}_f$: Yüzey alan vektörü

Şekil 5.1. φ için ayrıklaştırmanın yapıldığı üç boyutlu kontrol hacmi

$$\frac{\partial \rho \varphi}{\partial t} V + \sum_{f}^{N_f} \rho_f \vec{v}_f \varphi_f . \vec{A}_f = \sum_{f}^{N_f} \Gamma_\varphi \nabla \varphi_f . \vec{A}_f + S_\varphi V \tag{5.11}$$

Burada;

N_f : Hesap yapılan hücreyi saran yüzeylerin sayısı

φ_f : f yüzeyinden geçen φ değeri

$\rho_f \vec{v}_f . \vec{A}_f$: Yüzeyden olan kütle akısı (kg.m^2)

$\vec{A}_f$: f yüzeyinin alanı (m^2), ($|A| = |A_x i + A_y j + A_z k|$)

$\nabla \varphi_f$: f yüzeyinde φ gradyanı

V : Hücrenin hacmi (m^3)

Eş. 5.11, hesap yapılan hücre merkezinde (P) ve komşu hücre merkezlerinde (W, E, N, S, B, T) değeri bilinmeyen φ terimleri içermektedir. Ayrıca bu eşitlik, değişkenlere de bağlı olarak doğrusal olmayan yapıda olabileceğinden,

doğrusallaştırılması gerekmektedir. Eş. 5.11'in doğrusallaştırılmış hali Eş. 5.12'de görüldüğü gibi ifade edilmektedir.

$$a_P \varphi_P = \sum_{nb} a_{nb} \varphi_{nb} + b \tag{5.12}$$

Burada nb alt indisi komşu hücreleri, a_P hesap yapılan hücredeki φ'nin doğrusallaştırma katsayısını ve a_{nb} komşu hücrelerdeki φ'lerin doğrusallaştırma katsayılarını temsil etmektedir. Komşu hücrelerin sayısı, oluşturulan hücre (grid, çözüm ağı) yapısı ile ilgili olmakla birlikte, sınırlardaki hücreler hariç genellikle hücrenin yüzey sayısına eşittir.

Eş. 5.12, akış alanındaki bütün hücreler için yazıldığında matris yapısında ve doğrusal halde cebirsel denklem takımları elde edilir. FLUENT skaler denklemler için bu doğrusal cebirsel denklem sistemini, Gauss Seidel iterasyon yöntemi ile birlikte Cebirsel çoklu grid (AMG, algebraic multigrid) yöntemini kullanarak çözmektedir.

FLUENT, ayrıklaştırılmış skaler φ değerlerini otomatik olarak hücre merkezlerine yerleştirir. Bununla birlikte, taşınım terimleri için φ'nin yüzeydeki değerinin (φ_f) bilinmesi gerekmektedir. Yüzeydeki φ değerleri, hücre merkezlerindeki φ değerlerinin interpolasyonu ile bulunmaktadır. İnterpolasyon, hücre içindeki akışın yönüne bağlı olarak türetilen "upwind" yöntemi ile yapılmaktadır. FLUENT yazılımında "*First order upwind*", "*Second order upwind*", "*Power Law*" ve "*QUICK*" olmak üzere dört farklı "upwind" interpolasyon yöntemi kullanılabilmektedir [98]. Bu çalışmada, Second Order Upwind (İkinci dereceden Upwind) interpolasyon yöntemi kullanılarak değişkenlerin hücre yüzeyindeki değerleri elde edilmiştir. İkinci dereceden upwind yönteminde, hücre merkezi için yapılan çözümlerin Taylor serisi ile açılımı yapılmakta ve değişkenlerin hücre yüzeylerindeki değerleri yüksek hassasiyetle elde edilmektedir [90, 98].

Zamana bağlı terimlerin ayrıklaştırılması işleminde, diferansiyel denklemlerdeki her bir terimin zaman adımı (Δt) boyunca integrali alınmaktadır. Bu çalışmada zamana bağlı terimler birinci dereceden IMPLICIT yöntem kullanılarak ayrıklaştırılmıştır. Zamana bağlı terimlerin birinci dereceden ayrıklaştırılması Eş. 5.13' de görülen ifade ile gerçekleştirilmektedir. Bu ifadede zamana bağlı türev, geri farklar ayrıklaştırma yöntemi kullanılarak alınmaktadır.

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} = \frac{\varphi^{n+1} - \varphi^{n}}{\Delta t} = F(\varphi) \tag{5.13}$$

Birinci dereceden IMPLICIT ayrılaştırmada $F(\varphi)$ bir sonraki zaman adımında hesaplanmaktadır (Eş. 5.14). $F(\varphi)$ fonksiyonu içerisinde akış alanına ait ayrıklaştırma da bulunmaktadır.

$$\frac{\varphi^{n+1} - \varphi^{n}}{\Delta t} = F\left(\varphi^{n+1}\right) \tag{5.14}$$

Eş. 5.14 düzenlendiğinde, φ 'nin bir zaman adımı sonrasındaki değeri, Eş. 5.15'de görüldüğü gibi bulunmaktadır.

$$\varphi^{n+1} = \varphi^{n} + \Delta t F\left(\varphi^{n+1}\right) \tag{5.15}$$

Yukarıdaki eşitliklerde, $n+1$ bir sonraki zaman adımındaki ($t + \Delta t$) değeri ve n ise hesap yapılan andaki (t) değerini göstermektedir. Eş. 5.15, her bir zaman adımında bir sonraki adıma geçmeden önce iteratif olarak çözülmektedir. Bu yöntemin avantajı, uygun seçilen zaman adımına bağlı olarak başka bir şart aranmaksızın kararlı olmasıdır.

Temel denklemlerde bulunan gradyan terimleri, skalerlerin hücre yüzeyindeki değerlerinin hazırlanması ile birlikte ikincil difüzyon terimleri ve hız türevlerinin de hesaplanması için gereklidir. Verilen φ değişkeninin gradyanı ($\nabla \varphi$), temel akış

denklemlerindeki konveksiyon ve difüzyon terimlerinin ayrıklaştırılmasında kullanılmaktadır. FLUENT yazılımında gradyanlar, "Hücre Esaslı Gren-Gauss", "Düğüm Noktası (node) Esaslı Green-Gauss" ve "Hücre Esaslı En Küçük Kareler" yöntemlerinden seçilen biri ile hesaplanmaktadır. Bu çalışmada, gradyanların hesaplanması için "Hücre Esaslı En Küçük Kareler" yöntemi tercih edilmiştir. En küçük kareler yönteminde, çözümün doğrusal değiştiği kabul edilmektedir.

Doğrusal olmayan yapıdaki denklemler çözülürken çözümün yakınsaması oldukça zordur. Bu nedenle, doğrusal olmayan yapıdaki denklem takımları çözülürken φ değişkeninin akış alanı içindeki gridlerde değişiminin kontrol edilmesi ve grid noktalarındaki φ değişimlerin yavaşlatılması gerekmektedir. Bu işlem "underrelaxation" olarak adlandırılmaktadır. Under-relaxation ile her iterasyonda φ'nin değişimi azaltılır. Her griddeki yeni φ değeri Eş. 5.16'da görüldüğü gibi eski (bir önceki adımda hesaplanan) φ değeri kullanılarak elde edilmektedir.

$$\varphi = \alpha\varphi_{yeni} + (1-\alpha)\varphi_{eski} \tag{5.16}$$

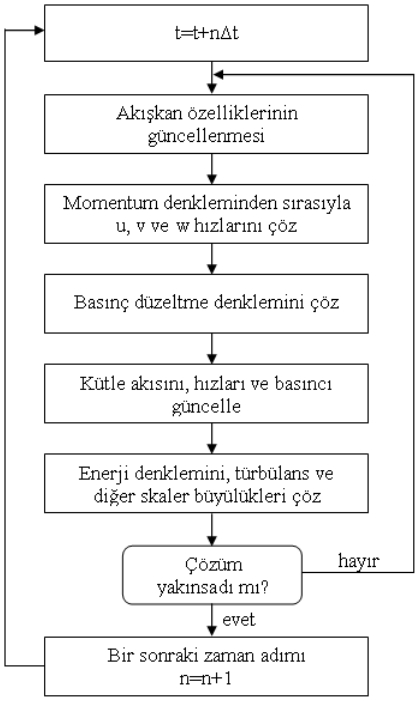
Burada, α under-relaxation parametresini temsil etmektedir ve değeri 0~1 arasında değişmektedir. Bu çalışmada yapılan analizlerde kullanılan under-relaxation parametreleri Çizelge 5.1'de verilmiştir.

Çizelge 5.1. Under-relaxation parametreleri

Under-relaxation uygulanan büyüklük	**Under-relaxation parametresi**
Basınç	0,3
Yoğunluk	1,0
Gövde kuvvetleri	1,0
Momentum	0,2
Hacim fraksiyonu	0,7
Enerji	0,7

5.3.2. Basınca dayalı çözücü sayısal yöntemi

Basınca dayalı yöntem, yavaş ve sıkıştırılamayan akış problemlerinin çözümünde tercih edilmektedir. Basınca dayalı çözücü yönteminde ayrık (segregated) ve birleşik (coupled) olmak üzere akış problemlerin çözümü için iki farklı algoritma kullanılmaktadır. Bu çalışmada, kararsız (zamana bağlı) ayrık çözüm algoritması kullanılmıştır. Ayrık çözüm algoritması Şekil 5.2'de görülen çözüm adımlarından oluşmaktadır.



Şekil 5.2. Basınca dayalı çözüm yöntemi ayrık çözüm algoritması [98]

Şekil 5.2'den de görüldüğü üzere, basınca dayalı çözüm yönteminin ayrık çözüm algoritması kullanıldığında, temel akış denklemleri sırayla çözülmektedir. Başlangıçta akış alanı içerisindeki basınç dağılımı biliniyor olsaydı momentum denklemi genel konveksiyon-difüzyon denklemi gibi çözülebilirdi. Fakat başlangıçta basınç dağılımının bilinmemesi ve basınç için ayrı bir diferansiyel denklem takımının olmaması, basınç terimi içeren momentum denkleminin çözümünde özel

yöntemlerin kullanılmasını gerektirmektedir [89, 90]. SIMPLE, SIMPLEC ve PISO bu özel yöntemlere örnek algoritmalar olarak verilebilir.

Bu çalışmada, SIMPLE (Semi Implicit Method for Pressure Link Equations, basınçla ilişkili denklemler için yarı implisit yöntem) algoritması kullanılarak basınç dağılımı bulunmuştur. Bu yöntemin temelini tahmin etme ve tahmin edileni düzelterek doğruya ulaşma mantığı oluşturmaktadır. SIMPLE algoritmasında, momentum denkleminden hız bileşenleri (u^*, v^*, w^*), akış alanı için yapılan tahminini basınç dağılımına (p^*) ve hücre yüzeylerinden olan kütle akısına göre çözülmektedir. Bulunan hızlar yardımıyla süreklilik ve doğrusallaştırılmış momentum denklemlerinden türetilen basınç düzeltme denklemi çözülerek basınç (p') elde edilmekte ve elde edilen basınç Eş. 5.17 kullanılarak düzeltilmektedir.

$$p = p^* + \alpha p' \tag{5.17}$$

Burada α, relaksasyon katsayısıdır ve değeri 0~1 arasında değişmektedir. Bu katsayı sayesinde yeni basınç, bir önceki adımda elde edilen basınca yapılan ilaveler ile bulunmaya çalışılmaktadır. Düzeltilen basınç kullanılarak da hız bileşenleri düzeltilmektedir. Düzeltilen hızlarda (u, v, w), düzeltilen basınç gibi relaksasyona tabi tutulmaktadır (Eş. 5.18-5.20).

$$u^{yeni} = \alpha u + (1-\alpha) u^{öi} \tag{5.18}$$

$$v^{yeni} = \alpha v + (1-\alpha) v^{öi} \tag{5.19}$$

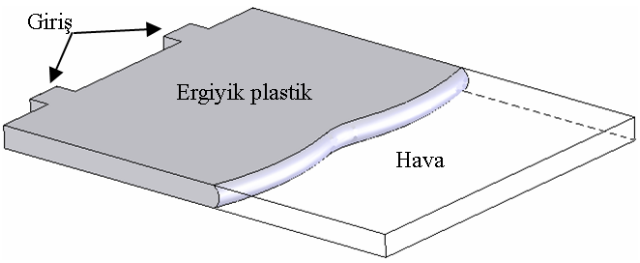
$$w^{yeni} = \alpha w + (1-\alpha) w^{öi} \tag{5.20}$$

Burada, α relaksasyon katsayısı ve *öi* üst simgesi bir önceki iterasyondan elde edilen hız değerlerini göstermektedir. Düzeltilmiş hız ve basınç değerleri kullanılarak skaler denklemler (enerji, türbülans, karışım, vb.) çözülmektedir. Denklem setinin çözümü

yakınsayıp yakınsamadığı, süreklilik denklemi ile kontrol edilmektedir. Eğer süreklilik sağlanmıyorsa elde edilen basınç değeri (p), ilk adımda tahmin edilen basınç değeriymiş (p^*) gibi değerlendirilerek hesaplamalar iteratif olarak süreklilik sağlanıncaya kadar devam ettirilir. Yakınsamış değerler elde edildiğinde, bir sonraki zaman adımına geçilir ve işlemler istenilen çözüm zamanı tamamlanıncaya kadar devam ettirilir.

5.4. Akış Cephesi Tespiti

Ergiyik plastik kalıp boşluğunda ilerlerken, kalıp boşluğunda bulunan havayı da önünde hareket ettirmektedir (Şekil 5.3). Böylece kalıp boşluğu içerisinde iki fazlı akış (akışkan-gaz) meydana gelmektedir. Dolum sırasında, kalıp boşluğunda bulunan hava, ergimiş plastiğin akışı ile birlikte kalıp boşluğunun kenarlarına açılacak tahliye kanallarından tahliye edilmelidir. Tahliye edilemeyen havanın kalıp boşluğunda sürekli küçülen bir hacimde sıkışması, basıncının artmasına ve buna bağlı olarak ta havanın ısınmasına sebep olacaktır. Sıkışmış ve ısınmış hava ergiyik plastiğin akışına direnç göstererek akışını engelleyecek ve eksik ürün basımına veya üzerinde yanık izleri bulunan plastik ürünlerin elde edilmesine sebep olacaktır.



Şekil 5.3. Kalıp boşluğunda ergiyik plastiğin ilerlemesi

Ergiyik plastik-hava ara yüzeyinin tespiti, ergiyik plastiğin kalıp boşluğundaki akış davranışının belirlenmesini sağlayacaktır. Bu akış davranışının bilinmesi, havanın kalıp boşluğundan tahliyesi için açılması gerekli olan kanalların yerlerinin tespit edilmesini sağlayacağı gibi kaynak hattı vb. oluşumlarının da nerede, nasıl ve hangi karakteristikte gerçekleşecekleri konusunda bilgi verecektir.

Birbirine karışmayan iki veya daha fazla akışkanın aynı akış alanı içindeki davranışları FLUENT yazılımında VOF (Volume of Fluid) yöntemi kullanılarak tespit edilebilmektedir. Bu yöntemde, bütün akışkan fazlar için tek bir momentum denklemi çözülmektedir. Temel akış denklemlerinin yanında problem alanı içerisindeki akışkan fazların hacimsel oranlarının tespiti, VOF eşitliği (Eş. 5.21) çözülerek bulunmaktadır. Enjeksiyonla kalıplamada dolum sırasında kalıp boşluğunda ergiyik plastik ve hava olmak üzere iki akışkan faz bulunmaktadır.

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\alpha_p \rho_p\right) + \nabla.\left(\alpha_p \rho_p \vec{v}_p\right) = 0 \tag{5.21}$$

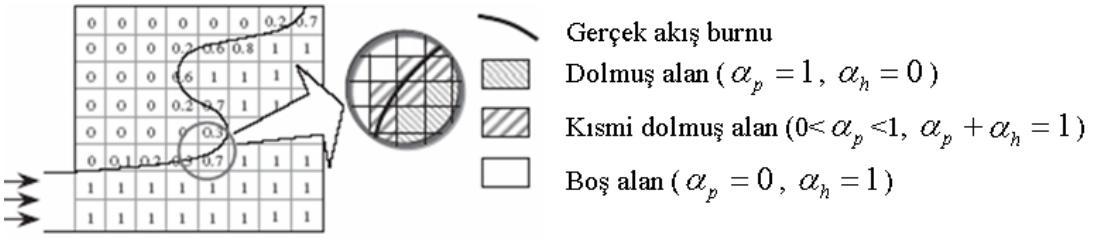
Burada p alt indisi ergiyik plastik akışkan fazını temsil etmekte olup hava fazı h alt indisi ile gösterilmiştir. Yakınsama probleminin ortadan kaldırılması için yoğunluğu düşük olan akış fazının birinci faz olarak tanımlanması, FLUENT yazılımı tarafından önerilmektedir [98]. Bu nedenle kalıp boşluğunun dolumu sırasında hava birinci akış fazı ve ergimiş plastik ise ikinci akış fazı olarak tanımlanmıştır. Eş. 5.21 yoğunluk değeri büyük olan ergimiş plastik fazı için çözülmektedir. Hava fazının hacimsel oranı Eş. 5.22 ile belirlenmektedir. Ergimiş plastik ve hava fazlarının hacimsel oranlarının toplamı bir (1)' dir.

$$\sum_{q=1}^{2} \alpha_q = 1 \tag{5.22}$$

Eş. 5.21'in çözümünden sonra, Şekil 5.4'den de görüleceği üzere α_p ve α_h aldığı değerlere göre aşağıdaki gibi değerlendirilmektedir:

- *Eğer*, α_p=0 ise; o an hesap yapılan hücrede ergiyik plastik fazı yoktur, hücre tamamen hava fazı ile doludur.
- *Eğer*, α_p=1 ise; o an hesap yapılan hücre tamamen ergiyik plastik faz ile doludur.

- *Eğer*, $0<\alpha_p<1$ ise; o an hesap yapılan hücrede hem ergiyik plastik faz hem de hava fazı bulunmaktadır.



Şekil 5.4. Ergimiş plastik ve hava fazlarının dolum sırasında durumu [27]

Temel akış denklemlerindeki malzeme fiziksel ve reolojik özellikleri, akış alanındaki her bir kontrol hacminde bulunan akışkan faz bileşenleri dikkate alınarak belirlenmektedir. Bu iki faz için, çözülecek momentum denklemindeki malzeme özellikleri, Eş. 5.23 ve Eş. 5.24 kullanılarak belirlenmektedir.

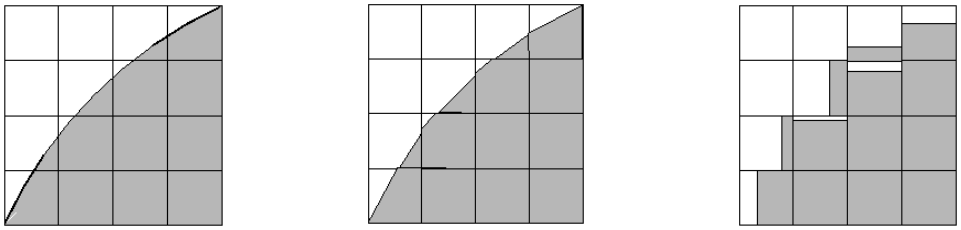
$$\rho = \alpha_p \rho_p + (1-\alpha_p)\rho_h \tag{5.23}$$

$$\eta = \alpha_p \eta_p + (1-\alpha_p)\eta_h \tag{5.24}$$

Tek momentum denkleminin çözülüyor olmasının olumsuz bir yönü, fazlar arasındaki hız farkının çok fazla olduğu durumlarda ortaya çıkmaktadır. Bu gibi durumlarda, fazlar arasındaki ara yüzeydeki yüksek hız farkları yanlış hesaplamalara sebep olabilmektedir [98].

FLUENT kontrol hacmi formülasyonunda, kontrol hacmi yüzeylerinden olan konveksiyon ve difüzyon akılarının hesaplanması gerekmektedir. VOF eşitliği (Eş. 5.21) zamana bağlı olarak Implicit veya Explicit yöntemlerden biri seçilerek çözülmektedir. Seçilen zamana bağlı ayrıklaştırma yöntemine bağlı olarak kontrol hacmi yüzeylerinden olan konveksiyon ve difüzyon akılarının interpolasyonu için de farklı yöntemler seçilmektedir (Şekil 5.5). Bu çalışmada, zamana bağlı ayrıklaştırma için Implicit yöntem kullanılmıştır (Eş. 5.25). Ergimiş plastik-hava ara yüzeyinin

konumu ve şekli, değiştirilmiş ve geliştirilmiş yüksek çözünürlüklü ara yüzey yakalama (MHRIC) interpolasyon yöntemi kullanılarak tespit edilmiştir.



Şekil 5.5. Ara yüzey bulma için kullanılan interpolasyon yöntemine örnekler [98]
a) Gerçek ara yüzey b) Geometric reconstruction c) Donor-acceptor

$$\frac{\alpha_p^{n+1}\rho_p^{n+1}-\alpha_p^{n}\rho_p^{n}}{\Delta t}V+\sum_f \alpha_p^{n+1}U_f^{n+1}\rho_{p,f}^{n+1}=0 \tag{5.25}$$

Burada,

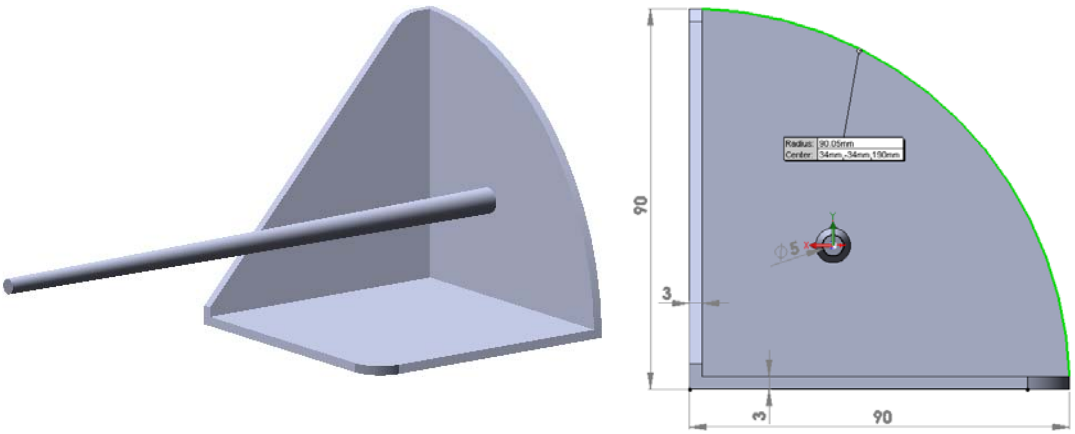
- $n+1$, yeni zaman adımı için gösterge,
- n, bir önceki zaman adımı için gösterge,
- $\alpha_{p,f}$, ergimiş plastiğin hacim oranının ara yüzey bulma interpolasyon yöntemlerinden biri ile hesaplanmış olan yüzeydeki değeri,
- V, hücrenin hacmi,
- U_f, normal (dik) hıza dayalı olarak, yüzeyden geçen hacim akısıdır.

Implicit yöntemde, akışkan fazların içinde bulunulan zaman adımındaki hacimsel oranlarına ihtiyaç duyulmaktadır. Bunun için, ergimiş plastik faz için skaler hareket denklemi (scaler transport), her bir zaman adımında iteratif olarak çözülmektedir.

5.5. Akış Alanı Modeli ve Çözüm Ağı (Grid) Yapısı

Ergimiş plastiğin kalıp boşluğundaki üç boyutlu akış davranışı Şekil 4.6'da görülen plastik parça modeline ait akış alanında analiz edilmiştir. Üç boyutlu plastik ürün

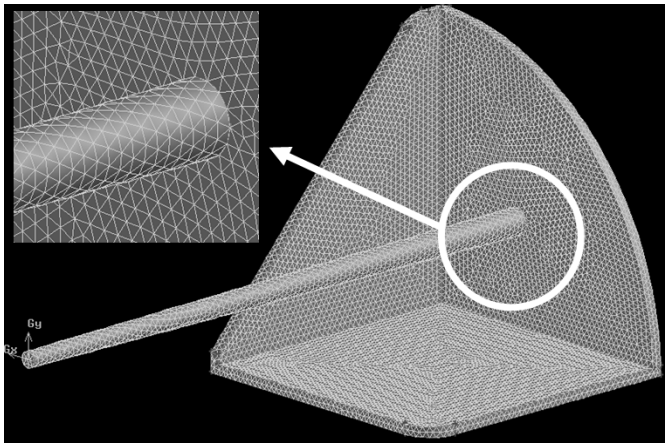
geometrisi, 90x90x90 mm boyutlarında bir küpten elde edilmiş olup genel ölçüleri Şekil 5.6'da verilmiştir.



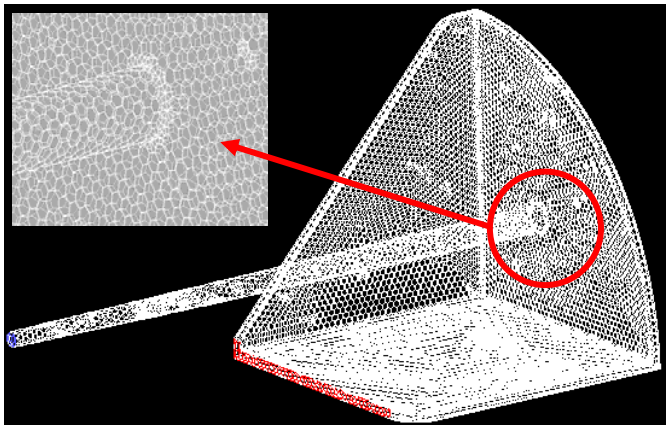
Şekil 5.6. Analizlerde kullanılan plastik parça modeli

Şekil 5.6'dan görüleceği gibi, numunelerin et kalınlığı 3 mm'dir. Doğrudan giriş tipinin kullanıldığı parçada, yolluk 190 mm uzunluktadır. Yolluğun küçük çapı 5 mm ve koniklik açısı 1 derecedir.

Akış alanı, sayısal analiz için sonlu sayıda hacimlere ayrılmıştır. Bu işlem sonunda akış alanı içerisinde 40651 adet tetrahedral dört yüzlü hücre (Şekil 5.7-a) ve 13039 adet düğüm noktası oluşturulmuştur. FLUENT hücre yüzeyi merkezli çözümler yaptığından, çözümün daha kararlı olması ve daha kısa çözüm süresi için tetrahedral hücreler, bal peteği biçiminde 8 yüzlü polyhedral hücre yapısına çevrilmiştir (Şekil 5.7-b).



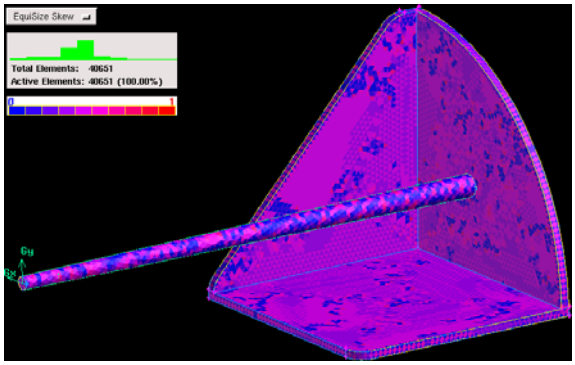
a)



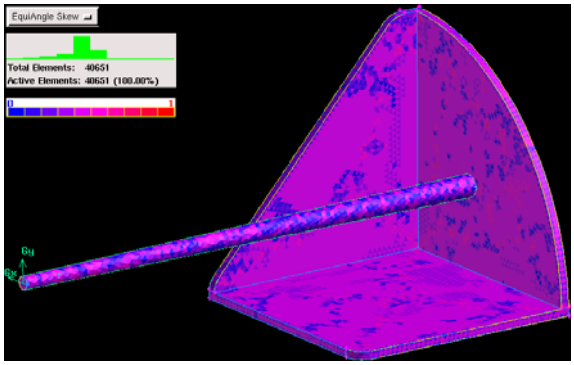
b)

Şekil 5.7. Akış alanının sonlu hacimlere bölünmesi ve çözüm ağı
c) Akış alanının dört yüzlü (tetrahedral) hücrelere bölünmesi
d) Dört yüzlü hücrelerin 8 yüzlü polyhedral hücrelere döndürülmesi.

Sayısal çözüm sonuçlarının kararlılığını ve güvenilirliğini etkileyen en önemli parametrelerden biri de çözüm ağının yapısı ve çözüm ağındaki hücrelerin kalitesidir. Oluşturulan çözüm ağındaki hücrelerin kalitesi, düğüm noktalarının dağılımı, hücrelerin çarpıklığı (skewness) ve kenar uzunlukları arasındaki oran (aspect ratio) ile belirlenmektedir. Çözüm ağındaki hücreler kalite bakımından incelendiğinde boyutsal ve açısal en büyük çarpıklık 1'dir (Şekil 5.8). Kenar uzunlukları arasındaki oran en fazla 6 olup, en büyük kenar uzunluk değerine sahip oran hücrelerin sayısı ise oldukça azdır (Şekil 5.9).

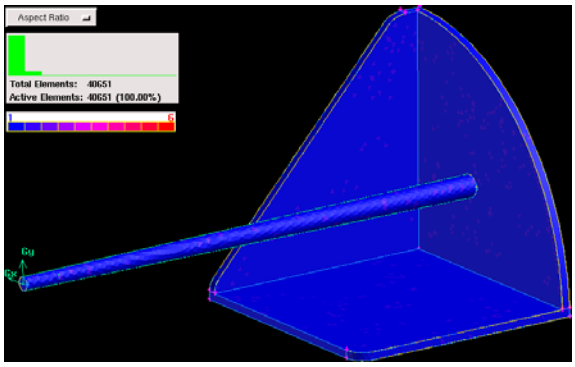


a)



b)

Şekil 5.8. Çözüm ağındaki hücrelerin çarpıklık analizi sonucu
a) Boyutsal çarpıklık b) Açısal çarpıklık



Şekil 5.9. Çözüm ağındaki hücrelerin kenar uzunlukları oranı analizi sonucu

Sayısal çözüm, farklı sayıdaki hücre sayıları için ayrı ayrı gerçekleştirilmiş olup sonucun değişim göstermediği en az hücre sayısının 22120 olduğu tespit edilmiştir. Böylece, çözümün hücre sayısından bağımsız olması sağlanmıştır. Farklı hücre sayıları için yapılan analizlerden elde edilen dolum süresi sonuçları, Çizelge 5.2'de verilmiştir.

Çizelge 5.2. Hücre sayısının dolum süresine etkisi (T=170^{o}C, p=3 MPa)

	Hücre sayısı	18370	22120	30640	34782	40651
Dolum süresi, s	A.Y.PE	5,344	5,200	5,202	5,202	5,202
	Y.Y.PE	6,924	6,600	6,606	6,604	6,604
Dolan hacim, %	PS	34,65	32,75	32,82	32,82	32,80

Polyhedral hücre dönüşümü yapıldığında elde edilen hücre sayısı 23337 olup, hücre sayısından bağımsız analizler için kabul edilebilir sınırlardadır. Bu azalan hücre sayısı, çözüm zamanının kısalması açısından çok faydalı olmaktadır. Zamana bağlı problemlerin çözümünde, zaman adım artışları çözümün doğruluğunu ve kararlılığını etkileyen diğer bir önemli parametredir [89, 98]. Bu çalışmada, zaman adımı (Δt) Eş. 5.30 ile ifade edilen Courant sayısına göre belirlenmiştir. VOF yönteminin kullanıldığı analizlerde, Courant sayısının 0,5'den küçük alınması önerilmektedir. Yapılan analizlerdeki hız, kullanılan hücre kenar uzunluk değerleri ve Courant sayısı için 0,25 değeri kullanılarak zaman adımının 0,0005 s'den küçük olması gerektiği Eş. 5.30 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$CO = \frac{u\Delta t}{\Delta x} \tag{5.30}$$

Burada u hızı, Δt zaman adımını ve Δx grid kenar uzunluğunu temsil etmektedir. Çalışma kapsamında yapılan analizlerde, zaman adımı değeri çözümün başlangıcında 0,00001 s alınmış yakınsama sonucundaki artık değerler 10^{-5} olduğunda, zaman adımı 0,0005 s'ye kadar artırılmıştır. Böylece, çözüm zamanından tasarruf edilmiştir.

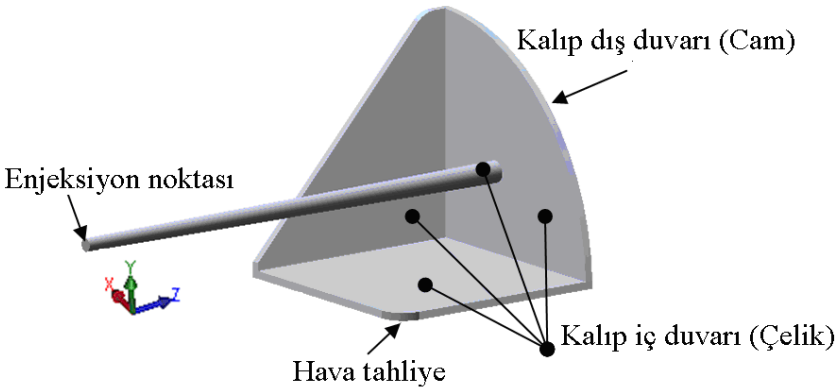
5.6. Sınır Şartları

Enjeksiyonla kalıplamada dolum anının sayısal analizlerinde kullanılan sınır şartları Şekil 5.10'da görülmektedir.

- Enjeksiyon noktasında; $T=T_{enj}$, $V=V_{enj}$, $p=p_{enj}$ alınmıştır.
- Hava tahliye noktasında; $T=T_{atm}$, $p=p_{atm}$ alınmıştır.
- Kalıp iç ve dış duvarlarında kaymanın olmadığı kabul edilmiş olup, kalıp dış

duvarında $T=T_{dd}$ ve kalıp iç duvarında $T=T_{id}$ alınmıştır. Ayrıca, kalıp iç ve dış duvarlarında $\frac{\partial p}{\partial n}=0$ alınmıştır.

- Akış cephesinde; $p=p_{atm}$ alınmıştır.



Şekil 5.10. Sayısal çözümde kullanılan sınır şartları

6. BULGULAR VE TARTIŞMA

Plastiklerin enjeksiyonla kalıplanmaları sırasında, dolum aşamasının üç boyutlu incelendiği tez kapsamında yapılan çalışmalar, teorik ve deneysel olmak üzere iki aşamada gerçekleştirilmiştir.

Deneysel çalışmalar iki aşamadan meydana gelmektedir ve birinci aşamayı malzeme özelliklerinin belirlenmesi oluşturmaktadır. Deneylerin birinci aşamasında, teorik analizlerde kullanmak üzere, A.Y.PE, Y.Y.PE ve PS malzemelerinin yoğunluk, ısı iletim katsayısı ve viskozite değişimleri deneysel olarak tespit edilerek, malzemelerin karakterizasyonu yapılmıştır. Deneylerden elde edilen verilerin (viskozite, yoğunluk, ısı iletim katsayısı) temel akış denklemlerinde kullanılabilmesi, ancak elde edilen sonuçların matematiksel olarak modellenmeleri ile mümkün olabilmektedir. Elde edilen modeller, malzemelerin fiziksel ve reolojik özellik modelleri olarak adlandırılmaktadırlar. Bu çalışmada, yapılan deneylerden elde edilen fiziksel ve reolojik özelliklere ait veriler, regresyon analizi yapılarak, deneysel verileri ifade eden matematiksel modeller elde edilmiştir. Deneylerin ikinci aşamasında ise, teorik analizlerde kullanılmak üzere elde edilen malzeme verilerinin ve teorik analiz için tercih edilen sayısal yöntemin, hangi oranda başarılı olduğunun belirlenmesi için, üç boyutlu kalıp boşluğunun gerçek zamanlı görüntülenmesi yapılmıştır.

Teorik çalışmada, deneysel verilerin dolum aşamasında üç boyutlu akışa etkileri, sonlu kontrol hacmi yöntemine göre çözüm yapan FLUENT yazılımı ile analiz edilmiştir. Üç boyutlu akış cephesi davranışının VOF yöntemi ile tespit edildiği analizlerde, dolum sırasında zamana bağlı olarak meydana gelen fiziksel ve reolojik özelliklerdeki değişimler ve bu değişimlerin akışa etkileri, basınç ve sıcaklık değişkenlerine bağlı olarak analiz edilmiştir.

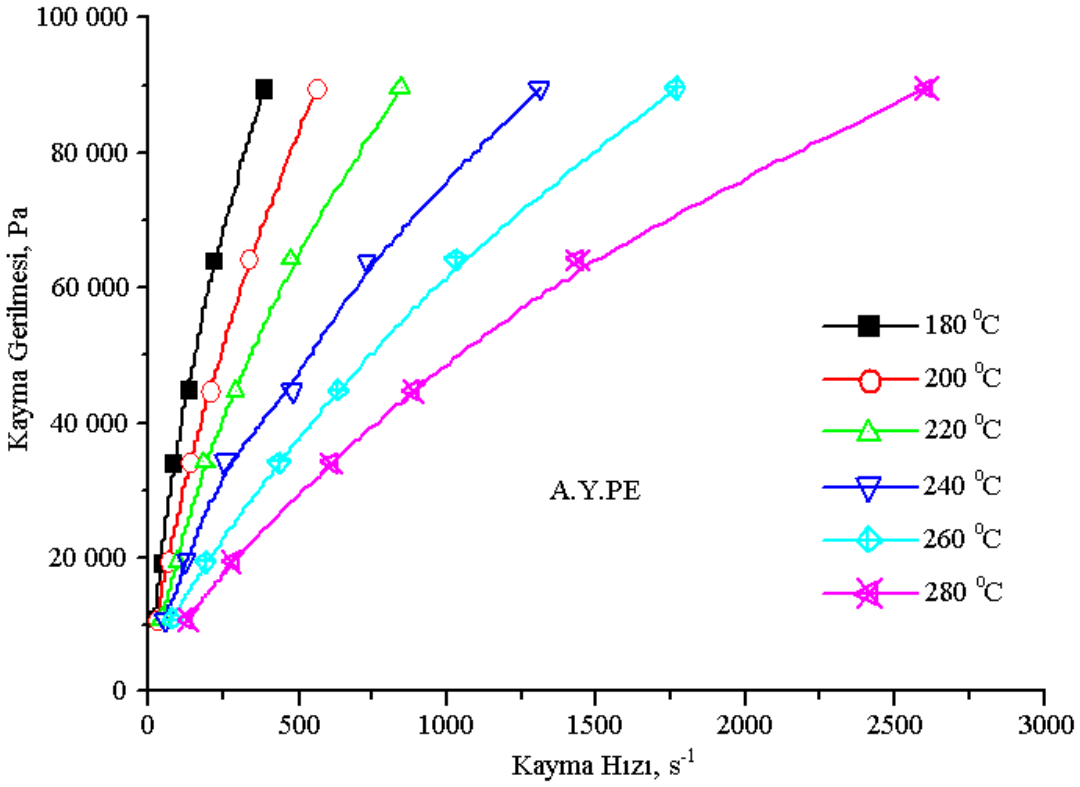
Elde edilen deneysel ve teorik bulgular ve değerlendirmeleri, bu bölümde aşağıdaki akış içerisinde verilmiştir.

6.1. Ergiyik Plastiklerin Fiziksel ve Reolojik Özellik Modellerinin Türetilmesi

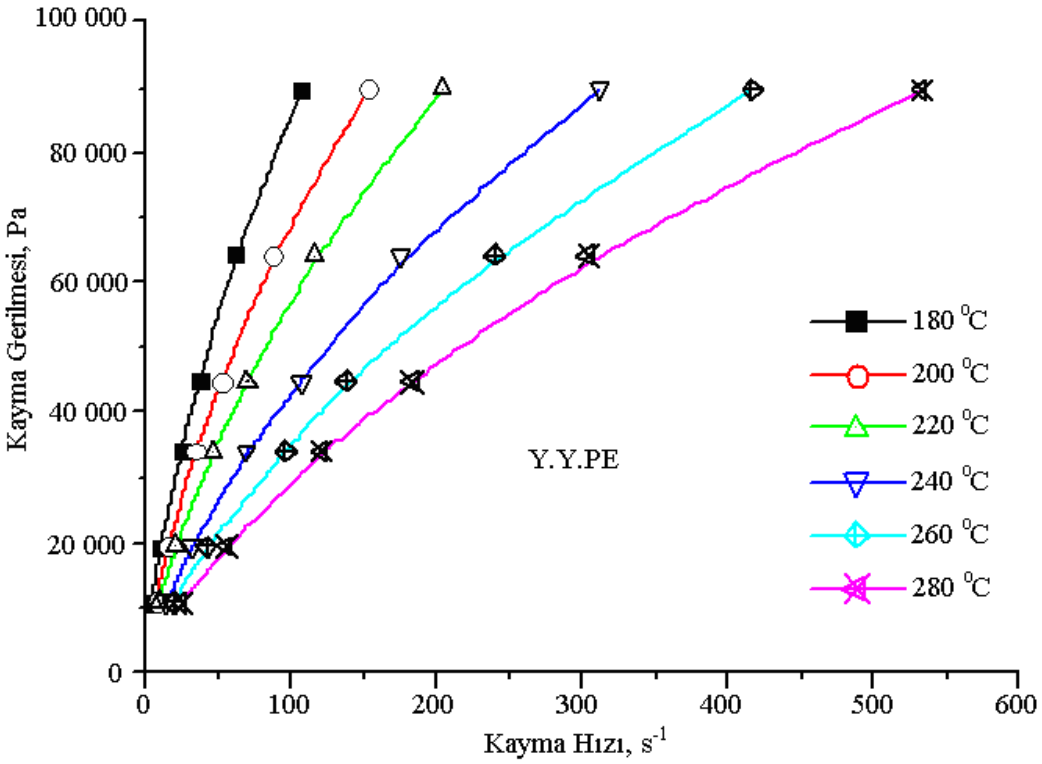
6.1.1. Deneysel verilerden viskozite modellerinin türetilmesi

Çalışma kapsamında kullanılan A.Y.PE, Y.Y.PE ve PS malzemelerinin viskoziteleri EAİ cihazı kullanılarak tespit edilmiştir. Her üç plastik malzeme için viskozite, enjeksiyonla kalıplama analizi yapan paket yazılımlarda da önerildiği gibi 180^{o}C-280^{o}C arasında değişen altı (6) farklı sıcaklık ve 165,4-1379,9 Pa arasında değişen altı (6) farklı basınç değeri için deneysel olarak tespit edilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda elde edilen akış eğrilerinden (Flow curve, Kayma gerilmesi-kayma hızı grafiği) çalışma kapsamında kullanılan plastik malzemelerin, Newtonian olmayan ve kayma incelmesi gösteren akış özelliğine sahip oldukları görülmektedir (Şekil 6.1-6.3). Şekil 6.1-Şekil 6.3' de görülen grafiklerde, deneysel verilerin nasıl bir eğilim gösterdiğinin belirtilebilmesi için veriler bir eğri uydurularak birleştirilerek gösterimi tercih edilmiştir. Eğri uydurma işleminden elde edilen eğrinin matematiksel ifadesi bu çalışmada dikkate alınmamıştır.

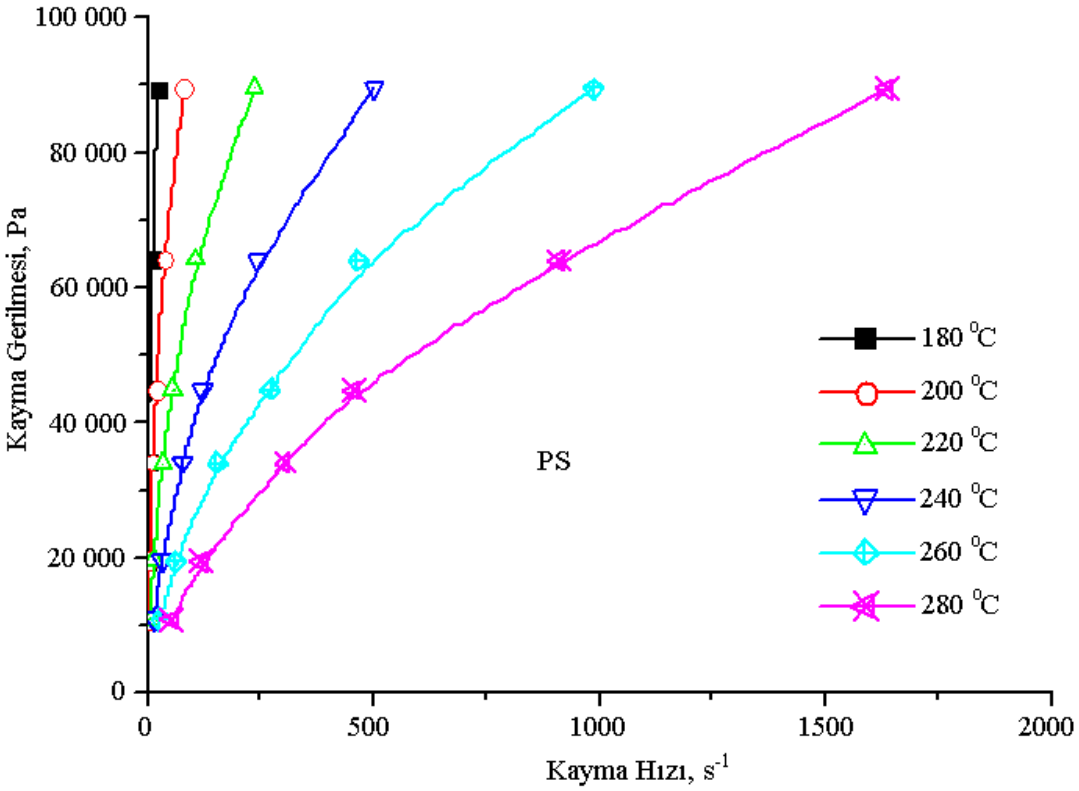
Akışkanın Newtonian özellikte olup olmadığına akış üs (akış davranışı) sabitine bakılarak karar verilmektedir. Akış üs sabiti akış eğrisinin (logaritmik olarak çizilerek doğrusallaştırılan akış eğrisinin) eğimi olup "*n*" simgesi ile gösterilmektedir. Newtonian akış özelliğine sahip olan akışkanlar için $n = 1$ dir. Newtonian olmayan akışkanlar için $n \neq 1$' dir. Newtonian olmayan akışkanlarda eğer $n < 1$ ise kayma incelmesi (viskozitenin azalması), $n > 1$ ise kayma kalınlaşması (viskozitenin artması) davranışı sergileniyor anlamına gelmektedir. Termoplastik malzemeler kayma incelmesi davranışı sergilemektedirler [1, 5, 6, 8, 9, 11, 12].



Şekil 6.1. A.Y.PE plastik malzemesine ait akış eğrileri



Şekil 6.2. Y.Y.PE plastik malzemesine ait akış eğrileri



Şekil 6.3. PS plastik malzemesine ait akış eğrileri

EAİ cihazından elde edilen kayma hızı değerleri görünür değer olup görünen kayma hızı ($\dot{\gamma}_g$) olarak adlandırılmaktadır. EAİ cihazında, uygulanan basınç sonrasında oluşan hız ve hıza bağlı olarak yer değiştirme miktarı ölçülmektedir. Ölçülen yer değiştirme miktarı kullanılarak debi hesaplanmaktadır. Bu debi değeri, nozul yüzeyindeki (duvardaki) kayma hızının (Eş 6.1) elde edilmesi için kullanılmaktadır. Uygulanan basınçta nozul boyunca düşme olmadığı kabulü ile birlikte ($\Delta p = p$) nozul yarıçapı (R) ve nozul uzunluğuna (L) ait geometrik değerler kullanılarak Newtonian bir akışkan için silindir içindeki akışta duvardaki kayma gerilmesi (τ) Eş. 6.2 ile hesaplanmaktadır. Dolayısı ile elde edilen değerler Newtonian bir akışkan için gerçek değerler olup, Newtonian olmayan bir akışkan için bu değerler görünür değerler olarak adlandırılmaktadır. Görünür kayma hızı ve duvardaki kayma gerilmesi kullanılarak hesaplanan viskozite de Newtonian viskozite olup görünür viskozite olarak adlandırılmaktadır (η_g). Gerçek viskozite değerinin elde edilmesi için görünür kayma hızının Rabinowitsch yaklaşımı (Eş. 6.3) ile düzeltilmesi gerekmektedir. Rabinowitch yaklaşımı, duvardaki kayma hızının herhangi bir hız profili gerekmeksizin hesaplanabilmesini sağlamaktadır. Ayrıca, Rabinowitch yaklaşımı, Newtonian ve Newtonian olmayan akışkanların kayma hızları arasındaki farkı da göstermektedir. Düzeltilen kayma hızı ($\dot{\gamma}_d$) Eş. 6.4'de yerine yazılarak düzeltilmiş gerçek viskozite (η_d) elde edilmiştir [11].

$$\dot{\gamma}_g = \frac{4Q}{\pi R^3} \tag{6.1}$$

$$\tau = \frac{\Delta pR}{2L} \tag{6.2}$$

$$\dot{\gamma}_d = \dot{\gamma}_g \left(\frac{3n+1}{4n} \right) \tag{6.3}$$

$$\eta_d = \frac{\tau}{\dot{\gamma}_d} \tag{6.4}$$

Tez çalışması kapsamında elde edilen görünür kayma hızı değerleri Rabinowitch yaklaşımı dikkate alınarak düzeltilmiştir. Düzeltilen kayma hızları yardımıyla gerçek viskozite değerleri hesaplanmıştır. Çizelge 6.1'de 220^{o}C sıcaklık değeri için, görünen ve düzeltilen kayma hızı ve viskozite değerleri örnek olarak verilmiştir. Deneylerden elde edilen görünen kayma hızı değerleri düzeltilen değerlerden daha yüksektir. Bunun bir sonucu olarak düzeltilmiş gerçek viskozite değerleri ise azalmaktadır. A.Y.PE, Y.Y.PE ve PS malzemeleri için deneysel elde edilen viskozite değerlerinin tümü EK-3'de verilmiştir.

Çizelge 6.1. 220 ^{o}C için görünen ve düzeltilmiş kayma hızı ve viskozite değerleri

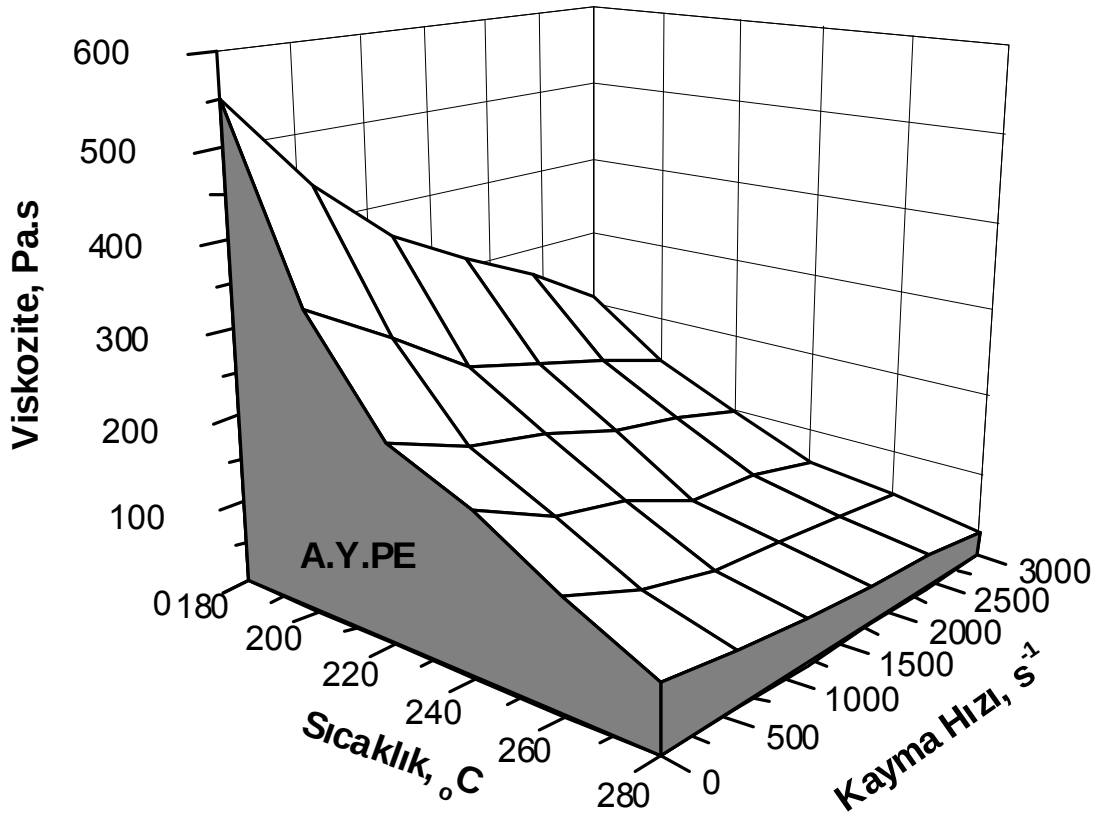
Malzeme	**Kayma Gerilmesi, Pa (τ)**	**Kayma Hızı, s^{-1} ($\dot{\gamma}$)**		**Viskozite, Pa.s (η)**	
		Görünür ($\dot{\gamma}_g$)	**Düzeltilmiş ($\dot{\gamma}_d$)**	**Görünür (η_g)**	**Düzeltilmiş (η_d)**
A.Y.PE	10758,5	44,1	48,2	244,4	223,1
	19365,3	95,4	104,4	202,9	185,4
	34068,6	185,8	203,3	183,5	167,6
	44827,1	291,1	318,6	154,5	140,7
	64192,3	477,1	522,2	134,6	122,9
	89654,1	841,8	921,3	106,5	97,3
Y.Y.PE	10758,5	9,5	10,6	1127,8	1015,1
	19365,3	20,7	23,0	934,1	841,4
	34068,6	46,6	51,8	730,3	657,8
	44827,1	70,0	77,7	640,1	576,7
	64192,3	116,2	129,0	552,3	497,5
	89654,1	204,1	226,5	439,4	395,8
PS	10758,5	6,0	7,1	1792,0	1517,4
	19365,3	13,6	16,0	1427,6	1209,5
	34068,6	33,8	39,9	1008,0	854,3
	44827,1	56,6	66,8	792,1	671,0
	64192,3	105,7	124,7	607,6	514,7
	89654,1	235,3	277,7	383,0	322,9

Kılcal reometre kullanılarak yapılan deneylerden elde edilen viskozite değerleri, kılcalın boyu uzun olduğundan, kayma viskozitesi ve uzama viskozitesi değerlerinin birleşiminden oluşmaktadır. Uzama viskozitesi, ergiyik plastik basınç etkisiyle büyük çaplı silindirden küçük çaplı orifise girerken meydana gelmektedir. Uzama

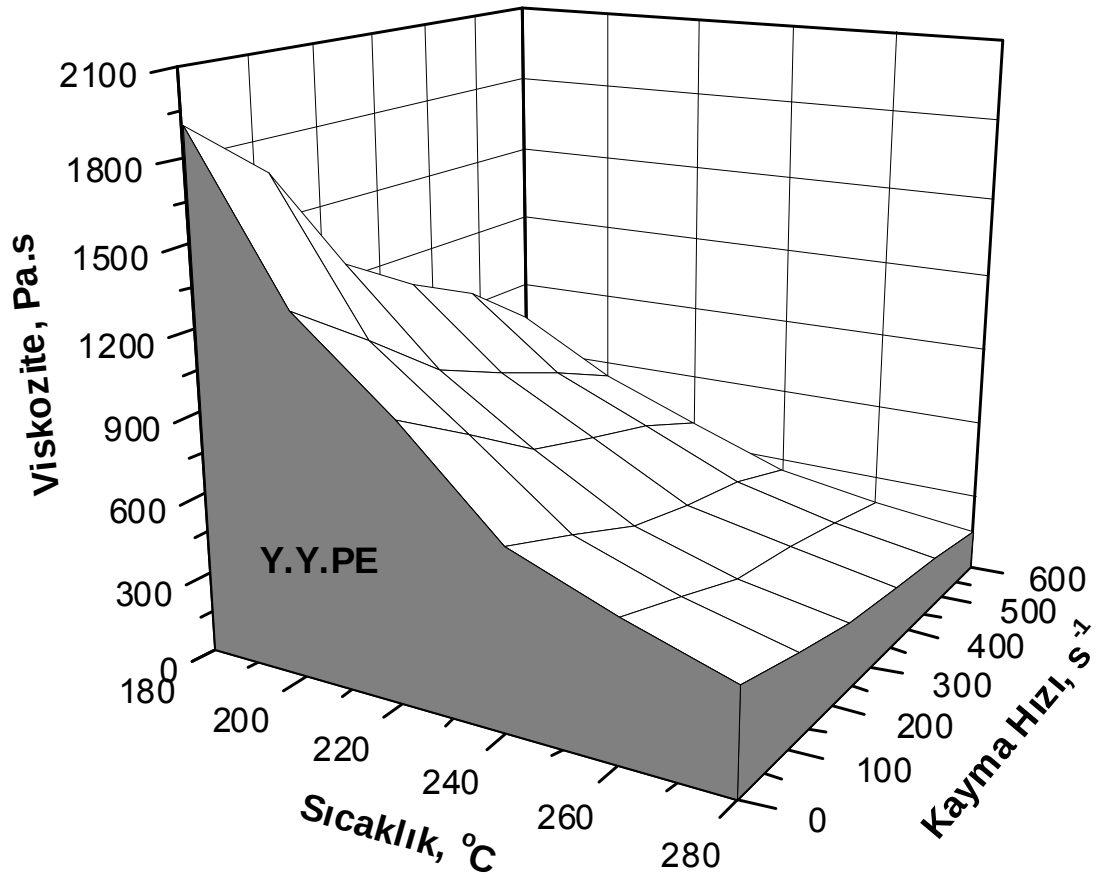
viskozitesi nedeni ile orifis boyunca bir basınç kaybı meydana gelmekte ve dolayısıyla kayma gerilmesinin düzeltilmesi gerekmektedir. Bu basınç kaybı, Bagley yaklaşımı uygulanarak düzeltilmiş kayma gerilmesi hesaplanmasında kullanılmaktadır. Bu doktora çalışmasında viskozite, EAİ cihazı kullanılarak elde edilmiştir. EAİ cihazının nozulu 8 (sekiz) mm yüksekliğe sahip olduğundan, bu mesafe boyunca olacak basınç kaybı ihmal edilmiş ve dolayısı ile uzama viskozitesinin akışı etkileyecek kadar olmadığı kabulü yapılmıştır. Düzeltilen kayma hızı ve sıcaklığa bağlı olarak elde edilen viskozite değişim grafiklerinden (Şekil 6.4-Şekil 6.6) de görüleceği üzere, kayma hızı ve sıcaklıktaki artış, viskozitenin parabolik olarak azalmasına sebep olmaktadır.

Şekil 6.4-Şekil 6.6 incelendiğinde, viskozite üzerinde sıcaklığın kayma hızından daha fazla etkili olduğu görülmektedir. Özellikle amorf yapıya sahip olan PS malzemesine ait grafik (Şekil 6.6) incelendiğinde, sıcaklığın 240^{o}C'nin üzerine çıkması ile birlikte ergiyik plastiğin viskozite değişiminin oldukça azaldığı ve Newtonian olmayan davranıştan Newtonian davranışa doğru bir geçiş olduğu görülmektedir.

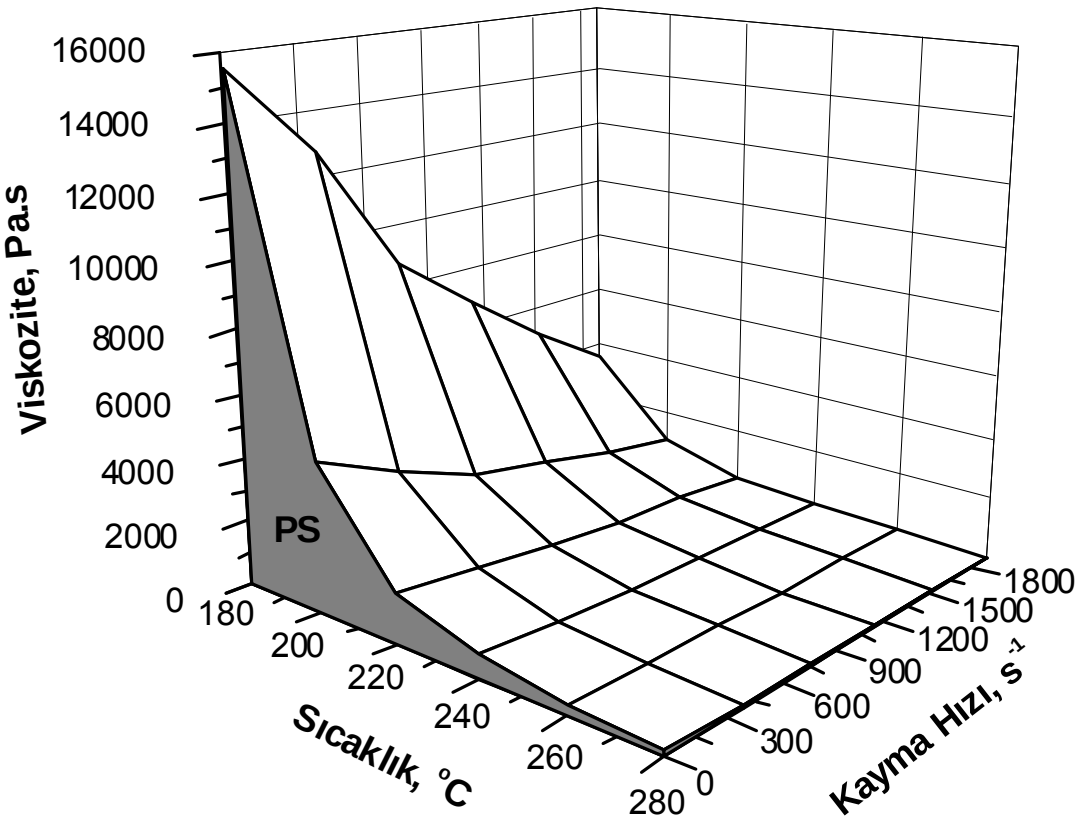
Elde edilen veriler istatistiksel açıdan değerlendirildiğinde de viskozite üzerinde sıcaklığın kayma hızından daha fazla etkili olduğu görülmektedir. Deneyler sırasında kayma hızını oluşturan unsur basınç olduğu için, istatistiksel değerlendirmede basınç faktörü kullanılmıştır. İstatistiksel incelemede kullanılan tüm faktörler Çizelge 6.2'de verilmiştir.



Şekil 6.4. A.Y.PE malzemesinin viskozitesinin kayma hızı ve sıcaklıkla değişimi



Şekil 6.5. Y.Y.PE malzemesinin viskozitesinin kayma hızı ve sıcaklıkla değişimi



Şekil 6.6. PS malzemesinin viskozitesinin kayma hızı ve sıcaklıkla değişimi

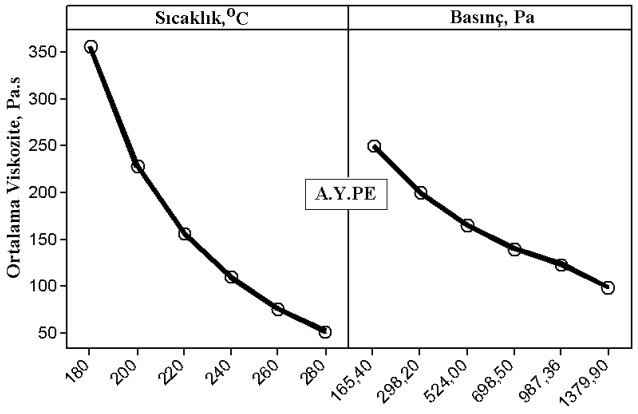
Şekil 6.7'de A.Y.PE malzemesinin viskozitesine basınç ve sıcaklığın etkileri görülmektedir. Grafik incelenecek olursa, 180^{o}C-200^{o}C sıcaklık değerleri arasında viskozite keskin olarak azalmaktadır. Belirtilen bu sıcaklık değerleri arasındaki viskozite değişimi üzerinde basıncın bir etkisi yokmuş gibi görülmektedir. Bu sıcaklık aralığından sonraki kısımlar incelendiğinde basınç ve sıcaklık etkilerinin aynı oranda etkili olduğu görülmektedir. Çizelge 6.3'de verilen varyans analizi sonuçlarına bakıldığında ve kareler toplamı (KT), kareler ortalaması (KO) ve F (Fischer katsayısı) katsayıları incelendiğinde, sıcaklığın viskozite üzerinde basınçtan ve dolayısı ile kayma hızından daha fazla etkili olduğu görülmektedir.

Çizelge 6.2. A.Y.PE, Y.Y.PE ve PS malzemelerinin viskozitelerine sıcaklık ve basıncın etkilerinin istatistiksel olarak incelenmesinde kullanılan faktörler

Faktör	**Tip**	**Derece**	**Değer**
Sıcaklık, ^{o}C	Sabit	6	180; 200; 220; 240; 260; 280
Basınç, Pa	Sabit	6	165,40; 298,20; 524,00; 689,50; 987,36; 1379,90

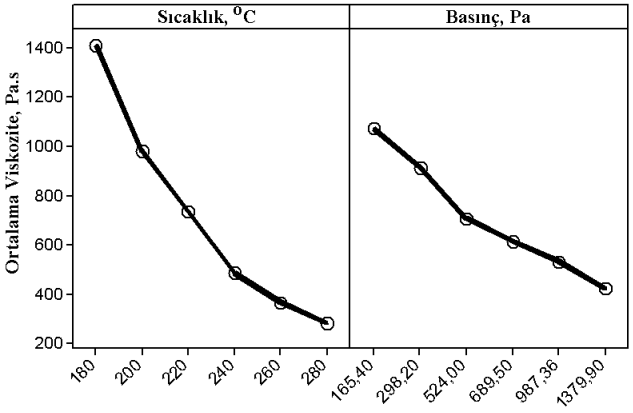
Çizelge 6.3. A.Y.PE malzemesinin viskozitesi için varyans analizi sonuçları

	SD	**KT**	**KO**	**F**
Sıcaklık	5	387293	77459	51,14
Basınç	5	91236	18247	12,05
Hata	25	37868	1515	
Toplam	35	516397		



Şekil 6.7. A.Y.PE malzemesinin viskozitesine basınç ve sıcaklığın etkisi

Y.Y.PE malzemesinin viskozitesine de sıcaklığın etkisi basınçtan daha fazla olmuştur. Şekil 6.8 ve Çizelge 6.4 incelendiğinde, sonuçların A.Y.PE için açıklananlarla benzer olduğu görülmektedir. Bu durumun aynı olması, A.Y.PE ve Y.Y.PE malzemelerinin yarı kristalin yapıya sahip olmalarından kaynaklandığına atfedilmiştir. Viskozite değerlerinin ve viskozite değişim miktarlarının birbirinden farklı olmasının sebebinin de molekül ağırlıklarının farklı olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.



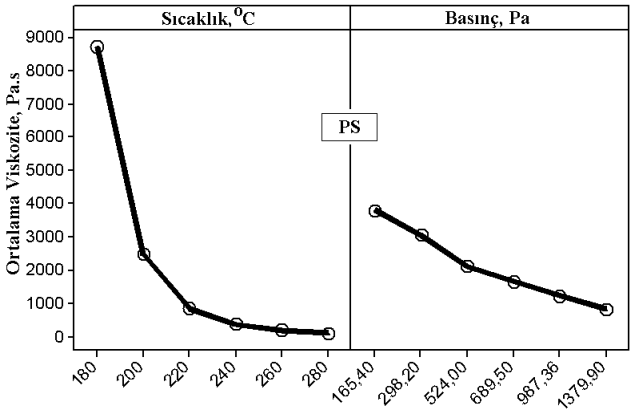
Şekil 6.8. Y.Y.PE malzemesinin viskozitesine basınç ve sıcaklığın etkisi

Çizelge 6.4. Y.Y.PE malzemesinin viskozitesi için varyans analizi sonuçları

	SD	KT	KO	F
Sıcaklık	5	5512632	1102526	49,48
Basınç	5	1764818	352964	15,84
Hata	25	557027	22281	
Toplam	35	7834477		

Şekil 6.9 incelendiğinde, PS malzemesinin viskozitesi üzerinde sıcaklığın basınçtan daha etken olduğu açıkça görülmektedir. Özellikle 180^{o}C–200^{o}C sıcaklık aralığında viskozitenin basıncın etkisi olmaksızın aniden düşüş göstermesi bu durumun en belirgin göstergesidir. 200^{o}C–240^{o}C aralığında basınç ve sıcaklığın viskozite üzerindeki etkisi hemen hemen benzer olmakla birlikte 240^{o}C'nin üzerindeki sıcaklıklarda viskozite üzerinde sıcaklığın etkisinin azalmaya başladığı görülmektedir. Çizelge 6.5'de verilen varyans analizi sonuçlarına bakıldığında

basıncın etkisinin anlamlılığının % 95'lik güvenilirliğin dışında kaldığı görülmektedir (P>0,05).



Şekil 6.9. PS malzemesinin viskozitesine basınç ve sıcaklığın etkisi

Çizelge 6.5. PS malzemesinin viskozitesi için varyans analizi sonuçları

	SD	KT	KO	F
Sıcaklık	5	337325614	67465123	20,96
Basınç	5	38324178	7664836	2,38
Hata	25	80487647	3219506	
Toplam	35	456137440		

Yarı kristalin yapıya sahip A.Y.PE için elde edilen varyans analiz sonuçlarındaki katsayılara (KT, KO, F) bakıldığında sıcaklık için elde edilen değerler basınç için elde edilen değerlerden yaklaşık 4,25 kat fazladır. Y.Y.PE için elde edilen varyans analizi sonuçlarına bakıldığında ise katsayılar arasındaki oranın yaklaşık 3,124 kat olduğu görülmektedir. Amorf yapıya sahip olan PS için elde edilen varyans analiz sonuçlarına bakıldığında ise katsayılar arasındaki oranın yaklaşık 8,8 kat olduğu görülmektedir. Bu durum da amorf yapıya sahip olan plastik malzemelerin viskozitelerinin yarı kristalin yapıya sahip plastik malzemelerin viskozitelerine nazaran sıcaklıktan daha fazla etkilendiğini göstermektedir. Ayrıca, yarı kristalin yapıya sahip Y.Y.PE malzemesinin A.Y.PE malzemesinden daha fazla kristalin yapı içerdiği anlaşılmaktadır.

Kalıp boşluğuna dolum sırasında, kayma hızı en fazla ergiyik plastiğin giriş

kanallarındaki akışı sırasında meydana gelmektedir. Katmanların birbiri üzerinden kayması şeklinde gerçekleşen kayma akışından kaynaklanan viskoz ısınma, ergiyik plastik kalıp boşluğu ve dağıtıcı kanallara oranla çok daha küçük kesite sahip olan giriş kanalından akarken soğutmanın etkisini en aza indirerek ergiyik plastiğin tamamen katılaşmasını engellemektedir.

A.Y.PE, Y.Y.PE ve PS malzemelerine ait deneysel viskozite verileri, kayma hızı ve sıcaklığa bağlı olarak Power Law viskozite modeline (Eş. 6.3) uydurulmuş ve katsayılar elde edilmiştir. Eş. 6.3'de matematiksel ifadesi verilen model, yaygın olarak tercih edilen ve genellikle sıcaklık terimlerinin ihmal edildiği Power Law viskozite modelinin aksine sıcaklık terimini de içeren halidir. Sıcaklık teriminin ihmal edilmemesi ile elde edilen model, Şekil 6.4-Şekil 6.6' da görülen ve kayma hızı ve sıcaklık olmak üzere iki parametreye bağlı değişim gösteren üç boyutlu yüzeyleri temsil edebilecek yetenektedir. Veriler Power Law viskozite modeline, çoklu doğrusal regresyon modeli kullanılarak uydurulmuştur. Bunun için, kayma hızı ve viskozitenin doğal logaritmaları alınıp veriler doğrusallaştırılmıştır. Bu işlem sonunda Eş. 6.5, Eş. 6.6 halini almıştır. Eş. 6.3'deki sıcaklık ifadesinin birimi ^{o}C cinsindendir. Model denklem (Eş. 6.5) kullanılarak deney yapılmamış şartlar için viskozitenin ara değerleri kolayca hesaplanabilmektedir.

$$\eta(\dot{\gamma},T) = m\dot{\gamma}^{n-1}\exp^{cT} \tag{6.5}$$

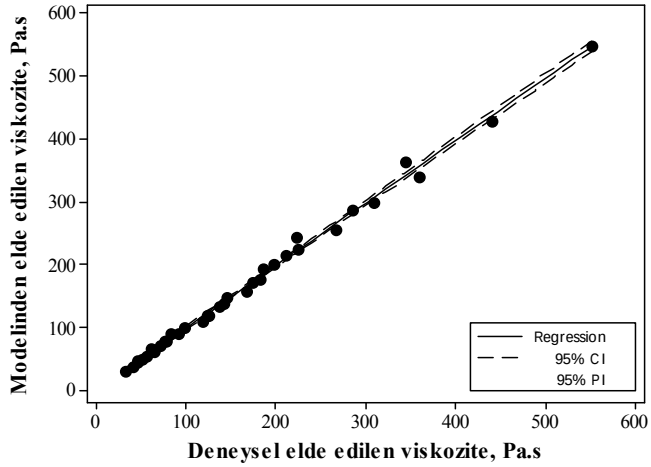
$$\ln(\eta) = \ln(m) + (n-1)\ln(\dot{\gamma}) + cT \tag{6.6}$$

Doğrusallaştırılmış denklem dikkate alınarak (Eş. 6.6) ve MINITAB programının kullanılmasıyla yapılan doğrusal çoklu regresyon analizinden elde edilen viskozite modeli katsayıları, Çizelge 6.6'da verilmiştir. Şekil 6.10-Şekil 6.12'de, regresyon modelinden elde edilen katsayılar kullanılarak hesaplanan viskozite değerleri ile deneysel olarak elde edilen (tüm sıcaklık ve basınç değerleri dahil elde edilen) viskozite değerlerinin kıyaslandığı grafikler görülmektedir. Grafikler incelendiğinde, elde edilen viskozite modellerinin deney sonuçlarını % 95'in üzerinde bir

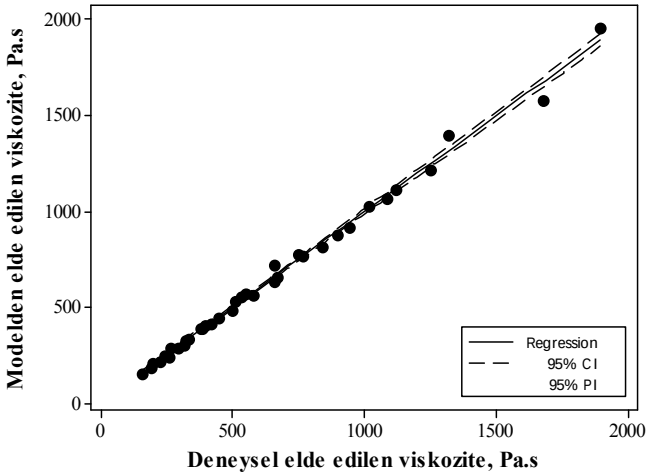
anlamlılıkla ($p<0,05$) temsil ettiği görülmektedir.

Çizelge 6.6. Power Law viskozite modeli katsayıları

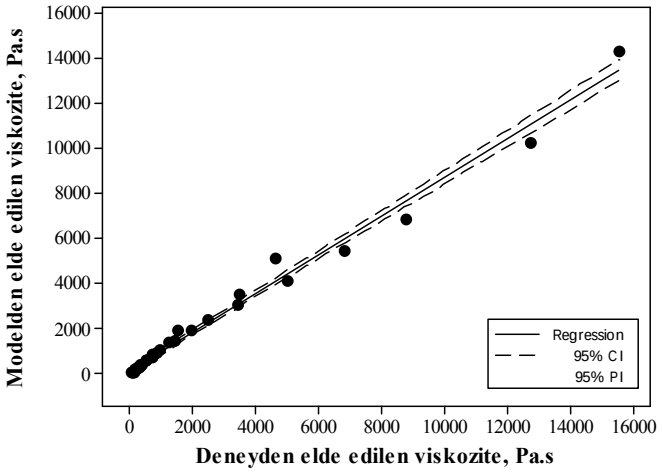
Malzeme	Power Law viskozite modeli katsayıları			
	m	***n***	***c***	$\mathbf{R^2}$
A.Y.PE	14 939,7392	0,6964	-0,0133	0,9970
Y.Y.PE	25 693,6716	0,6949	-0,0114	0,9960
PS	1 137 678,1125	0,5733	-0,0252	0,9920



Şekil 6.10. A.Y.PE için Power Law modelinden elde edilen ve deneysel elde edilen viskozite verilerinin kıyaslanması

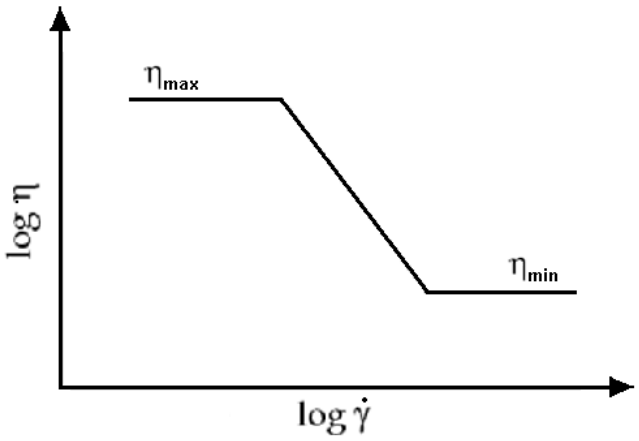


Şekil 6.11. Y.Y.PE için Power Law modelinden elde edilen ve deneysel elde edilen viskozite verilerinin kıyaslanması



Şekil 6.12. PS için Power Law modelinden elde edilen ve deneysel elde edilen viskozite verilerinin kıyaslanması

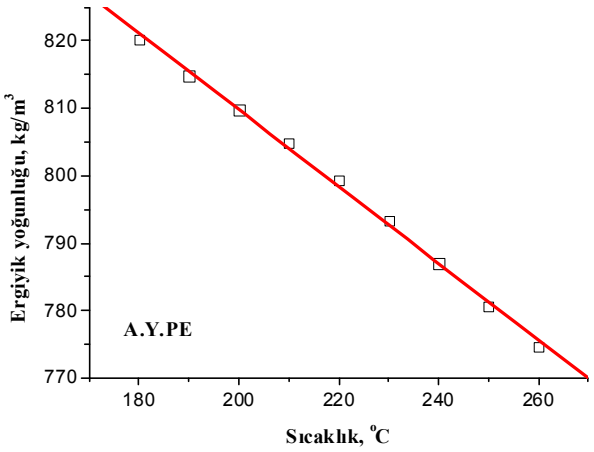
Sayısal analizler yapılırken, viskozite modelinin FLUENT yazılımında tanıtılması sırasında, Şekil 6.13'de görüldüğü gibi η_{max} ve η_{min} değerleri girilerek viskozite sınırlandırılmıştır. Böylelikle, analizler sırasındaki hesaplamalardan elde edilen ve değerleri deneysel verilerdeki sınırların dışında olan viskozite değerlerinin yerine η_{max} ve η_{min} değerlerinin alınması sağlanmıştır. η_{max} değeri olarak deneylerde elde edilen en yüksek viskozite değerleri, η_{min} değeri olarak ta deneylerden elde edilen en düşük viskozite değerleri kullanılmıştır. η_{max} sıfır kayma hızındaki viskoziteyi, η_{min} ise en büyük kayma hızındaki viskoziteyi temsil etmektedir.



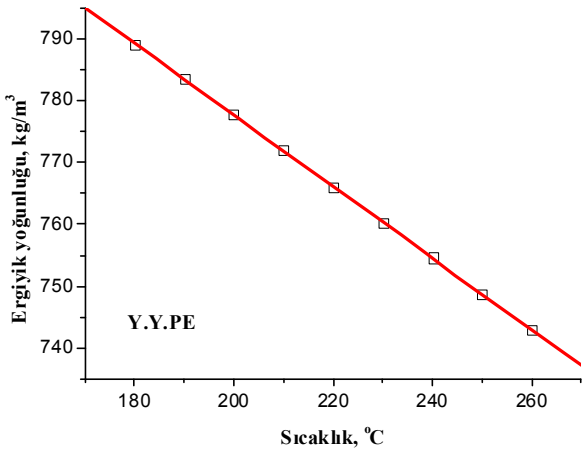
Şekil 6.13. Power Law viskozite modeli için, viskozite değerinin sınırlandırılması

6.1.2. Deneysel verilerden yoğunluk modellerinin türetilmesi

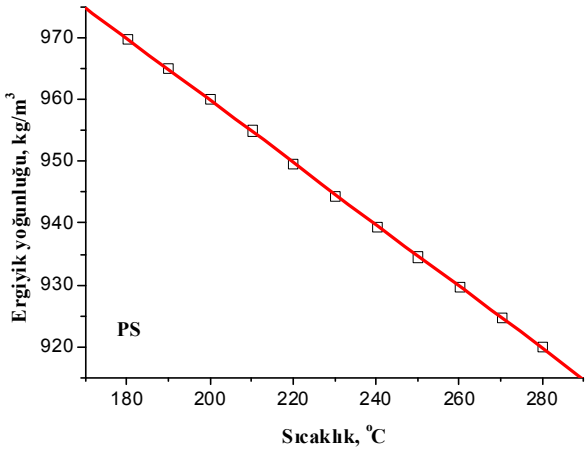
Enjeksiyonla kalıplamada, ergiyik plastik kalıp boşluğuna dolarken kalıp duvarlarına temas ederek akmaktadır. Kalıp duvarlarının soğutuluyor olması ya da kalıp boşluğuna dolan ergiyik plastiğin sıcaklığından daha düşük sıcaklık değerinde olması, ergiyik plastikten kalıp duvarlarına ısı akısının olmasını sağlamaktadır. Bu ısı alış verişi sırasında sıcaklığını kaybeden ergiyik plastik kalıp duvarlarında katılaşıp kalmakta ve akış içerisinde farklı fazların olmasına sebep olmaktadır. Akış içerisinde farklı fazların olması, akış alanı içerisinde değişken yoğunluk değerlerinin kullanılmasını gerektirmektedir. Ayrıca, çalışmada enerji denklemi de çözüleceği için, yoğunluğun sıcaklığın fonksiyonu olarak ifade edilmesi, sayısal analiz sonuçlarının daha doğru olmasını sağlayacaktır. Çalışma kapsamında kalıp boşluğunun dolum safhası incelendiğinden, yoğunluğun basınç ile değişimi ihmal edilmiş ve yoğunluk sadece sıcaklığın fonksiyonu olarak dikkate alınmıştır. Şekil 6.14-Şekil 6.16'da deneysel olarak elde edilmiş ve yoğunluğun sıcaklık ile değişimini veren grafikler görülmektedir. Şekillerden de görüleceği üzere her üç plastik malzeme için de yoğunluk sıcaklık ile ters yönde doğrusal bir ilişkiye sahiptir. Sıcaklığın artışı, ergiyik haldeki plastiğin yoğunluğunu doğrusal olarak azaltmaktadır. Deneysel olarak elde edilen yoğunluk değerleri EK-4'de verilmiştir.



Şekil 6.14. A.Y.PE malzemesinin yoğunluğunun sıcaklıkla değişimi



Şekil 6.15. Y.Y.PE malzemesinin yoğunluğunun sıcaklıkla değişimi



Şekil 6.16. PS malzemesinin yoğunluğunun sıcaklıkla değişimi

Plastik malzemelerin ergiyik haldeki yoğunlukları ve sıcaklık arasındaki ilişki, regresyon analizi uygulanarak doğrusal bir modele (Eş. 6.7) uydurularak ifade edilmiş ve elde edilen model FLUENT yazılımı ile gerçekleştirilen analizlerde kullanılmıştır. Regresyon analizi ile elde edilen doğrusal yoğunluk modellerine ait katsayılar Çizelge 6.7'de verilmiştir. Eş. 6.7'deki sıcaklık ifadesinin birimi ^{o}C cinsindendir.

$$\rho(T) = D_0 + D_1 T \tag{6.7}$$

Çizelge 6.7' den görüleceği üzere, elde edilen doğrusal yoğunluk modelleri, deneysel

verileri çok büyük doğrulukta (R^2>0,99) temsil etmektedir. Bu nedenle analizlerde dolum aşaması için güvenle kullanılmışlardır.

Çizelge 6.7. Ergiyik yoğunluk modeli katsayıları

Malzeme	**Katsayılar**		
	D_0	D_1	R^2
A.Y.PE	923,6266	-0,5696	0,998
Y.Y.PE	893,322	-0,5783	1,000
PS	1060,17	-0,5016	1,000

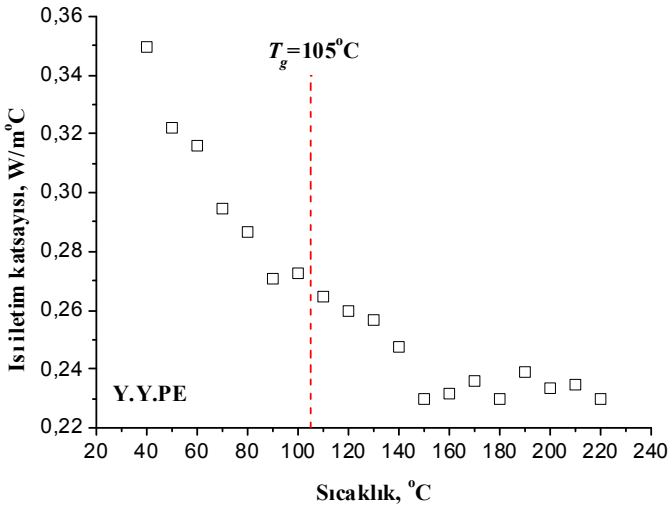
Enjeksiyonla kalıplamada, "*ütüleme*" olarak adlandırılan bir aşama bulunmaktadır. Bu aşamada, kalıp boşluğu dolduktan sonra soğutmanın etkisi ile malzemede meydana gelebilecek olan hacimsel küçülmelerin (çekme) telafisi, dolum sonrasında kalıp içi basınç düşmesinin önüne geçmek için vida baskısını devam ettirerek sağlanır. Bu baskı, giriş kanalları katılaşana kadar, kalıp boşluğuna ergiyik plastik takviyesi ile sağlanmaktadır. Ergiyik plastikler sıkıştırılabilir özellikte oldukları için, ütüleme safhasında sıkıştırma etkisi ile oluşan yoğunluk değişimleri üzerinde, ütüleme basıncı sıcaklıktan daha etkili olmaktadır. Bu nedenle, elde edilen doğrusal ergiyik yoğunluk modeli basınç terimi içermediğinden, sadece dolum safhası için kullanılması uygundur.

6.1.3. Deneysel verilerden ısı iletim katsayısı modellerinin türetilmesi

Enjeksiyonla kalıplamada dolum sırasında ergiyik plastiğin sıcaklığı zamana bağlı olarak değiştiğinden, akış alanı içerisindeki aynı noktada zamana bağlı olarak farklı özelliklerin gelişmesine sebep olmaktadır. Farklı özelliklere sahip akış katmanlarının oluşması ve dolum sırasında fıskiye tipi akışın gerçekleşmesi sonucunda ergiyik plastiğin kalıp duvarlarına doğrudan teması olmamaktadır. Ergiyik plastik katılaşmış katmanların arasından akmaktadır. Bu sırada ergiyik ile kalıp duvarları arasındaki ısı alış verişi de doğrudan temasla olmayıp arada yalıtım vazifesi gören katılaşmış katman üzerinden gerçekleşmektedir. Katılaşan katmanın da sıcaklığı zamana bağlı

olarak değiştiğinden, doğru bir ısı transferi hesaplaması için, plastik malzemenin sıcaklığa bağlı ısı iletim katsayısının bilinmesi gerekmektedir.

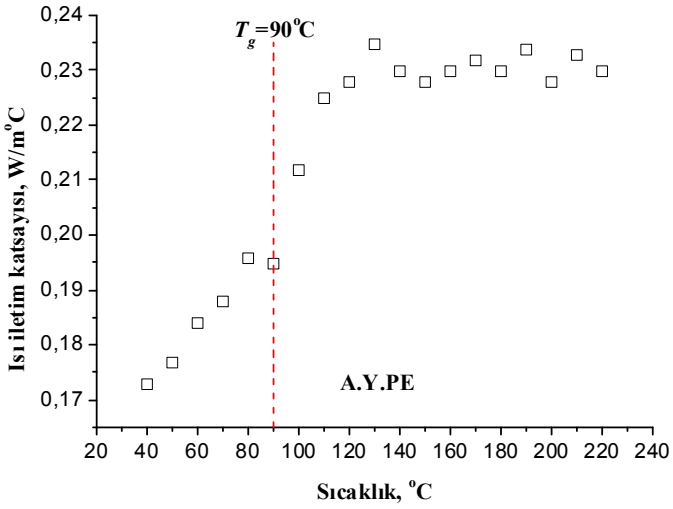
Doktora çalışmasında, sıcaklığa bağlı ısı iletim katsayısı değişiminin ölçülebileceği test düzeneği imal edilmiştir. İmal edilen cihazın kalibrasyonu, ısı iletim katsayısının sıcaklıkla değişimi bilinen bakır malzemenin test edilmesi ile gerçekleştirilmiştir. Kalibrasyon sırasında, cihazdan elde edilen sıcaklık değerlerine göre yapılan hesaplamalardan elde edilen ısı iletim katsayısı değerlerinin önceden bilinen değerlerden % 1,02 oranında sapma gösterdiği görülmüştür. Bu nedenle, çalışmada kullanılan plastik malzemelerin sıcaklığa bağlı ısı iletim katsayıları % 1,02 sapma oranı kullanılarak düzeltilmiştir. Çalışmada kullanılan plastik malzemelerin sıcaklığa bağlı olarak ısı iletim katsayılarına ait veriler bulunmadığından, elde edilen tüm değerlerin doğruluğunun kıyaslaması yapılamamıştır. Fakat çalışmada kullanılan plastik malzemelerin ait oldukları sınıfa ait değişik ticari markalı ürünler için kaynak taramasından elde edilen ısı iletim katsayılarının, deneysel olarak elde edilen değerler aralığında olması, elde edilen sonuçların doğru olduğunun bir göstergesi olarak kabul edilmiştir. Çalışmada kullanılan plastik malzemeler için yapılan deneylerden elde edilen verilere ait grafikler Şekil 6.17–Şekil 6.19'da görülmektedir. Y.Y.PE malzemesi 105^{o}C, A.Y.PE malzemesi 90^{o}C ve PS malzemesi ise 94^{o}C'den sonra ergiyik hale gelmekte olup bu sıcaklık değerleri camsı geçiş sıcaklığıdır.



Şekil 6.17. Y.Y.PE malzemesinin ısı iletim katsayısının sıcaklıkla değişimi

Şekil 6.17 incelendiğinde, Y.Y.PE malzemesinin ısı iletim katsayısının 150^{o}C sıcaklık değerine kadar azaldığı ve bu sıcaklık değerinden sonra çok küçük değişimlerim meydana geldiği görülmektedir. Y.Y.PE için elde edilen veriler üç gruba ayrılarak analizlerde kullanılmak üzere sıcaklığa bağlı ısı iletim katsayısı modeli elde edilmiştir. Birinci grupta 40^{o}C $\leq$ T $\leq$150^{o}C arasındaki sıcaklığa bağlı azalma gösteren veriler alınmıştır. Bu veriler, doğrusal bir modele uydurulmuş ve modele ait katsayılar elde edilmiştir. 150^{o}C'nin üzerindeki sıcaklıklar için ısı iletim katsayısı sabit alınmıştır ve değeri k(T>150^{o}C) = 0,233 W/m^{o}C'dir. 40^{o}C'nin altındaki sıcaklık değerleri için de ısı iletim katsayısı sabit alınmıştır ve değeri k(T<40^{o}C) = 0,332 W/m^{o}C'dir. Bu modeller bir şart yapısı ile FLUENT yazılımında kullanıcı tanımlı fonksiyon olarak tanıtılarak eş zamanlı kullanımları sağlanmıştır. FLUENT yazılımında kullanıcı tanımlı fonksiyonlar C programlama dilinde yazılabilmektedir. Y.Y.PE malzemesinin ısı iletim katsayısına ait kullanıcı tanımlı fonksiyon EK-1'de verilmiştir. Fonksiyonda kullanılan sıcaklıklar, K cinsindendir.

Şekil 6.18 incelendiğinde, Y.Y.PE malzemesinin tersine, A.Y.PE malzemesinin ısı iletim katsayısının sıcaklık artışıyla arttığı ve 130^{o}C'den sonra çok küçük değişimler gösterdiği görülmektedir. A.Y.PE için elde edilen veriler üç gruba ayrılarak analizlerde kullanılmak üzere sıcaklığa bağlı ısı iletim katsayısı modeli elde edilmiştir. Birinci grupta 40^{o}C $\leq$ T $\leq$130^{o}C arasındaki sıcaklığa bağlı artış gösteren veriler alınmıştır. Bu veriler doğrusal bir modele uydurulmuş ve modele ait katsayılar elde edilmiştir. 130^{o}C'nin üzerindeki sıcaklıklar için ısı iletim katsayısı sabit alınmıştır ve değeri k(T>130^{o}C) = 0,234 W/m^{o}C'dir. 40^{o}C'nin altındaki sıcaklık değerleri için de ısı iletim katsayısı sabit alınmıştır ve değeri k(T<40^{o}C) = 0,169 W/m^{o}C'dir. Bu modeller bir şart yapısı ile kullanıcı tanımlı fonksiyon olarak tanıtılarak her iki modelinde de eş zamanlı kullanımı sağlanmıştır. A.Y.PE malzemesinin ısı iletim katsayısına ait kullanıcı tanımlı fonksiyon EK-2'de verilmiştir. Fonksiyonda kullanılan sıcaklıklar, K cinsindendir.



Şekil 6.18. A.Y.PE malzemesinin ısı iletim katsayısının sıcaklıkla değişimi

A.Y.PE ve Y.Y.PE malzemelerinin ısı iletim katsayılarının sıcaklıkla doğrusal değiştiklerinin kabul edildiği aralıkta kullanılan doğrusal model Eş. 6.8'dir. Bu modele ait katsayılar Çizelge 6.8' de verilmiştir.

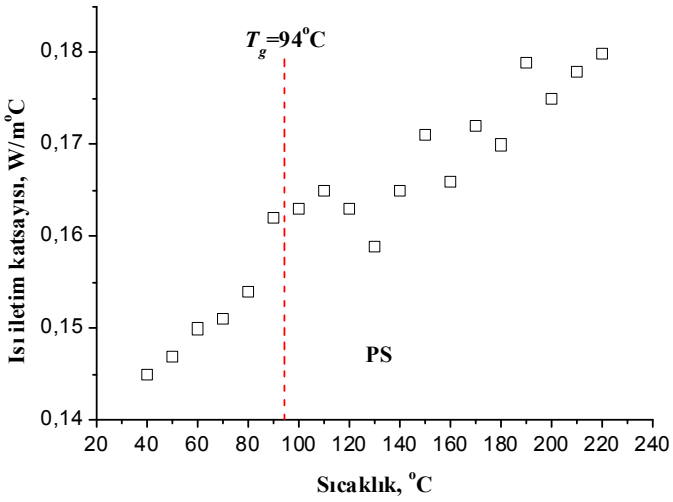
$$k(T)_{AYPE,YYPE} = C_0 + C_1 T \tag{6.8}$$

Çizelge 6.8. A.Y.PE ve Y.Y.PE için ısı iletim katsayısı modeli katsayıları

Malzeme	**Katsayılar**		
	C_0	C_1	R^2
A.Y.PE	-0,057219	0,000722	0,964
Y.Y.PE	0,620740	-0,000922	0,934

Şekil 6.19 incelendiğinde, PS malzemesinin ısı iletim katsayısının deneylerin yapıldığı 40°C-220°C aralığında sıcaklık artışıyla arttığı görülmektedir. Grafik incelendiğinde, grafiğin artan bir eğilim gösterdiği görülmektedir. Bu eğilime rağmen, aralık dışındaki sıcaklık değerlerindeki ısı iletim katsayıları için deney sıcaklık aralığının ilk ve son değerlerindeki değerler alınmıştır. İlk deney sıcaklığından daha düşük sıcaklık değerleri için k(T<40°C) = 0,1457 W/m°C alınmıştır. Son deney sıcaklığından daha yüksek sıcaklık değerleri için k(T>220°C) = 0,1788 W/m°C alınmıştır. 40°C-220°C sıcaklık aralığında elde edilen veriler ikinci

dereceden bir polinom ile (Eş. 6.9) ifade edilmiş olup model katsayıları Çizelge 6.9' da verilmiştir.



Şekil 6.19. PS malzemesinin ısı iletim katsayısının sıcaklıkla değişimi

$$k(T)_{PS} = C_0 + C_1 T + C_2 T^2 \tag{6.9}$$

Çizelge 6.9. PS için ısı iletim katsayısı modeli katsayıları

Malzeme	**Katsayılar**			
	C_0	C_1	C_2	R^2
PS	0,037659	0,0004473	-0,0000003266	0,927

A.Y.PE, Y.Y.PE ve PS malzemelerinin sıcaklığa bağlı ısı iletim katsayılarının değişimleri için elde edilen deneysel sonuçlar EK-5'de verilmiştir.

6.2. Sayısal Dolum Analizi Sonuçları

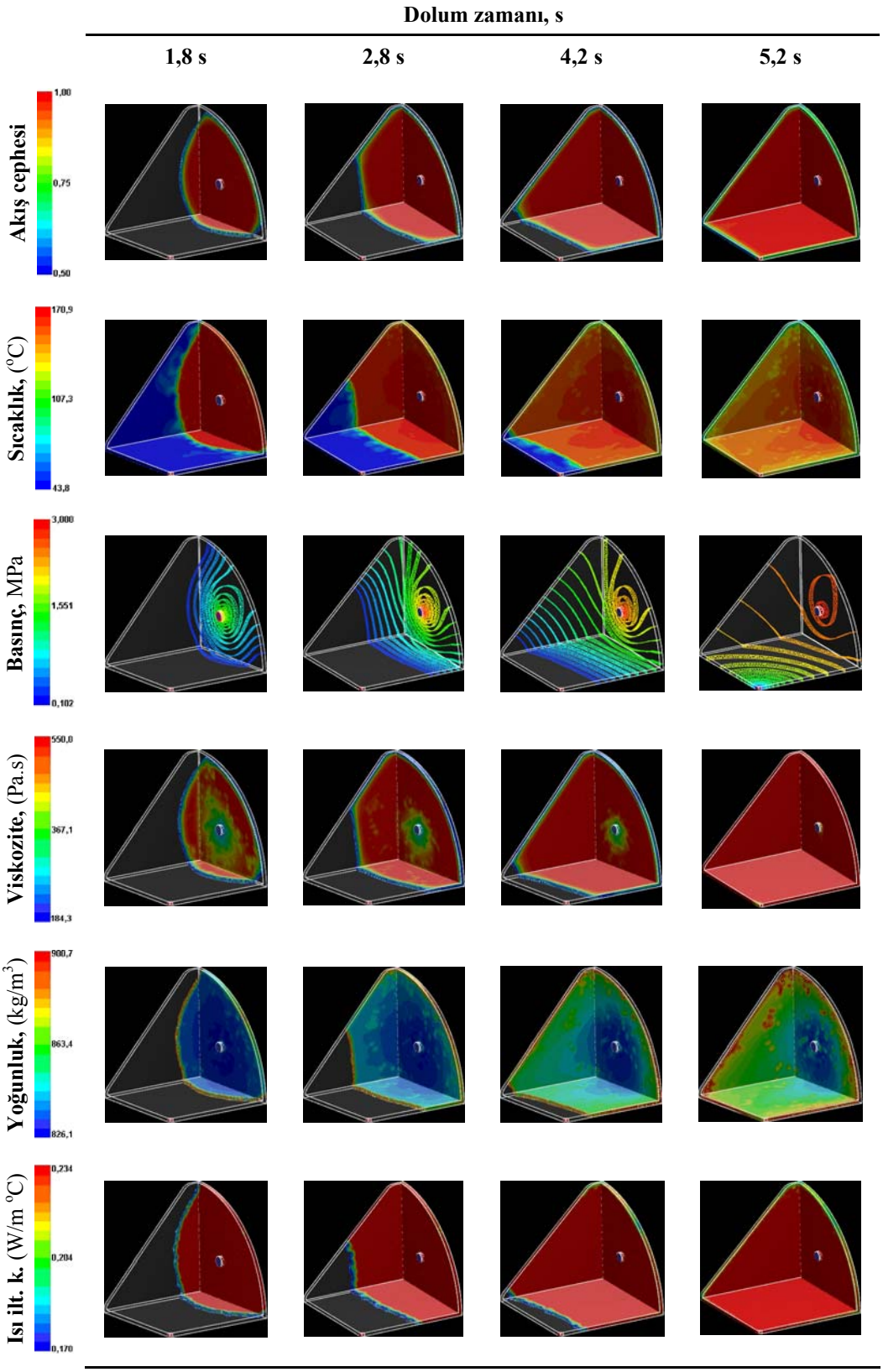
A.Y.PE, Y.Y.PE ve PS malzemelerinin fiziksel ve reolojik özellik modellerinin kullanılması ile elde edilen sayısal dolum analizi sonuçları, FLUENT yazılımı ortamında gerçekleştirilmiştir. Temel akış denklemleri ile birlikte enerji denklemi de FLUENT yazılımında çözdürülmüştür. Kalıp boşluğu içerisinde ergiyik plastik ile hava arasındaki yüzey (akış cephesi) VOF yöntemi ile tespit edilmiştir. Dolum

sırasında kalıp boşluğundaki havanın tahliye edildiği kabulü yapılmıştır. Akış cephesi profili, düzenlenmiş yüksek çözünürlüklü ara yüzey yakalama (MHRIC) interpolasyon yöntemi seçilerek belirlenmiştir.

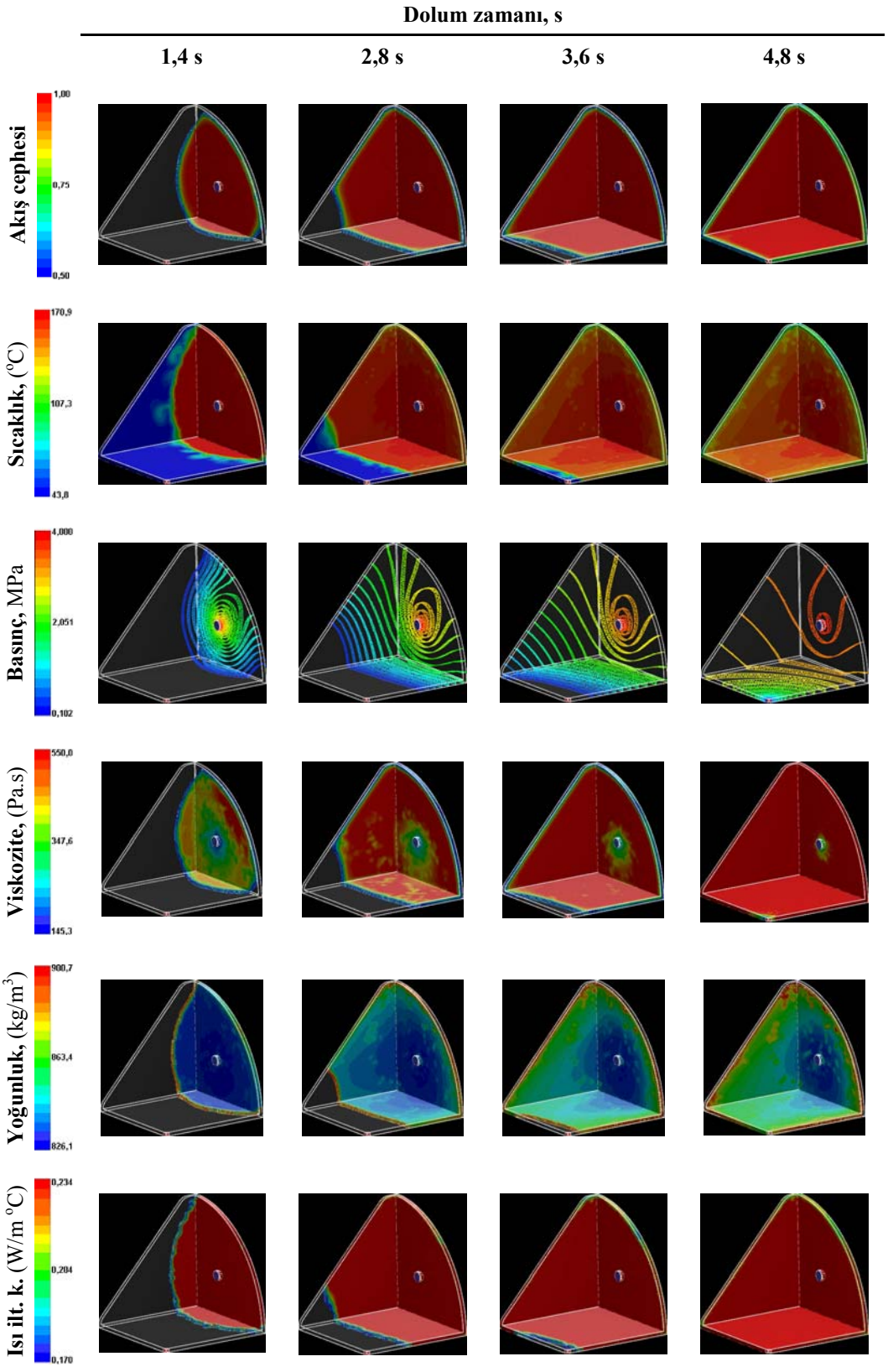
Sayısal çözümlerin kararlılığı için, Courant sayısı 0,25 alınarak elde edilen zaman adımı (Δt) 0,0005 s olarak alınmıştır. Ayrıca, hücre sayısından bağımsız çözümler için yapılan denemeler sonucunda 40651 tetragonal (dört yüzlü) hücre sayısının yeterli olduğu tespit edilmiştir. Daha kararlı sayısal sonuçların daha kısa çözüm sürelerinde elde edilebilmesi için, dört yüzlü hücreler (tetragonal), FLUENT yazılımı ortamında polyhedral (çok yüzlü, yüz sayısı 6'dan fazla olan) bal peteği şeklinde 8 yüzlü hücrelere dönüştürülmüştür. Böylece, çözüm zamanından tasarruf edilmiştir.

6.2.1. A.Y.PE için sayısal dolum analizi sonuçları

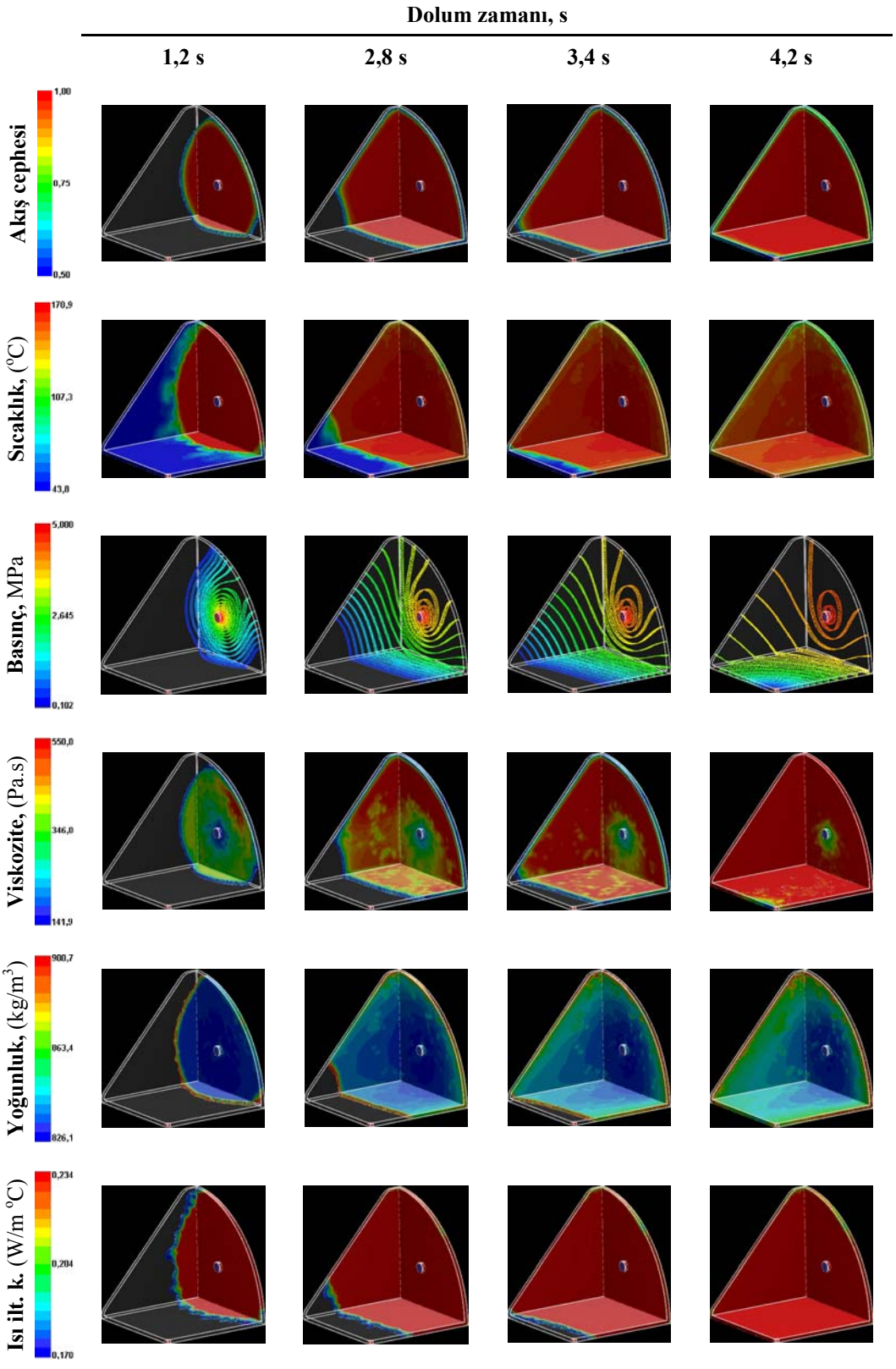
A.Y.PE malzemesi için sayısal analizler, enjeksiyon basıncının 3-5 MPa aralığında ve 0,5 MPa'lık artışlarla değiştirildiği; enjeksiyon sıcaklığının 170^{o}C-210^{o}C aralığında ve 10^{o}C'lik artışlarla değiştirildiği enjeksiyon parametreleri için gerçekleştirilmiştir. Bu şartlar, deneysel çalışmada da aynen kullanılmıştır. Farklı enjeksiyon basınçları ve farklı enjeksiyon sıcaklıkları kullanılarak gerçekleştirilen sayısal analizler ile, basınç ve sıcaklığın akış davranışına etkileri incelenmiştir. Ayrıca, akış cephesinin ilerlemesiyle birlikte, plastik malzemenin fiziksel ve reolojik özelliklerdeki değişimlerin nasıl bir seyir izlediği grafiksel olarak sunulmuştur. Şekil 6.20-Şekil 6.22'de A.Y.PE malzemesinin akış cephesi davranışı ve A.Y.PE malzemesinin fiziksel ve reolojik özelliklerinin sabit sıcaklıkta (170^{o}C) basınç değişimine bağlı olarak değişimi görülmektedir. Şekillerde analiz sonuçları dolumun gerçekleştiği zaman adımındaki değişimler görülebilecek biçimde verilmiştir.



Şekil 6.20. A.Y.PE için akış cephesi davranışı ve fiziksel ve reolojik özellik değişimi (Basınç etkisi; $T_{enj} = 170^{o}\text{C}$, $p_{enj} = 3$ MPa)



Şekil 6.21. A.Y.PE için akış cephesi davranışı ve fiziksel ve reolojik özellik değişimi (Basınç etkisi; $T_{enj} = 170^{o}\text{C}$, $p_{enj} = 4$ MPa)



Şekil 6.22. A.Y.PE için akış cephesi davranışı ve fiziksel ve reolojik özellik değişimi (Basınç etkisi; $T_{enj} = 170^{o}\text{C}$, $p_{enj} = 5$ MPa)

Basıncın akış cephesi ilerlemesi ve dolum sırasında A.Y.PE malzemesinin fiziksel ve reolojik özelliklerindeki değişimler üzerindeki etkilerinin grafiksel olarak gösterildiği Şekil 6.20-Şekil 6.22'de, basınç artışının öncelikle dolum süresi üzerinde etkili olduğu görülmektedir. Basınç artışına paralel olarak, A.Y.PE malzemesi kalıp boşluğunu daha kısa sürede doldurmaktadır. Bu durum, basınca bağlı oluşan hız ve hıza bağlı meydana gelen kayma deformasyonu ile birlikte moleküler zincir yapısının akışı kolaylaştıracak şekilde yönlendirilmesinden kaynaklanmaktadır. 170^{o}C sıcaklık ve 3 MPa enjeksiyon basıncında kalıp boşluğu 5,2 s'de dolarken basınç 4 MPa çıktığında kalıp boşluğu 4,8 s'de ve 5 MPa çıktığında ise 4,2 s'de dolmuştur.

Kısa dolum süresi aynı zamanda, ergiyik A.Y.PE malzemesinin soğuk kalıp yüzeylerine teması ile meydana gelen sıcaklık kayıplarının da az olmasını beraberinde getirmektedir. Ayrıca, sıcaklık sabit alınmasına karşılık basınç etkisiyle oluşan yüksek kayma hızları viskoz ısınma ile sıcaklık artışına sebep olmuştur. Bunlara bağlı olarak, ergiyik A.Y.PE malzemesinin fiziksel ve reolojik özelliklerinde sıcaklığa bağlı değişim daha az olmuştur. Şekil 6.20-Şekil 6.22'de yoğunluk değerlerine bakılacak olursa, dolum sonrası en büyük yoğunluk değeri ve dolayısıyla en fazla katılaşan fazı bünyesinde bulunduran durum 3 MPa basınç değerinde gerçekleşmiştir. Zamana bağlı olarak yoğunluk değişimlerine bakıldığında, dolum süresinin artışıyla birlikte özellikle giriş bölgesinden uzak ve kalıp yüzeylerine temas eden yerlerde sıcaklık değişimine bağlı olarak katılaşmanın başladığı ve dolum süresinin artışı ile birlikte katılaşmanın da arttığını söylemek mümkündür.

Viskozite de yoğunlukla benzer doğrultuda bir değişim göstermiştir. Düşük basınç değerlerinde dolum süresine bağlı olarak, viskozite hemen dolum aşamasının ilk başlarında artmaya başlamıştır. Dolum sonrasında, en düşük viskozite değerinin giriş bölgesinde olduğu görülmektedir.

Dolum süreleri ile birlikte akış cephesi ilerleyişi de incelendiğinde, dolum süresindeki artışın özellikle kalıp boşluğunun tam dolmasına yakın olan bölgelerde meydana geldiği görülmektedir. Bu durum, girişten uzak olan bu bölgelerde azalan sıcaklığa bağlı olarak ergiyik viskozitesi ve yoğunluk değerlerindeki artıştan ve

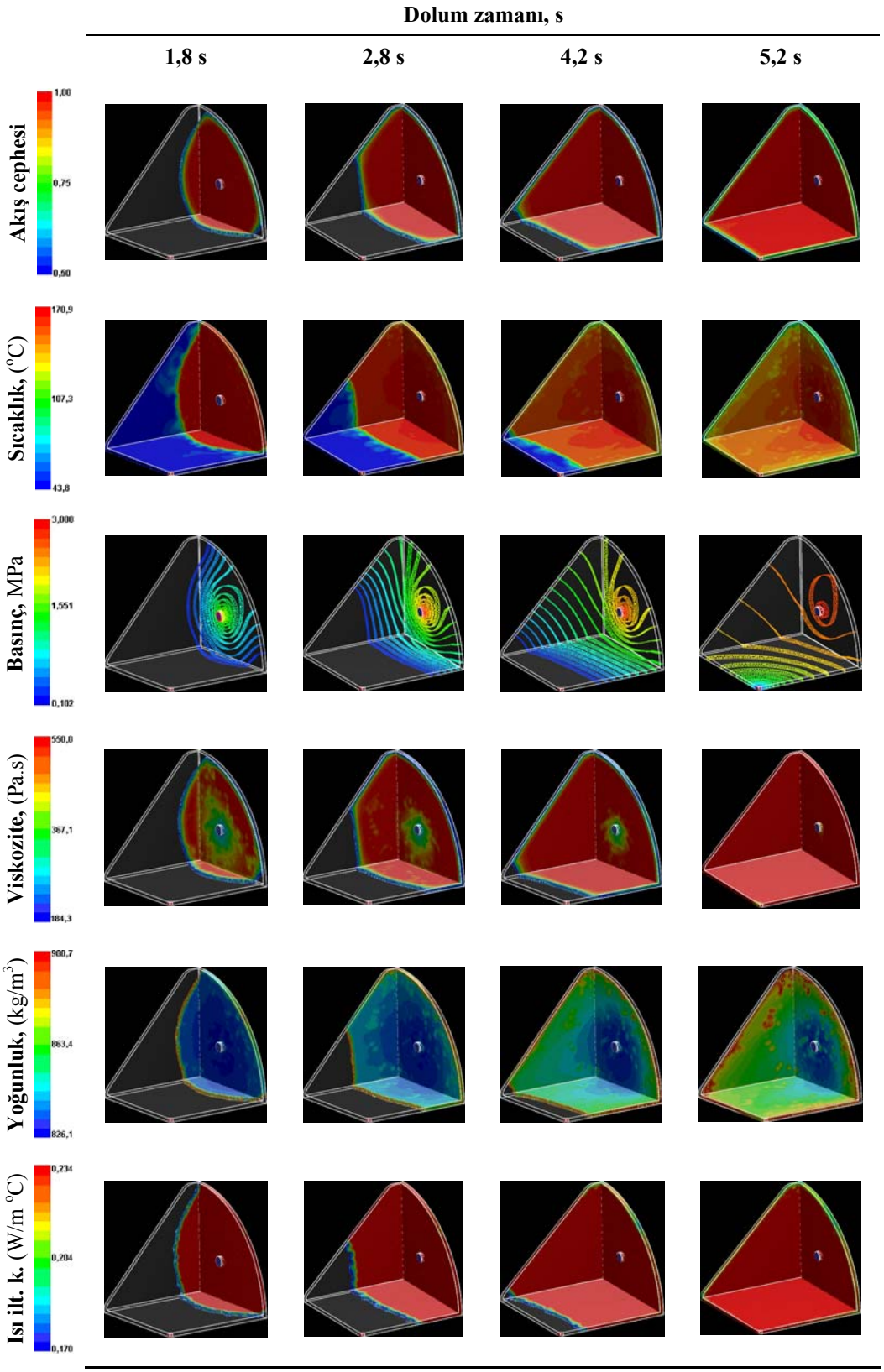
bunlara bağlı olarak da azalan basınç ve hızdan kaynaklanmaktadır. Dolum sırasında ve dolum sonrasında en yüksek basınç ve sıcaklık değerlerinin giriş bölgesinde ve girişe yakın bölgelerde olduğu görülmektedir.

A.Y.PE malzemesi için, sabit sıcaklıkta (170^oC) basınç değişimine bağlı olarak ısı iletim katsayısındaki değişim değerlendirildiğinde, meydana gelen sıcaklık değişimi aralığında ısı iletim katsayısının fazla değişim göstermediği ve dolayısıyla akışta çok önemli davranış değişimine sebep olmadığı görülmüştür.

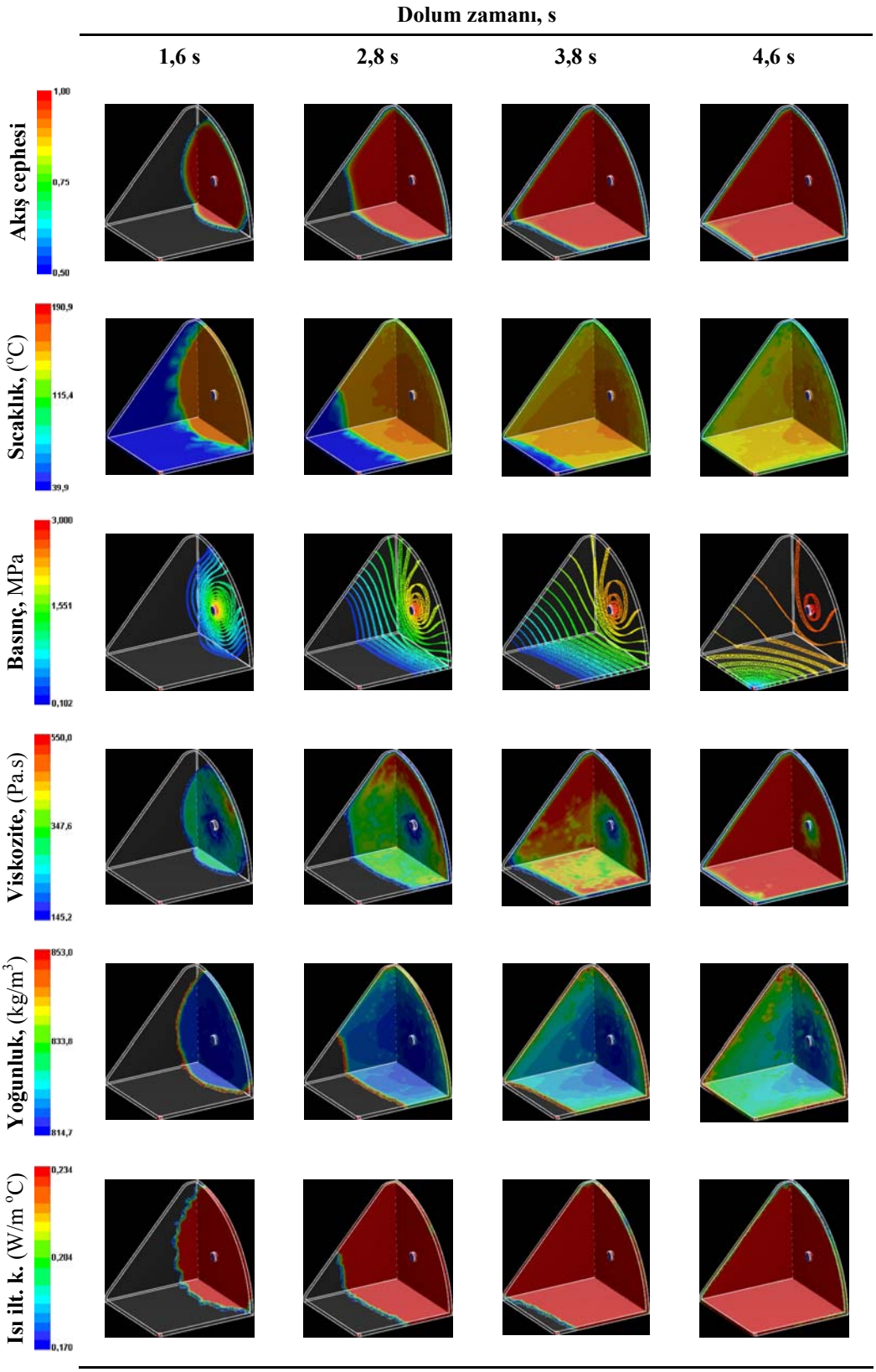
Şekil 6.23-Şekil 6.25'de A.Y.PE malzemesinin sabit basınçta (3 MPa) sıcaklık değişimi ile akış cephesi davranışı ve A.Y.PE malzemesinin fiziksel ve reolojik özelliklerinin değişimi grafiksel olarak görülmektedir. Grafiksel gösterimler incelendiğinde, sabit basınçta (3 MPa) sıcaklık artışının, sabit sıcaklıkta basınç artışıyla benzer bir etki gösterdiği ve öncelikle dolum süresi üzerinde etkili olduğu görülmektedir. Sıcaklığın artması, beraberinde daha kısa dolum sürelerinin olmasını sağlamıştır. Bunun sebebi, sıcaklık artışı ile moleküler zincir yapıdaki bağ kuvvetlerinin azalması ve dolayısı ile moleküler yapının daha düşük basınç değerlerinde akış doğrultusunda yönlenebilmeleridir. 3 MPa basınç ve 170^oC sıcaklıkta kalıp boşluğu 5,2 s'de dolarken, sıcaklık 190^oC'ye çıktığında kalıp boşluğu 4,6 s'de ve 210^oC'ye çıktığında ise 3,4 s'de dolmuştur.

Sabit basınçta (3 MPa) sıcaklık değişimine bağlı olarak fiziksel ve reolojik özelliklerin değişimi incelendiğinde, sıcaklık artışına paralel olarak akış alanı içerisinde daha düşük viskozite ve daha düşük yoğunluk değerine sahip bölgeler oluşmuştur. Bu durum, dolum süresinin sıcaklık artışı ile birlikte azalmasının en büyük sebebi olarak görülmektedir.

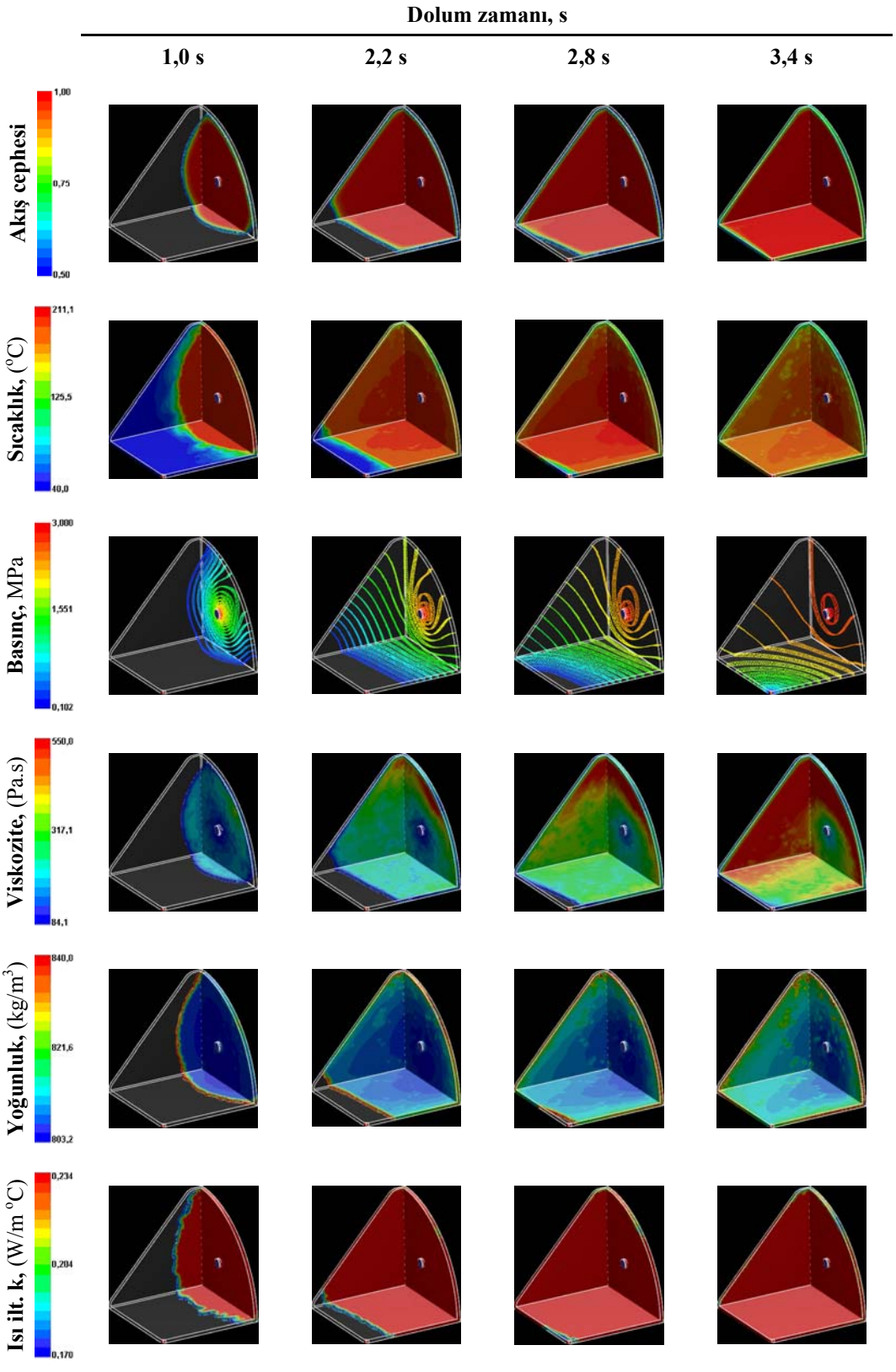
A.Y.PE malzemesi için, sabit basınçta (3 MPa) sıcaklık değişimine bağlı olarak ısı iletim katsayısındaki değişim değerlendirildiğinde, analiz yapılan sıcaklık değerinde meydana gelen sıcaklık değişim aralığında ısı iletim katsayısının akış davranışını etkileyecek düzeyde değişim göstermediği görülmektedir.



Şekil 6.23. A.Y.PE için akış cephesi davranışı ve fiziksel ve reolojik özellik değişimi (Sıcaklık etkisi; $T_{enj} = 170^{o}\text{C}$, $p_{enj} = 3$ MPa)

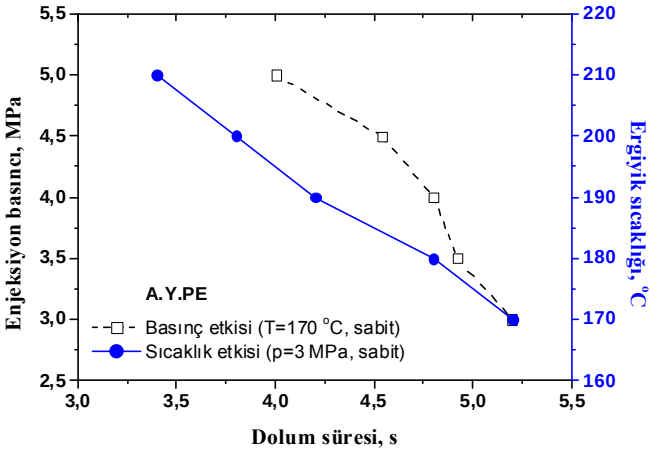


Şekil 6.24. A.Y.PE için akış cephesi davranışı ve fiziksel ve reolojik özellik değişimi (Sıcaklık etkisi; $T_{enj} = 190^{o}\text{C}$, $p_{enj} = 3$ MPa)



Şekil 6.25. A.Y.PE için akış cephesi davranışı ve fiziksel ve reolojik özellik değişimi (Sıcaklık etkisi; $T_{enj} = 210^{o}\text{C}$, $p_{enj} = 3$ MPa)

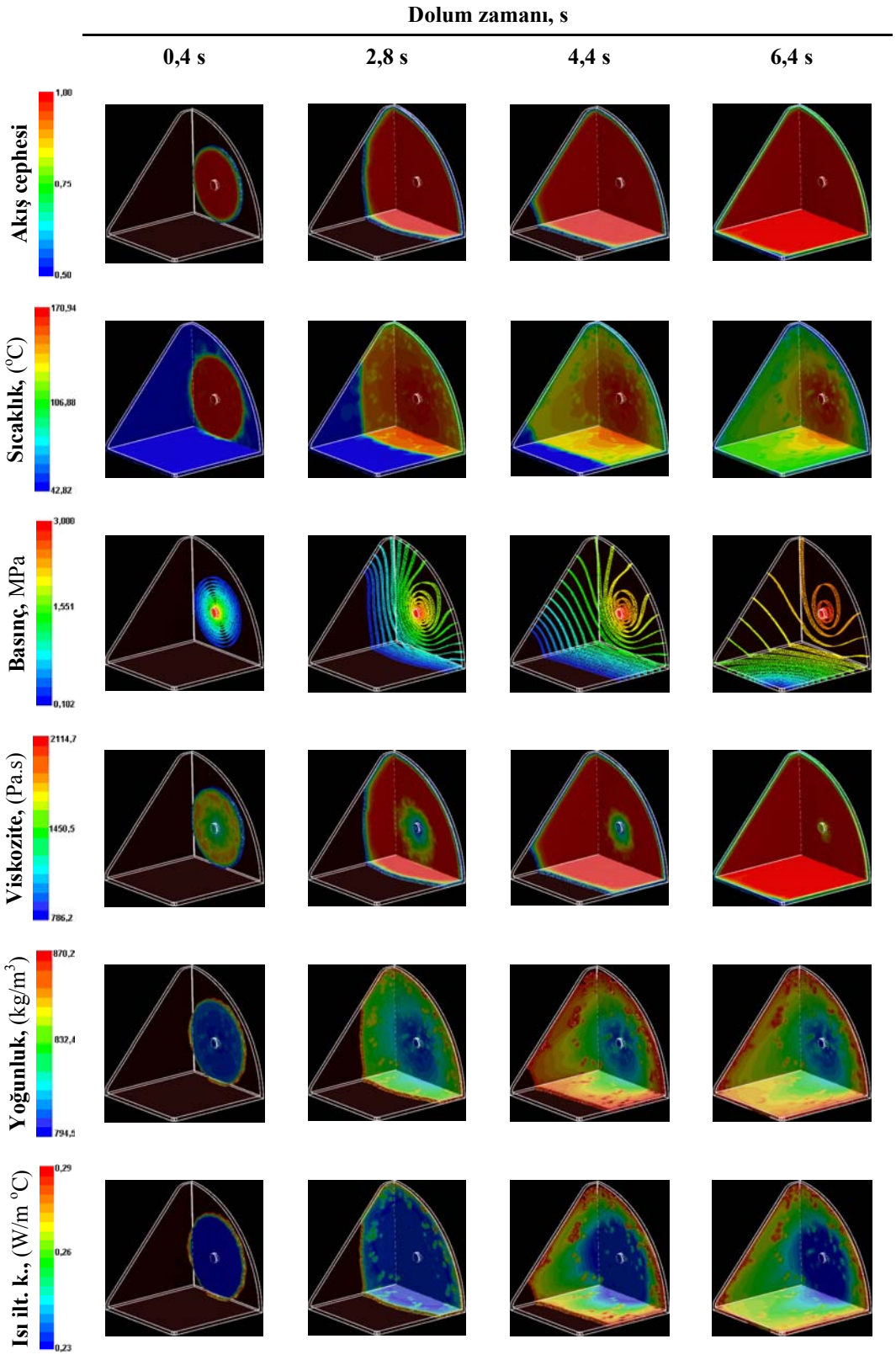
Şekil 6.26'da A.Y.PE malzemesi için yapılan, sabit sıcaklıkta basınca bağlı ve sabit basınçta sıcaklığa bağlı tüm dolum analizlerinin, dolum süresi üzerindeki etkileri grafik olarak görülmektedir. Grafikten görüldüğü üzere, hem basınç hem de sıcaklık, dolum süresi üzerinde ters yönde etkilidir. Basınç ve sıcaklıktaki artışa bağlı olarak dolum süresi azalmaktadır. Basınç ve sıcaklık ayrı ayrı değerlendirildiklerinde ise, dolum aşamasında sıcaklığın yoğunluk ve viskozite üzerinde basınçtan daha etkili olması, sıcaklık değişimine bağlı dolum sürelerinin basınç değişimine bağlı dolum sürelerinden daha kısa olmasını sağlamıştır.



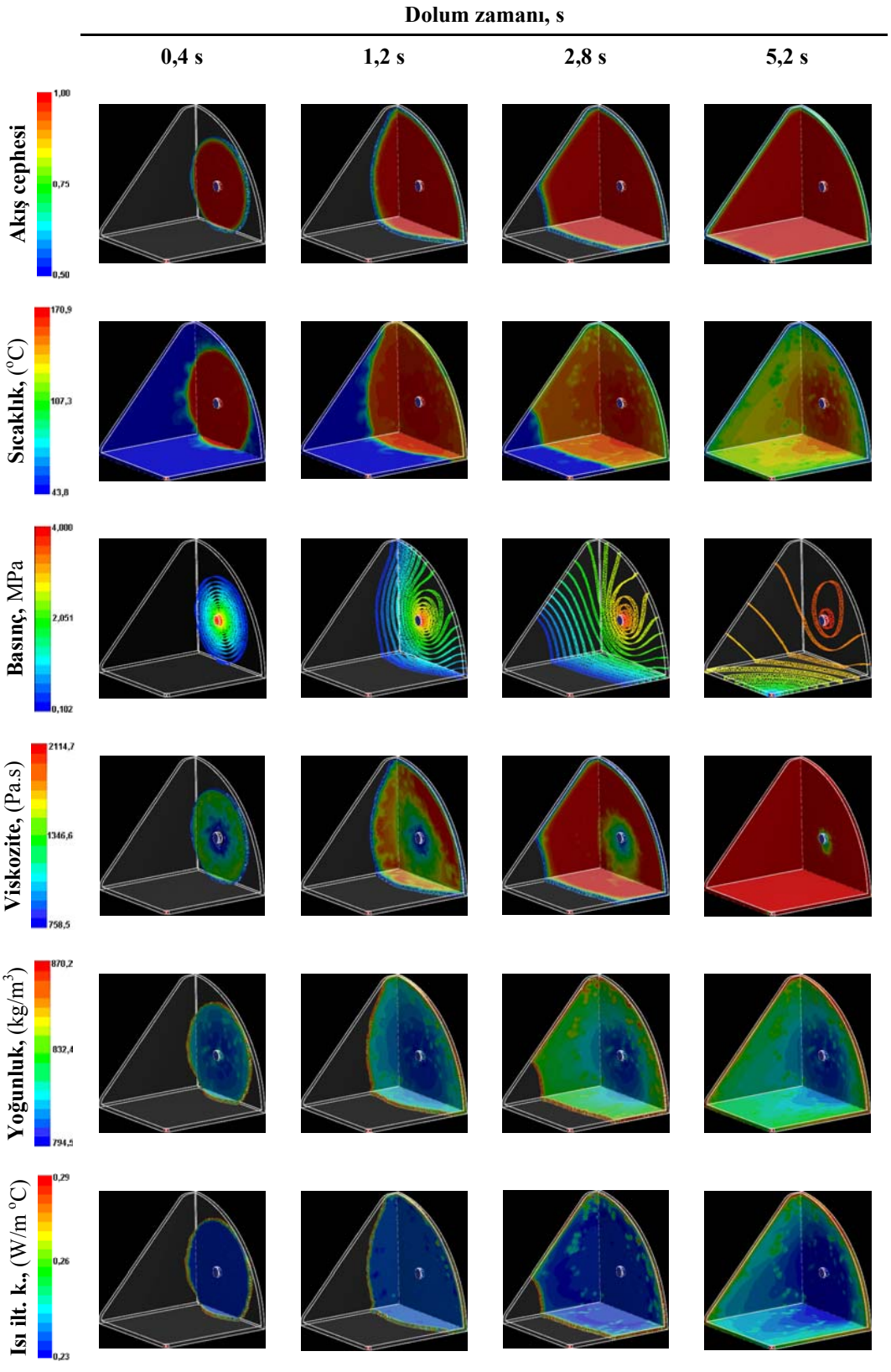
Şekil 6.26. A.Y.PE için dolum süresinin basınç ve sıcaklığa bağlı değişimi

6.2.2. Y.Y.PE için sayısal dolum analizi sonuçları

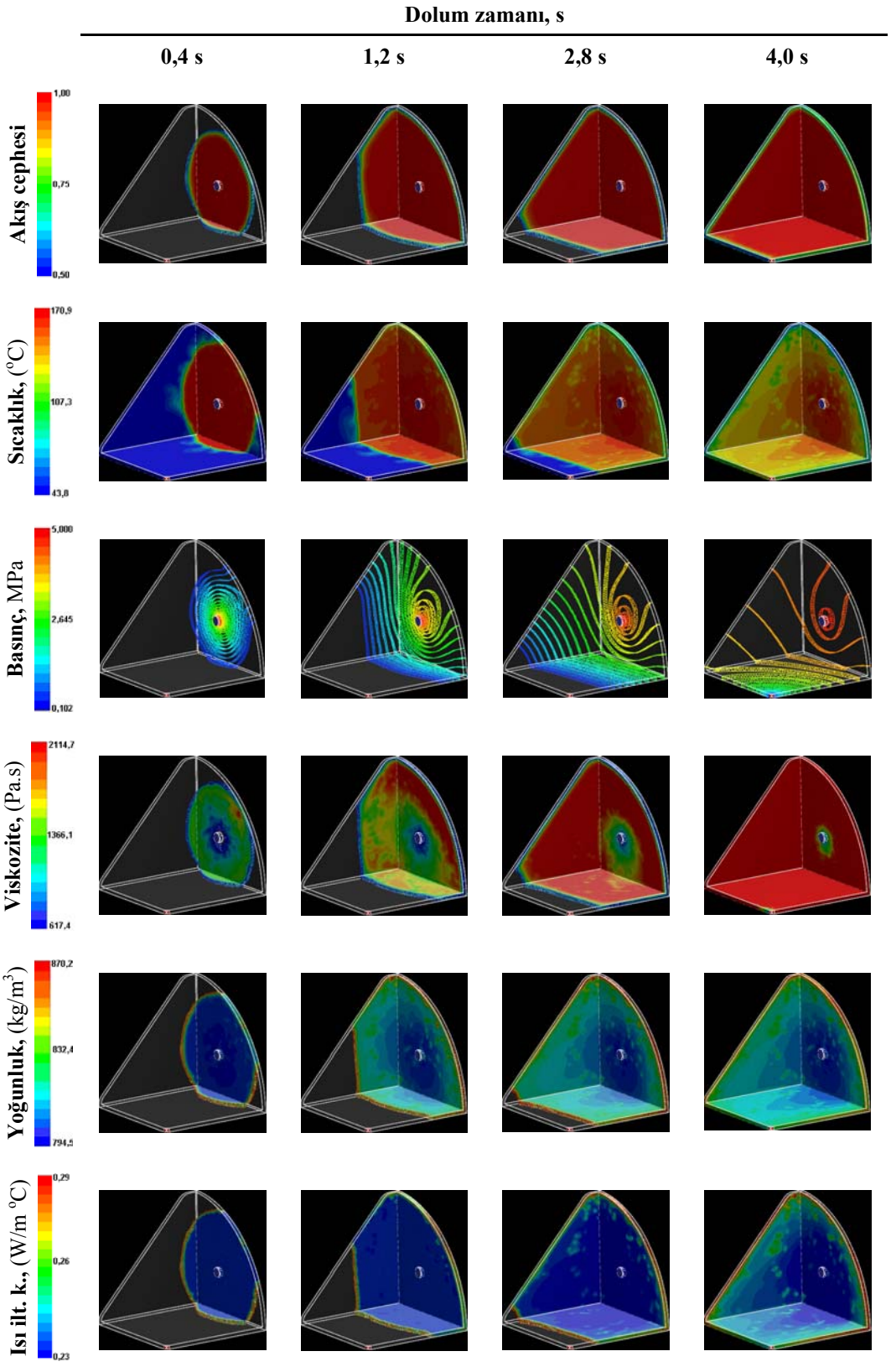
Y.Y.PE malzemesi için sayısal analizler, enjeksiyon basıncının 3-5 MPa aralığında ve 0,5 MPa'lık artışlarla değiştirildiği; enjeksiyon sıcaklığının 170-180-190-205 ve 220^{o}C olarak değiştirildiği enjeksiyon parametreleri için gerçekleştirilmiştir. Bu şartlar, deneysel çalışmada da aynen kullanılmıştır. Farklı enjeksiyon basınçları ve farklı enjeksiyon sıcaklıkları kullanılarak gerçekleştirilen sayısal analizler ile, basınç ve sıcaklığın akış davranışına etkileri tespit edilmiştir. Ayrıca, akış cephesinin ilerlemesiyle birlikte, plastik malzemenin fiziksel ve reolojik özelliklerindeki değişimlerin nasıl bir seyir izlediği grafiksel olarak sunulmuştur. Şekil 6.27-Şekil 6.29'de Y.Y.PE malzemesinin akış cephesi davranışı ve bu malzemenin fiziksel ve reolojik özelliklerinin sabit sıcaklıkta (170^{o}C) basınç ile değişimi görülmektedir.



Şekil 6.27. Y.Y.PE için akış cephesi davranışı ve fiziksel ve reolojik özellik değişimi (Basınç etkisi; $T_{enj} = 170^{o}\text{C}$, $p_{enj} = 3$ MPa)



Şekil 6.28. Y.Y.PE için akış cephesi davranışı ve fiziksel ve reolojik özellik değişimi (Basınç etkisi; $T_{enj} = 170^{o}\text{C}$, $p_{enj} = 4$ MPa)



Şekil 6.29. Y.Y.PE için akış cephesi davranışı ve fiziksel ve reolojik özellik değişimi (Basınç etkisi; $T_{enj} = 170^{o}\text{C}$, $p_{enj} = 5$ MPa)

Basıncın akış cephesi ilerlemesi ve dolum sırasında Y.Y.PE malzemesinin fiziksel ve reolojik özelliklerindeki değişimler üzerindeki etkilerinin grafiksel olarak gösterildiği Şekil 6.27-Şekil 6.29 incelendiğinde, Y.Y.PE malzemesi için basınç artışının A.Y.PE' de olduğu gibi öncelikle dolum süresi üzerinde etkili olduğu görülmektedir. Basınçtaki artış, Y.Y.PE malzemesinin kalıp boşluğuna daha kısa sürede dolmasını sağlamıştır. Bu durum, basınca bağlı oluşan hız ve hıza bağlı meydana gelen kayma deformasyonu ile birlikte moleküler zincir yapısının akışı kolaylaştıracak şekilde yönlendirilmesinden kaynaklanmaktadır. Y.Y.PE ve A.Y.PE malzemelerinin yoğunluk değerleri hemen hemen aynı olmasına karşılık, Y.Y.PE malzemesinin moleküler bağ kuvvetinin A.Y.PE malzemesinin moleküler bağ kuvvetinden daha güçlü olması ve daha fazla kristallenebilme yeteneği, Y.Y.PE malzemesinin viskozitesinin daha yüksek olmasını sağlamıştır. Bunun bir sonucu olarak, 170^{o}C sıcaklık ve 3 MPa basınç değerleri ile yapılan analizlerde Y.Y.PE malzemesinin kalıp boşluğunu doldurma süreleri A.Y.PE malzemesinin dolum sürelerinden daha fazla olmuştur. Fakat basıncın artışı, moleküler bağ kuvvetini zayıflatan bir etki olarak kendini göstermiş ve artan basınçlarla birlikte A.Y.PE ve Y.Y.PE malzemelerinin dolum süreleri birbirlerine yaklaşmıştır. 170^{o}C sıcaklık ve 3 MPa enjeksiyon basıncında Y.Y.PE malzemesi kalıp boşluğuna 6,4 s'de dolarken, kalıp boşluğu basınç 4 MPa çıktığında 5,2 s'de ve 5 MPa çıktığında ise 4,0 s'de dolmuştur.

Şekil 6.27-Şekil 6.29'da yoğunluk değerlerine bakılacak olursa, dolum sonrası en büyük yoğunluk değeri dolayısıyla en fazla katılaşan fazı bünyesinde bulunduran durum A.Y.PE malzemesinde olduğu gibi 3 MPa basınç değerinde gerçekleşmiştir. Zamana bağlı olarak yoğunluk değişimlerine bakıldığında, dolum süresinin artışıyla birlikte özellikle giriş bölgesinden uzak ve kalıp yüzeylerine temas eden yerlerde sıcaklık değişimine bağlı olarak katılaşmanın başladığı ve dolum süresinin artışı ile birlikte katılaşmanın da arttığını söylemek mümkündür.

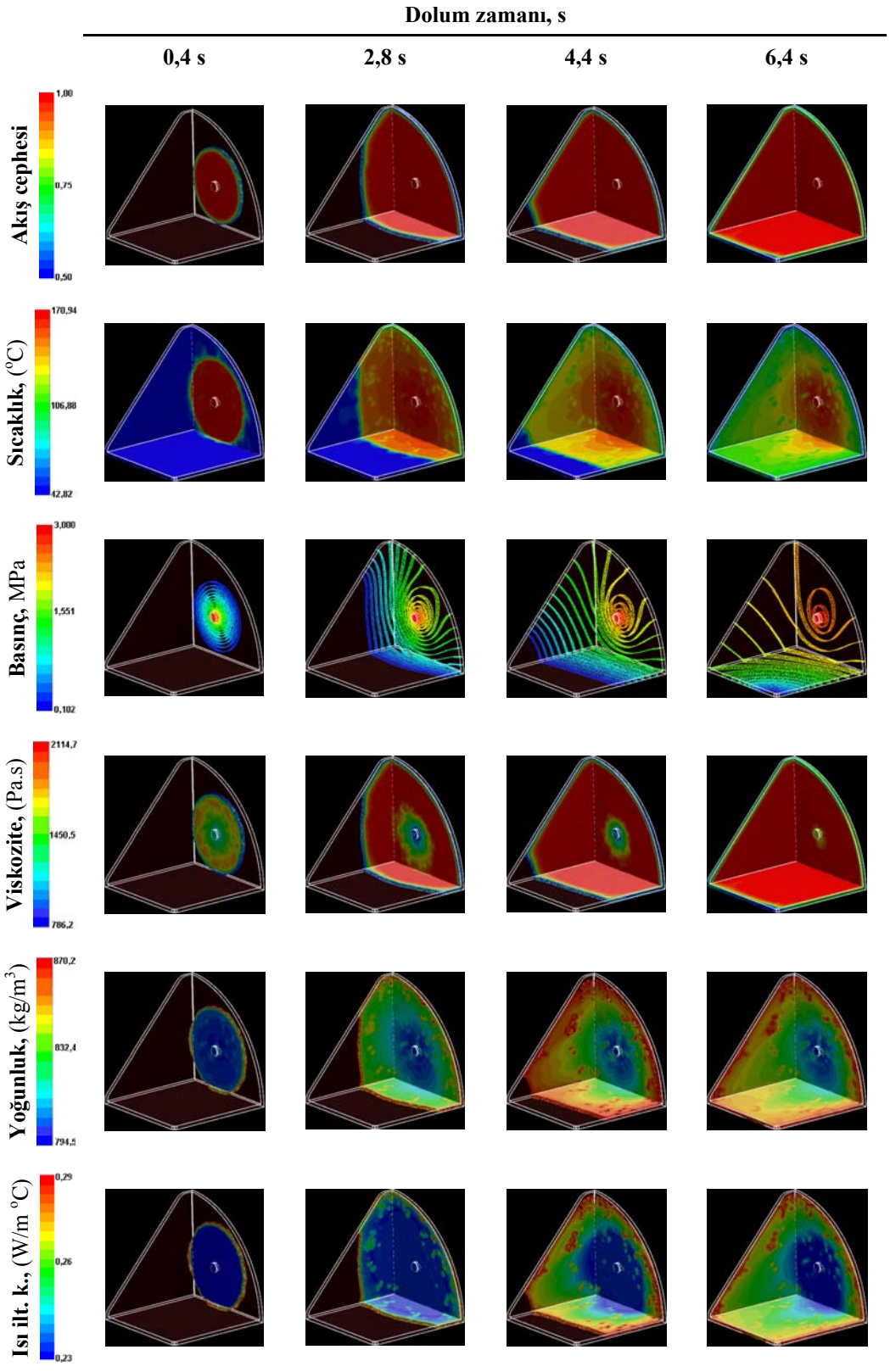
Viskozite de yoğunlukla benzer doğrultuda değişim göstermiştir. Özellikle ilk 1,2 s' den sonra viskozite hızla artmıştır. Dolum sonrasında, en düşük viskozite değerinin giriş bölgesinde olduğu görülmektedir. Dolum sırasında ve dolum sonrasında en

yüksek basınç ve sıcaklık değerlerinin giriş bölgesinde ve girişe yakın bölgelerde olduğu görülmektedir.

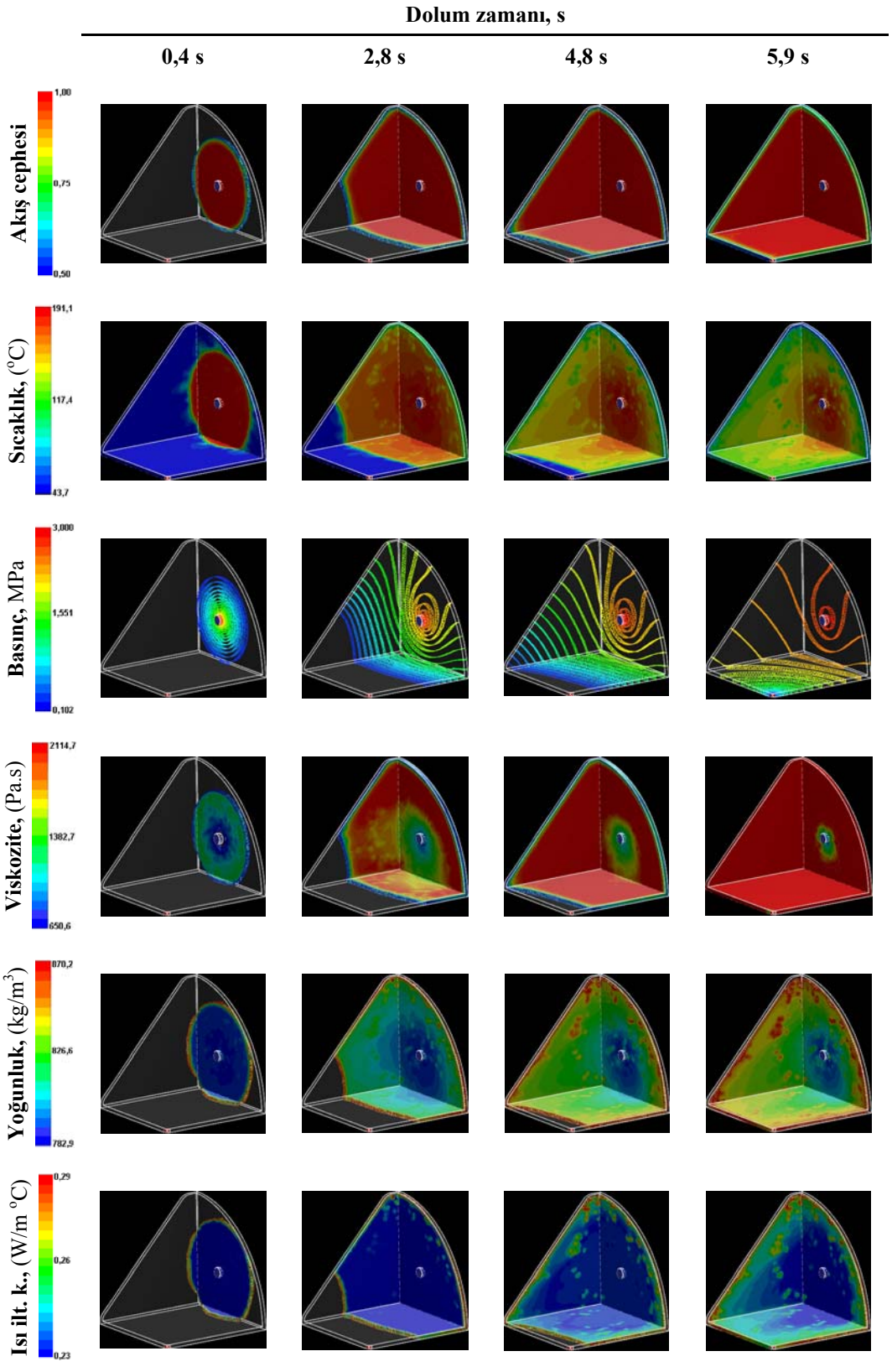
Y.Y.PE malzemesi için, sabit sıcaklıkta (170^{o}C) basınç değişimine bağlı olarak ısı iletim katsayısındaki değişim değerlendirildiğinde, meydana gelen sıcaklık değişimi aralığında özellikle enjeksiyon basıncının 3 MPa alındığı analizlerde, kullanılan modelle paralellikte kalıp boşluğundaki azalan sıcaklıkla birlikte artış gösterdiği görülmektedir. Isı iletim katsayısı en büyük değerine, kalıp boşluğunun dolduğu son noktalarda ulaşmıştır. Bu hali ile ergiyik plastiğin daha fazla ve hızlı soğumasına sebep olarak akış davranışında dolum süresinin uzamasına sebep olarak olumsuz yönde etkili olmuştur.

Şekil 6.30-Şekil 6.32'de Y.Y.PE malzemesinin sabit basınçta (3 MPa) sıcaklık değişimine bağlı akış cephesi davranışı ve Y.Y.PE malzemesinin fiziksel ve reolojik özelliklerinin değişimi grafiksel olarak görülmektedir. Grafiksel gösterimler incelendiğinde, sabit basınçta (3 MPa) sıcaklık artışının, sabit sıcaklıkta basınç artışıyla aynı paralellikte, öncelikle dolum süresi üzerinde etkili olduğu görülmektedir. Sıcaklığın artması, beraberinde daha kısa dolum sürelerinin olmasını sağlamıştır. 3 MPa basınç ve 170^{o}C sıcaklıkta kalıp boşluğu 6,4 s'de dolarken, kalıp boşluğu sıcaklık 190^{o}C'ye çıktığında 5,9 s'de ve 220^{o}C'ye çıktığında ise 4,0 s'de dolmuştur.

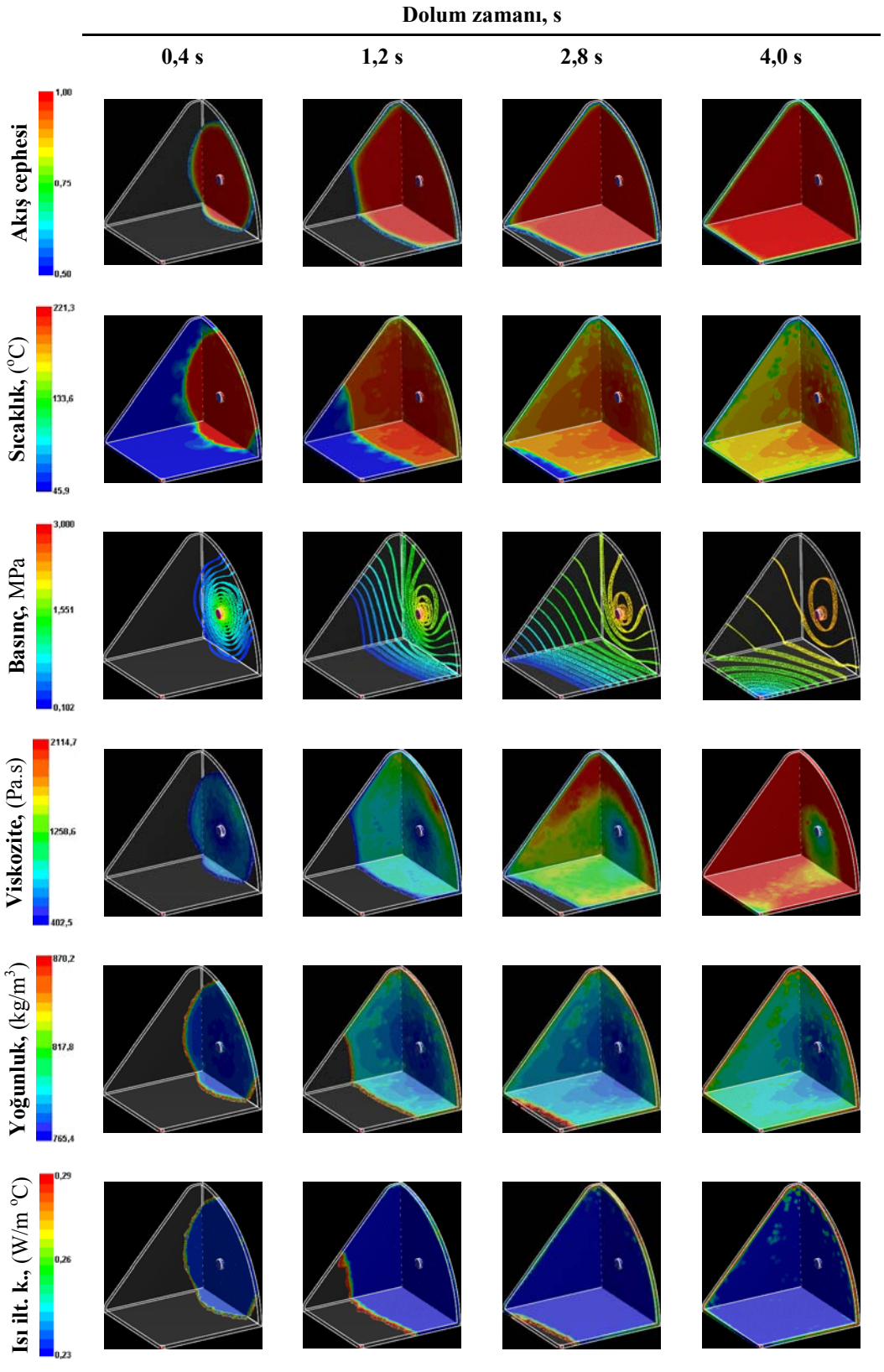
Y.Y.PE malzemesi için, sabit basınçta (3 MPa) sıcaklık değişimine bağlı olarak ısı iletim katsayısındaki değişim değerlendirildiğinde, 170^{o}C ve 190^{o}C sıcaklık değerlerinde ısı iletim katsayısında modele uygun olarak artan yönde bir değişim meydana geldiği görülmektedir. Fakat sıcaklığın 220^{o}C olduğu analizde meydana gelen sıcaklık değişim aralığında ısı iletim katsayısı deneylerde tespit edilen en düşük değerde kalarak daha az soğumayı beraberinde getirmiştir.



Şekil 6.30. Y.Y.PE için akış cephesi davranışı ve fiziksel ve reolojik özellik değişimi (Sıcaklık etkisi; $T_{enj} = 170^{o}\text{C}$, $p_{enj} = 3$ MPa)

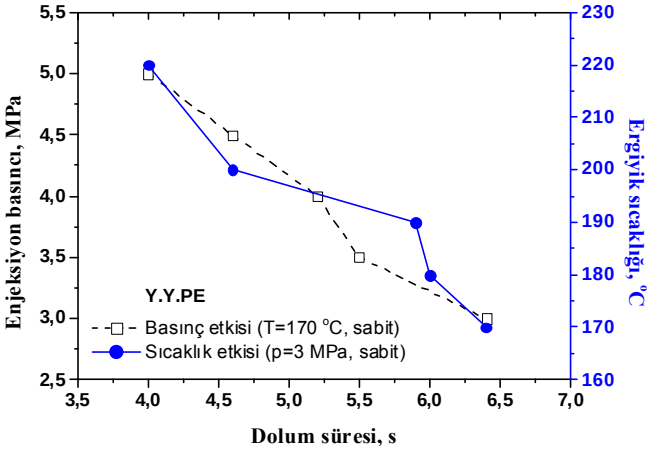


Şekil 6.31. Y.Y.PE için akış cephesi davranışı ve fiziksel ve reolojik özellik değişimi (Sıcaklık etkisi; $T_{enj} = 190^{o}\text{C}$, $p_{enj} = 3$ MPa)



Şekil 6.32. Y.Y.PE için akış cephesi davranışı ve fiziksel ve reolojik özellik değişimi (Sıcaklık etkisi; $T_{enj} = 220^{o}\text{C}$, $p_{enj} = 3$ MPa)

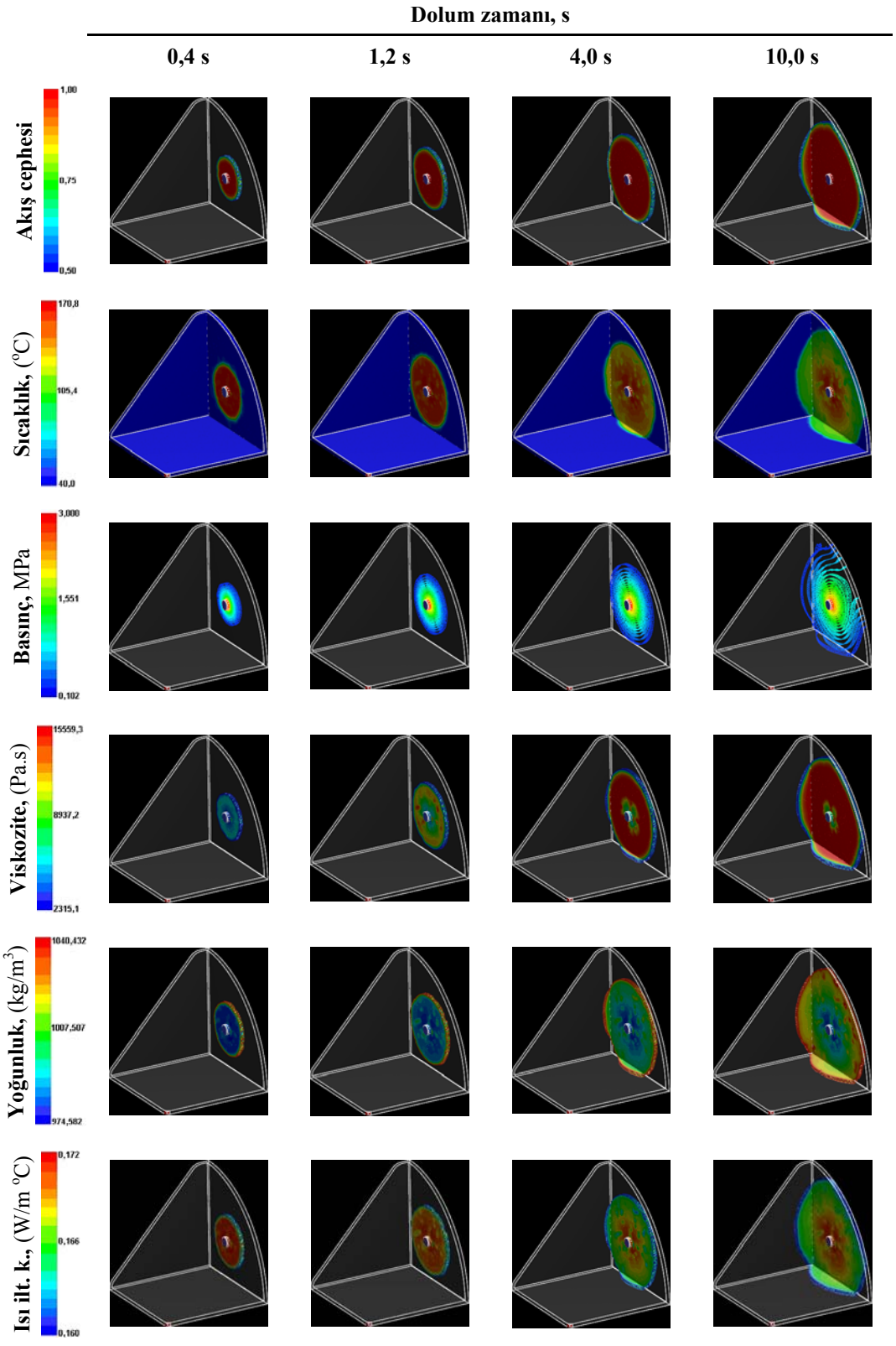
Şekil 6.33'de Y.Y.PE malzemesi için gerçekleştirilen, sabit sıcaklıkta basınca bağlı ve sabit basınçta sıcaklığa bağlı tüm dolum analizlerinin, dolum süresi üzerindeki etkileri grafik olarak görülmektedir. Grafikten de görüldüğü gibi, hem basınç hem de sıcaklık, dolum süresi üzerinde ters yönde etkiye sahiptir. Basınç ve sıcaklıktaki artışa bağlı olarak dolum süresi azalmaktadır. Y.Y.PE malzemesi için yapılan analiz sonuçlarından, basınç ve sıcaklığın dolum süresi üzerinde hemen hemen aynı oranda etkili oldukları görülmektedir.



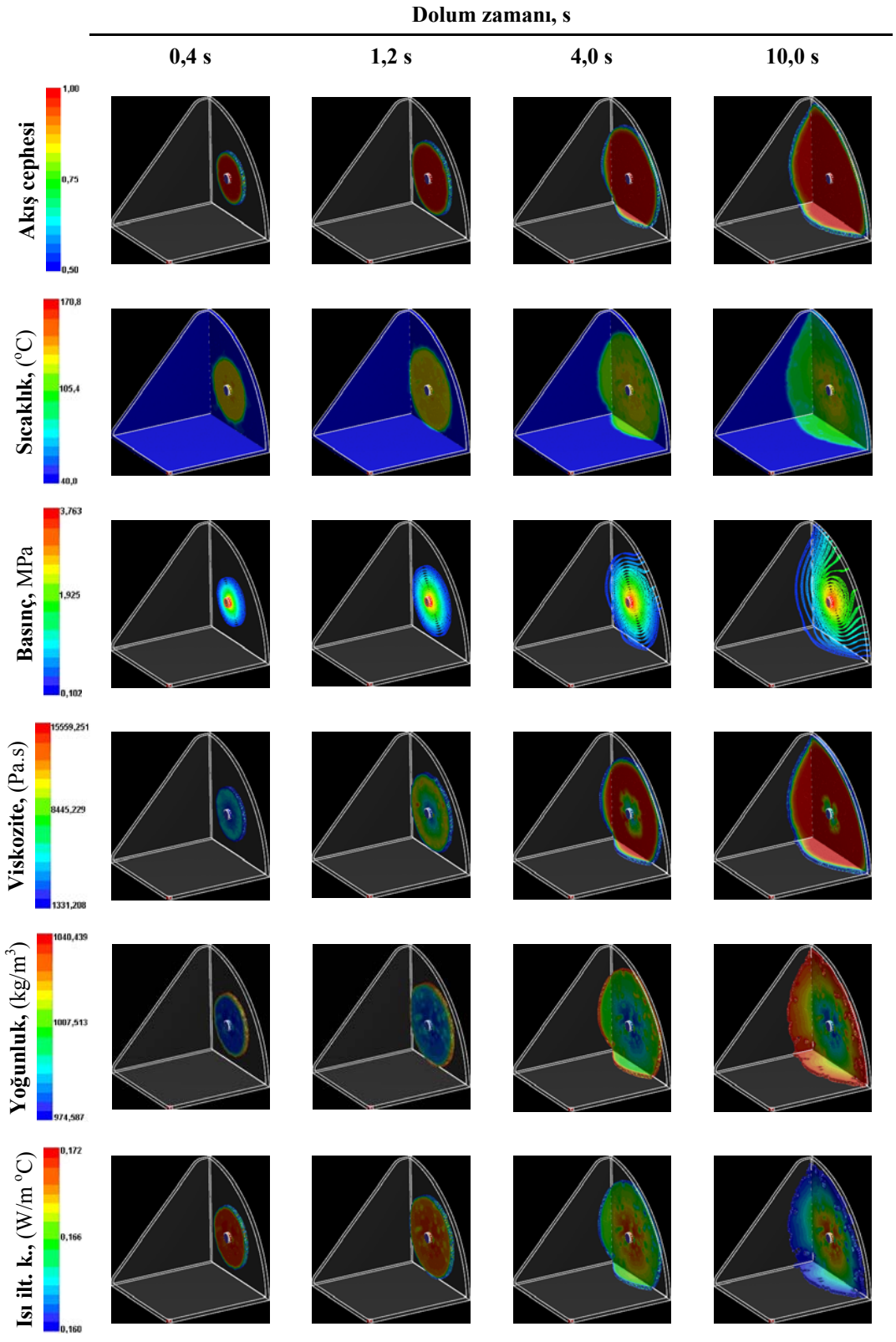
Şekil 6.33. Y.Y.PE için dolum süresinin basınç ve sıcaklığa bağlı değişimi

6.2.3. PS için sayısal dolum analizi sonuçları

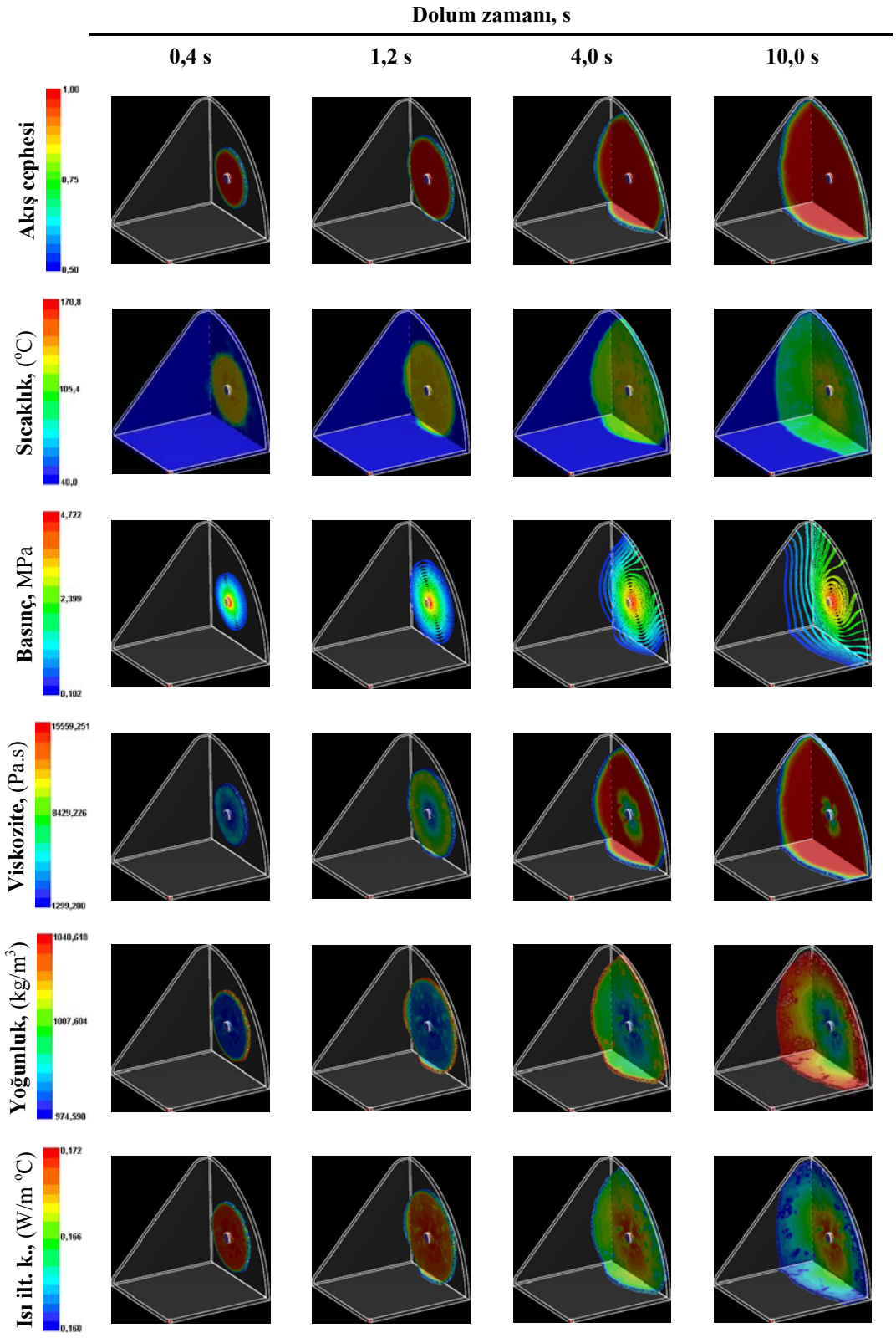
PS malzemesi için sayısal analizler, enjeksiyon basıncının 3-5 MPa aralığında ve 0,5 MPa'lık artışlarla değiştirildiği; enjeksiyon sıcaklığının 170°C-210°C aralığında ve 10°C'lik artışlarla değiştirildiği enjeksiyon parametreleri için gerçekleştirilmiştir. Bu şartlar, deneysel çalışmada da aynen kullanılmıştır. Farklı enjeksiyon basınçları ve farklı enjeksiyon sıcaklıkları kullanılarak gerçekleştirilen sayısal analizler ile, basınç ve sıcaklığın akış davranışına etkileri tespit edilmiştir. Ayrıca, akış cephesinin ilerlemesiyle birlikte, PS malzemesinin fiziksel ve reolojik özelliklerindeki değişimlerin nasıl bir seyir izlediği grafiksel olarak sunulmuştur. Şekil 6.34-Şekil 6.36'da PS malzemesinin akış cephesi davranışı ve PS malzemesinin fiziksel ve reolojik özelliklerinin sabit sıcaklıkta (170°C) basınç ile değişimi görülmektedir.



Şekil 6.34. PS için akış cephesi davranışı ve fiziksel ve reolojik özellik değişimi (Basınç etkisi; $T_{enj} = 170^{o}\text{C}$, $p_{enj} = 3$ MPa)



Şekil 6.35. PS için akış cephesi davranışı ve fiziksel ve reolojik özellik değişimi (Basınç etkisi; $T_{enj} = 170^{o}\text{C}$, $p_{enj} = 4$ MPa)

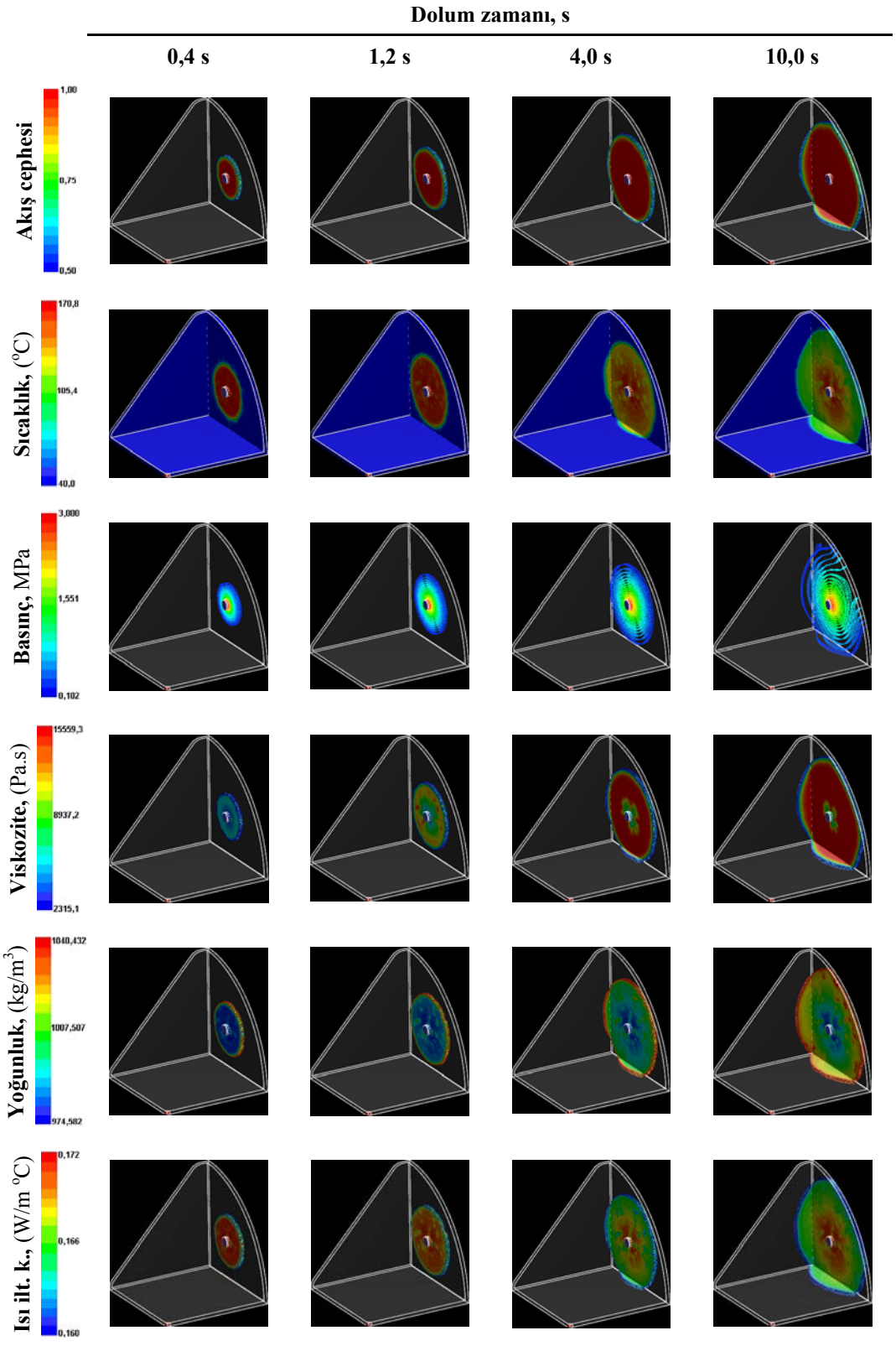


Şekil 6.36. PS için akış cephesi davranışı ve fiziksel ve reolojik özellik değişimi (Basınç etkisi; $T_{enj} = 170^{o}\text{C}$, $p_{enj} = 5$ MPa)

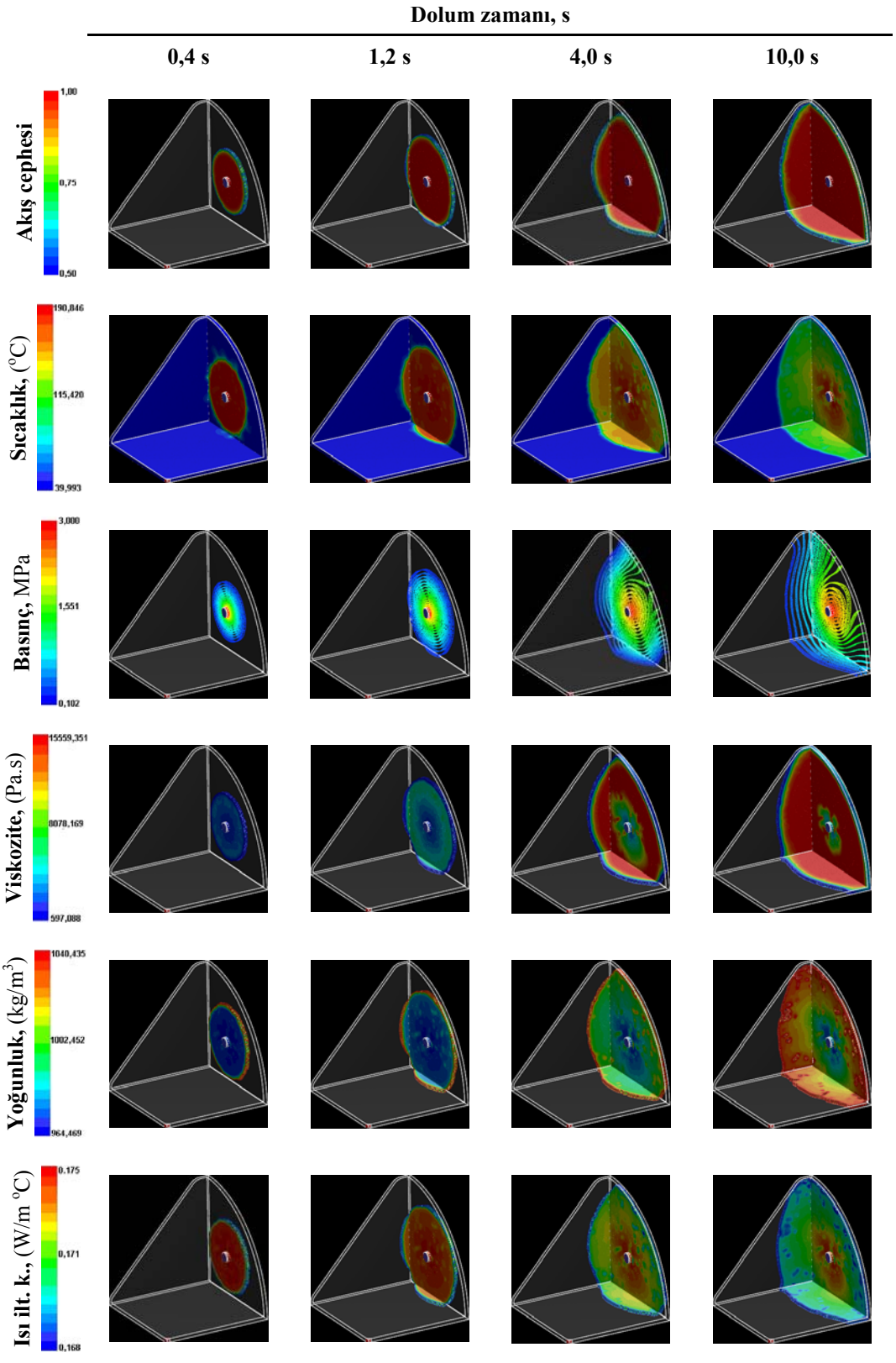
Basıncın akış cephesi ilerlemesi ve dolum sırasında PS malzemesinin fiziksel ve reolojik özellilerindeki değişimlere ait etkilerinin grafiksel olarak gösterildiği Şekil 6.34-Şekil 6.36 incelendiğinde, PS malzemesi için basınç artışının hacimsel dolum oranı üzerinde etkili olduğu söylenebilir. Yarı kristalin yapılı A.Y.PE ve Y.Y.PE malzemeleri ile amorf yapılı PS malzemelerinin kalıp boşluğundaki akış davranışlarının aynı üretim şartları altında değerlendirilebilmesi için kullanılan basınç değerlerinin (3-5 Mpa, 0,5 MPa artışlarla), PS malzemesinin kalıp boşluğunu tam doldurabilmesi için yetersiz kaldığı görülmektedir. A.Y.PE ve Y.Y.PE malzemelerine oranla daha yüksek yoğunluk ve amorf yapı nedeni ile çok daha yüksek viskozite değerine sahip PS malzemesi kullanıldığında, 170^{o}C sabit sıcaklıkta 3 MPa basınç ile kalıp boşluğunun sadece %32,75'i, 4 MPa basınç ile kalıp boşluğunun %44,9'u ve 5 MPa basınç ile kalıp boşluğunun %56,17'si dolmuştur.

Düşük sıcaklık ve buna bağlı olarak yüksek değerli yoğunluk ve viskozite değerleri ve bunlara ilave olarak düşük basınçtan kaynaklanan düşük dolum hızları oluşmuştur. Düşük hızlı dolumlar sırasında sıcaklığını kaybeden PS malzemesinin fiziksel ve reolojik özellikleri de kauçuğumsu katı bir malzemede bulunan değerler seviyesine gelmiştir. Şekil 6.34-Şekil 6.36'da yoğunluk değerlerine bakılacak olursa, yoğunluğun A.Y.PE ve Y.Y.PE malzemelerine oranla daha az oranda değiştiği, fakat viskozitenin ise çok fazla değişim göstererek eksik dolumun gerçekleşmesinde başrolü oynadığı görülmektedir. Isı iletim katsayısında meydana gelen değişimler incelendiğinde, sıcaklığın azalması ısı iletim katsayısının azalmasına sebep olmasına rağmen PS için olumlu görülen bu değişim, kullanılan enjeksiyon şartlarında özellikle viskozitedeki değişimin önüne geçip akışı etkileyerek kalıp boşluğunun dolmasını sağlayıcı bir unsur olamamıştır.

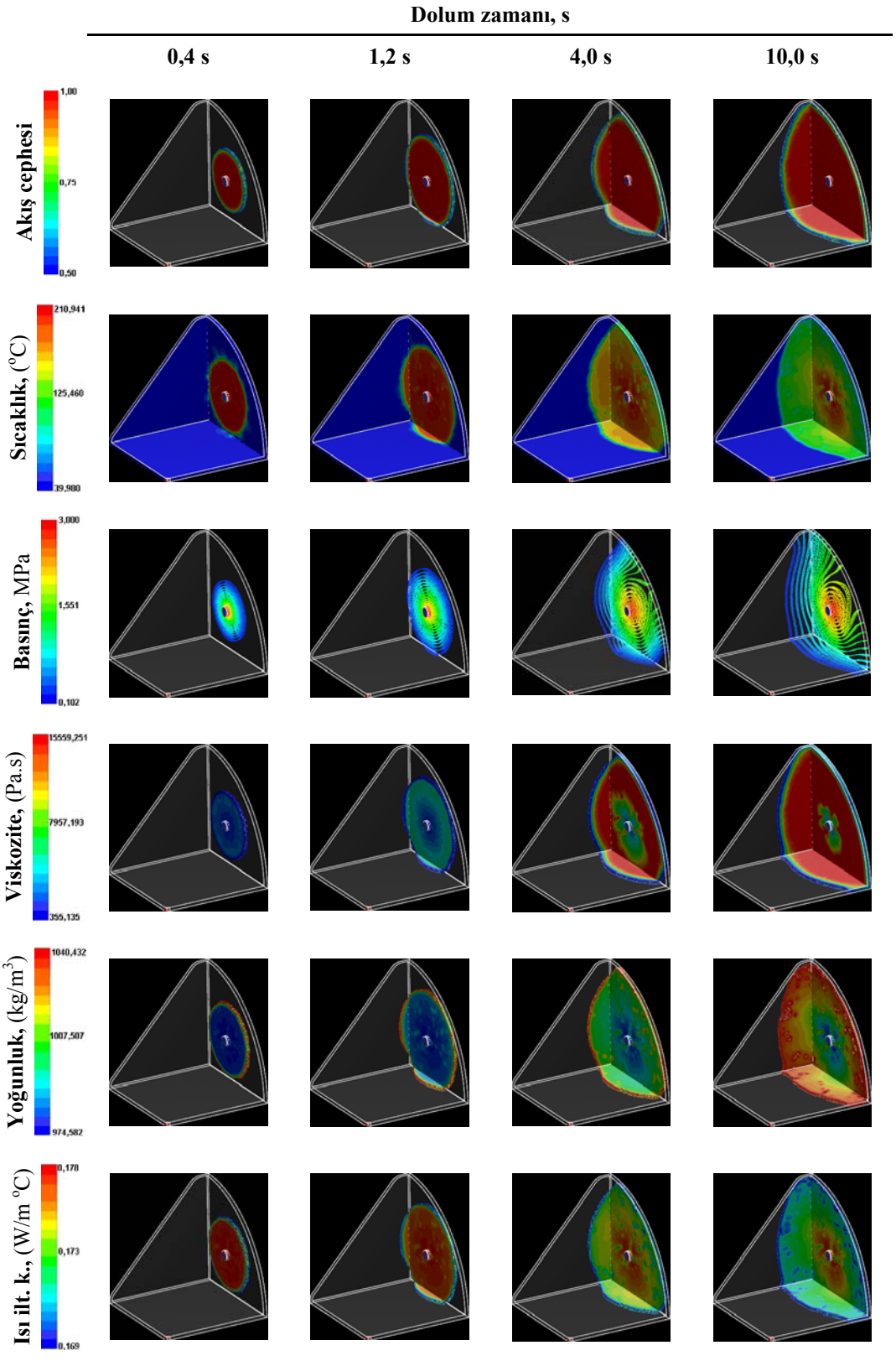
Şekil 6.37-Şekil 6.39'da PS malzemesinin sabit basınçta (3 MPa) sıcaklık değişimine bağlı akış cephesi davranışı ve PS malzemesinin fiziksel ve reolojik özellikleri üzerindeki etkileri grafiksel olarak görülmektedir. Grafiksel gösterimler incelendiğinde, sabit basınçta (3 MPa) sıcaklık artışının, sabit sıcaklıkta basınç artışıyla aynı paralellikte hacimsel dolum oranı üzerinde etkili olduğu görülmektedir.



Şekil 6.37. PS için akış cephesi davranışı ve fiziksel ve reolojik özellik değişimi (Sıcaklık etkisi; $T_{enj} = 170^{o}\text{C}$, $p_{enj} = 3$ MPa)



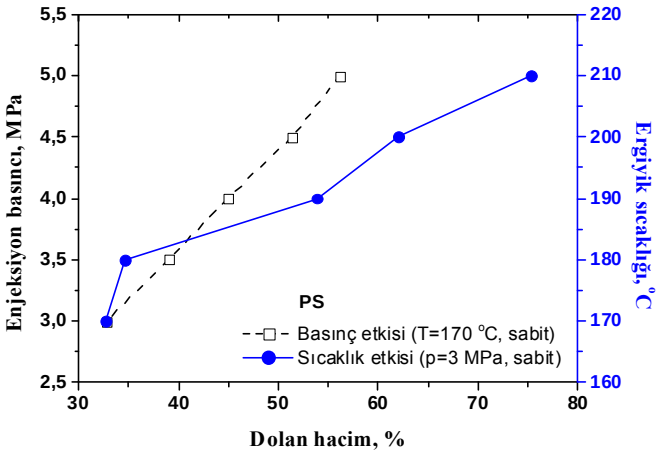
Şekil 6.38. PS için akış cephesi davranışı ve fiziksel ve reolojik özellik değişimi (Sıcaklık etkisi; $T_{enj} = 190^{o}\text{C}$, $p_{enj} = 3$ MPa)



Şekil 6.39. PS için akış cephesi davranışı ve fiziksel ve reolojik özellik değişimi (Sıcaklık etkisi; $T_{enj} = 210^{o}\text{C}$, $p_{enj} = 3$ MPa)

Şekil 6.37-Şekil 6.39' a bakıldığında, 3 MPa sabit basınç ve 170^{o}C sıcaklıkta kalıp boşluğunun sadece %32,75'i PS malzemesi ile dolarken, ergiyik sıcaklığı 190^{o}C'ye çıktığında kalıp boşluğunun %53,80'i ve 210^{o}C'ye çıktığında ise kalıp boşluğunun %75,34'ü dolmuştur.

Şekil 6.40'da PS malzemesi için gerçekleştirilen, sabit sıcaklıkta basınca bağlı ve sabit basınçta sıcaklığa bağlı tüm dolum analizlerinin, dolan hacim üzerindeki etkileri grafik olarak görülmektedir. Grafikten görüldüğü üzere, hem basınç hem de sıcaklık, hacimsel dolum oranı ile doğru orantılıdır. Basınç ve sıcaklıktaki artışa bağlı olarak hacimsel dolum oranı artmaktadır. PS malzemesi için yapılan analizlerde**,** basınç ve sıcaklık ayrı ayrı değerlendirildiklerinde ise dolum aşamasında sıcaklığın yoğunluk ve özellikle viskozite üzerinde basınçtan daha etkili olması, sıcaklık değişimine bağlı hacimsel dolum oranlarının basınç değişimine bağlı hacimsel dolum oranlarından daha fazla olmasını sağlamıştır.



Şekil 6.40. PS için dolan hacim oranının basınç ve sıcaklığa bağlı değişimi

6.3. Deneysel Dolum Analizi Sonuçları

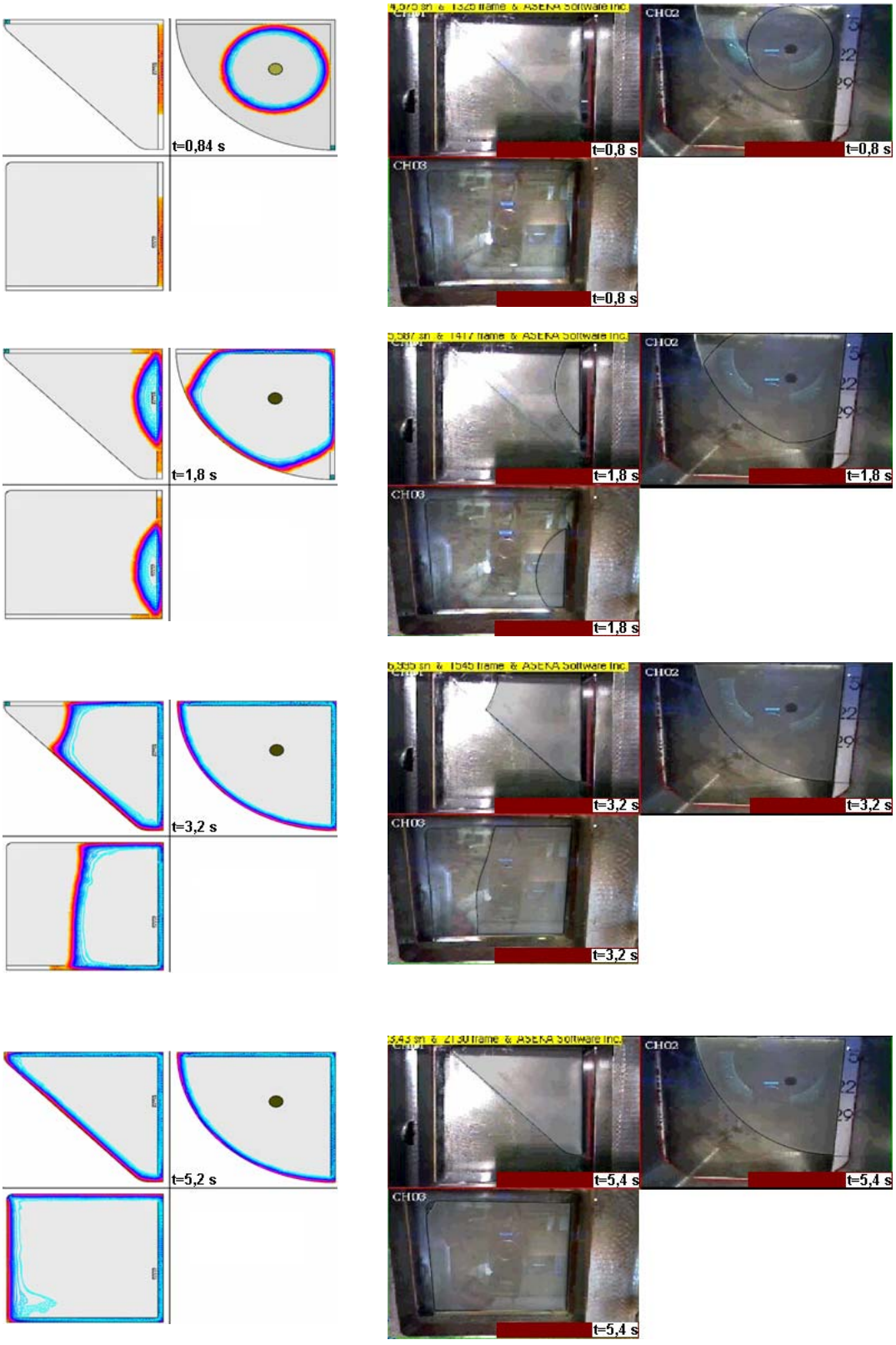
Enjeksiyonla kalıplama yönteminde ergiyik plastiğin kalıp boşluğunda gerçek üretim şartlarında sergilediği akış davranışı, Şekil 6.41-Şekil 6.43'de görülmektedir. Şekillerdeki resimler, video görüntülerinin fotoğrafa dönüştürülmesi ile elde edilmiştir. Deneysel çalışmada kullanılan enjeksiyon şartları sayısal analizlerde

kullanılan şartlarla aynı olup değerleri Çizelge 6.11'de verilmiştir. Deneysel sonuçlar, deneme yanılma baskıları yapılarak kalıp sıcaklığının kararlı hale gelmesinden sonra yapılan video çekimlerinden elde edilmiştir. Deneyler sırasında yapılan ölçümlerde, kalıp sıcaklığının 35^{o}C-40^{o}C aralığının üzerine çıktığı tespit edildiğinde, deney durdurularak kalıbın 35^{o}C-40^{o}C sıcaklık aralığına gelmesi beklenmiştir.

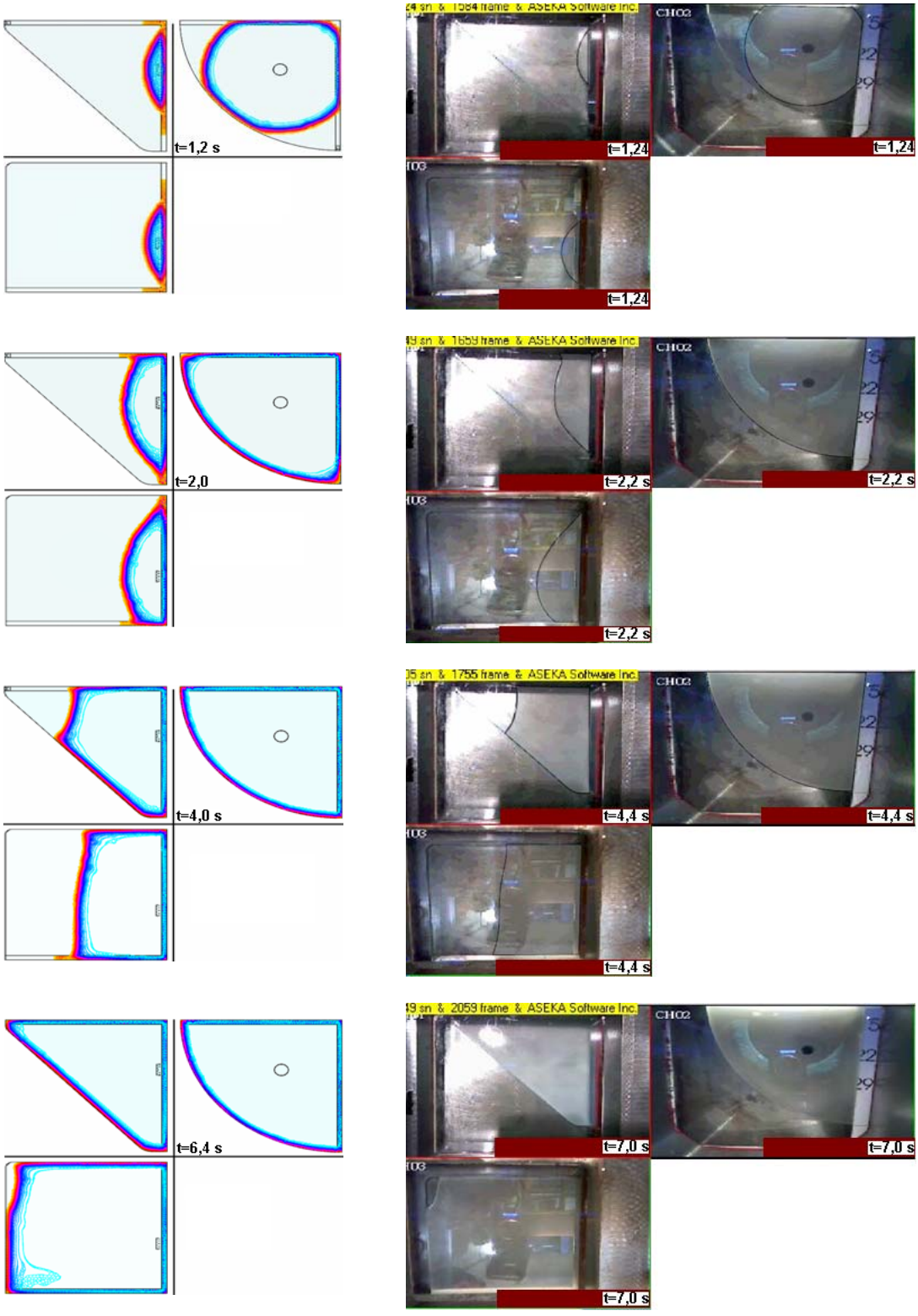
Çizelge 6.10. Deneysel çalışmada kullanılan enjeksiyon parametreleri

	Enjeksiyon parametreleri		
Malzeme	**Basınç, MPa**	**Sıcaklık, ^{o}C**	**Kalıp Sıcaklığı, ^{o}C**
A.Y.PE	3,0	170	35-40
	3,5	180	
	4,0	190	
	4,5	200	
	5,0	210	
Y.Y.PE	3,0	170	
	3,5	180	
	4,0	190	
	4,5	205	
	5,0	220	
PS	3,0	170	
	3,5	180	
	4,0	190	
	4,5	200	
	5,0	210	

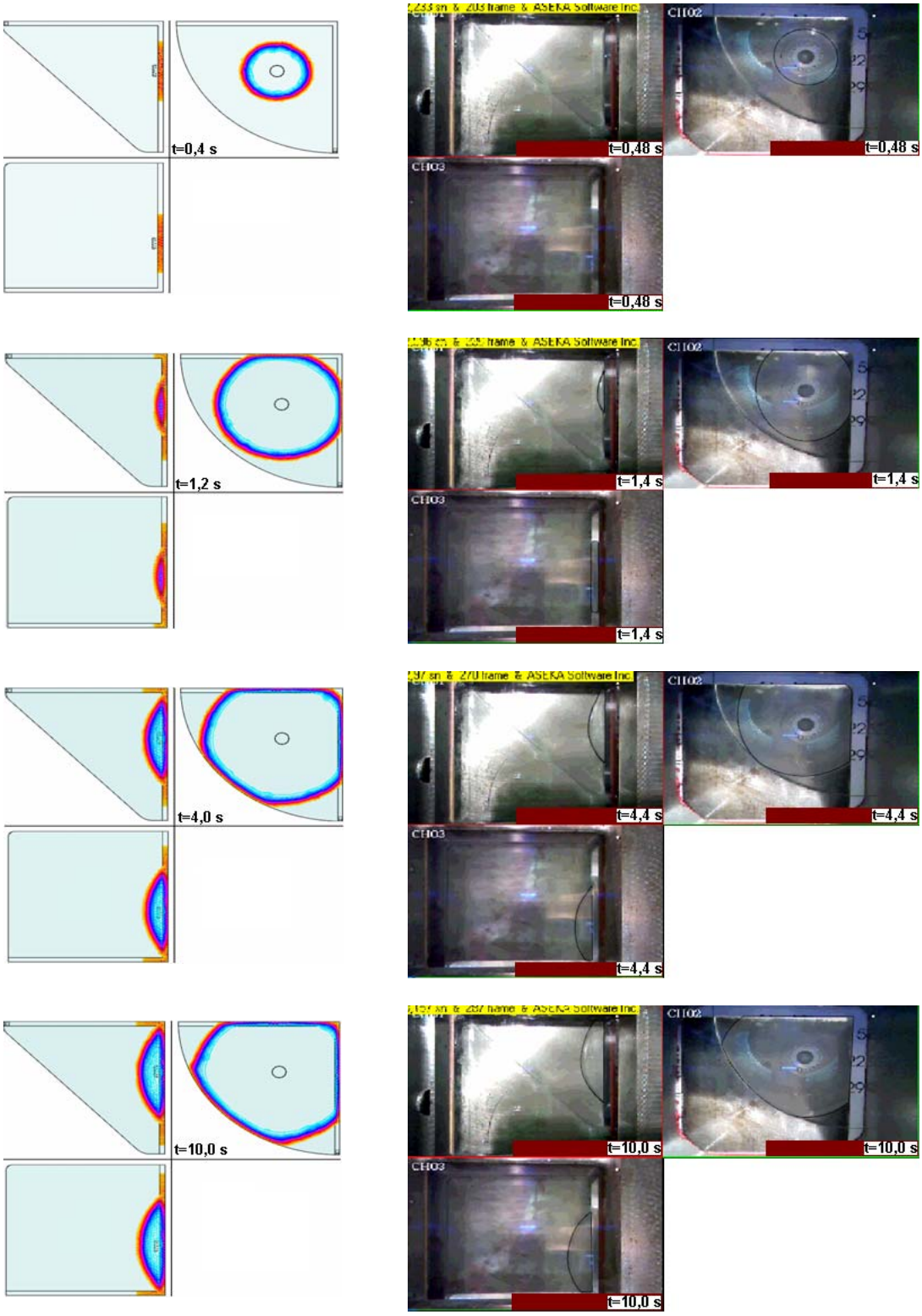
Şekil 6.41-Şekil 6.43 incelendiğinde, A.Y.PE, Y.Y.PE ve PS malzemelerinin kalıp boşluğuna dolum sırasında sergiledikleri akış davranışlarının deneysel olarak görüntülenen akış davranışlarıyla uyumlu olduğu görülmektedir. Bu durum, akış cephesi tespitinde kullanılan VOF yönteminin ve hesap yapılan hücrelerde tespit edilen doluluk oranları için kullanılan düzenlenmiş yüksek çözünürlüklü ara yüzey yakalama (MHRIC) interpolasyon yönteminin başarılı olduğunun bir göstergesidir. Deneysel olarak tespit edilen fiziksel ve reolojik özelliklerin de FLUENT yazılımında kullanılması, sayısal analiz sonuçlarının gerçek akış davranışıyla uyumlu olmasını sağlamıştır.



Şekil 6.41. A.Y.PE için sayısal akış cephesi ve gerçek akış cephesi davranışı
($T_{enj} = 170^{o}$C, $p_{enj} = 3$ MPa)



Şekil 6.42. Y.Y.PE için gerçek akış cephesi ve sayısal akış cephesi davranışı
($T_{enj} = 170^{o}$C, $p_{enj} = 3$ MPa)



Şekil 6.43. PS için gerçek akış cephesi ve sayısal akış cephesi davranışı
($T_{enj} = 170^{o}$C, $p_{enj} = 3$ MPa)

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu doktora çalışmasında, üç boyutlu bir kalıplama boşluğunun A.Y.PE, Y.Y.PE ve PS malzemeleri ile dolum aşamasının sayısal analizi, sonlu kontrol hacmi yöntemini kullanarak temel akış denklemlerini ayrıklaştıran ve sayısal çözümünü yapan, genel bir akışkanlar dinamiği yazılımı FLUENT ile gerçekleştirilmiştir. FLUENT, algoritmasının doğruluğu ve güvenilirliği nedeni ile birçok araştırmacı tarafından tercih edilen genel bir akışkanlar dinamiği yazılımıdır. Çalışma kapsamında kullanılan plastik malzemelerin yoğunluk, ısı iletim katsayısı ve viskozite gibi fiziksel ve reolojik özellikleri, deneysel olarak tespit edilerek malzemelerin karaterizasyonu gerçekleştirilmiştir. Malzemelerin fiziksel ve reolojik özelliklerine (yoğunluk, ısı iletim katsayısı ve viskozite) ait modellerin ve kullanılan sayısal yöntemin gerçeği hangi oranda temsil ettiği, kalıp boşluğundaki akışın görüntülenebilmesine imkân verecek şekilde üretilen ve üç tarafına temperlenmiş 20 mm kalınlığında cam plaka yerleştirilmiş olan deneysel amaçlı plastik enjeksiyon kalıbı (Şekil 4.17-b) gerçek üretim şartlarında (Şekil 4.17-a) denenerek incelenmiştir.

7.1. Sonuçlar ve Tartışma

Yarı kristalin yapılı A.Y.PE ve Y.Y.PE malzemeleri ile amorf yapılı PS malzemelerinin viskoziteleri EAİ cihazı kullanılarak kayma hızı ve sıcaklığa bağlı olarak tespit edilmiştir. Viskozite doğrudan ölçülebilen bir özellik olmayıp, kayma hızı ve kayma gerilmesi arasındaki ilişkiye bağlı olarak yapılan hesaplamalardan bulunabilmektedir. EAİ cihazında 2,095 mm çapında ve 8 mm yüksekliğindeki nozul kullanılarak yapılan deneyler, 20^{o}C'lik artışlı aralıklarla 180^{o}C-280^{o}C sıcaklık aralığında ve 165,6 kPa; 298,2 kPa; 524,0 kPa; 689,5 kPa; 987, 36 kPa ve 1379,9 kPa basınç şartlarında gerçekleştirilmiştir. Deneyler sırasında viskozite hesaplamaları EAİ cihazına ait Nexygen Davenport yazılımı ile otomatik olarak yapılmıştır. Yazılım tarafından hesaplanan viskozite değerleri, görünen değerler olup gerçek viskozite değerleri, akış eğrilerinin (kayma gerilmesi-kayma hızı grafiği) eğimi olan üs sabitleri (n) ve bu üs sabitlerinin Rabinowitsch yaklaşımı dikkate alınarak elde edilen ve Newtonian bir akışkan için olan düzeltilmiş kayma hızları yardımıyla

hesaplanmıştır. Kayma hızı ve sıcaklığa bağlı olarak A.Y.PE malzemesinin gerçek viskozite değerinin 31,158 Pa.s-550,571 Pa.s arasında, Y.Y.PE malzemesinin gerçek viskozite değerinin 151,836 Pa.s-1899,738 Pa.s arasında ve PS malzemesinin gerçek viskozitesinin 47,413 Pa.s-15559,246 Pa.s arasında değişim gösterdiği tespit edilmiştir. Kayma hızına ve sıcaklığa bağlı olarak elde edilen gerçek viskozite değerlerinin sayısal analizlerde kullanılabilmesi için, elde edilen değerler doğrusal çoklu regresyon analizi ile kayma hızı ve sıcaklığa bağlı Power Law viskozite modeline (Eş. 6.5) uydurularak model katsayıları elde edilmiştir. Bu hali ile modeller kayma hızı ve sıcaklığa bağlı olarak viskozite değişimini ifade eden üç boyutlu yüzeyleri (Şekil 6.4-Şekil 6.6) temsil edebilir yetenektedir. Elde edilen katsayılar FLUENT yazılımında viskozite modeli katsayıları olarak kullanılmıştır.

A.Y.PE, Y.Y.PE ve PS malzemelerinin sıcaklığa bağlı yoğunluk değişimleri, EAİ cihazında yapılan düzenlemelerle (Şekil 4.4) sabit kütleli numunelerin sıcaklık artışıyla hacimlerindeki değişimlerin tespit edilmesi ile bulunmuştur. Her üç malzeme için de yoğunluk değerlerinin sıcaklıkla ters orantılı doğrusal bir ilişkiye sahip olduğu görülmüştür. Her üç malzemenin yoğunluğu da sıcaklık artışıyla doğrusal olarak azalmıştır. A.Y.PE ve Y.Y.PE malzemeleri için yoğunluk tespit deneyleri, 10 ^{o}C'lik artışlarla 180^{o}C-260^{o}C sıcaklık aralığında ve PS malzemesi için 10 ^{o}C'lik artışlarla 180^{o}C-260^{o}C aralığında gerçekleştirilmiştir.

Deneyler sonunda sıcaklığa bağlı olarak A.Y.PE malzemesinin yoğunluğunun 774,7 kg/m^3-820,2 kg/m^3, Y.Y.PE malzemesinin yoğunluğunun 742,9 kg/m^3-789,1 kg/m^3 ve PS malzemesinin yoğunluğunun 920,0 kg/m^3-969,7 kg/m^3 aralığında değişim gösterdiği tespit edilmiştir. Deneysel veriler, regresyon analizi ile doğrusal bir modele uydurulmuş ve elde edilen katsayıların FLUENT yazılımında yoğunluk modeli katsayıları olarak kullanılmaları sağlanmıştır.

A.Y.PE, Y.Y.PE ve PS malzemelerinin ısı iletim katsayıları, sıcaklığa bağlı olarak deneysel çalışmayla tespit edilmiştir. Deneyler, ASTM C177 standardı referans alınarak imal edilen deney düzeneğinde gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.6). Deney düzeneğinde kullanılan plastik numuneler (Şekil 4.11) Ø 124 mm dairesel kesitli ve 5

mm kalınlığındadır. Numuneler, enjeksiyonla kalıplama yöntemi ile, imal edilen plastik enjeksiyon kalıbı kullanılarak elde edilmiştir. Deneylerde, ısıtıcının sıcaklık kontrolü PID kontrollü sıcaklık denetleyicisi ile yapılmıştır. Sistem, ısının tek yönde akmasını sağlayacak şekilde imal edilmiştir. Sıcaklık gradyanlarının ölçüldüğü sistemde, ısı akısı hesaplanarak bulunmuş ve bulunan değerler Fourier ısı iletim denkleminde kullanılarak, ilgili sıcaklıktaki ısı iletim katsayısı hesaplanmıştır.

Yapılan ölçümlerden A.Y.PE malzemesinin ısı iletim katsayısının 40^oC-130^oC sıcaklık aralığında 0,169 W/m^oC'den 0,234 W/m^oC'ye yükseldiği görülmüştür. Sıcaklığın 130^oC'den büyük olduğu deneylerde, ısı iletim katsayısının çok az değişim gösterdiği tespit edilmiş olup bu noktadan sonra ısı iletim katsayısının değeri 0,234 W/m^oC alınmıştır. Sıcaklığın 40^oC'den düşük olan bölgeler için ısı iletim katsayısının değeri 0,169 W/m^oC olarak alınmıştır. Y.Y.PE malzemesi için yapılan deneylerde ısı iletim katsayısının 40^oC-150^oC sıcaklık aralığında 0,332 W/m^oC'den 0,233 W/m^oC'ye düştüğü görülmüştür. Sıcaklığın 150^oC'den büyük olduğu deneylerde, ısı iletim katsayısının çok az değişim gösterdiği tespit edilmiş olup bu noktadan sonra ısı iletim katsayısının değeri 0,233 W/m^oC alınmıştır. Sıcaklığın 40^oC'den düşük olan bölgelerde ısı iletim katsayısının değeri 0,332 W/m^oC olarak alınmıştır. PS malzemesi için yapılan deneylerde ısı iletim katsayısının 40^oC-220^oC sıcaklık aralığında 0,1457 W/m^oC'den 0,1788 W/m^oC'ye yükseldiği görülmüştür. PS malzemesinin ısı iletim katsayısı, sıcaklık artışıyla doğru orantılı olarak artış eğilimini devam ettirmesine rağmen, sıcaklığın 220^oC'den büyük olduğu durumlar için ısı iletim katsayısının değeri 0,1788 W/m^oC ve sıcaklığın 40^oC'den düşük olduğu bölgeler için ısı iletim katsayısının değeri 0,1457 W/m^oC alınmıştır. Viskozite ve yoğunluk modellerinin aksine, ısı iletim katsayısı modelleri kullanıcı tanımlı fonksiyonlar şeklinde (EK-2) FLUENT yazılımında kullanılmıştır.

Deneysel verilerden oluşturulan yoğunluk, ısı iletim katsayısı ve viskozite modellerinin tanıtıldığı FLUENT yazılımında, basınca dayalı çözücü kullanılarak temel akış denklemleri üç boyutlu bir akış alanı için (kalıp boşluğu) çözülmüştür. Basınca dayalı çözücüde basınç dağılımı, momentum ve süreklilik denklemlerinin birlikte kullanılmasından elde edilen bir basınç düzeltme denklemi (algoritması)

çözülerek elde edilmektedir. Bu doktora çalışmasında, basınç dağılımının hesaplanması için literatürdeki benzer çalışmalara uygun olarak [14, 88-90] SIMPLE algoritması tercih edilmiştir. Temel akış denklemlerinin kontrol hacminde integralleri alınarak her bir hücrede bağımlı değişkene ait cebirsel denklem sisteminin elde edildiği (ayrıklaştırma) sonlu kontrol hacmi yöntemi, FLUENT yazılımının kullandığı sayısal yöntemdir. Ayrıklaştırma sonunda elde edilen ve doğrusal formda olmayan cebirsel denklem takımlarının doğrusallaştırılması için (Eş. 5.16) Implicit yöntem kullanılmıştır. Hücre merkezlerindeki değerleri hesaplanan taşınım terimlerinin hücre yüzeylerindeki değerlerinin Upwind interpolasyon yöntemiyle hesaplanması sağlanmıştır. Zamana bağlı terimlerin ayrıklaştırılması için Implicit yöntem tercih edilmiştir. Enjeksiyonla kalıplama yönteminde dolum aşaması, çok fazlı akış özelliğindedir. Akışkan fazlardan biri kalıp boşluğuna dolmakta olan ergiyik plastik, diğeri ise kalıp boşluğundaki havadır. Doktora çalışmasında, ergiyik plastik-hava arasındaki ara yüzey (akış cephesi) VOF yöntemi tercih edilerek hesaplanmıştır. Her bir hücredeki doluluk oranlarının hesaplandığı VOF yönteminden elde edilen sonuçların birleştirilerek akış cephesi profilinin elde edilmesi için, yüksek çözünürlüklü ara yüzey yakalama (MHRIC) interpolasyon yöntemi kullanılmıştır.

Sayısal dolum analizi sonuçları ile gerçek akış davranışı sonuçlarının kıyaslanması, literatürde de rastlandığı gibi [14, 91-96] deneysel düzeneğin gerçek üretim şartlarında denenmesi ve kalıp boşluğundaki akış davranışının kayıt edilmesi ile yapılmıştır. Bu çalışmada, literatürden farklı olarak ilk defa üç boyutlu akış davranışı görüntülenebilmiştir. Üç adet video kamera ile kayıt edilen gerçek üç boyutlu akış davranışı, fotoğraf karelerine dönüştürülmüş (Şekil 6.41-Şekil 6.43) ve sayısal analiz sonuçları ile kıyaslamaların yapılabilmesi sağlanmıştır.

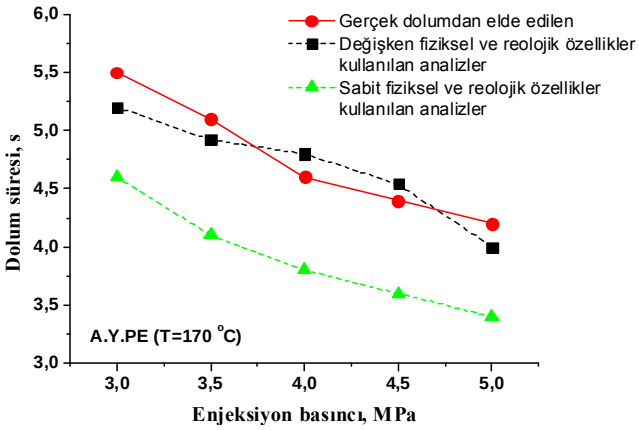
Sayısal analiz sonuçları ve deneysel elde edilen üç boyutlu akış davranışı görüntüleri kıyaslandığında, elde edilen akış cephesi görüntülerinin birbirine çok benzediği görülmektedir. Bu olumlu sonuç, FLUENT yazılımında akış cephesi tespiti için kullanılan VOF yöntemi ve MHRIC interpolasyon yönteminin başarılı sonuçlar verdiğinin açık bir göstergesi olmuştur.

Dolum sırasında akış cephesi davranışının tespit edilebiliyor olması, enjeksiyonla kalıplama sırasında kalıp içindeki havanın tahliye edilebileceği en uygun yerlerin belirlenmesini sağlamaktadır. Uygun yerlerde açılmayan hava tahliye kanalları kalıp boşluğunda tahliye edilemeyen havanın kalmasına sebep olacaktır. Kalıp boşluğundan tahliye edilemeyen hava, başta eksik basım olmak üzere, ürün içinde hapsolmuş hava ve tahliye edilemeyip kalan ve sıkışma nedeniyle sıcaklığı artan hava nedeniyle ürün üzerinde yanık izlerinin oluşması gibi olumsuzluklara sebep olacağından oldukça önemlidir. Ayrıca, akış davranışının bilinmesi ile kalıp boşluğunda bulunan ve maça olarak adlandırılan, akışı bölen ve engelleyen unsurlar etrafındaki akış sırasında meydana gelen birleşim yerleri (kaynak hattı) de tespit edilebilmektedir. Kaynak hatları, plastik ürünler üzerinde hem estetik görünümü bozan hem de mekanik mukavemet açısından en zayıf olan yerler olduğundan istenmeyen fakat kaçınılmaz bir durumdur. Özellikle birbirine montaj edilecek iki unsurun, montaj yerlerine yakın yerlerde oluşan kaynak hatları, montaj sırasında sürekli olarak plastik ürünlerin kırılmasına sebep olabilecektir. Akış davranışının bilinmesiyle, gerekli akış yönlendirmelerini sağlayacak tasarım değişiklikleri yapılarak kaynak hatlarının istenilen yerlerde olması sağlanabilir. Eğer böyle bir düzenleme yapılamıyorsa, o zaman kaynak hattındaki birleşimin kalitesi, sadece kaynak hattı bölgesinin ısıtılması gibi yöntemlerin kullanılmasıyla artırılarak istenilen niteliklerdeki plastik ürünlerin üretilmesi sağlanabilmektedir.

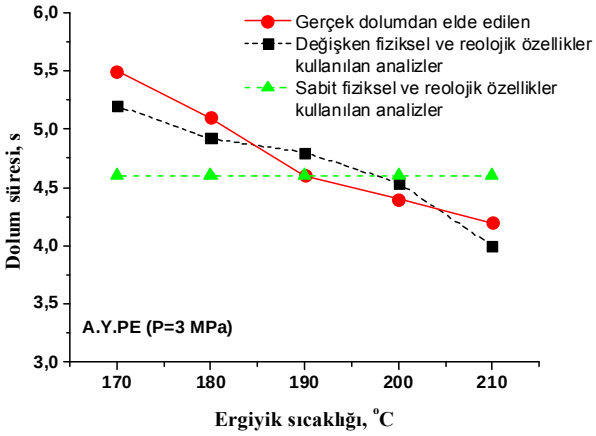
Akış davranışının biliniyor olmasının en önemli faydalarından birisi de, birden fazla plastik ürünün üretildiği kalıplarda (çoklu kalıplama) yolluk ve dağıtıcı kanal tasarımlarının yapılması sırasında ortaya çıkmaktadır. Çoklu kalıplama sırasında, her kalıp boşluğunun aynı anda dolması, her ürünün eş özelliklerde olması anlamına gelmektedir. Aksi takdirde, birbirinden farklı özelliklerde ürünler üretilecektir ki bu da istenmeyen bir durumdur. Ayrıca, çoklu malzeme kullanılarak yapılan kalıplama işlemlerinde (co-injection molding), her bir malzemenin birbirine etkileri ve gaz ve sıvı destekli kalıplama işlemlerinde gaz ve sıvıların akış sırasındaki davranışları da tespit edilebilerek varsa alınması gereken önlemlerin alınabilmesi de akış cephesi davranışının biliniyor olması ile sağlanabilmektedir.

Bu çalışmada, literatürden farklı olarak ergiyik yoğunluğu dolum aşamasında sabit kabul edilmemiştir. Literatürde genellikle yoğunluk dolum aşamasında sabit kabul edilmiş, sadece ütüleme aşamasında değişken kabul edilmiştir. Ayrıca, tercih edilen Power Law viskozite modeli, literatürden farklı olarak [14], sıcaklık terimlerini içeren hali ile kullanılmıştır. Isı iletim katsayısı literatürde genellikle sabit kabul edilirken, bu çalışmada sıcaklığa bağlı değişen bir parametre olarak değerlendirilmiştir. Sayısal analizlerden elde edilen akış davranışı sonuçları değerlendirildiğinde, kullanılan yoğunluk, ısı iletim katsayısı ve viskozite modellerinin de gerçeğe en yakın değerleri verdiği görülmektedir. Bu sonuca, A.Y.PE ve Y.Y.PE malzemelerinin kalıp boşluğunu doldurma sürelerine bakarak ve PS malzemesin dolumu sırasında meydana gelen eksik dolumdaki dolan hacimler incelenerek varılmıştır. Aynı kalıp boşluğunun dolum analizi, sabit yoğunluk, sabit ısı iletim katsayısı ve sabit viskozite değerleri kullanılarak da gerçekleştirilmiştir. Bu analizlerden elde edilen akış cephesi profillerinin de gerçek akış davranışı profiline benzediği görülmüştür. Bunun sebebi, çalışmada kullanılan plastik ürün kalınlığının 3 mm olması ve dolayısıyla fiziksel ve reolojik özelliklerin kalınlık doğrultusundaki değişimlerinin, kalınlık yönündeki akış davranışını fazla etkilememesidir. Ayrıca, 3 mm kalınlık viskoelastik genişlemeyi karşılayacak büyülükte olduğundan, ergiyik kalıp yüzeylerine hemen temas etmiştir. Bunun sonucu olarak da, Hele Shaw yöntemi ile elde edilen ve bu çalışma kapsamında reolojik ve fiziksel özelliklerin sabit alındığı analiz sonuçlarında da benzer akış cephesi davranışı elde edilmiştir. Fakat fiziksel ve reolojik özelliklerin sabit alındığı analiz sonuçlarından elde edilen dolum süreleri ve dolan hacimler değerlendirildiğinde gerçek davranıştan sapmaların olduğu görülmüştür. Sabit fiziksel ve reolojik özelliklerin kullanıldığı analizlerde sıcaklığa bağlı analizler için analizi yapılan sıcaklıktaki deneysel bulunan değerler, basınca bağlı analizlerde ise analiz yapılan basınç değerinde ve 170^{o}C sıcaklıktaki değerler kullanılmıştır. Bu sonuçlar, Şekil 7.1-Şekil 7.6'da verilmiştir. Şekiller incelendiğinde dolum süreleri ve dolan hacim oranlarının gerçek ile en yakın uyumunun değişken fiziksel ve reolojik özelliklerin kullanıldığı analizlerden elde edildiği görülmektedir. Fiziksel ve reolojik özelliklerin sabit alındığı analizlerde dolum süresini ve dolan hacmi, sadece basıncın etkilediği görülmektedir. Aynı parçadan yapılan yüksek sipariş miktarlı üretim süreçleri göz önüne alınacak olursa,

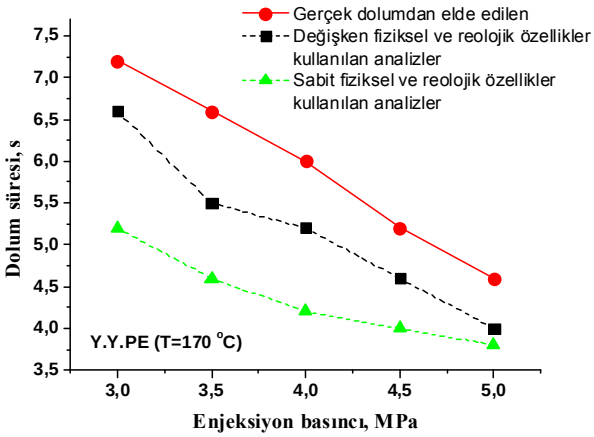
bir parçanın üretiminde yapılan bir saniyelik hataların bile toplam süreç içinde çok önemli problemler doğurarak parça üretim maliyetini artırıcı bir unsur olacağı çok açıktır.



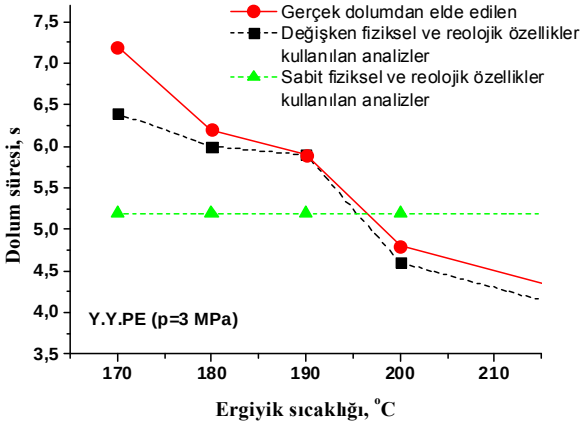
Şekil 7.1. A.Y.PE malzemesi için dolum sürelerinin kıyaslanması (Basınç etkisi, sabit sıcaklık)



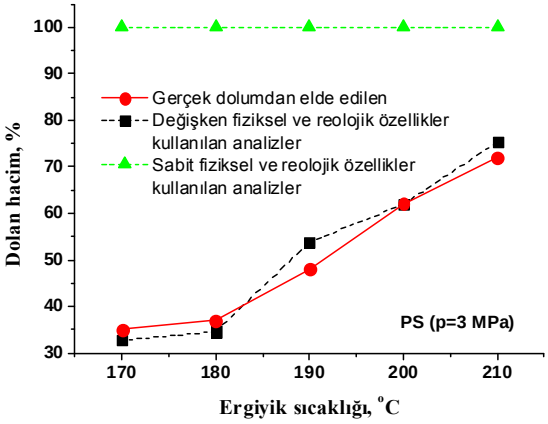
Şekil 7.2. A.Y.PE malzemesi için dolum sürelerinin kıyaslanması (Sıcaklık etkisi, sabit basınç)



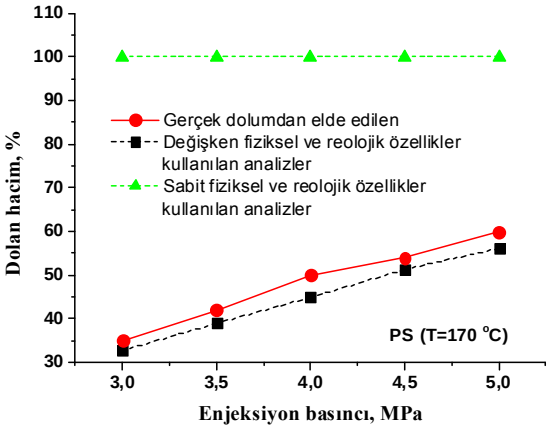
Şekil 7.3. Y.Y.PE malzemesi için dolum sürelerinin kıyaslanması (Basınç etkisi, sabit sıcaklık)



Şekil 7.4. Y.Y.PE malzemesi için dolum sürelerinin kıyaslanması (Sıcaklık etkisi, sabit basınç)



Şekil 7.5. PS malzemesi için dolum sürelerinin kıyaslanması (Sıcaklık etkisi, sabit basınç)



Şekil 7.6. Y.Y.PE malzemesi için dolum sürelerinin kıyaslanması (Basınç etkisi, sabit sıcaklık)

Fiziksel ve reolojik özelliklerin değişken olarak alındığı analiz sonuçlarından, hem sıcaklığın hem de basıncın dolum süresi ve dolan hacim oranı üzerinde etkili olduğu görülmüştür. A.Y.PE ve Y.Y.PE malzemelerinin kalıp boşluğunu doldurma süreleri basınç ve sıcaklık artışıyla birlikte azalmıştır. PS malzemesinin kalıp boşluğuna dolan hacim oranı, artan basınç ve sıcaklıkla doğru orantılı olarak artış göstermiştir. Viskozite deneylerinin istatistiksel olarak değerlendirilmesi sırasında, akışı kolaylaştırıcı unsur olarak her üç malzeme için de sıcaklığın, basınçtan daha fazla etkili olduğu görülmüştür. Bu sonucun doğruluğu, dolum süreleri incelendiğinde de ortaya çıkmıştır.

Dolum süresini azaltıcı en büyük unsur, sıcaklık artışıyla viskozitede meydana gelen azalmadır. Plastik malzemeler ergiyik haldeyken uzun molekül zincirlerini yapılarında bulundurmaktadır. Bu molekül zincirlerinin omurgasını karbon atomları oluşturmaktadır. Molekül zincirlerindeki karbon atomları çok güçlü kovalent bağlarla bir arada tutulmaktadır. Polimer zincirleri ise zayıf van der waals kuvvetleriyle bir arada tutulmaktadırlar. Sıcaklık artışı, kovalent bağlarda zayıflamaya ve bağların uzunluklarının artmasına neden olmaktadır. Normal sıcaklık değerlerinde bu bağlar, hareket serbestliğinin artmasını sağlarlar. Hareket serbestliği olmasına rağmen karbon atomları hala bir aradadırlar. Çok yüksek sıcaklık değerlerine çıkıldığında ise bu bağlar kırılarak polimerin bozulmasına neden olurlar. Normal sıcaklık

değerlerinde kovalent bağlar zayıflarken, Van der Waals bağları ise çok zayıflarlar ve polimer zincirleri birbirlerine çok az tutunurlar. Sıcaklığın biraz artırılmasıyla bu polimer zincirleri birbirinden ayrılarak akmayı başlatırlar. Bu nedenle, akışı kolaylaştıran en büyük unsur olarak sıcaklık gösterilmektedir. Basınç ise, daha düşük sıcaklıklarda polimer zincirlerinin yönlendirilebilmesini sağlayan ikincil unsur olarak kendini göstermektedir.

Dolum sırasında ısı iletim katsayısının özellikle gereksinim duyulacak basınç değerinin hesaplanması için gerekli olduğu görülmüştür. Yapılan analiz sonuçlarından da görüldüğü üzere, yüksek ısı iletim katsayıları hızlı soğumayı ve buna bağlı olarak meydana gelen düşük sıcaklıklar nedeniyle viskozitedeki yükselme anlamına gelmektedir. Bu durum da basınç ihtiyacının artması anlamına gelmektedir. Yoğunluk değeri, dolum sırasındaki hızı belirleyen ana unsur olarak göze çarpmaktadır. Enjeksiyon preslerinin silindir çapları değişmeyip sabittir. Bu durumda sabit debiyi sağlayacak şekilde ergiyik plastiğe uygulanan sabit itme basıncı ile sağlanan hız, yoğunluk değerinin büyüklüğüne bağlı olarak değer kazanmaktadır. Bu da sabit debi sağlayabilmek için, kalıp boşluğu dolarken sıcaklık değişimiyle artan ergiyik yoğunluğuna bağlı olarak, enjeksiyon basıncının ya da enjeksiyon hızının sürekli artırılması gerektiği anlamına gelmektedir. Üretim yapılan sıcaklık değerindeki ergiyik yoğunluğunun bilinmesi, enjeksiyon silindiri içine hangi hacimde plastik malzeme alınması gerektiği hakkında da ışık tutucu bir unsurdur. Dolayısı ile yoğunluk değeri de viskozite ile benzer bir etkiye sahiptir. Kalıp boşluğundaki yüksek yoğunluklu bölgeler, katılaşan katmanların tespiti için de kullanılabilmektedirler. Kaynak hatları oluşurken, birleşen akış burunlarındaki yoğunluk değerlerine bakılarak, birleşimin kalitesinin tayini de mümkündür.

Özgül ısı kapasitesi (c_p), bu çalışma kapsamında sabit alınmıştır. A.Y.PE ve Y.Y.PE malzemeleri için $c_p = 3400$ j/kg^{o}C, ve PS malzemesi için $c_p = 2300$ j/kg^{o}C değerleri literatüre uygun olarak alınmıştır. Yüksek ısı kapasitesi, soğuma ya da ergime için daha fazla enerji gerektiği anlamına gelmektedir. Yavaş dolum hızlarında, yüksek ısı kapasitesi soğumayı azaltıcı bir unsur olarak rol aldığı için ihtiyaç duyulan basınç

değerlerinin de azalmasını beraberinde getirmektedir. Yapılan analizlerde, PS malzemesinin ısı kapasitesinin düşük olması, daha hızlı soğumayı ve buna bağlı olarak da viskozite ve yoğunlukta artışa sebep olduğundan, kullanılan basınç değerinde kalıp boşluğunun dolamamasına neden olmuştur.

7.2. Öneriler

1. Atalet ve yerçekimi kuvvetlerinin, özellikle kalın kesitli plastik ürünlerin kalıplanması sırasında akış davranışında önemli davranış değişimlerine sebep olacağı öngörülmektedir. Bu nedenle, çalışmada kullanılan kalıp boşluklarının kalınlıkları daha fazla artırılarak akış davranışı görüntülenebilir.

2. Çalışmada, kalıp boşluğundaki basınç ve sıcaklık değişimleri sadece sayısal olarak analiz edilmiştir. Sayısal analizlerden elde edilen basınç ve sıcaklık dağılımlarının, gerçeği ne oranda yansıttığı, kalıp boşluğuna yerleştirilecek basınç sensörleri ve kalınlık doğrultusunda farklı derinliklerde yerleştirilecek termokupllarla elde edilecek verilerle kıyaslanabilir. Sıcaklık ölçümünde, hızlı cevap veren sistemlerin kullanılması tercih edilmelidir.

3. Çalışma kapsamında deneysel olarak tespit edilen yoğunluk ve ısı iletim katsayıları, sadece sıcaklığa bağlı değerlerdir. Bu halleri ile dolum aşamasının sayısal analizlerinde kullanılmaları uygundur. Dolum aşamasından sonraki ütüleme aşamasında, kalıp boşluğundaki ergiyik plastiğin davranışlarının tespit edilebilmesi için, yoğunluk ve ısı iletim katsayısı değerlerinin basınç ve sıcaklığa bağlı değişimleri tespit edilebilir.

4. Özgül ısınma ısının, sıcaklığa ve basınca bağlı değişimlerinin bilinmesi, soğutma ve ergitme için gerekli enerji miktarının tespit edilebilmesi açısından oldukça önemlidir. Bu nedenle, deneysel olarak tespit edilerek verilerin modellemesi yapılabilir.

5. Ergiyik plastik kalıp boşluğuna dolduktan sonra, soğutularak ürün haline gelmesi sağlanmaktadır. Soğutma sırasında, katılaşmaya başlayan ergiyik plastik, polimer

zincirlerinin birbirine yaklaşması ve bağ uzunluklarının kısalması nedeniyle hacimsel olarak küçülmektedir. Bu hacimsel küçülme sebebi ile plastik temas halinde bulunduğu kalıp yüzeylerinin bazılarından uzaklaşmakta ve temas bitmektedir. Bu durumda, nasıl bir ısı transferi gerçekleştiği araştırılabilir.

6. Farklı giriş kanalı tiplerinin dolum üzerine etkileri araştırılabilir.

7. Çalışmada gerçekleştirilen sayısal analizlerde, temel akış denklemlerinde ihmaller yapılmadığı ve fiziksel ve reolojik özellikler sabit alınmadığı için, çözüm süresi oldukça uzun olmuştur (~21-30 saat/analiz). İhmaller yapılmadan yapılan analizlerde, çözüm süresini azaltıcı algoritma ve yaklaşımların geliştirilmesi sağlanabilir.

KAYNAKLAR

1. Akovalı, G., "Temel ve Uygulamalı Polimer", ***A.Ü.F.F. Basımevi***, Ankara, 1-437 (1984).

2. Aksoy, S., "Başkandan, Plastik sektörü", ***Plastik Araştırma, Geliştirme ve İnceleme Dergisi***, 98: 9 (2008).

3. Barbaros Demirci, "Plastik sektörü 2007 değerlendirmesi ve ileriye dönük beklentiler", http://www.plastik-tr.com/sektordegerlendirme.doc (2009).

4. Barbaros Demirci, "Plastik sektörü 2008 yılı ilk 6 aylık değerlendirmesi", http://www.plastik-tr.com/6aylikdeg.pdf (2009).

5. Beaumont, J.P., Nagel, R., Sherman, R., "Successful Injection Molding", ***Carl Hanser Verlag***, Munich, 1-355 (2002).

6. Kennedy, P., "Flow Analysis of Injection Molding", ***Hanser/Gardner Publications***, Cincinnati, USA, 1-222 (1995).

7. Beaumont, J.P., "Runner and Gating Design Handbook", ***Carl Hanser Verlag***, Munich, 1-281 (2004).

8. Rosato, D. V., Rosato, D. V., "Injection Molding Handbook 2nd Edition", ***Kluwer Academic Publishers***, Boston/London, 1-1101 (1999).

9. Osswald, A. T., "Polymer Processing Fundamentals", ***Hanser / Gardner Publications, Inc.***, Cincinnati, 1-139 (1998).

10. Menges, G., Mohren, P., "How to Make Injection Molding", ***Hanser Publication***, New York, 89-126 (1995).

11. Carreau, P.J., Kee, D.C.R.D., Chhabra, R.P., "Rheology of polymeric systems", ***Hanser/Gardner Publications***, Cincinnati, 1-132 (1997).

12. Morrison, F.A., "Understanding Rheology", ***OxfordUniversity Press***, Oxford, USA, 1-522 (2001).

13. Uluer, O., "Enjeksiyonla kalıplamada işleme parametrelerinin katılaşmış katman oluşumuna etkisi", ***Gazi Üniversite, Mühendislik Mimarlık Fakültesi*** Dergisi, 23 (1): 249-255 (2008).

14. Güldaş, A., "Plastik enjeksiyon kalıplarında ergimiş plastik akışının matematiksel modellenmesi ve deneysel olarak incelenmesi", Doktora Tezi, ***Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü***, Ankara (2004).

15. Crawford, R.J., "Plastics Engineering 2nd Edition", ***Pergamon Press***, Great Britain, 1-287 (1987).

16. Bicerano, J., "Preediction of Polymer Properties 3rd Edition Revised and Expanded", ***Marcel Dekker Inc.***, USA, 1-700 (2002).

17. Buckleitner, E. V., "Plastics Mold Engineering Handbook 5th Edition", ***Chapman & Hall***, An International Thomson Publishing Company (1995).

18. Michaeli, G., Kaufmann, V., "Training in Plastic Technology"**,** ***Hanser/ Gardner Publications Inc.***, Cincinnati, 1-65 (1995).

19. Malloy, R.A., "Plastic Part Design for Injection Molding", ***Carl Hanser Verlag***, Munich, 1-123 (1994).

20. Seminar notes on polymer rheology and processing, ***Thermo Fisher Scientific***, 29th November 2007.

21. Kaya, F., "Ana Hatlarıyla Plastikler ve Katı Maddeleri 2. Baskı", ***Birsen Yayınevi***, İstanbul (2005).

22. Dupret, F., Couniot, A., Mal, O., Vanderschuren, L., Verhoyen, O., "Rheology Series: Advances in the Flow and Rheology of Non-Newtonian Fluids", ***Elsevier Book Series,*** 8 (2): 939-1010 (1999).

23. Nassehi, V., "Paractical Aspects of Finite Element Modelling of Polymer Processing", ***John Wiley&Sons Ltd.***, Chichester, 1-208 (2002).

24. Uysal, B. Z., "Akışkanlar Mekaniği", ***Alp yayınevi***, Ankara, 71-89 (2003).

25. Chang, R. Y., Yang, W. H., "Numerical simulation of mold filling in injection molding using a three dimensional finite volume approach", ***International Journal for Numerical Methodsin Fluids***, 37: 125-148 (2001).

26. Kamal, M.R., Kenig, S., "The injection molding of thermoplastics, Part I: Theoretical Model", ***Polymer Engineering&Science***, 12: 294-301 (1972).

27. 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).

28. 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).

29. 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).

30. Kuo, Y., Kamal, M.R., "The fluid mechanics and heat transfer of injection mold filling of thermoplastic materials", ***AIChE Journal***, 22: 661-668 (1976).

31. Kamal, M.R., Chu, E., Lafleur, P.G., "Computer simulation of injection mold filling for viscoelastic melts with fountain flow", ***Polymer Engineering&Science***, 26: 190-196 (1986).

32. Kamal, M.R., Goyal, S.K., Chu, E., "Simultion of injection mold filling of viscoelastic polymer with fountain flow, ***AIChE Journal***, 34: 94-106 (1988).

33. 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).

34. Lord, H.A., Williams, G., "Mold filling studies for injection molding of thermoplastic materials", ***Polymer Engineering and Science***, 15 (8): 569-582 (1975).

35. 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).

36. Garcia, D., Courbebaisse, G., Jourlin, M., "Image analysis dedicated to polymer injection molding", ***Image Anal Stereol***, 20: 143-148 (2001).

37. Jiang, B., Zhong, J., Huang, B., Ui, X., Lİ, 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).

38. 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).

39. Smith, D. E., Tortorelli, D. A., Tucker III, C. L., "Analysis and sensivity analysis for polymer injection and compression molding", ***Computer Methods in Applied Mechanics Engineering***, 167: 325-344 (1998).

40. Harry, D., Parrot, R., "Numerical simulation of injection mold filling", ***Polymer Engineering and Science***, 10: 209 (1970).

41. Berger, J., Gogos, C., "A Numerical Simulation of the Cavity Filling Process with PVC in Injection Molding" ***Polymer Engineering and Science***, 13: 102 (1972).

42. Tadmor, Z., Broyer, E., Gutfinger, C., "Three-dimensional Finite Element Method for the Filling Simulation of Injection Molding", ***Polymer Engineering and Science***, 14: 660 (1974).

43. Hieber, C., Shen, S., "FA finite-element/finite-difference simulation of the injection molding residual stress process", ***Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics***, 7: 1 (1980).

44. Hieber, C., Socha, L., Shen, S., Wang, K., Isayev, A., "Filling thin cavities of variable gap thickness:a numerical and experimental investigation", ***Polymer Engineering and Science***, 23: 20 (1983).

45. Papanastasiou, T., Scriven, L. E., Macosko, C. W., "A finite element method for liquid with memory", ***Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics***, 22: 271 (1987).

46. Wesson, R., Papanastasiou, T., Wilkes, J., "Viscoelastic melt flow ", ***Journal of Rheology***, 33: 1047 (1989).

47. Loh, K., Teoh, S., Tay, A., "Compute simulation of viscoelastic flow at the entry region", ***Polymer Engineering and Science***, 36: 368 (1996).

48. Özdemir, A., Uluer, O., Güldaş, A., "Flow Front Advancement of Molten Thermoplastic Materials During Filling Stage of a Mold Cavity", **Polymer Testing**, 23 (8): 957-966 (2004).

49. Versteeg, H.K., Malalasekera, W., "An Introduction to Computational Fluid Dynamics, The Finite Volume Method", ***Addison Wesley Longman Limited***, England, 48-280 (1995).

50. 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).

51. 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).

52. Yung, K.L., Xu, Y., Lau, K. H., "Simulation of transient process in melting section of reciprocating extruder", ***Polymer***, 43: 983-988 (2002).

53. 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)

54. 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).

55. 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).

56. Tang, D., Yang, C., Kobayashi, S., Ku, D.N., "Experiment-based numerical simulation of unsteady viscous flow in stenotic collapsible tubes", ***Applied Numerical Mathematic*s**, 36: 299-320 (2001).

57. Yiğitler, K., "Numerical modeling of cyclone separators laminar swirling flow", Msc. Thesis, ***Boğaziçi University Science and Engineering***, 1-58 (1995).

58. Georgiou, G.C., "The time-dependent, compressible poiseuille and extrudate-swell flows of a carreau fluid with at the wall", ***Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics***, 109: 93-114 (2003).

59. Lee, A.G., Shaqfeh, E.S., Khomami, B., "A study of viscoelastics free surface flows by the finite element method: Hele-Shaw and slot coating flows", ***Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics***, 108: 327-362 (2002).

60. 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).

61. Pichelin, E., Coupez, T., "A Taylor discontinuous Galerkin method for the termal solution in 3d mold filling", ***Computer Methods in Applied Mechanics Engineering***, 178: 153-169 (1999).

62. Sepe P. M., "Dynamic mechanical analysis for plastics engineering", ***Plastics Design Library***, Norwich, 38-237 (1998).

63. 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).

64. 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).

65. Tang, L.Q., Chassapis, C., Manoochehri, "Optimal cooling system design multi-cavity injection molding", ***Finite Element Analysis and Design***, 26: 229-251 (1997).

66. Wang, Y., Guo, B., "Petrov-Galerkin methods for non-linear systems without monotonicity", ***Applied Numerical Mathematics***, 33: 57-78 (2001).

67. Smith, D. E., Tortorelli, D. A., Tucker III, C. L., "Analysis and sensivity analysis for polymer injection and compression molding", ***Computer Methods in Applied Mechanics Engineering***, 167: 325-344 (1998).

68. Poullet, P., "Staggered incremental unknowns for solving Stokes and generalized Stokes problems", ***Applied Numerical Mathematics***, 35: 23-41 (2000).

69. Kumar, A., Ghoshdastidar, P.S., Muyu, 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).

70. 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).

71. Edvwards, S.A., Provatas,M., Ginic-Markovic, M., Choudhury, N.R., "Probing the interface behaviour of injection molded thermoplastics by micro-termal analysis and temperature-modulated differential scanning calorimery", ***Polymer***, 44: 3661-3670 (2003).

72. 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).

73. 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).

74. F. H. Harlow and J. E. Welch, "The MAC method: a computing technique for solving viscous, incompressible, transient fluid flow problems involving free surfaces", ***os Alamos Scientific laboratory Report***, A:3425 (1966).

75. E. G. Thompson, J. F. T. Pittman and O. C. Zienkiewicz, “Some integration techniques for the analysis of viscoelastic flows”, ***Int. J. Numer. Meth. Fluids***, 3: 165-177 (1983).

76. 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).

77. E. Thompson, “Use of Pseudo-Concentrations to follow creeping viscous flows during Transient Analysis”, ***Int. J. Numer. Meth. Fluids***, 6:749-761 (1986).

78. Walt, 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).

79. C. W. Hirt and B. D. Nichols, “Volume of ßuid (VOF) method for the dynamics of free boundaries”, ***J. Comput. Phys.***, 39(1), 201-225 (1981).

80. E. Broyer, C. Gutfinger and Z. Tadmore, “A theoretical model for the cavity filling process in injection molding”, ***Trans. Soc. Rheol.***, 19(3), 423-444 (1975).

81. K. K. Wang and C. A. Hieber, “The Manufacturing Science Of Composites”, ***ASME (Injection molding simulation, T. G. Gutowski edition)***, New York, 4: 5-220 (1988).

82. Rider, C., Flavio, J., “Vasconcellos, an unstructured finite volume procedure for simulating flows with moving fronts”, ***Computer Methods in Applied Mechanics Engineering***, 182, 401-420 (2000)

83. 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).

84. 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).

85. Gogos, C.G., Huang, C.F., “The process of cavity filling including the fountain flow in injection molding”, ***Polymer Engineering and Science***, 26: 1457-1466 (1986).

86. Coyle, D.J., Blake, J.W., Macosko, C.W., “The kinematics of fountain flow in mold filling, ***AIChE Journal***, 33: 1168-1177 (1987).

87. N. Narazaki and A. Mizukami, “Simulation of polymeric flows in the injection molding process”, ***Convex Users Conf.***, *Texas*, 344-348 (1990).

88. 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).

89. Patankar, S.V., "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow", ***Hemisphere Published Corparation***, New York, USA, 1-184 (1980).

90. Versteeg, H.K., Malalasekera, W., "An Introduction to Computational Fluid Dynamics, The Finite Volume Method", ***Addison Wesley Longman Limited***, England, 48-280 (1995).

91. 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).

92. Fathi, S., Behravesh, A. H., "Real-time measurement of flow front kinematics using quantitative visualization in injection molding process", ***Polymer Engineering and Science***, 48: 598-605 (2008).

93. Yokoi, H., Masuda, N., Mitsuhata, H., "Visualization 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).

94. Han, X., Yokoi, H., "Visualization analysis of the filling behavior of melt into microscale v-grooves during the filling stage of injection molding", ***Polymer Engineering and Science***, 46: 1590-1597 (2006).

95. Liu, J. S., Wu, Y. C., "Dynamic visualization of cavity filling process in fluid-assisted injection molding-gas versus water", ***Polymer Testing***, 26: 232-242 (2007).

96. Bickerton, S., Advani, S. G., "Experimental investigation and flow visualization of the resin-transfer mold-filling process in a non-planar geometry", ***Composites Science and Technology***, 57: 23-33 (1997).

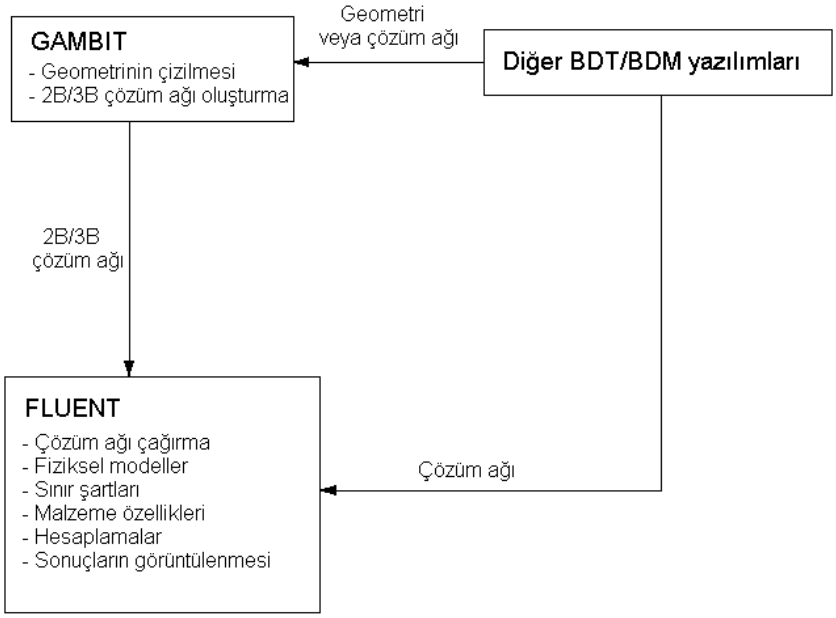
97. Shah, V., "Handbook of Plastics Testing Technology 2nd Edition", ***John Wiley&Sons Ltd.***, USA, 101-106 (1998).

98. FLUENT 6.3 User's Guide, ***Fluent Inc.,*** (2003).

EKLER

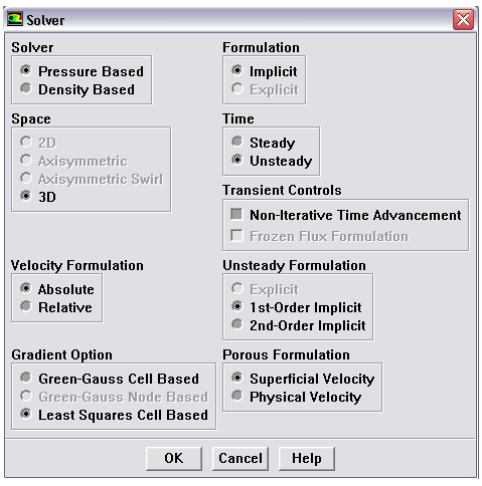
EK-1 FLUENT programının yapısı ve çalışma adımları

FLUENT programının yapısı:



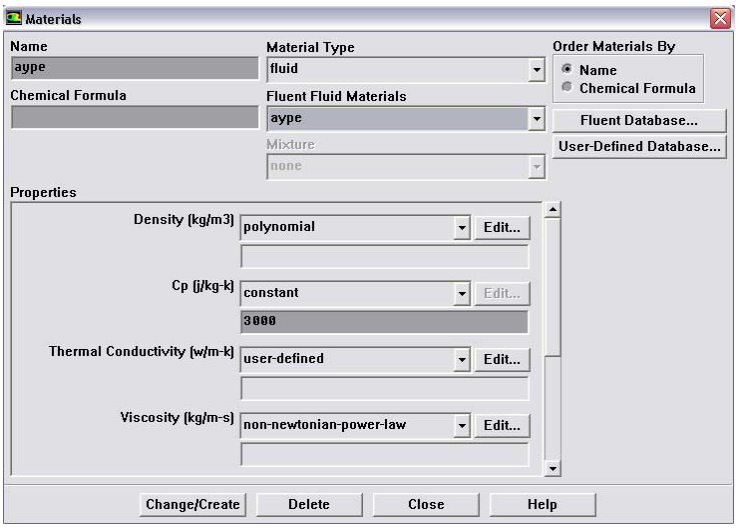
FLUENT programında çalışma adımları:

- Akış alanı FLUENT ortamına çağırılır.
- Çözücü seçimi yapılır.



EK-1 (Devam) FLUENT programının yapısı ve çalışma adımları

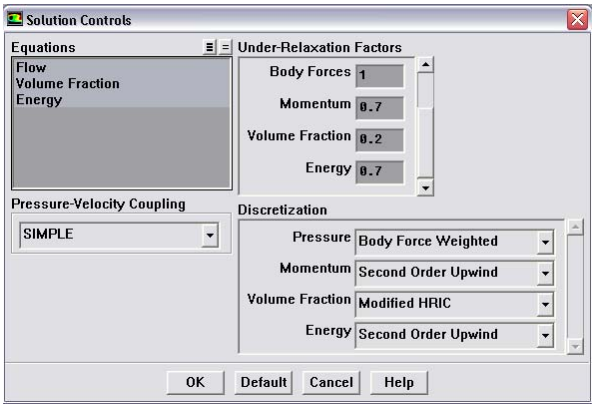
- Malzeme özellikleri girilir.



- Sınır şartları girilir.

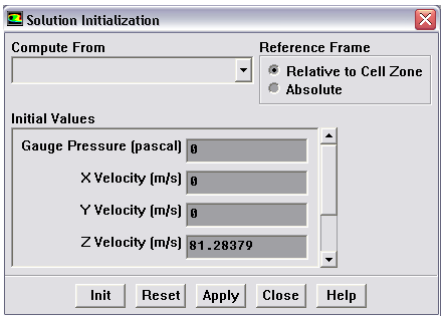


- Temel denklemlerin ayrıklaştırma/çözüm parametreleri ve yöntemleri seçilir.

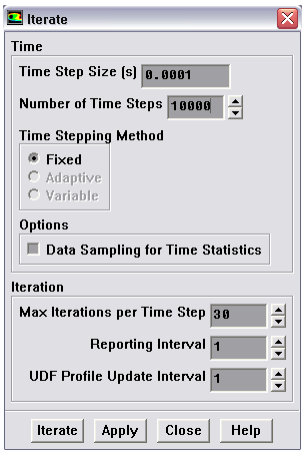


EK-1 (Devam) FLUENT programının yapısı ve çalışma adımları

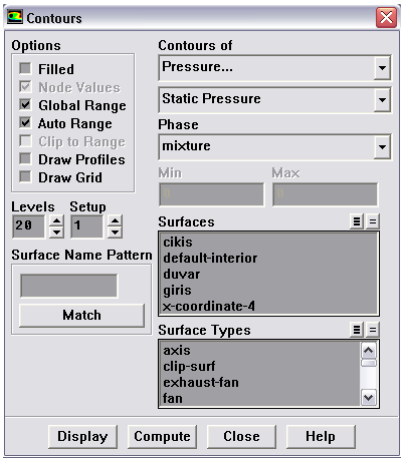
- Sayısal çözümün başlangıcında, değişkenlerin başlangıç tahmin değerleri girilir.



- İterasyon parametreleri girilir.



- Çözüm sonuçlarının grafik ekranda gösterilmesi



EK-2 A.Y.PE, Y.Y.PE ve PS malzemelerinin ısı iletim katsayıları için yazılan kullanıcı tanımlı fonksiyonlar

```
/**********************************************************************
  A.Y.PE-Sıcaklığa Bağlı Isı İletim Katsayısı için Kullanıcı Tanımlı Fonksiyon
**********************************************************************/

#include "udf.h"
DEFINE_PROPERTY(AYPE,cell,thread)
{
        real kond;
        real temp=C_T(cell,thread);

        if (temp>403.)
            kond=0.233;
        else if (temp>313.)
            kond=0.000722*temp-0.057111;
        else
            kond=0.169;

        return kond;
}

/**********************************************************************
  Y.Y.PE-Sıcaklığa Bağlı Isı İletim Katsayısı için Kullanıcı Tanımlı Fonksiyon
**********************************************************************/

#include "udf.h"
DEFINE_PROPERTY(YYPE,cell,thread)
{
        real kond;
        real temp=C_T(cell,thread);

        if (temp>423.15)
            kond=0.233;
        else if (temp>313.15)
            kond=0.620740-0.000922*temp;
        else
            kond=0.332;

        return kond;
}
```

EK-2 (Devam) A.Y.PE, Y.Y.PE ve PS malzemelerinin ısı iletim katsayıları için yazılan kullanıcı tanımlı fonksiyonlar

```
/************************************************************************
  PS-Sıcaklığa Bağlı Isı İletim Katsayısı için Kullanıcı Tanımlı Fonksiyon
************************************************************************/

#include "udf.h"
DEFINE_PROPERTY(PS,cell,thread)
{
        real kond;
        real temp=C_T(cell,thread);

        if (temp>493.15)
            kond=0.178808;
        else if (temp>313.15)
            kond=0.037659+(0.0004473*temp)-(0.0000003266*temp*temp);
        else
            kond=0.145695;

        return kond;
}
```

EK-3 A.Y.PE, Y.Y.PE ve PS malzemelerinin deneysel elde edilen viskozite değerleri

180 ^oC için görünen ve düzeltilmiş kayma hızı ve viskozite değerleri:

Malzeme	**Kayma Gerilmesi, Pa (τ)**	**Kayma Hızı, s^{-1} ($\dot{\gamma}$)**		**Viskozite, Pa.s (η)**	
		Görünür ($\dot{\gamma}_g$)	**Düzeltilmiş ($\dot{\gamma}_d$)**	**Görünür (η_g)**	**Düzeltilmiş (η_d)**
A.Y.PE	10758,5	17,6	19,5	611,5	550,6
	19365,3	39,7	44,1	487,9	439,3
	34068,6	85,2	94,7	399,6	359,8
	44827,1	130,8	145,2	342,8	308,7
	64192,3	216,4	240,4	296,6	267,0
	89654,1	384,8	427,4	233,1	209,8
Y.Y.PE	10758,5	5,1	5,7	2114,7	1899,7
	19365,3	10,4	11,5	1866,4	1678,5
	34068,6	24,5	27,2	1390,8	1250,7
	44827,1	37,1	41,3	1207,0	1085,6
	64192,3	61,1	68,0	1050,0	944,5
	89654,1	107,6	119,6	833,4	749,6
PS	10758,5	0,6	0,7	18531,0	15559,2
	19365,3	1,3	1,5	15073,4	12740,4
	34068,6	3,3	3,9	10386,6	8779,5
	44827,1	5,6	6,6	8078,0	6819,1
	64192,3	10,8	12,8	5917,2	5003,9
	89654,1	22,1	26,1	4059,9	3433,2

EK-3 (Devam) A.Y.PE, Y.Y.PE ve PS malzemelerinin deneysel elde edilen viskozite değerleri

200 ^oC için görünen ve düzeltilmiş kayma hızı ve viskozite değerleri:

Malzeme	Kayma Gerilmesi, Pa (τ)	Kayma Hızı, s^{-1} ($\dot{\gamma}$)		Viskozite, Pa.s (η)	
		Görünür ($\dot{\gamma}_g$)	Düzeltilmiş ($\dot{\gamma}_d$)	Görünür (η_g)	Düzeltilmiş (η_d)
A.Y.PE	10758,5	28,5	31,4	378,0	343,0
	19365,3	61,9	68,1	313,0	284,2
	34068,6	137,9	151,8	247,1	224,4
	44827,1	206,3	227,1	217,4	197,4
	64192,3	335,5	369,5	191,6	173,7
	89654,1	559,2	615,8	160,4	145,6
Y.Y.PE	10758,5	7,3	8,1	1463,8	1322,0
	19365,3	15,6	17,3	1239,6	1119,1
	34068,6	34,3	38,0	993,1	897,0
	44827,1	52,7	58,4	850,5	768,1
	64192,3	86,9	96,2	739,0	667,5
	89654,1	152,9	169,3	586,4	529,5
PS	10758,5	2,0	2,3	5461,7	4608,2
	19365,3	4,7	5,6	4112,5	3469,2
	34068,6	11,8	14,0	2886,4	2435,3
	44827,1	19,5	23,1	2297,8	1939,0
	64192,3	38,0	45,0	1690,8	1426,3
	89654,1	80,0	94,9	1119,6	944,8

EK-3 (Devam) A.Y.PE, Y.Y.PE ve PS malzemelerinin deneysel elde edilen viskozite değerleri

240 ^oC için görünen ve düzeltilmiş kayma hızı ve viskozite değerleri:

Malzeme	**Kayma Gerilmesi, Pa (τ)**	**Kayma Hızı, s^{-1} ($\dot{\gamma}$)**		**Viskozite, Pa.s (η)**	
		Görünür ($\dot{\gamma}_g$)	**Düzeltilmiş ($\dot{\gamma}_d$)**	**Görünür (η_g)**	**Düzeltilmiş (η_d)**
A.Y.PE	10758,5	52,6	59,4	204,5	181,1
	19365,3	126,3	142,6	155,3	135,8
	34068,6	254,8	287,7	133,8	118,4
	44827,1	479,9	541,9	93,4	82,7
	64192,3	727,2	821,2	88,4	78,2
	89654,1	1308,9	1477,9	68,7	60,7
Y.Y.PE	10758,5	14,8	16,3	728,7	657,8
	19365,3	31,9	35,3	607,2	548,0
	34068,6	69,5	76,9	490,6	442,8
	44827,1	107,1	118,7	418,6	377,8
	64192,3	175,2	194,1	366,4	330,6
	89654,1	311,5	345,1	287,9	259,8
PS	10758,5	13,5	15,9	795,2	678,7
	19365,3	33,0	38,7	586,1	500,1
	34068,6	78,9	92,4	431,7	368,5
	44827,1	121,5	142,3	368,9	314,9
	64192,3	241,8	283,2	265,6	226,6
	89654,1	503,0	589,2	178,4	152,2

EK-3 (Devam) A.Y.PE, Y.Y.PE ve PS malzemelerinin deneysel elde edilen viskozite değerleri

260 ^{o}C için görünen ve düzeltilmiş kayma hızı ve viskozite değerleri:

Malzeme	Kayma Gerilmesi, Pa (τ)	Kayma Hızı, s^{-1} ($\dot{\gamma}$)		Viskozite, Pa.s (η)	
		Görünür ($\dot{\gamma}_g$)	Düzeltilmiş ($\dot{\gamma}_d$)	Görünür (η_g)	Düzeltilmiş (η_d)
A.Y.PE	10758,5	77,3	86,3	139,8	124,7
	19365,3	190,2	212,2	101,9	91,3
	34068,6	435,7	486,0	78,2	70,1
	44827,1	633,4	706,6	70,8	63,4
	64192,3	1028,3	1147,2	62,4	56,0
	89654,1	1764,7	1968,8	50,8	45,5
Y.Y.PE	10758,5	19,1	21,3	562,3	505,5
	19365,3	41,6	46,3	465,2	418,3
	34068,6	96,0	106,8	355,3	319,0
	44827,1	137,6	153,0	326,1	293,0
	64192,3	240,0	267,02	267,5	240,4
	89654,1	416,4	463,2	215,3	193,6
PS	10758,5	31,0	36,0	346,5	298,3
	19365,3	62,5	72,6	310,3	266,8
	34068,6	154,5	179,4	220,6	189,9
	44827,1	274,1	318,4	163,7	140,8
	64192,3	464,5	539,571	138,3	119,0
	89654,1	987,6	1147,1	90,8	78,2

EK-3 (Devam) A.Y.PE, Y.Y.PE ve PS malzemelerinin deneysel elde edilen viskozite değerleri

280 ^oC için görünen ve düzeltilmiş kayma hızı ve viskozite değerleri:

Malzeme	Kayma Gerilmesi, Pa (τ)	Kayma Hızı, s^{-1} ($\dot{\gamma}$)		Viskozite, Pa.s (η)	
		Görünür ($\dot{\gamma}_g$)	Düzeltilmiş ($\dot{\gamma}_d$)	Görünür (η_g)	Düzeltilmiş (η_d)
A.Y.PE	10758,5	128,3	141,7	85,8	76,0
	19365,3	276,9	305,8	70,5	63,32
	34068,6	607,9	671,6	56,1	50,7
	44827,1	885,6	978,3	50,6	45,8
	64192,3	1437,5	1588,0	44,7	40,4
	89654,1	2606,3	2879,2	34,4	31,1
Y.Y.PE	10758,5	25,4	28,1	424,2	383,1
	19365,3	55,5	61,4	349,3	315,5
	34068,6	120,9	133,8	281,8	254,5
	44827,1	183,2	202,9	244,7	221,0
	64192,3	304,3	336,9	211,0	190,5
	89654,1	533,3	590,5	168,1	151,8
PS	10758,5	55,3	63,7	194,5	168,8
	19365,3	121,0	139,4	160,1	138,9
	34068,6	304,4	350,8	112,3	97,1
	44827,1	456,8	526,5	98,1	85,1
	64192,3	910,2	1049,0	70,8	61,2
	89654,1	1640,7	1890,9	54,7	47,4

EK-4 A.Y.PE, Y.Y.PE ve PS malzemelerinin deneysel elde edilen yoğunluk değerleri

		Yoğunluk, kg/m^3		
		A.Y.PE	**Y.Y.PE**	**PS**
Sıcaklık, ^{o}C (*T*)	180	814,8	789,1	969,7
	190	809,8	783,5	965,0
	200	804,9	777,7	960,2
	210	799,4	771,9	955,0
	220	793,3	766,1	949,7
	230	787,0	760,3	944,5
	240	780,6	754,6	939,5
	250	774,7	748,7	934,6
	260	814,8	742,9	929,7
	270	-	-	924,8
	280	-	-	920,0

EK-5 A.Y.PE, Y.Y.PE ve PS malzemelerinin deneysel elde edilen ısı iletim katsayısı değerleri

		Isı iletim katsayısı, W/m^{o}C (*k*)		
		A.Y.PE	**Y.Y.PE**	**PS**
Sıcaklık, ^{o}C (*T*)	40	0,173	0,350	0,145
	50	0,177	0,322	0,147
	60	0,184	0,316	0,150
	70	0,188	0,295	0,151
	80	0,196	0,287	0,154
	90	0,195	0,271	0,162
	100	0,212	0,273	0,163
	110	0,225	0,265	0,165
	120	0,228	0,260	0,163
	130	0,235	0,257	0,159
	140	0,230	0,248	0,165
	150	0,228	0,230	0,171
	160	0,23	0,232	0,166
	170	0,232	0,236	0,172
	180	0,230	0,230	0,170
	190	0,234	0,239	0,179
	200	0,228	0,234	0,175
	210	0,233	0,235	0,178
	220	0,230	0,230	0,180

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı	: ULUER, Onuralp
Uyruğu	: T.C.
Doğum tarihi ve yeri	: 02.06.1976 Bornova/İZMİR
Medeni hali	: Bekar
Telefon	: 0 (312) 202 86 17
Faks	: 0 (312) 212 00 59
e-mail	: uluer@gazi.edu.tr.

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Yüksek lisans	G.Ü.F.B.E /Makine Eğitimi A.D	2002
Lisans	G.Ü.T.E.F / Makine Eğitimi Bölümü	1998
Lise	Manisa Anadolu Teknik Lisesi	1994

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2000-2008	Gazi Üniversitesi	Araştırma Görevlisi
1999-2000	Salihli Çıraklık Eğitim Merkezi	Öğretmen
1998-1999	Çetin Elektroplastik A.Ş	Kalıphane Sorumlusu

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

1. Abdulmecit Güldaş, **Onuralp Uluer**, Ahmet Özdemir, "The numerical analysis of the injection mold cavity filling using finite control volume method and comparison to the experimental results", ***Polymer-Plastics Technology and Engineering*****,** (kabul edildi).

2. Volkan Kırmacı, **Onuralp Uluer**, "The effects of orifice nozzle number on heating and cooling performance of vortex tubes: an Experimental Study", ***Instrumentation Science and Technology*****,** 36 (5): 493-502 (2008).

3. Özdemir, A., **Uluer, O.**, Güldaş, A., "Flow front advancement of molten thermoplastic materials during filling stage of a mold cavity", ***Polymer Testing***, 23 (8): 957-966 (2004).

4. F. Mert, **O. Uluer**, A. Güldaş, A. Özdemir, "Kalıp çekirdeklerinin işlenmesi için bilgisayar destekli takım yolu oluşturma ve deneysel olarak incelenmesi", ***Politeknik Dergisi,*** 11(3): 215-227 (2008).

5. **Uluer, O.**, "Enjeksiyonla kalıplamada işleme parametrelerinin katılaşmış katman oluşumuna etkisi", ***G.Ü. Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi***, 23 (1): 249-255 (2008).

6. Güldaş, A., **Uluer, O.**, Özdemir, A., "The determination of viscosity and density variations of molten plastics", ***Teknoloji Dergisi***, 9 (2): 127-135 (2006).

7. Güldaş, A., **Uluer, O.**, "Termoplastiklerin Akış Davranışları", ***Kalıp, Aylık Kalıp ve Teknolojileri Dergisi***, 1 (1): 121-124 (2006).

8. Güldaş, A., **Uluer, O.**, Özdemir, A., "Enjeksiyon kalıplarındaki akışın analizi, ergimiş plastik akışının matematiksel modellenmesi için temel denklemlerin türetilmesi", ***Gazi Ün. Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi***, 18 (4): 517–528 (2005).

9. **Uluer, O.**, Güldaş, A., Özdemir, A., "Ergimiş plastiğin kalıp boşluğundaki gerçek akış davranışının gözlenmesi için kalıp tasarımı ve imalatı", ***Teknoloji Dergisi***, 8 (2): 181-189 (2005).

10. Abdulmecit Güldaş, Onuralp Uluer, Ahmet Özdemir, "YYPE malzemesinin reolojik özellikleri", ***12th International Materials Symposium*****,** Denizli (2008).

11. **Uluer, O.**, Güldaş, A., Özdemir, A., "Plastik malzemelerin sıcaklığa bağlı ısı iletim katsayılarının tespit edilebilmesini sağlayan düzeneğin tasarımı ve üretimi", **ULIBTK'07 16. Ulusal Isı Bilimi ve Tekniği Kongresi**, Kayseri (2007).

12. **Uluer, O.**, Güldaş, A., Özdemir, A., "Determining the real behavior and melt front advancement during filling stage of a mold cavity: An experimental study", **3rd International Conference and Exhibitions on Design and Production of DIE & MOLDS**, Bursa (2004).

13. Gülesin, M., Özdemir, A., Güllü, A., Güldaş, A., Uluer, O., "SolidWorks İle Modelleme"***, Asil Yayın Dağıtım***, Ankara (2007).

14. Gülesin, M., Güllü, A., Güldaş, A., Uluer, O., Tevfik A., "SolidWorks İle Uygulamalar"***, Asil Yayın Dağıtım***, Ankara (2006).

Hobiler

Müzik, Basketbol, fotoğrafçılık.