

**PLASTİK ENJEKSİYON İŞLEMİNİN  
ÜÇ BOYUTLU SAYISAL MODELLENMESİ**

**ALİ KARAKUŞ**

**MERSİN ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ  
ANA BİLİM DALI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**MERSİN  
AĞUSTOS 2009**

**PLASTİK ENJEKSİYON İŞLEMİNİN  
ÜÇ BOYUTLU SAYISAL MODELLENMESİ**

**ALİ KARAKUŞ**

**Mersin Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü**

**Makina Mühendisliği  
Ana Bilim Dalı**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Tez Danışmanı  
Doç. Dr. Mustafa TUTAR**

**MERSİN  
Ağustos 2009**



Bu tezin gerek bilimsel içerik, gerekse elde edilen sonuçlar açısından tüm gerekleri sağladığı kanaatine ulaşan ve aşağıda imzaları bulunan biz jüri üyeleri, sunulan tezi oy birliği ile Yüksek Lisans Tezi olarak kabul ediyoruz.

Tez Danışmanı  
Doç. Dr. Mustafa TUTAR

Jüri Üyesi  
Doç. Dr. Ahmet PINARBAŞI

Jüri Üyesi  
Yrd. Doç. Dr. Hüseyin MUTLU

Bu tezin Fen Bilimleri Enstitüsü yazım kurallarına uygun olarak yazıldığı Enstitü Yönetim Kurulu'nun ...../...../.....tarih ve ...../..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Mahir TURHAN  
Enstitü Müdürü

**Not:** Bu tezde kullanılan özgün bilgiler, şekil, çizelge ve fotoğraflardan kaynak göstermeden alıntı yapmak 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunu hükümlerine tabidir.

## ÖZ

Bu çalışmada, paralel hesaplama teknolojisi kullanılarak, üç boyutlu (3-B) insert enjeksiyon işleminde, sıkıştırılma ve hal değişimi şartlarını göz önünde bulunduran nümerik bir yaklaşım sunulmuştur. Akışkan elemanı hacim yöntemi (VOF) sonlu hacimler yöntemiyle birlikte polimer enjeksiyon prosesinin dolma aşamasının simülasyonunda kullanılmıştır. Hareketli ara yüzü yakalamak için CICSAM algoritması ve basınç ve hız arasındaki yüksek seviyeli ilişkiye dayalı PISO basınç-hız bağlantı algoritması başarıyla uygulanmıştır. Gerçek kalıp dolma koşulları için önerilen nümerik metodolojinin yeterliliği yapılan deneysel sonuçlarla ve başka programlardan elde edilen sonuçlarla kıyaslanarak doğrulanmıştır. Nümerik sonuçlar, sunulan nümerik modelleme yaklaşımının insert metalli plastik enjeksiyon işleminin optimizasyonuna yönelik çalışmalarda güvenle kullanılabileceğini ileri sürmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** plastik enjeksiyon; katılaşma; jet oluşumu, sonlu hacimler yöntemi; üç boyutlu modelleme

## ABSTRACT

In the present study a more complete numerical solution approach using parallel computing technology is provided for the three-dimensional (3-D) modeling of mold insert polymer injection molding process by considering the effects of phase-change and compressibility for non-Newtonian fluid flow conditions. A volume of fluid (VOF) method coupled with a finite volume approach is used to simulate the mold filling stage of the injection molding process. A comprehensive high-resolution differencing scheme (CICSAM) is successfully utilized to capture moving interfaces and the Pressure Implicit with Splitting Operators (PISO) pressure-velocity coupling algorithm is employed to enable higher degree of approximate relation between corrections for pressure and velocity. The capabilities of the proposed numerical methodology in modeling real molding flow conditions are verified through quantitative and qualitative comparisons with other simulation programs and the data obtained from the conducted experimental study. The numerical results suggest that the present numerical solution approach can be used with a confidence for further studies of optimization of design of mold insert polymer injection molding processes.

**Keywords:** insert injection molding; solidification; jetting, finite volume method; mold filling; three-dimensional modeling

## TEŞEKKÜR

Yazar, araştırma boyunca rehberliği, önerileri, eleştirileri, teşvikleri ve anlayışı için danışmanı Doç. Dr. Mustafa Tutar'a ve ayrıca çalışmalarında destek ve önerileri için Suat Özer'e ve Yasin Özdemir'e teşekkürü bir borç bilir.

Yazar, Pilsa Plastik Sanayi A.Ş'ye deney olanakları sağladığı için teşekkürlerini sunar.

Bu çalışma Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından 106M465 proje numarası altında desteklenmiştir.

## İÇİNDEKİLER

<b>ÖZ</b>	i
<b>ABSTRACT</b>	ii
<b>TEŞEKKÜR</b>	iii
<b>İÇİNDEKİLER</b>	iv
<b>ÇİZELGELER DİZİNİ</b>	vi
<b>ŞEKİLLER DİZİNİ</b>	vii
<b>SİMGE VE KISALTMALAR DİZİNİ</b>	x
<b>1. GİRİŞ</b>	1
<b>2. KAYNAK ARAŞTIRMASI</b>	4
2.1. PLASTİK ENJEKSİYON	4
2.1.1. Enjeksiyon İşleminin Proses Tanımı	4
2.1.2. Enjeksiyonla İlgili Önceki Çalışmalar	5
2.2. YÜZEY İZLEME ALGORİTMALARI	8
2.2.1. Yüzey Metotları	9
2.2.2. Hacim Metotları	11
2.3. KATILAŞMANIN MODELLENMESİ	15
<b>3. MATEMATİKSEL MODEL</b>	19
3.1. YÖNETİCİ DENKLEMLER	19
3.2. VOF METODU	20
3.3. KATILAŞMA	21
3.4. MALZEME ÖZELLİKLERİ	24
3.4.1. Viskozite Modeli	24
3.4.2. Özgül Hacim Modeli	25
<b>4. SAYISAL MODEL</b>	28
4.1. SONLU HACİMLER İLE AYRIKLAŞTIRMA	28
4.1.1. Uzaysal Ayırıklaştırma	30
4.1.2. Zamansal Ayırıklaştırma	32
4.2. AKIŞ ÖNÜ İZLEME	33
4.3. ÇÖZÜM YÖNTEMİ	38
4.3.1. Doğrusallaştırılmış Denklemlerin Çözümü ve Paralleleştirme	38
<b>5. BULGULAR ve TARTIŞMA</b>	40

5.1. ANALİZ 1: FOUNTAIN AKIŞ	41
5.2. ANALİZ 2: JET TAHMİNİ	42
5.3. ANALİZ 3: GEOMETRİ ve PROSES KOŞULLARININ ETKİSİ	48
5.3.1. Geometrik Koşulların Etkileri	50
5.3.2. Proses Şartlarının Etkisi	59
5.4. ANALİZ 4: TEK BOŞLUKLU KALIP	64
5.5. ANALİZ 5: ÇOK BOŞLUKLU KALIP SİSTEMİ	72
<b>6. SONUÇLAR ve ÖNERİLER</b>	<b>78</b>
<b>7. KAYNAKLAR</b>	<b>79</b>

## ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1. Simülasyonlarda kullanılan PP için viskozite model sabitleri .....	25
Çizelge 3.2. Simülasyonlarda kullanılan PP için özgül hacim modeli sabitleri....	27
Çizelge 5.1. Simülasyonlarda kullanılan yolluk geçidi ölçüleri ve çokyüzlü uzaysal ağ yoğunlukları.....	43
Çizelge 5.2. Analiz 3’de yapılan 3-B simülasyonlar için geometrik boyutlar ve hesaplama ağ yoğunlukları .....	51
Çizelge 5.3. Analiz 3 için seçilen proses koşulları .....	51
Çizelge 5.4. Simülasyonlarda kullanılan ağ yoğunlukları ve proses koşulları .....	59
Çizelge 5.5. Paralel hızlanma ve karşılık gelen verim değerleri .....	64
Çizelge 5.6. Tek boşluklu kalıp analizi için simülasyonlarda kullanılan ağ yoğunlukları ve proses koşulları .....	66
Çizelge 5.7. Tek boşluklu kalıp analizi için paralel hızlanma ve karşılık gelen verim değerleri .....	72
Çizelge 5.8. Çok boşluklu kalıp sisteminde deneysel durum çalışmaları için proses şartları.....	74

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Tipik enjeksiyon kalıp sistemi .....	2
Şekil 2.1. Arayüzeyin gösterimi için farklı metotlar .....	9
Şekil 2.2. Farklı doğru tekniklerinin karşılaştırılması.....	13
Şekil 2.3. Donör-akseptör şemanın gösterimi .....	13
Şekil 4.1. Rastgele topolojide kontrol hacmi .....	28
Şekil 4.2. Eksplisit hesaplamalar için CBC.....	34
Şekil 4.3. UQ için sınırlar .....	36
Şekil 4.4. CICSAM şeması için NVD .....	37
Şekil 5.1. Analiz 1 için dikdörtgensel sayısal bölge .....	41
Şekil 5.2. Polimer eriyik akışın dikdörtgensel alan içerisinde gelişimi ve akış önu profilinin deneysel verilerle karşılaştırılması .....	42
Şekil 5.3. Jet tahmini analizlerinde kullanılan 3-B geometri .....	44
Şekil 5.4. Dolma aşaması analizi kullanılan PP boru ek parçası geometrisinin kesit görüntüsü .....	44
Şekil 5.5. Simetri düzleminde oluşturulan çokyüzlü uzaysal ağ .....	45
Şekil 5.6. Analizlerde kullanılan 3-B kalıp boşluğu için oluşturulan uzaysal ağ....	45
Şekil 5.7. Kalıp boşluğu için oluşturulan 3-B yüzeysel ağ .....	46
Şekil 5.8. Simetri düzlemi üzerinde 0.005s'de anlık akış önu profilleri a) Durum 1 b) Durum 2; c) Durum 3.....	47
Şekil 5.9. Durum 1 için simetri düzlemi üzerinde 0.05s'lik sürede akış önu gelişimi .....	48
Şekil 5.10. Analizlerde kullanılan 3-B kalıp boşluğu ve insert geometrisi .....	49
Şekil 5.11. Çok yüzlü elemanlardan oluşan hesaplama alanı .....	50
Şekil 5.12. 3-B anlık hacim fraksiyonu kontörleri; a) Sunulan 3-B model; b) MPI 3-B model .....	52
Şekil 5.13. Sunulan nümerik yöntem ile durum 2 için üç farklı zaman için elde edilmiş 3-B akış önu gelişimi ( $t = 0.25$ s, $0.55$ s ve $1.1$ s) .....	53
Şekil 5.14. Durum 2 için dört farklı zamanda akış önündeki sıcaklık dağılımı ( $t = 0.25$ s, $0.65$ s, $0.9$ s ve $1.15$ s) .....	54



Şekil 5.15. Sunulan nümerik model ve MPI 3-B modelden elde edilen alan ağırlıklı basınç değerlerinin karşılaştırılması .....	55
Şekil 5.16. İnsert metal yüzeyinde hesaplanan alan ağırlıklı ortalama sıcaklık gelişimi .....	57
Şekil 5.17. İnsert metal yüzeyinde hesaplanan alan ağırlıklı ortalama gerilim gelişimi .....	57
Şekil 5.18. Durum 2 için 1.22 s’de dolma sırasında kalıp boşluğu içerisindeki basınç dağılımı a) Sunulan 3-B model; b) MPI 3-B model .....	58
Şekil 5.19. Durum 2 için dolma şaması sonuna doğru hava boşlukları ve kaynak çizgisi oluşumun tahmini.....	60
Şekil 5.20. Sunulan nümerik model ve MPI 3-B modelden elde edilen alan ağırlıklı basınç değerlerinin Durum 2 için karşılaştırılması .....	61
Şekil 5.21. Hesaplama ağı yoğunluğunun basınç dağılımına etkisi .....	61
Şekil 5.22. Proses koşullarının enjeksiyon basıncına etkileri .....	62
Şekil 5.23. Proses parametrelerinin insert yüzeyindeki sıcaklık gelişimine etkileri.....	63
Şekil 5.24. a) - c) Kalıp boşluğu, insert ve parçanın 3-B geometrisi .....	66
Şekil 5.25. Tek boşluklu kalıp sistemi için 3-B ağı yapısı.....	66
Şekil 5.26. Durum 2 için akış önü gelişimi, sunulan model (solda) ve MPI 3-B model (sağda).....	67
Şekil 5.27. Hesaplanan alan ağırlıklı basınç ortalamasının farklı ağı yoğunlukları ve MPI 3-B modeliyle karşılaştırılması.....	68
Şekil 5.28. Durum 2 için farklı zaman adımlarında akış önü gelişimi .....	69
Şekil 5.29. Her bir durum için hesaplanan alan ağırlıklı basıncın gelişimi .....	70
Şekil 5.30. Her bir durum çalışması için hesaplanan katı fraksiyonun gelişimi .....	70
Şekil 5.31. Bütün durum çalışmaları için metalik insert dış yüzey ortalama sıcaklık artış hızının boyutsuz dolma zamanına göre değişimi.....	71
Şekil 5.32. Tüm durum çalışmaları için metalik insert yüzeyindeki ortalama sıcaklık artışının boyutsuz dolma zamanına göre değişimi .....	72
Şekil 5.33. Çok boşluklu kalıp sisteminin 3-B geometrisi; a) İnsert geometri; b) 3-B kalıp sistemi .....	73

Şekil 5.34. Çok boşluklu kalıp sistemi için çokyüzlü elemanlardan oluşan 3-B hesaplama alanı .....	74
Şekil 5.35. Durum 2 (solda) ve durum 6 (sağda) için elde edilmiş hatalı ürünler...	75
Şekil 5.36. Tahmin edilen akış önü gelişiminin 0.3 ve 0.75 boyutsuz zamanda durum 7 için deneysel verilerle karşılaştırılması .....	76
Şekil 5.37. Çok boşluklu kalıpta durum 7 için akış önünün 3-B gelişimi ( $t^* = 0.2, 0.7, 0.9$ ).....	77
Şekil 5.38. Durum 7 için tahmin edilen basınç gelişimi .....	77

## SİMGE VE KISALTMALAR DİZİNİ

### Simgeler

$p$	Statik basınç
$\rho$	Yoğunluk
$\vec{u}$	Hız vektörü
$\tau$	Toplam stres tansörü
$I$	Birim tansör
$v$	Özgül hacim
$h$	Fark edilir entalpi
$k$	Isı iletim katsayısı
$T_{ref}$	Referans sıcaklık
$T$	Sıcaklık
$f$	Hacim fraksiyonu
$c_p$	Sabit basınç altında özgül ısı
$h_{ref}$	Referans entalpi
$T_{ref}$	Referans sıcaklık
$\beta$	Yerel katılık oranı
$L$	Gizli ısı
$T_l$	Likidus sıcaklık
$T_s$	Solidus sıcaklık
$\varepsilon$	Yarı sıcaklık aralığı
$\mu$	Moleküler viskozite
$\Gamma$	Diffüsiviti
$\varphi$	Bağımlı değişken
$A$	Hücre yüzey alanı
$V$	Hücre hacmi
$r$	Pozisyon vektörü
$\psi$	Gradyan sınırlayıcı
$J$	Katsayı matrisi
$W$	Ağırlıklar matrisi
$\zeta$	Enterpolasyon faktörü

$F$	Kütle akısı
$c$	Courant sayısı
$\gamma$	Arayüzey normali
$\theta$	Arayüzey açısı

### Alt Simgeler

$j$	Hücre yüzey indisi
$P$	Hesaplama hücresi
$N$	Komşu hesaplama hücresi
$UQ$	Ultimate-Quick Test
$CBC$	Convection Boundness Criterion
$D$	Downwind hücre
$A$	Akseptör hücre
$U$	Upwind hücre
$ft$	Akış önü uç noktası
$cl$	Akış önü temas noktası

### Üst Simgeler

$x,y,z$	Kartezyen koordinatlar
$t$	Şimdiki zaman adımı
$t+\delta t$	Sonraki zaman adımı
$\sim$	Normalleştirilmiş değişken

### Kısaltmalar

VOF	Volume of Fluid Element
NVD	Normalized Variable Diagram
MPI	Moldflow Plastic Insight
UDS	Upwind Differencing Scheme
CDS	Central Differencing Scheme
PISO	Pressure-Implicit with Splitting Operators
3-B	Üç boyutlu
PP	Polipropilen

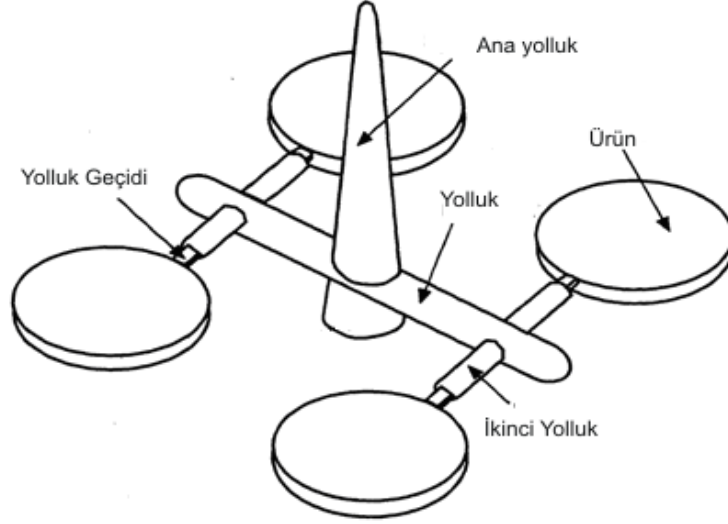
## 1. GİRİŞ

Polimer, Yunan kökleri olan *poly* (çok) ve *meros*'dan (parça) da anlaşıldığı gibi birçok tekrar eden birimden oluşan bir maddedir. Birçok polimer karbon omurgaya dayalıdır ve dolayısıyla organik maddelerdir. Diğer malzemeler gibi polimerler de plastik, reçine, köpük, elastomer, güçlendirilmiş plastik ve kompozit gibi farklı şekillerde tanımlanır. Plastik, reçine ve polimer terimleri genellikle eş anlamlı olarak kullanılır. Plastikler doğal ürünleri modifiye ederek veya ara maddelerin sentezi ile üretilirler. Polimerlerin sınıflandırılması elde edilme yöntemleri, ısıma veya soğumaya karşı tepkileri gibi birçok yolla yapılmaktadır.

Polimerin üretim yöntemi genel olarak üç aşamadan oluşmaktadır. Birinci aşama karıştırma ve akışkan elde etmedir. Bu aşama, stabilizatörlerin, pigmentlerin ve diğer katkı maddelerinin dağılması, hava ve uçucu maddelerin uzaklaştırılması ve polimerin kompozisyon, sıcaklık ve deformasyon geçmişi bakımından homojen akışkana dönüşümünü içerir. İkinci aşama şekillendirmedir ve karışım akışkanın büyük ölçüde hareket ettirilmesini gerektirir. Elde edilen ürün akışkanın parçalı kalıp içerisinde akışından veya açık yüzeyli bir alıp içerisinde baskılanmasından dolayı üç boyutlu olabilir. Ürün, eriyiğin bir ekstrüzyon kalıbında akışından dolayı iki boyutlu olabilir ve ayrıca bölme veya hala akışkan olan polimer kütlesine kuvvet uygulanması yoluyla ikinci bir şekillendirme işleminden geçebilir. Üçüncü aşama ise ürünlerdeki gerekli şeklin kararlı hale getirilmesidir. Bunu yapmanın, termoplastik malzemeyi katılaşıncaya kadar soğutulması ve termoset malzemede ise çapraz bağların oluşturulması olmak üzere iki yolu vardır.

Bütün tip ve şekildeki plastik parçaların üretilmesinde birçok yöntem kullanılır. Üretim yönteminin seçimi plastik malzemeye, son üründe beklenen özelliklere, yöntemin hızına, maliyetine ve parçanın üretim miktarına bağlıdır. Bazı malzemeler birçok üretim yönteminde kullanılabilirken bazıları sadece özel bir üretim yönteminde ve makinede kullanılabilir. Proses parametreleri üretimde önemli bir yer tutar ve ürünün görüntüsünü, performansını ve maliyetini etkileyebilir.

Enjeksiyon, kompleks şekildeki plastik parçaların çok iyi boyutsal doğrulukta üretilebilmesi ve kısa döngü zamanından dolayı plastik şekillendirme en çok kullanılan işlemlerden biridir. Proses, üretim hacminin çok yüksek olduğu ürünlerde diğer plastik üretim yönteminin üzerinde birçok avantaj sunar. Şekil 1.1 tipik enjeksiyon kalıp sistemini göstermektedir.



Şekil 1.1. Tipik enjeksiyon kalıp sistemi

Enjeksiyon işlemi, enjeksiyon sıcaklığındaki polimer eriyiğinin kalıbı doldurduğu dolma aşaması (filling stage) ile başlar. Kalının doldurulmasından sonra, polimerin katılaşması ile oluşan büzülmeyle karşılaşmak için eriyiğin daha yüksek basınç altında kalıba akmaya zorlandığı baskılama aşaması gelir. Bu aşamayı, parçanın kalıptan çıkarılacak rijid hale gelinceye kadar soğutulduğu, soğuma aşaması izler. Genellikle baskılama ve soğuma aşamalarının ikisi birden dolma sonrası (post-filling) aşaması olarak adlandırılır.

Bu karmaşık kalıplama işleminin tasarımında ve proses optimizasyonunda, yıllardır deneyimler, sezgiler, deneme yanılma yolu ve göz kararı prosedürler anahtar rol üstlenmiştir. Bu yaklaşımlar daha büyük ve kompleks şekilli parçalarda, yeni malzemelerin işlenmesinde veya daha teknolojik proses kontrol ekipmanlarının kullanımında verimsizdir [1]. Dolayısıyla bilgisayar destekli kalıp analizleri

enjeksiyon işleminin kritik aşamalarının simülasyonunda etkin bir araç halini almıştır. Bilgisayar destekli mühendislik enjeksiyonla üretilmiş parçaların ve prosesin çok daha hızlı ve başarılı bir şekilde yapılmasını önemli ölçüde geliştirmiştir.

Sınırlı bilgisayar kaynağı ve hesaplama zamanı altında, enjeksiyon işleminin analizi için birçok nümerik çalışma yapılmıştır. Bu çalışmaların çoğu 2B ve  $2^{1/2}$ B (Hele-Shaw) akış varsayımına dayanmakta ve dolma aşamasında sıkıştırılma ve katılaşma etkilerini dikkate almamaktadır. Fakat gerçek kalıplama şartları, 3-B ve Newtonyan olmayan akış davranışlarının ve sıkıştırılma, hal değişim etkilerinin dikkate alınması gerektiğini ortaya koymuştur. Kalıp duvarlarında katı katmanın oluşması, kalıp boşluğu içerisinde akışa karşı direncin artmasına neden olur. Aynı zamanda dolma aşamasındaki yüksek enjeksiyon basıncı ve basıncın kalıp içerisinde düzgün dağılmıyor olması akışkanın yoğunluğunda farklılıklara yol açar. Bu etkiler kalıp içerisindeki eriyik akışın daha iyi modellenebilmesi için dikkatlice incelenmelidir.

Bu nümerik çalışma, insert enjeksiyon işleminde dolma aşamanın modellenmesi için, daha az basitleştirici varsayım kullanarak daha komple ve sağlıklı bir çözüm yolu geliştirmeyi hedeflemektedir. Çalışmada önerilen nümerik yöntem polimer-hava arayüzey gelişimini, sıkıştırılma etkilerini, viskozitedeki değişimleri ve hal değişim etkilerini 3-B ve izotermal olmayan akış koşullarında çözmeyi hedeflemektedir [2].

## 2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

### 2.1. PLASTİK ENJEKSİYON

#### 2.1.1. Enjeksiyon İşleminin Proses Tanımı

Enjeksiyon işlemi döngüseldir. Döngünün başlangıcında, enjeksiyon makinesinin helezonu içerisindeki homojen sıcaklıktaki polimer eriyik, meme içerisinden geçerek döküm deliğine, enjeksiyon ünitesinin kontrol sistemine bağlı olarak sabit basınç veya kütleli akış hızında akmaya zorlanır. Genellikle her bir bölümünde sabit kesit alanına sahip olan yolluk sistemi, polimer eriyiği döküm deliğinden, yolluk geçidine doğru dağıtır. Tipik olarak yolluk geçitleri, ikincil işleme gerek kalmadan parçanın kolayca yolluk sisteminden ayrılmasını sağlayacak küçük açıklıklardır. Aynı kalıp boşluğunun birden fazla yolluk geçidiyle beslendiği çoklu-yolluk geçitli sistemlerde, dolma aşamasında farklı akış önü profillerinin karşılaşması sonucu, parçanın görüntüsünde ve mekanik özelliklerinde zayıflamaya yol açan kaynak çizgileri oluşabilir.

Dolma aşamasından sonra, enjeksiyon basıncı sabit baskılama basıncı kontrolüne geçer. Baskılama (ütüleme) aşaması adı verilen bu aşamada, polimer eriyiğin katılaşmasından doğan büzölmeleri gidermek amacıyla, genellikle daha yüksek basınç altında polimer, kalıp içerisinde sıkıştırılır. Bu aşamayı daha önceden belirlenen çıkarma kriterine kadar parçanın soğutulduğu soğuma aşaması izler. Genel çıkarma kriteri plastik eriyik içerisindeki sıcaklığın her yerde belli bir sıcaklığın altına düşmesi dolayısıyla parçanın çıkarılacak yeterlikte sertliğe ulaşmasıdır. Baskılama ve soğuma aşaması birlikte dolma sonrası aşama olarak adlandırılır. Daha sonra kalıp açılır ve parça kalıptan çıkarılır ardından kalıp tekrar kapanarak yeni enjeksiyon döngüsü başlar. Yukarıda da belirtildiği gibi, bir enjeksiyon döngüsü dolma, dolama sonrası ve kalıp açılma aşamaları olmak üzere üç bölümden oluşur. Genelde enjeksiyonda toplam döngü süresinin dörtte üçünden fazlası dolma sonra aşamasıyla geçer.

Dolma ve dolma sonrası aşamada, polimer eriyik içinde ısı transferi ve eriyiğin akışı eş zamanlı olarak gerçekleşir. Aynı zamanda, kalıp ve ona dokunan polimer yüzeyinde de ısı transferi olur, polimer ısı kaybederek soğurken kalıpta ise ısınma meydana gelir. Polimer tarafından kaybedilen ısının bir kısmı soğuma kanallarına ulaşır ve burada çevrilen soğuma akışkanıyla uzaklaştırılır

Tüm enjeksiyon döngüsü boyunca, üniform olmayan baskılama basıncı ve homojen olmayan soğuma nedeniyle polimer içerisinde artık gerilmeler oluşur. Pratikte parça geometrilerinin, kalıbın ve soğuma kanallarının tasarımının karmaşıklığı nedeniyle üniform ve dengelenmiş bir soğuma elde etmek oldukça güçtür. Bu durum parça kalınlığı boyunca düzgün dağılmayan artık gerilmelerin oluşmasına ve dolayısıyla iç momentlerin oluşmasına neden olur. Parça kalıptan çıkarıldıktan sonra, artık gerilmelerinin dengelenmesi parçada bozulmaya neden olur.

#### 2.1.2. Enjeksiyonla İlgili Önceki Çalışmalar

Plastik enjeksiyon işleminde, var olan prosesi optimize etmek ve/veya yeni teknikler geliştirmek için, birçok deneysel çalışma yapılmıştır. Wang ve Young [3] incec duvarlı plastik parçalarda artık gerilimlere proses şartların etkililerini incelediği deneysel bir çalışma yapmıştır. Çalışmaları ince duvarlı parçalarda kalıp sıcaklığının çekirdek bölgenin büyüklüğünü ve yüzey katmanındaki artık gerilimleri etkilediğini göstermiştir. Song ve ark. [4] çok ince duvarlı parçaların enjeksiyon işlemi ile üretilmesinde proses parametrelerinin etkisini incelemiştir. Araştırmaları parça kalınlığının enjeksiyonda belirleyici faktör olduğunu, akışın yol aldığı uzunluğun ve enjeksiyon hızının ise birincil faktörler olduğunu, enjeksiyon hızını artırmanın dalma oranını yükselttiğini göstermiştir. Demirer ve ark. [5] deneysel olarak sıcak yolluk sistemlerinin etkilerini klasik yolluk sistemleriyle karşılaştırarak göstermişlerdir. Sıcak yolluklu sistemlerde daha ağır plastik parçaların üretilmesi için daha küçük basınç değerlerinin yeterli olacağını gözlemlemiştir. Oktem ve ark. [6] yakın zamanda, Taguchi ve Konishi [7] tarafından geliştirilen Taguchi optimizasyon tekniğini kullanarak ince duvarlı plastik parçaların enjeksiyonla üretilmesindeki proses parametrelerini belirlemiştir.



Son yıllarda, ince ve kalın duvarlı parçaların enjeksiyonla üretilmesinin modellenmesiyle ilgili birçok sayısal çalışma yapılmıştır [8]. Önceki çalışmalar, Hieber ve Shen [9] tarafından ortaya konan Hele-Shaw akış modelini temel almıştır. Hele-Shaw akış yaklaşımı kalıp boşluğu içerisinde kalınlık yönündeki hız bileşenlerini, yerçekimi etkilerini ve atalet terimlerini ihmal eden, genel yönetici denklemlerinin oldukça basitleştirilmiş halini kullanır ve çok ince duvarlı parçalar için uygulanabilir [8]. Holm ve Langtangen [10] Hele-Shaw akış yaklaşımına dayalı birleşik sonlu elemanlar metodu geliştirdi fakat orta-düzlem ağı oluşturmanın karmaşıklığı bu metodun kullanılmasını sınırlamıştır. Daha sonra Zhou and Li [11] katı geometri için orta-düzlem ağı yerine model hazırlama zamanını azaltan ve performansı artıran, karşılık yüzeyler için ağ oluşturulduğu yüzey metodu geliştirdi. Zhou ve ark. [12] enjeksiyon işleminin dolma ve dolma sonrası aşamaları için yüzey yöntemini kullandı ve orta-düzlem modellerine göre daha iyi sonuçlar elde etti. Günümüzde yüzey modeli plastik enjeksiyon işleminin modellenmesinde en yaygın kullanılan yöntemdir ve birçok araştırmacı yöntemi enjeksiyon ve gaz basınçlı enjeksiyon yönteminin birçok aşamasını içine alacak şekilde genişletmiştir [13-15]. Yüzey metotlarının uygulaması kolaydır fakat model Hele-Shaw akış yaklaşımını kullanır ve bu bağlamda orta-düzlem modellerine benzerdir. Hele-Shaw akış yaklaşımı, ince duvarlı parçalar için yapılan çalışmalarda yeterli olabilir ancak 3B, kompleks ve kalınlığın değiştiği plastik parçaların enjeksiyon işleminin modellenmesine uygun değildir ve üç boyutlu modellerle yeri doldurabilir.

Bu bağlamda, literatürde plastik enjeksiyon işleminin değişen kalınlıktaki parçaların 3-B modellenmesi ile ilgili sayısal çalışmalar da yapılmıştır. Hetu ve ark. [16] genelleştirilmiş Stoke denklemleri ile yönetilen sıkıştırılmaz akışlar için Discontinuous Petrov-Galerkin formülasyonu ve akış önünün tahmini için pseudo-concentration metodunu uyguladıkları 3-B bir sonlu elemanlar yöntemi geliştirdiler. Pichelin ve Coupez [17], 3-B kalıp doldurma analizleri için ısı transferi probleminin çözümünde sıkıştırılmaz ve kayma hızı ve sıcaklığa bağlı viskozitesi olan Newtonyan olmayan akışkan için Taylor Discontinuous Galerkin metodunu uyguladıkları bir yöntem önerdiler. Han et al. [18] atalet kuvvetlerinin ihmal edildiği, sıkıştırılmaz Newtonyan akışlar için mikro çip kaplama prosesinin (Microchip

Encapsulation Process) zamana bağılı dolma aşamasının modellenmesinde 3-B sonlu elemanlar metoduna dayalı bir yöntem geliştirdi. Chang ve Yang [19] sonlu hacimler yöntemine dayalı, izotermal, sıkıştırılmaz yüksek viskoziteli serbest yüzeyli akışlar için 3-B bir program geliştirdiler. Çalışmaları önerdikleri yöntemin kalınlığın değiştiği ve kalın duvarlı parçalarda Hele-Shaw akışlara göre daha doğru sonuçlar verdiğini göstermiştir. Ilinca ve Hetu [20] ko-enjeksiyon işleminde, sıkıştırılmaz, Newtonyan olmayan, izotermal akışlar için, polimer-hava ve çekirdek-kabuk arayüzeylerini izleyen 3-B nümerik bir yöntem geliştirdi. Chang ve ark. [21] mikro çip kaplama prosesi için (MEP) izotermal ve Newtonyan olmayan akışlarda sıkıştırılma ve yerçekimi kuvvetlerini ihmal eden tam 3-B ve iki fazlı zaman bağılı analiz yaptılar. Ilinca ve ark. [22] akış önü profilini pseudo-concentration yöntemiyle çözen bir çalışma yaptı. Nümerik çalışmalarında, momentum ve süreklilik denklemlerinde GLS (Galerkin Least-Squares) metodunu, enerji denkleminin çözümü için GLS/GGLS (Galerkin least squares/ Galerkin Gradient Least-Squares) metodunu ve akış önü denklemleri için ise SUPG (Streamline Upwind Petrov-Galerkin) metodunu kullandılar. Estacio ve Mangiavacchi [23] enjeksiyon işleminin dolma aşamasında sıkıştırılmaz, izotermal olmayan, atalet etkilerinin ihmal edildiği koşullarda 2-B basınç ve 3-B sıcaklık alanını çözen ve serbest yüzeyin hareketi için VOF metodunu kullanan bir yöntem sundular.

Yukarıda özetlenen 3-B nümerik çalışmaların tamamı enjeksiyon işleminin modellenmesinde sıkıştırılmaz akış koşullarında, değişim etkilerini ihmal eden varsayımlara dayalıdır. Fakat deneysel ve nümerik çalışmaların karşılaştırılması, kalıp içerisindeki polimer eriyik akışın sıkıştırılma ve hal değişim etkileri dikkate alınmadan doğru ve güvenilir sonuç vermeyeceğini göstermiştir [24,25]. Yakın zamanda enjeksiyon işleminde dolma aşaması için yapılan nümerik çalışmalarda, benzer varsayımları kullanmış ve polimer-hava arayüzeyin gelişimi, sıcaklık ve hız dağılımları üzerine fazla gelişme sağlayamamıştır. Zhou ve ark. [26] enjeksiyon işleminin analizi için SUPG ve PSPG (Pressure-Stabilized/Petrov-Galerkin) dayalı Newtonyan olmayan, sıkıştırılmaz, atalet kuvvetlerinin ihmal edildiği 3-B bir sonlu elemanlar yöntemi önermiştir. Zheng ve Ou [27] toz-enjeksiyon işleminin dolma aşamasında viskozite değişimlerini sıkıştırılmaz akış koşullarında modellemiştir.

Tsai ve ark. [28] akış önü gelişiminde kontrol hacim yöntemini kullanarak, mikro enjeksiyon işlemi için sıkıştırılma ve hal değişim etkilerini ihmal eden 3-B nümerik bir yöntem önermiştir.

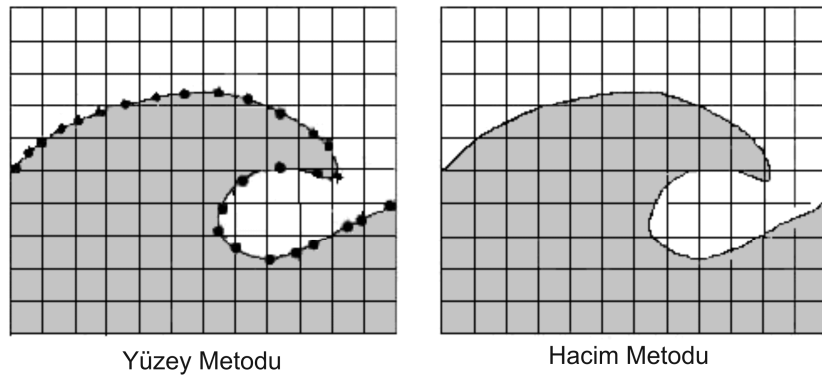
Fakat gerçek kalıplama şartları, 3-B ve Newtonyan olmayan akış davranışlarının ve sıkıştırılma, hal değişim etkilerinin dikkate alınması gerektiğini ortaya koymuştur. Kalıp duvarlarında katı katmanın oluşması, kalıp boşluğu içerisinde akışa karşı direncin artmasına neden olur. Aynı zamanda dolma aşamasındaki yüksek enjeksiyon basıncı ve basıncın kalıp içerisinde düzgün dağılmıyor olması akışkanın yoğunluğunda farklılıklara yol açar. Bu etkiler kalıp içerisindeki eriyik akışın daha iyi modellenebilmesi için dikkatlice incelenmelidir. Sonuç olarak gerçek kalıp koşullarlı altında polimer akışın daha doğru modellenmesi için daha verimli ve güvenilir bir 3-B nümerik yöntem ihtiyacı vardır.

## 2.2. YÜZEY İZLEME ALGORİTMALARI

Ishii [29] birbirine karışmayan akışkanları arayüzey yapılarına ve fazların topografik dağılımlarına göre ayrılmış akışlar (segregated flows), geçiş veya karışık akışlar (transitional veya mixed flows) ve dağınık akışlar (dispersed flows) olmak üzere sınıflandırmıştır. Bu üç durum bir kısmı sıvı diğer kısmı gazla dolu bir sistem ile açıklanabilir. Ayrılmış akışlar sistemin düşük frekans ve genlikte salınım yatığında fazların birbirinden iyi tanımlanmış bir arayüzeyle ayrılmasıyla oluşur. Karışık veya geçiş akışlar frekansın ve genliğin bir miktar artırılmasıyla dalgaların karasızlaşması ve kırılmasıyla oluşur. Arayüzeyin bir parçası kırılır ve kabarcıklar sıvı içerisinde tutulur. Dağınık akışlar sistemin yüksek frekans ve genlikte salınım yapmasıyla, gaz sıvı içerisinde kabarcıklar halinde asılı kalır. Dağınık akışlara ağ boyutunun dağınık arayüzey yapısından çok daha küçük olduğu ölçekte, ayrılmış akışlar gibi davranılabilir [30].

Birbirinden kesin hatlarla ayrılan akışlarda arayüzey izleme algoritmaları, hareketli süreksiz arayüzeyleri yöneten kısmi diferansiyel denklemlere dönük nümerik yaklaşımların doğru hesaplanması için gereklidir [31]. Serbest yüzeylerin hesaplanması için var olan nümerik yöntemler yüzey metotları veya yüzey izleme

metotları (surface methods veya surface tracking methods) ve hacim metotları veya yüzey yakalama metotları (volume methods veya surface capturing methods) olmak üzere iki grupta incelenebilir [32]. Yüzey metotlarında ara yüzey özel işaret noktaları ile işaretlenerek veya onunla hareket etmeye zorlanan bir ağ yüzeye (mesh surface) bağlanarak gösterilir ve eksplisit olarak izlenir. Hacim metotlarında ise arayüzeyin herhangi bir tarafındaki akışkan kütleli parçacıklarla veya işaret fonksiyonları (indicator function) ile işaretlenir.



Şekil 2.1. Arayüzeyin gösterimi için farklı metotlar [30]

### 2.2.1. Yüzey Metotları

Daha öncede bahsedildiği gibi yüzey izleme yöntemlerinde arayüzey belli sırada yerleştirilmiş işaret noktaları ile gösterilir. Bu noktalar arasında arayüzey genellikle parçalı polinom olan ara-değer (interpolant) fonksiyonlarca tahmin edilir. Bu zamana bağlı arayüzey problemini birbiriyle bağlı alanlara böler. Çözüm işaret noktalarında tanımlıdır ve ara değerlerle elde edilen arayüzey, süreksizlikleri hesaba katmak için çoklu değer alabilir [32]. Bu metodun en avantajlı noktası hesaplama boyunca arayüzey bilinmesi ve eğer hesaplama ağı boyunca konveksiyonu sağlanırsa keskin arayüzey elde edilmesidir. Metodun diğer faydaları ise yüzey gerilim kuvvetlerinin dahil edilmesi ve hesaplama eforunun az olmasıdır. Yüzey işaretlemenin parçacık, yükseklik fonksiyonu, seviye fonksiyonu ve hesaplama ağının kendisini kullanma gibi yolları vardır.

Daly [33] arayüzeyi sabit hesaplama ağında birbirine bağlı kütleli işaret parçaları takımıyla işaretlenen ve eksplisit olarak izlenen bir yöntem önerdi. Bu kütleli parçacıkların Lagrangian tarzda adveksiyonu için yerel hız değerleri kullandı. Bu yöntem işaret parçacıklarının arasındaki mesafeye karşı çok hassastır. Eğer parçacıklar birbirinden çok uzak olursa arayüzey çok iyi belirlenemez diğer taraftan parçacıklar birbirine çok yakın olursa, parçacıkların yeni pozisyonu eğriliğin artmasına buna çok kuvvetli yüzey gerilmelerine neden olur. Modelin diğer eksikliği ise, parçacıklar arası mesafenin hesaplama sırasında sabit kalması için dinamik olarak yeni parçaların eklenip çıkarılmasıdır. Bu durum ise parçacıkların sırada tutulabilmesi için sürekli olarak tekrardan numaralandırılmasını gerektirir. Aynı zamanda metod serbest yüzeyde birleşme ve ayrılma gibi durumları belirleyemez ve iki boyutlu çizgilerin üç boyutlu yüzeylere dönüştüğü üç boyutlu akışlarda uygulanması imkânsızdır [31].

Nichols ve Hirt [34] arayüzeydeki referans noktaları bir referans düzlem üzerindeki noktalarla ilişkilendirdi. Daha sonra arayüzeyin konumu bu düzlemde bir yükseklik fonksiyonu ile tanımlandı. Bundan sonra birçok araştırmacı bu yaklaşımı genişletti ve başarı ile 2-B ve 3-B yüzey yakalama hesaplarında kompleks olmayan akış koşullarında uyguladılar. Bu yöntemin en önemli kısıtlaması her bir referans noktasının sadece bir arayüzey değerine sahip olabilmesi ve referans noktaların çoklu değer aldığı durumları tahmin edememesidir. Fakat yöntem bilgisayar kullanımını bakımından çok verimlidir ve çok kompleks olmayan 3-B serbest yüzeyli akışlar için arayüzey tahmini yapabilir.

Arayüzeyi işaretlemek için seviye tespit metodu (Level Set Method) olarak bilinen diğer bir yöntem Osher ve Sethian [35] tarafından geliştirildi. Yöntemde seviye tespit fonksiyonu skalar bir özelliktir ve akışkanlar tarafından tüm hesaplama alanı boyunca adveksiyonu sağlanır. Yöntemin dezavantajları ise konveksiyon denkleminin daha öncesinde ayırıştırma şemaları ile çözülmesi nümerik difüzyona neden olur ve arayüzeylerin birleşmesi, seviye tespit fonksiyonunda step gradyana neden olur.

Yüzey metotlarında, Dervieux ve Thomasset [36] ve Takizawa et al. [37] gibi arayüzeyi hesaplama ağına iliştiren birçok teknik geliştirilmiştir. Metotlar bilgisayar kullanımı, keskin arayüzey elde etme, kısmi dolan hesaplama hücrelerden kaçınması konusunda çok kullanılışlıdır fakat arayüzeyin fazla deformasyona uğramadığı durumlarla sınırlıdır. Büyük deformasyonlar tekrardan ağ oluşturmayı gerektirebilir ki bu hesaplama sırasında karmaşıklığı artırabilir.

### 2.2.2. Hacim Metotları

Temelde hacim metotları akışkanları herhangi biri tarafından işaretler bundan dolayı arayüzeyin tam konumu açık olarak bilinemez. İyi tanımlanmış arayüzey elde etmek için çözümlerin bir parçası olan özel tekniklere ihtiyaç vardır.

Harlow ve Welch [38] MAC (Marker and Cell) adında bir metot geliştirdi. Metotta işaret noktalar serbest yüzeye sahip akışkanın kapladığı hacme dağıtılır. Işaret nokta içermeyen bir hesaplama hücresi boş kabul edilir ve bu hücreye komşu olan dolu hücre arayüzü içerir. Daily [33], Harlow ve Welch [38] tarafından önerilen MAC metodunu iki akışkan için hesaplama yaparak genişletti. Metotta işaret noktalar akışkanlara göre ikiye ayrılır ve bu yapı akış boyunca korunur. İki tür işaret noktası içeren hücre arayüzü arayüzey tanımlar ve noktalar arayüzeydeki karışımın yoğunluğu ve viskozitesini hesaplamada kullanılır. Daha sonra, Hirt ve Shannon [39], Harlow ve ark. [40] ve Koshizuka ve ark. [41] bu yaklaşımı genişlettiler. MAC metodu uygulama anlamında çok basittir fakat metot bilgisayar kullanımı bakımından yüksek hesaplama gücü gerektirir. Çünkü metotta tüm yönetici denklemlerin çözümlenmesinin yanı sıra çok sayıda işaret noktasının hareketleri takip edilmelidir ki bu bilgisayarda parçacıkların koordinatlarını tutmasını gerektirir ve büyük bir depolama alanına ihtiyaç duyulur.

Diğer bir yöntem ise sıfır ve bir arasında değerler alan, skalar bir gösterici fonksiyon olan hacim fraksiyonunu kullanmaktadır. Bir hesaplama alanında sıfır değerı akışkanlardan birini ifade ederken 1 değerı diğer akışkanı ve sıfır ile bir arasındaki bir değer arayüzeyi gösterir.

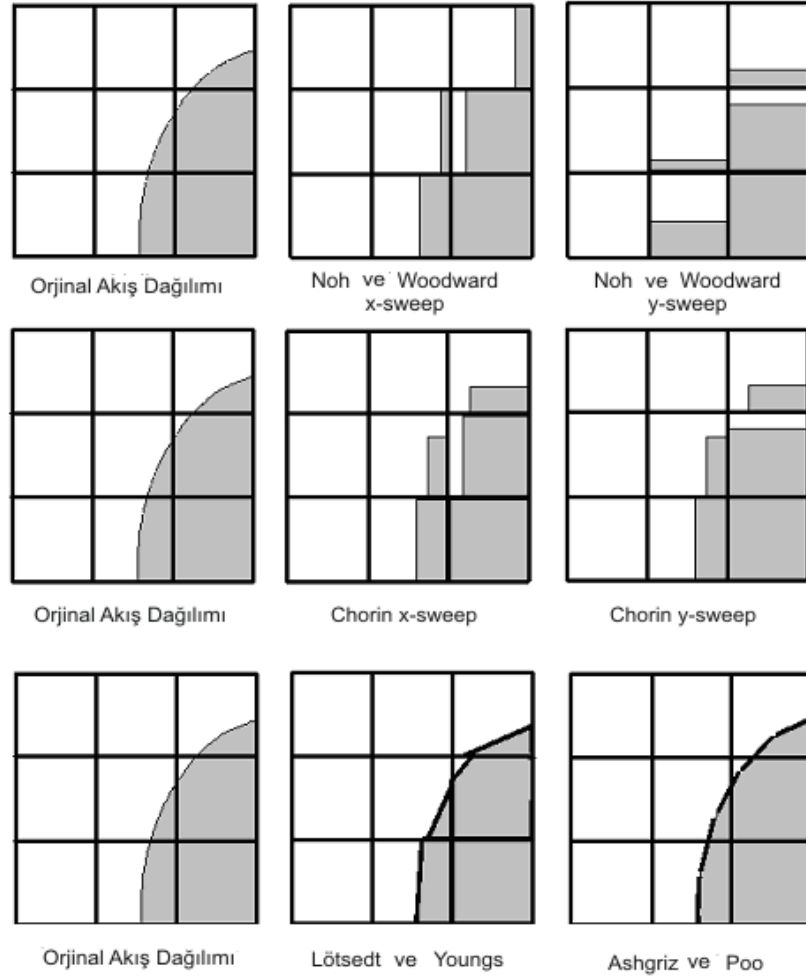
Hacim metodu MAC metotlardan hesaplama gücü bakımından çok daha ekonomiktir. Çünkü her hücre için yalnızca bir değer depolanmalı ve fazladan sadece bir adveksiyon denklemi çözülmelidir. Fakat skalar konveksiyon denkleminin klasik ayrıklaştırma şemalarıyla çözümünün arayüzey yakınlarında dağılmaya (smearing) ve birkaç hücre içerisinde arayüzeyin yakalanmamasına neden olur. Birçok araştırmacı iyi tanımlı arayüzey elde etmek için değişik teknikler önermiştir. Bu teknikler doğru tekniği, donör-akseptör formülasyonu ve yüksek dereceden ayrıklaştırma şemalarıdır [42].

Noh ve Woodward [43] SLIC (Simple Line Interface Calculation) metodu adıyla bilinen birden fazla akışlar için bir doğrusal yöntem geliştirdi. Metot arayüzeyi, her bir hücrede eksenlerden birine paralel olarak alır. Metot sol ve sağ komşu hesaplama hücrelerinin hacim fraksiyonunu kullanarak x eksenine (x-sweep), üst ve alt komşu hücrelerinin hacim fraksiyonlarını kullanarak y eksenine (y-sweep) paralel çizgiler oluşturur. Chorin [44] arayüzey içeren bir hücre için bütün komşu hücrelerin hacim fraksiyonlarını kullanarak yukarıda bahsedilen yöntemi geliştirdi. Youngs [45] ve Löstedd [46] ise arayüzeyde eksenlere paralel çizgiler kullanmak yerine eğik çizgiler kullanarak önemli bir gelişme sağladı. Ashgriz ve Poo [47] FLAIR (Flux Line segment Model for Advection and Interface Reconstruction) olarak bilinen ve hücre yüzeylerinde doğru parçaları kullanarak SLIC metoduna düzeltme getirmiştir. Şekil 2.2 farklı doğru tekniklerinin karşılaştırılmasını göstermektedir.

Yukarıda bahsedilen tüm yöntemlerde, yapısal dörtgensel elemanlardan oluşan hesaplama ağı, çözüm algoritmasının implisit bir parçasıdır. Eğer yapısal olmayan hesaplama hücreleri 3-B da kullanılırsa, akışkanların dağılımını tahmin etmek çok zordur [42].

Donör-akseptör formülasyonundaki temel fikir, bir zaman aralığı içerisindeki akseptör hücrenin yüzeyinde transport eden hacim fraksiyonunun hesaplanmasında onun hacim fraksiyonunun kullanılmasıdır. Akseptör hücredeki değer kullanılması

hacim fraksiyonlarının sınırlandırılmamış (unbounded) olmasına yani sıfırdan küçük veya birden büyük değerler almasına neden olabilir. Şekil 2.3 donör-akseptör formülasyonunun şematik olarak göstermektedir.



Şekil 2.2. Farklı doğru tekniklerinin karşılaştırılması [30]



Şekil 2.3. Donör-akseptör şemanın gösterimi [42]



Ramshaw ve Trapp [48] donör-akseptör formülasyonunda bir problem bildirdiler. Yöntemin tüm sonlu gradyanlara birer basamak (step change) olarak davranması, arayüzeyin akış yönünde yöneldiğinde doğru olmayan yükselmelere (dikleşmeye) neden olmaktadır. Hirt ve Nicholas [49] bu donör-akseptör formülasyonun kendi VOF (Volume of Fluid Element) metodu ile iyileştirdiler. VOF metodunun çözüm algoritmasında arayüzeyin hücre yüzeyi ile yaptığı açılı bilgileri de kullanılır. Lafaure ve ark. [50] SURFER adını verdikleri ve akış önündeki ayrılma ve birleşmelerle de ilgilenebilen VOF metodunun modifiye edilmiş bir halini önerdiler. Bölüm 3.2’de VOF metodu ile ilgili detaylı bilgi bulunmaktadır.

Yüksek seviyeli fark yöntemlerinde ise, konvektif skalar transport denklemini ayrıklaştırılırken yüksek seviyeli fark şemaları arayüzeyi yakalamak için kullanılır. Davis [51] arayüzeyin izlenmesinde birçok yüksek seviyeli fark yöntemi karşılaştırmış ve az/hiç-difüzyon (less/non-diffusive) ve sıkıştırılmış (compressive) şemalar arasındaki farkı bildirmiştir. Çalışmaları az/hiç difüzyon şemaların arayüzeyde dağılmayı önlediğini ve sıkıştırılmış şemaların ise hem arayüzeydeki dağılmayı önlediği hem de arayüzey yakınlarında oluşabilecek difüzyonu uzaklaştırdığını göstermiştir [30]. Bu iki önemli özellik keskin arayüzey elde etmekte önemli yer tutar.

Ghobadian [52] ve Pericleous ve Chan [53], Van Leer [54] tarafından önerilen yüksek seviyeli fark yöntemlerini uyguladılar ancak sonuçlar arayüzeyde dağılmayı gösterdi. Darwish [56], Leonard [55] tarafından önerilen NVD (Normalized Variable Diagram) diyagramını kullanan bir şema önerdi. Yöntem sınırlandırılmış, difüzyon olmayan bir şemaydı fakat aynı hücre içindeki adımı tutmakta başarısızdı. Ubbink ve Issa [42] CICSAM (Compressive Interface Capturing Scheme for Arbitrary Meshes) adını verdikleri yüksek seviyeli fark yöntemi geliştirdiler. CICSAM, hacimsel akışların yüzey değerlerinin yaklaşımında sınırlandırma koşulunu sağlamak için Leonard’ın [55] NVD diyagramını kullanan donör-akseptör formülasyonuna dayalı yüksek çözünürlüklü bir fark şemasıdır. Şema iki yüksek çözünürlüklü fark şeması olan CBC (Convection Boundness Criterion) ve UQ (Ultimate-Quick Test) arasında

gidip gelerek arayüzeyin keskinliğini sağlar. Bölüm 4.3 CICSAM ile ilgili detaylı bilgi içermektedir.

### 2.3. KATILAŞMANIN MODELLENMESİ

Katılma problemleri hareketli katı-sıvı sınır nedeniyle lineer olmayan problemlerdir ve birkaç pratik anlamda önemi olmayan durum dışında analitik çözümleri elde edilemez. Hareketli sınır problemlerinin çözümü için çok sayıda sonlu farklar, sonlu elemanlar ve sonlu hacimler yöntemine dayalı nümerik teknik geliştirilmiştir. Sonlu farklar yöntemi basit, düzgün şekillerde çok iyi sonuçlar verir ancak 2-B ve 3-B kompleks geometrilerde uygulanması zordur. Literatürde gizil ısının dağılımı konusunda farklılaşan birçok sonlu farklar yöntemi önerilmiştir. Bu metotlar genel olarak sabit ağ metotları (fixed grid methods) ve değişken ağ metotları (variable grid methods) olmak üzere iki gruba ayrılabilir [57].

Değişken ağ metotlarında, hal değişim arayüzünün yeri her zaman adımı için ağ üzerinde değerlendirilir. Bu metotlarda hal değişim arayüzü dinamik olarak değişen hesaplama ağından yakalanır. Dolayısıyla bu grup içindeki metotlar yapısal olmayan ağlarda uygulanabilir. Yapısal olan ağlarda ise hal değişim arayüzü düzgün değişmeyen zaman adımlarıyla yakalanabilir [58]. Bu yaklaşım çok boyutlu, kompleks problemlerin çözümü için uygulanması zordur.

Değişken ağ yöntemlerinin çok boyutlu hal değişim problemlerinde uygulanması algoritma olarak karmaşıktır ve yüksek hesaplama gücü gerektirir bu nedenle bu problemlerin çözümünde genellikle sabit ağ yöntemleri kullanılır. Sabit ağ yöntemlerinde, problem yönetici denklemlerin sabit ağ üzerinde çözümünü sağlayacak şekilde tekrar formüle edilir ve katı-sıvı bölgeye sürekli bir bölgelerden biri gibi davranılır [58]. Bu grup altında birçok yöntem olsa da, bunlar entalpi metotları (enthalpy methods), etkin özgül ısı metotları (effective specific heat methods) ve ısı akışı metotları (heat flow methods) olmak üzere üç gruba ayrılabilir. Entalpi metotlarında, enerji denklemi entalpiye bağlı olarak tekrar tanımlanır. Eksplisit veya implisit bir yöntem kullanılarak, entalpi-sıcaklık ilişkisinden sıcaklık

gelişiminin belirlenmesinden sonra bilinmeyen entalpi değerleri bulunur. Özgül ısı metotlarında, gizil ısı etkileri malzemenin özgül ısı tanımı içinde değerlendirilir. Isı akışı metotlarında ise gizil ısı yerel katılma hızına bağlı ısı üretimi terimi gibi değerlendirilir.

Sabit ağ üzerinde çözüm yapan metotların önemli bir bölümü, hal değişiminde iletimin ısı transferinde birincil mekanizma olduğunu varsaymıştır. Comini ve ark. [59] sıcaklığa bağlı termo-fiziksel özellikler ve doğrusal olmayan ısıyım-taşıyım sınır koşullarını kullanarak, zamana bağlı ısı iletim probleminin çözümünde özgül ısı yöntemini kullandı ve bu basitleştirilmiş modellerinin çözümü analitik çözümlerle yakın sonuçlar verdi. Pham [60] yuvarlanmış sığa prensibine (lumped-capacitance principle) dayalı eksplisit entalpi metodu önerdi ve onun, özgül ısının katı-sıvı bölgedeki süreksiz davranışları aşmak için kullandığı üç seviyeli entalpi metodu daha önceki zaman seviyesi metotları ile karşılaştırıldığında basitlik, doğruluk ve kolay uygulanabilirlik bakımından birçok avantaj sağladı. Dalhuijsen ve ark. [61] köşe bölgesinde iletimden kaynaklı katılma probleminin çözümü için entalpi metodunu ve gerçek olmayan ısı akışı metodunu (fictitious heat flow method) kullanarak çözdü ve sonuçları analitik sonuçlarla karşılaştırdı. Çalışmalarında iteratif, iteratif olmayan ve üç zaman seviyeli gibi farklı zaman şemalarını, gizil ısıyı değerlendirmede Bath, Lemmon, Del Giudice ve Rolph metotları gibi farklı yaklaşım metotlarını kullandılar. Nümerik çalışmaları entalpi metotlarının gerçek olmayan ısı akışı yöntemlerinden daha doğru sıcaklık profilleri verdiğini fakat analiz zamanı bakımından daha az ekonomik olduklarını ve Euler –Backward şemasının kararlılık ve kolay uygulanma bakımından tercih edilebilir olduğunu göstermiştir. Comini ve ark. [62] özgül ısı metodu, entalpi-sıcaklık metodu, entalpi-difüzyon metodu ve öngörme-düzeltilme metodu olmak üzere dört farklı metodu iletim kaynaklı katılma probleminin çözümünde kullandı ve izotermal durumlarda entalpi metotlarının özgül ısı metotlarından daha iyi sonuç verdiğini gösterdi. Fachinoti ve ark. [63] zamana bağlı katılmayı içeren ısı iletim denkleminin çözümünde sıcaklığa dayalı bir yöntem önerdi ve analitik çözümle karşılaştırmaları yöntemin geniş zaman aralığında doğru ve hızlı sonuç verdiğini gösterdi. Chessa ve ark. [64] sıcaklık ve arayüzün konumundaki dalgalanmaları aşmak için genişletilmiş bir sonlu elemanlar

yöntemi önerdiler ve yöntemlerinin analitik ve diğer nümerik çalışmalarla kıyaslandığında doğru ve dalgalanmalardan bağımsız olduğunu gösterdiler.

Katı-sıvı hal değişimin olduğu fiziksel sistemlerin neredeyse tamamında konveksiyon etkileri de önemli rol oynar. Literatürde konveksiyon-difüzyon hal değişimiyle ilgili birçok çalışma yer almaktadır. Gagdil ve Gobin [65] ve Albert ve O'Neil [66] saf sıvının difüzyon ve doğal konveksiyon altında donmasıyla ilgili sıcaklık formülasyonuna dayalı, katı-sıvı arayüzü hareketli ağla yakalayan bir yaklaşım önerdiler. Fakat sabit ağ yaklaşımları daha öncede bahsedildiği gibi katılaşmanın sistemin sadece bir parçası olduğu durumlarda nümerik modellemeyle ilgili birçok avantaj sunmaktadır. Sabit ağ yöntemlerindeki en önemli problem sıvın katılaştığı bölgede sıfır hız durumunu hesaba katmaktır. Morgan [67] ortalama gizil ısının, ( $\Delta H$ ) daha önceden belirlenen ve sıfırla hal değişim gizil ısısı,  $L$  arasında bir değere ulaştığı durumda hızı sıfır kabul ettiği basit bir yaklaşım uyguladı. Gartling [68] katı-sıvı hal değişimi için  $\Delta H$ 'ın  $L$ 'den sıfıra düşerken viskozitenin yüksek değerlere ulaştığı viskozitenin  $\Delta H$ 'ın bir fonksiyonu olduğu daha gelişmiş bir model önerdi. Voller ve ark. [69, 70] sabit ağ üzerinde hızı sıfıra düşürmek için birçok yöntem çalıştı ve Gartling [68] tarafından önerilen yöntemle benzer entalpi metodu uyguladı. Bu metotta hal değişimin olduğu hesaplama hücresinin, ( $0 < \Delta H < L$ ) poroz bir ortam olduğu ve porozitenin,  $\Delta H$   $L$ 'den sıfıra düşerken birden sıfıra doğru düştüğünü varsayılmıştır. Burada daha önce bahsedilen tüm nümerik metotlar saf malzemelerde uygulamalarında karşılaşılan izotermal hal değişimi varsaymıştır. Fakat birçok pratik uygulamada kullanılan malzemeler saf değildir. Katılaşmanın bir sıcaklık aralığında olduğu bu tip problemler genellikle katı-sıvı bölge (mush zone) problemi olarak adlandırılır Voller ve Prakash [71] entalpi-porozite tekniğine dayalı konveksiyon-difüzyon katı-sıvı bölge hal değişim metodu geliştirmiştir. Modelin temel özelliği katı-sıvı bölgedeki gizil ısının gelişimini ve hız için yönetici denklemlerde uygun kaynak terimlerinin kullanılmasıdır. Modelle ilgili detaylar bölüm 3.3'te verilmiştir.

Amorf polimerlerdeki ısı transferi termal özelliklerinin katılaşma sırasında bile çok az değişmesinden dolayı karmaşık değildir. Diğer taraftan yarı-kristal (semi-

crystalline) polimerler bir kristal parça içerir, bu kristalleşme ısısının yayılımına ve katılma sırasında termal özelliklerin değişimine neden olur [72]. Literatürde yarı kristal polimerlerde mikro yapı gelişimi ve izotermal olmayan kristalleşme kinetikleriyle ilgili birçok yayın bulunmaktadır [73]. Aslında polimerler mol kütlesi dağılımı (polydispersity) ve hiyerarşik yapı nedeniyle birçok modelin öngördüğü gibi belirli bir sıcaklıkta değil bir sıcaklık aralığında katılır [74]. Kristal polimerlerin katılmasında oluşan katı-sıvı bölge (mushy zone) literatürde pek çalışılmamıştır. Bu bağlamda önceki bölümde bahsedildiği gibi alaşım araştırmacıların katı-sıvı bölge hal değişimi üzerine katılma/kristalleşme analizlerinden yararlanılabilir. Son zamanlarda, Yang ve ark. [74], Cao ve Faghri [75] tarafından önerilen entalpi taşınım tekniğini kalın duvarlı parçalarda yüksek yoğunluklu polietilen malzemenin enjeksiyon işleminin soğuma aşaması için kullandılar ve deneylerle çok yakın sonuçlar elde ettiler. Bu modelin genişletilmiş sıcaklık aralığıyla birlikte katı-sıvı bölge içeren katılma problemlerinin 3-B çözümünde uygun olduğu ve özellikle kalın duvarlı yarı-kristal polimerlerin enjeksiyon işleminin soğuma aşamasında kullanılabileceği gösterilmiştir. Bu nümerik çalışmada yarı-kristal polimeri malzemenin katılmanın modellenmesi için Voller ve Prakash [71] tarafından önerilen bir entalpi porozite tekniği genişletilmiş sıcaklık aralığıyla birlikte başarıyla uygulanmıştır

### 3. MATEMATİKSEL MODEL

#### 3.1. YÖNETİCİ DENKLEMLER

3-B, sıkıştırılabilir ve izotermal olmayan akışlar matematiksel olarak kütle korunumu (süreklilik), momentumun korunumu ve enerjinin korunumu denklemleri ile ifade edilir. Süreklilik denklemi korunumlu haliyle aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \cdot \vec{u}) = 0 \quad (1)$$

Burada  $\rho$  yoğunluk,  $u$  hız vektörüdür. Momentumun korunumu denklemi konservatif haliyle, ataletli bir referans sistemi için yüzey gerilimini ve eğilimi ihmal ederek aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\frac{\partial(\rho \vec{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u} \vec{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\vec{\tau}) + \rho \vec{g} \quad (2)$$

Burada  $p$  statik basıncı,  $\tau$  toplam stres tansörünü ve  $\rho g$  ise yer çekiminden kaynaklanan kuvveti ifade etmektedir. Stres tansörü,  $\tau$  aşağıdaki denklemlerle verilir.

$$\vec{\tau} = \mu [(\nabla \vec{u} + \nabla \vec{u}^T) - \frac{2}{3} \cdot \vec{u} I] \quad (3)$$

Burada  $\mu$  moleküler viskoziteyi,  $I$  birim tansörü ve denklemin sağ tarafındaki ikinci terim hacimsel genişleme etkilerini gösterir. Enerji denklemi konservatif formunda viskoz ısınma etkilerini de dikkate alarak aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{u}(\rho E + p)) = \nabla \cdot (k \nabla T + \vec{\tau} \vec{u}) \quad (4)$$

ve

$$E = h - \frac{p}{\rho} + \frac{u^2}{2} \quad (5)$$

Katı bölümlerde enerji taşınım denklemi ise aşağıdaki genel form ile gösterilebilir.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \nabla \cdot (\vec{v} \rho h) = \nabla \cdot (k \nabla T) \quad (6)$$

Burada

- $\rho =$  yoğunluk
- $h =$  fark edilir entalpi,  $\int_{T_{ref}}^T c_p dT$
- $k =$  ısı iletim katsayısı
- $T =$  Sıcaklık

Denklem 6'da soldaki ikinci terim katının, katı bölümde hesaplanan hız vektörüne dayalı ötelenme veya dönme hareketinden kaynaklanan konvektif ısı transferini göstermektedir. Denklemin sağındaki terim ise iletimden kaynaklı ısı akısını ifade etmektedir.

### 3.2. VOF METODU

Akışkan hacmi metodu (VOF) Hirt ve Nichols [49] tarafından geliştirilmiştir. Metot sabit koordinat sisteminde hareketli serbest yüzeyi olan akışların çözümüne dayanmaktadır. VOF metodunda akış denklemlerinin, eşitlikleri tek set halinde elde etmek için direkt olarak hacim oranları alınır ve ara yüzey bir faz belirleyici fonksiyon,  $f$  (hacim fraksiyonu veya renk fonksiyonu olarak da bilinir) kullanılarak takip edilir

$$f = \frac{\text{akışkanın hacmi}}{\text{hesaplama hücresinin hacmi}} \quad (7)$$

ve iki akışkanlı sistemler için bir hesaplama alanında aşağıda gösterilen üç durum söz konusudur.

$$\begin{cases} f = 1 & \text{Kontrol hacmi sadece faz 1 ile doludur} \\ f = 0 & \text{Konrol hacmi sadece faz 2 ile doludur} \\ 0 < f < 1 & \text{Kontrol hacmi ara yüzey içerir} \end{cases} \quad (8)$$

Ara yüzeyin hareketi  $f$ 'nin adveksiyon denklemi ile ifade edilir.

$$\frac{\partial f}{\partial t} + u \cdot \nabla f = 0 \quad (9)$$

Denklem serbest yüzeyin belirgin bir çizgi olduğunu vurgulamaktadır. Denklem yalnızca adveksiyon terimi içerdiğinden direkt ayrıklaştırma yöntemleri ile çözüm akış önünün yayılmasına neden olan nümerik difüzyonun oluşmasına meyillidir. VOF metodu karmaşık hareketteki akışlar için kullanılabilir ancak problem nümerik difüzyonun azaltılmasıdır. Birçok araştırmacı bölüm 4.2'de anlatıldığı gibi akış önü şeklinin tekrardan oluşturulması ve serbest yüzeyin adveksiyonu için, nümerik difüzyondan kaçınan ve arayüzeyin yayılmadığı, algoritmalar geliştirmiştir.

### 3.3. KATILAŞMA

Amorf polimerlerdeki ısı transferi termal özelliklerinin katılma sırasında bile çok az değişmesinden dolayı karmaşık değildir. Diğer taraftan yarı-kristal (semi-crystalline) polimerler bir kristal parça içerir, bu kristalleşme ısısının yayılımına ve katılma sırasında termal özelliklerin değişimine neden olur [72]. Literatürde yarı kristal polimerlerde mikro yapı gelişimi ve izotermal olmayan kristalleşme kinetikleriyle ilgili birçok yayın bulunmaktadır [73]. Aslında polimerler mol kütlesi dağılımı (polydispersity) ve hiyerarşik yapı nedeniyle birçok modelin öngördüğü gibi belirli bir sıcaklıkta değil bir sıcaklık aralığında katılır [74]. Kristal polimerlerin katılmasında oluşan katı-sıvı bölge literatürde seyrek çalışılmıştır. Bu bağlamda



bölüm 2.3 de bahsedildiği gibi alaşım araştırmacıların katı-sıvı bölge hal değişimi üzerine katılaşma/kristalleşme analizlerinden yararlanılabilir.

Bu nümerik çalışmada katılaşmanın modellenmesi için Voller ve Prakash [71] tarafından önerilen bir entalpi porozite tekniği kullanılmıştır. Bu teknikte eriyik arayüzü eksplisit olarak izlenmez fakat hesaplama alanındaki tüm hücreler için entalpi dengesinden hesaplanan, hücre içerisindeki sıvı miktarının hücre hacmine oranını gösteren sıvı oranı takip edilir. Sıvı oranının 1 ile 0 arasında bulunduğu katı-sıvı bölge poroz bir alandır ve porozite malzeme katılaştıkça 1 den 0 doğru azalır. Hesaplama hücresinde malzeme katılaştığında porozite sıfır olur ve hız sıfıra düşer. Katılaşma problemleri için enerji transport denklemi aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\frac{\partial(\rho H)}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{u}\rho H) = \nabla \cdot (k\nabla T) + S \quad (10)$$

Burada  $H$  entalpiyi  $S$  ise kaynak terimi göstermektedir. Kaynak terim için detaylı açıklama Voller ve Prakash [71] tarafından verilmiştir. Malzemenin entalpi değeri fark edilir entalpi,  $h$  ve gizli ısı,  $\Delta H$  değerlerinin toplamı olarak hesaplanır

$$H = h + \Delta H \quad (11)$$

burada

$$h = h_{ref} + \int_{T_{ref}}^T c_p dT \quad (12)$$

ve

$$\begin{aligned} h_{ref} &= \text{referans entalpi} \\ T_{ref} &= \text{referans sıcaklık} \\ c_p &= \text{sabit basınç altında özgül ısı} \end{aligned}$$

Katı-sıvı hal değişimi için gizli ısı katkısı sıcaklığın,  $T$  bir fonksiyonu olarak belirlenmiştir.

$$\Delta H = f(T) \quad (13)$$

Katı-sıvı bölgede gizli ısının sıvılık oranının bir fonksiyonu kabul edilerek,  $f(T)$  aşağıdaki genel haliyle yazılabilir.

$$f(T) = \begin{cases} 0 & T \leq T_s \\ L & T > T_l \\ L(1 - \beta) & T_s < T \leq T_l \end{cases} \quad (14)$$

Burada  $\beta$  yerel katılık oranını,  $L$  malzemenin gizli ısını,  $T_l$  katılaşımanın başladığı likidus sıcaklığını ve  $T_s$  ise tam katılaşımanın ulaşıldığı solidus sıcaklığı göstermektedir.

$$\Delta H = \beta L \quad (15)$$

Katı-sıvı bölgede gizli ısının gelişimini tamamen tanımlayabilmek için, yerel katılık oranı ve sıcaklık arasındaki ilişki kurulmalıdır. Eğer doğrusal bir ilişki seçilirse:

$$\beta = \begin{cases} 1 & \text{if } T \leq -\varepsilon \\ 0 & \text{if } T > \varepsilon \\ \frac{(\varepsilon - T)}{2\varepsilon} & \text{if } -\varepsilon < T \leq \varepsilon \end{cases} \quad (16)$$

Burada  $T=\varepsilon$  ve  $-\varepsilon$  sırasıyla likidus ve solidus sıcaklıkları gösterecek şekilde ölçeklendirilmiştir.  $\varepsilon$  katı-sıvı bölgenin yarı sıcaklık aralığı olarak tanımlanmıştır.

### 3.4. MALZEME ÖZELLİKLERİ

Plastik enjeksiyon işleminin simülasyon sonuçları kullanılan malzemenin özelliklerine büyük ölçüde bağlıdır dolayısıyla malzeme özellerine ve bunların modellenmesine dikkat edilmelidir. Bu çalışmada, yoğunluktaki değişimler ve Newtonyan olmayan akışkan özellikleri sırasıyla Tait [76] durum denklemi ve Cross-WLF [77] tipi viskozite ile gösterilmiştir. Detaylar izleyen bölümlerde açıklanmıştır.

#### 3.4.1. Viskozite Modeli

Bu çalışmadaki simülasyonlarda Cross tipi (Cross [77]) eşitliklere dayalı bir viskozite modeli kullanılmıştır.

$$\eta(\dot{\gamma}, T, p) = \frac{\eta_0(T, p)}{1 + \left[ \frac{\eta_0(T, p) \dot{\gamma}}{\tau} \right]^{(1-n)}} \quad (17)$$

Burada  $n$  kuvvet yasası indeksi,  $\tau$  kuvvet yasası ve Newtonyan akışlar arasındaki asimptotik geçiş bölümündeki stres değeri ve  $\eta_0(T, p)$  sıfır kayma hızı viskozitesi.  $\eta_0$ 'ın basınç ve sıcaklık bağımlılığını göstermek için, WLF fonksiyonel formu değiştirilmiş sıcaklık aralığında aşağıda gösterildiği gibi kullanılmıştır.

$$\eta_0(T, p) = D_1 \cdot \exp\left(-\frac{A_1(T - T^*)}{A_2 + (T - T^*)}\right) \quad T \geq T^* + \varepsilon \quad (18)$$

$$\eta_0(T, p) = \infty \quad T < T^* - \varepsilon \quad (19)$$

burada

$$T^*(p) = D_2 + D_3 \cdot p \quad (20)$$

ve

$$A_2(p) = \tilde{A}_2 + D_3 \cdot p \quad (21)$$

Yukarıdaki denklemlerde,  $\varepsilon$  katı-sıvı bölgesinin yarı sıcaklık aralığını gösteren küçük bir değerdir.. Katı-sıvı bölgede,  $\eta_0(T,P)$  için denklem (16)'dakine benzer doğrusal bir ilişki varsayılmıştır. WLF tipi gösterim,  $\eta(\dot{\gamma}, T, p)$  için yedi model sabiti ( $n, \tau, D_1, D_2, D_3, A_1, \tilde{A}_2$ ) ile sonuçlanır. Model dolma aşamasının analizi için uygundur aynı zamanda önemli soğumanın olduğu dolma sonrası aşaması içinde kullanılabilir. Çizelge 3.1. nümerik çalışmalarda kullanılan polipropilen için model sabitlerini göstermektedir.

Çizelge 3.1. Simülasyonlarda kullanılan PP için viskozite model sabitleri

$n$	0.2975
$\tau$ (Pa)	28200
$D_1$ (Pa.s)	$9.25 \times 10^{13}$
$D_2$ (°C)	263.15
$D_3$ (°C/Pa)	0
$A_1$	32.03
$\tilde{A}_2$ (°C)	51.6

#### 3.4.2. Özgül Hacim Modeli

Bu nümerik çalışmada Tait [76] denklemine dayalı bir özgül hacim modeli kullanılmıştır. Özgül hacmin basınç ve sıcaklıkla değişimi,  $p-v-T$  modeli göz önüne alınarak Tait [76] tarafından önerilen klasik ampirik hal denklemi ile gösterilmiştir.

$$v(T, p) = v_0(T) \left[ 1 - C \ln \left( 1 + \frac{p}{B(T)} \right) \right] + v_i(T) \quad (22)$$

Burada  $C = 0.0894$ . Bu denklem  $v_0(T)$  ve  $B(T)$  ile aşağıda gösterildiği gibi katı ve sıvı halleri tanımlayabilir.

$$v_0(T) = \begin{cases} b_{1,l} + b_{2,l}\bar{T} & \text{if } T > T_t \\ b_{1,s} + b_{2,s}\bar{T} & \text{if } T < T_t \end{cases} \quad (23)$$

ve

$$B(T) = \begin{cases} b_{3,l} + \exp(-b_{4,l}\bar{T}) & \text{if } T > T_t \\ b_{3,s} + \exp(-b_{4,s}\bar{T}) & \text{if } T < T_t \end{cases} \quad (24)$$

Burada  $\bar{T} = T - b_5$  ve kristalleşme sıcaklığına karşılık gelen dönüşüm sıcaklığının basıncın doğrusal fonksiyonu olduğu varsayılmıştır.

$$T_t = b_5 + b_6 p \quad (25)$$

Aynı zamanda yarı kristal polimerler için dönüşüm sıcaklığı,  $T_t$  yakınlarındaki ani basınç değişimlerini idare etmek için ek terime gerek vardır. Model için gerekli ek terim aşağıda verilmiştir.

$$v_t(T) = \begin{cases} 0 & \text{if } T > T_t \\ b_7 \exp(b_8 \bar{T} - b_9 p) & \text{if } T < T_t \end{cases} \quad (26)$$

Yarı kristal polimerler için,  $b_{1,l} > b_{1,s}$  dolayısıyla  $b_7 = b_{1,l} - b_{1,s}$  ve  $v(T, p=0)$   $T=b_5$ 'de süreklidir.

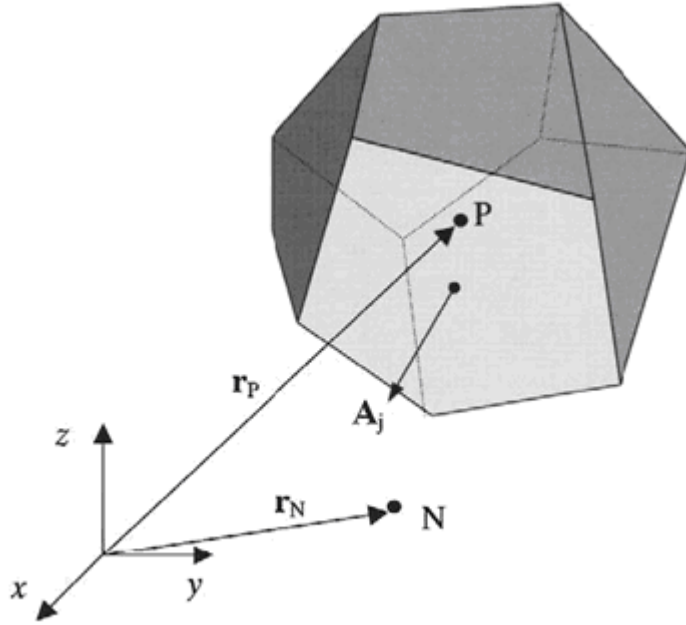
Çizelge 3.2. Simülasyonlarda kullanılan PP için özgül hacim modeli sabitleri

$b_{1,l}$ (m <sup>3</sup> /kg)	$1.312 \times 10^{-3}$
$b_{2,l}$ (m <sup>3</sup> /kg°C)	$9.96 \times 10^{-7}$
$b_{3,l}$ (Pa)	$7.78394 \times 10^7$
$b_{4,l}$ (°C <sup>-1</sup> )	$5.207 \times 10^{-3}$
$b_{1,s}$ (m <sup>3</sup> /kg)	$1.18 \times 10^{-3}$
$b_{2,s}$ (m <sup>3</sup> /kg°C)	$4.870 \times 10^{-7}$
$b_{3,s}$ (Pa)	$1.62964 \times 10^7$
$b_{4,s}$ (°C <sup>-1</sup> )	$4.502 \times 10^{-3}$
$b_5$ (°C)	455.05
$b_6$ (°C/Pa)	$2.31 \times 10^{-8}$
$b_7$ (m <sup>3</sup> /kg)	$1.068 \times 10^{-4}$
$b_8$ (°C <sup>-1</sup> )	$7.14 \times 10^{-2}$
$b_9$ (Pa <sup>-1</sup> )	$3.59 \times 10^{-9}$

## 4. SAYISAL MODEL

### 4.1. SONLU HACİMLER İLE AYRIKLAŞTIRMA

Bu çalışmada yüzey adresleme tekniğine dayalı sonlu hacimler metodu kullanılmıştır. Bu yaklaşım, Perić'in [78] önerdiği bütün akış özelliklerinin kontrol hacmi merkezinde depolandığı bir düzenleme (co-located variable arrangement) kullanır. Bu düzenleme hesaplama ağıyla ilgili gerekli geometrik bilginin miktarını azaltır ve programlamayı basitleştirir. Bütün hesaplama alanı, Şekil. 4.1'de gösterildiği gibi sonlu sayıda, birbiriyle kesişmeyen, rastgele yapıda hesaplama hücrelerine bölünür. Her bir yüzey, biri yüzeye sahip olan  $P$  merkezli diğeri yüzeye komşu olan  $N$  merkezli iki hesaplama hücresiyle paylaşılır.  $V_P$  ve  $V_N$  sırasıyla sahip ve komşu hücrelerin hacimlerini,  $A_j$  ise her zaman sahip hücreden komşu hücreye doğru olan yüzey alan vektörünü ve  $r_P$  ve  $r_N$  de hücre merkezlerinin pozisyon vektörlerini göstermektedir.



Şekil 4.1. Rastgele topolojide kontrol hacmi [19]

Tüm yönetici denklemler  $\rho$ ,  $\Gamma$  ve  $S_\varphi$  uygun şekilde seçilmesiyle genel, zamana bağlı transport denklemi ile gösterilebilir.

$$\underbrace{\frac{\partial(\rho\varphi)}{\partial t}}_{\text{zaman bağlı terim}} + \underbrace{\nabla \cdot (\rho v \varphi)}_{\text{konvektif terim}} = \underbrace{\nabla \cdot (\Gamma \nabla \varphi)}_{\text{difüzyon terim}} + \underbrace{S_\varphi}_{\text{kaynak terim}} \quad (27)$$

Burada  $\varphi$  skalar veya vektör olan bağımlı değişken,  $\Gamma$  difüzyon ve  $S_\varphi$  ise difüzyon ve konvektif terimlerin içinde yer almayan tüm terimleri içeren kaynak terimidir.

Kontrol hacmi üzerinde formal integrasyon aşağıdaki denklemi verir.

$$\int_V \frac{\partial(\rho\varphi)}{\partial t} dV + \int_V \nabla \cdot (\rho v \varphi) dV = \int_V \nabla \cdot (\Gamma \nabla \varphi) dV + \int_V S_\varphi dV \quad (28)$$

Gauss dijervans teoremi uygulandığında, denklem (28) aşağıdaki gibi yazılır

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \int_V \rho \varphi dV \right) + \int_A (\rho v \varphi) \cdot dA = \int_A (\Gamma \nabla \varphi) \cdot dA + \int_V S_\varphi dV \quad (29)$$

Ve son olarak bu denklemi kontrol hacmi,  $V_P$  ve sınır yüzeyleri,  $A_j$  boyunca integre edilmesiyle aşağıdaki denklem elde edilir.

$$\left( \frac{\partial \rho \varphi}{\partial t} \right)_P V_P + \sum_{j=1}^n (\rho v \varphi)_j \cdot A_j = \sum_{j=1}^n (\Gamma \nabla \varphi)_j \cdot A_j + S_\varphi V_P \quad (30)$$

Burada,  $n$  toplam hücre yüzey sayısını ve indis,  $j$  değişkenlerin karşılık gelen yüzey değerlerini ifade etmektedir. Genel transport denkleminin kısmi ayrıklaştırılmış halinden, konvektif ve difüzyon akıların hesaplanması için, değişkenlerin yüzey değerlerinin ve gradyanlarının hücre merkezi değerlerinden elde edilmesi gerektiği görülebilir.



#### 4.1.1. Uzaysal Ayırıklaştırma

Denklem (30)'da görüldüğü gibi, konvektif terimin sonlu hacimler metoduna göre ayırıklaştırılmış hali aşağıda gösterilmiştir.

$$\int_A (\rho v \varphi) \cdot dA \approx \sum_{j=1}^n (\rho v \varphi)_j \cdot A_j \quad (31)$$

Bağımlı değişkenlerin hücre yüzeyi merkezinde değerlerini tahmin etmek için, sınırlandırılmış ve doğru bir ayırıklaştırma şemasına gerek vardır. Yoğun kullanılan birinci dereceden doğrulukta UDS (First Order Upwind Differencing Scheme) şeması sınırlandırılma kriterini sağlar fakat yüksek miktarda sayısal difüzyona neden olur. CDS (Central Differencing Scheme) ikinci dereceden doğruluğa sahiptir ve birinci derece UDS'den daha kesin sonuçlar verir fakat şema sınırlandırılmamış sonuçlara neden olur ve momentum denklemlerinde beklenmedik hız alanına yol açar. Bu problemin üstesinden gelmek için literatürde UDS ve CDS arasında bir karma faktörü kullanan, çözümde hem sınırlandırılma hem de doğruluk kriterlerini sağlamaya çalışan birçok karma ayırıklaştırma şeması önerilmiştir.

Bu çalışmada ikinci dereceden doğrulukta UDS şeması kullanılmıştır. Bu yaklaşımda yüksek seviyede doğruluk, hücre merkezinde Taylor serisi açılımı yaklaşımıyla elde edilir. Yüzey değeri,  $\varphi_j$  aşağıda gösterildiği gibi hesaplanır.

$$\varphi_j = \varphi_P + \psi \nabla \varphi_P \cdot \overline{r_{PN}} \quad (32)$$

Burada,  $\psi$  Barth and Jespersen'nin [79] çalışmalarına dayanan diferansiyel olmayan tipte gradyan sınırlayıcıdır ve parazit dalgalanmaları (spurious oscillation) önlemek için kullanılır. Her alan değişkeninin,  $\varphi$  gradyanını hücre merkezinde hesaplamak için, çözümün doğrusal değiştiği varsayılmıştır.

$$\nabla \varphi_P \cdot \overline{r_{PN}} = \varphi_N - \varphi_P \quad (33)$$

Eğer benzer eşitlikler hücreyle,  $P$  komşu yüzeyi olan bütün hücreler için yazılırsa aşağıda gösterilen sistem elde edilir.

$$[J]\nabla\varphi_P = \Delta\varphi \quad (34)$$

Burada  $J$  katsayı matrisini gösterir ve tamamen geometrinin bir fonksiyonudur.

Bu kare olmayan katsayı matrisinin en aza indirme problemini, en küçük kareler metodu ile çözümüyle, hücre merkezi gradyanları eksplisit yolla elde edilebilir. Yukarıdaki doğrusal denklem sistemi artık belirtilmiştir (overdetermined) ve Gram-Schmidt [80] işlemi ile katsayı matrisinin ayrıştırılmasıyla çözülmüştür. Bu ayrıştırma yöntemi ağırlıklar matrisi oluşturur ve hücre merkezli şemada ağırlıkların üç bileşeni hesaplama hücresinin,  $P$  her bir yüzeyi için elde edilir. ( $W^x_j, W^y_j, W^z_j$ )

$$\begin{aligned} \nabla\varphi^x_P &= \sum_{j=1}^n W^x_j(\Delta\varphi) \\ \nabla\varphi^y_P &= \sum_{j=1}^n W^y_j(\Delta\varphi) \\ \nabla\varphi^z_P &= \sum_{j=1}^n W^z_j(\Delta\varphi) \end{aligned} \quad (35)$$

Burada  $W^x_j, W^y_j, W^z_j$  uzaysal koordinatlarda yüzey  $j$ . için ağırlıkları gösterir.

Difüsif terimin sonlu hacimler yöntemine göre ayrıklaştırılması, denklem (30)'da da gösterildiği gibi aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$\int_A (\Gamma\nabla\varphi) \cdot dA = \sum_{j=1}^n (\Gamma\nabla\varphi)_j \cdot A_j \quad (36)$$

Difüsif terimin ayrıklaştırılması için doğrusal enterpolasyon veya CDS aşağıda gösterildiği gibi uygulanmıştır.

$$(\nabla \varphi)_j = \zeta_P (\nabla \varphi)_P + (1 - \zeta_P) (\nabla \varphi)_N \quad (37)$$

Burada  $\zeta_P$  enterpolasyon faktörüdür ve aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$\zeta_P = \frac{|AN|}{|PN|} \quad (38)$$

Hücre merkezindeki gradyanlar denklem (33)-(35)'de gösterildiği gibi elde edilir.

#### 4.1.2. Zamansal Ayrıklaştırma

Zamanla değişen akışların hesaplanmasında, zaman uzaysal koordinatlardaki gibi ayrıklaştırılmalıdır. Zamanla uzay arasındaki temel fark etki yönüdür. Hesaplama alanını herhangi bir noktada etki eden kuvvet, hesaplama alanında her noktayı (eliptik problemler) etkileyebilir. Fakat belirli bir zamanda etki eden kuvvet akışı ileriki zamanlarda etkileyecektir yani zamanda geriye dönük etki yoktur. Başka bir deyişle tüm çözüm metotları zaman da adım adım ilerler (marching problem).

Eksplisit metotların programlaması kolaydır, daha az bilgisayar hafızası gerektirir ve iterasyon başına daha az hesaplama zamanı kullanır fakat eksplisit metotların kararlılığı zaman adımına bağlıdır. Diğer taraftan implisit metotlar yeni zaman adımındaki değerlerin elde edilmesi için iteratif çözüm gerektirir. Bu implisit metotların programlanmasını zorlaştırır, daha fazla bilgisayar hafızası kullanmasına neden olur ve iterasyon başına düşen hesaplama zamanını artırır. Fakat implisit metotlar kendilerinin eşleniği eksplisit metotlardan çok daha kararlıdır. Diğer bir metot grubu ise eksplisit ve implisit metotları birleştiren öngörme-düzeltilme metotlarıdır (predictor corrector methods). Ferziger ve Perić [81] farklı zaman adımı yöntemleri ilgili detaylı bilgi vermiştir.

Bu sayısal çalışmada, zaman adımı büyüklüğüne karşı koşulsuz kararlılığından ve kendi içerisinde tutarlılığından (roboustness) dolayı birinci dereceden Euler implisit metodu kullanılmıştır.

$$\varphi^{t+\delta t} = \varphi^t + Q(\varphi^{t+\delta t})\delta t \quad (39)$$

Burada  $Q$  herhangi bir uzaysal ayrıklaştırılmayı ifade etmektedir. İmplicit metotlarda, yukarıda ayrıklaştırılmış denklemin sağ tarafındaki, çözümün henüz bilinmediği yeni zaman adımındaki değerler gereklidir. Dolayısıyla zamanda ilerleyebilmek için bir iteratif prosedür uygulanır.

#### 4.2. AKIŞ ÖNÜ İZLEME

Bölüm 3.2’de belirtildiği gibi, hareketli arayüzeyin izlenmesinde bir hacim fraksiyonu denklemi kullanılmıştır. Her bir zaman adımında hız alanı hesaplandıktan sonra, bu adveksiyon denklemi arayüzeyin yeni konumunu belirlemek için elde edilen hız alanı için çözülür. Hacim fraksiyonu denklemi arayüzeyde süresiz hiperbolik bir denklemdir. Sonuç olarak, bu adveksiyon denkleminin arayüzeyin keskinliğini korumak için minimum difüzyonla çözümünde özen gereklidir.

Süreklilik denkleminin hacim fraksiyonu denklemine ilişirtmesiyle:

$$\frac{\partial(f\rho)}{\partial t} + \nabla \cdot (f\rho u) = 0 \quad (40)$$

Hacim fraksiyonu adveksiyon denkleminin sonlu hacimler metoduna göre ayrıklaştırılması, denklem (40)’ın her bir hücrede ve zaman aralığı,  $\delta t$  için integral formuna dayalıdır. Zamanda ayrıklaştırma için birinci dereceden doğruluğa sahip eksplisit Euler metodu kullanılırsa:

$$\frac{[(f\rho)_P^{t+\delta t} - (f\rho)_P^t]V_P}{\delta t} = -\sum_{j=1}^n (f_j F_j)^t \quad (41)$$

$F_j$  yüzeye dik hız bileşenine dayalı kütle akısıdır ve aşağıdaki gibi gösterilmiştir.

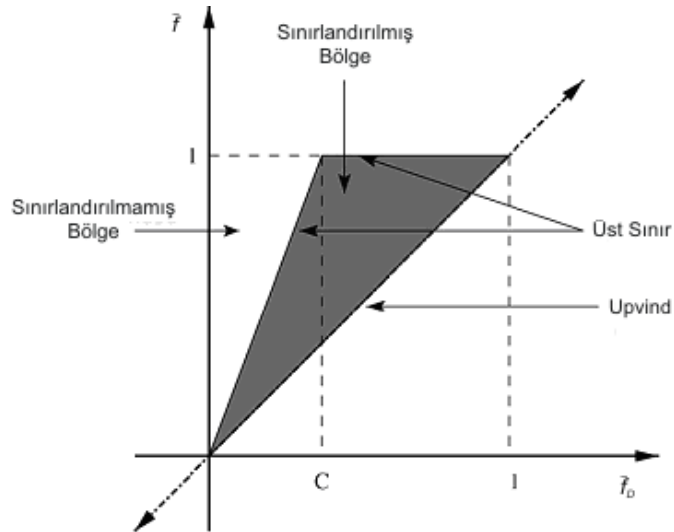
$$F_j = A_j u_j \rho_j \quad (42)$$

Hacim fraksiyonunun yüzey değerlerinin yaklaşımında klasik enterpolasyon şemalarının kullanılması çok fazla nümerik difüzyona neden olur ve keskin bir arayüzey elde etmeyi engeller. Literatürde nümerik difüzyonu azaltan birçok fark şeması (diffrence scheme) önerilmiştir. Bu çalışmada Ubbink'in [30] CICSAM kullanılmıştır. CICSAM, hacimsel akışların yüzey değerlerinin yaklaşımında sınırlandırma koşulunu sağlamak için Leonard'ın [55] NVD diyagramını kullanan donör-akseptör formülasyonuna dayalı yüksek çözünürlüklü bir fark şemasıdır. Şema iki yüksek çözünürlüklü fark şeması olan CBC ve UQ arasında gidip gelerek arayüzeyin keskinliğini sağlar. CICSAM'ın kısa açıklaması aşağıda verilmiştir.

$f$ 'nin normalleştirilmiş değişkeni aşağıdaki tanımlanmıştır.

$$\tilde{f} = \frac{f - f_U}{f_A - f_U} \quad (43)$$

$U$ ,  $A$  ve  $D$  altsimgeleri sırasıyla upvind, akseptör ve donvind hücreleri ifade etmektedir.



Şekil 4.2. Eksplisit hesaplamalar için CBC

Sol üst üçgen içerisine düşen herhangi bir şema sınırlı değildir. Üst sınıra yakın herhangi bir şema daha sıkıştırıcı (compressive) ve UD şemasına yakın herhangi bir şema ise daha difüsitir. Şekil 4.2’de gösterilen NVD diyagramı kullanılan bir fark şemasını uygulamadan sınırlılık ve sıkıştırıcılık derecesini göstermede kullanılabilir. Aynı zamanda Şekil 4.2 Courant sayısı artığında sınırlı alanın yok olduğunu ve Courant sayısının birden büyük olduğunda eksplisit yaklaşımda bütün fark şemalarının sınırlı olmadığını göstermektedir.

Leonard [55] Hyper-C olarak bilinen ve eksplisit hesaplamalarda CBC’nin üst sınırını izleyen bir fark şeması önermiştir. Hyper-C için normalleştirilmiş yüzey değerleri aşağıdaki gibi tanımlıdır.

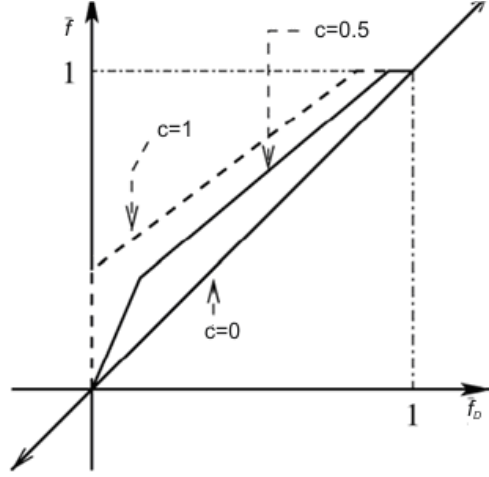
$$\tilde{f} = \begin{cases} \min(1, \frac{\tilde{f}_D}{c}) & 0 \leq \tilde{f}_D \leq 1 \\ \tilde{f}_D & \tilde{f}_D < 0 \text{ or } \tilde{f}_D > 1 \end{cases} \quad (44)$$

Burada  $c$ , yüzey,  $j$ ’deki Courant sayısını gösterir ve aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

$$c = \left| \frac{u_j \delta t}{\delta x} \right| \quad (45)$$

Hyper-C en sıkıştırıcı fark şemasıdır çünkü bütün gradyanlara keskin adımlarla yaklaşır fakat arayüzeyin yönelimi akışa dik olduğunda kullanımı uygun değildir. Bu problemi çözmek için Hirt ve Nichols’un [49] VOF metodunda arayüzeyin açısı belirlenir ve eğer arayüzeyle hücre yüzeyi arasındaki açı  $45^\circ$  fazla ise UD’ye atlanır. Gappola’nın [82] yaptığı nümerik deneyler arayüzeyin daha iyi belirlenmesi için standart VOF’ un dışında yüksek çözünürlüklü fark şemasına ihtiyaç olduğunu göstermiştir.

CICSAM, CBC'nin yetersiz olduğu durumlarda hesaplamaya Leonard'ın [81] önerdiği ve QUICK fark şemasının bir boyutlu, sınırlı, eksplisit hali olan UQ ile hesaplamaya devam eder.



Şekil 4.3. UQ için sınırlar

UQ'nin matematiksel formülü aşağıda gösterilmiştir.

$$\tilde{f}_{UQ} = \begin{cases} \min(8c\tilde{f}_D + (1-c)(6\tilde{f}_D + 3), \tilde{f}_{CBC}) & 0 \leq \tilde{f}_D \leq 1 \\ \tilde{f}_D & \tilde{f}_D < 0 \text{ or } \tilde{f}_D > 1 \end{cases} \quad (46)$$

UQ da yüksek çözünürlüklü bir fark şemasıdır fakat hala hareketli arayüzeyler için fazla difüsitir. CICSAM bu iki metot arasında aşağıda da gösterildiği gibi bir ağırlık oranı kullanır.

$$\tilde{f} = \gamma_j \tilde{f}_{CBC} + (1 - \gamma_j) \tilde{f}_{UQ} \quad \text{where} \quad 0 \leq \gamma_j \leq 1 \quad (47)$$

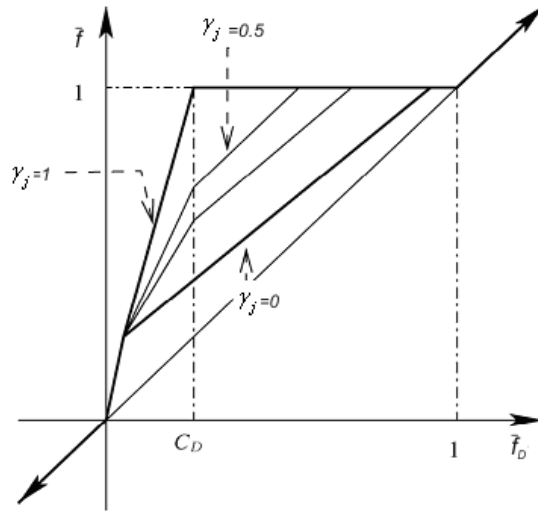
Burada  $\gamma_j$  arayüzeyin normal vektörü,  $(Af)_D$  ve donör ve akseptör hücreleri birleştiren vektör,  $d_j$  arasındaki açının,  $\theta_j$  kosinüsüne dayalı hesaplanan bir ölçekleme faktörüdür. Açının denklemi aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\theta_j = \arccos \left| \frac{(\nabla f)_D \cdot d_j}{\|(\nabla f)_D\| \cdot \|d_j\|} \right| \quad (48)$$

Ve ölçeklendirme faktörü aşağıda gösterilmiştir.

$$\gamma_j = \min \left\{ \frac{\cos(2\theta_j) + 1}{2}, 1 \right\} \quad (49)$$

Şekil 4.4 CICSAM şeması için NVD'yi göstermektedir. Arayüzeyin yönelimi akışa dik doğrultu olduğunda,  $\gamma_j=1$  kullanılırken yönelim teğetsel olduğunda  $\gamma_j=0$  kullanılır. Bu şemanın çok boyutlu sistemlere uygulanmasında hacim fraksiyonunun yüzey değerleri hesaplanırken fiziksel olmayan sonuçlar elde edilebilir. Ubbink [30] bu problemi önlemek için detaylı bir öngörme-düzeltilme prosedürü önermiştir.



Şekil 4.4. CICSAM şeması için NVD



### 4.3. ÇÖZÜM YÖNTEMİ

İki akışkanlı sistemler için hareket denklemleri birbiriyle sıkı şekilde bağlıdır ve bu denklemleri çözenin ideal yolu tüm hesaplama alanında eş zamanlı çözmektir. Fakat bu birleşik (coupled) prosedür yüksek miktarda hesaplama gücü gerektirir çünkü diğer denklemler çözülürken ayrıklaştırılmış sistem denklemleri hafızada tutulur. Hareket denklemlerinin çözümü için diğer bir yaklaşım da farklı denklemlerin sıralı olarak çözüldüğü ayrılmış (segregated) yaklaşımdır. Çözümün bir sonuca yakınsaması için momentum ve süreklilik denklemleri ilişkilendirilmelidir. Bu çalışmada kullanılan Issa [83]'nin PISO hız basınç birleştirme algoritması iteratif olmayan sıkıştırılabilir akışlar için geliştirilmiştir. PISO algoritması bir öngörme basamağı ve iki düzeltme basamağı içerir ve SIMPLE algoritmasının fazladan yapılan bir düzeltme basamağı ile geliştirilmiş versiyonu olarak görülebilir.

#### 4.3.1. Doğrusallaştırılmış Denklemlerin Çözümü ve Parallelleştirme

Ayrıklaştırılmış skalar transport denklemi hücre merkezinde ve komşu hücre merkezlerinde bilinmeyen skalar,  $\phi$  içerir. Denklem (30)'daki tüm terimlerin toplamı aşağıda gösterilen lineer olmayan cebirsel denklemi verir.

$$a_P \phi + \sum_n a_n \phi_n = b_P \quad (50)$$

$a_n$  hesaplama noktası  $P$  ile karşılık gelen komşu hücrelerin ortak yüzeyleri üzerindeki yüzey integralinin katkısını,  $a_P$  zamana bağlı terimler ve olası hacim integralini ve kaynak terim,  $b_P$  basınç gradyanı, standart difüzyon terimi içinde bulunmayan stres tansörü bileşenlerini ve ayrıca gecikmiş düzeltme şemasının eksplisit parçasını içerir [19].

Sunulan nümerik kod tek program çoklu-data (single-program multiple-data programming ) programlama modeli kullanılarak paralelleştirildi. METIS [84] yüksek kalitede ayrıştırma yeteneğinden dolayı hesaplama alanını, paralel yapı içerisinde hesaplama noktalarına dağıtmak için alt alanlara ayrıştırmada kullanıldı.

Her hesaplama noktası aynı programı çalıştırır ve akış alanı değişkenleri ve onların gradyanları data değişim elemanlarıyla MPI (Message-Passing Interface) kullanarak problemin sadece kendi parçasında çalışırlar. Bütün akış alanı değişkenleri ve onların gradyanları hesaplama noktalarına gönderildikten sonra, standart MPI rutinleri kullanılarak karşılık gelen işlemde mesajlar alınır. BiCGStab algoritması Block-ILU (Block Incomplete Lower-Upper) önkoşullayıcıyla birlikte lineer hale getirilmiş transport denklemlerini çözmekte kullanıldı. ILU (Incomplete Lower-Upper ) ön koşullayıcı yakınsamayı hızlandırmak için sık kullanılır fakat sıralı yapısından dolayı paralel işlemcilerde kullanılması zordur. Block-ILU matrisi bloklara ayırır ve her bir bloğu bir işlemciye gönderir dolayısıyla işlemciler arasında senkronizasyona ihtiyaç duymaz ve potansiyel olarak paralel işlemlerde verimlidir.

## 5. BULGULAR ve TARTIŞMA

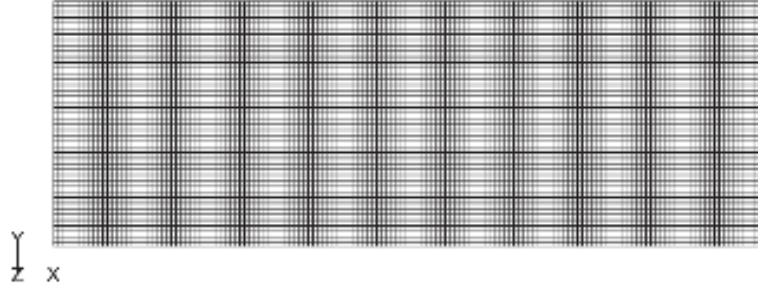
Önceki bölümlerde plastik enjeksiyon işleminin dolma aşaması için bir hesaplamalı akışkanlar dinamiği metodolojisi açıklanmıştı. Bu bölümde ise, yöntem basit geometri ve yapısal ağ konfigürasyonundan başlayarak kompleks geometri ve yapısal olmayan ağdan oluşan sisteme kadar beş farklı örnek için uygulanmıştır. İlk analizde, sayısal kod 2-B, sıkıştırılamaz, izotermal, Newtonyan akışlar için deneysel çalışma ile karşılaştırılarak doğrulanmıştır. İkinci analizde nümerik kodun yetenekleri, jet oluşumu tahmininde denenmiştir. Üçüncü analizde ise tek boşluklu bir kalıp için basit şekilli bir geometride, insert enjeksiyon işlemine geometrik etkenlerin ve proses koşulların etkileri incelenmiştir. Dördüncü analizde ise belirtilen yöntem oldukça kompleks yapıya sahip insert metalli bir boru ek parçasına uygulanmıştır. Beşinci ve son analizde sekiz boşluklu ve gerçek kalıplama koşullarında, nümerik kodun kompleks geometrilerdeki yetenekleri sınamıştır.

Geometri ve hesaplama ağının oluşturmak için ticari bir ön işlemci olan Gambit [92] kullanılmıştır. Sonlu hacimler yöntemine göre ayrıklaştırma yine ticari bir program olan Fluent [93] ile yapılmıştır. Fakat programın standart fonksiyonları, Bölüm 3 ve 4 de açıklanan model denklemleri, ayrıklaştırma yöntemlerini ve malzeme modelleri için yetersiz olduğu için, C programlama dilinde hazırlanan makrolar ana çatıya (mainframe) başarı ile eklenmiştir

Arayüzeyin gösterilmesinde birçok yöntem vardır. Bazı araştırmacılar arayüzeyin gösterilmesinde hacim fraksiyonu için,  $f=1$  ile  $f=0$  arasındaki tüm değerleri göstermektedir. Bu çeşit sunumda, farklı yöntemler arasında nicel karşılaştırma yapmayı zorlaştırır fakat gösterim arayüzeyin dağılımı hakkında çok geniş bilgi verir. Hacim değeri için,  $f=0.5$  kullanımı nicel karşılaştırmaları kolaylaştırır. Bu çalışmada tüm hacim fraksiyonu gösterimleri için  $f=0.5$  nicel karşılaştırmalardaki etkinliğinden dolayı kullanılmıştır.

## 5.1. ANALİZ 1: FOUNTAIN AKIŞ

Sunulan nümerik çalışmanın doğruluğu ilk olarak enjeksiyon işleminde karşılaşılan ve parçanın mikro yapısı üzerinde önemli etkileri olan fountain akış veya fiskiye akış olarak adlandırılan durumun modellenmesinde gösterildi. Nümerik test durumu Chang ve ark. [21]'in çalışmalarına benzer şekilde paralel iki plaka arasında dikdörtgensel bir bölgeyle sınırlandırılmış 2-B sayısal ağda izotermal akış koşulları için sabit materyal özelliklerine sahip hava ve polimer eriyiği için uygulanmıştır

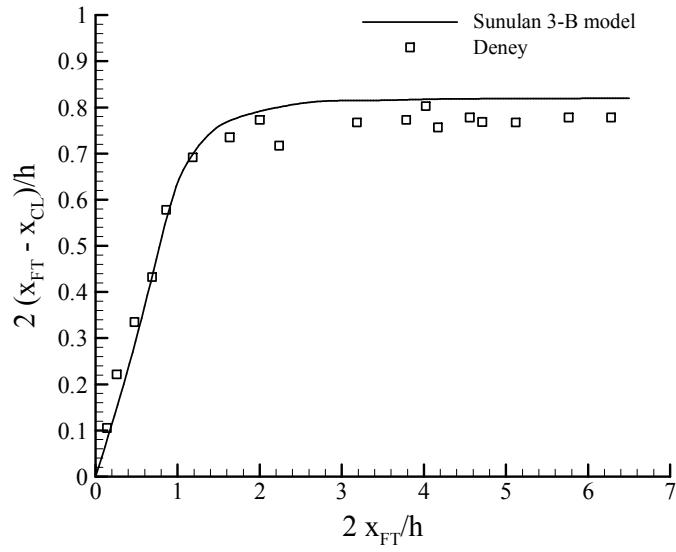
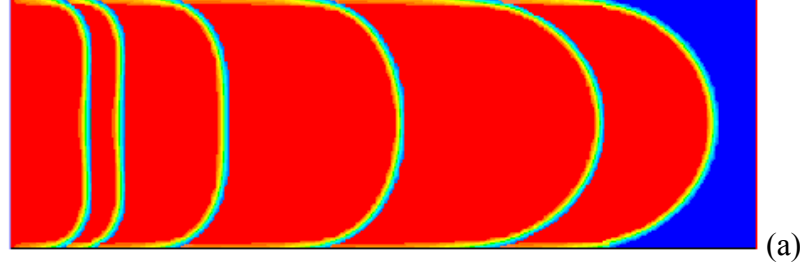


Şekil 5.1. Analiz 1 için dikdörtgensel sayısal bölge

Şekil 5.1 de görüldüğü gibi geometri 5 mm en , 15 mm uzunluk ve 75x225 eşit aralıklı yapısal ağdan oluşmuştur. Bu durum için hava ve polimer eriyiğinin materyal özellikleri  $\rho_{hava} = 1.23 \times 10^{-3} \text{ g cm}^{-3}$ ,  $\mu_{hava} = 1.0 \text{ g cm}^{-1}$ ,  $\rho_{eriyik} = 1 \text{ g cm}^{-3}$ ,  $\mu_{eriyik} = 2000.0 \text{ g cm}^{-1}$  olarak verilmiştir. Çözümün yakınsamasını hızlandırmak için ve polimer akış üzerine etkisinin çok fazla olmaması nedeniyle havanın viskozitesi artırılmıştır.

Şekil 5.2 (a) hacim fraksiyonunun renklendirilmiş kontör grafiğini göstermektedir. Şekil tavsiye edilen nümerik modelin uygun bir şekilde nümerik difüzyonu kontrol ettiğini ve birkaç sayısal hücre içerisinde arayüzeyi yakaladığını göstermektedir. Şekil 5.2 (b) de görüldüğü gibi, 3-B nümerik yöntem tahmin edilen polimer-hava arayüzey konumları bakımından, Behrens [86] tarafından elde edilen deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Şekil sunulan üç boyutlu modelin, akış önünün pozisyonunu, deneysel verilerle iyi bir uyum içinde tahmin ettiğini ve modelin daha fazla durum için güvenle kullanılabileceğini açıkça göstermiştir. Şekil 5.2(b)'de ki

parametreler  $x_{FT}$  akış önu profilindeki en uç noktanın konumunu,  $x_{CL}$  temas çizgisinin konumunu ve  $h$  paralel plakalar arasındaki mesafeyi göstermektedir.



Şekil 5.2. Polimer eriyik akışın dikdörtgenel alan içerisinde gelişimi ve akış önu profilinin deneysel verilerle karşılaştırılması

## 5.2. ANALİZ 2: JET TAHMİNİ

Eğer kalıp boşluğu ve yolluk geçidi arasındaki geçişte temel kayma akışı (basic shear flow) kurulmamışsa kalıp boşluğuna doğru akış jet halini alır ve eriyik basınçla sürülen akış için şartlar hazır olmadan önce kalıp duvarına çarpar [87]. Jet yüzeyinde sürtünme kuvveti ve iç kayma gerilimi olmadığından, jet ilerlemeye devam eder. Basınçla sürülen akış, yolluk geçidinde kurulduktan sonra, eriyik jet materyali tümüyle kaplar. Fakat çevre materyallerle beraber karışma işlemi tam oluşmaz ve fiziksel olarak bozuk, zayıf bağlar oluşur. Jet, yüksek kütleli akış hızı, düşük eriyik direnci, yolluk geçidi boyutu ve konumu gibi uygunsuz geometri ve

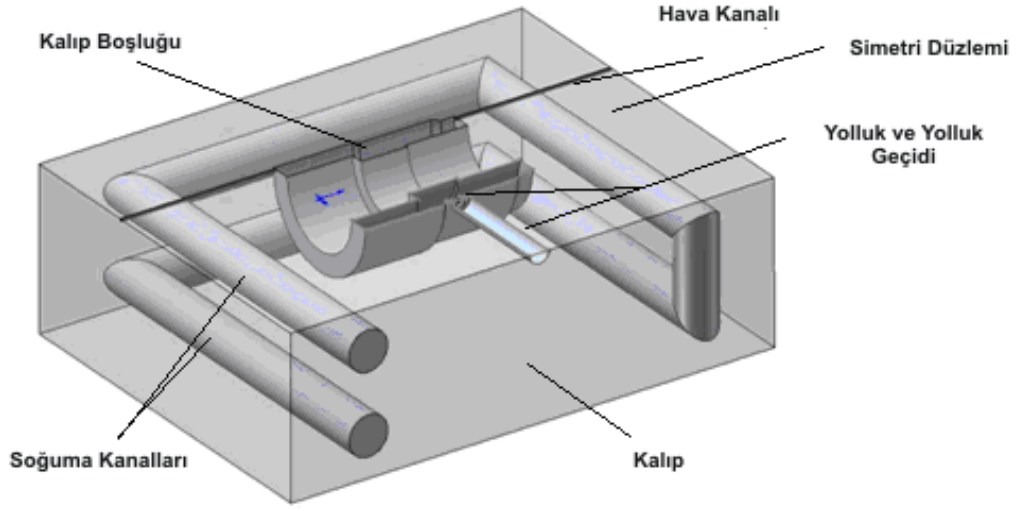
yanlış tasarlanan proses koşullarının kombinasyonundan doğmaktadır [88]. Bu yüzden, akışı optimize amaçlı gerekli değişimleri saptamak için plastik enjeksiyon işleminin başında jet oluşup oluşmayacağını doğru tahmin edebilmek çok önemlidir. Jet oluşumu bir kere iyi tahmin edilince, farklı geometrik ölçüler ve/veya konumlar, farklı proses koşulları altında başarılı bir enjeksiyon gerçekleştirmek adına optimum bir yolluk geçidi dizaynı için kullanılabilir. Bir nümerik kodun, jet tahmini yetenekleri bu kodun genel amaçlı kullanımı için çok önemli bir yer tutmaktadır.

Bu analizde nümerik çalışmalar, farklı yolluk geçidi boyutları ve hesaplama ağı konfigürasyonlarında jet oluşumu tahminlerini yapabilmek için gerçekleştirilmiştir. Jet oluşumu yolluk geçidi boyutuna bağlı olduğundan, jet oluşumunu tahmin etmede sunulan nümerik modelin kapasitesini doğrulamak için iki farklı yolluk geçidi boyutu kullanılmıştır. Ayrıca hazırdaki sonuçlar üzerinden ağ yoğunluğunun etkisini araştırmak için iki farklı ağ konfigürasyonu kullanılmıştır. Çizelge 5.1 hesaplamalar için kullanılan geçit boyutunu ve ağ çözünürlüğünü özetlemektedir.

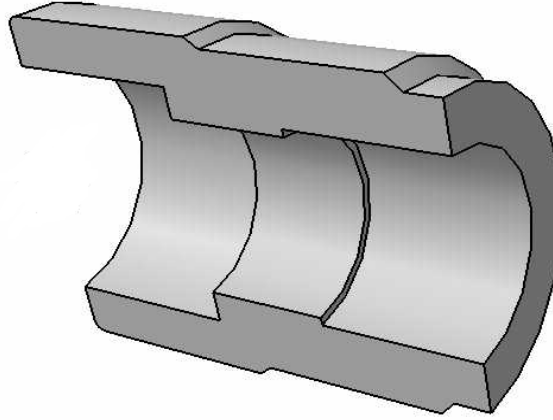
Çizelge 5.1. Simülasyonlarda kullanılan yolluk geçidi ölçüleri ve çokyüzlü uzaysal ağ yoğunlukları

Durum No	Yolluk Geçidi (mm)	Uzaysal Ağ (Hücre Sayısı)
1	0.625	631,000
2	0.625	460,000
3	0.75	631,000
4	0.75	460,000

Şekil 5.3 plastik enjeksiyon prosesinde kullanılan ve geliştirilmiş nümerik model kullanılarak modellenen polipropilen (PPR) boru ek parçası için hazırlanmış geometriyi göstermektedir. Şekil 5.3'deki geometri simetri düzlemi kesitinde, soğuma kanalı, kalıp boşluğu, maça parçası, hava kanalı, yolluk ve yolluk geçidini göstermektedir. Şekil 5.4 ise önerilen nümerik yöntem kullanılarak analizi yapılan plastik ek parça geometrisinin kesit görüntüsünü göstermektedir.



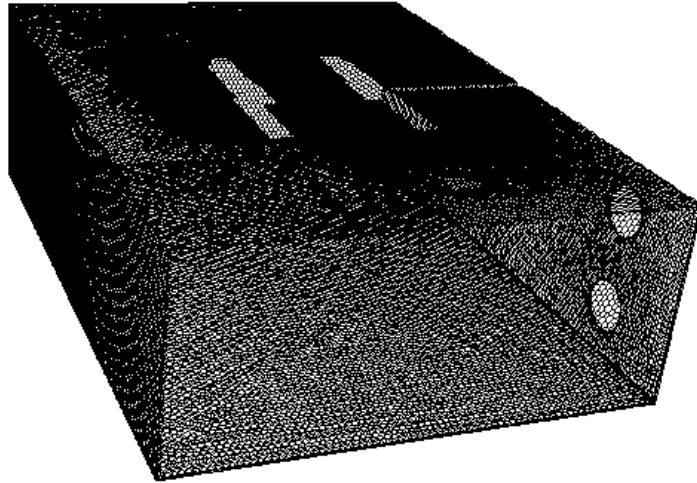
Şekil 5.3. Jet tahmini analizlerinde kullanılan 3-B geometri



Şekil 5.4. Dolma aşaması analizi kullanılan PP boru ek parçası geometrisinin kesit görüntüsü

Kalıp boşluğu yüzeyleri için yüksek çözünürlükte üçgensel, yapısal olmayan ağ hücreleri kullanıldı. Daha sonra 3-B hesaplama alanının oluşumunda bu üçgensel sınır elemanlarından başlayarak dört yüzlü elemanlar kullanıldı. Hücrelerin çarpıklığı (skewness), doğruluk ve nümerik prosedürün yakınsama karakteristiklerinde öncelikli öneme sahip olduğundan, sayısal alan çokyüzlü (polyhedral) hücrelerden oluşan bir ağ sistemine çevrildi ve Cutchill-McKee metodu kullanılarak yeniden düzenlendi. Simetri düzleminde oluşturulan 2-B yüzeysel ağ ve kalıp boşluğu için oluşturulan 3-B sayısal alan sırasıyla Şekil 5.5 ve 5.6'da gösterilmiştir.

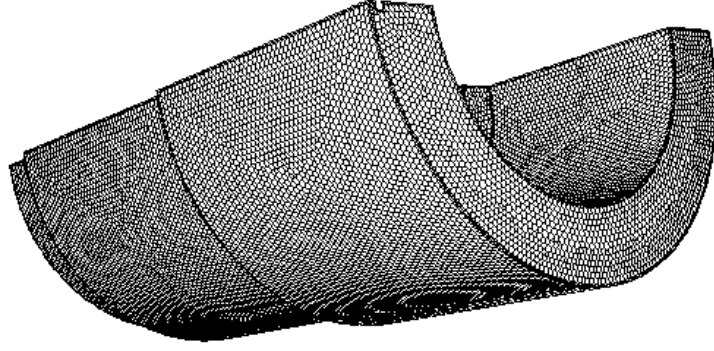
Şekil 5.5. Simetri düzleminde oluşturulan çokyüzlü uzaysal ağ



Şekil 5.6. Analizlerde kullanılan 3-B kalıp boşluğu için oluşturulan uzaysal ağ

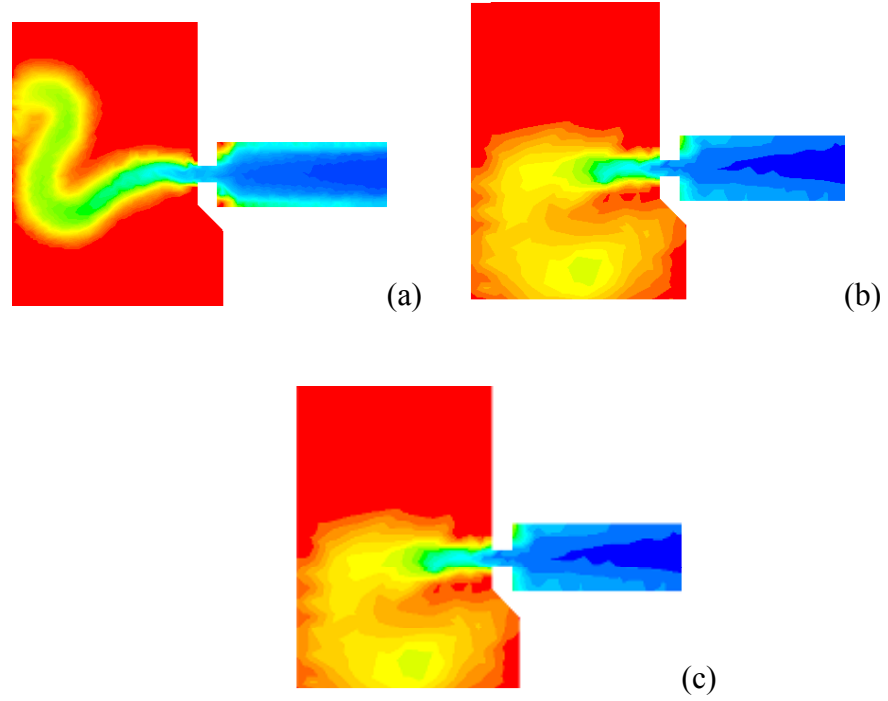
Figür 5.5 ve 5.6’da görüldüğü gibi sayısal alan aralıkları düzgün olmayan yapısal olmayan çokyüzlü hesaplama hücreleri içerir. Kalıp boşluğunda çok yüksek çözünürlükte bir ağ yapısı kullanılmış bu ağ yapısı yüksek çözünürlükte yüzey ağından geometrik bir fonksiyon ile kalıp içerisine dışarıya doğru azaltılmıştır. Şekil 7 ayrıca kalıp boşluğu duvarlarındaki yüksek çözünürlüklü yüzeysel ağ yapısını göstermektedir.





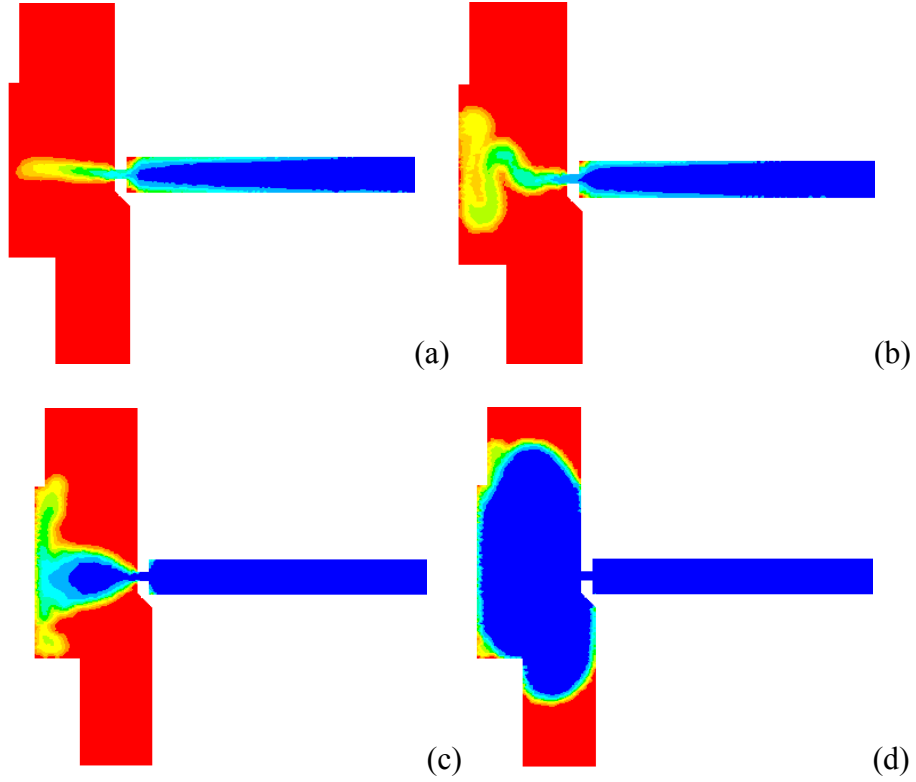
Şekil 5.7. Kalıp boşluğu için oluşturulan 3-B yüzeysel ağ

Şekil 5.8 (a)-(c) farklı ağ çözünürlüklerinde ve yolluk geçidi boyutlarında akış önünün gelişimini göstermektedir. Şekil 5.8’de görüldüğü gibi yolluk geçidi boyutu ve ağ yoğunluğu jet oluşumunda ve tahmininde, buna bağlı olarak akış önünün gelişiminde çok etkilidir. Yolluk geçidi boyutu 0.625 mm ve ağ yoğunluğu 631,000 çokyüzlü hücre olan model başarılı bir şekilde, literatüründe bildirilen bu uzunluk ve çap oranında (yolluk uzunluğu/ yolluk geçidi çapı) jet oluşumunu gösterebilmektedir. Ayrıca sonuçların sadece geçit boyutunun değil aynı zamanda uygun ağ çözünürlüğünün de jet tahmininde önemli bir faktör olduğunu gösterir. 0.625 mm geçit boyutlu ve 460,000 çokyüzlü ağ hücreli olan konfigürasyon jet tahmininde yetersiz olurken, Şekil 5.8 (b)’de görüldüğü gibi düşük ağ çözünürlüğünden dolayı istenmeyen akış gelişimi sergiler. Basınçla sürülen akış koşullarının oluştuğu daha büyük yolluk girişi ölçülerinde, Şekil 5.8 (c)’de görüldüğü üzere jet oluşmadan akış gelişmektedir.



Şekil 5.8. Simetri düzlemi üzerinde 0.005s'de anlık akış önü profilleri  
a) Durum 1b) Durum 2; c) Durum 3

Şekil 5.9 (a)-(d) dolum aşamasının başlangıç bölümlerinde, kalıp boşluğu içerisindeki akış önü gelişimini göstermektedir. Sunulan 3-B nümerik model, akış önü gelişiminde jet oluşundan dolayı eğimli bir akış profili tespit etmekte ve nümerik difüzyonu düzgünce kontrol etmektedir. Bundan dolayı da beklenen keskin arayüzü yakalayabilmektedir. Jet oluşumundan sonra, polimer eriyik kalıp duvarlarına çarpar ve ayrılır. Fakat zaman ilerledikçe, akış yeniden birleşir ve basınçla sürülen koşulların oluşmasıyla istenilen akış önü profili oluşur. Ayrıca Şekiller 5.9 (a)-(c) önerilen modelin, akış önündeki ayrılmaları ve yeniden birleşmeleri göstermedeki kabiliyetini de göstermektedir. Akış önü gelişiminin yakın bir analizi yapılacak olursa, akış yolluk geçidinden çıkarken jet oluşur (Şekil 5.9 (a)), basınçla sürülen akış koşulları oluşmadan kalıp duvarına çarpar ve ayrılır (Şekil 5.9 (b)), basınçla sürülen akış koşullarının oluşmasıyla eriyik jet materyali çevreler ve aralarında kaynaşma olur (Şekil 5.9 (c)), karışım materyal kalıbı doldurmak üzere ilerler (Şekil 5.9 (d)).

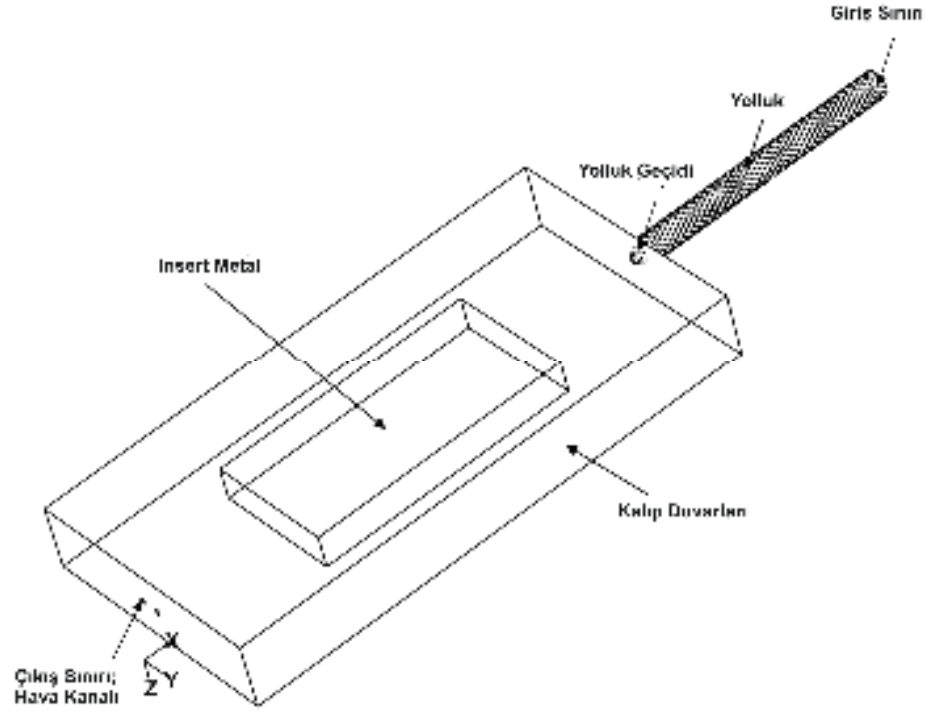


Şekil 5.9. Durum 1 için simetri düzlemi üzerinde 0.05s'lik sürede akış önü gelişimi

### 5.3. ANALİZ 3: GEOMETRİ ve PROSES KOŞULLARININ ETKİSİ

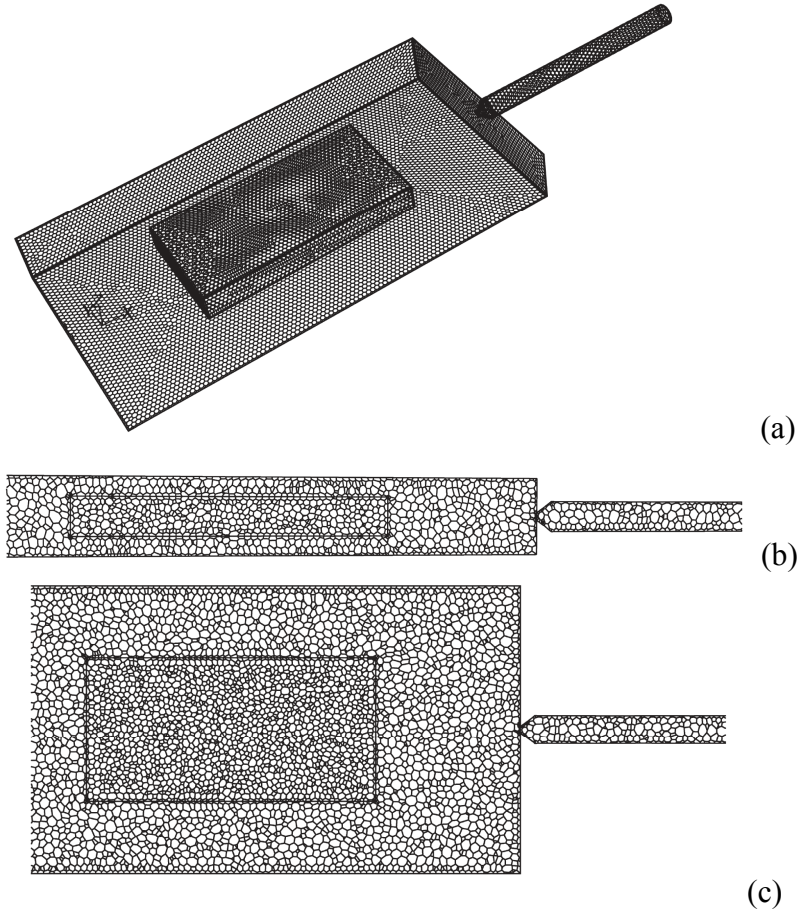
Bu analizde, enjeksiyon işlemindeki dolma aşaması örnek kutu şekilli geometri için farklı uzaysal ağ çözünürlüklerinde, geometrik boyutlarında (yolluk çapı/yolluk geçidi çapı), proses koşulları ve hal değişim etkileri altında incelendi. Durum çalışmasının birinci kısmında geometrik koşulların akış alanına etkisi araştırılırken ikinci kısımda aynı geometride proses koşullarının etkileri incelendi.

Bu zamana bağlı, laminar simülasyonda kullanılan 3-B geometri Şekil 5.10'da görülmektedir. Geometri kalıp duvarları, kalıp boşluğu, maça, insert metal, hava kanalları, yolluk ve yolluk girişinden oluşmaktadır. Kalıp boşluğu 40mm uzunluğunda, 20 mm genişliğinde ve 10 mm kalınlığında iken kalıp boşluğunun tam ortasına yerleştirilen insert ise 20 mm uzunluğunda, 10 mm genişliğinde ve 5 mm genişliğindedir.



Şekil 5.10. Analizlerde kullanılan 3-B kalıp boşluğu ve insert geometrisi

Kalıp boşluğunun 3-B hesaplama alanı ve 2-B dik simetri düzlemi üzerinde hesaplama alanı ve 2-B yatay simetri düzlemi üzerinde hesapla ağı Şekil 5.11 (a)-(c)'de gösterilmektedir. Şekillerde görüldüğü gibi hesaplama alanı düzgün dağılmayan ve yapısal olmayan çok yüzlü elemanlardan oluşan hesaplama ağından oluşmaktadır. Kalıp boşluğu içerisinde çok yüksek çözünürlüklü hesaplama ağı kullanılmıştır. Yoğun duvar sınır ağından başlayarak hesaplama ağı kalıp boşluğu içerisine doğru geometrik fonksiyonlarla genişletilmiştir. Ayrıca Şekil 5.11 (b) ve (c) yatay ve dikey simetri düzlemleri üzerinde, oluşturulan yüksek çözünürlüklü çok yüzlü elemanlardan oluşan hesaplama alanı göstermektedir.



Şekil 5.11. Çok yüzlü elemanlardan oluşan hesaplama alanı

### 5.3.1. Geometrik Koşulların Etkileri

Çizelge 5.2 ve çizelge 5.3’de özetlendiği gibi, insert metalli plastik enjeksiyon işleminin dolma aşaması simülasyonları seçilen proses koşulları altında farklı ağ yoğunluklarında, geometrik koşullarında ve hal değişim koşullarının olup olmaması durumu için yapıldı. 0.5 mm’den 0.75 mm’ye kadar değişen üç farklı yolluk girişi çapı ve 2 mm sabit yolluk çapı, yolluk girişi/yolluk geçidi ( $D_r/D_g$ ) oranının eriyik akışa etkilerini incelemek amacıyla seçildi. Çok yüzlü elemanlardan oluşan iki farklı uzaysal ağ yoğunluğu, ağ yoğunluğunu etkilerini incelemek amacıyla seçilen yolluk geçidi çapı/yolluk çapı oranının 4 olduğu durum için kullanıldı. Katılaşma etkilerini incelemek üzere entalpi-porozite tekniğe dayalı katılaşma modeli durum 5 için kullanıldı.

Çizelge 5.2. Analiz 3’de yapılan 3-B simülasyonlar için geometrik boyutlar ve hesaplama ağ yoğunlukları

Durum No	Çaplar(mm)		Çapların Oranı (Dr/Dg)	Ağ (Hücre Sayısı)	
	Yolluk	Geçit		Dört Yüzlü	Çok Yüzlü
1	2.0	0.5	4	90,000	18,000
2	2.0	0.5	4	257,800	71,560
3	2.0	0.75	2.67	87,000	17,400
4	2.0	1.0	2	87,500	17,500
5	2.0	0.5	4	90,000	18,000

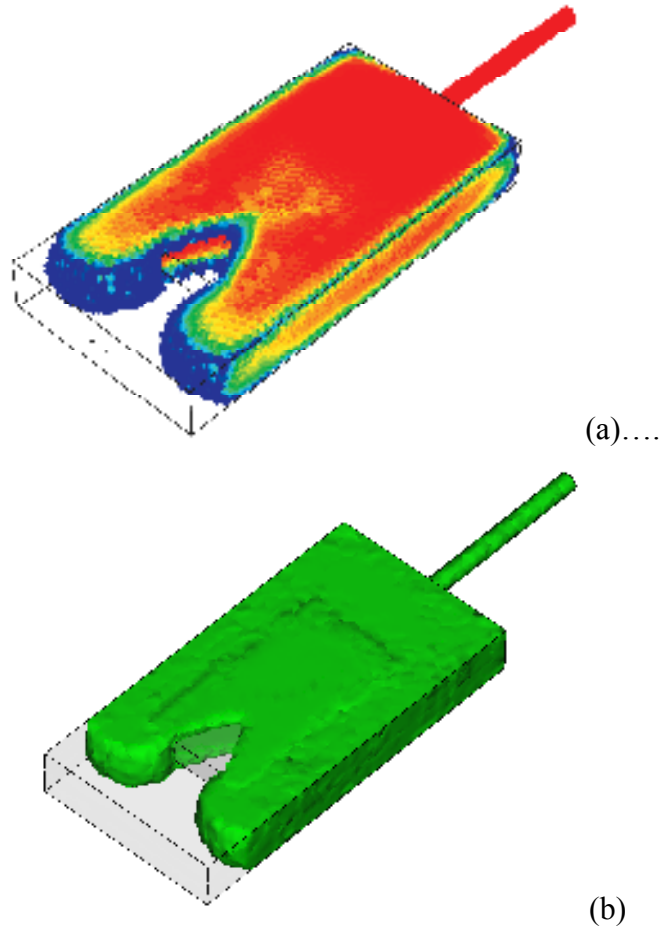
Çizelge 5.3. Analiz 3 için seçilen proses koşulları

Enjeksiyon Sıcaklığı (K)	513
Enjeksiyon Zamanı (s)	1.5
Kalıp Sıcaklığı (K)	313
Enjeksiyon Hızı (kg/s)	0.0015

Sunulan sonuçlar hem nitel hem de nicel olarak birbiriyle ve MPI 3-B [89] ile yapılan simülasyonlarından elde edilen sonuçlarla karşılaştırıldı. Her bir yolluk çapı/yolluk geçidi çapı oranında, benzer uzaysal ağ konfigürasyonunda ve sınır şartları altında aynı geometri için, MPI 3-B analizleri ile sunulan 3-B analizleri direk karşılaştırma yapmak için kullanıldı.

Şekil 5.12 (a) ve (b), dolma aşamasının bitimine doğru, 1.22s’de sunulan 3-B model ve MPI 3-B modeli için sırasıyla anlık hacim fraksiyonu kontörlerini göstermektedir. Şekil 5.12 (a) da görüldüğü gibi, önerilen nümerik metodoloji, akış profilini hem akış yönünde hem de akışa dik yönde tahmin edebilmekte, ayrıca kalıp boşluğunun köşe bölümlerde hava boşluklarının oluşumunu ve dolmanın son aşamasına doğru insert metal arkasında birleşmeden oluşan kaynak çizgilerini başarıyla tahmin edebilmiştir. Sunulan 3-B modelden elde edilen akış yönünde akış önu gelişimi MPI 3-B’den elde edilen sonuçlarla benzerlik göstermektedir ve her iki modelde hem akış yönünde hem de akışa dik yönde özdeş akış önu profilleri üretmiştir. Ayrıca kullanılan arayüz yakalama algoritmasının nümerik difüzyonu

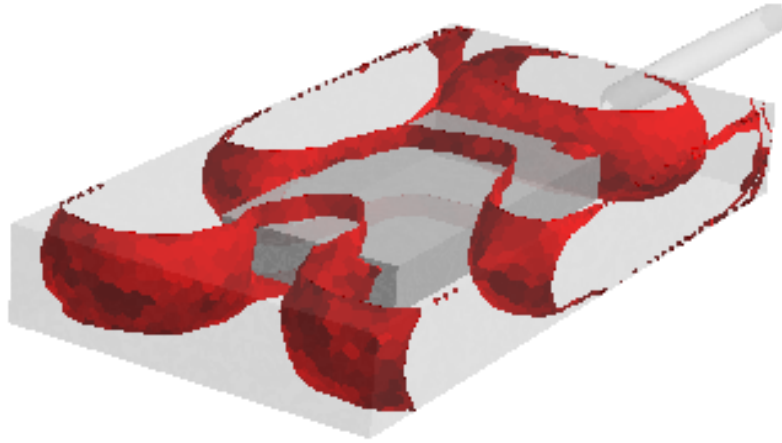
kontrol ettiği ve keskin arayüzey elde edildiği şekilde görülmektedir. Kalınlık yönünde ise, sunulan nümerik yöntemin fountain etkileri akış önünde oluşturduğu açıkça görülmekte ve kalınlık yönünde hız bileşenlerini ihmal eden ve düz akış önü profili oluşturan Hele-Shaw akışların tersine oval şekilde akış önü profili oluşturduğu görülmektedir. Fountain akış yapısı enjeksiyon işleminde akış önünde görülmekte plastik parçaların mikro yapısı bakımından çok önemli bir yer tutmaktadır. Aynı zamanda kaynak çizgilerini ve bunların konumlarının belirlenmesinde ve hava boşluklarının sıcaklık, basınç dağılımların tahmininde de önemli bir yer tutmaktadır.



Şekil 5.12. 3-B anlık hacim fraksiyonu kontörleri; a) Sunulan 3-B model; b) MPI 3-B model

Şekil 5.13 durum 2 de üç farklı zaman için akış gelişimini göstermektedir. Şekil aynı zamanda geliştirilen nümerik modelin insert çevresinde akışın ayrılması ve tekrar birleşmesini başarı ile yakaladığını da göstermektedir. İntert ön yüzeyine

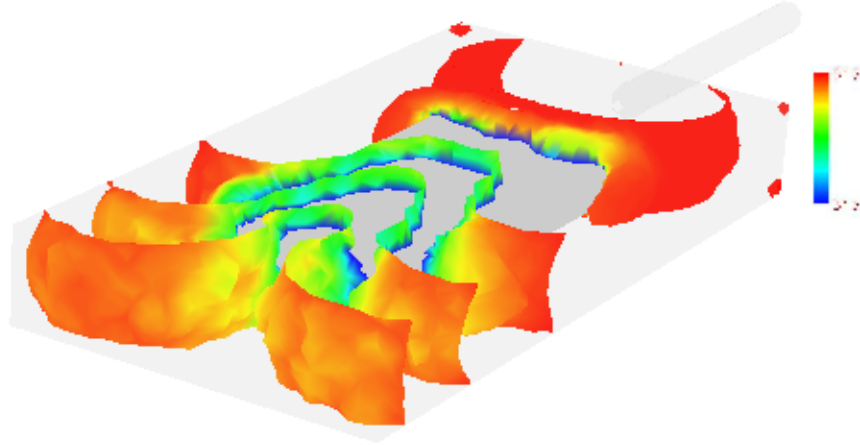
dokunan akış burada ayrılmaya başlar ve ayrılarak insert çevresinde ilerler ve insert arkasında tekrar birleşmeye başlar. Gelişmeye devam eden akış insert arkasında havanın, hava kanallarından kaçmasına izin vererek kalıbı doldurur. Fakat kalıbın ön köşelerinde hava kanalları olmadığından buradaki hava kaçamaz ve hava boşluklarının oluşmasına neden olur. Enjeksiyon işleminde karşılaşılan tüm akış durumları sunulan nümerik model ile başarılı bir şekilde çözülmüştür.



Şekil 5.13. Sunulan nümerik yöntem ile durum 2 için üç farklı zaman için elde edilmiş 3-B akış önü gelişimi ( $t = 0.25$  s,  $0.55$  s ve  $1.1$  s)

Şekil 5.14 durum 2 için dört farklı zamanda akış önündeki sıcaklık dağılımını göstermektedir. İinsert metal yüzeyi eriyik arasındaki büyük sıcaklık farkından dolayı, akış önünün insert metalle kesiştiği noktalarda yüksek konvektif ısı transfer hızı nedeniyle önemli sıcaklık değişimleri oluşmuştur. Sıcaklığın büyük ölçüde düştüğü insert çevresindeki katılaşma ve viskozitedeki artma buralarda akış alanının azalmasına ve akışa karşı direncin artmasına neden olmuştur. Bu etkinin daha fazla görüldüğü insert alt ve üst yüzeyi çevresindeki akış, yüksek dirençten dolayı geride kalmış ve şekilde gösterilen akış profilinin oluşmasına neden olmuştur.



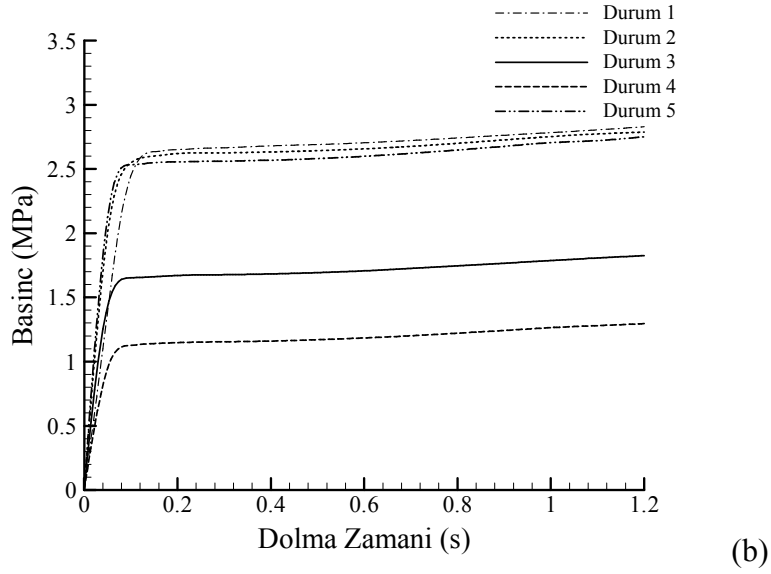
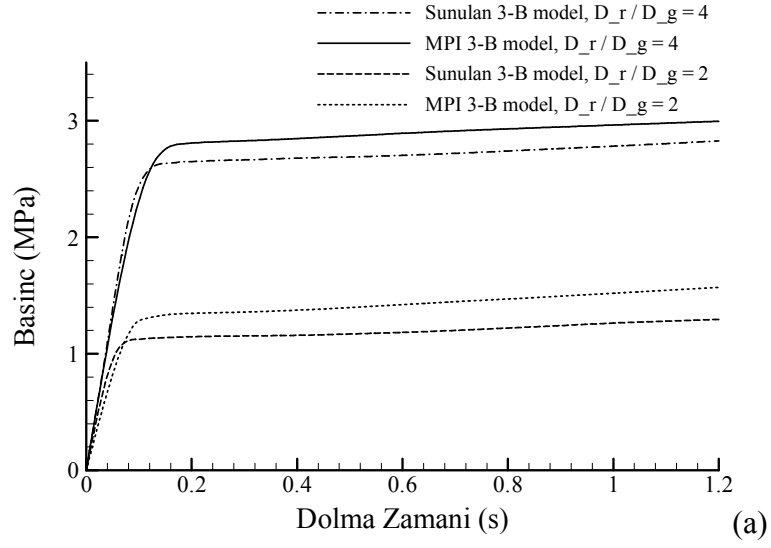


Şekil 5.15. Durum 2 için dört farklı zamanda akış önündeki sıcaklık dağılımı  
( $t = 0.25$  s,  $0.65$  s,  $0.9$  s ve  $1.15$  s)

Elde edilen sonuçların her bir durum için nicel karşılaştırılmaları Şekil 5.15-17 arasında verilmiştir. Şekil 5.15 (a) ve (b) yoluk geçidinde hesaplanan alan ağırlıklı basıncın değişimini göstermektedir. Sunulan sonlu hacim yöntemine dayalı nümerik modelde alan ağırlıklı ortalamalar, seçilen bir düzlem için aşağıda verilen formülle hesaplanır.

$$\frac{1}{A} \int \phi dA = \frac{1}{A} \sum_{i=1}^n \phi_i |A_i| \quad (51)$$

Burada  $\phi_i$  daha öncede belirtildiği gibi herhangi yerel hız veya ısı transferi için bir alan değişkenini,  $A$  düzlemin toplam alanı ve  $A_i$  ise düzlem içinde her bir integral alanı ifade eder.



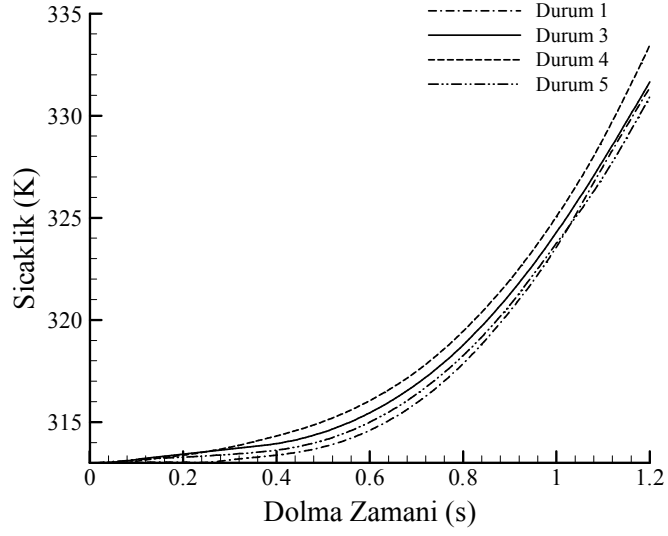
Şekil 5.15. Sunulan nümerik model ve MPI 3-B modelden elde edilen alan ağırlıklı basınç değerlerinin karşılaştırılması

Şekil 5.15(a) 2 ve 4 olan iki farklı yolluk/yolluk geçidi oranı için yolluk geçidi üzerindeki alan ağırlıklı basınç değerlerini karşılaştırmaktadır. MPI 3-B modelinden elde edilen basınç değerleri de karşılaştırma amaçlı olarak eklenmiştir. Şekil 5.15 (a)'dan ortalama basınç değerlerinin geometrik koşullardan önemli ölçüde etkilendiği açıkça görülmektedir. Her iki model çözümü için, basınç değerlerindeki ani artış dolma aşamasının erken safhalarında görülmektedir ve bu artış yolluk geçidi çıkışında eriyik akıştaki yüksek konvektif hız değişimine bağlanabilir. Bu ani

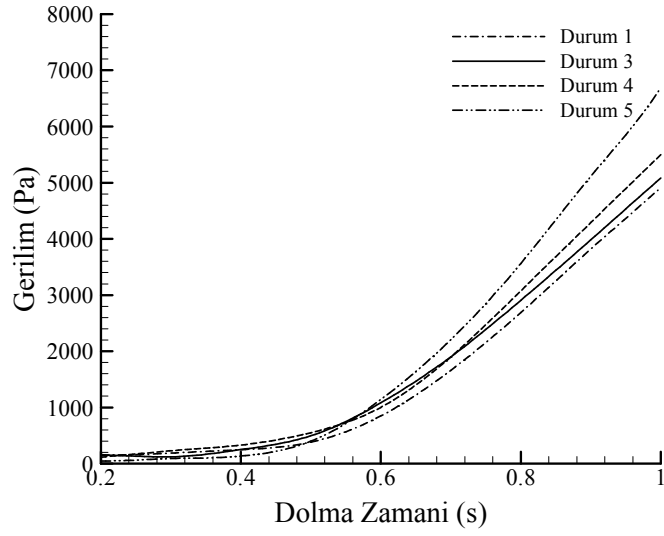
yükseliş akışın insertle temas ettiği yerel maksimum değere ulaşılması ile son bulur. Her iki model simülasyonları benzer basınç değerleri vermesine rağmen sunulan nümerik yöntem MPI 3-B'den daha küçük sonuçlar vermektedir. Bu iki model tahmini arasındaki fark uygulanan nümerik yöntemlerden kaynaklanmaktadır. Sunulan 3-B nümerik model basınca dayalı ayrıklaştırılmış (Pressure based segregated algorithm) kullanırken MPI 3-B denklem sistemlerini birleştirilmiş (coupled) olarak çözer. Zhou ve ark. [26] birleştirilmiş sistemlerin ayrıklaştırılmış sistemlerden daha küçük basınç tahmini yaptığını bildirmiştir.

Şekil 5.15 (b) geometrik koşulların ve uzaysal ağ çözünürlüğünün yolluk geçidindeki basınç dağılımına etkisini göstermektedir. Yolluk çapı-yolluk geçidi çapı oranı 4'ten 2'ye düştüğünde ortalama basınç değerleri her bir durum için büyük ölçüde azalmaktadır. Her bir durum için düşük yolluk-yolluk geçidi çapı oranında düşük basınç değerleri elde edilmiştir. Uzaysal ağ yoğunluğunun son durum için daha fazla artırılması sonuçlarda önemli değişikliğe neden olmadığından, 18.000 çok yüzlü elemandan oluşan ağ yapısının nicel karşılaştırmaları yapmakta yeterli olduğu bulunmuştur. Katılma etkilerinin dikkate alınmasının basınç gelişiminde önemli değişiklik yaratmadığı ve  $D_r/D_g = 4$  için daha küçük basınç değerleri verdiği gözlemlenmiştir. Şekil aynı zamanda yolluk çapı-yolluk girişi çapının düşmesinin polimer eriyik akışın insert yüzeyine dokunma zamanının düştüğü ve basınç değerlerinin bundan sonra çok az miktarda arttığı gözlemlenmiştir.

Şekil 5.16 insert metal yüzeyi üzerindeki alan ağırlıklı sıcaklık ortalamalarını her bir durum için göstermektedir. Şekil ortalama sıcaklık değerinin dolma aşaması boyunca arttığını ve bu artışın küçük yolluk çapı-yolluk geçidi çapı oranlarında daha yüksek olduğunu göstermektedir. Bu durum, yolluk çapı-yolluk girişi çapı oranı düştüğünde momentum akış hızı yolluk geçidinde artar bu da insert duvarıyla polimer eriyik akış arasında daha güçlü hidrodinamik etkileşimin olmasına yani insert duvarında daha güçlü konvektif sıcaklık gradyanlarının oluşmasından olabilir.



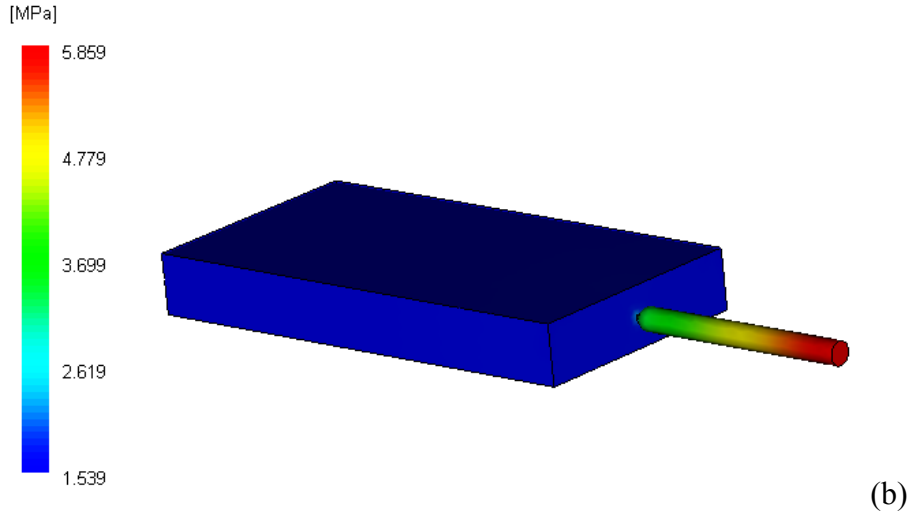
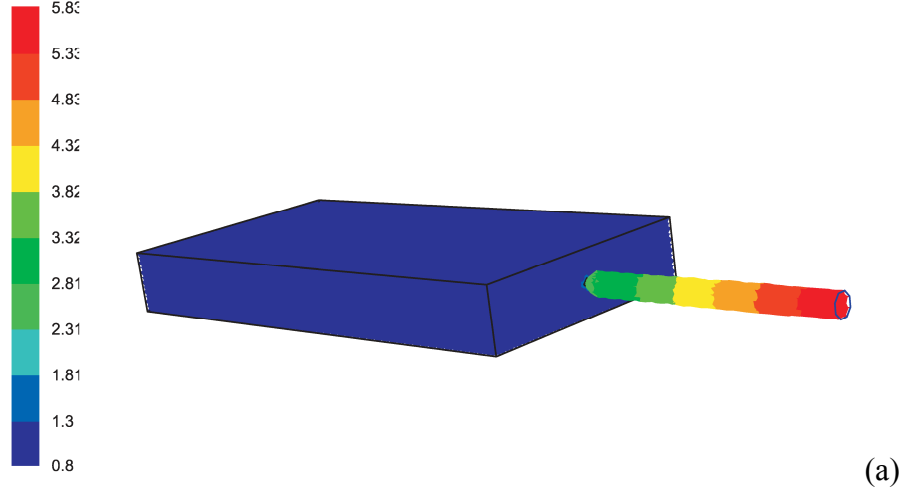
Şekil 5.16. İncert metal yüzeyinde hesaplanan alan ağırlıklı ortalama sıcaklık gelişimi



Şekil 5.17. İncert metal yüzeyinde hesaplanan alan ağırlıklı ortalama gerilim gelişimi

Şekil 5.17 dolum aşamasında her bir durum için, incert metal yüzeyinde hesaplanan alan ağırlıklı ortalama gerilim gelişimini göstermektedir. Yolluk çapı-yolluk geçidi çapı oranının değişmesi sadece incert yüzeyindeki sıcaklık değişimini etkilemez, incert duvarı üzerindeki gerilim gelişimini de önemli ölçüde etkiler. Yolluk çapı-yolluk geçidi çapı oranındaki azalmayla kalıba giriş bölgesinde oluşan yüksek momentum akış hızı eriyiğin incert duvarlarıyla daha çabuk etkileşimine ve

insert duvarıyla buna dokunan eriyik molekülleri arasında sürtünmenin artmasına ve bu da gerilim seviyesinin yükselmesine neden olur.



Şekil 5.18. Durum 2 için 1.22 s’de dolma sırasında kalıp boşluğu içerisindeki basınç dağılımı a)Sunulan 3-B model; b) MPI 3-B model

Diğer nitel karşılaştırma sunulan 3-B model ile MPI 3-B model arasında kalıbın dolma sırasında kalıp boşluğu içerisindeki basınç dağılımı açısından Şekil 5.18’de görüldüğü gibi yapıldı. Her iki modelde dolma anında kalıp içerisinde benzer basınç dağılımları oluşturmuştur. Anlık basınç dağılımı şekilde de görüldüğü gibi yolluk geçidinden sonra düşük ve düzgün basınç değerleri vermiştir.

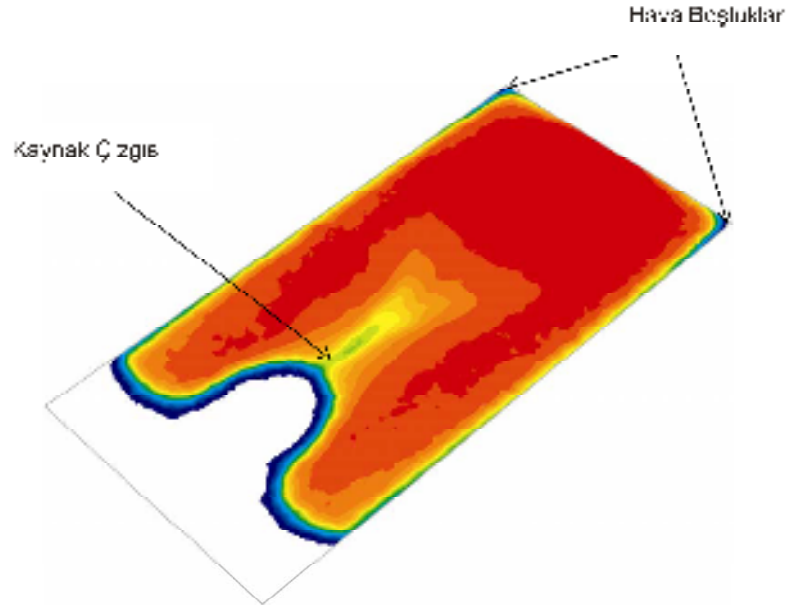
### 5.3.2. Proses Şartlarının Etkisi

Bu bölümde çizelge 5.4’de görüldüğü gibi, enjeksiyon işleminin dolma aşaması simülasyonları farklı ağ yoğunlukları ve proses koşulları için yapılmıştır. Geometrik koşullar önceki bölümdeki durum 4 ile aynıdır. Hal değişim etkileri bütün durumlarda hesaba katılmıştır.

Çizelge 5.4. Simülasyonlarda kullanılan ağ yoğunlukları ve proses koşulları

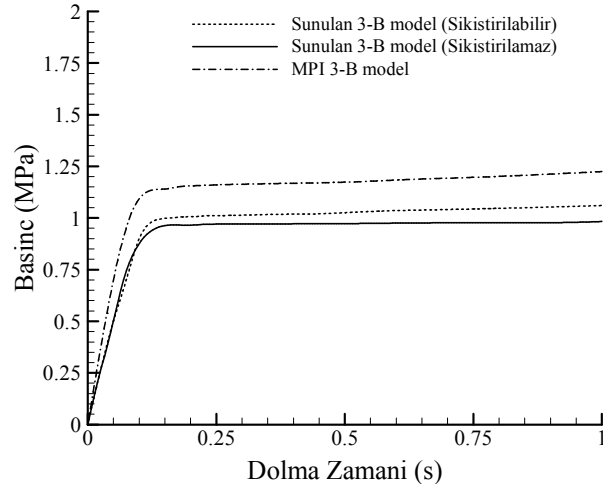
Durum No	Kütleli Akış Hızı (kg/s)	Sıcaklık (K)		Hesaplama Ağı (Hücre Sayısı)	
		Enjeksiyon	İnsert Yüzeyi	Dörtüzlü	Çokyüzlü
1	0.0015	513	313	90,000	18,000
2	0.0015	513	313	635,000	135,000
3	0.0015	513	313	840,000	195,000
4	0.0015	485	313	840,000	195,000
5	0.0015	513	343	840,000	195,000
6	0.0010	513	313	840,000	195,000

Şekil 5.19 durum 2 için önerilen nümerik yöntemin dolma aşamasının sonlarında hava boşlukları ve kaynak çizgisi tahminindeki kabiliyetlerini göstermektedir. 1.05s’de 2-B düzlem üzerindeki ani hacim fraksiyonu kontörü kalıp boşluğu köşelerinde hava boşluklarını ve insert arkasında birleşme sonrası oluşan kaynak çizgilerini başarıyla tahmin ettiği şekilde açıkça görülmektedir.



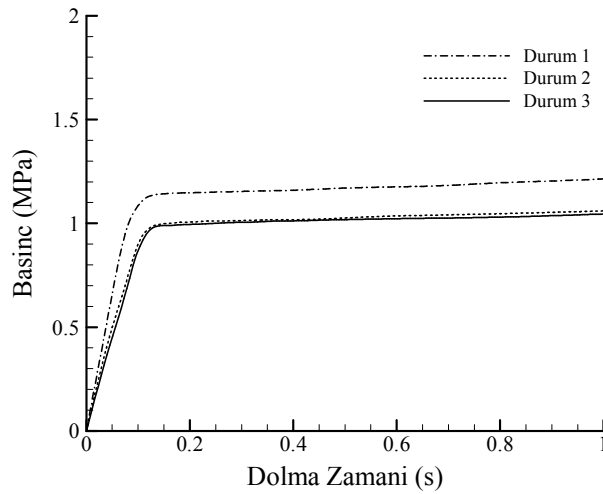
Şekil 5.19. Durum 2 için dolma aşaması sonuna doğru hava boşlukları ve kaynak çizgisi oluşumun tahmini

Şekil 5.20 nümerik simülasyonları için hesaplanan alan ağırlıklı basınç değişimlerini göstermektedir. Şekil 5.20’de durum2 için hesaplanan basınç değerleri MPI 3-B modelden elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmaktadır. Sıkıştırılmaz akış koşulları için elde edilen sonuçlarda aynı figürde karşılaştırma amaçlı eklenmiştir. Şekilde basıncın dolma aşamasının ilk veresinde her bir model için doğrusal olarak artmakta olduğu görülmektedir. Bu artış polimer akışın yolluk geçidi çıkışındaki yüksek konvektif hız değişimine ve artan kayma direncine bağlanabilir [90]. Sıkıştırılma etkilerini hesaba katan ve katmayan model çözümleri MPI 3-B model ile elde edilen sonuçlarla benzer sonuçlar verse de sıkıştırılma etkilerini dikkate alan çözümün MPI 3-B ile daha yakın sonuçlar verdiği ve her durumda sunulan 3-B çözümün daha yüksek basınç değerleri ürettiği gözlemlenmiştir. Fakat hala bu iki model çözümleri arasında fark vardır ve bu fark daha öncede bahsedildiği gibi kullanılan nümerik yöntemlerden kaynaklanabilmektedir. Sunulan 3-B nümerik yöntem basınca dayalı ayrıklaştırılmış çözüm yöntemi kullanılmaktadır. Bu yaklaşım momentum denklemlerinin ve süreklilik denklemini birbiri arkasına ayrı olarak çözer fakat Moldflow MPI 3-B sistem denklemlerini birleşik olarak çözer. Bu durum yakın zamanda Zhou ve ark. [26] tarafından da gösterilmiştir.



Şekil 5.20. Sunulan nümerik model ve MPI 3-B modelden elde edilen alan ağırlıklı basınç değerlerinin Durum 2 için karşılaştırılması

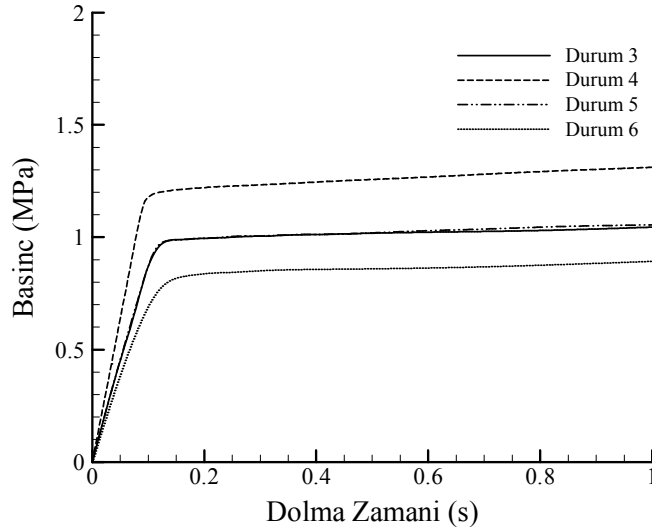
Ağ çözünürlüğünün nümerik çalışmanın sonuçlarına etkisi Şekil 5.21'de görülmektedir. 18.000 çokyüzlü elemandan oluşan hesaplama ağı yoğunluğu, basınç dağılımında yüksek ağ yoğunluğuyla elde edilen sonuçlardan oldukça büyük sapmaya neden olmuştur. Hesaplama ağı yoğunluğunu 135.000 çok yüzlü hücreden 195.000 çok yüzlü hücreye çıkarılması tahmin edilen basınç değerlerinde herhangi göze çarpan basınç gelişimi farkına neden olmamıştır ve bu durum önerilen nümerik yöntemin proses koşulların etkisini incelemede güvenilirlikle kullanılabileceğini göstermektedir.



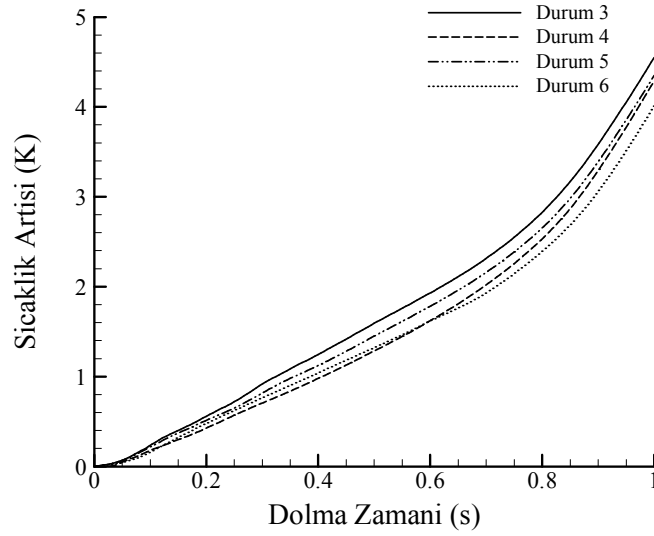
Şekil 5.21. Hesaplama ağı yoğunluğunun basınç dağılımına etkisi



Şekil 5.22 195.000 çokyüzlü elemandan oluşan son hesaplama ağı yoğunluğunda, enjeksiyon sıcaklığının, insert duvar sıcaklığının, girişteki kütleli akış hızının enjeksiyon basıncına etkisini göstermektedir. Kütleli akış hızı basınç gelişimini önemli ölçüde etkilememektedir. Kütleli akış hızındaki artış dolama zamanının kısalmasına buda daha yüksek momentum konveksiyon hızına ve iç sürtünme etkilerinin artmasına neden olur. Artan bu etkileri aşmak için girişteki basınç değeri yükselir. Diğer taraftan insert duvar sıcaklığındaki değişiklik basınç gelişimine önemli bir etkide bulunmamaktadır. Fakat enjeksiyon sıcaklığı basınç dağılımına önemli ölçüde etkiler. Enjeksiyon sıcaklığı belirli bir kütleli akış hızında (0.0015 kg/s) azalırsa, sıcaklığa ve kayma hızına bağlı olan viskozite yükselir ve bu yüksek akış direncine neden olur. Enjeksiyon basıncı giriş sınır koşulu olarak verilen sabit kütleli akış hızını sağlayabilmek için, bu artan akış direncine karşı artmaya başlar.



Şekil 5.22. Proses koşullarının enjeksiyon basıncına etkileri



Şekil 5.23. Proses parametrelerinin insert yüzeyindeki sıcaklık gelişimine etkileri

Şekil 5.23 son hesaplama ağı yoğunluğunda, dolma aşamasında insert duvar yüzeyindeki sıcaklık değişimini göstermektedir. Şekil enjeksiyon sıcaklığının ve kütleli akış hızının sıcaklık artışında daha önemli etkiye sahip olduğunu açıkça göstermektedir. Her durum için ortalama insert duvar sıcaklığı dolma aşaması boyunca artmaktadır ve bu artış yüksek kütleli akış hızının olduğu durumlarda daha yüksektir. Bu durum yüksek kütleli akış hızının polimer akışın insert yüzeyine daha çabuk dokunmasına ve polimer ile insert arasında daha uzun süre etkileşime neden olmasından olabilir. Aynı zamanda yüksek kütleli akış hızı insert yüzeyinde daha fazla kayma hızına ve buda sıcaklık artışına neden olur. Benzer etkiler enjeksiyon sıcaklığı artırıldığında da görülebilir. Enjeksiyon sıcaklığını göreceli olarak yüksek olduğu durumda, eriyik sıcaklığı daha uzun bir süre sıcak olarak kalır. Bu ise eriyiğin ısı iletkenliğinin artmasına ve insert yüzeyi ile daha fazla ısı iletimini sağlar.

Çizelge 5.5’de gösterildiği gibi, işlemci sayısının artması, nümerik kodun paralel ölçeklenebilirliğini işlemciler arasındaki haberleşme zamanının toplam zamana oranının artmasıyla azalır. Nümerik çalışmada paralel uygulama MPI kullanarak dağıtılmış hafıza yapısı ile uygulandı ve doğrusallaştırılmış denklemler BiCGStab algoritması Block-ILU ön koşullayıcı kullanarak çözüldü. Zhou ve Turng [94] ve Araujo ve ark. [95] gibi benzer paralelleştirme algoritması kullanılan daha önceki

çalışmalarla kıyaslandığında benzer verimlilik değerlerinin elde edildiği görülmüştür. Kullanılan algoritmanın paralel performansı CICSAM gibi Couarant sayısına çok bağlı olmayan arayüz yakalama algoritmaları kullanılarak ve PCG (Paralel Conjugate Gradient Method ) veya AMG (Algebraic Multi-grid Approach ) gibi daha hızlı paralel çözüm yöntemleri kullanılarak arttırılabilir.

Çizelge 5.5. Paralel hızlanma ve karşılık gelen verim değerleri

İşlemci Sayısı	İterasyon Başına Düşen Gerçek Zaman (s)	Hızlanma	Paralel Verim (%)
1	1.126	1	100
2	0.647	1.74	87
4	0.343	3.28	82
6	0.241	4.68	78
8	1.184	6.09	76
10	1.154	7.29	73
12	0.132	8.53	71

#### 5.4. ANALİZ 4: TEK BOŞLUKLU KALIP

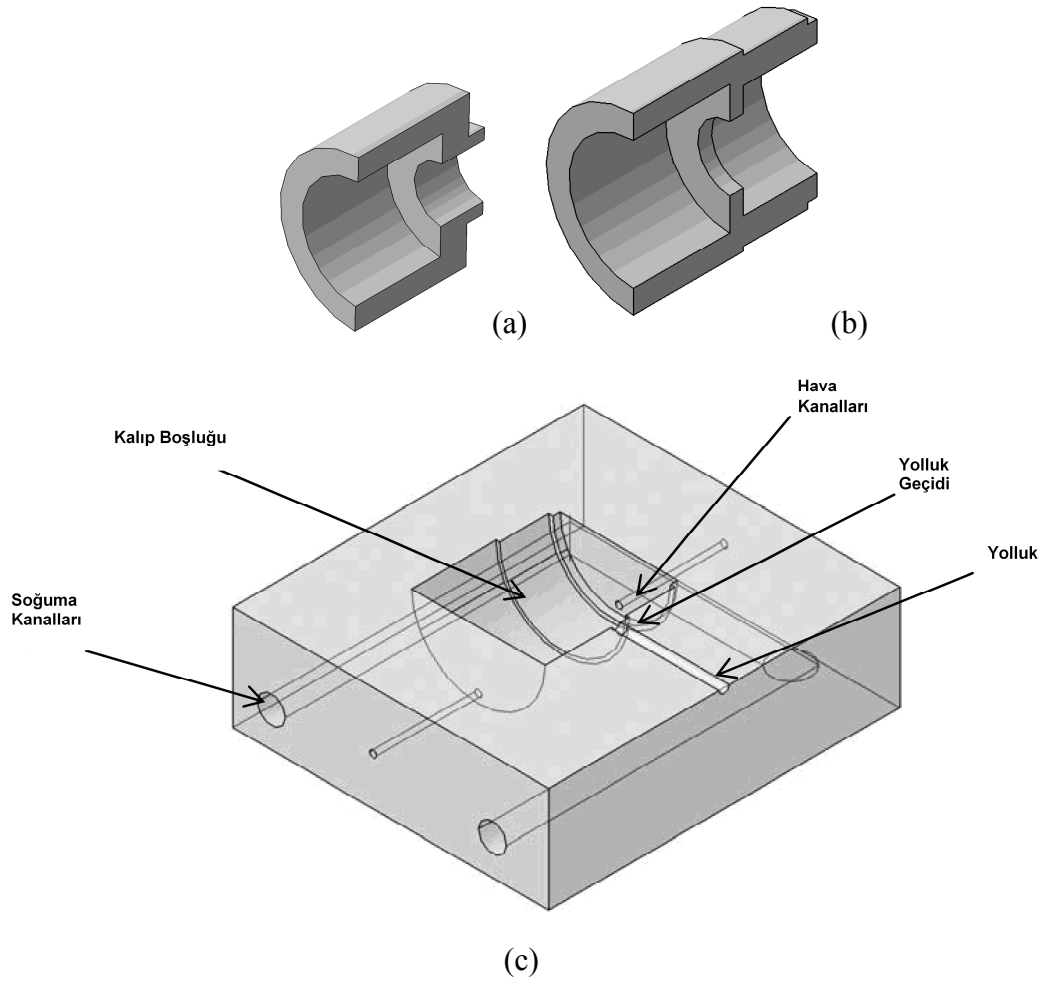
Daha önceki bölümlerde önerilen nümerik yöntemin enjeksiyon işleminin modellenmesindeki yeterliliği incelenmiş bu bölümde ise kompleks geometri üzerinde uygulanmıştır. Tek boşluklu kalıpta insert enjeksiyon işlemine etki eden proses koşulları içten dışlı boru ek parçası geometrisi için uygulanmıştır. İntert enjeksiyon işlemimin dolma aşaması için enjeksiyon sıcaklığı, insert sıcaklığı ve enjeksiyon hızı önceki bölümde olduğu gibi yönetici parametreler olarak alınmıştır. Sunulan sonuçları bu kompleks geometride doğrulamak için, sonuçlar birbiriyle ve MPI 3-B ile elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

Çizelge 5.6. Tek boşluklu kalıp analizi için simülasyonlarda kullanılan ağ yoğunlukları ve proses koşulları

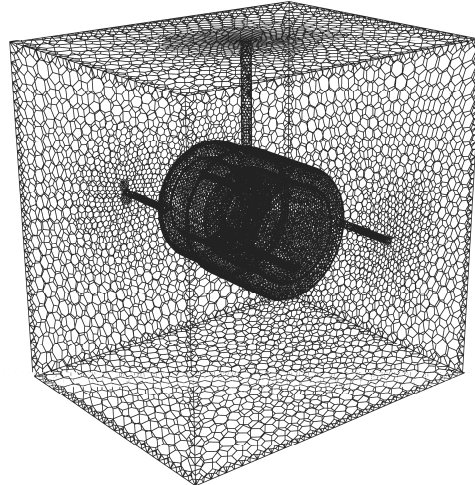
Durum No	Enjeksiyon Hızı (kg/s)	Sıcaklık (K)			Hesaplama Ağı (Hücre Sayısı)	
		$T_m$	$T_w$	$T_0$	Dörtüzlü	Çokyüzlü
1	0.003	513	313	313	537580	107516
2	0.003	513	313	313	1072115	214423
3	0.003	513	293	293	1072115	214423
4	0.003	493	293	293	1072115	214423
5	0.010	513	313	313	1072115	214423

Şekil 5.24 (a)-(c) tek kalıplı boşlukta enjeksiyon işleminin nümerik simülasyonları için oluşturulmuş 3-B model geometriyi göstermektedir. Şekil 5.24 (a), (b) ve (c) sırasıyla metalik insert, içten dişli boru ek parçası geometrisi ve kalıp boşluğunu göstermektedir. Kalıp boşluğu montaj geometrisi kalıp duvarları, kalıp boşluğu, metalik insert, hava kanalları, yolluk ve yolluk geçidinden oluşmaktadır. Kalıp boşluğunun ana boyutları 40 mm uzunluğunda 20 mm genişliğinde ve 10 mm kalınlığında, metalik insertin boyutları ise 15 mm uzunluğunda ve sırasıyla 28 mm ve 20 mm dış ve iç çap olarak alınmıştır. Yolluk uzunluğu 20 mm olarak oluşturulmuştur.

Hesaplama ağının oluşturulmasında önceki bölümde anlatılan prosedür uygulanmıştır. Şekil 5.25 hesaplama alanının 3-B ağ yapısını göstermektedir. Tek boşluklu kalıp sistemi için son hesaplama ağı yoğunlu 214423 çokyüzlü hesaplama hücresinden ve 1321765 hesaplama noktasından oluşmaktadır.

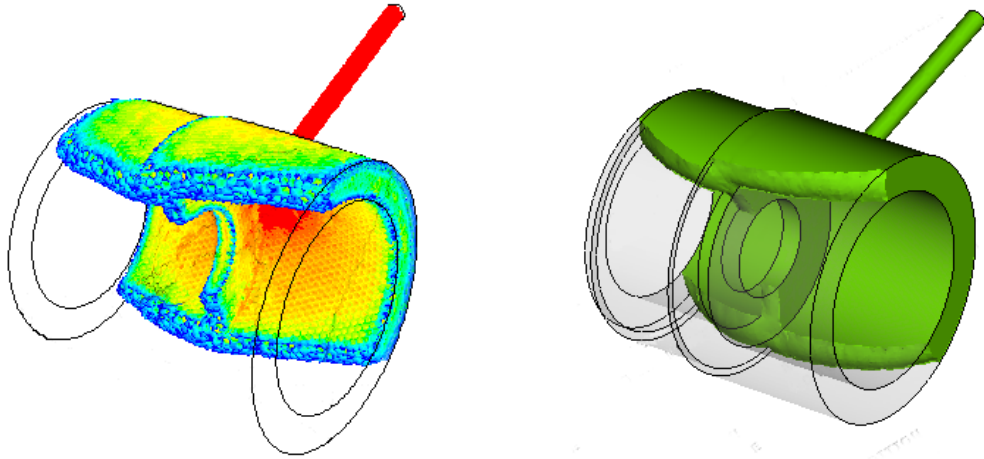


Şekil 5.24. a) - c) Kalıp boşluğu,insert ve parçanın 3-B geometrisi



Şekil 5.25. Tek boşluklu kalıp sistemi için 3-B ağ yapısı

Şekil 5.26 ve 27 bu kompleks geometri için sunulan 3-B nümerik modelin enjeksiyon işlemindeki akış önü yapısını, akıştaki simetriyi ve 3-B etkileri yakalamadaki doğruluğunu sunmak için nitel ve nicel karşılaştırmaları göstermektedir. Durum 2 için elde edilen anlık hacim fraksiyonu kontörleri kalıp boşluğu içerisinde akışa dik yöndeki hareketi (fountain etki) başarıyla yakalayabilmektedir. Polimer eriyik akışın tahmin edilen konumu ve şekli aynı anda MPI 3-B analiz sonuçlarından elde edilen kontörle çok iyi uyum göstermektedir.

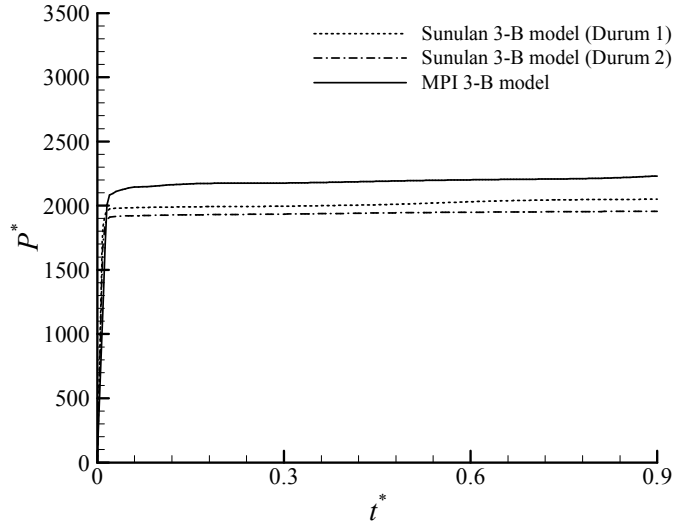


Şekil 5.26. Durum 2 için akış önü gelişimi, sunulan model (solda) ve MPI 3-B model (sağda)

Enjeksiyon basıncının,  $P$  boyutsuz zamanla,  $t^*$  değişimi iki farklı ağ yoğunluğu ve MPI 3-B model sonucu ile birlikte Şekil 4.27’de verilmiştir. Simülasyon zamanı değişkeni aşağıda gösterildiği gibi boyutsuz hale getirilmiştir.

$$t^* = \frac{m^o t}{\rho_R \nabla_m} \quad (52)$$

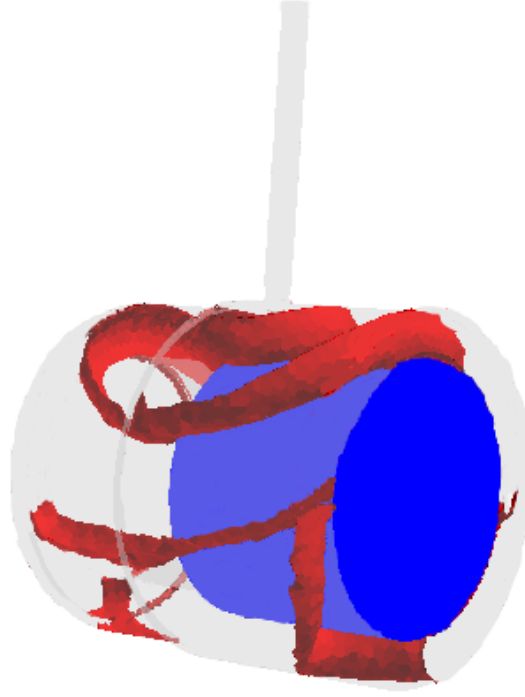
Burada  $m^o$ , enjeksiyon hızının ve  $\rho_R$  referans yoğunluğu göstermektedir.  $\nabla_m$  ise kalıp boşluğunun eriyikle dolan hacmini ifade eder. Yoğunluk için referans değer,  $\rho_R$   $737.87 \text{ kg/m}^3$  olarak alınmıştır.



Şekil 5.27. Hesaplanan alan ağırlıklı basınç ortalamasının farklı ağ yoğunlukları ve MPI 3-B modeliyle karşılaştırılması

Şekil. 5.27’de görüldüğü gibi, hesaplanan ortalama basınç gelişimi her iki nümerik modelde de benzer sonuçlar vermektedir. Fakat sunulan nümerik yaklaşım MPI 3-B modelden daha düşük basınç dağılımı vermektedir. Bu durumun nedeni önceki bölümde açıklanmıştı. Dolma aşamasının ilk bölümündeki basıncın hızlı ve doğrusal gelişimi katı katmanın oluşumundan dolayı yolluk geçidi çıkışında akışa karşı direncin yükselmesine bağlanabilir [2]. Hesaplama ağı yoğunluğundaki artış sunulan model ile MPI 3-B model arasındaki farkın azalmasına neden olmasına rağmen sonuç üzerinde önemli bir düzelme sağlamamıştır.

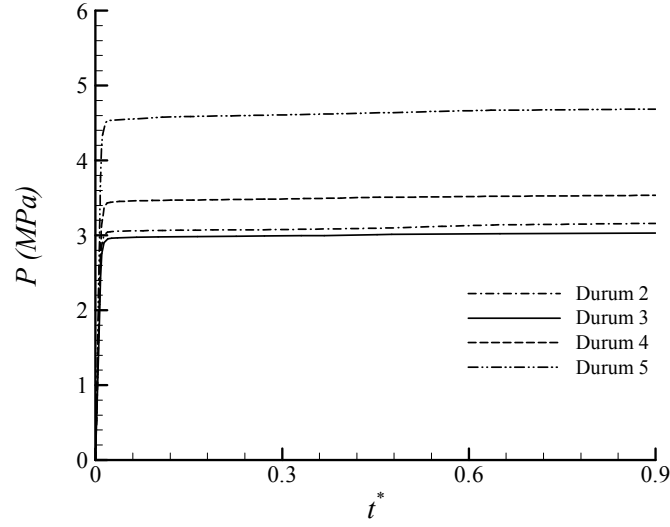
Şekil 5.28, sunulan 3-B modelde durum 2 için akış önü gelişimini göstermektedir. Polimer eriyik akışı kalıp boşluğunun merkez simetri düzlemine göre simetrik gelişim göstermektedir ve her zaman adımında beklenen 3-B eğik akış önü yapısını başarıyla tahmin etmiştir. Akış önünün metalik inserti sararken ayrılması ve tekrar birleşmesi de iyi bir şekilde yakalanmıştır.



Şekil 5.28. Durum 2 için farklı zaman adımlarında akış önu gelişimi

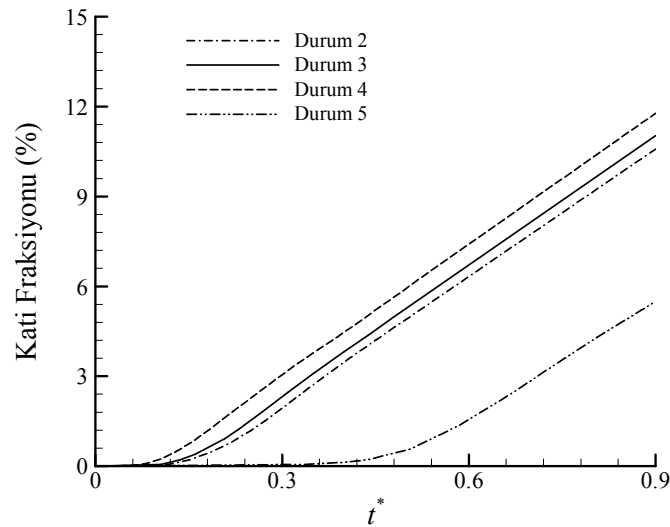
Şekil 5.29, 214423 çokyüzlü hücre ve 1321765 hesaplama noktasından oluşan son ağ yoğunluğunda, her bir durum çalışması için boyutsuzlaştırılmış dolma zamanına göre hesaplanan basınç gelişimini göstermektedir. Basınç dağılımının dolma aşamasın başlarında artan, akışa karşı direnç nedeniyle bütün durum çalışmalarında hızlı ve doğrusal değiştiği açıkça görülebilmektedir. Bütün durum çalışmaları basıncı gelişiminde aynı eğilimi gösterse de enjeksiyon sıcaklığı, insert duvar sıcaklığı ve enjeksiyon hızı gibi değişen proses şartlarının etkisiyle farklı basınç değerleri oluşmuştur. Enjeksiyon hızının basınç gelişimine etkisi enjeksiyon sıcaklığı ve insert duvar sıcaklığıyla karşılaştırıldığında daha fazladır. Enjeksiyon hızının artmasıyla kalıp dolma zamanı düşer ve bu da artan moleküler momentum ve termal difüzyon değişim hızında artışa ve dolayısıyla polimer akıştaki sürtünme etkilerinin yükselmesine neden olur. Insert duvar yüzeyinin ilk sıcaklık değeri, enjeksiyon hızı ve enjeksiyon sıcaklığının aksine basınç gelişimi üzerinde önemli bir etkiye neden olmamaktadır. Enjeksiyon sıcaklığının düşmesi, eriyik viskozitesinin ve yoğunluğunu artmasına buda şekilde görüldüğü gibi basıncın yükselmesine neden olmuştur.





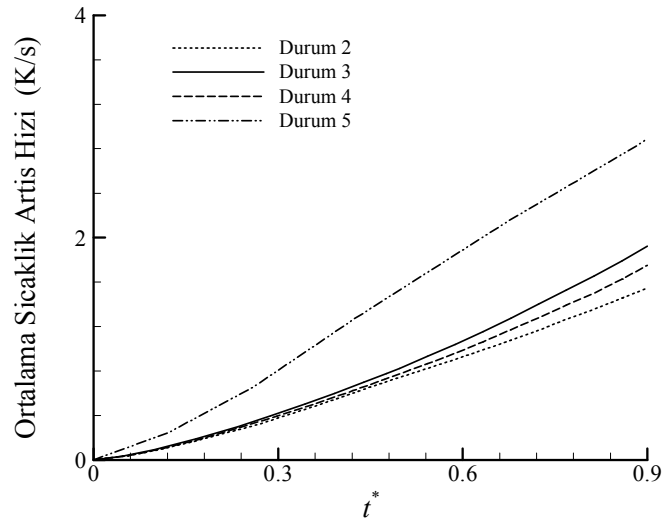
Şekil 5.29. Her bir durum için hesaplanan alan ağırlıklı basıncın gelişimi

Katılaşılan eriyik fraksiyonun boyutsuzlaştırılmış dolma zamanına göre gelişimi tahmin edilmiş ve Şekil 5.30'da gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi katılaşma hızı enjeksiyon hızına büyük ölçüde bağlıdır ve artan enjeksiyon hızı katılaşma hızında önemli azalmaya neden olmuştur. Bu farkın nedeni akışın metalik insertle daha erken karşılaşması ve daha kısa dolma süresinden dolayı eriyiğin insertle daha kısa süre kontak halinde bulunması olabilir. Çok daha yüksek katılaşma oranlarına enjeksiyon sıcaklığının ve insert yüzey sıcaklığının daha düşük olduğu durumlarda ulaşılmıştır.



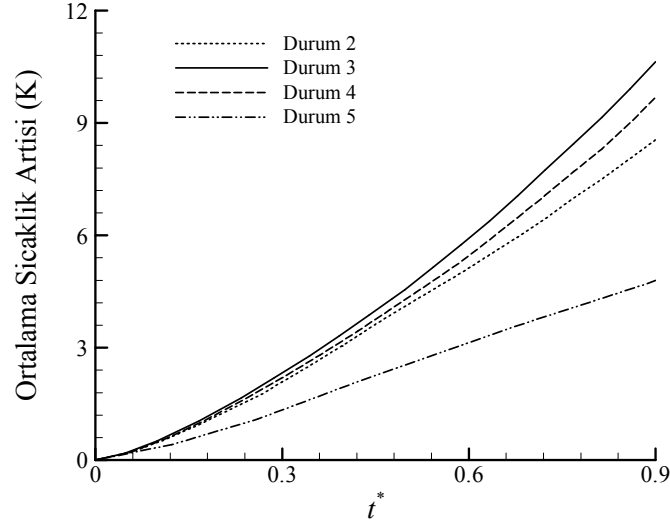
Şekil 5.30. Her bir durum çalışması için hesaplanan katı fraksiyonun gelişimi

Şekil 5.31 tüm durum çalışmaları için, metalik insert dış yüzey ortalama sıcaklık ortalama artış hızının ( $\Delta T/\Delta t_f$ ) boyutsuz dolma zamanına göre değişimini göstermektedir. Burada  $\Delta T$ , metalik insert yüzeyindeki alan ağırlıklı ortalama sıcaklık değişimi ve  $\Delta t_f$  de ortalama dolma zamanını göstermektedir. Enjeksiyon hızının artarken ortalama sıcaklık artış hızı artan konvektif hız değişimi nedeniyle yükselir. Termal etkiler aynı zamanda insert duvarı ilk sıcaklığı ve enjeksiyon sıcaklığı arasındaki farkın büyümesiyle hızlanır.



Şekil 5.31. Bütün durum çalışmaları için metalik insert dış yüzey ortalama sıcaklık artış hızının boyutsuz dolma zamanına göre değişimi.

Ortalama sıcaklık artış hızı yüksek enjeksiyon hızında daha fazla olmasına rağmen (Şekil 5.31), insert yüzeyi sıcaklık artışının düşük enjeksiyon hızlarında daha az olduğu bulunmuştur (Şekil 5.32). Bu durumun nedeni ise düşük enjeksiyon hızlarında dolma zamanı yükselir ve bu insert ile polimer eriyik arasında daha uzun süre etkileşime neden olur. Metalik insert yüzeyinde oluşan termal sınır katmanının insert yüzeyi ile daha uzun etkileşmesi, düşük enjeksiyon hızlarında daha yüksek insert yüzey sıcaklığının oluşmasını sağlar.



Şekil 5.32. Tüm durum çalışmaları için metalik insert yüzeyindeki ortalama sıcaklık artışının boyutsuz dolma zamanına göre değişimi

Çizelge 5.7. Tek boşluklu kalıp analizi için paralel hızlanma ve karşılık gelen verim değerleri

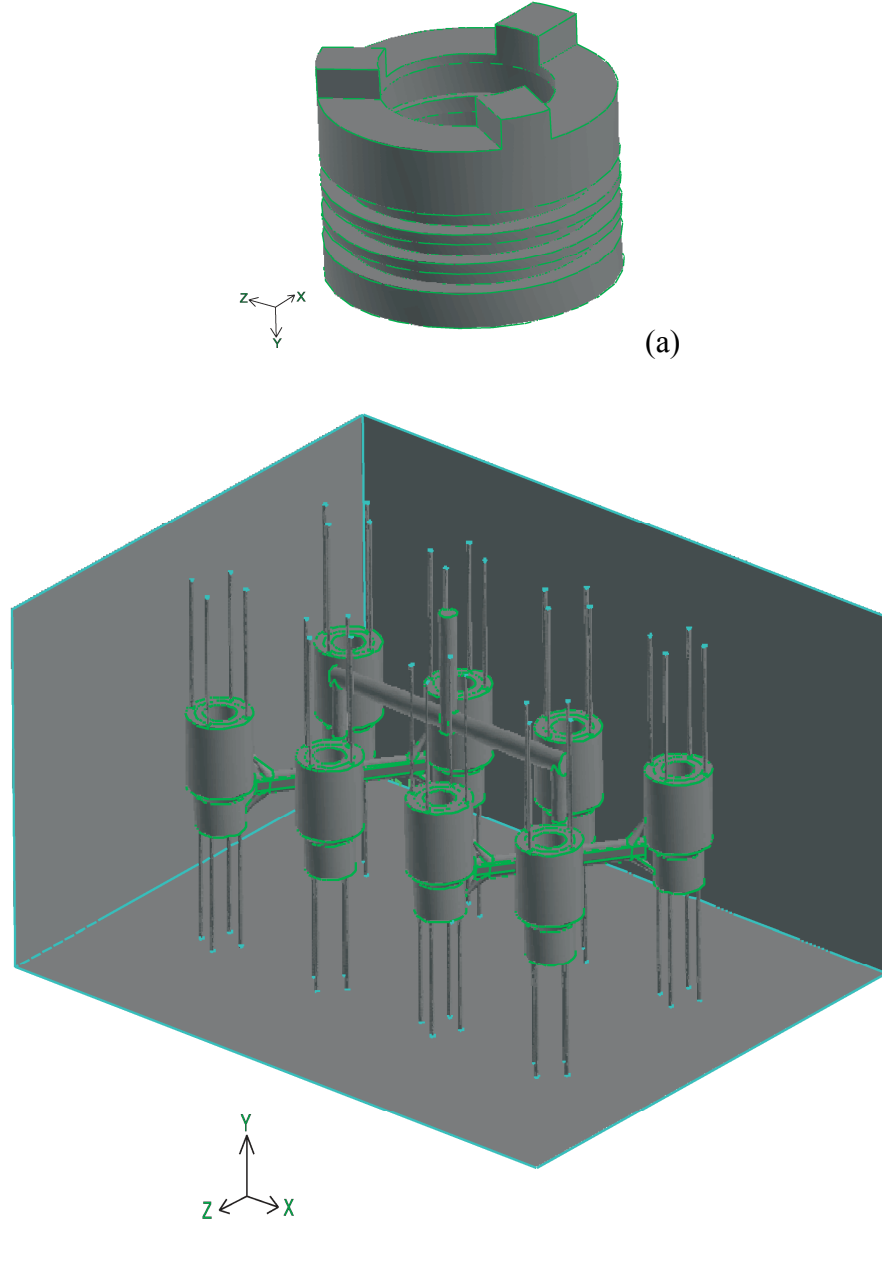
İşlemci Sayısı	İterasyon Başına Düşen Gerçek Zaman (s)	Hızlanma	Paralel Verim (%)
1	4.644	1	100
4	1.304	3.56	89
8	0.754	6.16	77
12	0.594	7.81	65

Çizelge 5.6'de gösterildiği gibi, işlemci sayısının artması, nümerik kodun paralel ölçeklenebilirliğini, işlemciler arasındaki haberleşme zamanının toplam zamana oranının artmasıyla azalır ve bu oranlar daha önce yapılan çalışmalarla benzerlik göstermiştir [94,95].

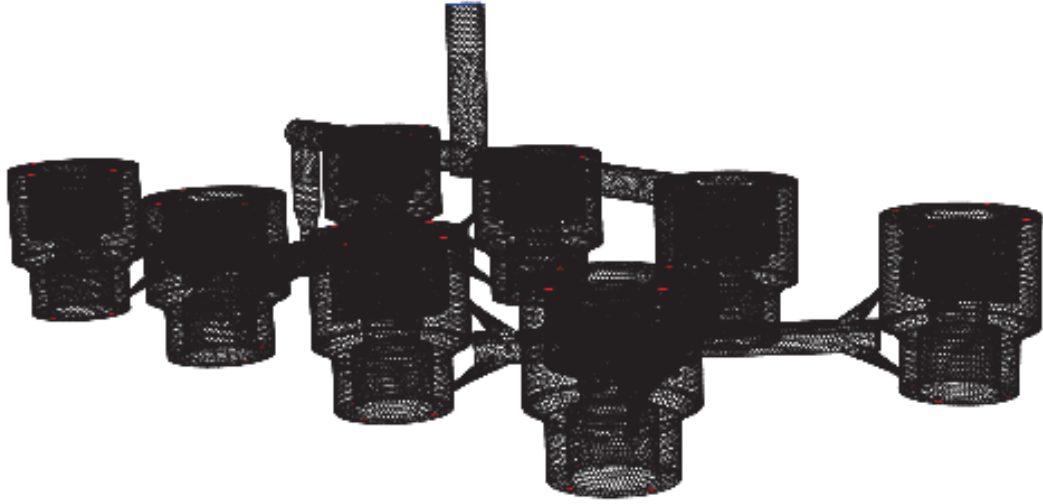
## 5.5. ANALİZ 5: ÇOK BOŞLUKLU KALIP SİSTEMİ

Tek boşluklu kalıp sisteminde içten dişli insert metali boru ek parçasının enjeksiyon işlemine proses koşullarının etkilerinin incelenmesinden sonra, sunulan nümerik çalışmalar sekiz boşluktan oluşan çok boşluklu kalıp sisteminin gerçek

üretim koşulları altında simülasyonu için genişletildi ve aynı geometri ve sınır koşulları için deneysel çalışmalarla karşılaştırılmıştır. Şekil 5.33 ve Şekil 5.34 sırasıyla kalıp ve insert geometrisini ve oluşturulan kalıp geometrisi için 3-B hesaplama ağı yapısını göstermektedir.



Şekil 5.33. Çok boşluklu kalıp sisteminin 3-B geometrisi; a) İnsert geometri; b) 3-B kalıp sistemi

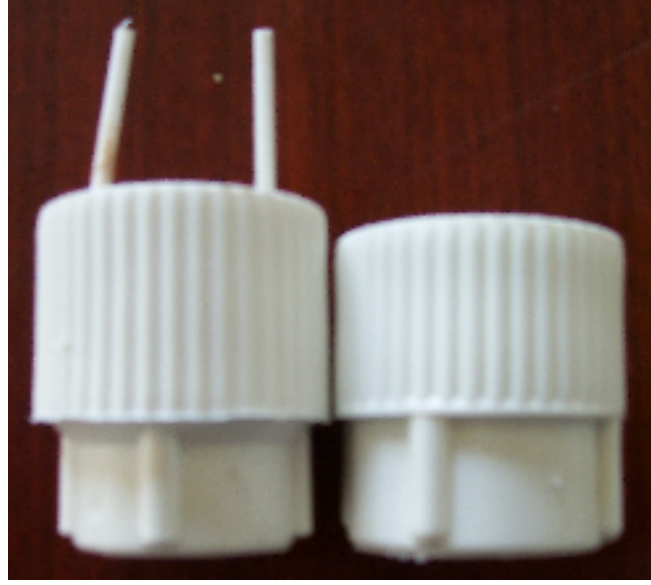


Şekil 5.34. Çok boşluklu kalıp sistemi için çokyüzlü elemanlardan oluşan 3-B hesaplama alanı

Çizelge 5.8 her bir deneysel durum çalışması için proses şartlarını göstermektedir. Deneyleler ENGELS marka ES 600/150 model enjeksiyon makinesinde yapıldı. Enjeksiyon hızı artarken bütün deneysel durumlarda toplam dolma zamanı kısalmır. Fakat ürün kalitesi enjeksiyon hızından büyük ölçüde etkilenir ve 0.04 m/s olan yüksek enjeksiyon hızında ve kullanılan yüksek enjeksiyon basıncında Şekil 5.35’da görüldüğü gibi parçada hatalar oluşmaktadır. Ürün hataları yüksek enjeksiyon basıncında da görülmektedir. Kullanılan geometri ve fiziksel şartlar altında deneysel durum çalışmaları arasında ürün kalitesi bakımından yapılan karşılaştırmalar sonrasında durum 7 optimum proses koşulu olarak seçilmiştir.

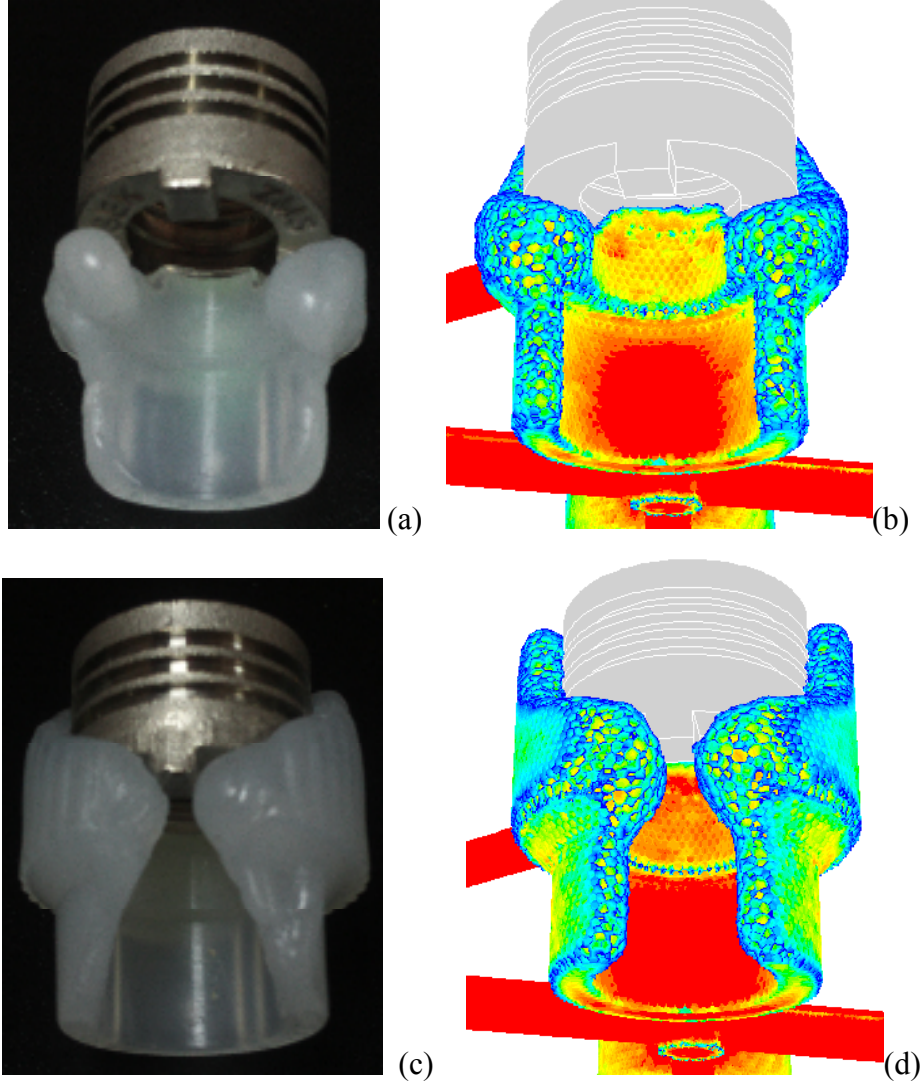
Çizelge 5.8. Çok boşluklu kalıp sisteminde deneysel durum çalışmaları için proses şartları

Durum No	Enjeksiyon Basıncı (MPa)	Enjeksiyon Hızı (m/s)	Enjeksiyon Sıcaklığı (K)	Kalıp Duvar Sıcaklığı (K)
1	10	0.02	493	293
2	12	0.02	493	293
3	14	0.02	493	293
4	14	0.04	493	293
5	10	0.04	493	293
6	12	0.04	493	293
7	12	0.02	513	293



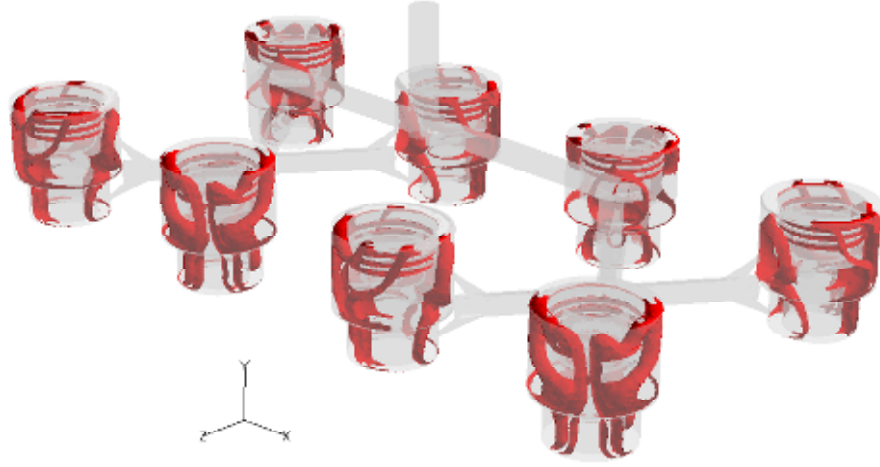
Şekil 5.35. Durum 2 (solda) ve durum 6 (sağda) için elde edilmiş hatalı ürünler

Optimize edilmiş proses koşullarında (durum 7), deneysel sonuçlarla direkt nicel karşılaştırma yapabilmek için benzer sınır koşulları kullanılarak nümerik çalışmalar bu çok boşluklu kalıp sistemi için gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.36 sunulan nümerik yöntem kullanılarak elde edilen akış önü gelişiminin seçilen proses koşulları altında deneysel verilerle karşılaştırılmasını göstermektedir. Akış önü gelişimi yüksek hızlı kamera yardımıyla elde edilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi, 3-B akış önü gelişimi, akışta simetri, kalınlık yönündeki değişimler gibi polimer eriyik akışın temel özellikleri sunulan nümerik yöntemle başarıyla yakalanmıştır. Ayrıca deneyden ve nümerik olarak elde edilen akış önü pozisyonu tam uyuma göstermektedir. Sunulan nümerik yöntem 3-B çok boşluklu kalıp sisteminin dolma aşamasında akışın gelişimi ve kompleks yapısı hakkında doğru ve detaylı bilgi verebilmektedir.



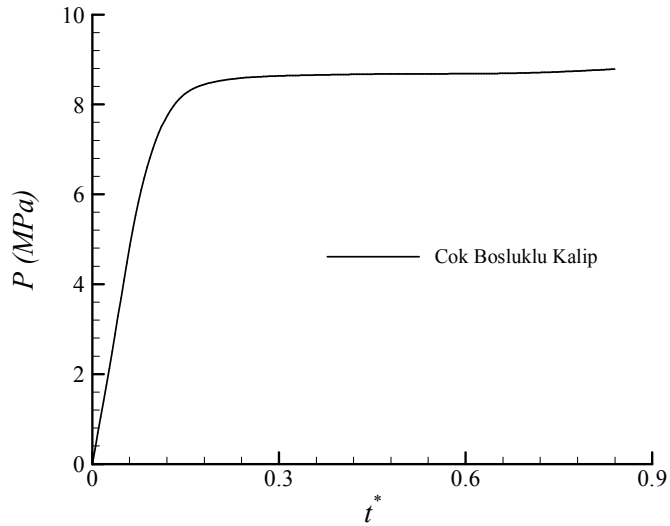
Şekil 5.36. Tahmin edilen akış önü gelişiminin 0.3 ve 0.75 boyutsuz zamanda durum 7 için deneysel verilerle karşılaştırılması

Çok boşluklu kalıp sisteminde her bir kalıp boşluğu için tahmin edilen akış önü gelişimi üç farklı zaman için şekil 5.37’de verilmiştir. Şekilde akış önünün kalıp boşluğu merkezine göre simetrik gelişimi, 3-B etkiler ve akışın ayrılma ve birleşme durumları açıkça görülmektedir.



Şekil 5.37. Çok boşluklu kalıpta durum 7 için akış önünün 3-B gelişimi  
( $t^* = 0.2, 0.7, 0.9$ )

Son olarak şekil 5.38 durum 7 için girişteki basınç gelişimini göstermektedir. Aynı geometri için çok boşluklu kalıpta tek boşluklu kalıba göre çok daha yüksek basınç değerlerinin elde edildiği görülebilir. Deneysel test durumu ile karşılaştırıldığında fark büyük olmasa da daha düşük basınç değerleri elde edilmiştir. Bu fark daha öncede tartışıldığı kullanılan ayrıklaştırılmış yaklaşımdan kaynaklanmaktadır.



Şekil 5.38. Durum 7 için tahmin edilen basınç gelişimi



## 6. SONUÇLAR ve GELECEK ÇALIŞMALAR İÇİN ÖNERİLER

Sunulan nümerik prosedür daha az basitleştirici varsayım yaparak insert enjeksiyon işlemi için daha doğru ve güvenilir nümerik modelleme yaklaşımı sunmaktadır. Bahsedilen nümerik yöntem 3-B akış önü gelişimi, kalınlık yönünde hareket gibi temel akış durumlarını tek ve çok boşluklu kompleks geometriler için başarıyla göstermiştir. Sonuçların plastik endüstrisinde sık kullanılan Moldflow programı ile yapılan analiz sonuçlarıyla ve yapılan deneyden elde edilen verilerle çok iyi uyum gösterdiği gözlenmiştir.

Tek boşluklu kalıp sisteminde yapılan analizler, enjeksiyon hızı, enjeksiyon sıcaklığı ve kalıp duvar sıcaklıkları gibi proses şartlarının gerekli enjeksiyon basıncı, katılma oranı ve sıcaklık dağılımı gibi polimer akış karakteristikleri üzerinde önemli etkiye sahiptir. Yapılan analizlerden akış karakteristiğine en önemli etkiyi enjeksiyon hızının yaptığı görülmüştür. Enjeksiyon hızı sadece enjeksiyon basıncının gelişiminde değil aynı zamanda polimer eriyik ve kalıp içerisindeki sıcaklık dağılımına ve katılma oranına da etki etmektedir. Sunulan sonuçlar verilen geometrik ve fiziksel koşullar altında enjeksiyon işlemimin optimize edilebilmesinde enjeksiyon hızının birincil parametre, enjeksiyon sıcaklığı ve insert ve kalıp sıcaklıklarının ise ikincil faktörler olduğunu göstermektedir. Aynı geometrik ve fiziksel koşullar altında yapılan deneyden elde edilen sonuçlar nümerik çalışmalarla aynı sonucu vermektedir.

Kullanılan nümerik yöntem ve malzeme modelleri sıkıştırılma ve soğuma etkilerinin fazla olduğu dolma sonrası aşaması içinde uygundur. İleriki çalışmalarda yöntemin uygun sınır koşulları altında dolma sonrası aşaması için uygulanabilirliği tespit edilmelidir. Ayrıca malzeme özelliklerinin daha iyi modellenmesine ve daha geniş termo-fiziksel şartlar altında kabiliyetlerinin artırılmasına yönelik çalışmalar yapılmalıdır. Arayüzeyin konumunu daha az yayılma etkileriyle belirleyebilecek ve Couarant sayısına da az bağlı arayüzü yakalama algoritmalarına halen ihtiyaç vardır.

## 6. KAYNAKLAR

- [1] Onalır, B. “Computer Aided Simulation of Injection Molding Process for Thermoplastic Materials”, Yüksek Lisans Tezi, ODTU Makina Mühendisliği Bölümü, Ankara, 243s, (1997).
- [2] Tutar, M., Karakus, A. “Computational Modeling of Three-Dimensional Compressible Filling Process of Injection Molding”, ICHMT International Symposium on Advances in Computational Heat Transfer, Marrakech, Morocco (2008).
- [3] Wang, T.H. ve Young, W.B. “Study on Residual Stress of Thin-Walled Injection Molding”, European Polymer Journal, **41(10)**: 2611-2517 (2005)
- [4] Song, M.C., Liu, Z., Wang, M.C., Yu, T.M., ve Zhao, D.Y., “Research on Effects of Injection Process Parameters on the Molding Process for Ultra-thin Wall Plastic Parts”, J. of Materials Proc. Technology, **187**:668-671 (2007)
- [5] Demirer, A., Soydan, Y., ve Kaptı, A.O., “ An Experimental Investigation of the Effects of Hot Runner System on Injection Moulding Process in Comparison With Conventional Runner System”, Materials and Design, **28**:1467-1476 (2007)
- [6] Oktem, H., Erzurumlu, T. ve Uzman, I. “Application of Taguchi Optimization Technique in determining Plastic Injection Molding Process Parameters for a Thin-Shell Part”, Materials and Design, **28**:1271-1278 (2007)
- [7] Tagushi, G., Konishi, S. “Tagushi Methods, Orthogonal Arrays and Linear Graphs, Tools for Quality American Supplier Institute”, American Supplier Institute, **8**: 8-35, (1987)
- [8] Gao, D.M., Nguyen, K.T., Hetu, J.F., Laroche ve D., Rejon, G. “Modeling of Industrial Polymer Process: Injection Molding and Blow Molding”, Advanced Performance Materials, **5**: 43-64 (1998)
- [9] Hieber, C.A. ve Shen, S.F. “A Finite Element/Finite Difference Simulation of Injection-Molding Filling Process”, Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, **7(1)**: 1-32 (1980)
- [10] Holm, E. J. ve Langtangen, H. P. “A Unified Finite Element Model for the Injection Molding Process”, Comput. Methods Appl. Mech. Eng., **178**, 413-429 (1999)
- [11] Zhou, H. M. ve Li, D.Q. “A Numerical Simulation of the Filling Stage in Injection Molding Based on a Surface Model”, Advances in Polymer Technology, **20(2)**:125-131, (2001)
- [12] Zhou, H., Zhang, Y. ve Li, D. Q. “Injection Molding Simulation of Filling and Post-Filling Stages Based on a Three Dimensional Surface Model”, Proceedings of Institution of Mechanical Engineers Part B-Journal of Engineering Manufacture, **204**: 475-480 (2008)
- [13] Jaworski, M. J ve Yuan, Z. “Theoretical and Experimental Comparison of the Four Major Types of Mesh Currently used in Cae Injection Molding Simulation Software”, SPE Annual Technical Conference-ANTEC, Nashville, Tennessee, 642-646, (2003)

- [14] Li, D. ve Zhou, H. “Modelling and Simulation of Residual Stress and Warpage in Injection Molding”, Proceedings of Institution of Mechanical Engineers Part C-Journal of Mechanical Engineerings Science, **218(5)**:521-530, (2004)
- [15] Cao, W., Shen, C. Y. ve Li, H. M., “Coupled Part and Mold Temperature Simulation for Injection Based on Solid Geometry ”, Polymer-Plastic Technology and Engineering, **45(6)**:741-749, (2006)
- [16] Hetu, J. F., Gao, D. M., Garcia-Rejon, A., ve Salloum, G. “3D Finite Element Method for the Simulation of the Filling Stage in Injection Molding”, Polymer Engineering and Science, **38(2)**:223-236, (1998)
- [17] Pichelin, E. ve Coupez, T. “A Taylor Discontinuous Galerkin Method for the Thermal Solution in 3D Moulding”, **178**: 153-169, (1999)
- [18] Han, R., “Three-Dimensional Simulation of Microchip Encapsulation Process”, Polymer Engineering and Science, **40**: 776-783 (2000)
- [19] Chang, R.Y. ve Yang, W.H. “Numerical Simulation of Mold Filling In Injection Molding Using a 3-D Finite Volume Approach”, Int. J. for Numerical Methods in Fluids, **37**:125-148 (2001)
- [20] Ilinca, F. ve Hetu, J. F. , “Three-Dimensional Simulation of Multi-Material Injection Molding, Application to Gas Assisted and Co-Injection Molding”, Polymer Engineering and Science, **43(7)**:1415-1427, (2003)
- [21] Chang, R.Y., Yang, W.H., Hwang, S.J. ve Su, F. “Three-Dimensional Modeling of Mold Filling in Microelectronics Encapsulation Process”, IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, **27(1)**: 200-209 (2004)
- [22] Ilinca, F., Hetu, J. F. ve Dourdour, A., “Numerical Investigation of the Flow Front Behavior in the Co-injection Molding Process”, Int. J. for Numerical Methods in Fluids, **50**:1445-1460, (2006)
- [23] Estacio, K. C. ve Mangiavacchi, N. “Simplified Model for Mould Filling Simulations using CVFEM and Unstructured Meshes”, **23**:345-361, (2007)
- [24] Han, K. H. ve Im, Y. T. “Compressible Flow Analysis of Filling and Post-Filling in Injection Molding with Phase-Change Effect”, **1(4)**:179-190, (1997)
- [25] Lee, S. C., Yang, D. Y., Ko, J. ve Youn, J. R. “Effect of Compressibility on Flow Field and Fiber Orientation During the Filling Stage of Injection Molding”, Journal of Materials Processing Technology, **70**:83-92, (1997)
- [26] Zhou, H., Yan, B. ve Zhang, Y., “3D Filling Simulation of Injection Molding Based on the PG Method”, **204**, 475-480 (2008)
- [27] Zheng, Z. S. ve Ou, X. H., “Numerical Simulation of Variation of Viscosity in Powder InjectionMolding Filling Process”, J. of Computational and theoretical Nanoscience, **5**: 1612-1617 (2008)
- [28] Tie, G., Dequn, L. ve Huamin, Z. “Three Dimensional Finite Element Method for the Filling Simulation of Injection Molding”, Engineering with Computers, **21**: 289-295, (2206)
- [29] Ishii, M. Thermo-fluid Dynamic of Two-Phase Flow, Eyrolles-x-70-06741-1, (1975)
- [30] Ubbink, O. “Numerical Prediction of Two Fluid Systems with Sharp Interfaces”, Doktora Tezi, Imperial Collage of Science, Technology and Medicine, 136 s, (1997)

- [31] Hyman, J. M. “Numerical Methods for Tracking Interfaces”, *Physica*, **12**:396-407, (1984)
- [32] Ferziger, J. H. ve Periq, M. “Computational Methods for Fluid Dynamics”, Heidelberg: Springer, (2002)
- [33] Daly, B. J., “A Technique for Including Surface Tension Effects in Hydrodynamic Calculations”, *J. Comp. Physics*, **4**: 97-117, (1967)
- [34] Hirt, C.W. ve Nichols, B.D., “Calculating Three-Dimensional Free Surface Flows in the Vicinity of Submerged and Exposed Structures”, *J. Comp. Physics*, **12**: 136-141 (1973)
- [35] Osher, S. ve Sethian, J. A “Fronts Propagating with Curvature Dependent Speed: Algorithms Based on Hamilton-Jacobi Formulations”, *J. Comp. Physics*, **79**: 12-49, (1988)
- [36] Dervieux, A. ve Thomasset, F. “A finite Element Method for Rayleigh - Taylor Instability”, IRIA-LABORIA Report, F-78150, Le Chasney, (1979)
- [37] Takizawa, A., Koshizuka, S. ve Kondo, S. “Generalization of Physical Component Boundary Fitted Co-ordinate Method for the Analysis of Free Surface Flows, *Int. J. for Numerical Methods in Fluids*, **15**:1213-1237, (1992)
- [38] Harlow, F.H. ve Welch, J. E. “Numerical Calculation of Time-Dependent Viscous Incompressible Flow of Fluid with Free Surface”, *Physic of Fluids*, **8(12)**: 2182-2189, (1965)
- [39] Hirt, C. W. ve Shannon, J. P “Free Surface Stress Conditions for Incompressible-Flow Condition”, *J. Comp. Physics*, **2**: 403-411, (1968)
- [40] Harlow, F. H., Amsden, A. A. ve Nix, J. R. “Relativistic Fluid Dynamics Calculations with Particle-in-Cell Technique”, *J. Comp. Physics*, **20**: 119-129, (1976)
- [41] Koshizuka, S., Tamako, H. ve Oka, Y., “A Particle Method for Incompressible Viscous Flow with Fluid Fragmentation”, *Computational Fluid Dynamics Journal*, **4(1)**: 29-46, (1995)
- [42] Ubbink, O. ve Issa, R.I., “A Method for Capturing Sharp Interfaces on Arbitrary Meshes”, *J. Comp. Physics*, **153**: 26-50 (1999)
- [43] Noh, W.F. ve Woodward, P. “SLIC (Simple Line Interface Calculations). *Lecture Notes in Physics*, **59**: 330-340, (1976)
- [44] Chorin, A.J., “Flame advection and propagation algorithms”. *J. Comput. Phys.*, **35**: 1-11, (1980)
- [45] Youngs, D.L. “Time-dependent multi-material flow with large fluid distortion”. *Numerical Methods for fluid Dynamics*, London: Academic Pres, 273-285, (1982)
- [46] Lötstedt, P. “A front tracking method applied to Burger's equation and two-phase porous flow”, *J. Comput. Phys.*, **47**: 211-228, (1982)
- [47] Ashgriz, N. ve Poo, J.Y. “FLAIR: Flux line-segment model for advection and interface reconstruction”, *J. Comput. Phys.*, **93**: 449-468, (1991)
- [48] Ramshaw, J.D. ve Trapp, J.A. “A numerical technique for low-speed homogeneous two-phase flow with sharp interfaces”, *J. Comput. Phys.*, **21**: 438-453, (1976)
- [49] Hirt, C.W. ve Nichols, B.D. “Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries” *J. Comput. Phys.*, **39**: 201-225, (1981)

- [50] Lafaurie, B., Nardone, C., Scardovelli, R., Zaleski, S. ve Zanetti, G. “Modelling merging and fragmentation in multiphase flows with SURFER”, *J. Comput. Phys.*, **113**: 134-147, (1994)
- [51] Davis, S.F. “Flux difference splittings and limiters for the resolution of contact discontinuities”, *Appl. Mathematics and Computation*, **65**: 3-18, (1994)
- [52] Ghobadian, A. “Development of a method for numerical simulation of flows with moving interfaces”, National Power report TEC/L/0077/M91, (1991)
- [53] Pericleous, K.A. ve Chan, K.S. “The sea method for free surface problems with heat transfer and change of phase”, *Numerical methods in multiphase flows* , , Lake Tahoe, Nevada, June 19-23, (1994)
- [54] Van Leer, B. “Towards the ultimate conservative differencing scheme. IV. A new approach to numerical convection”, *J. Comput. Phys.*, **23**: 276-299, (1977)
- [55] Leonard, B.P. “A stable and accurate convective modelling procedure based on quadratic upstream interpolation” *Comp. Meth. in Appl. Mech. and Eng.*, **19**: 59-98, (1979)
- [56] Darwish, M.S. “A new high-resolution scheme based on the normalized variable formulation”. *Numerical Heat Transfer, Part B*, **24**: 353-371,(1993)
- [57] Alrmah, M. “Numerical Investigation of Solidification”, Yüksek Lisans Tezi, ODTU Makina Mühendisliği Bölümü, Ankara, 75s, (2004).
- [58] Smarskii, A.A, Vabishchevich, P.N, Iliev, O.P ve Churbanov, A.G “Numerical simulation of convection/diffusion phase change problems-a review” *Int. J. Heat Mass Transfer*, **36**: 4095-4106, (1993)
- [59] Comini, G., Del Giudice, S., Lewis, R. W., ve Zienkiewicz, O. C. “Finite Element Solution of Non-Linear Heat Conduction Problems with Special Reference to Phase Change”, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, **8**: 613-624, (1974)
- [60] Pham, Q. T. “The Use of Lumped Capacitance in the Finite-Element Solution of Heat Conduction Problems with Phase Change”, *Int. J. Heat Mass Transfer*, **29(2)**: 285-291, (1986)
- [61] Dalhuijsen, A. J. ve Segal, A, “Comparison of Finite Element Techniques for Solidification Problems”, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, **23**: 1807-1829 (1986)
- [62] Comini, G., Nonino, C., ve Saro, O. “Performance of Enthalpy-Based Algorithms for Isothermal Phase Change”, *Numerical Methods in Heat Transfer*, **3**: 3-13 (1990)
- [63] Fachinotti, V. D., Cardona, A. ve Huespe, A. E. “A Fast Convergent and Accurate Temperature Model for Phase-Change Heat Conduction”, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, **44**: 1863-1884 (1999)
- [64] Chessa, J., Smolinski, P., ve Belytschko, T. “The Extended Finite Element Method (XFEM) for Solidification Problems”, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. **53**: 959-1977, (2002)
- [65] Gagdil, A. ve Gobin, D. “Analysis of two dimensional melting in rectangular enclosures in the presence of convection”, *J. Heat Transfer*, **106**: 20-26, (1984)

- [66] Albert, M. R. ve O'Neill, K. "Transient two-dimensional phase change with convection using deforming finite elements" Computer Techniques in Heat Transfer, Vol1. Pineridge Press, Swansea (1985).
- [67] Morgan, K. "A numerical analysis of freezing and melting with convection", Comp. Meth. Appl. Engng **28**: 275-284, (1981).
- [68] Gartling, D. K. "Finite element analysis of convective heat transfer problems with change of phase". Computer Methods in Fluids, pp. 257-284. Pentech, London (1980).
- [69] Voller, V. R., Markatos N. C. ve Cross, M. "Techniques for accounting for the moving interface in convection/diffusion phase change" Numerical Methods in Thermal Problems, **4**: 595-609. Pineridge Press, Swansea(1985).
- [70] Voller, V. R. Markatos N. C. ve Cross, M. "Solidification in convection and diffusion" In Numerical Simulations of Fluid Flow and Heat/Mass Transfer Processes, 425-432. Springer, Berlin(1986).
- [71] Voller, V.R, ve Prakash. C., "A Fixed Numerical Modeling Methodology for Convection-Diffusion Mushy Region Phase-Change Problems", Int. J. Heat Mass Transfer, **30**: 1709-1719, (1987)
- [72] Le Goff, R., Poutot, G., Delaunay, D., Fulchiron, R. ve Koscher, E. "Study and modeling of heat transfer during solidification of semi-crystalline polymers", Int. J. Heat Mass Transfer, **48**: 5417-5430, (2005)
- [73] Hieber, C. A. "Correlation for the quiescent crystallization kinetics of isotactic polypropylene and polyethylene terephlate", Polymer, **36(7)**: 1455-1467, (1995)
- [74] Yang, B., Fu, X.R, Yang, W., Huang, L., Yang, M.B. ve Feng, J.M "Numerical prediction of phase change heat conduction of injection-molded high density polyethylene thick walled parts via the enthalpy transforming model with mush zone", Polymer Engineering and Science, 1707-1717, (2008)
- [75] Cao, Y. ve Faghri, A "A numerical analysis of Stefan problems for generalized multi-dimensional phase-change structures using the enthalpy transforming model "Int. J. Heat Mass Transfer, **32**: 1289-, (1989)
- [76] Tait, P.G., "Physics and Chemistry of the Voyage H.M.S Challenger", **2(4)**, Scientific Papers LXI (1988)
- [77] Cross, M.M., "Relation between Viscoelasticity and Shear-Thinning Behavior in Liquids Rheologica", ACTA, **18(5)**, 609-614 (1979)
- [78] Periq, M, "A finite volume method for the prediction of three-dimensional flow in complex ducts". Phd Thesis, University of London, (1985).
- [79] Barth, T. J. ve Jespersen, D. "The design and application of upwind schemes on unstructured meshes", Teknik Rapor, AIAA-89-0366, AIAA 27th AerospaceSciences Meeting, Reno, Nevada, 1989.
- [80] W. Anderson ve D. L. Bonhus. An Implicit Upwind Algorithm for Computing Turbulent Flows on Unstructured Grids. Computers Fluids, **23(1)**:1 {21, 1994.
- [81] Ferziger, J.H. ve Peric, M., Computational methods for fluid dynamics. Heidelberg: Springer, (1996)
- [82] Leonard, B.P., "The ULTIMATE conservative difference scheme applied to unsteady one-dimensional advection",. Comp. Meth. in Appl. Mech. and Eng., **88**: 17-74.,(1991)

- [83] Gopala, V.R. ve van Wachern,B.G.M “Volume of fluid element for immiscible fluid and free surface flows”, Chemical Engineering Journal, **141**: 204-221, (2007)
- [84] Issa, R.I. “Solution of the implicitly discretised fluid flow equations by operator-splitting”. J. Comput. Phys., **62(1)**:. 40-65, (1986)
- [85] METIS- Serial Graph Partitioning and Fill-reducing Matrix Ordering,(2003)
- [86] Rhie C. M. ve Chow. W. L. “Numerical Study of the Turbulent Flow Past an Airfoil with Trailing Edge Separation”. AIAA Journal, **21(11)**:1525-1532, (1983)
- [87] Behrens, R.A. “Transient domain free surface flows and their application to mold filling”, Doktora Tezi, University of Delaware (1983)
- [88] Schmidt, L.R. Plastic Flow: Basic Fluid Flows and Flow Phenomena, Lecture Notes: Society of Plastic Engineers, (2003)
- [89] Beaumont, J. P., Nagel R. ve Sherman, R., Successful Injection Molding, Hanser Publ., Munich, (2002)
- [90] Moldflow, Moldflow Plastic Insight 3-D, Version 6.2, Moldflow Corporation, Wayland, MA, USA 2008
- [91] M. Buncmann, R. Theriault ve T.A. Osswald, Polymer flow length simulation during injection mold filling, Polymer Eng. and Science, **37**:667-671, (1997)
- [92] Gambit, Version2.4.6, Fluent Inc. Hampshire, USA 2006
- [93] Fluent Solver Version 6.3.26, Fluent Inc. Hampshire, USA 2006
- [94] Zhou, J., ve Turng, L., “Three-Dimensional Numerical Simulation of Injection Mold Filling with a Finite-Volume method and Parallel Computing”, Advances in Polymer Technology, **25**: 247-258 (2006)
- [95] Araujo, B.J, Teixeira, J.C.F., Cunha A.M, ve Groth, C.P.T., “Parallel three-dimensional Simulations of the Injection Molding Process”, International Journal for Numerical Methods in Fluids, **59**: 801-815, (2008)

## ÖZGEÇMİŞ

28 Temmuz 1981 yılında Malatya ili Darande ilçesinde doğdum. İlköğrenimimi Darande Mehmet İzzet Paşa ilköğretim okulunda ortaöğrenimimi Darande Lisesi, Malatya Kuluncak Lisesi ve Mersin Gazi Lisesi olmak üzere farklı okullarda sürdürdüm. 2005 yılında Ortadoğu Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünden mezun olduktan sonra askerlik hizmetimi tamamladım. 2006 yılında TEMSA A.Ş.'de çalışmaya ve Mersin Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümünde yüksek lisans eğitimime başladım. 2007 yılından beri aynı bölümde araştırma görevlisi olarak çalışmaktayım.