

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YENİ NESİL ENJEKSİYON MAKİNESİNİN VE KALIBININ
GELİŞTİRİLMESİ

Deniz SÖNMEZ

DOKTORA TEZİ
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
İmal Usulleri Programı

Danışman
Prof. Dr. Ayşegül AKDOĞAN EKER

Haziran, 2022

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YENİ NESİL ENJEKSİYON MAKİNESİNİN VE KALIBININ
GELİŞTİRİLMESİ

Deniz SÖNMEZ tarafından hazırlanan tez çalışması 22.06.2022 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı İmal Usulleri Programı **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Ayşegül AKDOĞAN EKER
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Ayşegül AKDOĞAN EKER, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Adnan DİKİCİOĞLU, Üye
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Mihriğül ALTAN, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Celaletdin ERGUN, Üye
İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç.Dr. Bedri Onur KÜÇÜKYILDIRIM, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi

Danışmanım Prof. Dr. Ayşegül AKDOĞAN EKER sorumluluğunda tarafımca hazırlanan Yeni Nesil Enjeksiyon Makinesinin Ve Kalıbının Geliştirilmesi başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Deniz SÖNMEZ

İmza

*Eşime
ve biricik kızım Arya'ya*



TEŞEKKÜR

Tez çalışması boyunca desteklerini esirgemeyen değerli danışman hocam, sayın Prof. Dr. Ayşegül Akdoğan EKER'e, bilgi, tecrübe ve önerilerinden faydalandığım, tez izleme komitesi üyeleri, değerli hocalarım, Prof. Dr. Adnan DİKİCİOĞLU ve Prof. Dr. Mihriğül ALTAN hocalarıma, çok değerli öneri ve bilgi paylaşımlarından dolayı sayın Prof.Dr. Celaletdin ERGUN hocama teşekkürü borç bilirim. Deneysel çalışmaların gerçekleştirilmesine olanak sağlayan Üstün Plastik A.Ş. firmasından Alim ÇİFTÇİ ve çok değerli, sayın Mahmut Sefa BERKE Bey'e, çalışmada kullandığım Moldflow yazılımı için desteklerini esirgemeyen MF Software TR firmasından sayın Hakan Aktaş'a, Ansys yazılım ile ilgili desteklerinden ötürü sevgili arkadaşım Onur Erdoğan'a teşekkür ederim. Tezimi tamamlamam için günlük motivasyon konuşmaları ile destek olan değerli babama, gösterdikleri sabır ve destekleriyle hep yanımda olan, canım kızım ve eşime teşekkür ederim.

Deniz SÖNMEZ

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ	viii
KISALTMA LİSTESİ	x
ŞEKİL LİSTESİ	xi
TABLO LİSTESİ	xiv
ÖZET	xv
ABSTRACT	xvi
1 GİRİŞ	1
1.1 Literatür Özeti	1
1.1.1 Çalışmalara Genel Bakış	1
1.1.2 ICM Yönteminde Parametre Optimizasyonu	6
1.1.3 ICM Metodu için Malzeme Seçimi	7
1.1.4 ICM için Literatürde Kullanılan Malzemelerin Karakteristik Özellikleri	10
1.1.5 Sıkıştırılmalı Enjeksiyon Kalıplamada Kalıp Özellikleri	13
1.2 Tezin Amacı	18
1.3 Hipotez	19
1.4 Araştırma ve Analiz Yöntemi	19
2 POLİMER MALZEMELER	21
2.1 Polimerlerin Özellikleri ve Sınıflandırılması	21
2.2 Camı Geçiş ve Erime Sıcaklıkları	24
2.3 Plastiklerin Kalıplanma Metotlarına Genel Bakış	26
2.3.1 Basınçlı (sıkıştırılmalı) kalıplama	26
2.3.2 Transfer kalıplama	27
2.3.3 Vakum (termoforming) kalıplama	28
2.3.4 Şişirmeli kalıplama yöntemi	29
2.3.5 Döner (döndürmeli) Kalıplama	30
2.3.6 Ekstrüzyon kalıplama	30

2.3.7	Enjeksiyon kalıplama	31
3	SIKIŞTIRMALI ENJEKSİYON KALIPLAMAYA GENEL BAKIŞ	33
3.1	Sıkıştırılmalı Enjeksiyon Kalıplama Metodolojisi	33
3.2	ICM Metodu Akış Analizinde Temel Proses Parametreleri	36
3.2.1	Enjeksiyon Aşaması	36
3.2.2	Sıkıştırma Aşaması	39
4	ICM METODUNDA KALIP İÇİ AKIŞIN MATEMATİKSEL İFADESİ	41
4.1	Korunum Denklemleri	42
4.1.1	Süreklilik Denklemleri	43
4.1.2	Momentum Denklemleri	44
4.1.3	Enerji Denklemleri	47
4.2	Arbitrary Lagrange-Eulerian (ALE) Tekniği	48
4.2.1	Korunum Denklemlerinin İntegral Formu	49
4.3	Hele-Shaw Modeli	50
4.4	Viskozite Modeli	54
4.4.1	Modifiye-Cross Modeli - Williams-Landel-Ferry (WLF)	54
4.4.2	2 Alanlı Tait pVT Denklemi	55
4.5	Nümerik Analiz	56
4.5.1	Sonlu Fark Yöntemi (FDM)	56
4.5.2	Sonlu Hacim Yöntemi (FVM)	57
4.5.3	Sonlu Eleman Yöntemi (FEM)	59
4.6	ICM Yöntemi için Nümerik Analiz Metotlarına Genel Bakış	59
4.7	Hele-Shaw Modelinin Çözümünde Hibrid Metotların Kullanılması	60
4.8	Sonlu Kontrol Hacmi Yöntemi	62
4.9	Mesh Güncellemesi	67
4.10	Kalıntı Gerilmelerin Hesaplanması	68
4.10.1	Enjeksiyon Kalıplamada Kalıntı Gerilmeler	69
4.10.2	Sıkıştırılmalı Enjeksiyon Kalıplama için Kalıntı Gerilmeler	71
5	NÜMERİK ANALİZ VE PARAMETRE OPTİMİZASYONU	77
5.1	Kalıp İçİ Akış Analizinde Kullanılan Modelin Özellikleri	77
5.2	IM ve ICM için Nümerik Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması	84
5.3	Optimum Ayarlarla ICM Sayısal Simülasyonun Gerçekleştirilmesi	94
5.4	Kalıntı Gerilmeler	97
5.5	Taguchi Metodu ile Parametre Optimizasyonu	101
5.5.1	Nümerik Analiz Sonuçlarına Göre Taguchi Analizi	101
5.5.2	Proses Faktörlerinin Etkileri	105

6 DENEYSEL ÇALIŞMA	112
6.1 Malzeme ve Deneysel Kurulum	112
6.1.1 Sayısal ve Deneysel Sonuçlar için Çarpılma Değerlerinin Karşılaştırılması	114
6.1.2 Basma Deneyleri ve Sonuçlarının Değerlendirilmesi	119
6.1.3 Basma Deneylerinin Nümerik Analiz Sonuçları ile Karşılaştırılması	122
7 SONUÇ VE ÖNERİLER	125
KAYNAKÇA	129
TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR	134



SİMGE LİSTESİ

p	basınç
$\mathbf{I}$	birim vektör
F_o	Fourier sayısı
η	genelleştirilmiş Newton viskozitesi
C_{ijrs}	gerilme-gerinim tensörü
ε	gerinim tensörü
$\mathbf{v}$	hız vektörü
k	ısı akısı vektörü
β	ısıl genleşme katsayısı
κ	ısıl iletkenlik
h	ısı transfer katsayısı
$\Delta e_{ij}^{(k)}$	iterasyon k için, artımlı doğrusal gerinim tensörü
$\Delta e_{rs}^{ini(k)}$	iterasyon k için artımlı ilk gerinim tensörü
$\delta \Delta \eta_{ij}^{(k)}$	iterasyon k için doğrusal olmayan artımlı gerinim tensörü
$\dot{\gamma}$	kesme oranı tensörü
V	kontrol hacmi içindeki eriyik dolgulu hacim
f	kontrol hacminin doldurma parametresi
τ_s	Newtonian akış gerilmesi
C_p	sabit basınçta özgül ısı
$\delta \Delta \eta_{ij}^{(k)}$	sanal artımlı yer değiştirmeye karşılık gelen doğrusal olmayan artımlı gerinim tensörü
$\delta \Delta e_{ij}^{(k-1)}$	sanal artımlı yer değiştirmeye karşılık gelen lineer artımlı gerinim tensörleri
Q_c	sıkıştırma ile ortaya çıkan toplam erime akış hızı

T	soğutucu akışkan sıcaklığı
$t+\Delta t S_{ij}^{(k-1)}$	$t + \Delta t$ zamanında iterasyondan $(k - 1)$ sonra ikinci Piola-Kirchhoff gerilme gerinim tensörü
σ	toplam gerilme tensörü
Δ_e	üçgen elemanın e alanı
τ	viskoz gerilme tensörü
ρg	yer çekimi kuvveti
g	yerçekimi vektörü
ρ	yoğunluk

KISALTMA LİSTESİ

ALE	Arbitrary Lagrange-Eulerian
IM	Enjeksiyon Kalıplama / Injection Molding
CV	Kontrol Hacmi / Control Volume
FEM	Sonlu Elemanlar Metodu / Finite Element Method
FDM	Sonlu Fark Metodu / Finite Difference Method
FVM	Sonlu Hacim Metodu / Finite Volume Method
ICM	Sıkıştırılmalı Enjeksiyon Metodu / Injection Compression Molding
ANOVA	Varyans Analizi / Analysis of Variance

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1	Araştırmalarda kullanılan farklı geometrideki parçalar	8
Şekil 1.2	Konik hizalamanın kullanıldığı ICM kalıp tasarımı [28]	14
Şekil 1.3	Sızdırmazlığın bir düz hizalama ile sağlandığı kalıp [20]	14
Şekil 1.4	ICM metodu için hareketli kalıbın çalışma prensibi [1]	15
Şekil 1.5	Basınç ve gerinim ölçer sensörlerinin uygulandığı ICM kalıbı [24] . .	15
Şekil 1.6	Hareketli kalıbın dişi (1,2) ve erkek (3,4) tarafta olduğu kalıp tasarımları	16
Şekil 1.7	4 + 4 gözlü bir ICM kalıbı	17
Şekil 1.8	Netstal Elion 2800-2000 enjeksiyon makinesi	17
Şekil 1.9	Çalışmada kullanılan araştırma yöntemi akış şeması	20
Şekil 2.1	Polimerlerde amorf ve kristal yapı şematik gösterimi [29]	21
Şekil 2.2	İçyapılarına göre polimerlerin sınıflandırılması	22
Şekil 2.3	Plastik malzemeler ve mekanik özellikleri [30]	24
Şekil 2.4	Yarı kristal ve amorf malzemelerin erime ve yumuşama davranışı [31] .	25
Şekil 2.5	Basıncı (sıkıştırılmalı) kalıplama	26
Şekil 2.6	Transfer kalıplama yönteminin şematik gösterimi	27
Şekil 2.7	Vakum (termoforming) kalıplama	28
Şekil 2.8	Şişirmeli kalıplama yöntemi şematik gösterimi	29
Şekil 2.9	Döner (döndürmeli) Kalıplama	30
Şekil 2.10	Ekstrüzyon Kalıplama	31
Şekil 2.11	Enjeksiyon kalıplama makinasının temel elemanları	32
Şekil 2.12	ICM yöntemi	32
Şekil 3.1	Sıkıştırılmalı enjeksiyon kalıplama metodunun şematik gösterimi . . .	34
Şekil 3.2	Sıkıştırılmalı enjeksiyon kalıplama döngüsü için kalıp boşluğu içindeki basınç değişimi	35
Şekil 3.3	Enjeksiyon basıncı ve süresi arasındaki ilişki	37
Şekil 3.4	Enjeksiyon basıncı ve sıcaklığın enjeksiyon süresi ile olan ilişkisi . . .	38
Şekil 4.1	Temel akışkan tipleri	42
Şekil 4.2	Kütle korunumu	43
Şekil 4.3	Momentum korunumu	44
Şekil 4.4	Eriyik ve hava akışı şematik gösterimi	46

Şekil 4.5	Birim kontrol hacmindeki enerji korunumu	47
Şekil 4.6	Hele-Shaw modelini tanımlayan akışın şematik olarak gösterimi [41]	50
Şekil 4.7	İki boyutlu elemanter bir eleman üzerinden giren ve çıkan akış	51
Şekil 4.8	1D(a), 2D(b)ve 3D(c) sonlu fark ayrıklaştırmasının şematik gösterimi [41]	57
Şekil 4.9	2D hesaplamalı etki alanının ve ağın şematik gösterimi [47]	58
Şekil 4.10	Köşe merkezli FVM'de (a, b) ve hücre merkezli FVM'de (c, d) ağ ve çift ağ [48]	58
Şekil 4.11	Genel çok yüzlü kontrol hacmi ve kullanılan gösterim [6]	62
Şekil 4.12	Sıkıştırma aşamasında, erime hareketi ve ağ hareketi arasındaki ilişkinin şematik gösterimi [13]	65
Şekil 4.13	Hareket eden düğümlerin ve düğüm yer değiştirme dağılım istatistiklerinin iz grafiği; a) Enjeksiyon kalıplama, b) % 50 enjeksiyon hacmi ve 0.2 s sıkıştırma durumu [10]	76
Şekil 5.1	Simülasyonda kullanılan gıda ambalajının geometrik boyutları	78
Şekil 5.2	Simülasyonda kullanılan gıda ambalajının Moldflow'da sonlu eleman ağı	80
Şekil 5.3	PP BJ356MO için sıcaklık ve kayma hızının bir fonksiyonu olarak viskozite (Moldflow)	82
Şekil 5.4	PP BJ356MO Moblen hammaddesine ait ısı iletkenlik grafiği (Moldflow)	82
Şekil 5.5	PP BJ356MO Moblen (Moldflow) için $p \nu T$: Farklı basınçlarda sıcaklık / özgül hacim diyagramı	83
Şekil 5.6	Kalıp boşluğunun dolum süreleri; a)IM, b)ICM	84
Şekil 5.7	Ön akış sıcaklık dağılımı; a) IM, b)ICM	85
Şekil 5.8	Beş nokta için ön akış sıcaklık dağılımı; a)IM, b)ICM	85
Şekil 5.9	IM ve ICM için yoğunluk profili; a)IM, b)ICM	86
Şekil 5.10	Doldurma sırasında kalıp boşluğundaki basınç dağılımı; a)IM, b)ICM	87
Şekil 5.11	Kesme hızı için kalıp akışı analizi, maksimum; a)IM, b)ICM	87
Şekil 5.12	İşlem boyunca hem IM hem de ICM için enjeksiyon konumunda hesaplanan basınç profilleri; a)IM, b)ICM	88
Şekil 5.13	Simüle edilmiş kenetlenme kuvveti profillerinin karşılaştırılması; a)IM, b)ICM	89
Şekil 5.14	Kalıp boşluğu tamamen plastik ile dolduğu andaki basınç dağılımı; a)IM, b)ICM	90
Şekil 5.15	Dolum sonundaki basınç dağılımının beş nokta üzerinden gösterimi; a)IM, b)ICM	90
Şekil 5.16	Hacimsel kendini çekme profilleri; a)IM, b)ICM	91
Şekil 5.17	Beş nokta için hacimsel kendini çekme profilleri; a)IM, b)ICM	92

Şekil 5.18 Arttırılmış skala oranına bağlı olarak parça üzerindeki çarpılma değerleri; a)IM, b)ICM	93
Şekil 5.19 ICM için sıkıştırma aşaması	94
Şekil 5.20 Doldurma ve doldurma sonrası fazları için basınç dağılımları	95
Şekil 5.21 ICM için kritik parametre sonuçları; a) Basınç, b) Kenetlenme kuvveti c) Sıkıştırma hızı, d) Sıkıştırma kuvveti, e) Kalıp boşluk hacmi, f) Sıkıştırma mesafesi	96
Şekil 5.22 Tetrahedral eleman sayısının temel proses parametrelerine etkisi; a) 531283 tetrahedral eleman b) 1152422 tetrahedral eleman	98
Şekil 5.23 Tetrahedral eleman sayısının hacimsel kendini çekme ve çarpılmaya olan etkisi; a) 531283 tetrahedral eleman b), 1152422 tetrahedral eleman	99
Şekil 5.24 ICM yöntemi için Mises-Hencky gerilme sonuçları	100
Şekil 5.25 Mises-Hencky gerilme sonuçları; a)IM, b)ICM	101
Şekil 5.26 Proses parametrelerinin çarpılma için ortalama S / N oranı üzerine etkisi	106
Şekil 5.27 Proses parametrelerinin çarpılma için ortalama S / N oranı üzerine etkisi	107
Şekil 5.28 Maksimum çarpılma için kalıntı gerilmeleri	110
Şekil 5.29 Proses faktörlerinin etkileşim grafiği	111
Şekil 6.1 Enjeksiyon kalıplama makinesi	113
Şekil 6.2 ICM Kalıp Elemanları	114
Şekil 6.3 FARO 3D tarama teknolojisi ve numune	115
Şekil 6.4 FARO 3D tarama teknolojisinde kullanılan yazılım ve oluşturulan 3D parça geometrisi	115
Şekil 6.5 Deney 1-2-3-4-5-6 için deneysel sonuçlar	116
Şekil 6.6 Nümerik analizde ortaya çıkan çarpılma sonuçları	117
Şekil 6.7 Deneysel ve simülasyon çalışmaları için p1 noktasındaki çarpılma değerlerinin karşılaştırılması	118
Şekil 6.8 Basma deney düzeneği	119
Şekil 6.9 Basma deneyi sonuçları	120
Şekil 6.10 Basma deneyi ve maksimum kuvvetler	121
Şekil 6.11 Altı deney tasarımı için basma deneyi sonuçları	122
Şekil 6.12 Young (E) modülünün belirlenmesinde ISO 527 standartının kullanılması	123
Şekil 6.13 Simülasyonda kullanılan gıda ambalajının sonlu eleman ağı	124
Şekil 6.14 Basma deformasyonunun uygulanması ile elde edilen analiz sonuçları	124

TABLO LİSTESİ

Tablo 1.1	ICM yönteminde kullanılan malzemeler ve geometrik özellikleri . .	8
Tablo 1.2	Malzeme seçiminde önemli karakteristik özellikler	12
Tablo 2.1	Termoplastiklerin kullanım alanları	23
Tablo 2.2	Plastiklere ait camsı geçiş sıcaklıkları [33]	25
Tablo 3.1	ICM prosesinin avantajları ve sınırları	35
Tablo 5.1	BJ356MO Moblen (100MFI) malzemesinin fiziksel özellikleri	79
Tablo 5.2	BJ356MO Moblen malzemesinin IM ile kalıplanmasında kullanılan parametre değerleri	79
Tablo 5.3	Çapraz WLF Viskozite Modeli katsayıları	81
Tablo 5.4	Deney faktörleri ve seviyeleri (ICM)	102
Tablo 5.5	Deney faktörleri ve seviyeleri (IM)	102
Tablo 5.6	L18 ortogonal dizilim (ICM)	103
Tablo 5.7	L18 ortogonal dizilim (IM)	103
Tablo 5.8	Çarpılma deney sonuçları ve S/N oranı değerleri (ICM)	104
Tablo 5.9	Çarpılma deney sonuçları ve S/N oranı değerleri (IM)	105
Tablo 5.10	ICM için S / N yanıt tablosu	106
Tablo 5.11	IM için S / N yanıt tablosu	107
Tablo 5.12	Parçanın çarpılma değerleri için ANOVA sonuçları (ICM)	108
Tablo 5.13	Parçanın çarpılma değerleri için ANOVA sonuçları (IM)	108
Tablo 6.1	Si-450-6S JH750D (2015 Model) enjeksiyon makinası	113

Yeni Nesil Enjeksiyon Makinesinin Ve Kalıbının Geliştirilmesi

Deniz SÖNMEZ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Doktora Tezi

Danışman: Prof. Dr. Ayşegül AKDOĞAN EKER

Enjeksiyon kalıplama (IM), plastik parçaların üretiminde yaygın olarak kullanılan bir üretim metodudur. Ancak, daha yüksek boyutsal hassasiyet ve optik performans ile düşük kalıntı gerilmeleri ihtiyacı, bir hibrit üretim metodu olan Sıkıştırılmalı Enjeksiyon Kalıplama (ICM) yönteminin ortaya çıkmasına yol açmıştır. ICM yönteminin, düşük enjeksiyon basıncı ve kenetlenme kuvveti, kalıp içi homojen basınç dağılımı gibi avantajları, özellikle optik malzemelerin üretiminde dikkat çekmesini sağlamıştır. Çalışmada, akış analizleri Moldflow yazılımı aracılığıyla gerçekleştirilerek, simülasyon sonuçları IM ve ICM yöntemlerini karşılaştırmak için kullanılmış ve ICM yönteminin, IM'e göre üstünlükleri ortaya çıkarılmıştır. Eriyik sıcaklığı, kalıp sıcaklığı, sıkıştırma basıncı ve sıkıştırma mesafesi gibi proses parametrelerinin kalıplanmış bir Polipropilen parçanın çarpılma davranışı üzerindeki etkileri Taguchi analizi ile araştırılmıştır. Simülasyon ve Taguchi analizi sonuçları ile elde edilen çarpılma değerleri, deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak, ICM için, simülasyon ve deneysel çalışmalarından elde edilen çarpılma değeri sonuçlarının, birbirleriyle iyi bir uyumluluk gösterdiği bulunmuştur.

Anahtar Kelimeler: İnce cidarlı polimerik parçalar, sıkıştırılmalı enjeksiyon kalıplama, Taguchi analizi, ANOVA

Development of New Generation Injection Molding Machine and Mold

Deniz SÖNMEZ

Department of Mechanical Engineering

Doctor of Philosophy Thesis

Supervisor: Prof. Ayşegül AKDOĞAN EKER

Injection molding (IM) is a production method that is widely used in the production of plastic parts. However, the need for high dimension accuracy and optical performance with residual stress-free polymeric parts has led to the emergence of a hybrid manufacturing method, Injection Compression Molding (ICM). The advantages of the ICM method, such as low injection pressure and clamping force, and homogeneous pressure distribution in the mold cavity, have made it particularly attractive in the production of optical materials. In the study, flow analyses were performed and the simulation results were used to compare the IM and ICM methods, and reveal the superiority of the ICM over IM. The effects of process parameters, namely melt temperature, mold temperature, compression pressure, and compression distance, on warpage behavior of a molded Polypropylene part were investigated by Taguchi analysis. The obtained warpage results with optimum process parameters were compared with experimental measurements to test the validation of the simulation model of ICM. As a result, it was found that the numerical simulations of the ICM show good compatibility with experimental measurements for comparison of warpage.

Keywords: Thin-walled polymeric parts, injection compression molding, Taguchi design, Analysis of Variance (ANOVA), numerical simulation

1.1 Literatür Özeti

ICM metodu için yapılan literatür taramasında, deney numunesi olarak, 5 mm'den 1800 mm'ye kadar çok farklı boyutlarda düz ve dairesel plakalar kullanıldığı, malzeme türü olarak çoğunlukla optik ürünlerin temel malzemesi olarak seçilen Polimetil metakrilat (PMMA) ile az da olsa Polipropilen, Polisitren, ABS gibi termoplastik malzemeler tercih edildiği görülmüştür. Genel olarak incelendiğinde araştırmacılar, parçaların, kalıntı gerilmelerini, çekme ve çarpılma gibi kalite özelliklerini etkileyen farklı faktörleri araştırarak, ICM ile elde edilen ürünlerin performansını arttırmanın çeşitli yollarını incelemişlerdir. Literatür araştırmasında özellikle, eriyik sıcaklığı ve kalıp yüzey sıcaklığı, sıkıştırma kuvveti ve sıkıştırma mesafesi gibi parametrelerin proses çıktıları üzerindeki etkileri Taguchi metodu uygulanarak incelenmiştir.

1.1.1 Çalışmalara Genel Bakış

Hong ve arkadaşlarının [1] çalışma konusu, makro ölçekli ince plaka yüzeyinde düzenli olarak oluşturulmuş mikro ölçekli desenlerin, enjeksiyon ve sıkıştırmalı enjeksiyon kalıplama metotları ile karşılaştırılmasıdır. IM ve ICM ile elde edilen mikro modelin kopyalama oranları deneysel olarak ölçülmüş ve sonuç olarak en etkili faktörlerin enjeksiyon basıncı ve polimer sıcaklığı olduğu bulunmuştur.

Young [2] çalışmasında, sıkıştırmalı enjeksiyon kalıplama metoduyla üretilen pikap lensinin üzerinde oluşan kalıntı gerilmeleri ve çekme payını incelemiştir. Sıkıştırmalı enjeksiyon kalıplama ile elde edilen parçalarda, kalıntı gerilmelerin davranışının erime sıcaklığı, kalıp sıcaklığı, sıkıştırma basıncı ve zaman gibi farklı işlem parametrelerinden etkilendiği belirtilmiştir. Ayrıca, akış simülasyonunda kullanılan kalıp duvarının ısı transfer katsayısının etkisi de tartışmaya açılmıştır. Küçük lens boyutu sebebiyle sıkıştırma kuvvetinin parça üzerindeki etkisi azalırken, kalıp sıcaklığı, kalıp duvarındaki ısı transferi ve sıkıştırma süresinin kalıntı gerilme dağılımının ve kalınlıktaki çekme oranını etkilediği ifade edilmiştir. Daha yüksek

kalıp sıcaklığı ve kalıp duvarındaki daha yavaş soğumanın, kalıntı gerilme dağılımını homojenleştirildiği kanıtlanmıştır. Yine, sıkıştırma süresinin de kalıntı gerilme dağılımına ve kalınlığın daralmasına olumlu katkı sunması için optimize edilmesi gerektiği belirlenmiştir.

Guan ve Huang [3] sıkıştırmalı enjeksiyon kalıplama esnasında, geri eriyik akışının parça kalınlığı dağılımı üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Deneysel analizler kullanılarak, parça kalınlığı stabilitesinin, erime sıcaklığı ve sıkıştırmaya bağlı proses faktörlerinden (sıkıştırma kuvveti, sıkıştırma darbesi ve sıkıştırma hızı) önemli ölçüde etkilendiği, ancak enjeksiyon oranından çok daha az etkilenmiş olduğu ileri sürülmüştür. Ayrıca, genelleştirilmiş Hele-Shaw akış simülasyonu ile parça kalınlığı dağılımında hakim olan mekanizma araştırılmış ve geri akışın simülasyon sonuçlarının, kalınlık dağılımı ile ilişkilendirilmesi sağlanmıştır.

Han ve arkadaşları [4], yüksek basınçlı gaz vanasının önemli bir bileşeni olan kalın plastik gövdenin, geleneksel enjeksiyon kalıplama ile üretiminde bölgesel boşluk probleminin ortaya çıktığını tespit etmişlerdir. Bu problemin üstesinden gelebilmek adına, sıkıştırmalı enjeksiyon kalıplama metodu ile plastik gövde üretiminin gerçekleştirilmesi için bir çalışma yapılmıştır. Enjeksiyon kalıplama ve sıkıştırmalı enjeksiyon kalıplama metotlarının kalıp içi akış özellikleri 3-D termal akış analizleri ile karşılaştırılmıştır. Deneysel çalışmalarla elde edilen numuneler, X-ışını fotoğrafları ve numunelerin kesme düzlemleri kullanılarak incelenmiştir. Çalışmalar sonucunda, sıkıştırmalı enjeksiyon kalıplama yöntemi ile parçadaki iç boşluk problemlerinin tamamen ortadan kaldırıldığı ispatlanmıştır.

Kwon [5], ince ve büyük polimerik batarya kutusunun üretilmesi için ICM metodunu kullanmıştır. Çalışmada, ICM yöntemi ile geleneksel enjeksiyon kalıplama yöntemleri sayısal olarak karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak, ICM metodunun, nispeten düşük bir doldurma basıncına ihtiyaç duyduğu ve bunun da nihai ürünlerin çekmesi ve çarpılmasını azalttığı tespit edilmiştir.

Zhang ve diğerleri [6], sıkıştırma aşamasında hareketli sınır akış problemini modellemek için Arbitrary Lagrange-Eulerian (ALE) metodunu sunarak, ICM yöntemine özgü bir 3D akış simülasyon yöntemi geliştirmişlerdir. Çalışmada, simülasyonlar aracılığıyla IM ve ICM metotlarının akış özellikleri karşılaştırılmıştır. ICM metodu için Hele-Shaw metodunun değil, 3D akış metodunun geçerli olduğu, geri akışın, ICM metodunun akış düzeninde ve kavite basıncının yeniden dağılımında önemli bir rol oynadığı ve parça kalitesi üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu ve hem IM hem de ICM metodunun çeşitli parametrelerinin geri akışı etkilediği belirlenmiştir.

Han ve Jin [7] çalışmalarında termoplastik malzemeler için sıkıştırılmalı enjeksiyon kalıplama işleminin üç boyutlu bir simülasyon programı kullanarak analizini gerçekleştirmişler. Enjeksiyon basıncı, sıkıştırma kuvveti ve boyutsal kararlılık bakımından, normal enjeksiyonla kalıplanmış parçalar, sıkıştırılmalı enjeksiyon kalıplama ile elde edilmiş parçalarla karşılaştırılmıştır. Çalışmada geliştirilen simülasyon programının sonuçları, enjeksiyon sıkıştırma işleminin doğru bir şekilde kontrol edilmesiyle, enjeksiyon basıncının, kenetlenme kuvvetinin ve parçada meydana gelen çarpıklığın geleneksel enjeksiyon kalıplama işlemine kıyasla önemli ölçüde azaltılabileceği gösterilmiştir.

Theriault ve Posunski [8] izotermal olmayan sıkıştırılabilir bir akış modeli kullanarak, ICM prosesinin sıcaklık ve basınç alanlarını modellemek için bir hibrit sonlu eleman / sonlu fark yöntemi kullanmışlardır. CD-R için simülasyon sonuçlarından elde edilen enjeksiyon basıncı ve kalıp yer değiştirmesi, optik dereceli bir polikarbonat kullanılarak yapılan deneysel gözlemlerle karşılaştırılmıştır. Simülasyonun, eriyik sıcaklığı, kalıp sıcaklığı ve paketleme basıncı gibi çeşitli işlem parametrelerinin bağımlılığına ilişkin deneysel gözlemler ile benzer eğilimler gösterdiği tespit edilmiştir.

Hu ve arkadaşları [9] ışık kılavuzu plakası (LGP) modelleri için izotermal olmayan sıkıştırılmalı enjeksiyon kalıplama metodunu simüle etmişlerdir. Bu amaçla Sonlu Hacim Metodu (FVM) tabanlı algoritma ile gerçek bir 3D model kullanılmış ve çeşitli proses parametrelerinin etkileri incelenmiştir. Sonuç olarak, ICM ile boşluk basıncı dağılımının, IM'de olduğundan daha düşük olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, basınç dağılımının ICM'de daha homojen olduğu ve ICM ile kalıplanan parçalarda daha düşük hacimlerde çekme ve daha iyi ürün kalitesi elde edildiği ortaya çıkarılmıştır.

Li ve arkadaşları [10] düzensiz geometrik şekilli şeffaf bir plastik panel için, ICM sürecini simüle etmişlerdir. Çalışmada sıcaklığın ve basıncın 3D modeli ile birleştirilmiş bir hesaplama yöntemi kullanılmıştır. Yöntemin, sadece 3D akışı, sıcaklığı ve basıncı çok daha gerçekçi bir şekilde yeniden kurmakla kalmadığı, aynı zamanda 3D fiber akış çizgisinin (FFL) uzunluğunu, çekme hızının ve homojenizasyon sürecinin değişimini daha iyi gösterebildiği öne sürülmüştür. ICM ile elde edilen parçalarda, klasik enjeksiyon kalıplamaya göre çekme oranının önemli ölçüde azaldığı, çekme ve çarpılma kaynağı olan FFL uzunluğunun daha kısa olduğu, parça yüzeyinde daha eşit sıcaklık dağılımı sebebiyle düşük kalıntı gerilmesi ve çekmelerin olduğu gösterilmiştir.

Lee ve arkadaşları [11] büyük boyutlu polimer plakların çarpılma özelliklerini araştırmak için enjeksiyon kalıplama ve sıkıştırılmalı enjeksiyon kalıplama yöntemlerinin karşılaştırmasını yapmışlardır. Sıkıştırılmalı enjeksiyon kalıplama

metodu kullanılması ile parça üzerinde oluşan çarpılma değerlerinin önemli ölçüde azaltılabildiği vurgulanmıştır.

Kwon ve Song [12] çalışmalarında, ince cidarlı polimerik parçaların, IM yöntemi ile üretim sürecini araştırırken, enjeksiyon kalıplama işlemini sayısal olarak modellemiş ve deneysel olarak kalıplamışlardır. Ayrıca, parçaları imal etmek için sıkıştırılmalı enjeksiyon kalıplama yöntemi de kullanılmış ve sonuçta ortaya çıkan kalıntı gerilme ve çarpılma sonuçları değerlendirilmiştir. Sayısal sonuçları doğrulamak için kalıplanmış parçanın çift kırılması analiz edilmiştir.

Cao ve arkadaşları [13] yaptığı çalışmada, sıkıştırma aşamasındaki akışı tetikleyen gerilmenin karmaşık olması sebebiyle, akışı etkili bir şekilde tanımlamak için, teorik model, üç boyutlu sıkıştırılabilir olarak kurulmuş, denklemler Gauss formülü kullanılarak türetilmiş ve karma elemanlarla akış değişkenlerini ayırmak için sonlu elemanlar yöntemi kullanılmıştır. Çalışmanın sayısal sonuçları ile, sıkıştırılmalı enjeksiyon kalıplamanın, geleneksel enjeksiyon kalıplama ile karşılaştırıldığında, akışla indüklenen gerilmeyi önemli ölçüde azaltabileceğini, sıkıştırma hızının artırılmasının, akışla indüklenen gerilme büyümesine sebep olduğunu ve yüksek sıcaklığın akışla oluşturulan gerilmeyi azalttığı gösterilmiştir.

Sortino ve çalışma arkadaşlarının [14] yaptığı çalışmada, fresnel lenslerine özgü, optik, termoplastik mikro ölçekli prizma modellerinin üretimi için, klasik enjeksiyon kalıplama (IM) ile sıkıştırılmalı enjeksiyon kalıplama (ICM) ve vakum enjeksiyon kalıplama (VIM) metodları kullanılmış ve her üç yöntem birbiriyle karşılaştırılmıştır. Toplamda, özel proses parametreleri dahil olmak üzere 288 test için bir deney tasarımı gerçekleştirilmiş ve sonuçta ICM ile üretilen parçaların, üç enjeksiyon kalıplama metodolojisi içinde en hassas ve tekrarlanabilir kaliteye sahip olduğu kanıtlanmıştır.

Qi ve arkadaşları [15] eriyik sıcaklığı, enjeksiyon hızı, kalıp sıcaklığı, sıkıştırma mesafesi ve sıkıştırma hızı parametrelerini kullanarak oluşturdukları deney tasarımı ile bir ışık kılavuzu plakasının (LGP) çarpılmasını incelemişlerdir. Sonuç olarak, ürünlerin çarpılmasını etkileyen en önemli faktörün, eriyik sıcaklığı olduğu simülasyon ve deneysel çalışmalarla gösterilmiştir.

Ho ve arkadaşları [16] üç boyutlu bir geometrinin, ICM ile simülasyonu için bir sonlu elemanlar yöntemi (FEM) ve bir Arbitrary Lagrange-Eulerian (ALE) yöntemi kullanan üç boyutlu bir sayısal analiz sistemi ve bunun deneysel olarak doğrulanması üzerine çalışmışlardır. ICM simülasyonundan elde edilen sonuçlar, IM işleminin sonuçlarıyla karşılaştırılmış ve ICM işleminin genelleştirilmiş kesme hızının ve son parçanın kesme gerilmesini azalttığı ve daha düzgün dağılımı ile sonuçlandığı gösterilmiştir. Ayrıca sıkıştırma hızı ve sıkıştırma boşluğu gibi işlem parametrelerinin etkilerini anlamak

için temel parametrik çalışmalar da yürütülmüştür.

Liu ve Lin [17], erime sıcaklığı, kalıp sıcaklığı, eriyik dolum basıncı, kısa atış boyutu, paketlenme basıncı, sıkıştırma basıncı ve soğuma süresi gibi çeşitli proses parametrelerinin, termoplastik kama şekilli plakaların boyutsal kalitesi üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Taguchi ortogonal dizi tasarımına dayanan deneysel bir çalışma ile kısa atım büyüklüğü ve eriyik sıcaklığının, parçaların boyutsal doğruluğunu etkileyen ana parametreler olduğu belirtilmiştir.

Chen ve arkadaşları [18], ICM süreci boyunca, enjeksiyon eriyik dolumu, sıkıştırma sırasında eriyik cephesi ilerlemesini ve basınç, sıcaklık ve akış hızı dağılımlarını dinamik olarak tahmin etmek için bir kontrol-hacim/sonlu eleman yöntemiyle birleştirilmiş bir Hele-Shaw akışkan akış modeli geliştirmişlerdir. Polimer eriyiğinin termal-mekanik geçmişi izlenerek kısmi hacimsel çekme araştırılmış, sıkıştırma hızı, enjeksiyondan sıkıştırmaya geçiş süresi, sıkıştırma stroku ve parça kalınlığı gibi işlem parametrelerinin parça çekmesi üzerindeki etkisi, bir disk parçasının simülasyonları ile ortaya çıkarılmıştır. Sonuçlar IM ile karşılaştırıldığında, ICM metodunun sadece parça çekmesini azaltmada önemli bir etki göstermediği, aynı zamanda IM metoduna kıyasla tüm parça içinde, çok daha üniform bir çekme sağladığı belirlenmiştir. Fakat daha yüksek bir geçiş süresi, daha düşük sıkıştırma hızı ve daha yüksek sıkıştırma stroku kullanılması, daha düşük bir kalıplama basıncı ile sonuçlanabilmesine rağmen, sıkıştırma-tutma aşamasında, sıkıştırma basıncı aynı olduğunda, parça çekmesi üzerinde belirgin bir etki göstermediği tespit edilmiştir. Doldurma sonrası aşamada, aynı sıkıştırma basıncı altında daha düşük bir geçiş süresi, daha yüksek sıkıştırma hızı ve daha düşük sıkıştırma strokunun kullanılmasının, doldurma aşamasının sonunda ortaya çıkan erime sıcaklığı etkisi nedeniyle parça çekmesi üzerinde bir iyileşme ile sonuçlandığı görülmüştür.

Huang ve Chung [19] V oluklu mikro özelliklere sahip ışık kılavuzlu levhaları imal etmek için enjeksiyon kalıplama ve sıkıştırmalı enjeksiyon kalıplama fizibilitesini araştırmışlar ve kovan sıcaklığı, kalıp sıcaklığı, paketlenme basıncı ve paketlenme süresi gibi işlem parametrelerinin kalıplama kalitesi üzerindeki etkilerini incelemek için Taguchi yöntemi ve parametrik analiz yöntemini uygulamışlardır. Kovan sıcaklığı ve kalıp sıcaklığının artırılması, genellikle, mikro boyutlardaki boşluklarda, polimer eriyik dolumunu geliştirdiği belirtirken, ICM ile çoğaltılan V oluklu mikro geometrilerin yüksekliğinin, IM ile çoğaltılanlardan çok daha iyi boyutsal doğrulukta çıktığı öne sürülmüştür.

Lee ve Yoo [20] sıkıştırmalı enjeksiyon kalıplama deneyleri için kısmi kalıp açma durumunda, eriyik sızıntısını önlemek için, kapalı olacak şekilde tasarlanmış bir kalıp

geliştirmişlerdir. Kalıp sıkıştırması sırasında eriyik geri akışının boşluk basıncına etkilerini araştırmak için, kalıba bir valf yerleştirilmiştir. Buna göre, büyük sıkıştırma aralığında, sıkıştırma aşamasına geçiş sırasında, giriş yakınındaki basıncın önemli ölçüde düştüğü, sıkıştırma hızının düşmesi ile de kalıp iç basıncının azaldığı ve tüm kalıp boyunca uniform hale geldiği tespit edilmiştir. Ayrıca, daha büyük sıkıştırma aralığının, parça kalınlığını arttırdığı, ancak sıkıştırma hızının kalınlık üzerindeki etkisinin çok az olduğu belirtilmiştir.

Bu ve arkadaşları [21] yaptıkları bu çalışmada, sıkıştırmalı enjeksiyon kalıplama teknolojisinin karakteristiğini ve plastik optik lensin kalıp yapısı ile çalışma prensibini anlatmışlardır. Çalışma ile enjeksiyon işlemindeki gerilme problemi çözülmüş, deformasyon problemi ve ürünün boyutsal doğruluğu geliştirilmiştir.

Parça kalitesine odaklanılan çalışmalar dışında, kalıntı gerilme dağılımı [22] ile parça dayanımını ilişkilendiren araştırmalar da yapılmıştır. ICM yöntemi uygulandığında kalıp içindeki basınç ve sıcaklık değerlerinin deneysel olarak belirlenmesi ve sayısal sonuçlarla karşılaştırılması da oldukça önemlidir. Buna göre yapılan bir başka çalışmada, ICM yönteminin önemli avantajlarından olan kalıp içi basınçlarındaki düşüşü ortaya çıkarabilmek için [23] parametre olarak sıkıştırma hızı ve mesafesi kullanarak, basınç üzerindeki etkileri sayısal ve deneysel olarak ortaya çıkarılmıştır. Yine çalışmalardan birinde, doldurma ve sıkıştırma aşamasında kalıp yüzeyinde oluşan gerilmelerin ve basıncın anlık olarak izlenmesi [24] ve parça kalite kontrolü için çevrimiçi geri bildirim sağlanabilmektedir.

1.1.2 ICM Yönteminde Parametre Optimizasyonu

Sıkıştırmalı enjeksiyon kalıplamada, hammadde özellikleri, kalıp tasarımı, proses koşulları ve kontrolü ile tüm proses faktörleri ve faktörlerin değerleri, kalıplanmış ürünün, boyutsal doğruluğuna ve nihai kalitesine olumlu ya da olumsuz katkıda bulunur. Her faktör arasındaki sıkı fakat karmaşık etkileşimin belirlenmesi, elde edilen ürünün istenilen özelliklere sahip olmasında büyük önem taşımaktadır. Ayrıca, tüm üretim süreci için gereken maliyet analizinde de faktörlerin etkisi, seviyeleri ve birbirileri ile olan etkileşimlerinin dikkate alınması gerekmektedir. Dolayısıyla hem maliyet hem de ürün özelliklerinin optimum seviyede olması üretimin temel hedeflerindendir. Optimum parametre değerlerinin belirlenmesinde kullanılan farklı metotlar olsa da yaygın kullanımı, kolay anlaşılabilir olması, güvenilir ve hızlı çözüm sunması ile Taguchi metodu, literatürde ICM ile ilgili yapılan birçok çalışmada uygulanmıştır. Taguchi metodu, parametre optimizasyonu için basit, verimli ve sistematik bir yaklaşım sunmaktadır. Taguchi metodunda, deney tasarımı tekniği ile yapılacak deney sayısı azaltılırken, kullanılan parametrelerin sisteme etkisi

belirlenebilmektedir.

Özellikle optik parçalar için yapılan çalışmalarda, kırınım açısının karşılaştırılması, ürün kalitesi ve optik verimliliğin artırılması amacıyla Taguchi metodu uygulanmıştır. Taguchi yöntemi ile parametrik analiz uygulanarak, erime sıcaklığı, enjeksiyon hızı, enjeksiyon basıncı, kalıp sıcaklığı, sıkıştırma hızı ve süresini kullanarak, IM ve ICM metotları karşılaştırılmış, farklı ortogonal dizilimlere sahip deney tasarımları yapılmıştır [14, 25]. Deney tasarımında, seçilen faktörlerin seviyeleri genellikle 3-7 arasında değişiklik gösterirken, L9, L16, L18, L27 ortogonal dizilime sahip deney tasarımları oluşturulmuştur [3, 16, 17, 25, 26].

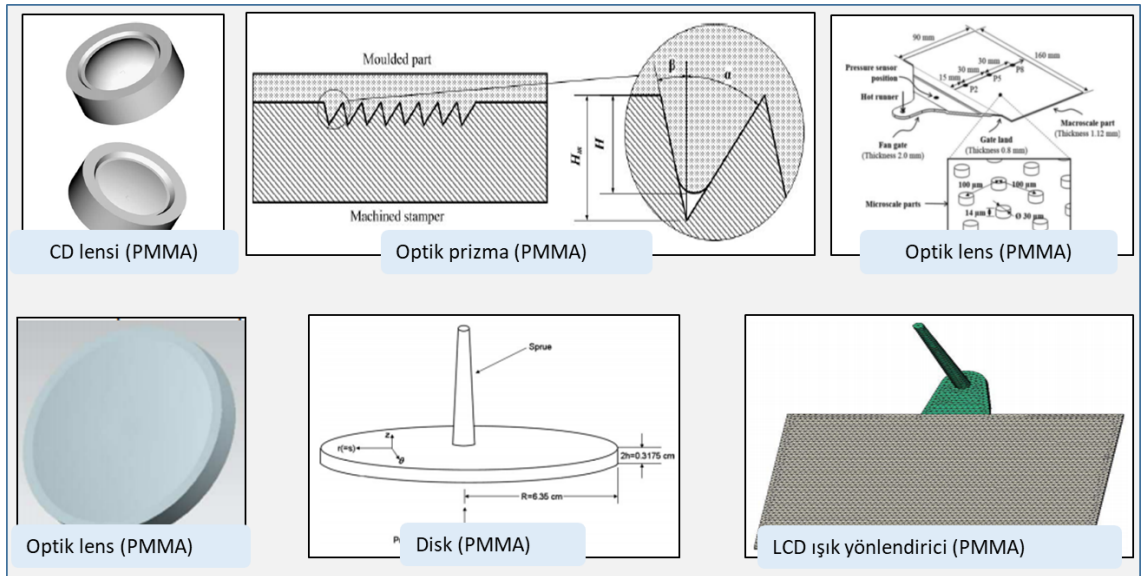
1.1.3 ICM Metodu için Malzeme Seçimi

Plastik malzemelerin, enjeksiyon metotları ile kalıplanmasında iyi sonuçlar elde edebilmek için, seçilen plastiğin yoğunluk, elastikiyet ve plastisite, homojenlik özellikleri ile kalıplama için gerekli ergime sıcaklığı, çekme, mukavemet ve optik özellikleri gibi karakteristikleri dikkate alınması gerekmektedir. Bir hibrit metot olarak ortaya çıkan ICM yönteminde de kullanılan plastiğin fiziksel özellikleri, proses sonunda elde edilecek ürünün özellikleri ile doğrudan ilişkilidir. ICM, boyutsal hassasiyet ve optik performans ile kırınım ızgarası lensi ve ışık kılavuzu gibi optik parçaların üretiminde bilinen bir teknolojidir [24]. ICM metodu için kullanılabilecek çok sayıda malzeme seçeneği bulunurken, her birinin kendine özgü avantajları bulunmaktadır. Literatür araştırmasında, özellikle optik parçalar için yaygın olarak PMMA malzemesinin kullanıldığı görülürken, boyutları daha büyük ve kalın parça geometrilerinde ise ABS, PC, PS ve bir çalışmada da PP tipi termoplastik malzeme kullanıldığı tespit edilmiştir. ICM yöntemi kullanılarak yapılan çalışmalardan bazılarında kullanılan malzeme tipleri ve parçaların geometrik özellikleri Tablo 1.1’de verilmiştir.

Tablo 1.1 ICM yönteminde kullanılan malzemeler ve geometrik özellikleri

Yayın Tarihi	Referans	Malzeme	Boyut	Geometrik şekil
2017	20	ABS	104x64x2 mm ³	2D plaka
2012	29	ABS	250x80x40 mm ³	2D plaka
2018	9	PC	200x100x7 mm ³	2D plaka
2011	10	PC	90x120x1 mm ³	2D plaka
2003	11	PC	120x1.2 mm ²	2D disk
2013	15	PC	85x100 mm ²	2D plaka
2018	17	PC	0.31 mm	2D plaka
2016	19	PC	552x280x20 mm ³	2D plaka
2012	22	PC	48x36x0.3 mm ³	2D plaka
2018	8	PC ve ABS	-	2D plaka
2019	12	PMMA	-	2D plaka
2015	1	PMMA	160x90x1.12 mm ³	2D plaka
2005	2	PMMA	5 mm çap	2D disk
2003	5	PMMA	86x65.5x4 mm ³	2D plaka

Araştırmalarda kullanılan farklı geometrideki parçalar ağırlıklı olarak dairesel veya düz plakalardan oluşmaktadır. Sadece bir çalışmada [4] sıkıştırma kuvvetine paralel bir geometri için çalışma yapılmıştır, ancak silindirik 3 boyutlu bu parça, bir gaz vanası parçası olarak kullanıldığı için kalınlığı oldukça fazladır ve geometrik doğruluktan ziyade iç boşlukların incelendiği bir çalışmanın konusu olmuştur. Şekil 1.1’de farklı araştırmalara ait numuneler gösterilmiştir.

**Şekil 1.1** Araştırmalarda kullanılan farklı geometrideki parçalar

1.1.3.1 Akrilonitril/Bütadien/Stiren kopolimeri (ABS)

Gövde panelleri, kamyonların yan rüzgarlıkları, panoramik sunrooflar, arka yan camlar, TV arka panelleri, muhafazalar, tamponlar, arka ışıklar ve arka kapılar gibi daha yüksek yüzey alanına sahip büyük parçaları üretmek için geleneksel enjeksiyon kalıplama yöntemi kullanılsa da, çok büyük bir basınç ve sıkıştırma kuvveti gerektirir. Bu nedenle ince et kalınlığına sahip parçalar için kullanılan CYCOLAC™ MG94 ticari kodlu ABS malzeme tipi, ICM metodunda tercih edilmiş ve üniform kalınlığa sahip düz bir plaka için uygulanmıştır [27]. Farklı bir çalışmada, yine ICM metoduyla, ticari olarak temin edilebilen, elektrik-elektronik ile otomotiv iç ve dış muhafaza parçalarında kullanılan, ABS (XR 404 / LG Chemical) ile deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir [20].

1.1.3.2 Polikarbonat (PC)

Geometrik ve optik özelliklerinin iyi olması nedeniyle çalışmalarda Polikarbonatın (PC)'ın sıkça tercih edilen bir malzeme olduğu gözlemlenmiştir. 0.3 mm'den 20 mm'ye kadar kalınlığa sahip ve uzunluk ile genişlikte sırasıyla minimum 36 mm ve maksimum 552 mm geometrik ölçülerine sahip parçalar tercih edilmiştir. Optik / lens mercek pazarına hitaben kullanılan Subic OQ2720 ticari isimli Polikarbonat, sıkı üretim kontrol koşulları ile cam kadar iyi netlik sunan bir malzeme çeşididir ve 7 mm kalınlığında bir parça ile ICM metodunda kullanılmıştır [6]. Yine, LCD panelde kullanılan bir ışık kılavuzu plakasının kalıplanmasını simüle etmek için PC malzemesi kullanılmıştır [7]. Bir başka PC malzemesi uygulaması, optik sektöründeki parçalar için kullanılırken [8], iyi mekanik ve optik özellikler elde edebilmek için gerçekleştirilen bir simülasyonda da ince et kalınlığına sahip parçalar için saydam Polikarbonat (PC) bir panel seçilmiştir [10]. Küçük ve büyük bateri kutularının üretilmesi için yapılan çalışmalar ile ışık klavuz plakası (LGP) denemelerinde de PC malzemesi tercih edilen bir malzeme tipi olmuştur [5, 12, 15]. Zhang [5] ve Oh [12] çalışmalarında, SABIC Corporation (CYCOLOYCX7240) ticari kodlu, polikarbonat (PC) ve akrilonitril bütadien stiren (ABS) kopolimeri ile harmanlanmış malzeme kullanmıştır. Bu malzeme, standart PC / ABS karışımlarına kıyasla gelişmiş kimyasal dirence sahiptir ve ince et kalınlıklı parça uygulamaları için iyi bir aday olarak kabul edilmiştir. Şeffaf ve yarı saydam renklerinin mevcut olduğu, göz ile ilgili lens pazarı için Sabic OQ 2720 ticari kodlu PC malzemesi, iki farklı çalışmada büyük ve kalın (7 – 20 mm) parçaların denemelerinde kullanılmıştır [6, 13, 15]. Işık yönlendirmesi için elektrik-elektronik sektöründe kullanılan PC malzemesi (Iupilon HL-4000 ticari kodlu), et kalınlığı 0.3 mm olan bir ışık kılavuz plakasının şekillendirilmesinde kullanılmıştır [15]. Seçilen tüm plastiklerin çeşitlerinin yoğunlukları, marka fark etmeksizin, 1.2 g/cm³ iken, MFR değerleri ise

Sabic OQ 2720 için 7.5, CYCOLOYCX7240 için 18, ve son olarak Iupilon HL-4000 için 63 g/10dk. olarak verilmiştir. MFR değerinin en yüksek olduğu PC Iupilon HL-4000, çok ince et kalınlığı olan (0.3 mm) parça geometrisi için seçilmiştir.

1.1.3.3 Polimetil Metakrilat (PMMA)

Sıkıştırılmalı enjeksiyon kalıplama çalışmalarında sıkça kullanılan PMMA malzemesinin seçilmesinin en önemli nedeni, mükemmel şeffaflığı ve optik işlevlerinin olmasıdır. PMMA, yüksek foto geçirgenliği, iyi boyutsal kararlılık, yüksek tekrarlamaya doğruluğu, düşük kırılma indisi ve mükemmel mekanik özellikler gibi üstün özelliklere sahiptir. PMMA, otomotiv sektöründe tasarımcılar için önem arz ettiğinden dolayı, aydınlatma ve elektronik parçalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. PMMA malzemesi, optik alanına sunduğu avantajlar nedeniyle, mikro optik cihazlar [14], DVD pikap lensi ve optik lens [2, 21, 25] ve farklı boyutlardaki dairesel ve dikdörtgen plakalar [1, 22], LCD [26], ışık klavye plakaları [9, 19] gibi, yüksek boyutsal hassasiyet istenilen ürünlerin deneysel ve sayısal analizlerinin yapıldığı çalışmalarda kullanılmıştır.

1.1.4 ICM için Literatürde Kullanılan Malzemelerin Karakteristik Özellikleri

Çalışmalarda, farklı ticari marka ürünleri kullanılsa da ISO 1183 standardına göre belirlenen yoğunluklar 1.18 ile 1.20 g/cm³ değerleri arasında tutulmuştur. Standart olarak ASTM D 1238 temel alınarak ortaya çıkarılan MFI değerleri ise 1.8 ile 10 g/10dk. arasındadır. Küçük boyutlu parçalarda, maksimum 2.8 g/10dk. MFI değeri olan ticari kodlu ürünler kullanılırken, parça boyutları büyüdükçe MFI değerleri 10 g/10dk. olarak seçilmiştir.

Hong ve arkadaşlarının [1] kullandığı Mitsubishi Rayon PMMA TF8 malzemesi, ışık yönlendirici panellerde ticari olarak kullanılmaktadır. 160 mm, 90 mm ve 1.12 mm genişlik, uzunluk ve nominal kalınlıkta mikropatternleri, sırasıyla 30 µm ve 14 µm'lik bir çap ve yüksekliğe sahip silindirik olarak şekillendirilmiş ve desenler arasında 100 µm'lik boşluk olan levha şeklinde bir parça geometrisi için ICM metodu uygulanmıştır. Seçilen malzemenin MFR değeri 10.0 g/10dk.'dır.

Bir ışık kılavuzu plakası (LGP) modeli için kullanılan, PMMA'nın ticari ismi KURARAY GH-1000s kodlu ürünü, optik özelliklerinin iyi olması, akışkanlığı ve aktarılabilirliği, ışık kılavuzlarında kullanıma uygun olması nedeniyle tercih edilmiştir. MFR değeri 10 g/10dk. olan bu plastik, ışık kılavuzu plakası (LGP) için yapılan deneysel çalışmalarda kullanılmıştır [9, 19].

Bir başka ICM metodu uygulaması için, otomobil aydınlatma optik parçalarında

yine yaygın olarak kullanılan bir PMMA sınıfı, Altuglas PMMA V825 T malzemesi kullanmıştır. Altuglas V825T LPL, iyi optik performanslar ve ışık yönlendirmesi nedeniyle, otomotivde güçlü estetik tasarımlar yaratmakta kullanılmaktadır [14]. Yine otomotiv sektöründe geniş kullanım alanı bulan, 7 mm çaplı DVD pikap lensi için Wu ve Chen [25] tarafından çalışmalarında kullanılan malzeme, 1.8 g/10dk. akış indeksine sahiptir.

1.1.4.1 Polioksietilen Metilen (POM)

Han ve arkadaşları [4] KEPITAL F10-03H sınıfı poliasetal (POM: Poly Oxy Methylene) malzemesini kullanarak yüksek basınçlı gaz vanasının önemli bir parçası olan kalın plastik gövdenin üretimi için sıkıştırılmalı enjeksiyon metodunu denemişlerdir.

1.1.4.2 Polipropilen (PP)

Polipropilen'in, literatür taramasında sadece, 1800x600x12 mm³ ve 1200x600x12 mm³ gibi büyük boyutlu, beton kalıbı olarak işlev gören, düz bir plaka için kullanıldığı belirlenmiştir. Lee ve arkadaşları [11] yaptıkları bu çalışmada, ağırlık olarak % 30 cam elyaf içeren cam elyaf takviyeli polipropilen (PP / GF, Thermocomp MEV-1006, LNP Engineering Plastic, ABD) malzemesinden, büyük boyutlu ortogonal sertleştirilmiş plastik levhaların, enjeksiyon ve sıkıştırılmalı enjeksiyon kalıplama ile üretilmesinde faydalanmışlardır.

1.1.4.3 Polistiren (PS)

PG-33 kodlu PS (Zhenjiang Chimei Chemical Co.), birbirinden farklı kalınlıkta (1.5–2 mm) ve farklı kenar uzunluklarında, deney numuneleri için kullanılmış, çalışmalarda kullanılan parçaların biri hariç (optik lens) işlevsel özelliği belirtilmemiştir. PG-33'ün MFR değeri 7.9 ve 8.5 g/10dk. olarak verilirken, yoğunlukları 0.94 ile 1.05 g/cm³ arasında değişmiştir [3, 16, 18, 23, 24]. Genel amaçlı olarak kullanımı bulunan polistiren (PS), PG-33 kodlu ürün ile aynı MFR ve yoğunluk değerlerine sahipken, likit kristal ekran (LCD) denemelerinde kullanmıştır [17]. Çalışmalarda, ticari isim ve kodları ile verilen farklı malzemelerin, enjeksiyon ve sıkıştırılmalı enjeksiyon kalıplama yöntemlerinde kullanılan önemli karakteristik özellikleri Tablo 1.2'de verilmiştir.

Tablo 1.2 Malzeme seçiminde önemli karakteristik özellikler

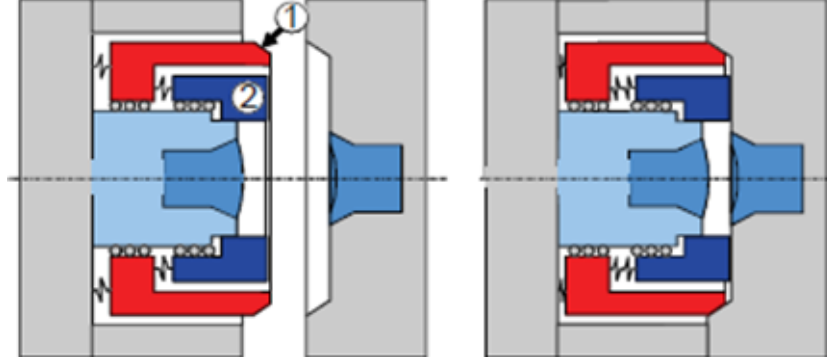
Referans	Ticari İsmi	Uygulama alanı	MFR g/10 min (ASTM D1238)	Erime sıcaklığı °C	Yoğunluk (g/cm ³ -ISO 1183)
20	CYCOLAC™ MG94(ABS)	Otomotiv	11.7	205-245	1.06
29	XR 404 / LG Chemical(ABS)	Otomotiv elek.elektr.	7	220-240	1.05
9	Subic OQ2720(PC)	Optik lens	7.5	310-330	1.2
17	CYCOLOYCX7240 (PC)	Büyük batırı kutusu	18	250-300	1.2
19	Subic OQ2720 (PC)	Optik lens	7.5	310-330	1.2
22	Iupilon HL-4000 (PC)	Işık kılavuzu plakası (LGP)	63	280 - 360	1.2
8	CYCOLOYCX7240 (PC ve ABS)	Batırı kutusu	18	250 - 300	1.2
14	KURARAY GH-1000s (PMMA)	Işık kılavuzu plakası (LGP)	10	-	1.19
21	Altuglas V825T LPL (PMMA)	Mikro optik	2.8 (ISO 1133)	230-250	1.19
24	ACRYREX CM-205 (PMMA)	DVD pickup lens	1.8	210-250	1.20
28	KURARAY GH-1000s(PMMA)	Işık kılavuzu plakası (LGP)	10	-	1.19
7	KEPITAL F10-03H(POM)	Gaz vanası	3	170-210	1.41
16		Beton kalıbı	-	-	-
3	CHI MEI/PG33 (PS)	-	8.5	185-210 (Makale)	1.05
6	CHI MEI/PG33 (PS)	-	8.5	240 (Makale)	1.05
25	CHI MEI/PG33 (PS)	Optik lens	8.5	-	0.94
26	Genel amaçlı PS	Likit kristal ekran (LCD)	8.5	180-260	1.05
27	CHI MEI/PG33 (PS)	-	8.5	-	0.94
Çalışma	BJ356MO	Paketleme endüstrisi	100 (ISO 1133)	220- 260	0.905

1.1.5 Sıkıştırılmalı Enjeksiyon Kalıplamada Kalıp Özellikleri

ICM yönteminde kalıbın tasarımında dikkat edilmesi gereken en önemli hususlar, kalıbın dişi ve erkek tarafının merkezlenmesi ve plastik enjeksiyonu sonrası sızıntı olmasını önlemek için kalıp aralığının mühürlenmesidir. Dolayısıyla deneysel çalışmalar öncesi, kalıp elemanlarının seçimi, boyutlandırılması ve kalıp tasarımının nümerik metotlarla doğrulaması oldukça önem arz etmektedir. Bunun için, yolluk, dağıtıcı kanal, soğutma kanalları gibi ana kalıp elemanlarının boyutsal özelliklerinin belirlenmesi ve elemanların fonksiyonlarını tam olarak yerine getirip getirmediğinin ortaya çıkarılması için Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD) simülasyon programlarından yararlanılabilmektedir. Sıkıştırılmalı enjeksiyon kalıplama metodunda kalıp tasarımı, hem geleneksel enjeksiyon kalıplama hem de sıkıştırılmalı enjeksiyon kalıplama metodolojisine uyumlu ve değiştirilebilir insertlerden oluşacak şekilde tasarlanıp üretilebilmektedir. Ayrıca, farklı kalıp tabanları kullanılarak hem enjeksiyon kalıplama hem de sıkıştırılmalı enjeksiyon kalıplama denemeleri aynı kalıpta gerçekleştirilip modülerlik gereksinimi karşılanabilmektedir [25]. Kalıp tasarımındaki bu tercih, enjeksiyon kalıplama ve sıkıştırılmalı enjeksiyon kalıplama yönteminin aynı şartlar altında karşılaştırılmasını mümkün hale getirdiğinden, literatür incelemesinde, yapılan çalışmalarda kullanıldığı görülmüştür.

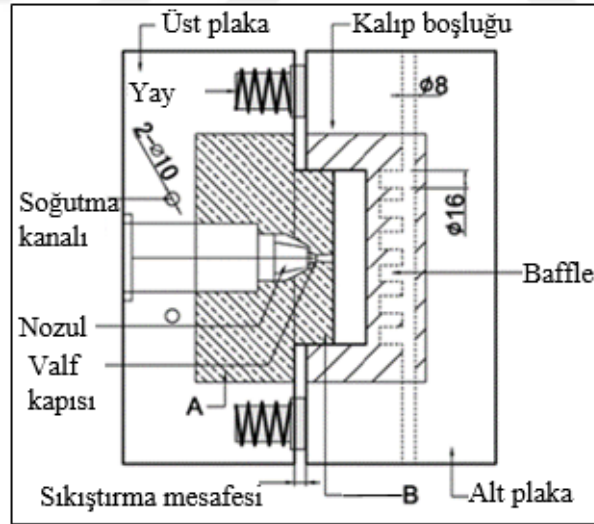
Sıkıştırılmalı enjeksiyon kalıplama (ICM) metoduna özgü yapılan kalıplar arasında çok büyük farklar olmadığı ve daha çok polimer sızıntısına engellemek için tasarımların gerçekleştirildiği görülmüştür. Sıkıştırma mesafesi nedeniyle hareketli ve sabit kalıp arasında bırakılan boşluğun, çevrim süresi boyunca her hangi bir eriyik sızıntısına izin vermeden prosesi tamamlaması gerekmektedir. Kalıpta yaşanacak bir kaçağın, kalıp içi basıncın düşmesine, uygulanan kuvvetlerde sapmalara, parça nihai geometrisinde eksikliğe ve geometrik saplamalara neden olması kaçınılmaz hale gelmektedir.

Şekil 1.2’de optik lens üretimi için kullanılan, kalıp insertlerinin kalıp tabanına yerleşiminin konik hizalamayla gerçekleştirildiği kalıp tasarımı şematik olarak gösterilmiştir [28].



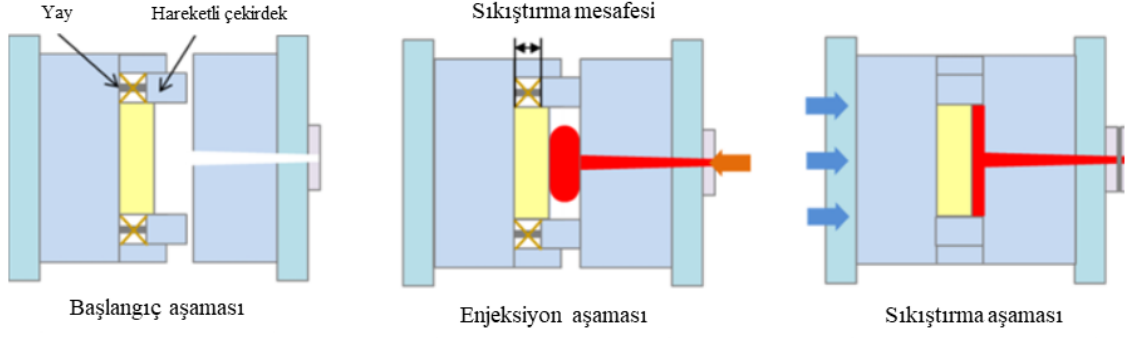
Şekil 1.2 Konik hizalamanın kullanıldığı ICM kalıp tasarımı [28]

Şekil 1.3’de ise kalıbın besleme ünitesi, kalıbın erkek tarafına monte edilmiş ve sızdırmazlığı, düz hizalama tasarımı ile sağlamış bir örnek gösterilmiştir. Eriyiğin sıcaklığını sabit tutmak, geri akışı engellemek amacıyla sıcak yolluklu bir valf kullanılmış ve üst plakada 10 mm çapında iki soğutma kanalı açılmıştır. Sıkıştırma sonrası geri dönüş hareketi, kalıbın B tarafı boyunca kayarak, üst plakaya (B) monte edilmiş dört yay ile sağlanmıştır [20].



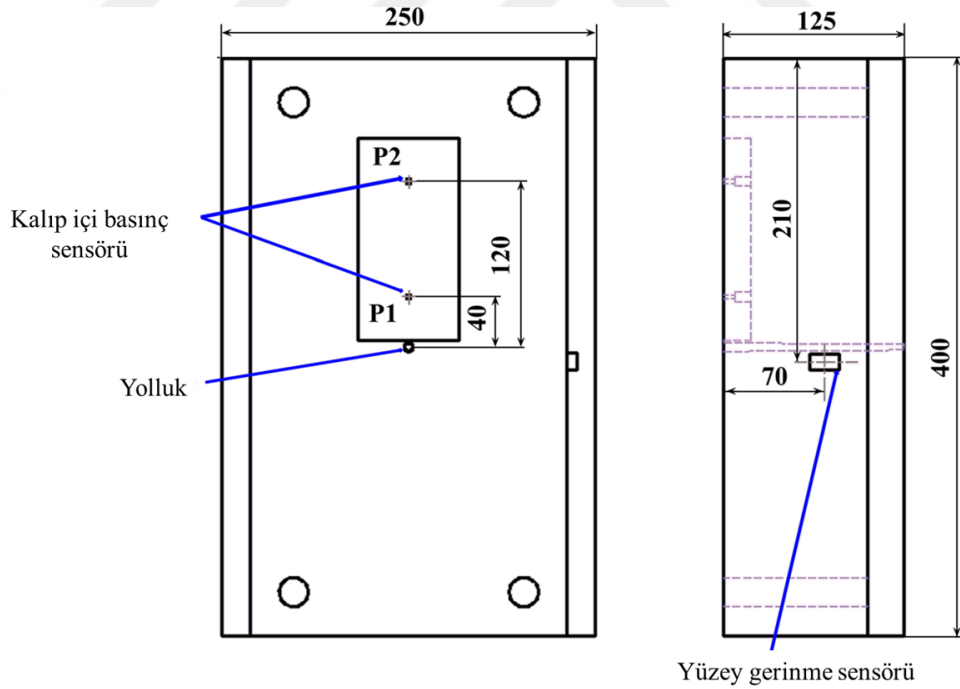
Şekil 1.3 Sızdırmazlığın bir düz hizalama ile sağlandığı kalıp [20]

Hong ve arkadaşları [1] kalıp sızdırmazlığını, birbirine geçen kalıp yarıları yerine yüzeyleri birbirine oturan hareketli ve sabit kalıp yarıları ile sağlamışlardır. Şekil 1.4’te gösterildiği üzere, bir yay mekanizması ile hareketli kalıp tabanına monte edilmiş sızdırmazlık elemanları, yay kuvvetinin etkisi ile sabit kalıp yüzeyine baskı uygulayarak hammadde sızıntısını engellemektedir.



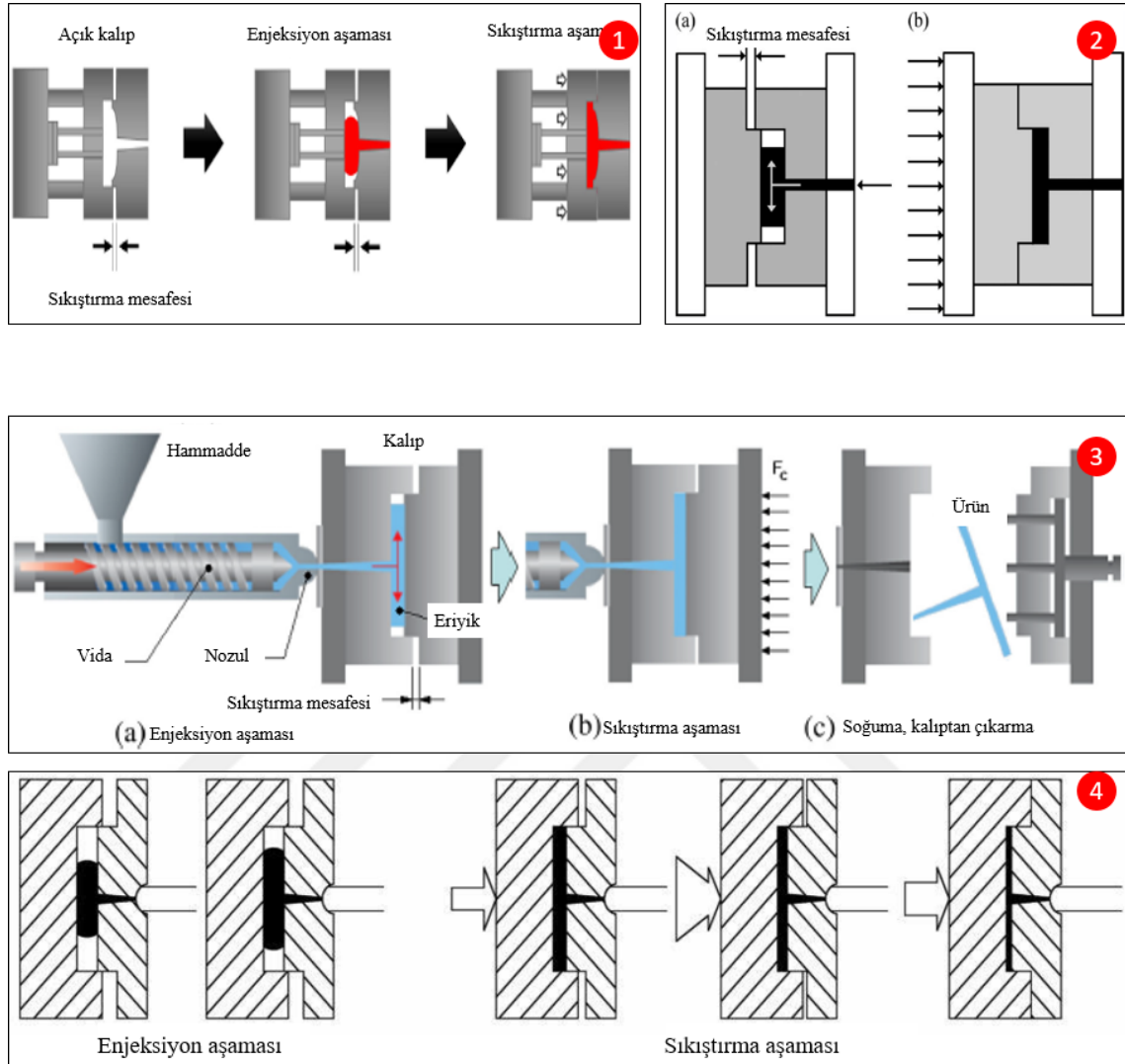
Şekil 1.4 ICM metodu için hareketli kalıbın çalışma prensibi [1]

Kalıp içine yerleştirilen basınç ve sıcaklık sensörleri ile enjeksiyon ve sıkıştırma aşamaları boyunca kalıp içi basınç ve sıcaklık değişimlerinin gözlemlendiği çalışmalar da bulunmaktadır. Bunlardan biri Şekil 1.5'te gösterildiği gibi kalıplama sırasında gerinim değerlerini incelemek için, sabit kalıp yarısının dış yüzeyine bir piezoelektrik yüzey gerinim sensörü (9232A, Kistler) uygulanırken, basınç ölçümü içinse, 50 Hz'lik örnekleme hızıyla veri toplanan iki adet piezoelektrik basınç sensörü (6190BA, Kistler) monte edilmiştir [24]. Böylece kalıp yüzeyinde oluşan gerilme değerleri ile basınç seviyeleri deneysel olarak takip edilebilir hale getirilmiştir.



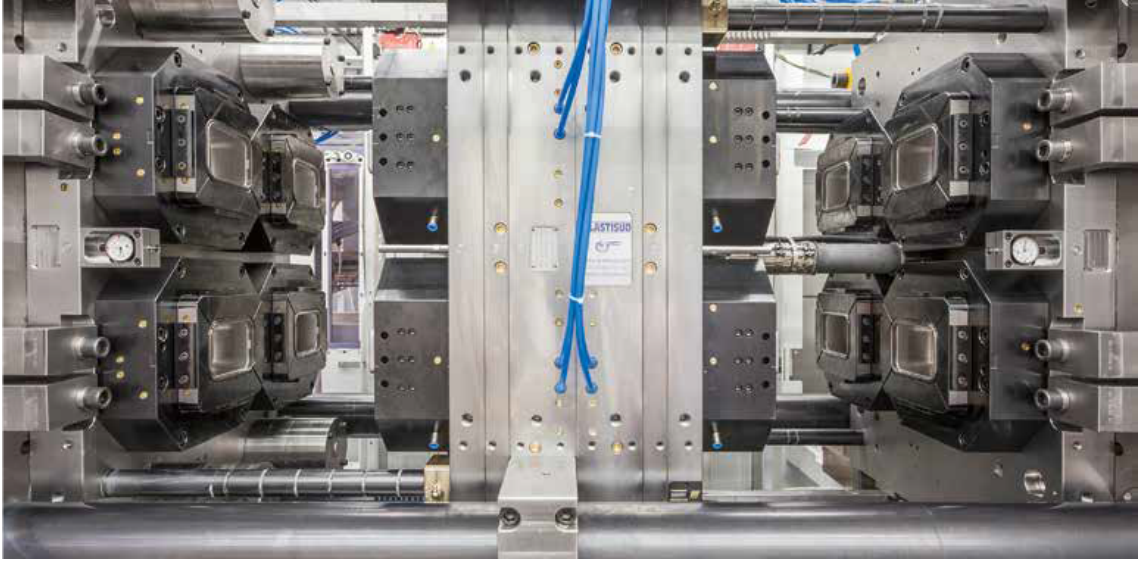
Şekil 1.5 Basınç ve gerinim ölçer sensörlerinin uygulandığı ICM kalıbı [24]

ICM'e özgü farklı kalıp tasarımlarının dışında, hareketli kalıbın dişi (1,2) ve erkek (3,4) tarafında olduğu farklı kalıp tasarımları Şekil 1.6'da gösterilmiştir [4, 16, 22].



Şekil 1.6 Hareketli kalıbın dişi (1,2) ve erkek (3,4) tarafta olduğu kalıp tasarımları

Sanayide yürütülen güncel çalışmalar, kalıp ve makineler üzerine odaklanmıştır. ICM ile ilgili ürünleri olan sayılı firmalardan, enjeksiyon kalıbı üreticisi Plastisud ve enjeksiyon makinası üreticisi Netstal, 2015 yılında patentini aldıkları dört gözlü kalıpla, margarin kutularında %20 hammadde tasarrufu sağlamışlardır. Ayrıca, Fransa menşeli Coveris firması ince cidarlı (min. 0.35 – 0.40 mm kalınlıkta) plastik gıda ambalajı uygulamaları için makine çözümleri sunmuştur. Şekil 1.7'de Nestal firmasına ait 4+4 gözlü kalıp görülmektedir.



Şekil 1.7 4 + 4 gözlü bir ICM kalıbı

Machines Pagès firması, sıkıştırılmalı enjeksiyon kalıplama işlemini bir yığın kalıp aracılığıyla uygulayabilmek için, Netstal Elion 2800-2000 enjeksiyon makinesi ile Plastisud 4 + 4 gözlü kalıbını bir araya getirerek, 10.7 g ağırlığında bir PP margarin kabı üretmiştir. Her iki firmaya ait sistemler birleştirilirken, Elion serisinin, mekanik ve yazılımsal olarak revize edilmiş bir hibrit enjeksiyon üniteli enjeksiyon kalıplama makinesi Şekil 1.8’de verilmiştir.



Şekil 1.8 Netstal Elion 2800-2000 enjeksiyon makinesi

1.2 Tezin Amacı

Literatürde, ICM yöntemi ile gerçekleştirilen çalışmaların çoğunda, basınç, kuvvet gibi parametrelerin, çarpılma ve kendini çekme gibi ürün kalitesine olan etkileri basit geometriler seçilerek incelenmiştir. Polimer teknolojisi genel olarak dikkate alındığında, karmaşık geometrili ürünlerde ürün kalitesi üzerinde birçok farklı parametrenin aynı anda etkili olabileceği açıktır.

Çalışmanın amacı, dolum ve sıkıştırma kuvvetine paralel ve dik yönde ince kesitler ve nispeten karmaşık yüzeyler içeren dönel simetriye sahip üç boyutlu bir parçanın IM ve ICM yöntemleri ile imal edilmesi sırasında seçilmiş olan işlem parametrelerinin parça kalitesine etkilerinin araştırılmasıdır. Bu çalışmada malzeme olarak Polipropilen (PP) polimer seçilmiştir.

Çalışmanın hedeflenen çıktıları tanımlayan, önemli somut ve ölçülebilir başarı ölçütleri aşağıdaki gibi sıralanabilir;

1. IM ve ICM yöntemleri ile imal edilmeye uygun farklı yönlerde ince kesitler içeren, dönel simetride 3 boyutlu bir parça ve bu parçayı üretmeye yönelik kalıpların CAD tasarımları,
2. CAD modellerin FEM ortamına aktarılarak kısa atış, eksik dolum, kuvvet ve kalıp aralığı gibi parametrelerin dikkate alınarak ideal üretim şartlarında seçilmesi gereken parametrelerin tespiti,
3. IM ve ICM için tespit edilmiş olağan ideal parametreler kullanılarak gerçekleştirilecek olan tipik imalat süreçlerinin FEM ortamında simüle edilmesi ve iki yöntemin birbirleri ile uygulanması gereken kuvvet ve basınç seviyeleri ve dağılımları, soğuma patternleri ve termal gradyenler, hacimsel kendini çekme ve oluşabilecek iç gerilme seviyeleri ve kenetleme kuvvetleri açısından karşılaştırılması,
4. Deneysel çalışmalara uygun altyapının hazırlanması, kalıp üretimi, tespit edilen parametrelerde prototip parça üretimlerinin gerçekleştirilmesi,
5. İşlem parametrelerinin ürün kalitesine etkilerinin tespiti için Taguchi ve Anova analizleri,
6. ICM yöntemi ile imal edilen prototiplerin mekanik özelliklerinin karşılaştırılması amacı ile mekanik deneylerin yapılması ve gerilme tespiti için ilgili FEM çalışmalarının yapılması,

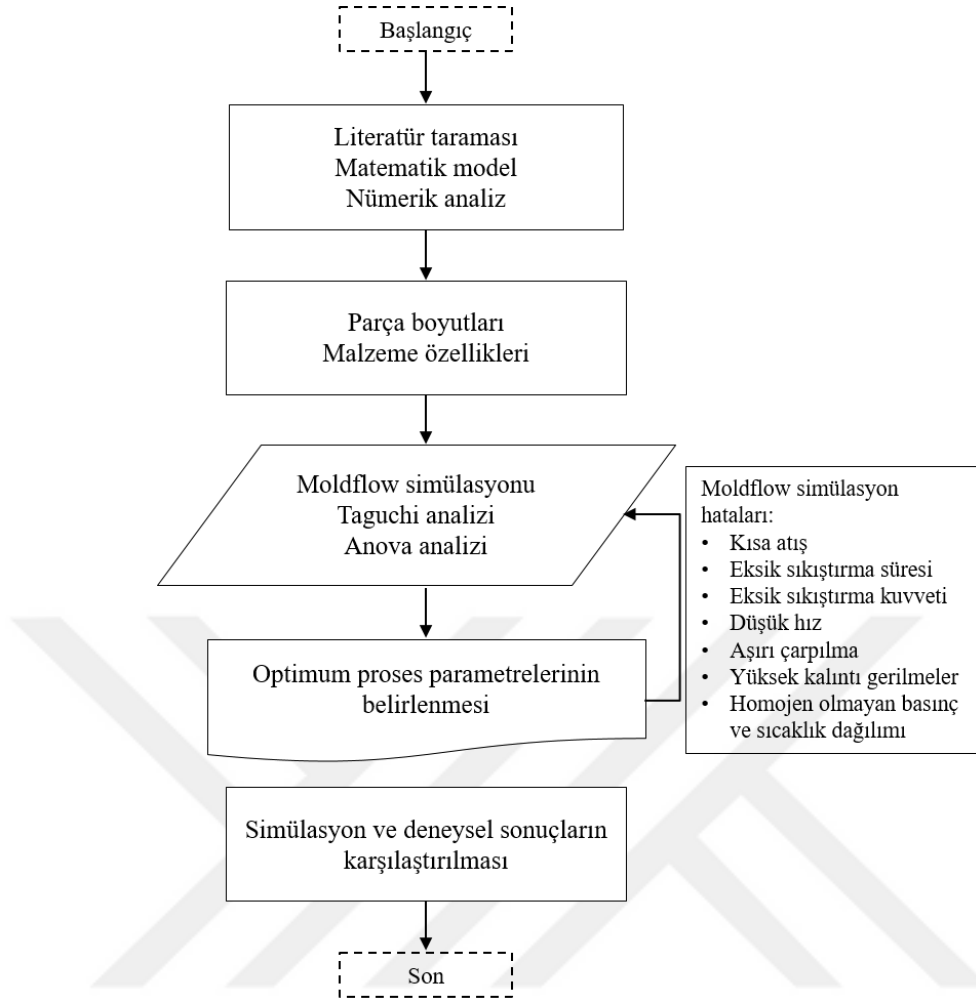
1.3 Hipotez

Enjeksiyon kalıplama plastik malzemelerin kitlesel üretiminde en çok kullanılan üretim metodudur. Enjeksiyon kalıplama (IM) metoduna, doldurma veya doldurma sonrası sıkıştırma hareketinin eklenmesiyle Sıkıştırmalı Enjeksiyon Kalıplama (ICM) metodu ortaya çıkmıştır. ICM hassas plastik parçaların üretiminde kullanılan, gelişmiş bir enjeksiyon kalıplama yöntemidir. Sıkıştırmalı Enjeksiyon Kalıplama (ICM) metodu IM ile karşılaştırıldığında, düşük enjeksiyon basıncı ve kenetlenme kuvveti gereksinimi, kalıp içi homojen basınç dağılımı, düşük kalıntı gerilmeleri ve çarpılma değerleri ile yüksek boyutsal hassasiyet gibi avantajlara sahiptir.

Sanayide, Netstal ve Coveris firması gıda endüstrisine yönelik ICM makinesi ve kalıbı tasarlamış ve dikdörtgenler prizması şeklinde üç boyutlu plastik parçalar üretmişlerdir. Literatürde ise, simülasyon ve deneysel çalışmaların uygulandığı parçalar düz plakalar şeklindedir ve çalışmalar ağırlıklı olarak optik malzemelerin ICM ile üretimine odaklanmıştır. Literatürde, çalışmadaki gibi, 3 boyutlu dönel simetriye sahip, ince kesitli, polipropilen bir numuneyle yapılmış herhangi bir çalışmaya rastlanmamıştır. Çalışmada, ICM metodunda kullanılan parametrelerin, elde edilen ürünün kalitesi üzerindeki etkileri incelenmiş ve IM metodu ile karşılaştırılmıştır. ICM metodu ile 3 boyutlu, ince kesitli, sıkıştırma kuvvetine hem dik hem de paralel yüzeyler içeren, oldukça mukavim ürünler üretilebileceği, çok daha düşük basınç ve kenetlenme kuvvetleri uygulanarak IM ile benzer hatta daha iyi geometrik özelliklere sahip parçalar elde edilebileceği belirlenmiştir.

1.4 Araştırma ve Analiz Yöntemi

Çalışmada, literatür taraması ile mevcut çalışmalar incelenmiş, endüstriyel uygulamalar gözden geçirilerek ICM metodu hakkında güncel bilgiler elde edilmiştir. Ardından yöntemin korunum denklemleri ile nümerik analiz için gerekli metotlar sunulmuştur. Böylece ICM yönteminin tüm kalıp içi akış süreci matematiksel olarak ifade edilmiştir. İkinci aşamada ise hangi parametre değerleri kullanılacağı ve parametrelerin sonuçlar üzerindeki etkisini netleştirmek amacıyla, Taguchi ve Anova analizleri uygulanmıştır. Taguchi ortogonal tablosunun istatistiksel gereksinimlerine göre 18 deney tasarlanmıştır. Parametrelerin parçanın çarpılma değerlerine olan katkısını belirleyebilmek için ANOVA analizi uygulanmıştır. Taguchi ve Anova analizlerinden elde edilen sonuçlar ile optimum parametre değerleri bulunarak nümerik analiz sonuçları ile deneysel çalışma sonuçları karşılaştırılmıştır. Çalışma boyunca izlenen araştırma ve analiz yöntemi akış şeması Şekil 1.9'da gösterilmiştir.



Şekil 1.9 Çalışmada kullanılan araştırma yöntemi akış şeması

2 POLİMER MALZEMELER

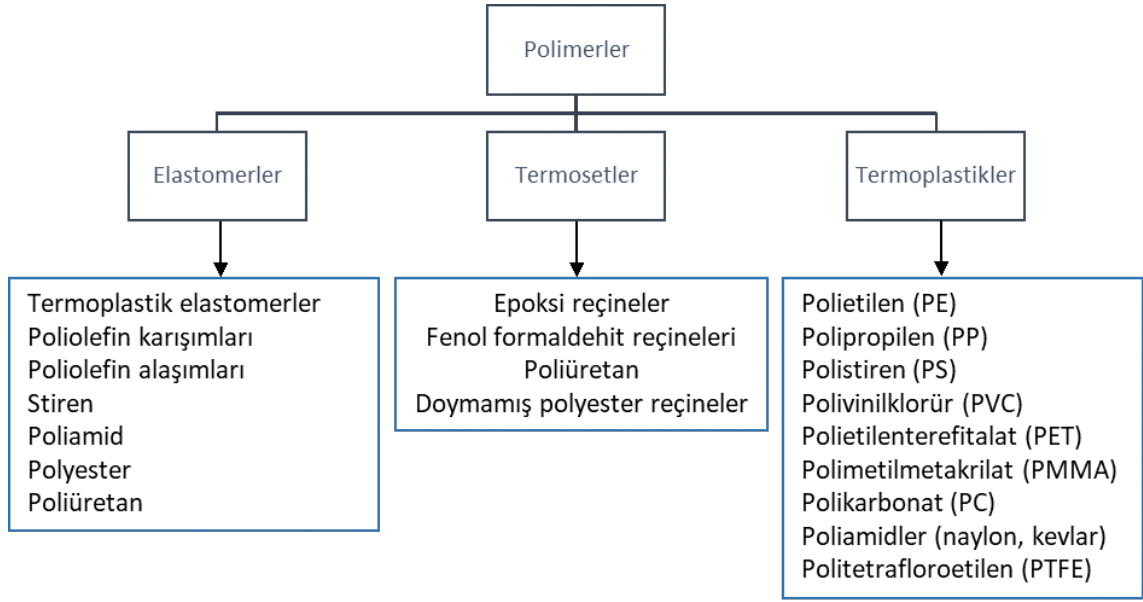
2.1 Polimerlerin Özellikleri ve Sınıflandırılması

Polimerler, birden çok molekülün basınç ve ısı altında uzun zincirler meydana getirmesiyle oluşur. Polimerlerin karakteristik özellikleri, bu uzun zincirleri birbirine bağlayan mekanizmalar tarafından belirlenir. Polimerlerin yapılarını inceleyen polimer morfolojisi, amorf, kristal veya yarı kristal olarak moleküllerin dizilişini tanımlar. Polimerler büyük ölçüde yarı kristal bir düzenlemeye sahiptir. Şekil 2.1’de gösterildiği gibi amorf faz alanları ile çevrili küçük kristallerden oluşan polimerler büyük ölçüde yarı kristal olarak sınıflandırılırlar [29].



Şekil 2.1 Polimerlerde amorf ve kristal yapı şematik gösterimi [29]

Şekil 2.2’de elastomerler, termosetler ve termoplastikler olarak üzere üç ana gruba ayrılan polimerlerin genel sınıflandırılması gösterilmiştir. Son kullanım yerlerine göre yapılan bu sınıflandırma içinde plastikler, enjeksiyon kalıplama metodunda en çok kullanılan malzemeler olarak yerini alırlar.



Şekil 2.2 İçyapılarına göre polimerlerin sınıflandırılması

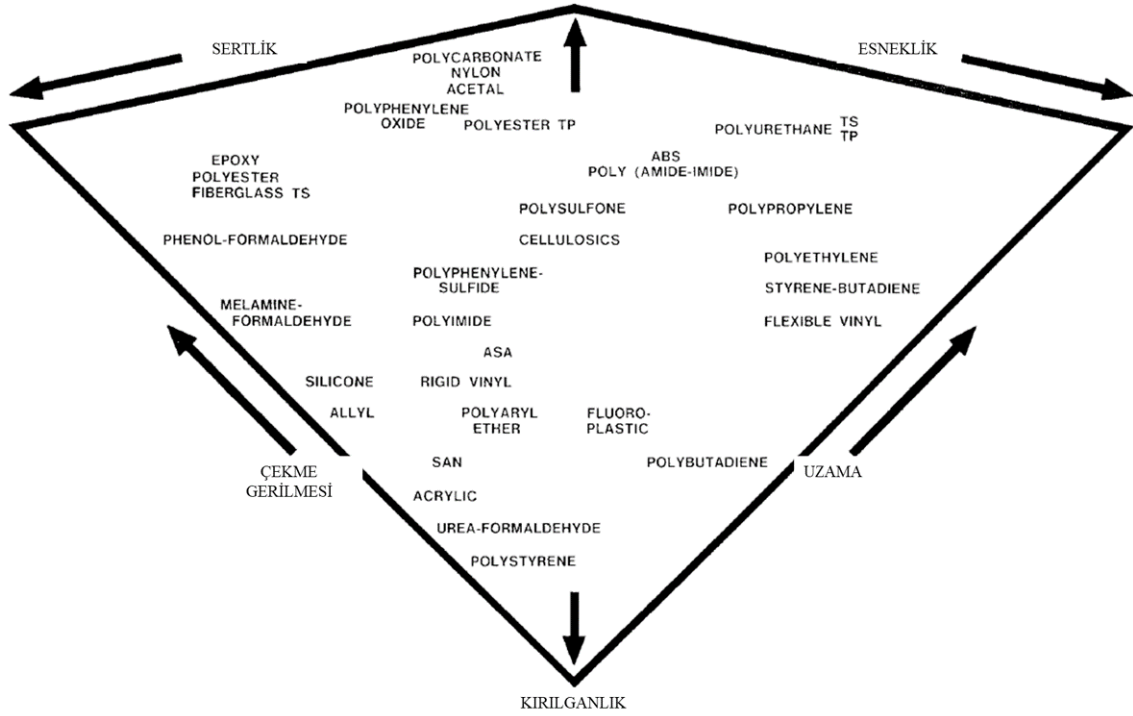
Plastik malzemeler, ucuz, kolay işlenebilir, hafif ve korozyona direnci yüksek malzemeler olmalarından kaynaklı olarak büyük bir üretim hacmine sahip ve yaygın olarak kullanılan malzemelerdir. Özellikle enjeksiyon kalıplamanın ana hammaddelerinden olan termoplastikler, farklı özelliklerinin yanı sıra, yüksek sıcaklıkta yumuşayan, viskoziteleri artan ve şekillendirmeye uygun hale gelen malzemeler olmaları nedeniyle tercih edilmektedirler.

Son yüzyılda, özellikle sentetik polimerler olarak bilinen plastik malzemelerde çok hızlı bir teknolojik gelişime tanık olunmuş ve günümüzde hacim olarak metallerle hemen hemen eşit oranda kullanılmaya başlandığı görülmüştür. Bunun başlıca nedenleri; plastik malzemelerin nispeten ucuz, kolay işlenebilir, hafif, yüksek kimyasal ve korozyon direncine sahip olmaları olarak sıralanabilir. Ayrıca yüksek ısı ve elektriksel özelliklerin yanında yeterli mekanik özelliklere de sahiptirler. Büyük kapasitelerde üretilen ve günlük hayatta kullanımı yüzlerce tonu bulan PE, PP, PS, PVC gibi klasik plastik malzemeler, sahip oldukları avantajlar sebebiyle farklı endüstri kollarında kendine yer edinmiştir. Termoplastiklerin genel olarak kullanım alanları, Tablo 2.1’de malzeme tipleri dikkate alınarak verilmiştir.

Tablo 2.1 Termoplastiklerin kullanım alanları

Malzeme Tipi	Kullanım Alanı
Polietilen (PE)	Mutfak eşyası, plastik kutu ve kaplar, boru, oyuncak, kabloların yalıtkan katmanları ve ambalaj filmi imalatında sıklıkla kullanılan PE, işlevselliği kadar, düşük maliyetiyle de tercih edilmektedir. Ayrıca, ucuz süpermarket çanta, poşet ve torbalarının yapımında, plastik şişe yapımında geniş kullanım alanı bulur. Otomotiv sanayiinde, cam sileceği rezervuarı ve yakıt tanklarında da kullanılır.
Polipropilen (PP):	Yiyecek ambalajları, otomotiv sanayiinin yanı sıra, kablo kaplamasında, gıda maddesi ambalajında, atılabilir filtre vb. birçok uygulama alanında kullanılmaktadır. Otomotiv sanayiinde, tamponlarda, tampon iç bakalitlerinde, kalorifer sistemlerinde de kullanılır.
Polistiren (PS)	Ambalaj köpüğü, yiyecek ambalajları, köpük bardak, tabak, CD kutularının imalatında sıklıkla tercih edilir.
Akrilonitril bütadien stiren (ABS)	Elektronik aletlerin plastik aksamı, otomotiv sanayiinde otomobillerin iç düzen, enstrüman panelleri, direksiyon kılıfı, ızgaralar, far yuvaları, dikiz aynası, arka spoylerinde kullanılır.
Polietilen (PET)	Tereftalat Karbonatlı içeceklerin şişesi, kavanoz, plastik film, mikrodalga ambalajı yapımında kullanılır. Pet şişe ismi bu malzemenin kısaltmasından gelmektedir.
Polyamid (PA): (Naylon)	Elyaf, diş fırçası kılı, misina, otomotiv yan sanayiinde yaygın kullanım alanı bulur. Otomotiv sanayiinde, karbüratör dahil, birçok parçanın (valfler, gaz ve buhar contaları, pervaneler, yüksek dayanımlı sahra kabloları, hava giriş manifoldu), jant kapaklarında kullanılır.
Polivinil klorid (PVC)	Boru, profil ve cam çerçeveleri (pencere) üretiminde geniş kullanım alanı bulur.
Poliüretan (PU)	Dolgu köpüğü imalatı, termal izolasyon köpüğü imalatı ve yüzey mantolama işlemlerinde çok tercih edilen bir plastik türüdür. Otomotiv sanayiinde, oturma koltukları, otomobil içi yalıtkan malzemeleri, gösterge tablosu, direksiyon, iç düzen aksamları ve enerji emici köpüklerde kullanılır.
Polimetilmetakrilat (PMMA)	Akrilik olarak da isimlendirilen PMMA, günümüzde, sentetik elyaf ve boyalarda kullanılır. Çok sert bir malzemedir ve camdan daha saydamdır. Optik uygulamalarda, mobilya ve dekorasyon sanayiinde, yatarda, otomotiv yan sanayiinde ve camın kullanılabileceği her alanda alternatif malzeme olarak kullanılmaktadırlar.
Polikarbonat (PC)	CD, gözlük, güvenlik camı, trafik ışığı, lens yapımında yaygın olarak kullanılır. Otomotivde yüksek çarpma direnci, yüksek ısıl bozunma sıcaklığı ve nem/UV kararlılığı nedeniyle otomotiv sektöründe reflektör, arka lamba muhafazası, farlarda kaplama malzemesi olarak, motosiklet cam siperi, havalandırma ve soğutma kafesi, iç aydınlatma aksamı, elektrik dağıtım sistemi muhafazası, silecek desteklerinde kullanılır.
Polyester (PES)	Elyaf (fiber) ve tekstil ürünlerinde kullanılır.

Malzeme seçiminde, farklı alternatiflerden doğru hammaddeyi bulabilmek oldukça karmaşık ve içinden çıkılmaz bir işlem haline gelebilir. Üreticiler bu durumun üstesinden gelebilmek için, çeşitli tablo ve grafikler oluşturmaktadırlar. Plastiklerin genel özelliklerini bir araya toplayarak malzeme seçimini kolaylaştırabilmek adına, Şekil 2.3’de farklı plastik malzemelerin mekanik özellikleri şematik olarak verilmiştir [30].

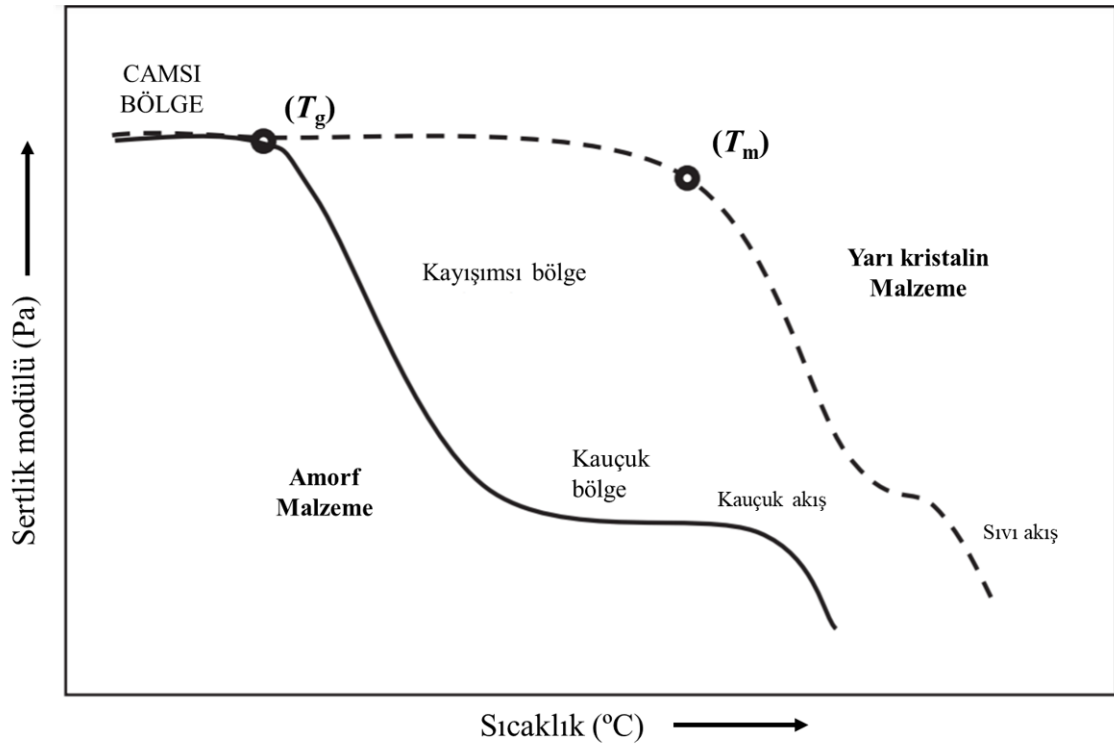


Şekil 2.3 Plastik malzemeler ve mekanik özellikleri [30]

2.2 Camsı Geçiş ve Erime Sıcaklıkları

Camsı geçiş sıcaklığı (T_g), termoplastik malzemelerde, amorf materyallerin veya yarı kristal materyallerin amorf kısmının bir özelliği için önemli bir sıcaklık noktasıdır. Erime sıcaklığı (T_m) da malzemenin fiziksel davranışını belirleyen bir diğer önemli sıcaklık noktasıdır. Şekil 2.4’te görüleceği üzere, yarı kristal materyaller, bu sıcaklıklar üzerinde akmaya başlar, dolayısıyla katılardan kalıplanabilen veya şekil verilebilen viskoz sıvılara dönüşerek enjeksiyon kalıplama için uygun hale gelirler. Amorf malzemeler ise, cam geçiş sıcaklığının üzerinde, geniş bir sıcaklık aralığında yumuşamaya devam eder ve hızla rijitliklerini kayberken, yarı kristal malzemelerin ise uzun bir sıcaklık aralığı boyunca rijitliklerini korudukları görülmektedir [31]. T_g ile ifade edilen cam geçiş sıcaklığından düşük sıcaklıklarda, malzemeler camsı veya kristal özellik gösterirken, bu sıcaklıktan yüksek sıcaklıklarda, kauçuksu bir davranış gösterirler [32]. Yarı kristal polimerde, T_g ile T_m arasındaki sıcaklıklarda, düşük

yükler altında malzeme üzerinde büyük uzamalar görülebilen bölgeye "kauçuk bölge" adı verilir [31].



Şekil 2.4 Yarı kristal ve amorf malzemelerin erime ve yumuşama davranışı [31]

Tablo 2.2'de çeşitli plastiklere ait camısı geçiş sıcaklıkları verilmiştir [33].

Tablo 2.2 Plastiklere ait camısı geçiş sıcaklıkları [33]

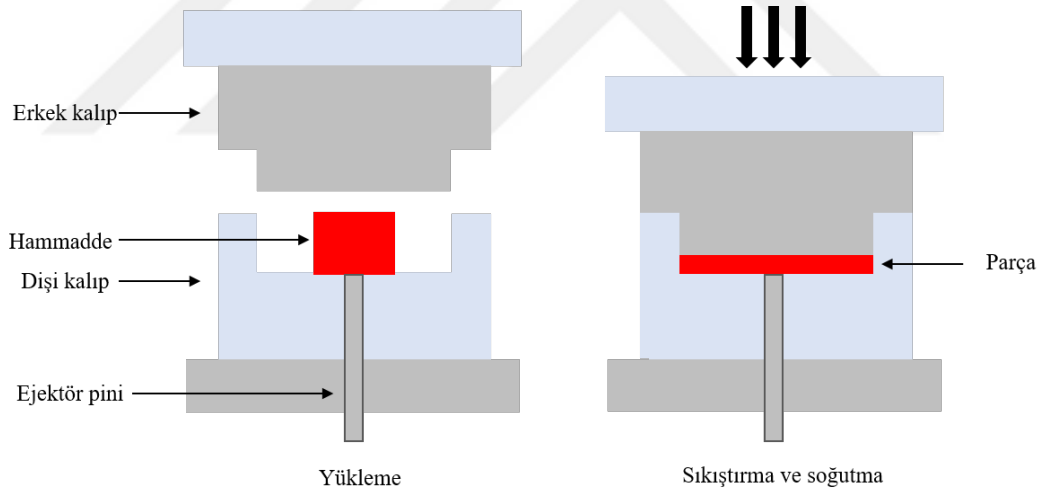
Malzeme Tipi	Tg()
Politetrafloroetilen (PTFE)	-97
Polipropilen (izotaktik PP))	+100
Polistiren (PS)	+100
Poli(metilmetakrilat) (PMMA)	+105
Nylon 6,6	+57
Polietilen (LDPE)	-120
Polietilen (HDPE)	-90
Polipropilen (ataktik PP)	-18
Polikarbonat (PC)	+150
Poli(vinil asetat) (PVAc)	+28
Polyester (PET)	+69
Poli(vinil alkol) (PVA)	+85
Poli(vinil klorür) (PVC)	+87

2.3 Plastiklerin Kalıplanma Metotlarına Genel Bakış

Plastik kalıplama, ısı ve basınç altında eriyik plastiğin bir kalıp aracılığıyla şekillendirilmesi işlemidir. Kalıplama için kullanılan kalıp bir veya daha fazla nihai ürün şeklini içeren gözden oluşur. Plastikler kullanım amaçlarına bağlı olarak farklı üretim metotları ile şekillendirilerek kullanıma hazır hale getirilirler. Enjeksiyon kalıplama metodu, plastik üretim endüstrisinde en büyük hacimli kalıplama işlemiyken, sıkıştırılmalı kalıplama, transfer kalıplama, vakum (termoforming) kalıplama, şişirmeli kalıplama yöntemi, döner (döndürmeli) kalıplama, ekstrüzyon kalıplama, yöntemleri de diğer başlıca kalıplama işlemleri olarak sayılabilir [34]

2.3.1 Basınçlı (sıkıştırılmalı) kalıplama

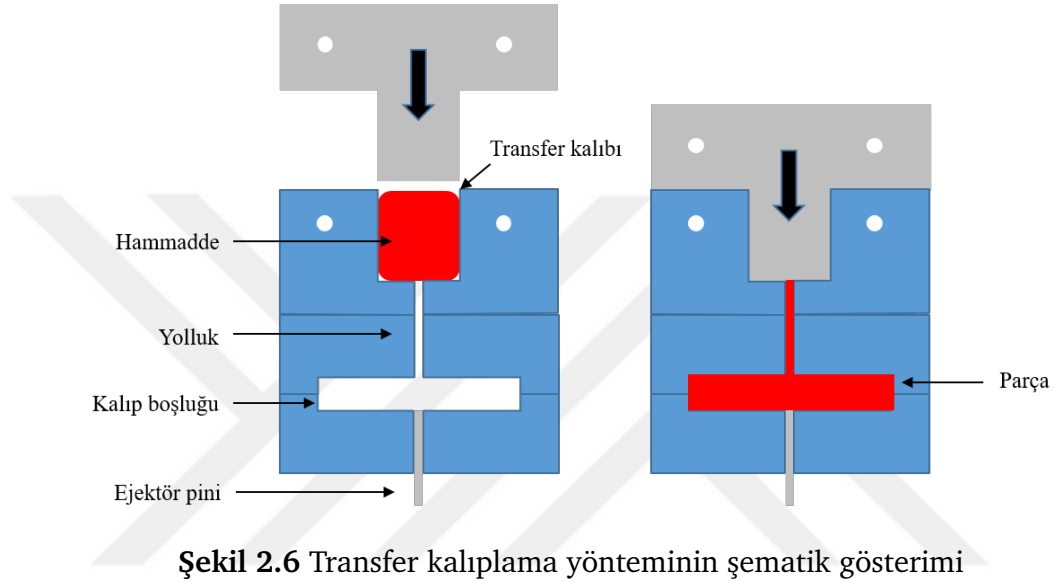
Sıkıştırma kalıplama yöntemi, ısıtılmış kalıp yarısına, granül veya tablet halinde doldurulan plastiğin belirli ısı ve basınç koşulları altında şekillendirilmesi ve ardından kalıp sıcaklığının dolayısıyla üretilen parçanın belirli sıcaklık değerine getirildikten sonra kalıptan çıkarılması üzerine kurulur. Parça kalıptan pinler veya kalıbın konik şeklinden faydalanılarak kalıptan çıkarılır. Ortaya çıkan ürünün kalitesi oldukça iyidir.



Şekil 2.5 Basınçlı (sıkıştırılmalı) kalıplama

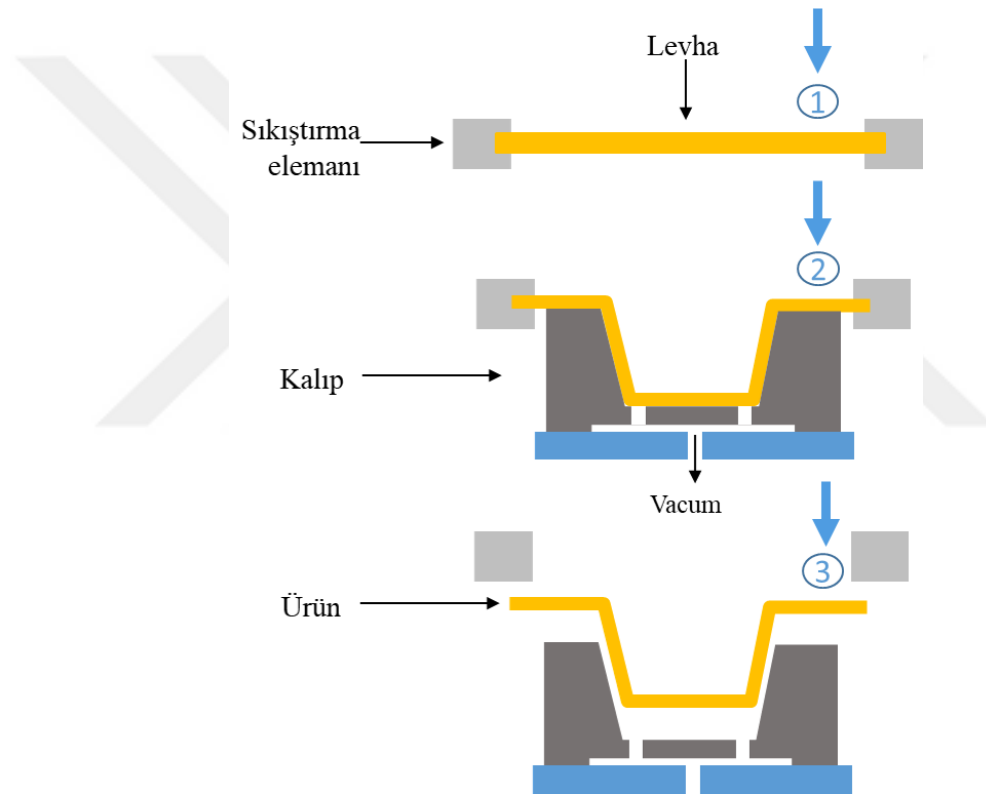
2.3.2 Transfer kalıplama

Basınçlı kalıplama yönteminden farklı olarak, plastik hammadde direk dişi kalıp içine konulmak yerine ayrı bir kalıpta ısıtıldıktan sonra bir yolluk vasıtasıyla sürekli kapalı olan bir kalıp boşluğuna iletilir. Yine belirli bir kürlenme süresinden sonra parça kalıptan çıkarılır. Hammaddenin başka bir kalıp içinden transfer edilmesi nedeniyle yolluk içinde ve transfer kalıbında malzeme kayıplarına sebep olması ve kalıbın temizlenmesi yöntemin dezavantajları olarak sayılabilir. Ancak ince kesitli kompleks geometrilerin üretiminde elverişli bir yöntemdir.



2.3.3 Vakum (termoforming) kalıplama

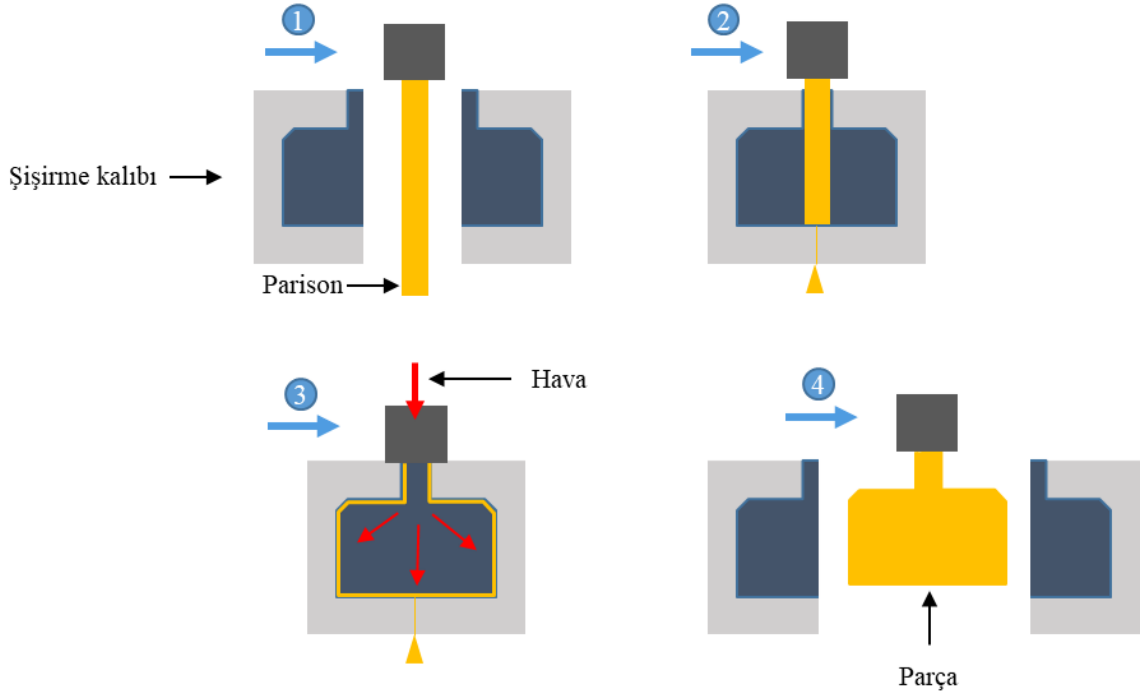
Şekil 2.7’de proses akışı gösterilen, vakum kalıplama ile kompleks ancak daha az boyutsal doğruluk istenen parçalar üretilebilmektedir. Bu yöntemde, ekstrüzyon yöntemiyle üretilmiş ve bir çerçeve ile sabitlenmiş bir plaka halindeki plastiğin, sıcaklık altında vakum basıncı ile bir kalıp üzerine çekilmeye zorlanmasıyla parçaların üretimi gerçekleştirilmektedir. Parça soğutulduktan sonra kenarlar kesilerek nihai geometri oluşturulur. Kenarlarındaki hammaddenin üretim sonrası hurdaya çıkarılması, ilave işlem gerektirmesi ve derin parçaların üretiminde, yüksekliğin artmasının parçada kalıp tabanına doğru incelmeye sebep olması, yöntemin dezavantajları olarak sayılabilir. Hurdaya çıkmış malzemeler tekrar plaka haline getirilmek üzere ekstrüzyona gönderilir. Düşük hacimli bir üretim yöntemidir [35].



Şekil 2.7 Vakum (termoforming) kalıplama

2.3.4 Şişirmeli kalıplama yöntemi

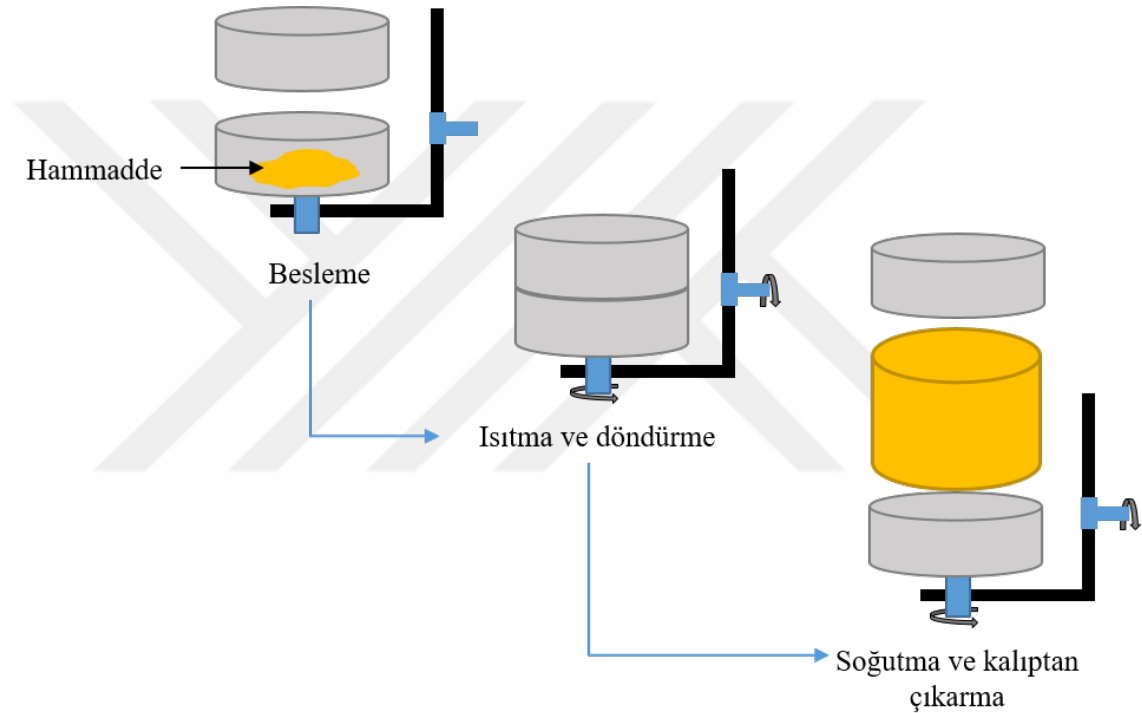
Üretilmesi istenen ürünün her bölgesindeki et kalınlığının aynı olması durumunda tercih edilen bir yöntemdir. Isıtılan plastik, akışkan hale geldikten sonra bir balon gibi hava vasıtasıyla şişirilerek kalıp duvarlarına temas eder (Şekil 2.8). Proses için belirlenen bir süre boyunca soğutulan parça, istenilen sıcaklığa erişildikten sonra kalıptan çıkarılır. Plastik şişeler, bidonlar, yakıt tankları gibi içi boş, hacmine oranla ince et kalınlığına sahip parçaların üretiminde kullanılan bir yöntemdir.



Şekil 2.8 Şişirmeli kalıplama yöntemi şematik gösterimi

2.3.5 Döner (döndürmeli) Kalıplama

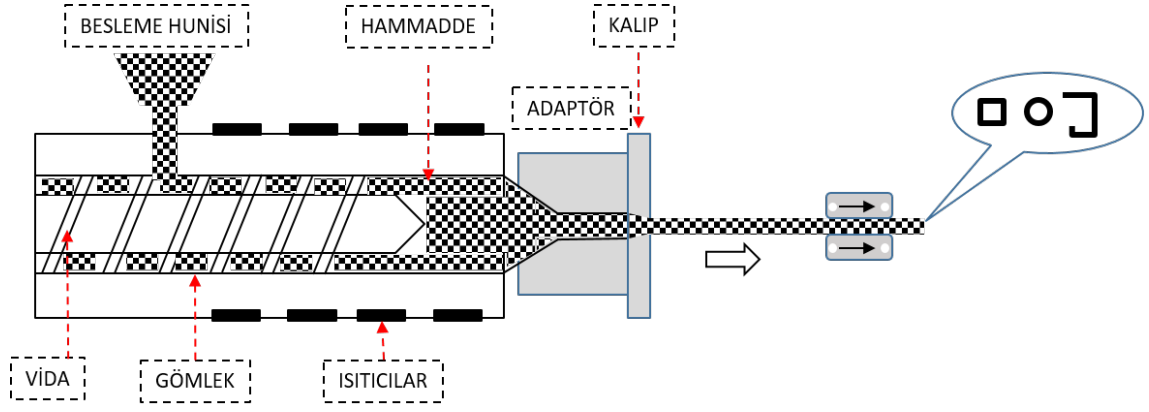
Hammaddenin kalıp içine yerleştirilmesinin ardından sıcaklık etkisi ile kalıbın bir veya birden fazla ekseninde döndürülmesi sonucu malzemenin kalıbın iç yüzeyine eşit olarak kaplanması prensibine dayanan bir yöntemdir. Şekil 2.9’da proses adımları gösterilmiştir. Hammaddenin eritilmesi için ısıtılan kalıp, bu süre zarfında döndürülürken bir yandan da soğutulur ve belirli sıcaklığa erişince parça kalıptan çıkarılır. Hammadde israfının az olması, maliyet ve çevresel etki önemli üstünlükleri olarak sayılabilen yöntemde, termoplastiklerin yanında termoset plastikler de üretilabilmektedir. Uygulama metodundan da anlaşılacağı üzere içi boş, basit geometrili ve sağlam parçaların üretilmesinde faydalanan bir yöntemdir.



Şekil 2.9 Döner (döndürmeli) Kalıplama

2.3.6 Ekstrüzyon kalıplama

Şekil 2.10’da şematik olarak gösterilen ekstrüzyon kalıplama yönteminde, ısıtılmış eriyik istenilen şeklin verildiği bir kalıp deliğinden basınç yoluyla ittilir. Levha, çubuk, boru, profil gibi uzun parçaların üretilmesi amacıyla kullanılan bir yöntemdir. Yüksek hacimde üretim için kullanılan, düşük ekipman maliyeti ile ucuz ve sürekli kalıplama yöntemlerinden biridir. Enjeksiyon kalıplama yöntemine benzer olarak besleme ünitesine konulan plastik granüller, ısıtılmış sonsuz vida yardımıyla eriyik hale getirilip basınçlandırılır ve kalıptan geçirilerek şekillendirilir.

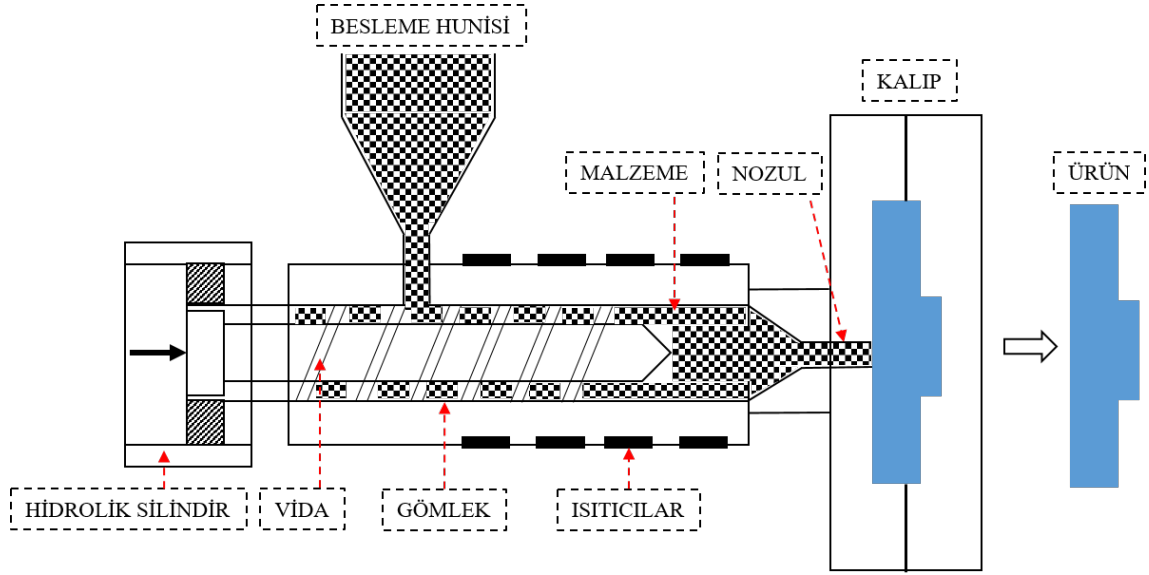


Şekil 2.10 Ekstrüzyon Kalıplama

2.3.7 Enjeksiyon kalıplama

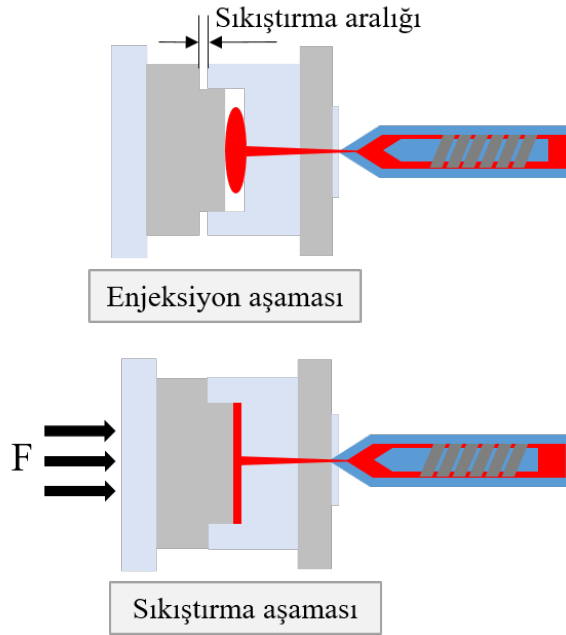
1872 yılında Hyatt kardeşler John ve Isaiah tarafından enjeksiyon makinası için alınan patentle ortaya çıkan enjeksiyon metodu, plastik parça üretimi için kullanılan yöntemlerin başında gelmektedir. Yüksek üretim hızı, görece düşük işçilik maliyeti, boyutsal toleransları dar, karmaşık şekilli parçaların kolaylıkla üretilmesi gibi üstünlükleri, enjeksiyon kalıplama metodunun önemli avantajlarındandır.

Enjeksiyon kalıplama (IM), kalıbın kapatıldıktan sonra, eriyiğin ısıtılmış bir silindir lülesinden, kapalı bir kalıbın boşluğuna, basınç uygulanarak enjekte edilmesi ile yapılan bir işlemdir. Besleme hunisinden gömleğe aktarılacak, hem ısıtıcılar hem de vida üzerindeki sürtünmeden kaynaklı olarak eriyik hale getirilip basınçlandırılmış plastik granüller, nozul aracılığıyla kalıp boşluğunun girişine aktarılır. Kalıp içine aktarılan basınçlandırılmış eriyik, kalıbın şeklini, dolayısıyla üretilmek istenen ürünün şeklini alır. Enjeksiyon aşamasının tamamlanması ile parçanın yüzey ve geometrik özelliklerinin iyileştirilmesi için kalıp içindeki basınç korunarak paketleme aşaması tamamlanır. Proseste bir çevrim için gerekli zamanın önemli bir kısmını oluşturan soğutma aşamasında, kalıp içindeki eriyik katılaşarak basınç düşer. Kalıp içine entegre edilmiş soğutma kanalları vasıtasıyla, kalıp içi sıcaklığı kontrol altına alınırken, kalıp içindeki eriyiğin soğuması sağlanır. Son olarak, çevrimin tamamlanması için gerekli süre beklendikten sonra kalıp açılır ve nihai şeklini alan parça kalıp boşluğundan çıkarılır (Şekil 2.11).



Şekil 2.11 Enjeksiyon kalıplama makinasının temel elemanları

Proses hızının artırılması, ham madde ihtiyacının düşürülmesi, parça cidar kalınlıklarının ve kalitelerinin optimize edilmesi talepleri, IM yöntemi dışında farklı enjeksiyon kalıplama metotlarının ortaya çıkarılmasını zorunlu kılmıştır. Bunlardan biri olan, Şekil 2.12’de şematik olarak gösterilen ICM metodu, özellikle boyutsal hassasiyeti yüksek parçaların üretilmesinde önemli avantajlar sağlaması nedeniyle, yeni nesil enjeksiyon metotlarından biri olarak çeşitli endüstriyel alanlarda yer edinmiştir.



Şekil 2.12 ICM yöntemi

3.1 Sıkıştırırmalı Enjeksiyon Kalıplama Metodolojisi

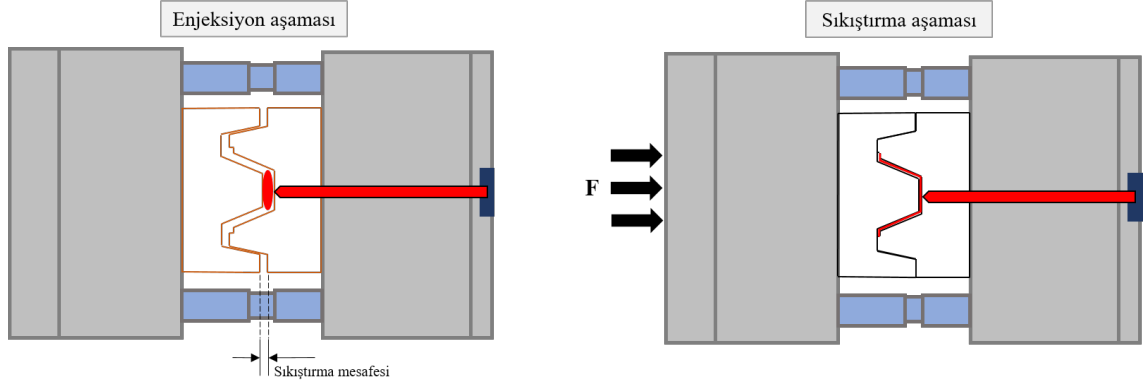
Sıkıştırırmalı enjeksiyon metodu (ICM) ile yapılan ilk konsept çalışma, kalın bir optik lensin kalıplanması üzerine, Matsuda (1985) ve Klepek (1987) tarafından uygulanmıştır. Bu çalışmadan farklı olarak Yang ve çalışma arkadaşları da 1995 yılında, ICM metodunun uygulanmasını sistematik bir çalışmayla gerçekleştirmişlerdir [1].

Sıkıştırırmalı enjeksiyon kalıplama, doldurma veya doldurma sonrasında, sıkıştırma işlemi sebebiyle, geleneksel enjeksiyon kalıplama metodundan ayrılır. Enjeksiyon kalıplama, kalıp parçalarının kapanıp kilitlenmesinden sonra oluşan kavite boşluğuna, termoplast bir plastiğin ısıtılmış bir silindir lülesinden, basınç uygulanarak enjekte edilmesi ile yapılan bir işlemdir. Sıkıştırırmalı enjeksiyon kalıplama prosesin de ise; eriyik, enjeksiyon aşamasında, kısmen açık olan kalıp boşluğuna enjekte edilir. Sıkıştırma aşamasına geçmeden kalıp tamamen kapatılır ve parçanın nihai şeklini alması, eriyiğin hareketli kalıp tarafından kalıp boşluğunda sıkıştırılmasıyla gerçekleştirilir [4, 9, 17].

Sıkıştırırmalı enjeksiyon kalıplama özellikle optik sektöründe yaygın olarak kullanılmasına rağmen çok daha büyük geometrilere sahip parçaların üretilmesinde de kullanılabilmektedir. Sıkıştırırmalı enjeksiyon kalıplamanın endüstriyel uygulama alanlarından bir kaçı; otomobil kapı modülleri taşıyıcıları, koltuk komponentleri, CD ve DVD'ler, uzun cam elyaf komponentler, optik lensler, tuş takımı kapakları, dizüstü bilgisayarlar, el bilgisayarları ve cep telefonları gibi ince cidarlı parçalar olarak özetlenebilir [36];

Şekil 3.1'de görülebileceği gibi, ICM metodu, enjeksiyon kalıplama aşamasını, sıkıştırma aşaması ile birleştirir. Sıkıştırırmalı enjeksiyon kalıplama yönteminin enjeksiyon aşaması, geleneksel enjeksiyonla kalıplama [2] ile aynıdır. Bununla

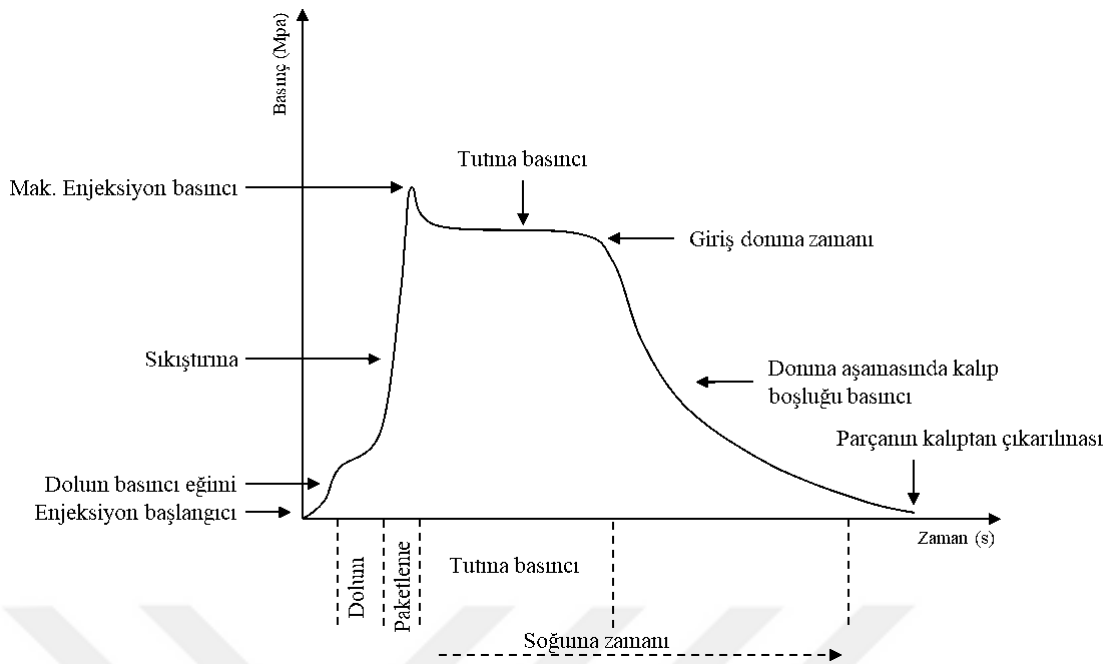
birlikte, sıkıştırma aşaması nedeniyle, ICM sürecinde paketleme aşaması mevcut değildir.



Şekil 3.1 Sıkıştırırmalı enjeksiyon kalıplama metodunun şematik gösterimi

Enjeksiyon aşamasında eriyik plastik, nominal parça kalınlığından birkaç *mm* daha fazla bir değere ayarlanmış bir kalıp boşluğuna enjekte edilir. Bu sayede, akışın daha düşük basınç ve gerilme altında boşluğun uç noktalarına kolayca ilerlemesine izin verir. Eriyik plastiğin kalıba enjekte edilmesinden bir süre sonra veya enjeksiyon aşamasının sonunda, sıkıştırma kuvveti kullanılarak kalıbın hareketli kısmı kapanarak, eriyik plastik kalıp boşluğunun doldurulmamış kısımlarına zorlanır ve kalıp nihai pozisyonuna gelerek parçanın son kalınlığı elde edilir. Hareketli kalıp yarıları proses ayarlarında belirlenen ve plastik eriyiğini sıkıştırmak için gereken maksimum kuvvete ulaşılan kadar kontrollü bir şekilde ilerler ve zamana bağlı değişen veya sabit bir hızda kuvveti uygular [7, 27].

Şekil 3.2, enjeksiyon, sıkıştırma, soğutma ve ejeksiyon aşamaları ile doldurma sonrası aşamada bir sıkıştırma eylemi gerçekleşen ICM sürecini şematik olarak temsil etmektedir.



Şekil 3.2 Sıkıştırılmalı enjeksiyon kalıplama döngüsü için kalıp boşluğu içindeki basınç değişimi

ICM prosesi sağladığı birçok avantaja rağmen, işlemin bazı dezavantajları da bulunmaktadır. ICM metodunun avantaj ve dezavantajları Tablo 3.1’de IM yöntemi ile karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir [4, 7, 9, 16, 17, 22, 27].

Tablo 3.1 ICM prosenin avantajları ve sınırları

Avantajları	Sınırları
Kenetlenme kuvvetinin azaltılması	IM ile karşılaştırıldığında daha kompleks kalıplama prosesi
Enjeksiyon basıncının azaltılması	Yatırım maliyeti yüksek
Sıkıştırma aşamasında havanın dışarı çıkabilmesi	Makine ve kalıp maliyeti yüksek
Düşük kalıntı gerilmeleri	Daha hassas makine kontrolü ve proses tekrarlanabilirliğinin sağlanması
Çekmenin azaltılması	3D ve derin parçaların üretiminde zorluklarla karşılaşılması
Boyutsal doğruluğun iyileştirilmesi	Sıkıştırma hareketinin açılal yüzeyler üzerinde daha az etkisinin olması
Parçada çarpılmaların azaltılması	Azaltılmış takım ömrü
Malzeme kesmesinin azaltılması	-
Homojen yoğunluk dağılımı	-
Daha az moleküler yönelim	-

3.2 ICM Metodu Akış Analizinde Temel Proses Parametreleri

ICM metodunda, proses ayarları yapılırken, birbiriyle ilişkili, ürünün kalitesi üzerinde son derece etkili, oldukça fazla sayıda parametrenin hassas şekilde ayarlanması gerekmektedir.

3.2.1 Enjeksiyon Aşaması

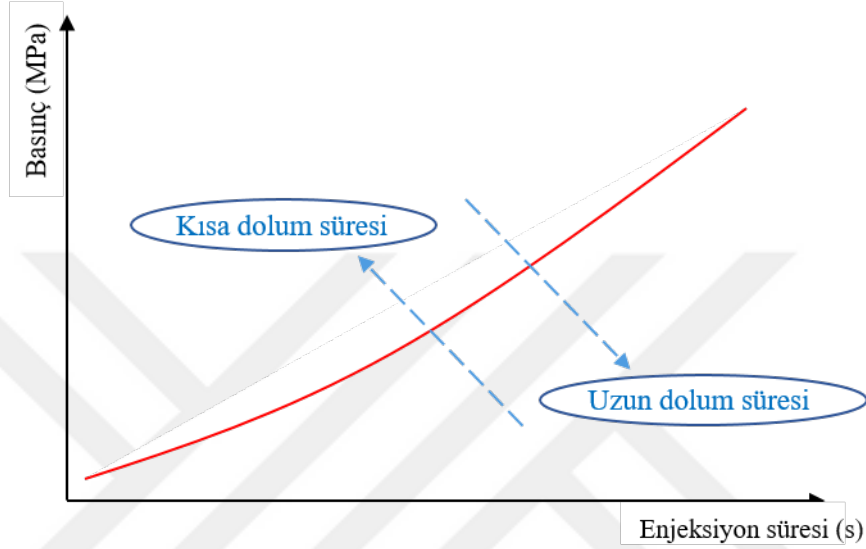
3.2.1.1 Enjeksiyon basıncı:

Kalıp boşluğunu, vida üzerinde basınçlandırılmış eriyik malzeme ile doldurmak için gereken basınç, enjeksiyon basıncı olarak ifade edilir ve hidrolik hat üzerindeki sensörler yardımıyla ölçülebilir. Enjeksiyon basıncı, enjeksiyon makinasının limitlerine göre belirlenir ve yüksek basınçlar, parçanın nihai geometrisindeki çekmeyi azaltmada önemli bir parametredir. Enjeksiyon basıncı, doldurma süresi ile doğrudan ilişkilidir ve belirlenen optimum zaman aralığı ile, gerekli basınç değerinin çok artması engellenir. Enjeksiyon basıncı, eriyiğin akmaya karşı direncini yenerek, eriyiğin basıncın daha düşük olduğu kalıp içindeki uzak yerlere doğru akmasını sağlar. Parçanın kalınlığı artarken gerekli olan basınç azalırken, inceldikçe basınç ihtiyacı artar. Yine parçanın geometrik şekli ne kadar basit, kalınlık değişimleri ve şekil değişimleri ne kadar az ise basınç ihtiyacı da o kadar azalır. Akış uzunluğunun artması, dolayısıyla enjeksiyon noktasının konumu da basınç değerinin artması ve azalması ile doğrudan ilişkilidir. ICM metodunda, kalıp aralığı nedeniyle kalıp boşluğu geleneksel enjeksiyon metodundan daha büyük bir hacme dolayısıyla sahiptir. Bu durum, eriyiğin kalıp içine enjekte edilmesi sırasında direncin azalmasına dolayısıyla ihtiyaç duyulan basıncın azalmasına sebebiyet vermektedir.

3.2.1.2 Dolum süresi:

Enjeksiyon kalıplamada kalıp boşluğunun doğru şekilde doldurulmasını sağlamak için dikkat edilmesi gereken en önemli parametrelerden biri, dolum süresidir. Dolum süresi belirlenirken, özellikle kısa atış gibi kusurların önlenmesi için doğru hesaplanması büyük önem taşımaktadır. Dolum süresine ait simülasyon sonuçları incelenirken, oluşan renk skalası dikkate alınmaktadır. Buna göre kısa atış hatasının oluşumu durumunda parça şeffaf görünürken, maviden kırmızıya doğru (doldurma süresi arttıkça) bir renk skalası oluşur. Kırmızı ve en uzak nokta, dolum için gerekli toplam süreyi ifade eder. Dolum süresi, parçanın bütün olarak kalıptan çıkarılması ve kalıbın tam olarak doldurulması için önemli ve dikkat edilmesi gereken parametrelerden biridir. Dolayısıyla simülasyon çalışmaları ile bu süre kolaylıkla belirlenerek en temel parça kalitesi garanti altına alınabilmektedir.

Enjeksiyon basıncı ve dolun süresi arasındaki ilişki Şekil 3.3'deki grafikte ifade edilebilir. Enjeksiyon aşaması ile birlikte basınç artmaya devam ederken, dolun zamanının arttırılması, enjeksiyon aşamasını uzatıp, kalıp içindeki basıncı düşürmektedir. Ancak, daha kısa dolun süreleri, yani yüksek akış hızlarının kullanılması durumunda, basınç zamana bağı olarak artacaktır. Bu nedenle optimum basınç ihtiyacı ve proses periyodunun belirlenmesinde bu basit ama önemli ilişkiye dikkat edilmelidir.



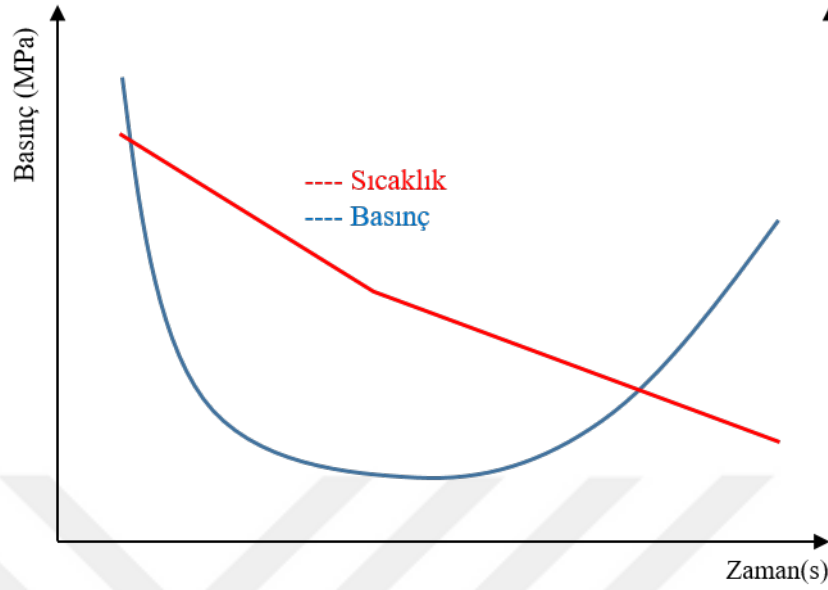
Şekil 3.3 Enjeksiyon basıncı ve süresi arasındaki ilişki

3.2.1.3 Erime sıcaklığı:

Termoplastik malzemelerin iki önemli sıcaklık değeri olan camı geçiş sıcaklığı (T_g) ve erime sıcaklığı (T_m), plastiklerin reolojik davranışlarını ve kalıplama sonrası ortaya çıkacak ürünün kalitesinin belirlenmesinde etkilidir. Erime sıcaklığından daha düşük olan camı geçiş sıcaklığında plastik katı haldedir. Plastiğin sıcaklığı camı geçiş sıcaklığına ulaştığında ise yoğunluk azalarak moleküller hareket etmeye başlar. Böylece malzeme kırılabilirlik özelliğini yitirerek hasar vermeden kuvvet uygulamaya uygun hale gelir. T_g ve T_m sıcaklıkları arasındaki farkı ABS (XR 404 / LG Chemical) malzemesi için örneklendirmek gerekirse; T_g 'si 116 °C iken enjeksiyon için gerekli erime sıcaklık aralığı 200-230 °C'dir [20].

Şekil 3.4'te doldurma basıncı ve akış ön sıcaklığının enjeksiyon sürelerine bağı değişimi gösterilmektedir. Basıncın yükselmesine neden olan etmenlerden biri, enjeksiyon sürelerinin kısalması ile artan kesme hızlarıdır. Enjeksiyon süresinin artışı ile birlikte düşen basınç ihtiyacı; optimum enjeksiyon süresinin üstüne çıkılması ile birlikte, eriyiğin akış önü sıcaklıklarının ve dolayısıyla viskozitesinin düşmesinden

kaynaklı olarak tekrar artış gösterir [37]. Basınç, parça geometrisi ve kalıp şekliyle de doğrudan ilişkilidir.



Şekil 3.4 Enjeksiyon basıncı ve sıcaklığın enjeksiyon süresi ile olan ilişkisi

3.2.1.4 V / P (hız doldurma / basınç kontrolü):

Hem IM hem de ICM metotlarında, enjeksiyonla birlikte hız kontrollü ilerleyen dolum, kalıp boşluğu tam olarak doldurulmadan, paketleme basıncına geçişte basınç kontrollü olarak devam eder. Proses hatalarının önlenmesi, özellikle ICM yöntemindeki kısa atış hatalarının giderilmesinde oldukça önemli bir parametre olarak, V / P (hacim doldurma / basınç kontrolü) değişim seviyeleri, literatür çalışmalarında farklı değerler almıştır. Üç boyutlu gaz vanası için yapılan çalışmada V/P değişimi, plastik, boşluk hacminin % 99'una kadar doldurulduğunda gerçekleştirilmiştir [4].

3.2.1.5 Paketleme basıncı:

Enjeksiyon kalıplama için, paketleme basıncı seviyesi, genellikle maksimum enjeksiyon basıncının % 80'ine ayarlanması tavsiye edilir. Sıkıştırma kuvveti, doldurma aşamasının sonunda en yüksek değerine kadar hızla artar ve sonra erimiş plastik katılaşırken sürekli olarak azalır [4]. ICM yönteminde paketlemenin yerini alan sıkıştırma aşamasında, enjeksiyon basıncı, sıkıştırma kuvvetinin uygulanması ile birlikte çok hızlı bir şekilde artmakta ve sıkıştırma sırasında hafifçe azalmaktadır, ancak bundan sonra, belirli bir seviyeyi korumaktadır [4].

3.2.2 Sıkıştırma Aşaması

3.2.2.1 Sıkıştırma mesafesi

Şekil 3.1’de görüleceği üzere, doldurma aşamasında eriyik malzeme, kalıp boşluğuna doldurulurken, kalıp nihai pozisyonunda değildir ve hareketli kalıpla sabit kalıp arasında mesafe bulunur. Sıkıştırma mesafesi olarak adlandırılan bu aralık, parçaya nihai şeklini vermek için azalır ve parça için belirlenmiş son kalınlık değerine kadar kapanmaya devam eder. Genel olarak, sıkıştırma mesafesi, maksimum parça kalınlığının sıfır ila üç katı arasında değişen değerler alır [15].

3.2.2.2 Sıkıştırma başlangıcı/dönüşümü (sıkıştırma anahtarı ayarı)

Enjeksiyon aşamasının belirli bir aşamasında veya bu sürecin sonunda, kalıp aralığının kapanması için, sıkıştırma aşaması başlar. Kalıp boşluğunu dolduran eriyiğin kalıp boşluğunun hacmine göre oranı sıkıştırma başlangıcını belirlemek için kullanılır. Buna göre örneğin kalıp boşluğunun % 70’i doldurulduğunda, hareketli kalıp ileri doğru hareket ederek sıkıştırma işlemini başlatır.

3.2.2.3 Sıkıştırma süresi

Sıkıştırma hareketinin başlangıcı ve bitişi arasında geçen toplam süre, sıkıştırma süresi olarak ifade edilir. Hareketli kalıbın sıkıştırma hareketi, eriyiği, kalıp boşluğunun içini doldurmaya zorlarken ve belirlenen süre boyunca sıkıştırma kuvvetini korur. Sıkıştırma aşamasının başlangıcı ile birlikte sıkıştırma süresi başlamış olur. Sıkıştırma süresi, sadece kalıp boşluğunun kapanması ile bitmez ve parçada oluşabilecek, kalıntı gerilmelerin dolayısıyla çekme ve çarpılmaların engellenmesi için belirlenen süre boyunca devam eder.

3.2.2.4 Sıkıştırma hızı

Hareketli kalıbın sıkıştırma aşamasının başlaması ile birlikte ileri doğru hareketi yani kalıp boşluğunun kapanma hızı sıkıştırma hızı olarak tariflenir. Proses süresince sabit ve değişken hızlar seçilebilmektedir.

3.2.2.5 Sıkıştırma kuvveti

Parçaya nihai şeklini veren sıkıştırma kuvveti, ICM metoduna özgü karakteristik avantajların belirleyicisi rolündedir. Sıkıştırma kuvveti kalıp içindeki basınç dağılımını homojen hale getirmesi, kenetlenme kuvveti ve enjeksiyon basınç

ihtiyaçlarını düşürmesi nedeniyle, ICM yönteminin önemli bir parametresi olarak göze çarpmaktadır.



ICM METODUNDA KALIP İÇİ AKIŞIN MATEMATİKSEL İFADESİ

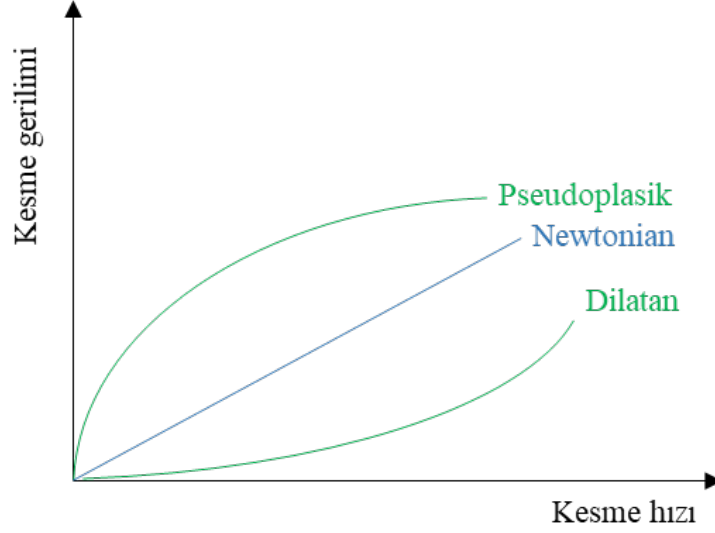
Literatürdeki bazı çalışmalarda, polimer eriyik akışının, izotermal olmayan koşullar altında yarı-kararlı bir genelleştirilmiş-Newtonian sıkıştırılabilir akışkan akışı olduğu varsayılarak, akış ve sıcaklık alanı için geçerli denklemler verilmiştir [2, 23]. Çalışmaların bazılarında ise, akışın Newtonian ve izotermal olmayan ve hafif sıkıştırılabilir olmadığı kabulü üzerine denklemler verilmiştir [6].

Genel olarak akış tipleri Newtonian ve Newtonian olmayan olarak sınıflandırılmaktadır. Buna göre su veya yağ gibi, kayma hızından bağımsız bir viskozite ile karakterize edilen Newton akışkanlarda, kesme gerilmesi ve kesme hızı doğrusal olarak ilişkilendirilir. Kesme gerilmesi-kayma hızı ilişkisinin eğimi viskozite (μ) ile ifade edilir. Yani Newtonian sıvı, viskozitenin kayma hızından bağımsız olduğu sıvılar için geçerli bir tanımlamadır ve Denklem (4.1) ile ifade edilir:

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (4.1)$$

τ , kayma gerilmesini, $\frac{du}{dy}$, kesme hızını, μ dinamik viskoziteyi temsil eder.

Newton tipi olmayan akışkanlar ise, viskozitenin kayma hızına bağlı olduğu akışkanlar için geçerlidir. Her iki akışkan tipine ait grafik Şekil 4.1’de gösterilmiştir.



Şekil 4.1 Temel akışkan tipleri

Newton tipi akışkanlarda, korunum denklemleri lineer olarak ifade edilirken Newton tipi olmayan akışkanlarda ise lineer olmayan (non-linear) olarak ifade edilir. Newton tipi olmayan akışkanlar için viskozite, kayma hızına göre değişirken, kesme gerilmesi ve kesme hızı arasındaki ilişki K sabit faktörü ile ilişkilendirilerek Denklem (4.2)'deki gibi yazılabilir [38]:

$$\tau = K \left[\frac{du}{dy} \right]^n \quad (4.2)$$

1. $n < 1$ psödoplastik akışkanlar için (viskozite, kesme hızı, kesme incelmesi ile azalır),
2. Newton akışkanları için $n = 1$ ve $K = \mu$ (sabit viskozite),
3. dilatan sıvılar için $n > 1$ (kayma hızı, kesme kalınlaşması ile viskozite artar).

4.1 Korunum Denklemleri

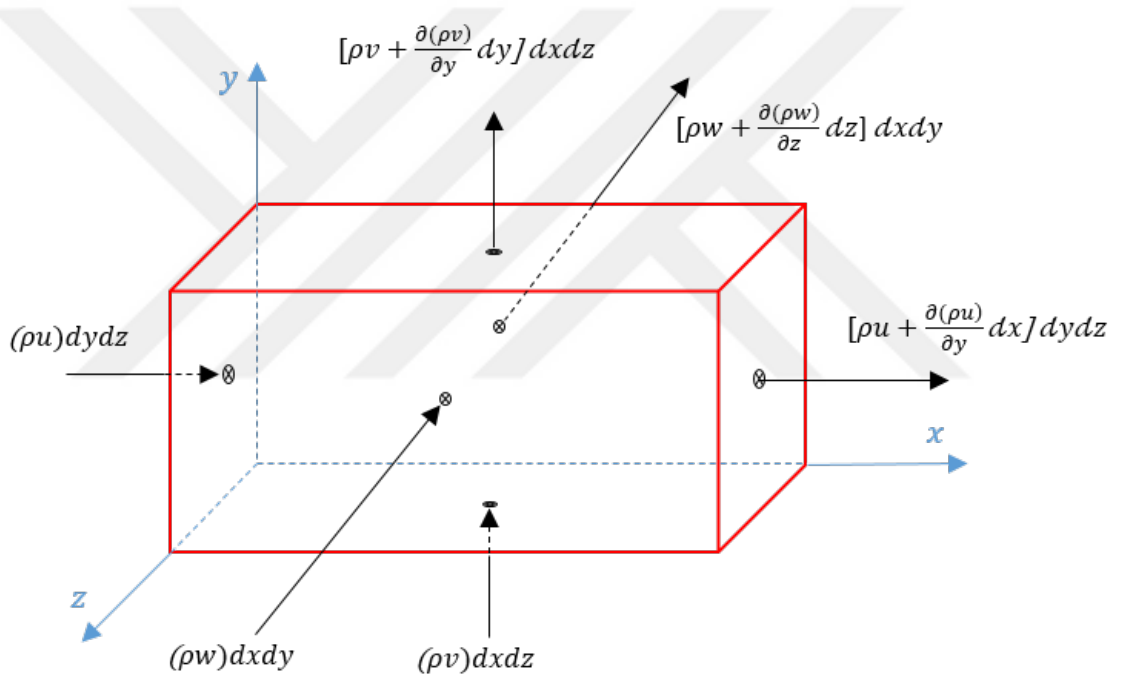
Korunum denklemleri; kütle korunumunu tanımlayan süreklilik, bir akışkan parça üzerindeki kuvvetlerin toplamına eşit olan momentum ve son olarak termodinamiğin birinci yasası olan enerji korunumundan oluşur. ICM yöntemi için literatürde verilen matematiksel denklemler, akışın izotermal olup olmayışı, Newtonian veya non-Newtonian oluşu ve sıkıştırılabilir-sıkıştırılamaz gibi kabul şartları dikkate alınarak oluşturulmuştur. Çalışmada, korunum denklemleri verilirken, ICM kalıplamanın izotermal olmadığı, Newton kuralına uymadığı ve zayıf şekilde

sıkıştırılabilir olduğu kabulü yapılmıştır. Bir polimer eriyiğinin akış cephesini tanımlayan süreklilik, momentum ve enerji denklemleri, literatürdeki notasyon farklılıklarına rağmen, benzer ifadelerle verilmiştir [1, 4, 6, 9, 10, 12, 22, 27, 39].

Korunum denklemleri, sonsuz küçük, altı yüzlü bir prizmatik kontrol hacminin süreklilik, momentum ve enerji denklemlerinin, ikinci mertebeden kısmi diferansiyel denklem formunda gösterilmesi ile açıklanabilir.

4.1.1 Süreklilik Denklemleri

Sonsuz küçüklükteki kontrol hacmine giren ve çıkan, diferansiyel formdaki kütle denklemleri birbirinden çıkarılarak süreklilik denklemleri elde edilir.



Şekil 4.2 Kütle korunumu

Şekil 4.2'deki şematik gösterimden faydalanarak x, y ve z yönleri için net kütle oranları bulunur:

$$\left[\rho u + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} dx \right] dydz - (\rho u) dydz = \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} dx dydz \quad (4.3)$$

$$\left[\rho v + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} dy \right] dxdz - (\rho v) dxdz = \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} dx dydz \quad (4.4)$$

$$\left[\rho w + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} dz \right] dxdy - (\rho w) dxdy = \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} dx dydz \quad (4.5)$$

$$\left[\frac{\partial(\rho w)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial z} \right] dx dy dz = -\frac{\partial \rho}{\partial t} (dx dy dz) \quad (4.6)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (4.7)$$

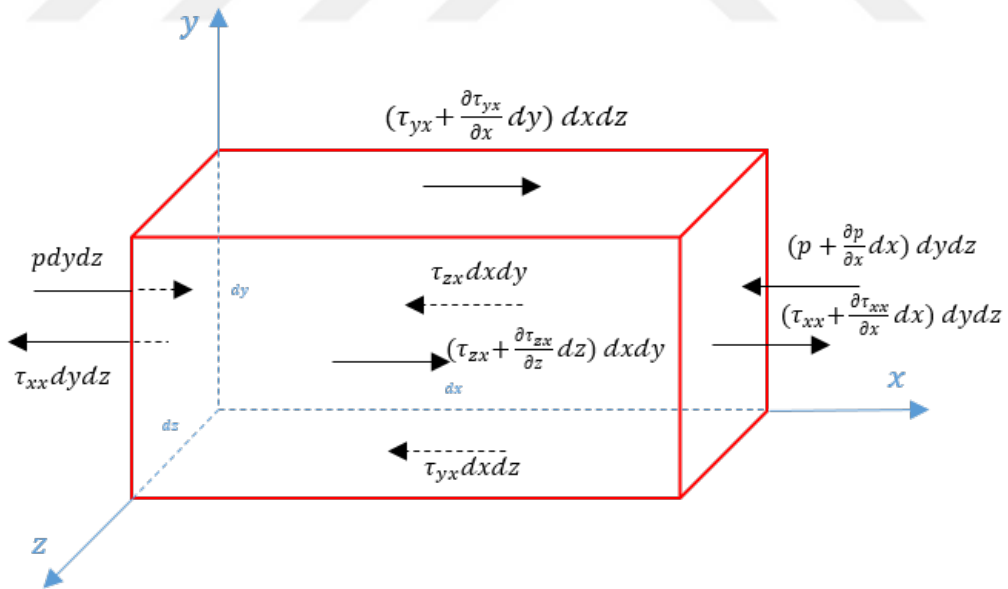
$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \mathbf{v} = 0 \quad (4.8)$$

ρ yoğunluk, $\mathbf{v}$ hız vektörü, Delta, $\nabla = (\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z})$, akışın hızını ifade etmek için $\mathbf{v} = (u, v, w)$ kullanılırken, 3D Kartezyen koordinat sistemi ise x, y, z ile ifade edilir.

$$\mathbf{v} \cdot \nabla = u \frac{\partial}{\partial x} + v \frac{\partial}{\partial y} + w \frac{\partial}{\partial z} \quad (4.9)$$

4.1.2 Momentum Denklemleri

Sonsuz küçüklikteki kontrol hacminde momentum korunumu, x yönünde etkiyen yerçekimi, basınç, yüzey kuvvetleri için Şekil 4.3'deki gibi gösterilmiştir.



Şekil 4.3 Momentum korunumu

x yönündeki toplam kuvvetler dikkate alınır:

$$F_x = m a_x = \rho (dy dz) \frac{Dv}{Dt} \quad (4.10)$$

elde edilir. Denklem (4.10), kontrol hacmindeki kuvvetlere eşitlenirse, toplam kuvvet ifadesi ortaya çıkarılmış olur.

Momentum korunumunun en genel hali Navier-Stokes denklemleri ile ifade edilir:

$$\rho \frac{D\mathbf{v}}{Dt} = \boldsymbol{\sigma} + \rho \mathbf{g} \quad (4.11)$$

$\rho \mathbf{g}$ yer çekimi kuvveti, $\boldsymbol{\sigma} = -\nabla p + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau}$ toplam gerilme tensörüdür.

$$\boldsymbol{\sigma} = \begin{pmatrix} \sigma_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_{zz} \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} p & 0 & 0 \\ 0 & p & 0 \\ 0 & 0 & p \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \sigma_{xx} + p & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_{yy} + p & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_{zz} + p \end{pmatrix} \quad (4.12)$$

$$\rho \frac{D\mathbf{v}}{Dt} = -\nabla p + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} + \rho \mathbf{g} \quad (4.13)$$

p basınç, $\boldsymbol{\tau}$ viskoz gerilme tensörü, $\frac{D}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + (\nabla \cdot \mathbf{v})\mathbf{v}$ malzeme türevidir.

$$(\nabla \cdot \mathbf{v})\mathbf{v} = \begin{bmatrix} u \frac{\partial u}{\partial x} + u \frac{\partial v}{\partial y} + u \frac{\partial w}{\partial z} \\ v \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + v \frac{\partial w}{\partial z} \\ w \frac{\partial u}{\partial x} + w \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \end{bmatrix} \quad (4.14)$$

Denklem (4.14)'ün ve malzeme türevinin, Denklem (4.13)'e ikame edilmesi, momentum denklemlerinin aşağıdaki şekilde ifade edilmesini sağlar:

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \rho g_x + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \quad (4.15)$$

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \rho g_y + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} \quad (4.16)$$

$$\rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \rho g_z + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \quad (4.17)$$

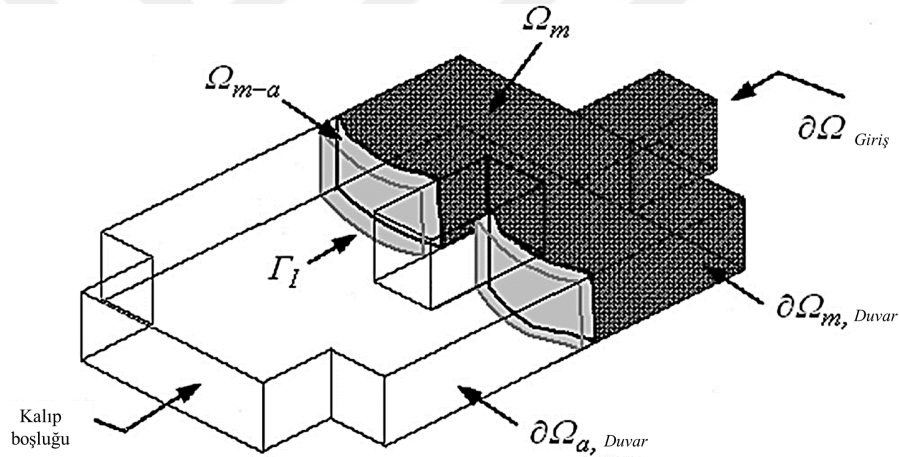
Kontrol hacmine basınç kuvvetleri ve normal gerilme (τ_{xx}) dikey olarak etki ederken, kesme gerilmesi (τ_{yx}) yüzeye paralel etki eder. τ bir kartezyen koordinat sisteminde, bir skaler denklem kümesi olarak yazılabilen viskoz gerilme tensörüdür.

$$\tau = \mu [(\nabla \cdot \mathbf{v} + \nabla \cdot \mathbf{v}^T)] + -\frac{2}{3}\mu(\nabla \cdot \mathbf{v})\mathbf{I} \quad (4.18)$$

$\mathbf{I}$ birim vektördür ve ε , gerinim tensörünün oranıdır ve Denklem (4.19) ile tanımlanır:

$$\varepsilon = 1/2(\nabla \cdot \mathbf{v} + \nabla \cdot \mathbf{v}^T) \quad (4.19)$$

Şekil 4.4'e bakıldığında, 3 boyutlu bir kalıp boşluğundaki termal akış, sıkıştırılabilir viskoz akış ve sabit sıcaklık arasındaki bağlantı ile karakterize edilir. Sıkıştırılabilir bir viskoz akış hızı $\mathbf{u}(\mathbf{x}; t)$ süreklilik denklemi ile yönetilir [4].



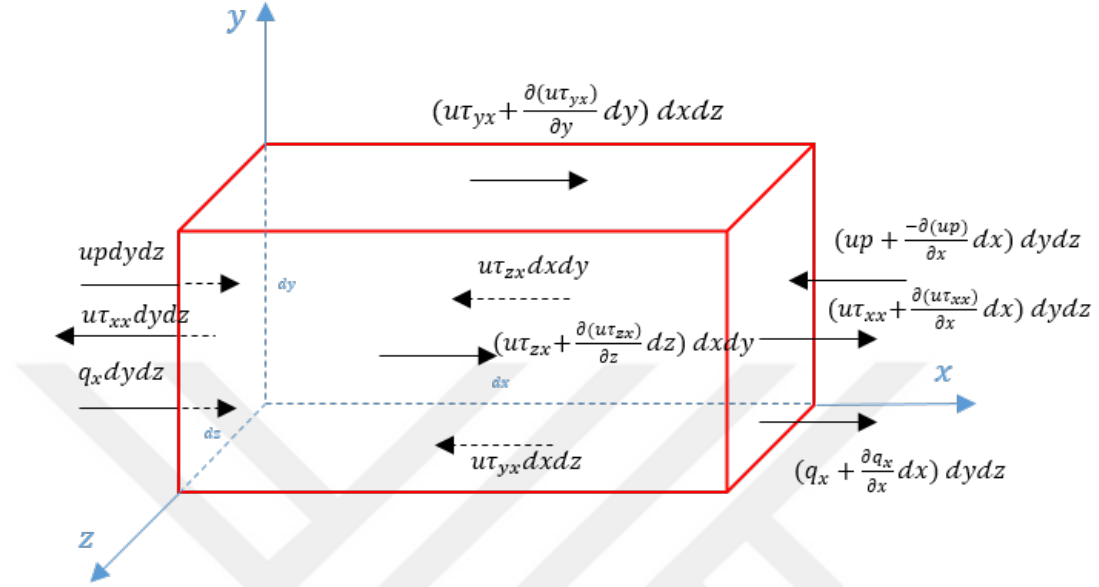
Şekil 4.4 Eriyik ve hava akışı şematik gösterimi

Ω_m ve Ω_a olarak gösterilen malzeme domainleri, ve Γ_I arayüzü, eriyik ve havanın kesirli hacim fraksiyonları ile tanımlanır. $f_m(\mathbf{x}; t)$ ($0 \leq f_m \leq 1$) ifadesinin hacim fraksiyonu problemi verilir ve ifade eriyiğin akış cephesini izlemek için kullanılır. Bir taşıma denklemi ile yönetilen hacim fraksiyonu fonksiyonu f , eriyik ve havanın 0 ile 1 arasındaki hacim ağırlıklı değerlerini belirler ve $f_m + f_a = 1$ ilişkisi ile açıklanır [4, 9].

$$\frac{\partial f_m}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla f_m = 0 \quad (4.20)$$

4.1.3 Enerji Denklemleri

x yönündeki enerji korunumu denkleminin ortaya çıkarılması için Şekil 4.5'te gösterilen kontrol hacmindeki akışkan elemanın enerji değişimi, ısı akışı ve kütle ile yüzey kuvvetleri tarafından yapılan işin toplamından faydalanılmıştır.



Şekil 4.5 Birim kontrol hacmindeki enerji korunumu

Enerji denkleminin en genel hali Denklem (4.21) ile verilir:

$$\rho c_p \frac{DT}{Dt} = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \eta \dot{\gamma}^2 + \beta T \frac{Dp}{Dt} \quad (4.21)$$

$$\begin{aligned} \rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right) &= \frac{\partial}{\partial x} \cdot \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \cdot \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \cdot \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) \\ &+ \eta \dot{\gamma}^2 + \beta T \left(\frac{\partial p}{\partial t} + u \frac{\partial p}{\partial x} + v \frac{\partial p}{\partial y} + w \frac{\partial p}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (4.22)$$

İzotermal sıkıştırma ısı terimi ihmal edilir ve enerji denklemi aşağıdaki denkleme dönüştürülür [40].

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \cdot \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \cdot \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \cdot \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \eta \dot{\gamma}^2 \quad (4.23)$$

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla T \right) = \nabla \cdot (k \nabla T) + \eta \dot{\gamma}^2 \quad (4.24)$$

C_p sabit basınçta özgül ısı, β ısı genleşme katsayısı, η genelleştirilmiş Newton viskozitesi ve k ısı akısı vektörüdür. Kesme oranı tensörü $\dot{\gamma}$, Denklem (4.25) gibi yazılır:

$$\dot{\gamma} = \sqrt{2\boldsymbol{\varepsilon} : \boldsymbol{\varepsilon}} \quad (4.25)$$

İfade yeniden düzenlenirse:

$$\dot{\gamma} = \sqrt{\left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)^2} \quad (4.26)$$

4.2 Arbitrary Lagrange-Eulerian (ALE) Tekniği

Nümerik analiz metotlarının gerçekleştirilebilmesi için faydalanılan farklı yaklaşımlardan biri de Arbitrary Lagrange-Eulerian (ALE) tekniğidir. Cao ve arkadaşları [13] çalışmalarında, , üç boyutlu, sıkıştırılabilir ve viskoelastik akışkan olarak tanımlanmış akışı ve akış alanını güncellemek için Arbitrary Lagrange-Eulerian (ALE) tekniğini kullanmışlardır. Bu teknik, önerilen teori ve algoritmaya dayanarak, program kodları, enjeksiyon / sıkıştırma kalıplama sırasında basıncın, hızın, sıcaklığın ve gerilmenin değişimini simüle etmek için geliştirilmiştir. $\dot{\mathbf{x}}$ ağ hareket hızını, $\mathbf{u}$ erime akış hızını belirtir, $\mathbf{w} \equiv \mathbf{u} - \dot{\mathbf{x}}$ farkı ise konvektif hız olarak adlandırılır. Eğer ızgara hızı $\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{0}$ ise, Eulerian tanımına, $\mathbf{x} = \mathbf{u}$ ise Lagrangian açıklamasına denk düşer. Belytschko'nun teorisine göre, ϕ malzeme zaman türevi:

$$\frac{d\phi(\mathbf{x}, t)}{dt} = \frac{\partial \phi}{\partial t} + \mathbf{w} \cdot \nabla \phi \quad (4.27)$$

Hem doldurma hem de sıkıştırma aşamalarındaki akış hızı küçük olduğundan, eylemsizlik kuvveti viskoz kuvvete kıyasla anlamlı değildir ve burada ihmal edilir. Buna göre Arbitrary Lagrange-Eulerian (ALE) tanımındaki kütle, momentum ve enerji denklemleri [13]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \nabla \cdot \mathbf{u} + \mathbf{w} \cdot \nabla \rho = 0 \quad (4.28)$$

$$\rho \mathbf{f} - \nabla p + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} = 0 \quad (4.29)$$

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{w} \cdot \nabla T \right) = \nabla \cdot (k \nabla T) + \boldsymbol{\tau} : \dot{\boldsymbol{\gamma}} \quad (4.30)$$

ile tanımlanır.

Newtoninan ve viskoleastik bileşenlere ayrılan viskoelastik bir akışkan için gerilme tensörü Denklem (4.31) ile tarif edilmiştir:

$$\boldsymbol{\tau} = \boldsymbol{\tau}_s + \boldsymbol{\tau}_v \quad (4.31)$$

$\boldsymbol{\tau}_v = \sum_i \boldsymbol{\tau}_i$, farklı modların toplamını temsil eden viskoelastisite kaynaklı gerilme tensörü, ve $\boldsymbol{\tau}_s$ ise Newtonian akış gerilmesini temsil eder [13].

$$\boldsymbol{\tau}_s = \left(2\eta_s - \frac{1}{3} \nabla \cdot \mathbf{u} \mathbf{I} \right) \dot{\boldsymbol{\gamma}} \quad (4.32)$$

4.2.1 Korunum Denklemlerinin İntegral Formu

Korunum denklemleri, literatürde genel olarak diferansiyel denklem takımları olarak ifade edilirken, özellikle nümerik analiz metotlarının önerildiği çalışmalarda, korunum denklemleri integral haliyle verilmiştir. Bunun nedeni, nümerik analizde kullanılan denklem takımlarında, korunum denklemlerinin integrali alınmış ifadelerinden faydalanılmasıdır.

Sıkıştırılabilir enjeksiyon kalıplamanın doldurma ve doldurma sonrası aşamalarındaki akışını ifade eden kütle, momentum ve enerji denklemlerinin diferansiyel formu, bir kontrol hacmi üzerinden integral formunda aşağıdaki gibi yazılabilir [6, 39]:

Süreklilik denklemi;

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho dV + \int_S \rho (\mathbf{v}_0 - \mathbf{v}_f) dS = 0 \quad (4.33)$$

Momentum denklemi;

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho \mathbf{v} dV + \int_S \rho \mathbf{v} (\mathbf{v}_0 - \mathbf{v}_f) dS = \int_S (\boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{n}) dS + \int_V \rho \mathbf{g} dV \quad (4.34)$$

Enerji denklemi;

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho h dV + \int_S \rho h (\mathbf{v}_0 - \mathbf{v}_f) dS = \int_S k (\nabla T \cdot \mathbf{n}) dS + \int_V 2\mu (\boldsymbol{\varepsilon} : \boldsymbol{\varepsilon}) dV \quad (4.35)$$

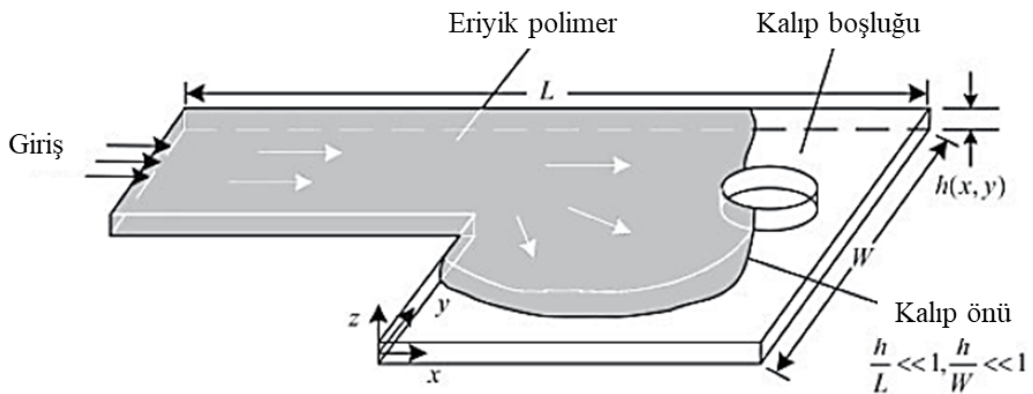
burada $\mathbf{V}$ arbitrary şekle sahip bir hacim, S , $\mathbf{V}$ 'nin yüzeyi, $\mathbf{n}$ sınır yüzeyindeki (V) birim normal vektör, ρ sıvının yoğunluğu, $\mathbf{v}$ hız, $\mathbf{v}_s$, S yüzeyinin hızı, ve η viskozitedir.

Farklı çalışmalarda, enerji denklemi verilirken, entalpi veya özgül ısı kullanılmaktadır. Bu nedenle bu iki katsayı arasındaki ilişki Denklem (4.36) ile formüle edilir:

$$h_2 - h_1 = c_p (T_2 - T_1) \quad (4.36)$$

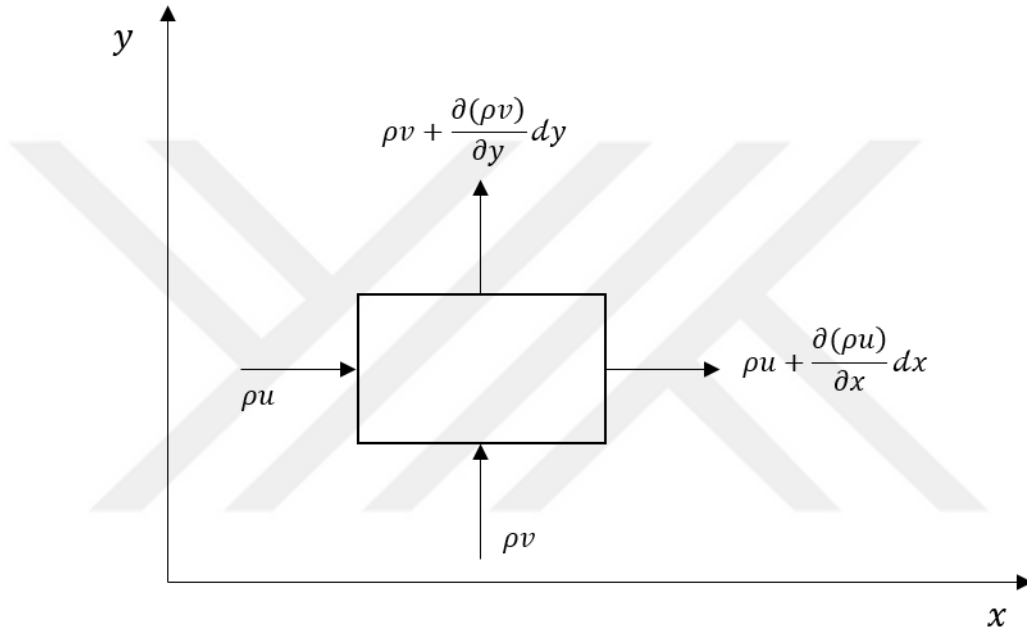
4.3 Hele-Shaw Modeli

Genel olarak, Hele-Shaw tipi akış modelinin, üç boyutlu ince kesitli parçaların kalıplanmasında, kalıp boşluğundaki polimer eriyik akışını makul derecede doğru bir tarifini sağladığı kabul edilmiş ve analizlerde yaygın olarak Hele-Shaw modeli kullanılmıştır [11, 23].



Şekil 4.6 Hele-Shaw modelini tanımlayan akışın şematik olarak gösterimi [41]

Hele-Shaw yaklaşımında, Şekil 4.7'de gösterildiği üzere akış iki eksene indirilerek incelenir. Basıncın, yalnızca x ve y yönünün bir fonksiyonu olduğunu, z yönündeki hız bileşeninin ve viskoz kuvvetlere kıyasla atalet kuvvetlerinin ve x ve y yönlerindeki hız gradyanlarının z yönündeki hız gradyanlarına kıyasla önemsiz olduğu kabul edilir. Korunum denklemleri, Newtonian viskozitesini μ , basınç, sıcaklık ve kesme oranına bağlı Newtonian olmayan viskozite η ile değiştirerek, genelleştirir ve Hele-Shaw yaklaşımları kullanılarak, bu denklemler sadeleştirilir. Sonuç olarak, izotermal olmayan koşullar altında Newtonian olmayan akışkanlar için genelleştirilmiş Hele-Shaw sayısal modeli elde edilir [42].



Şekil 4.7 İki boyutlu elemanter bir eleman üzerinden giren ve çıkan akış

Buna göre w hızını, z yönünde ihmal ederek, süreklilik denklemi elde edilir:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} = 0 \quad (4.37)$$

Yukarıdaki kabullerin ardından momentum denklemleri yeniden düzenlenirse:

$$-\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\eta \frac{\partial u}{\partial z} \right) = 0 \quad (4.38)$$

$$-\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\eta \frac{\partial v}{\partial z} \right) = 0 \quad (4.39)$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} = 0 \quad (4.40)$$

Elde edilen momentum denklemlerinin, kalıp aralığı yönünde integrali alınarak uygun sınır koşulları uygulanır [8].

$$u = 0 \rightarrow z = \{0, h\} \quad (4.41)$$

h , kalıp boşluğunun kalınlığıdır.

$$\frac{\partial u}{\partial z} = \frac{\partial P}{\partial x} \left(\frac{z}{\eta} \right) + \frac{C_1}{\eta} \quad (4.42)$$

Burada C_1 , Denklem (4.42)'nin sınır koşulu Denklem (4.41) yardımıyla boşluk yönünde entegrasyonu ile belirlenen bir katsayıdır. C_1 katsayısının değiştirilmesi ile:

$$\frac{\partial u}{\partial z} = \frac{\partial P}{\partial x} \left(\frac{z - \lambda}{\eta} \right) \quad (4.43)$$

$$\lambda = \frac{\int_0^h \frac{z dz}{\eta}}{\int_0^h \frac{dz}{\eta}} \quad (4.44)$$

Denklem (4.41) sınır koşulunu z 'den h 'ye boşluk yönünden Denklem (4.42)'nin ikinci integrali ile kullanarak:

$$u(z) = -\frac{\partial P}{\partial x} \int_z^h \frac{(\tilde{z} - \lambda)}{\eta} d\tilde{z} \quad (4.45)$$

$$v(z) = -\frac{\partial P}{\partial y} \int_z^h \frac{(\tilde{z} - \lambda)}{\eta} d\tilde{z} \quad (4.46)$$

Denklem (4.8), Denklem (4.13)'ün yerine geçerek, basınç için aşağıdaki denklem elde edilir.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(S \frac{\partial P}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(S \frac{\partial P}{\partial y} \right) = \frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (4.47)$$

Zincir kuralını kullanarak, yoğunluğun zaman türevi, sıcaklık ve basıncın [2] zaman türevleri olarak yazılabilir:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p \frac{\partial T}{\partial t} + \left(\frac{\partial \rho}{\partial P} \right)_T \frac{\partial P}{\partial t} \quad (4.48)$$

Denklem (4.47)'deki ilgili yerlerine, Denklem (4.45), (4.46) ve (4.48)'i yerleştirerek, doldurma ve sıkıştırma aşamaları yazılabilir:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(S \frac{\partial P}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(S \frac{\partial P}{\partial y} \right) = G \frac{\partial P}{\partial t} + F \quad (4.49)$$

$$G = \int_0^h \left(\frac{\partial \rho}{\partial P} \right)_T dz \quad (4.50)$$

$$F = \int_0^h \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p \frac{\partial T}{\partial t} dz \quad (4.51)$$

Akışkanlık olarak tanımlanan S , Denklem (4.52) ile tanımlanır:

$$S = \int_0^h \rho \left(\int_z^h \frac{(\tilde{z} - \lambda)}{\eta} d\tilde{z} \right) dz \quad (4.52)$$

Sıcaklık için sınır koşulu, sabit bir kalıp duvar sıcaklığı alınır: $T = -T_{w|z=0,h}$ ve başlangıç koşulu $T(x;0) = T_0$ ve soğutma hattında Biot konveksiyon sınır koşulu ile verilir[8]:

$$-\kappa \frac{\partial T}{\partial t} = h_\infty (T - T_\infty) \quad (4.53)$$

κ ısı iletkenlik, T_∞ ve h_∞ sırasıyla kalıp ve soğutucu arasındaki, soğutucu akışkan sıcaklığı ile ısı transfer katsayısıdır [4].

Her ne kadar Hele-Shaw modeli diğer adıyla 2.5D modeli, akışkanı sıkıştıran bazı karakterleri tanımlayabilse de sadece homojen kalınlık değerine sahip ince parçalarda iyi performans gösterir. Çünkü kalınlık yönündeki akış değişimi ihmal edilir. Ayrıca, örneğin, viskoz sürtünme nedeniyle oluşan sıcaklık artışı ve kavite kalınlığının değişmesi, 2.5D modelinde ihmal edilebilir düzeydedir. Homojen olmayan veya karmaşık geometriye sahip kalıp boşluğunda, akış davranışını tam olarak karakterize

etmek için, her ne kadar çok fazla hesaplama gerektirse de, Hele-Shaw yaklaşımındaki ihmaller yapılmadan Navier Stokes eşitliklerinin kullanılması tavsiye edilmektedir [13, 15].

4.4 Viskozite Modeli

Viskozite, bir malzemenin akışa karşı direncinin bir ölçüsüdür ve genellikle sabit sıcaklıkta, sabit bir değerdir. Termoplastikler için kimyasal yapıya, bileşime ve işleme göre değişkenlik gösteren viskozite, öncelikle sıcaklığa, kesme hızına ve basınca bağlıdır [43].

4.4.1 Modifiye-Cross Modeli - Williams-Landel-Ferry (WLF)

Enjeksiyonla kalıplama yöntemi ile ilgili yapılan çalışmalarda, üs yasası (Power Law) viskozite modeli ve Cross-WLF viskozite modeli gibi modeller kullanılmıştır. ICM yöntemi için yapılan çalışmalarda ise, eriyiklerin reolojik davranışları ve Newtonian olmayan viskoziteleri, ağırlıklı olarak “Cross Williams-Landel-Ferry (WLF)” modeli ile temsil edilmiştir [1–4, 7, 9–12, 15, 25–27, 39]. Cross WLF viskozite modeli, sıcaklık, kesme hızı ve polimer eriyik basıncı gibi akış özelliklerini açıklar ve polimer viskozitesi ile yoğunluk birleştirilerek elde edilir [2]. Akışkanın viskozitesi, η Denklem (4.54)’te verilmiştir:

$$\eta = \frac{\eta_0}{1 + \left[\frac{\eta_0 \dot{\gamma}}{\tau^*} \right]^{1-n}} \quad (4.54)$$

η viskozite, η_0 sıfır kayma hızı viskozitesi, τ^* , Newton ve Güç kanunu davranışları arasındaki geçişlerdeki kayma gerilmesi ve n , Powerlaw endeksidir.

η_0 , Williams-Landel-Ferry (WLF) denklemini kullanarak sıcaklığın bir fonksiyonu olarak gösterilebilir:

$$\eta_0 = D_1 \exp \left[-\frac{A_1 (T - T^*)}{A_2 + (T - T^*)} \right] \quad (4.55)$$

ve n , τ^* , D_1 , D_2 , D_3 , A_1 , ve $\tilde{A}_2$ katsayılar, η , $\dot{\gamma}$, T , ve p sırasıyla eriyiklerin viskozitesi, kayma hızı, sıcaklığı ve basıncıdır [3].

$$T^* = D_2 + D_3 P \quad (4.56)$$

$$A_2 = \tilde{A}_2 + D_3 P \quad (4.57)$$

Eşitliklerde belirtilen tüm malzeme sabitleri, Moldflow veya ilgili akış analizi yazılımından alınabilmektedir.

4.4.2 2 Alanlı Tait p v T Denklemleri

Değiştirilmiş 2 alanlı Tait p v T modeli, akış simülasyonu sırasında malzeme sıkıştırılabilirliğinin akışa olan etkisini hesaba katmak için kullanılır [2, 5, 26]. Enjeksiyon için kullanılan malzemenin sıkıştırılabilirlik özelliği, gerekli plastik hacmini direk olarak etkilemesi sebebiyle, malzemenin ne kadar sıkıştığını tespit etmek için malzemenin basınç (P), hacim (V) ve sıcaklık (T) gibi özelliklerini kullanılır.

Sıkıştırma tamamlandığında, eriyik çekmesi ve sıkıştırılabilirlik, 2 alanlı Tait p v T denkleminin uygulanmasıyla simüle edilebilir [3]:

$$V(T, p) = V_0(T) \left[1 - C \ln \left(1 + \frac{P}{B(T)} \right) \right] + v_i(T, p) \quad (4.58)$$

burada (V), spesifik hacim, V_0 , sıfır ölçüm basıncındaki spesifik hacim ve C bir sabittir. V_0 , v_i ve B terimleri erime sıcaklığına (T) bağlıdır.

Üst sıcaklık bölgesinde ($T > T_i$), bu üç terim şöyle tanımlanmaktadır:

$$\begin{cases} V_0 = b_{1m} + b_{2m}(T - b_5) \\ B(T) = b_{3m} \exp[-b_{4m}(T - b_5)] \\ V_i(T, p) = 0 \end{cases} \quad (4.59)$$

Düşük sıcaklık bölgesinde ($T < T_i$), ise:

$$\begin{cases} V_0 = b_{1s} + b_{2s}(T - b_5) \\ B(T) = b_{3s} \exp[-b_{4s}(T - b_5)] \\ V_i(T, p) = b_7 \exp[(b_8(T - b_5) - (b_9 p))] \end{cases} \quad (4.60)$$

ve

$$T_i(p) = b_5 + b_6 p \quad (4.61)$$

Kullanılan simülasyon yazılımından elde edilebilecek $b_{1m}, b_{2m}, b_{3m}, b_{4m}, b_{1s}, b_{2s}, b_{3s}, b_{4s}, b_5, b_6, b_7, b_8, b_9$ katsayıları, sabit sayılardır.

4.5 Nümerik Analiz

Kalıp boşluğu içerisinde ergimiş plastik akışının matematiksel modellenmesi, süreklilik, momentum ve enerji denklemleri temel alınarak gerçekleştirilir. Bu denklemlerin sayısal olarak çözümü ile akışın kalıp içindeki simülasyonu elde edilmektedir. Sıkıştırılmalı enjeksiyon kalıplama yöntemi için, eriyik akışının nümerik analizinde kullanılan yöntemlerin matematiksel modellerine literatürde kısıtlı olarak değinilmiştir. Önerilen metotların temelini, yine geleneksel enjeksiyon kalıplamaya ait temel denklemler ve bunların nümerik analizinde kullanılan farklı yaklaşımlar oluşturmaktadır. Ancak sıkıştırılmalı enjeksiyon metodunda sıkıştırma aşamasının, nümerik analizde hesaba katılması, prosesin en kritik ve karmaşık aşamasıdır. [6, 18, 23, 27].

Akışın davranışını ifade eden, çözümü zor ve uzun zaman alan kısmi diferansiyel denklemleri (partial differential equation) çözmek için, sonlu fark yöntemi (finite difference method/FDM), sonlu hacim yöntemi (finite volume method/FVM) ve sonlu elemanlar yöntemi (finite element method/FEM) gibi çeşitli metotlar kullanılmakta ve denklemler ayrıklaştırılarak çözülmektedir.

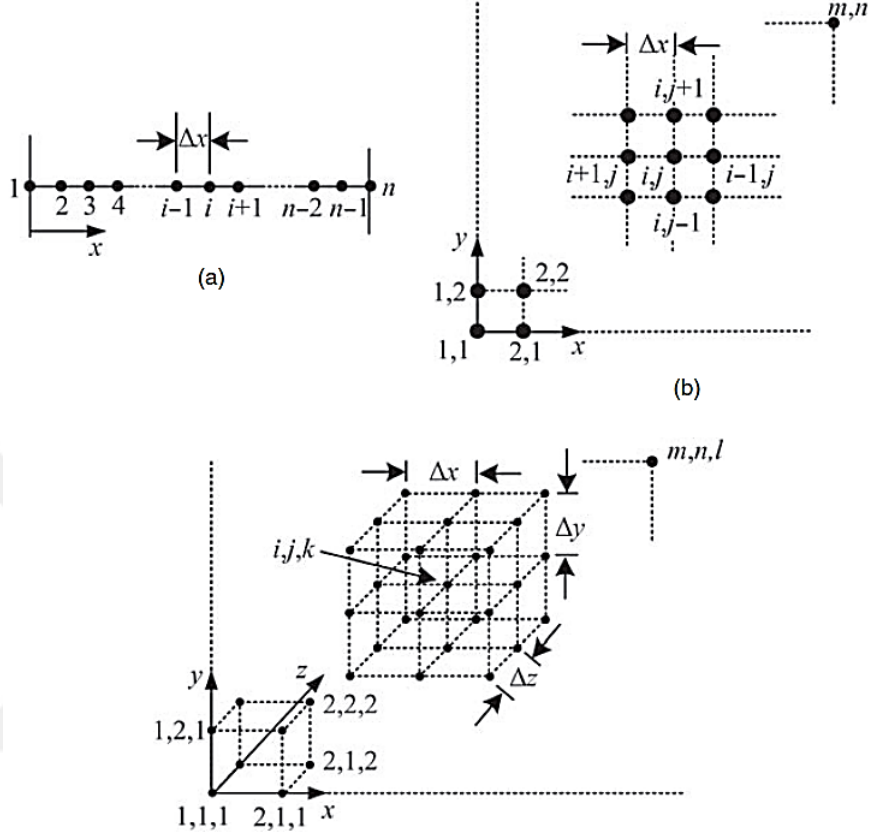
4.5.1 Sonlu Fark Yöntemi (FDM)

Diferansiyel denklemlerin çözümünde kullanılan yöntemlerden biri olan Sonlu Fark Yöntemi (FDM), hızlı ve doğru yakınsaması nedeniyle 1d sistemlerinde uygulanabilmektedir. Bu metot diferansiyel denklemleri lineer cebirsel denklemlere dönüştürürken, bağımsız değişkenleri yalnızca ayırık noktalarda dikkate alır [44]. 1768 yılında Euler tarafından uygulanan bu yöntem doğrudan diferansiyel denklem formuna uygulanan denklemlerin çözümünde ilk uygulanan metotlardan biridir. Yöntem, akışın değişkenlerini, Taylor serisi açılımı kullanarak ayrıklaştırmaktadır [45].

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{p(x) - p(x - \Delta x)}{\Delta x} \quad (4.62)$$

Bir kısmi diferansiyel denklemi ayrıklaştırmak için FDM yöntemi kullanıldığında, Denklem (4.62) örneğindeki yöntem kullanılır [46]. Basit ve yüksek dereceli doğruluk elde etme avantajı olan FDM, bir ızgara gerektirdiğinden, basit geometrilerle sınırlı bir uygulama alanına sahiptir. Ayrıca, eğrisel koordinatlarda uygulanamaması ve koordinat sisteminin Jacobian dönüşümü ile hata riski yüksek olması, kartezyen

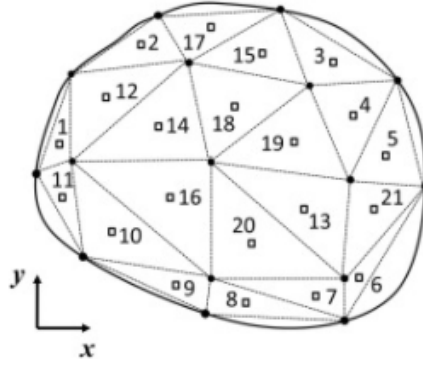
koordinat sistemine dönüştürme zorunluluğu yöntemin önemli dezavantajları olarak sayılabilir [45]. Sonlu fark yönteminde, ağ, düğüm adı verilen sayısız ayrık noktaların toplamıdır. Şekil 4.8’de, düğümler arasındaki farklar aynı olabileceği gibi farklı da olabilen, bir, iki ve üç boyutlu uniform fark ağları gösterilmektedir [41].



Şekil 4.8 1D(a), 2D(b)ve 3D(c) sonlu fark ayrıklaştırmasının şematik gösterimi [41]

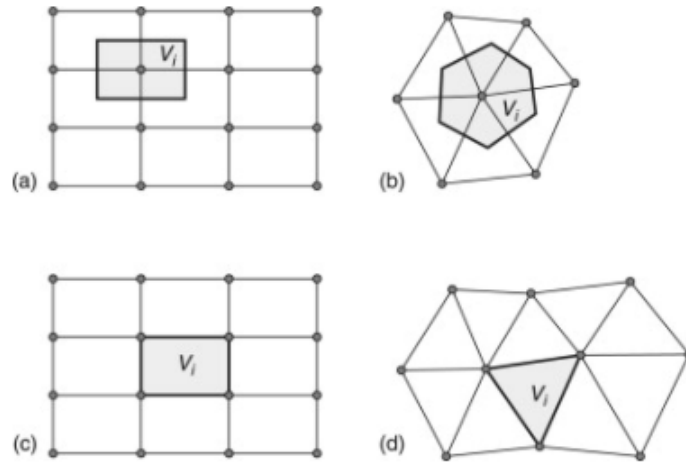
4.5.2 Sonlu Hacim Yöntemi (FVM)

Sonlu hacim yöntemi ile hesaplama alanını Şekil 4.9’da gösterildiği gibi hücreler halinde sonlu sayıda elemana bölerek kontrol hacimleri oluşturulur. Hücreler geleneksel olarak, dışbükey çokgenler (2D’de) veya çokyüzlüler (3D’de) olabilirken, farklı şekil ve boyuta sahip olabilmektedirler. Kavisli yüzeyleri, düz yüzeylerle birbirini yaklaştıran bu yüzeyler, hücre yüzeyleri olarak adlandırılırken, köşeler ise düğüm olarak adlandırılır [47].



Şekil 4.9 2D hesaplamalı etki alanının ve ağıın şematik gösterimi [47]

Çözüm için alanın Şekil 4.10'da gibi gri renkli alanlarla tanımlanan kontrol hacimlerine ayrıştırılması, ağıın her düğümünün sınırları, her elmanın kenarlarının orta noktaları ve ağırlık merkezi birleştirilerek bir sonlu hacim oluşturulur ve merkezi tepe merkezli olan bir yapı ortaya çıkar [48].



Şekil 4.10 Köşe merkezli FVM'de (a, b) ve hücre merkezli FVM'de (c, d) ağ ve çift ağ [48]

Ayrıştırma işleminden sonra diferansiyel denklemlerin integral formu oluşturulur. Örneğin, korunum denklemlerinden süreklilik denkleminin diferansiyel denklemler ifadesi:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (4.63)$$

şeklinde yazılırken, bir kontrol hacmi (veya sonlu bir hacim) için integral formu

Denklem (4.64)'deki gibi olmaktadır:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho dV + \int_S \rho \mathbf{u} \cdot d\mathbf{S} = 0 \quad (4.64)$$

Buna göre, kontrol yüzeyinden geçen net kütle akışı sıfır olmalıdır. FVM diferansiyel denklemleri, hacim setlerine bölerek integrallerini alarak ayrıklaştırır ve böylece çözümlerini sağlar. FVM yapılandırılmamış ağ temelli olduğu için karmaşık geometrilere uygulanabilmektedir. FEM'den farklı olarak diferansiyel denklemlere değil, onların integral haline uygulanması nedeniyle büyük türevler için çok daha doğru sonuçlar verebilmektedir [49]. Yöntem 2D ve 3D geometriler için benzer şekilde uygulanmaktadır.

4.5.3 Sonlu Eleman Yöntemi (FEM)

Sonlu eleman yöntemi (FEM), başlangıçta karmaşık geometriye sahip nesnelerin yapısal analizi için geliştirilmiştir. Kullanımı daha sonra ısı transferi ve akışkanlar mekaniği analizi dahil olmak üzere diğer disiplinleri kapsayacak şekilde genişletilmiştir [50]. Sonlu elemanlar yöntemi kullanarak diferansiyel ve integral denklemler çözülebilirken, FEM yöntemi, spektral yöntemler, süreksiz Galerkin yöntemleri, çok ölçekli FEM, genişletilmiş FEM (XFEM), stokastik FEM, vb. diğer Galerkin teknikleri gibi yeni yöntemlerle sürekli olarak geliştirilmektedir. Sıkıştırılamaz Navier-Stokes akışları için oldukça iyi çözümler sunarken, sıkıştırılabilir Euler veya Navier-Stokes akışları için henüz gelişime açık bir metottur. FEM yönteminde alan, ızgara adı verilen elemanlara/hücrelere bölünerek, üçgen, dörtgen doğrusal veya kavisli elemanlar oluşturulur [51].

4.6 ICM Yöntemi için Nümerik Analiz Metotlarına Genel Bakış

Lagrangian ve Euler, nümerik analiz metotlarının temel yaklaşımını oluşturmakta ve akışkan hareketini matematiksel olarak tanımlamaktadır. Lagrangian, akış alanı içerisindeki ayrı ayrı akışkan parçacıklarının konumları, hızları, vb. zamanın bir fonksiyonu olarak tanımlanır ve Newton yasaları ile kütle, enerjinin korunumu gibi fiziksel yasalar her parçacık için yazılabilir. Euler akışkan hareketi tanımında ise, tek tek akışkan parçacıkları yerine, bir kontrol hacmi tanımlanır ve basınç, hız, ivme ve diğer tüm akış özellikleri, kontrol hacmi içindeki alanlar olarak, dolayısıyla uzay ve zamanın (x, y, z, t) bir fonksiyonu olarak ifade edilir. Sıvı akışının Eulerian tanımında, belirli bir parçacığın konumu veya hızı hakkında değil, belirli bir zamanda belirli bir noktasında olan parçacığın hızı, ivmesi vb. ile ilgilenilir [52]. Lagrange

ve Eulerian algoritmalarının avantaj ve dezavantajları dikkate alınarak Arbitrary Lagrangian–Eulerian (ALE) yöntemleri geliştirilmiştir. Arbitrary Lagrangian–Eulerian (ALE) yöntemleri ile parçacık ve uzay noktasından bağımsız ağ noktaları ve bunların hareket metrik/mesh hızları tanımlanmıştır [41].

4.7 Hele-Shaw Modelinin Çözümünde Hibrid Metotların Kullanılması

Enjeksiyon ve sıkıştırma aşamalarının en genel halini ifade ederken kullanılan Denklem (4.49)'daki basınç probleminin çözümünde, sonlu kontrol hacmi ve sonlu elemanlar yöntemleri kullanılmıştır [8, 23]. Sonlu kontrol hacmi ve sonlu elemanlar yönteminin birleşimiyle elde edilen metot, Hele-Shaw akışkan yöntemine uygulanarak, kalıplama işlemi sırasında, akış ön ilerlemesi modellenirken, eriyikle doldurulmuş kalıp boşluğu içindeki basınç ve hız dağılımları hesaplanır.

Sonlu kontrol hacmi ve sonlu elemanlar yöntemlerinin birleştirilerek elde edilen yöntemle, analizler sırasında bir doldurma parametresi f tanımlanır ve hesaplanır. Sıkıştırma kalıplama için analiz algoritması daha ayrıntılı kütle dengesi düşünülmesini gerektirir ve kütle dengesi şu şekilde yazılır [23]:

$$\int_L \vec{V} \cdot \vec{n} dL = Q_c = - \sum_{c=1}^m \frac{\dot{h} \Delta_c}{3} \quad (4.65)$$

m , eriyik doldurulmuş kontrol hacmindeki toplam alt-eleman sayısı; Δ_e üçgen elemanın e alanı; $\vec{V}$, erime ön yüzeyindeki erime hızıdır ve Q_c , sıkıştırma ile ortaya çıkan toplam erime akış hızıdır.

Doldurma parametreleri, aşağıdaki ilişkiyi kullanarak her adımda değiştirilir ve güncellenir [18, 23]:

$$f_{new} = \frac{f_{org} V_{org} + q \Delta t}{V_{new}} \quad (4.66)$$

f , kontrol hacminin doldurma parametresidir (f_{new} yeni değerdir, f_{org} orjinal değeridir), V bir kontrol hacmi içindeki eriyik dolgulu hacimdir (V_{new} yeni değerdir, V_{org} orjinal değerdir), q yan duvardan bir kontrol hacmine hesaplanan akış hızı olarak ifade edilir.

Değişken zaman basamağı ile doldurulmamış bir kontrol hacmi, her zaman

basamağında eriyik ile doldurulur. Her zaman basamağında, düğüm ve doldurulacak ilgili kontrol hacmi seçildiğinde ise, Δt değeri Denklem (4.67) ile tarif edilir [18, 23]:

$$\Delta t = \frac{V_{\text{org}} (1 - f_{\text{org}})}{q + \sum_{c=1}^m \frac{\dot{h}_{\Delta_c}}{3}} \quad (4.67)$$

Sonlu elemanlar (FEM) ve Sonlu Farklar (FDM) metotlarını birleştirerek uygulanan bir diğer hibrit metot olan Galerkin metodu, Denklem (4.49)'daki doldurma ve sıkıştırma aşamalarını ifade eden basınç problemini çözmek için kullanmıştır [8]. Enjeksiyon kalıplamadaki benzer prosedürlerin ardından, doğrusal enterpolasyon fonksiyonları kullanılarak, uzunluğu L^l olan bir elemanın (l) sıkıştırmalı enjeksiyon kalıplama metodu için düğüm basınç ifadesi Denklem (4.68)'deki gibi yazılabilir:

$$\frac{L^{(l)}}{2} G_{(l)} \sum_l \hat{E}_{lN} \frac{P_l - P_l^{\text{old}}}{\Delta t} + \tilde{S}_{(l)} \sum_l \hat{D}_{lN} P_l = \frac{L^{(l)}}{2} F_{(l)} - \frac{L^{(l)}}{2} \dot{H}_{(l)} \quad (4.68)$$

$$\hat{E}_{lN} = \begin{cases} 2/3 & \text{if } i = N \\ 1/3 & \text{if } i \neq N \end{cases} \quad \text{ve} \quad \hat{D}_{lN} = \frac{1}{L^{(l)}} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.69)$$

Denklem (4.68) ve Denklem (4.69) standart ayırıklaştırma yöntemleri takip edilerek, sistem denklemi, ardışık gevşeme yöntemi (SUR) ile çözülmüştür. Sıcaklık alanı, sonlu bir fark yöntemi kullanılarak enerji denkleminin çözülmesiyle elde edilir. Ayrıca, kararlılığı sağlamak için sonlu fark formülasyonunda implicit (ayırıklaştırma) metodu kullanılmaktadır:

$$-Fo T_{t-1}^{t+\Delta t} + (1 + 2Fo) T_t^{t+\Delta t} - Fo T_{t+1}^{t+\Delta t} = T_t^t - \Delta t \left(v \frac{\Delta T}{\Delta x} \right)_i^t + \frac{\Delta t}{\rho C_p} (\eta \dot{\gamma}^2)_l^t \quad (4.70)$$

F_o Fourier sayısı Denklem (4.71) ile tanımlanır:

$$Fo = \frac{\alpha \Delta t}{(\Delta z)^2} \quad (4.71)$$

Hele-Shaw tipi akış modeli, üç boyutlu ince kesitli parçaların kalıplanmasında, makul analiz sonuçları vermektedir [3, 11, 19, 23]. Bununla birlikte yöntem, gerçek akış durumunun simüle edilmesinde soru işaretleri barındırmaktadır. Örneğin, viskoz sürtünmeden kaynaklanan viskoz ısınma ve boşluğun kalınlığının değişimi

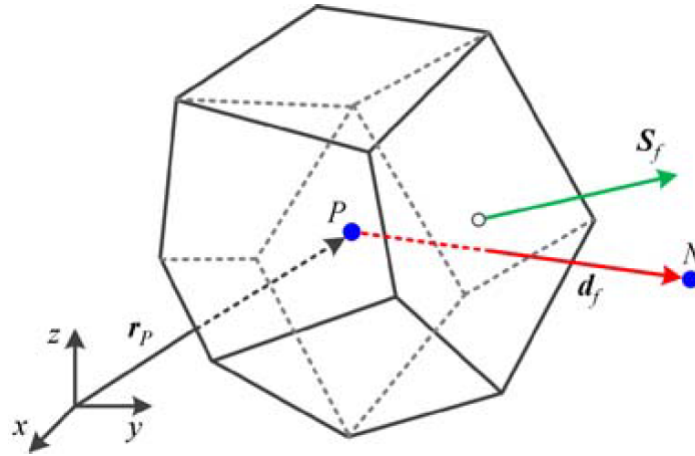
2.5D modelinde ihmal edilebilir [9]. Kontrol hacmi / sonlu eleman yöntemleriyle birleştirilmiş bir Hele-Shaw sıvı akış modeli, eriyik akış cephesi ilerlemesini belirlemek için kullanılır fakat bu yöntem ince parçalar için etkili olduğundan kalınlık yönündeki akış hızı dikkate alınmaz [6]. Sıkıştırılabilir enjeksiyon kalıplama metodunda, sıkıştırma aşması ile birlikte kalınlığın değişmesi nedeniyle, Hele-Shaw tipi akış modeli dışında, sonlu elemanlar yöntemine dayalı 3 boyutlu farklı simülasyon teknikleri önerilmiştir.

4.8 Sonlu Kontrol Hacmi Yöntemi

Akışkanlar dinamiğinde kısmi diferansiyel denklemler için bir ayrıklaştırma tekniği olan sonlu hacim yönteminde (FVM), genel taşıma denklemi, hızların normal hız olarak verilmesi ve bir birim vektör olarak tanımlanması ile korunum denklemlerinden elde edilir ve integral formunda yazılır [6]:

$$\frac{d}{dt} \int_V \Lambda \phi dV + \oint_S \mathbf{n} \cdot (\mathbf{v} - \mathbf{v}_s) \Lambda dS = \oint_S \mathbf{n} \cdot \Gamma \nabla \phi dS + \int_V Q_\phi dV \quad (4.72)$$

Sonlu hacim ayrıklaştırmasında, hesaplama alanı, sonlu sayıda üst üste binmeyen rastgele çok yüzlü hücreye bölünür ve her çok yüzlü hücre, Şekil 4.11'de gösterildiği gibi bir kontrol hacmi haline gelir.



Şekil 4.11 Genel çok yüzlü kontrol hacmi ve kullanılan gösterim [6]

Denklem (4.72) bir kontrol hacmi P 'ye uygulandığında, aşağıdaki denklem elde edilir:

$$\frac{d}{dt} \int_V \Lambda \phi dV + \sum_f \int_{S_f} \mathbf{n} \cdot (\mathbf{v} - \mathbf{v}_s) \Lambda \phi dS = \sum_f \int_{S_f} \mathbf{n} \cdot \Gamma \nabla \phi dS + \int_V Q_\phi dV \quad (4.73)$$

Burada $\sum_f()$, kontrol hacminin tüm yüzleri üzerindeki toplamı temsil eder. S_f , ise f yüzünün alanıdır.

Taşıma değişkenleri, kontrol hacminin merkezlerinde düzenlenir ve integraller, orta nokta kuralı ile yaklaşık olarak belirlenir. Geçici terim, zamansal ayrıklaştırmada kullanılan Euler ayrıklaştırma yöntemi ile yaklaşık olarak belirlenir:

$$\frac{d}{dt} \int_V \Lambda \phi dV = \frac{(\Lambda \phi V)_P - (\Lambda \phi V)_P^\circ}{\Delta t} \quad (4.74)$$

“o” önceki zaman basamağını gösterir, konvektif akı ise şu şekilde ifade edilebilir:

$$\int_{S_f} \mathbf{n} \cdot (\mathbf{v} - \mathbf{v}_s) \Lambda \phi dS \approx \Lambda_f (J_f - \dot{V}_f) \phi_f \quad (4.75)$$

j_f , hız ve basıncın bağlanmasını sağlamak için momentum interpolasyon yöntemi ile hesaplandığında, ϕ_f second-order upwind şeması ile hesaplanır ve $\dot{V}_f$ aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$\dot{V}_f = \frac{\delta V_f}{\Delta t} \quad (4.76)$$

Burada δV_f , δt zaman aralığı boyunca yüzey S_f tarafından süpürülen hacmi temsil eder. Difüzyif akı yaklaşık olarak hesaplanır:

$$\int_{S_f} \mathbf{n} \cdot \Gamma \nabla \phi dS \approx \Gamma_f |\mathbf{D}_f| \frac{\phi_N - \phi_P}{|\mathbf{r}_N - \mathbf{r}_P|} + \Gamma_f \mathbf{k}_f \cdot \overline{(\nabla \phi)_f} \quad (4.77)$$

$\mathbf{D}_f$ 'nin aşırı gevşetilmiş yaklaşım kullanılarak hesaplanabildiği yerlerde,

$$\mathbf{D}_f = \frac{|\mathbf{S}_f|^2 (\mathbf{r}_N - \mathbf{r}_P)}{\mathbf{S}_f \cdot (\mathbf{r}_N - \mathbf{r}_P)} \quad (4.78)$$

ve

$$\mathbf{k}_f = \mathbf{S}_f - \mathbf{D}_f \quad (4.79)$$

burada $\mathbf{S}_f = S_f \mathbf{n}_f$ hücre yüzü f 'nin yüzey vektörü, hücre yüzü f 'deki gradyan için

$\mathbf{D}_f$ vektörü ortogonal ve $\mathbf{k}_f$ vektörü ise ortogonal olmayan katkıları açıklamak için kullanılır. Sonuç olarak ayırık taşıma denklemi aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$a_p \phi_p = \sum_{nb} a_{nb} \phi_{nb} + b_p \quad (4.80)$$

$\sum$ kontrol hacmi, P 'nin komşu kontrol hacimleri üzerindeki toplamı temsil ederken, b_p , konvektif ve difüzyif akıların kaynak terimlerini içerir.

Sonlu Elemanlar Ayırıklaştırma ve Twofold İterasyon Şeması:

Cao ve arkadaşları [53] çalışmalarında Galerkin yöntemini, süreklilik, momentum ve enerji denklemleri için varyasyonel formülasyonlar oluştururken kullanmışlardır. Buna göre, Ω_t , t anındaki doldurulmuş bölgeyi gösterirken; $H^i(\Omega_t)$, Ω_t bölgesindeki Hilbert fonksiyon uzayının i_{th} sırasını temsil eder. Sınır koşullarına tabi Gauss formülü ile korunum denklemlerinin parçalarla integralinin alınması, aşağıdaki gibi varyasyon denklemlerini verir:

$$\iiint_{\Omega_t} \rho \mathbf{u} \cdot \nabla q d\Omega = \iint_r \rho \dot{h} q dS + \iiint_{\Omega_t} \frac{\partial \rho}{\partial t} q d\Omega - \iiint_{\Omega_t} (\dot{\mathbf{x}} \cdot \nabla \rho) q d\Omega \forall q \in H^1(\Omega_t) \quad (4.81)$$

$$\begin{aligned} \iiint_{\Omega_t} \eta_s \left(\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T - \frac{1}{3} \nabla \mathbf{u} \right) : \nabla \mathbf{v} d\Omega + \iiint_{\Omega_t} p \nabla \cdot \mathbf{v} d\Omega &= \iint_{\partial \Omega_t} \mathbf{t} \cdot \mathbf{v} dS \\ &+ \iiint_{\Omega_t} \rho \mathbf{f} \cdot \mathbf{v} d\Omega - \iiint_{\Omega_t} \tau_v : \nabla \mathbf{v} d\Omega. \forall \mathbf{v} \in H^2(\Omega_t)^3 \end{aligned} \quad (4.82)$$

$$\begin{aligned} \iiint_{\Omega_t} \rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{w} \cdot \nabla T \right) r d\Omega + k \iiint_{\Omega_t} \nabla T \cdot \nabla r d\Omega + h_a \iint_{\partial \Omega_t} \text{Tr} dS \\ = h_a \iint_{\partial \Omega_t} T_w r dS + \iiint_{\Omega_t} \tau : \dot{\gamma} r d\Omega \forall r \in H^2(\Omega_t) \end{aligned} \quad (4.83)$$

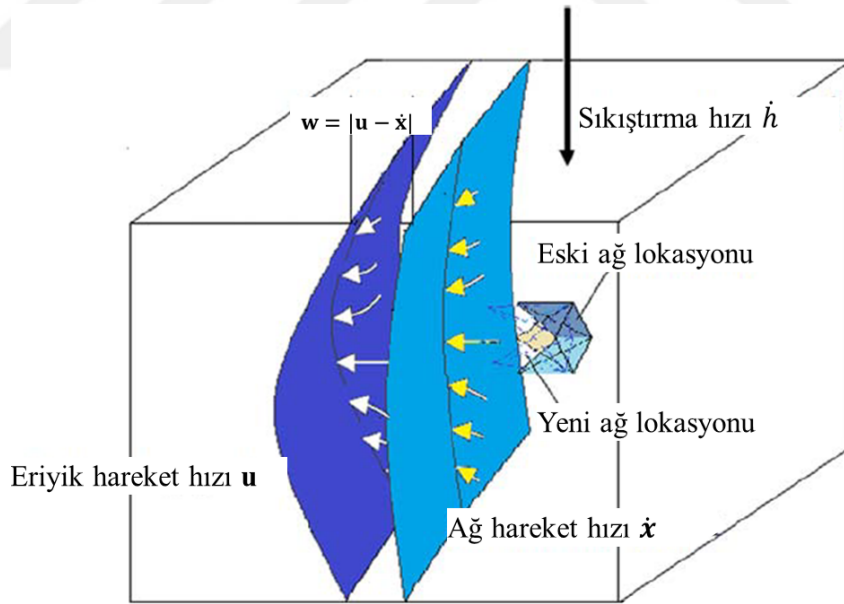
Burada, $t = (\tau - pl) \cdot \mathbf{n}$, $\mathbf{n}$ harici birim normal vektörünü ifade eder. U_h, P_h, R_h ve $\Sigma_h, \mathbf{u}, p, T$ ve τ 'nin sonlu eleman yaklaşma alanlarını, sınırın belirli bir kısmı üzerinde kaybolan test fonksiyonlarından ve U_h, p_h, T_h ve τ_h 'den oluşan test fonksiyonlarından üretilen ve buna karşılık gelen sayısal çözümü ifade eder. Varyasyonlu problemler şuna

dönüşür [13]:

$$\iiint_{\Omega_t} \rho \mathbf{u}_h \cdot \nabla q_h d\Omega = \iint_{\Gamma} \rho \dot{h} q_h dS + \iiint_{\Omega_t} \frac{\partial \rho}{\partial t} q_h d\Omega - \iiint_{\Omega_t} (\dot{\mathbf{x}} \cdot \nabla \rho) q_h d\Omega \forall q_h \in P_h \quad (4.84)$$

$$\begin{aligned} & \iiint_{\Omega_t} \eta_s \left(\nabla \mathbf{u}_h + (\nabla \mathbf{u}_h)^T - \frac{1}{3} \nabla \mathbf{u}_h \mathbf{1} \right) : \nabla \mathbf{v}_h d\Omega + \iiint_{\Omega_t} p_h \nabla \cdot \mathbf{v}_h d\Omega \\ &= \iint_{\partial \Omega_t} \mathbf{t}_h \cdot \mathbf{v}_h dS + \iiint_{\Omega_t} p \mathbf{f} \cdot \mathbf{v}_h d\Omega - \iiint_{\Omega_t} \tau_h : \nabla \mathbf{v}_h d\Omega. \forall \mathbf{v}_h \in U_h \end{aligned} \quad (4.85)$$

$$\begin{aligned} & \iiint_{\Omega_t} \left[\tau_{ih}^\nabla + \frac{1}{\lambda_{b,i}} \left(\frac{\alpha_i}{G_i} \tau_{ih} \cdot \tau_{ih} + F(\tau_{ih}) \tau_{ih} + G_i (F(\tau_{ih}) - 1) \mathbf{I} \right) - 2G_i \dot{\gamma}(\mathbf{u}_h) \right] \\ & : (\Phi_h + k \mathbf{u}_h \cdot \nabla \Phi_h) d\Omega = 0 \forall \Phi_h \in \Sigma_h \end{aligned} \quad (4.86)$$



Şekil 4.12 Sıkıştırma aşamasında, erime hareketi ve ağ hareketi arasındaki ilişkinin şematik gösterimi [13]

$$\begin{aligned}
& \iiint_{\Omega_t} \rho C_p \left(\frac{\partial T_h}{\partial t} + \mathbf{w} \cdot \nabla T_h \right) r_h d\Omega + k \iiint_{\Omega_t} \nabla T_h \cdot \nabla r_h d\Omega + h_a \iint_{\partial\Omega_t} T_h r_h dS \\
& = h_a \iint_{\partial\Omega_t} T_w r_h dS + \iiint_{\Omega_t} \tau_h : \dot{\gamma}_h r_h d\Omega \forall r_h \in R_h
\end{aligned} \tag{4.87}$$

Yalnızca bir mod uygulanması durumunda, $P, v_x, v_y, v_z, \tau_{xx}, \tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{yx}, \tau_{yy}, \tau_{yz}, \tau_{zz}, T$, en az bir zaman adımında her bir düğüm için belirlenecek 11 değişken vardır ve bunlar yukarıdaki denklemlerde birbirine bağımlıdırlar [13].

Ho ve arkadaşlarının [16] çalışmasında, üç boyutlu bir geometrinin modellenmesinde ve simülasyonunda, sonlu elemanlar yöntemi (FEM) ve Arbitrary Lagrangian-Eulerian (ALE) yöntemi kullanan üç boyutlu bir sayısal analiz sistemi sunulmuştur [16]. Önerilen yöntemde, Stokes denklemleri için Galerkin / en küçük kareler (GLS) formülasyonu kullanılmıştır. Diğer çalışmalardan farklı olarak, akış sıkıştırılmaz genelleştirilmiş Newtonian akışı olarak kabul edilmiştir. Akış probleminin çözümünde, atalet ve kütle (body) kuvvetlerinin etkileri enjeksiyon aşamasında ihmal edilmiştir. Sıkıştırılmaz Stokes akışı için geçerli denklemler Denklem (4.88)'de verilmiştir:

$$\nabla \cdot (2\mu \mathbf{D}) - \nabla p = 0, \nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \tag{4.88}$$

GLS formülasyonu sıkıştırılmaz Stokes denklemlerini (Denklem (4.8)) çözmek için kullanılırken ve hesaplama kolaylığı için hız ve basıncın eşit sıralı enterpolasyonu uygulanmaktadır [16]:

$$\begin{aligned}
& \int_{\Omega} 2\mu \mathbf{D}(\mathbf{u}) : \mathbf{D}(\mathbf{w}) d\Omega - \int_{\Omega} p(\nabla \cdot \mathbf{w}) d\Omega + \int_{\Omega} q(\nabla \cdot \mathbf{u}) d\Omega \\
& + \sum_k \int_{\Omega_k} (\nabla p - \nabla \cdot (2\mu \mathbf{D}(\mathbf{u}))) \cdot \tau_{GLS}(\nabla q - \nabla \cdot (2\mu \mathbf{D}(\mathbf{u}))) d\Omega_k = \int_{\Gamma_h} \mathbf{t} \cdot \mathbf{w} d\Gamma
\end{aligned} \tag{4.89}$$

burada m viskozite, $\mathbf{D}$ deformasyon hızı tensörü, p basınç ve $\mathbf{u}$ hız vektörüdür, $\mathbf{w}$ ve q sırasıyla hız ve basınç için ağırlık fonksiyonlarıdır ve $\mathbf{t}$ şu şekilde tanımlanan çekiş kuvvetidir:

$$\mathbf{t} = 2\mu \mathbf{D}(\mathbf{u}) \cdot \mathbf{n} - p \mathbf{n} \tag{4.90}$$

Konvektif terimleri, hem sıcaklık hem de pseudo konsantrasyonun korunum denklemlerinde işlemek için Streamline-Upwind/Petrov-Galerkin (SUPG) yöntemi kullanılmıştır. Konveksiyon baskın enerji denklemi için SUPG formülasyonu Denklem (4.91) ile verilir:

$$\int_{\Omega} \left(\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla T \right) - \nabla \cdot (k \nabla T) + \mu \dot{\gamma} \right) w d\Omega + \sum_k \int_{\Omega_k} \left(\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla T \right) - \nabla \cdot (k \nabla T) + \mu \dot{\gamma}^2 \times \tau_{\text{SUPG}}(\mathbf{u} \cdot \nabla w) \right) d\Omega = 0 \quad (4.91)$$

burada w , sıcaklık için ağırlıklandırma fonksiyonudur ve τ_{SUPG} , stabilizasyon parametresidir. Benzer şekilde, pseudo konsantrasyonun SUPG formülasyonu aşağıda Denklem (4.92) ile ifade edilir:

$$\int_{\Omega} \left(\frac{\partial F}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla F \right) w d\Omega + \sum_k \int_{\Omega_k} \left(\frac{\partial F}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla F \right) \tau_{\text{SUPG}}(\mathbf{u} \cdot \nabla w) d\Omega = 0 \quad (4.92)$$

4.9 Mesh Güncellemesi

Mesh güncellemesi ile ilgili literatür taramasında belirlenen iki çalışmadan faydalanılmıştır.

Bu çalışmalardan birinde, sınır hareketinin düşük olduğu sıkıştırılmalı enjeksiyon metodunda, lineerleştirme yöntemi kullanılarak ağ güncellenmektedir [6]. Böylece çözümün doğruluğunun yüksek olması sağlanır ve güvenilirlik artar. Yaygın olarak kullanılan lineerleştirme yöntemlerden biri olan yay bazlı birleştirmede, iki düğüm arasındaki her bir kenar bir yay olarak kabul edilir. Bu kabul üzerine, bir ağ düğümü üzerindeki kuvvet Hook yasasından faydalanılarak bulunur ve her düğüm üzerindeki net kuvvet sıfır olmalıdır [6].

$$F_i = \sum_j^{n_i} k_{ij} (\Delta \mathbf{r}_j - \Delta \mathbf{r}_i) = 0 \quad (4.93)$$

buradan,

$$\Delta \mathbf{r}_i = \frac{\sum_j^{n_i} k_{ij} \Delta \mathbf{r}_j}{\sum_i^{n_i} k_{ij}} \quad (4.94)$$

$\Delta \mathbf{r}_i$ ve $\Delta \mathbf{r}_j$, düğüm (node) i ve komşusu j 'nin yer değiştirmeleri ve, n_i düğüm i 'nin komşularının sayısıdır ve k_{ij} , düğüm i ve j 'yi birbirine bağlayan kenarın yay sabitidir. Yay sabiti şu şekilde tanımlanır:

$$k_{ij} = \frac{k_{fac}}{|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|} \quad (4.95)$$

$0 \leq k_{fac} \leq 1$, yay sabit faktörüdür. k_{fac} , yaylardaki sönümlemeyi gösterir. Denklem (4.94), iterasyon yöntemiyle çözülebilir ve yakınsamaya ulaşıldığında, her düğümün konumu aşağıdaki şekilde güncellenebilir:

$$\mathbf{r}_i = \mathbf{r}_i^o + \Delta \mathbf{r}_i^{converged} \quad (4.96)$$

Diğer bir çalışmada “Hareketli kalıp çeperi Γ için, ağ hareket hızı ($\dot{x}$), düğümlerin kalıp çeperiyle temasta kalmasını sağlamak için hareketli kalıp sıkıştırma hızına ($\dot{h}$) eşit olmalı ve bu nedenle de bu hız sabit kalıp duvarında sıfır olmalıdır. İç düğümlerin hareket hızı ($\dot{x}$), erime akış hızına ($\mathbf{u}$), yani, $\dot{x} = \mathbf{u}$ 'ya eşit olarak belirtilirse, Lagrangian yönteminde olduğu gibi, ana akış yönünde mesafe kateden düğüm, kalınlık yönünden çok daha büyük olacaktır; bu durum, elementlerin kısa sürede bozulmasına neden olur. Diğer yandan, eğer iç düğümler herhangi bir hareket olmadan sabitlenirse, hareketli kalıpla temas eden dış elemanlar sık sık çarpacaktır. Bu nedenle, iç düğümlerin hızının, kalıp sıkıştırma hızına uyması için uygun bir değer belirtilmelidir. Braess'in formülü hem erime hızı, $\mathbf{u}$ 'yu, hem de akış hızına uygun olan mesh hızı, $\dot{x}$ 'i hesapladığından, belirli bir süre sonra iç düğüm koordinatını güncellemek için benzer bir formül önerilmiştir”: [13]

$$\mathbf{x}^{n+1} = \mathbf{x}^n + \frac{1}{2} \Delta t^2 \ddot{\mathbf{u}}^{n+1} + \Delta t \mathbf{w}^{n+1} \quad (4.97)$$

4.10 Kalıntı Gerilmelerin Hesaplanması

Enjeksiyonla kalıplanmış parçaların kalıntı gerilmesi genellikle üç tür gerilmeden oluşur. Bunlar, sıkıştırma basıncından kaynaklanan paketleme gerilmesi, akıştan

kaynaklanan gerilme ve soğumadan, dolayısıyla termal olarak indüklenen gerilme olarak sıralanabilir. Sıkıştırma aşamasında, kalıntı gerilmelerin sebeplerinden birincisi olan paketleme gerilmesinin yüksek olması, ürünün çekmesine neden olur. İkincisi, eriyiğin viskoz akışı yani malzemenin moleküler yönelimiyle (kesme ve / veya uzama akışları) ilgili olan akış, kalıntı gerilmelere neden olur. Uzun fiber akış çizgisi (fiber flow line (FFL)), hızlı soğutma işlemi sırasında, eriyik sıvıda hapsolür ve sonuçta kalıntı gerilmeye ve çekme kusurlarına sebep olur. Ancak ICM yöntemi kullanıldığında, üretilen FFL nispeten kısa ve eşittir ve bu da kalıntı gerilmelerin oluşumunu azaltarak, nihai ürünün kalitesini yükseltmektedir. Son olarak soğuma aşamasında, düzensiz faz değişimi ve katılaşma ile soğuma sırasında sıcaklık dağılımının parça üzerinde homojen olmaması, termal olarak tetiklenen ve ürünlerdeki kalıntı gerilmesinin ana kaynağı olan ısı kalıntı gerilmelerine yol açar [2, 10, 12, 22, 54, 55].

Enjeksiyon kalıplama yöntemlerinde, kalıntı gerilmelerin tamamen ortadan kaldırılması olanaksızdır. Ancak, ICM gibi kalıntı gerilmeleri azaltacak farklı yöntemlerin kullanılması, optimum proses parametrelerinin belirlenmesi ve uygun malzeme seçimi, kalıntı gerilmelerin azaltılmasında önemli avantajlar sağlamaktadır. Kalıntı gerilmelerin varlığı; üretilen parçada, çekme, çarpılma, çatlak ve deformasyon gibi sonuçlara neden olabilmektedir [22]. Plastik malzemelerde, ürün kalitesinde etkin bir faktör olan kalıntı gerilmelerin ölçümü metallerden çok daha zor ve kısıtlı imkanlarla yapılabilmektedir. Karmaşık şekilli parçalara uygulanabilen delik delme, sadece düz parçalara uygulanan katman kaldırma ve saydam parçalara uygulanabilen çift kırınım teknikleri, plastik malzemelerde kullanılan belli başlı kalıntı gerilme ölçme yöntemleri olarak sayılabilir [1].

4.10.1 Enjeksiyon Kalıplamada Kalıntı Gerilmeler

Enjeksiyon prosesi boyunca, kalıp içinde hapsolan ve kalıp duvarları ile sınırlanan parçadaki homojen olmayan kendini çekme, parça kalıptan çıkarıldıktan sonra serbest kalarak, kalıntı gerilme oluşumuna sebep olmaktadır. Eğer oluşan çekme deformasyonu homojen ise parça, kalıptan çıkarıldıktan sonra kalıntı gerilmeler olmadan homojen olarak küçülür ve çarpılma görülmez. Enjeksiyon kalıplama metodunda, 3 boyutlu termo-viskoz-elastik ortotropik kalıntı gerilme modeli kullanılırken, eriyiğin viskoz olduğu ve katılaşırken doğrusal elastik davranışa sahip olduğu kabul edilir. Buna göre fiber dolgulu, 3D ortotropik gerilme-gerinim ilişkisi

aşağıdaki formülle ifade edilmiştir [55–57]:

$$\begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1-\nu_{yz}\nu_{zy}}{E_y E_z \Delta} & \frac{\nu_{yz}+\nu_{zx}\nu_{yz}}{E_y E_z \Delta} & \frac{\nu_{zx}+\nu_{yz}\nu_{zy}}{E_y E_z \Delta} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\nu_{xy}+\nu_{xz}\nu_{zx}}{E_z E_x \Delta} & \frac{1-\nu_{zx}\nu_{xz}}{E_z E_x \Delta} & \frac{\nu_{zy}+\nu_{zx}\nu_{xy}}{E_z E_x \Delta} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\nu_{xz}+\nu_{xy}\nu_{yz}}{E_x E_y \Delta} & \frac{\nu_{zy}+\nu_{xz}\nu_{yz}}{E_x E_y \Delta} & \frac{1-\nu_{xy}\nu_{yx}}{E_x E_y \Delta} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & G_{xy} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & E_{yz} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & E_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{zz} \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{bmatrix} \quad (4.98)$$

$$\Delta = \frac{1 - \nu_{xy}\nu_{yx} - \nu_{yz}\nu_{zy} - \nu_{zx}\nu_{xz} - 2\nu_{xy}\nu_{yz}\nu_{zx}}{E_x E_y E_z} \quad (4.99)$$

Gerilme ve gerinim ilişkisi şu şekilde yazılır [55–57]:

$$\{\sigma_g\} = -[D_g]\{\varepsilon_{g0}\} + \{\sigma_{g0}\} \quad (4.100)$$

$$[D_g] = [T_\varepsilon^T][D_l][T_g] \quad (4.101)$$

$$[\varepsilon_{g0}] = -[T_\varepsilon^{-1}][\varepsilon_{10}] \quad (4.102)$$

g , küresel koordinat sistemini ifade eder

l , yerel koordinat sistemini ifade eder

T_ε , global gerinmelerden yerel gerinmelere dönüşüm matrisidir

D , gerilme-gerinim ilişki matrisini temsil eder

σ_{g0} , ilk gerilmedir, yani donma sırasında basınç

ε_{g0} , sıfır basınç durumundan veya geçiş sıcaklığından oda sıcaklığına ilk gerinimdir

Parça kalıbın içinden çıkarıldıktan, dolayısıyla sınırlamalardan kurtarıldıktan sonra çarpılma ve kalıp içi kalıntı gerilmeler hesaplanabilir. İterasyon yöntemi kullanılarak ve başlangıç koşullarından başlayarak, $k = 1, 2, 3, \dots$ iterasyon adımlarında, t 'den

$t + \Delta t$ 'ye Denklem (4.103)'deki gibi ifade edilir [55–57]:

$$\begin{aligned} & \int_v C_{ijrs} \Delta e_{rs}^{(k)} \delta \Delta e_{ij}^{(k-1)} dV + \int_v^{t+\Delta t} S_{ij}^{(k-1)} \delta \Delta \eta_{ij}^{(k)} dV \\ &= - \int_v^{t+\Delta t} S_{ij}^{(k-1)} \delta \Delta e_{ij}^{(k-1)} dV + \int_v C_{ijrs} \Delta e_{rs}^{ini(k)} \delta \Delta e_{ij}^{(k-1)} dV \end{aligned} \quad (4.103)$$

C_{ijrs} : gerilme-gerinim tensörüdür

$\Delta e_{ij}^{(k)}$: iterasyon k için, artımlı doğrusal gerinim tensörü

$\delta \Delta \eta_{ij}^{(k)}$: iterasyon k için doğrusal olmayan artımlı gerinim tensörü

$\delta \Delta e_{ij}^{(k-1)}$: sanal artımlı yer değiştirmeye karşılık gelen lineer artımlı gerinim tensörleri

$\delta \Delta \eta_{ij}^{(k)}$: sanal artımlı yer değiştirmeye karşılık gelen doğrusal olmayan artımlı gerinim tensörü

$\Delta e_{rs}^{ini(k)}$: iterasyon k için artımlı ilk gerinim tensörü

$^{t+\Delta t} S_{ij}^{(k-1)}$: $t + \Delta t$ zamanında iterasyondan $(k-1)$ sonra ikinci Piola-Kirchhoff gerilme gerinim tensörü

4.10.2 Sıkıştırılmalı Enjeksiyon Kalıplama için Kalıntı Gerilmeler

Geleneksel enjeksiyon kalıplama metodu ile kalıntı gerilmelerin dolayısıyla ürünün boyutsal doğruluğunun artırılması, çarpılma değerlerinin mümkün olduğunca düşük seviyelere çekilmesi, karmaşık şekilli, akış yolunun uzun olduğu parçalar için mümkün olmayabilir. Bu problemlerin üstesinden gelebilmek, kalıntı gerilmeleri minimize edebilmek için ICM yöntemi önemli bir seçenek olarak ortaya çıkmaktadır. ICM yöntemi için kalıntı gerilmelerin hesaplanmasında, literatürde yapılmış çalışmalardan faydalanılmıştır. Ancak yapılan çalışmaların kısıtlılığı, kalıntı gerilmelerin matematiksel ifadelerinin çıkarılmasındaki en büyük engel olmuştur.

Enjeksiyona ilave olarak sıkıştırma aşamasının dahil edilmesi ile, hem kesme hem de yayılma akış karakteristiklerinin birleşerek, sıkıştırma akışının oluşumu sağlanır ve bu da akış cephesindeki ve sıkıştırma yönlerindeki sınır değişimini içerir. Bu karmaşık sürecin modellenmesinde, üç boyutlu sıkıştırılabilir, viskoelastik akışkan ve örgü hareket hızını içeren malzeme türevi ALE yöntemine dayanan bir metot

önerilmiştir [13].

Boltzmann ilkesi esas alınarak ısı kalıntı gerilme ve sıkıştırma basıncının neden olduğu kalıntı gerilmelerinin dağılımı aşağıdaki gibi Denklem (4.104) ile tanımlanır [54]:

$$\sigma_{ij} = \int_{-\infty}^t C_{ijkl} (\xi(t) - \xi(t')) \frac{\partial \varepsilon_{kl}}{\partial t' dt'} - \int_{-\infty}^t B_{ij} (\xi(t) - \xi(t')) dT(t') \quad (4.104)$$

σ_{ij} : Gerilme tensörü

C_{ijkl} : Malzeme mekanik özellikler tensörü

B_{ij} : Malzeme termal özellikler tensörü

T : Termodinamik sıcaklık

$\partial \varepsilon_{kl}$: Isı genleşme katsayısı tensörü

$\xi(t)$: Zaman içinde malzeme sıcaklığının fonksiyon değişimi

$$\xi(t) = \int_0^t 1/a_T dt' \quad (4.105)$$

a_T : sıcaklık ve zamanın dönüşüm faktörü [54].

Young [2] çalışmasında, sıkıştırma ve soğutma aşamalarında oluşan kalıntı gerilmeleri hesaplamak için basit bir termoviskoelastik model kullanmıştır. Çalışmada, sıkıştırmalı enjeksiyon kalıplama yöntemi için, doldurma sonrası aşamadaki sıcaklık ve basınç geçmişleri belirlenerek, gerilme alanı hesaplanmıştır. Kalıp içi kalıntı gerilmelerin analizinde normal gerilmenin, σ_z kalınlık yönünde sabit olduğu varsayılarak kayma gerilmeleri ihmal edilmiştir.

$$\sigma_{ii} = \int_0^t 2\mu\varphi(t)(\xi - \xi') de_{ii} + \int_0^t 3\kappa\varphi(t)(\xi - \xi') d\bar{e} - \int_0^t 3\kappa\varphi(t)(\xi - \xi') de_{th} \quad (4.106)$$

Değiştirilen zaman ölçeği ξ , aşağıda Denklem (4.107)'de gösterilen değişim

fonksiyonu ile ilgilidir:

$$\xi(x_i, t) = \int_0^t \Phi[T(x_i, t')] dt' \quad (4.107)$$

ve,

$$\log \Phi = \frac{c_1 (T - T_r)}{(c_2 + T - T_r)} \quad (4.108)$$

T sıcaklık, c_1 ve c_2 malzeme sabitleri ve T_r referans sıcaklıktır.

$$\varphi(t) = \sum_{r=1}^m g_r \exp\left(-\frac{t}{\theta_r}\right) \quad (4.109)$$

g_r , μ ve κ malzeme sabiti ve θ_r gevşeme zamanını simgeler.

Dolum sonrasındaki aşamada, malzeme düzlem içi yönlerde sınırlandırıldığından normal gerilmeler ortadan kalkmaktadır ($\varepsilon_{xx} = \varepsilon_{yy} = 0$)).

$$\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = \int_0^t \varphi(\xi - \xi') \left[\left(-\frac{2\mu}{3} + \kappa \right) d\varepsilon_{zz} - 3\kappa d_{th} \right] \quad (4.110)$$

$$\sigma_{zz} = \int_0^t \varphi(\xi - \xi') \left[\left(\frac{4\mu}{3} + \kappa \right) d\varepsilon_{zz} - 3\kappa d_{th} \right] \quad (4.111)$$

Denklemlerin $t = t^n$, $t = t^{n+1}$ arasında ayrıklaştırılması sonucunda,

$$\Delta\sigma_{xx}^n = \Delta\sigma_{yy}^n = [\varphi(\Delta\xi^n) - 1] \sigma_{xx}^n + \Gamma(\xi^n) \left[\left(-\frac{2\mu}{3} + \kappa \right) \Delta\varepsilon_{zz}^n - 3\kappa \Delta e_{th}^n \right] \quad (4.112)$$

$$\Delta\sigma_{nz}^n = [\varphi(\Delta\xi^n) - 1] \sigma_{xx}^n + \Gamma(\Delta\xi^n) \left[\left(\frac{4\mu}{3} + \kappa \right) \Delta\varepsilon_{kz}^n - 3\kappa \Delta e_{th}^n \right] \quad (4.113)$$

ile,

$$\sigma^{n+1} = \sigma^n + \Delta\sigma^n \quad (4.114)$$

ve

$$\Gamma(\Delta\xi^n) = \sum_r \frac{g_r \left(1 - e^{-\frac{\Delta\xi^n}{\theta_r}}\right)}{\Delta\xi^n / \theta_r} \quad (4.115)$$

Katılaşmanın durumuna bağlı olarak, kalıntı gerilme analizi aşağıdaki üç aşamada irdelenir. Bunlardan ilkinde, çekirdek bölgesinin hala cam geçişkenliğinin üzerinde ve hala sıkıştırma basıncının etkisinde olduğu durum için Denklem (4.113)'deki gerilme dikkate alınarak yeniden düzenlenirse:

$$\Delta\varepsilon_{z\pi}^n = \left(\frac{\Delta P^n - (\varphi(\Delta\xi^n) - 1)P^n}{\Gamma(\Delta\xi^n)} + 3\kappa\Delta e_{th}^n \right) / \left(\frac{4\mu}{3} + \kappa \right) \quad (4.116)$$

Denklem (4.116), denklem (4.112)'de yerine konursa:

$$\begin{aligned} \Delta\sigma_{\pi\pi}^n = \Delta\sigma_{yy}^n = & (\varphi(\Delta\xi^n) - 1)\Delta\sigma_{xx}^n + \alpha[\Delta P^n - (\varphi(\Delta\xi^n) - 1)P^n] \\ & + \Gamma(\Delta\xi^n)(\alpha - 1)(3\kappa)\Delta e_{th}^n \end{aligned} \quad (4.117)$$

İkinci durum ise tüm katmanların katılaştığı ve malzemenin kalıp duvarından ayrılmadığı ($\sigma_{zz} < 0$) koşul için geçerlidir.

$$\Delta h_z = \frac{\sum_{i=1}^{nl} \left(\frac{\Delta z_i}{\Gamma(\Delta\xi^n)} \right) [(\varphi(\Delta\xi^n) - 1)\Delta\sigma_{zz}^n - 3\kappa\Gamma(\Delta\xi^n)\Delta e_{th}^n] + \Delta h_z \left(\frac{4\mu}{3} + \kappa \right)}{\sum_{i=1}^{nl} \frac{\Delta z_i}{\Gamma(\Delta\xi^n)}} \quad (4.118)$$

$$\begin{aligned} \Delta\sigma_{xx}^n = \Delta\sigma_{yy}^n = & (\varphi(\Delta\xi^n) - 1)\Delta\sigma_{xx}^n + \alpha[\Delta\sigma_{zz}^n - (\varphi(\Delta\xi^n) - 1)\Delta\sigma_{zz}^n] \\ & + \Gamma(\Delta\xi^n)(\alpha - 1)(3\kappa)\Delta e_{th}^n \end{aligned} \quad (4.119)$$

Δh_z sıkıştırma durumundaki kalınlık değişimini, Δz_i katman kalınlığını ve nl ise toplam katmanı gösterir. Kalınlık yönündeki gerilmenin sıfıra düşmesi yani $\sigma_{zz} = \Delta\sigma_{zz} = 0$ değerlerinin elde edilebilmesi için parçanın daha da soğuması ve sonuç olarak kalıp duvarından ayrılması gerekir. Böylece düzlem içi gerilmenin değişimi aşağıda Denklem (4.120) ile ifade edilir:

$$\Delta\sigma_{xx}^n = \Delta\sigma_{yy}^n = (\varphi(\Delta\xi^n) - 1)\sigma_{xx}^n + \Gamma(\Delta\xi^n)(3\kappa)(\alpha - 1)\Delta\theta_{th}^n \quad (4.120)$$

$$\Delta \varepsilon_{zz}^n = \frac{3\kappa \Delta e_{th}^n}{\frac{4\mu}{3} + \kappa} \quad (4.121)$$

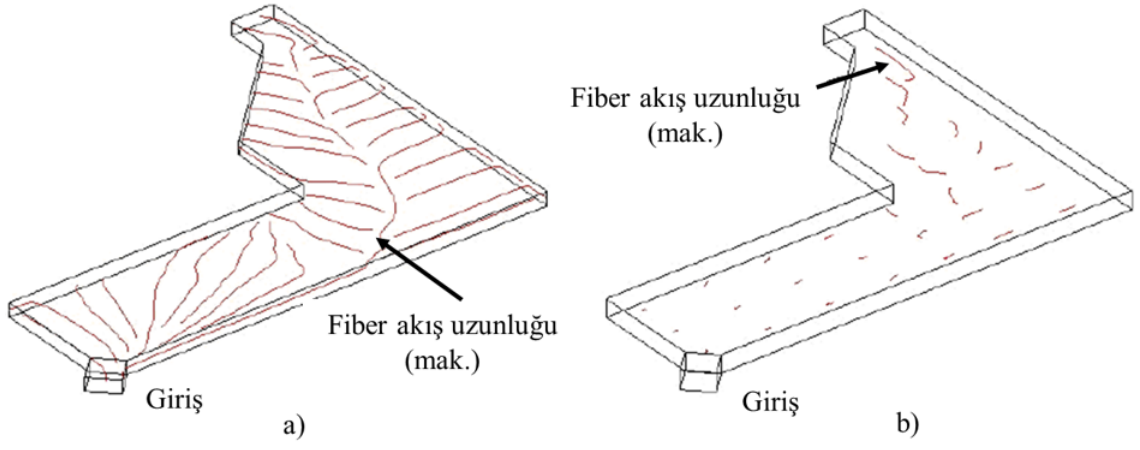
Parça kalıptan çıkarıldıktan sonra içindeki kalıntı gerilmeler, serbest sınır koşullarını barındırmak için yeniden dağıtılacaktır. Buna göre gerilme ve şekil değiştirme ilişkisi enjeksiyon kalıplama ile benzer şekilde kurularak Denklem (4.122) ile verilir:

$$[\sigma] = [D]([\varepsilon] - [\varepsilon_t]) + [\sigma_0] \quad (4.122)$$

burada ε_t termal gerinim ve σ_0 kalıp içi kalıntı gerilmedir. Denklem (4.122)'den faydalanılarak parçadaki çekme oranı (z yönündeki gerinim) aşağıdaki şekilde Denklem (4.123) ile bulunabilir:

$$\varepsilon_{zz} = -\frac{\nu}{E}(\sigma_x - \sigma_y - \sigma_{x0} - \sigma_{y0}) - \frac{\sigma_{z0}}{E} + \varepsilon_0 + \varepsilon_t \quad (4.123)$$

IM ve ICM metodu kullanılarak üretilmiş parçaya istinaden, Li ve arkadaşları [10] tarafından yapılmış bir başka çalışmada, kalıntı gerilmelerin kaynağı olarak fiber akış çizgisinin kalıp boşluğundaki uzunluğu gösterilmiştir. Şekil 4.13a'da gösterildiği üzere IM ile üretilen parçanın analizinde, fiber akış çizgilerinin (FFL) uzun ve eşit olmayan şekilde dizildiği ve bu dizilimin kesme gerilmesine neden olarak soğuma aşamasında sıkışıp kaldığı ve sonuç olarak kalıntı gerilmelere neden olduğu belirtilmiştir. Şekil 4.13b'de ICM ile kalıplanan parçanın, FFL uzunluklarının daha kısa ve birbirine eşit olduğu tespit edilmiş, bunun da nihai ürün kalitesini olumlu yönde etkileyeceği sonucuna varılmıştır. Ancak buna rağmen düzensiz geometrik yapının, enjeksiyon girişinden uzaklaştıkça, daha uzun ve tektip olmayan FFL'lere neden olacağı kanaatine varılmıştır. Bu nedenle, sıkıştırma aşamasında uzun FFL'lerin parçanın çekmesine ve nihayetinde çarpılmasına neden olacağı belirtilmiştir. Dolayısıyla karmaşık geometrilerin, ICM yönteminde ürünün kalitesini olumsuz yönde etkileyecek bir parametre olduğu belirtilmiştir [10].

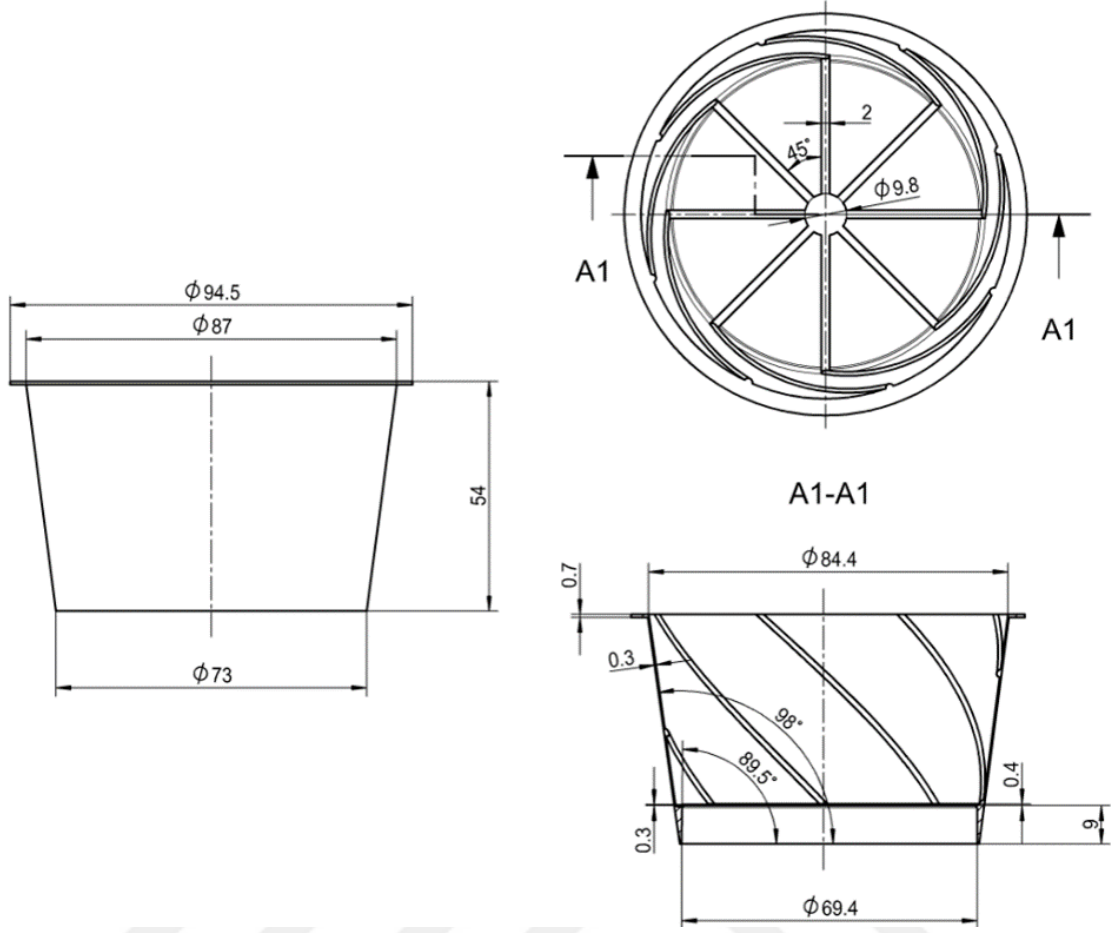


Şekil 4.13 Hareket eden düğümlerin ve düğüm yer değiştirme dağılım istatistiklerinin iz grafiği; a) Enjeksiyon kalıplama, b) % 50 enjeksiyon hacmi ve 0.2 s sıkıştırma durumu [10]

5.1 Kalıp İçi Akış Analizinde Kullanılan Modelin Özellikleri

IM ile karşılaştırıldığında tüm avantajlarına rağmen, ICM çok daha karmaşık bir prosestir ve proses tekrarlanabilirliğini sağlamak için daha yüksek hassasiyetli makine kontrolü gerektirir [27]. Bu nedenle, özellikle düşük kalıntı gerilmeler barındıran, yüksek boyutsal doğruluk gerektiren plastik parçalar için sayısal simülasyonlar kaçınılmazdır. Sıkıştırılmalı enjeksiyon kalıplama metodolojisinde, başta Moldflow olmak üzere, Moldex, CMold gibi yazılımlar kullanılarak, işlemin proses parametrelerinin belirlenmesi, kalıp ve ilgili kalıp elemanlarının geometrilerinin ve konumlarının tasarlanması, malzeme ve geometri seçimi ve tüm bu faktörlerin elde edilecek ürünü nasıl etkileyeceği simülasyon sonuçları ile belirlenebilmektedir. Bu yazılımlarla yapılan simülasyonlar, ürünün ve kalıbın geometrik özelliklerini, malzeme davranışlarını önceden tespit ederek, tasarım, deney süreç ve sayılarını azaltarak, verimliliğin artırılmasında çok büyük katkı sağlamaktadırlar.

Çalışmada, 3 boyutlu plastik parçanın imalatta kullanılacak proses parametrelerini belirlemek çok zor olduğundan, deneysel çalışmaları azaltabilmek veya tamamen ortadan kaldırabilmek için çeşitli sayısal simülasyonlar yapılmıştır. IM ve ICM sürecinin eriyik ön akışını simüle etmek için ticari yazılım olan Autodesk Moldflow kullanılmıştır. Şekil 5.1’de gösterildiği gibi, referans geometrinin, kalınlığı 0.3 mm ile 0.7 mm arasında değişirken, 94.5 mm x 50 mm boyutsal ölçülere sahiptir. Seçilen geometri, gıda ambalaj sektöründe yaygın olarak kullanılmaktadır.



Şekil 5.1 Simülasyonda kullanılan gıda ambalajının geometrik boyutları

Plastik numunene tasarlanırken kütlenin olabildiğince düşük tutulması amacıyla, et kalınlığı 0.3 mm'ye kadar inceltirilmiştir. Ayrıca, parçanın yan duvarlarına oluklar eklenerek eriyik akışı kolaylaştırılırken, taban geometrisinin tasarımı sayesinde ise burkulmaya karşı dirençli olması hedeflenmiştir. Böylelikle tasarlanan parça, farklı endüstri alanlarının üretim şartlarını yerine getiren ve bunların gereklerini işlevsel ve mekanik olarak karşılayabilecek bir ürün olarak ortaya çıkarılmıştır. z ekseninde derin ve ince et kalınlıklı bir numune seçilmesi, sadece dik yüzeyler değil aynı zamanda açısall yüzeyler için sıkıştırma hareketinin parça üzerindeki etkisinin incelenecek olması, çalışmanın literatürden farklılaşan en önemli tasarım kriteridir. Ayrıca literatürde sadece Lee ve arkadaşlarının [11] yaptığı çalışmada PP malzeme kullanılmış olması ve bu çalışmanın da düz bir plaka için yapılmış olması, çalışmayı farklı kılan özelliklerden biridir. Simülasyonlarda kullanılan malzeme, PP BJ356MO'nin reolojik özellikleri ile mekanik özellikleri Tablo 5.1'de listelenmiştir [58].

Tablo 5.1 BJ356MO Moblen (100MFI) malzemesinin fiziksel özellikleri

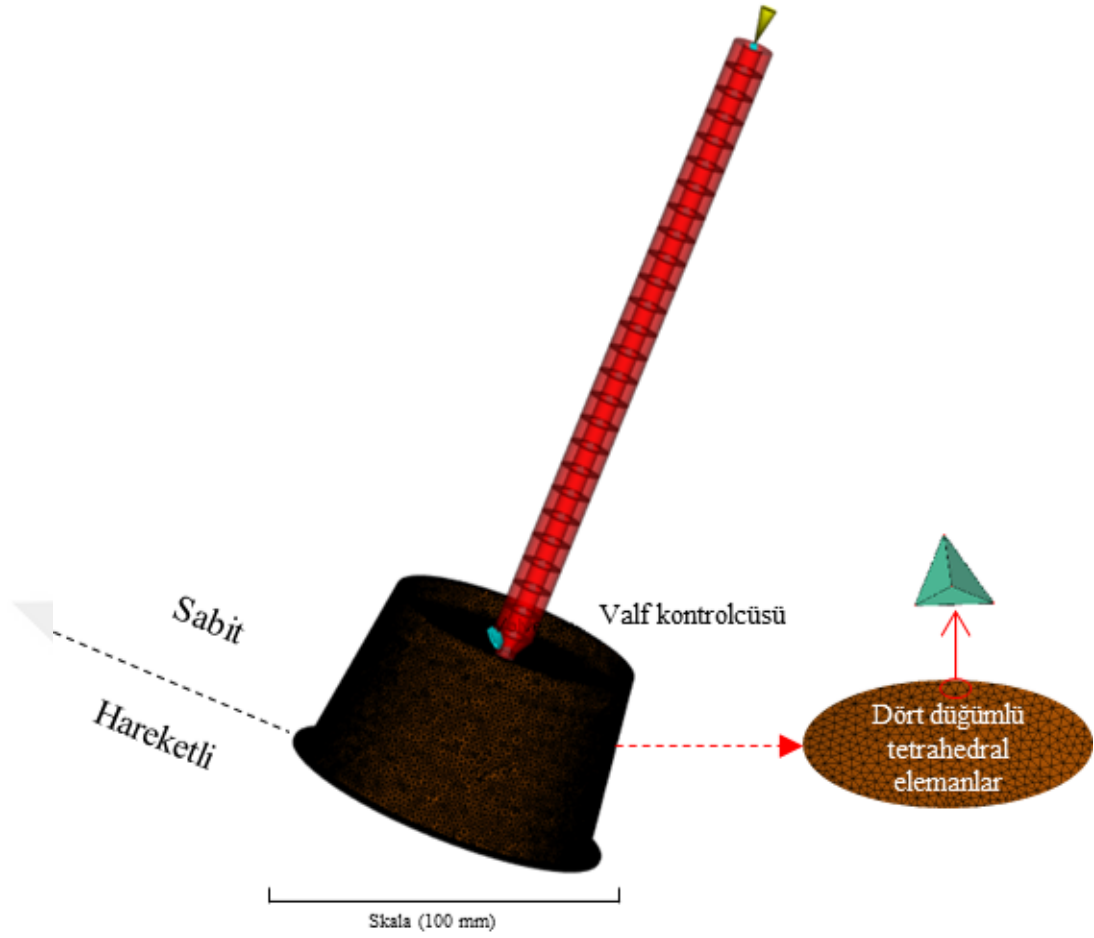
Özellik	Değer aralıkları
Yoğunluk	905 kg/m ³
Eriyik Akış Hızı (230 ° C / 2.16 kg)	100 g/10min
Eğilme Modülü	1.500 MPa
Çekme Modülü (50 mm / dak)	1.600 MPa
Akma esnasında çekme gerinmesi (50 mm / dak)	0.04
Akma esnasında çekme gerilmesi (50 mm / dak)	27 MPa
Isı Sapma Sıcaklığı (0.45 N / mm ²)	105 °C
Charpy Darbe Dayanımı, Çentikli (23 ° C)	4 kJ/m ²
Charpy Darbe Dayanımı, çentikli (-20 ° C)	2.5 kJ/m ²

BJ356MO malzemesi için üretici firma Borealis firması tarafından IM yönteminde önerilen proses parametre değerleri Tablo 5.2’de verilmiştir.

Tablo 5.2 BJ356MO Moblen malzemesinin IM ile kalıplanmasında kullanılan parametre değerleri

Parametre	Değer aralıkları
Erime sıcaklığı	210-260 ° C
Tutma basıncı	200-500 bar
Kalıp yüzey sıcaklığı	20-50 ° C
Enjeksiyon hızı	Mümkün olduğunca hızlı

ICM yönteminin uygulanabilmesi, Moldflow yazılımında bir sıkıştırma elemanı ve sıkıştırma yüzeyi tanımlanmasını gerektirmektedir. Bu nedenle yazılım içinde, Şekil 5.2’de görüleceği üzere, enjeksiyon lokasyonunun ayarlandığı yüzeyin karşı tarafı sıkıştırma yüzeyi olarak belirlenirken, ürünün kendisi sıkıştırma elemanı olarak belirlenmiştir. Akış analizinde, simüle edilecek parça geometrisi, 3-D tetrahedral elemanlara ayrıştırılarak oluşturulmuş sonlu elemanlar ağı, her yöndeki ısı iletimi, sıcaklık, basınç ve hız bileşenlerini çözerken, Navier-Stokes denklemlerinden faydalanmaktadır. Orta Düzlem (Mid Plane) veya İkili Alan (Dual Domain) analizleri ile oluşturulan ağ modelleri, ICM metodu için kullanılamadığından, parçanın ağ modeli, hesaplama süresi daha uzun ancak çözüm için uygun tek metot olan 3D ağ modeli kullanılarak oluşturulur. Çalışmada, simülasyon sonucunun iyileştirilmesi için sonlu eleman ağı düğüm sayısı yüksek tutularak; parça, 1154393 tetrahedral elemana bölünmüştür ve 208275 düğüme sahiptir.



Şekil 5.2 Simülasyonda kullanılan gıda ambalajının Moldflow'da sonlu eleman ağı

ICM simülasyonunda, V/P geçişi, plastik son kavite hacminin % 128'ine kadar doldurulduğunda başlar. Sıkıştırma aşaması 2 s'lik bir sıkıştırma süresi boyunca devam ederken, sıkıştırma hızı 10 mm/s 'de sabit tutulmuştur. İşlem için soğuma süresi 5 s olarak belirlenmiştir.

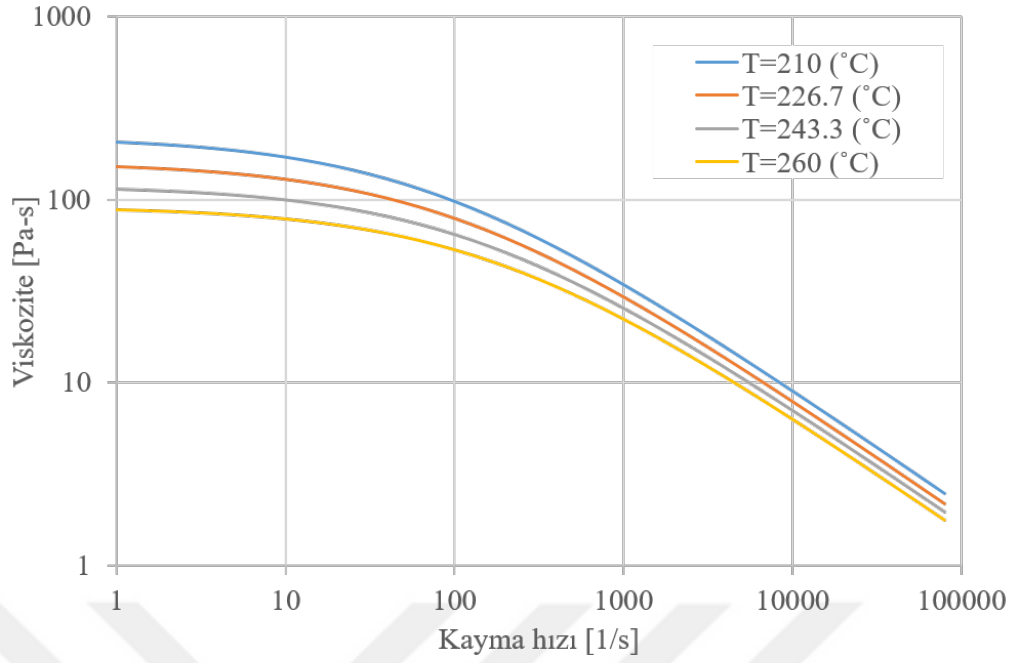
Çalışmada, hem IM hem de ICM prosesinin uygulanabilmesi için, Borealis firmasına ait PP BJ356MO ticari kodlu kopolimer ham madde olarak seçilmiştir. Bu plastiğin seçilmesinin nedeni; paketlenme endüstrisinin ihtiyaçlarını karşılaması, sektörde yaygın olarak kullanılması, optimum maliyete sahip olması, yüksek enjeksiyon hızlarına olanak sağlaması olarak açıklanabilir. 100 g/10dk 'lık yüksek MFR değeri, ICM metoduyla yapılan tüm çalışmalardan farklılık gösterirken, yine ISO 1183 standartı temel alınarak belirlenmiş yoğunluk değeri 0.905 g/cm^3 ile çalışmalar arasında en küçük yoğunluk değerine sahiptir. Kalıplama için gerekli basınç, eriyeğin akış direncine ve kalıp geometrisine bağlı olarak değişkenlik gösterirken, akışkanın viskozitesiyle yani MFR akış indeksi ile doğrudan ilişkilidir. Dolayısıyla MFR'ın yüksek olması basınç ihtiyacının düşürülmesinde önemli bir avantaj sağlamaktadır. BJ356MO kodlu plastik malzemenin üreticisi Borealis firması tarafından malzemenin; iyi bir

enjeksiyon özelliği, yüksek sertlik ve orta derece darbe direnci ile çok iyi parlaklık özelliklerini birleştiren bir malzeme türü olduğu, aynı zamanda üstün anti statik özelliklere sahip olduğu belirtilmektedir. Uygulama alanlarına en tipik örnek olarak, ince et kalınlığına sahip kaplar ve günlük kullanım plastikleri olarak verilmiştir [58]. BJ356MO malzemesinin, Çapraz WLF Viskozite Modeli'nde kullanılan katsayıları, Moldflow yazılımından elde edilebilmektedir. Değerler Tablo 5.3'de gösterilmiştir.

Tablo 5.3 Çapraz WLF Viskozite Modeli katsayıları

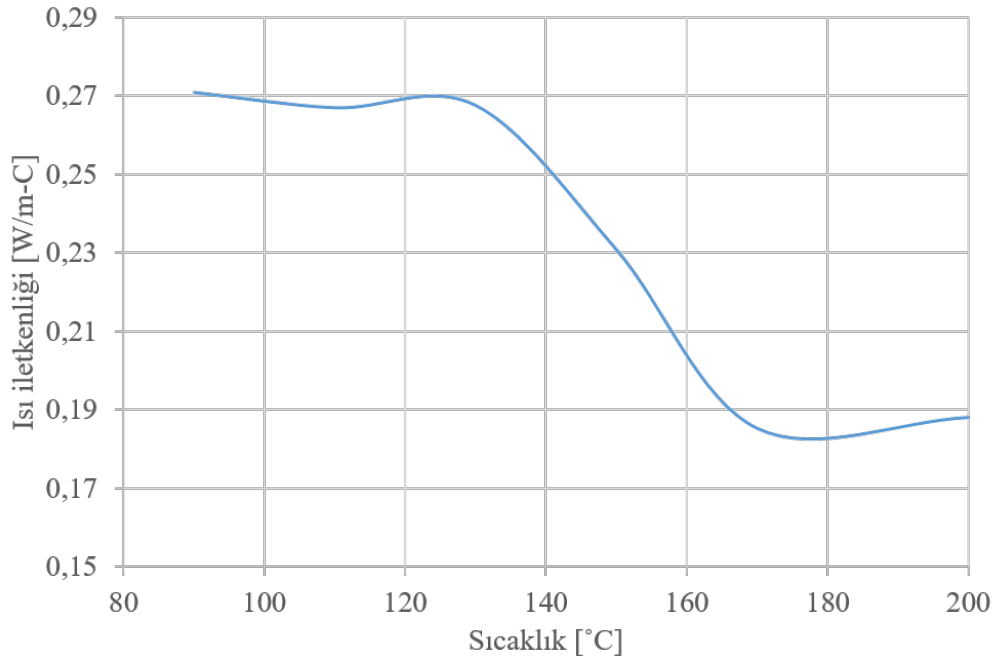
Katsayılar	PP (BJ356MO)
n	0.3624
Tau*	15537.4
D1	5.1494E+12
D2	263.15
D3	0
A1	29.477
A2	51.6

Şekil 5.3, polipropilen (PP) BJ356MO için dört farklı sıcaklıkta kayma hızının bir fonksiyonu olarak viskoziteyi (η) göstermektedir. PP BJ356MO malzemesinin farklı sıcaklık aralıkları için verilen değerlerine göre malzemenin sıcaklığı arttıkça viskozitesi azalmaktadır. Diğer bir deyişle malzemenin akışa karşı direnci sıcaklıkla birlikte artmaktadır. Buna göre, malzeme erime sıcaklığının düşük seçilmesi, eriyiğin viskozitesini arttırarak, dolumun daha hızlı gerçekleşmesini, enjeksiyon noktası ile parçanın en uç noktası arasındaki sıcaklık farklılıklarının azalmasını sağlayacak böylece parça kalitesini arttıracaktır. PP BJ356MO malzemesi için sıcaklığa bağlı olarak verilen viskozite değerlerinden, simülasyonlarda kullanılacak optimum erime sıcaklık aralıklarının ortaya çıkarılmasında faydalanılmıştır.



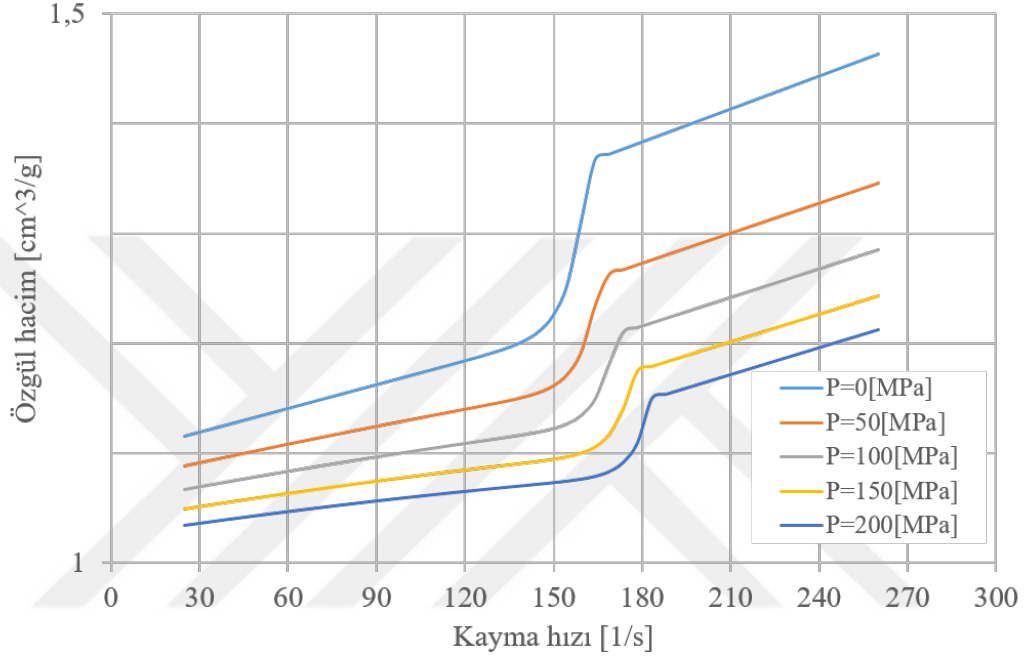
Şekil 5.3 PP BJ356MO için sıcaklık ve kayma hızının bir fonksiyonu olarak viskozite (Moldflow)

Isıl iletkenlik birim uzunluk başına bir malzemenin dağıttığı ısıнын hızını ifade eder ve basınç altında belirlenir. BJ356MO malzemesi için ısıl iletkenliği Şekil 5.4'te verilmiştir.



Şekil 5.4 PP BJ356MO Moblen hammaddesine ait ısıl iletkenlik grafiği (Moldflow)

Modifiye edilmiş 2-alanlı Tait basınç-hacim-sıcaklık (pVT) modeli simülasyon sırasında malzeme sıkıştırılabilirliğinin akış üzerindeki etkisini hesaba katmak için kullanılır [2, 7, 26]. Malzemenin sıkıştırılabilirliği, gerekli plastik hacmini doğrudan etkilediğinden, malzemenin basınç (P), hacim (V) ve sıcaklık (T) gibi özellikleri, ne kadar malzemenin sıkıştırılabileceğini belirlemek için kullanılır. Şekil 5.5, beş farklı sabit basınç değeri için incelenen BJ356MO malzemesinin özgül hacminin ölçümlerini göstermektedir.

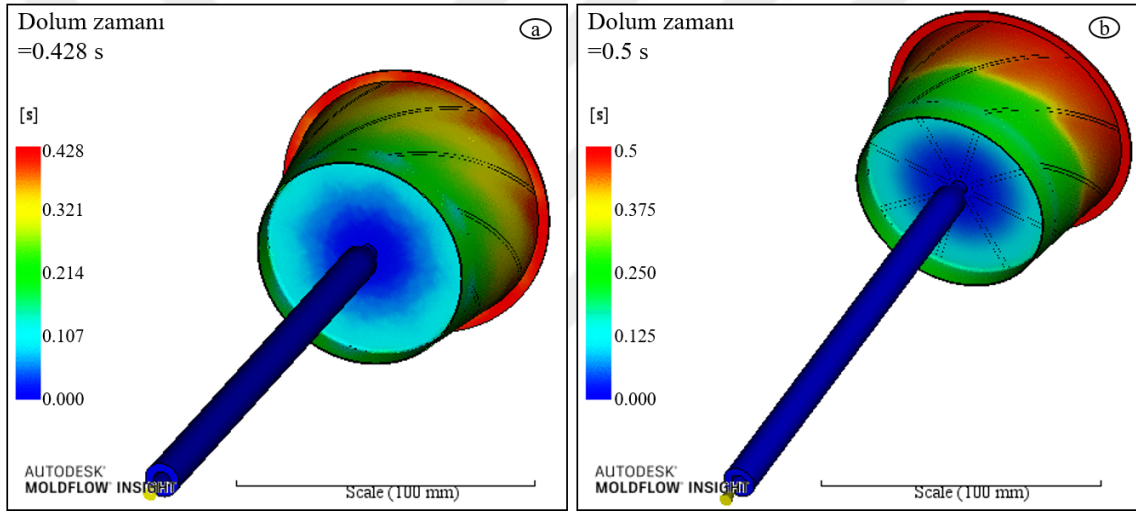


Şekil 5.5 PP BJ356MO Moblen (Moldflow) için pVT : Farklı basınçlarda sıcaklık / özgül hacim diyagramı

Herhangi bir enjeksiyon kalıplama metodunun, deneysel çalışma öncesi, nümerik analiz yöntemleriyle simüle edilmesi, kullanılan parametrelerin, kalıp ve nihai parçanın özelliklerinin değerlendirilmesi, maliyet, zaman ve doğru sonuç elde edilmesi açısından büyük avantaj sağlamaktadır. Çalışmada deneysel uygulamalara geçmeden önce hem IM hem de ICM metodları, farklı deneysel tasarımlarla, simüle edilmiş, her iki prosesten elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak, iki yöntemin avantajları belirlenmeye çalışılmıştır.

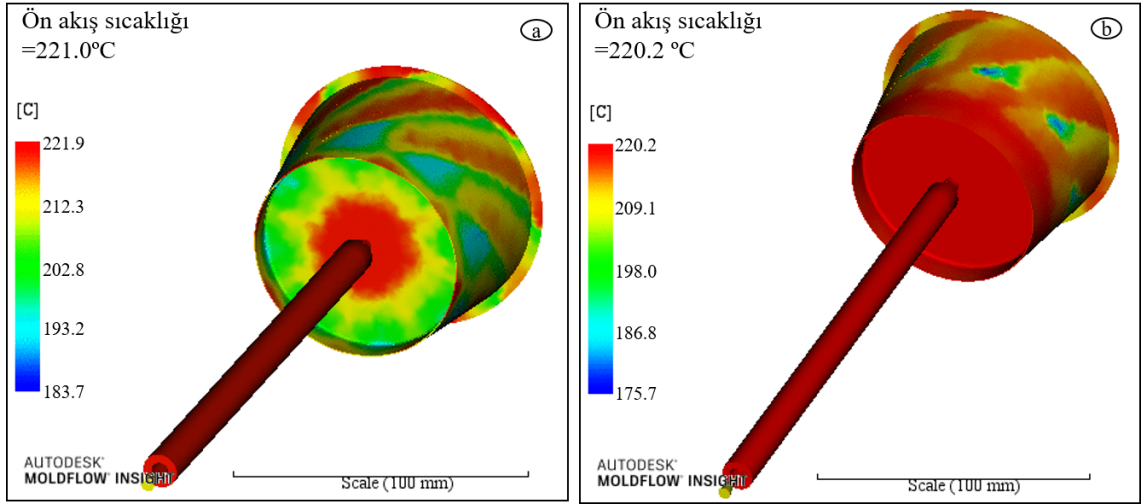
5.2 IM ve ICM için Nümerik Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması

Enjeksiyon kalıplama işleminde, kalıp içinin tam olarak dolmamasına neden olan kısa atış gibi kalıplama hataları, diğer proses parametrelerinde olduğu gibi kalıp doldurma süresinin doğru olarak belirlenmesi ile önlenabilir. Şekil 5.6, numune için kalıp boşluğunun doldurulma süresini göstermektedir. Buna göre kırmızı ile gösterilen renk skalası parçanın en son dolan kısımlarını gösterirken, mavi renk skalasına doğru geçişle, parçanın daha erken dolduğu bölgeler gösterilmiş olur. Her iki kalıplama yönteminde de kısa atış kusuru, dolayısıyla şeffaf bölgeler tespit edilmediğinden, parçaların tam olarak dolduğu görülmektedir. Sonuçlar toplam doldurma süresinin IM için 0.4279 s olduğunu gösterirken, ICM için 0.5 s'lik dolum süresine ihtiyaç duyulduğunu göstermektedir. Sonuç olarak, IM yöntemi ile kalıplanan parçada, dolumun ICM yönteminden 0.07 s daha düşük sürede gerçekleştiği gözlemlenmiştir.



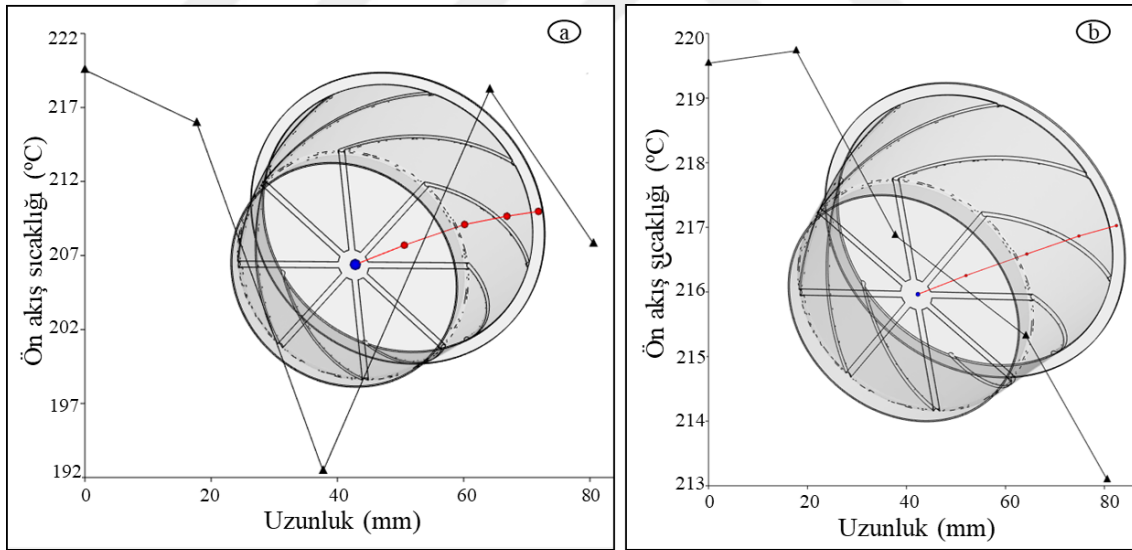
Şekil 5.6 Kalıp boşluğunun dolum süreleri; a)IM, b)ICM

Şekil 5.7 ve Şekil 5.8'de, IM ve ICM için ön akış cephesindeki plastiğin kalıplama işlemi sırasında farklı noktalardaki malzeme sıcaklığını göstermektedir. Kırmızı renkli bölgeler sıcaklığın en yüksek olduğu yerleri gösterirken, mavi renkli bölgeler sıcaklığın en düşük olduğu bölgeleri temsil eder. Parça yüzeyinde meydana gelebilecek kusurların azaltılabilmesi için, sıcaklık farklılıklarının mümkün olduğunca düşük tutulması gerekmektedir. IM ile elde edilen ürünün üzerindeki sıcaklık dağılımı farklı noktalarda farklı sıcaklık değerlerine sahiptir. Özellikle yan duvarda bölgesel sıcaklık farkları 29 °C'ye kadar çıkabilmektedir. Bu da parçanın nihai geometrik şeklinin doğruluğunun yeterli derecede iyi olmasına engel teşkil etmektedir. Buna karşılık ICM yöntemiyle kalıplanan parçada sıcaklık dağılımı oldukça homojen ve IM yöntemine göre sıcaklık farklılıkları çok daha azdır. Örneğin parçanın yan duvarlarında görülen sıcaklık farklılıkları noktasal olarak daha yüksek olmasına rağmen, sıcaklık dağılımının homojen olduğu görülmektedir.



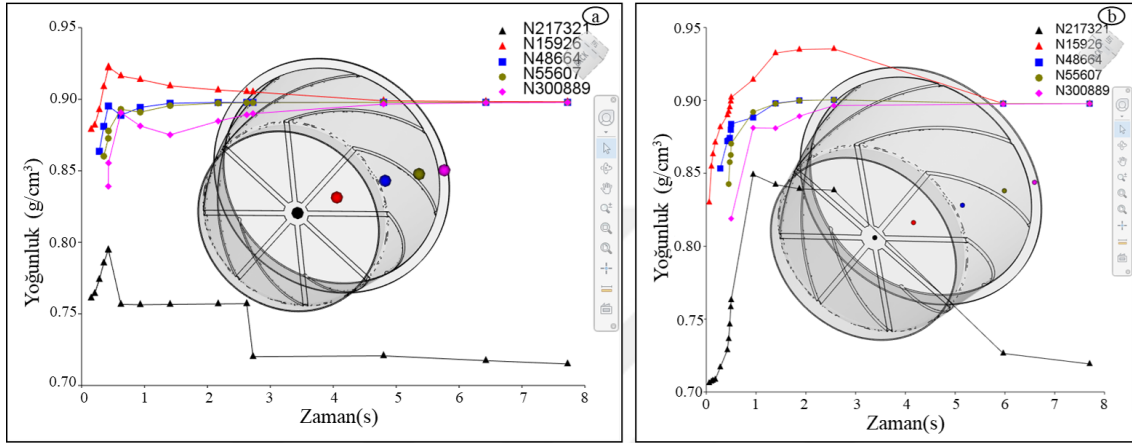
Şekil 5.7 Ön akış sıcaklık dağılımı; a) IM, b) ICM

Şekil 5.8’de ise, belirlenmiş beş nokta için ön akış sıcaklık dağılımları grafiksel olarak verilmiştir. IM için dalgalı yani daha inişli-çıkışlı sıcaklık değerleri tespit edilirken, ICM için taban merkezinden üst tavan kenarına kadar olan noktalarda lineer bir düşüş belirlenmiştir. Sıcaklık dağılımındaki bu farklılık, Şekil 5.7’de gösterilen sıcaklık dağılımının homojen olmadığına kanıtı olarak gösterilebilir.



Şekil 5.8 Beş nokta için ön akış sıcaklık dağılımı; a) IM, b) ICM

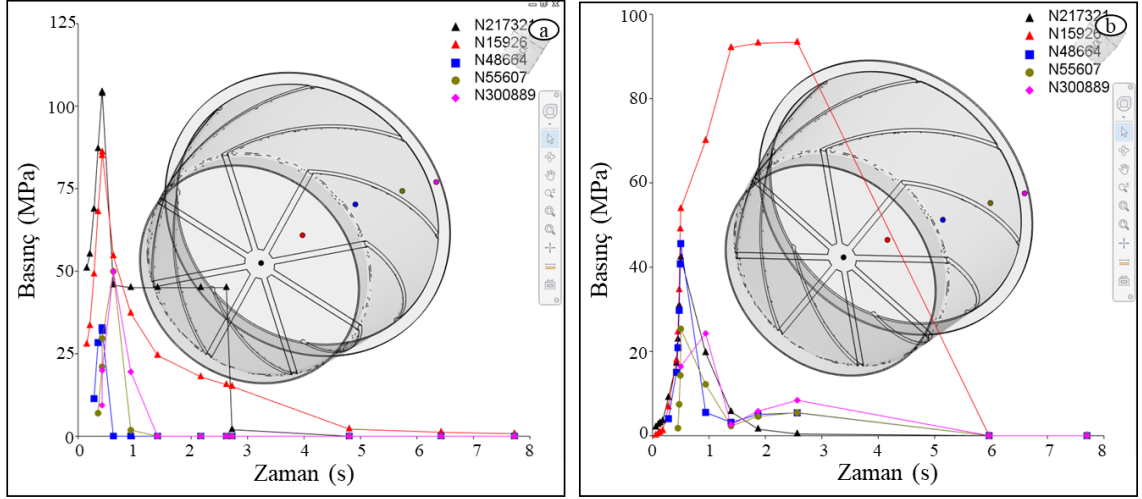
Şekil 5.9'dan ICM için belirtilen noktalardaki yoğunluk dağılımının, kalıplama işleminin bitmesinin ardından, tüm noktalarda IM yöntemi ile aynı olduğu gözlemlenmektedir. Dolayısıyla, her iki enjeksiyon yöntemi de parça için 0.9 g/cm^3 'lük benzer yoğunluk değeri sağlamaktadır. Yine her iki yöntemde, parça merkezinde yoğunluk değeri 0.72 g/cm^3 'lük değerde kalmıştır. Bu nedenle, yoğunluk değerinin düşük olduğu merkez bölgesinde, çarpılmaya olan direncin azalması dolayısıyla parçanın nihai geometrisinde, daha fazla çarpılma olması beklenen bir durumdur.



Şekil 5.9 IM ve ICM için yoğunluk profili; a)IM, b)ICM

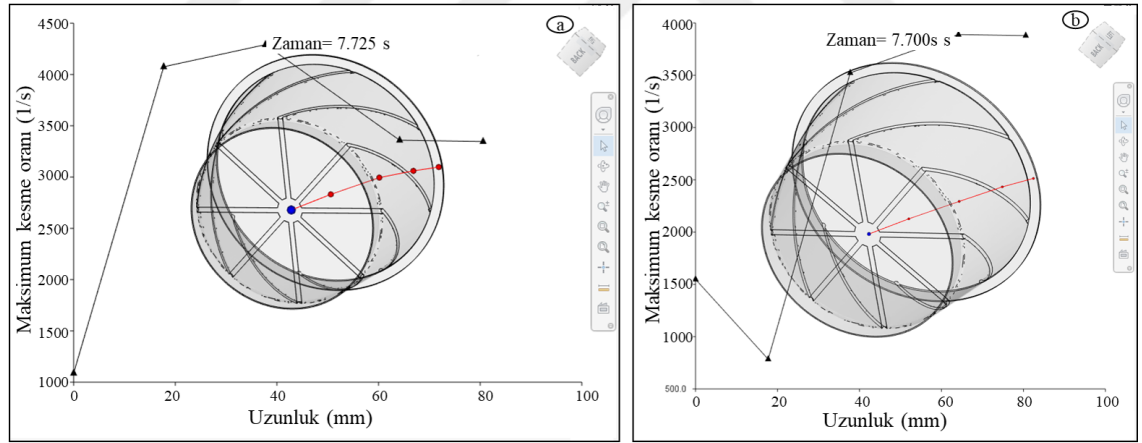
Şekil 5.10, doldurma sırasında boşluktaki basınç dağılımını göstermektedir. Beş nokta için, kalıp boşluğundaki basınç, ICM metodu için daha stabildir ve maksimum basınç değerleri enjeksiyon kalıplamaya göre çok daha düşüktür. Buna göre, ICM metodunda, doldurma sırasında, özellikle duvar boyunca oluşan basınç değerleri, IM yöntemine göre daha homojen bir dağılım göstermektedir. Basınç dağılımının homojen olması, bu bölgede düşük çekme değerleri ile daha homojen bir çekme ve daha düşük çarpılma yani daha iyi geometrik doğrulukta parça elde edilmesine katkı sağlamaktadır. Yine her iki metotta da enjeksiyon noktasından uzaklaştıkça basınç değerleri hızla düşmektedir.

Kalıp boşluğunda, tüm kalıplama süreci boyunca oluşan maksimum basınç, enjeksiyon makinesinin maksimum basınç limitinin altında olmalıdır. Bu sınır iyi bir kalıp tasarımı için, makine limitinin yaklaşık % 70'ine denk gelmektedir [2]. Deneysel çalışmalarda kullanılacak enjeksiyon makinesi için tanımlanan maksimum enjeksiyon basınç değeri 166 MPa 'dır. Dolayısıyla hem IM hem de ICM için sınır limit değeri 116 MPa 'dır.



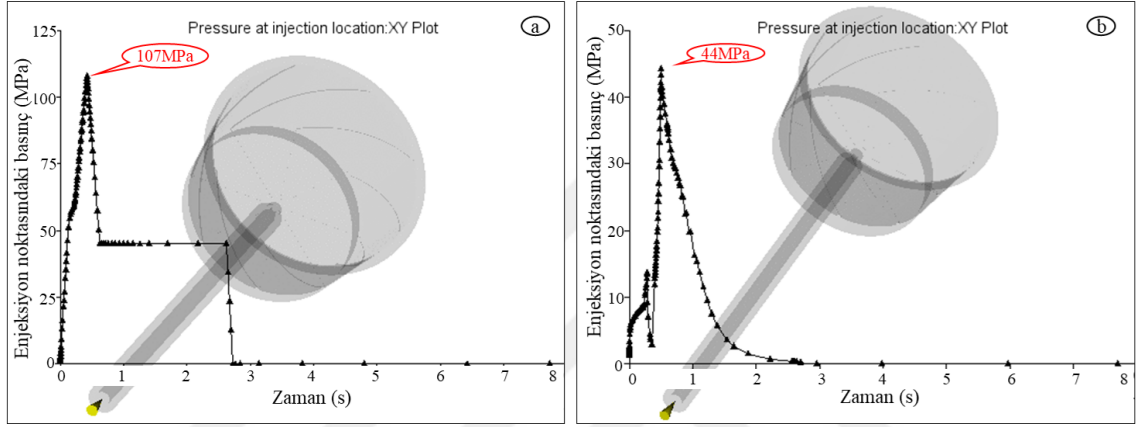
Şekil 5.10 Doldurma sırasında kalıp boşluğundaki basınç dağılımı; a)IM, b)ICM

Plastik katmanların birbirlerinin üzerinden ne kadar hızla kaydığı, Şekil 5.11’de maksimum kesme oranı ile gösterilir. Kesme hızının çok yüksek olması, plastikler arasındaki zincirlerin kırılmasına, dolayısıyla üretilen parçanın bozulmasına neden olur. Şekilde gösterildiği gibi, IM metodunda kesme oranı üçüncü noktada 4300 1/s’e ulaşırken, ICM metodunda kesme oranı üçüncü noktada 3389 1/s değerinde kalmıştır.



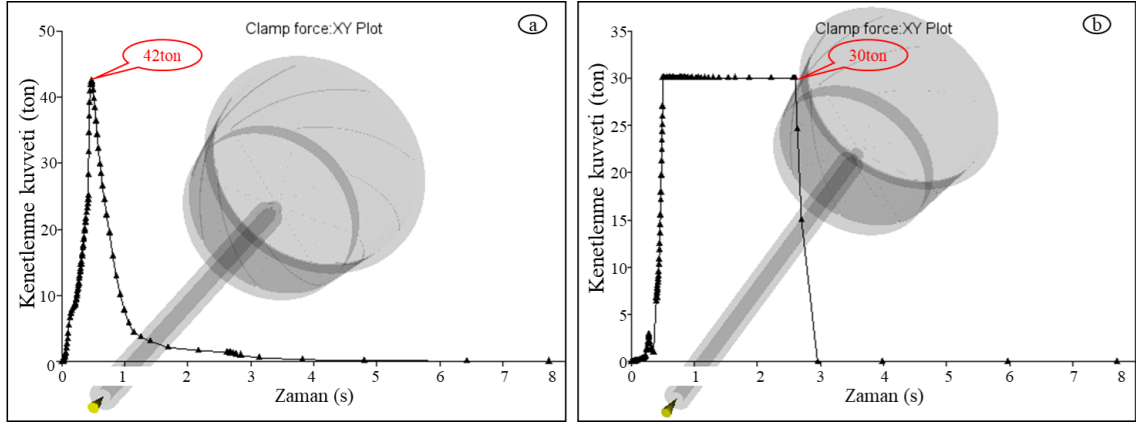
Şekil 5.11 Kesme hızı için kalıp akışı analizi, maksimum; a)IM, b)ICM

Şekil 5.12, doldurma ve doldurma sonrası aşamalar ile ilgili olarak, IM ve ICM sayısal simülasyonları için, enjeksiyon noktasındaki basıncın zaman geçmişini göstermektedir. IM işlemi için, başlangıçta basıncın dikkat çekici bir hızla 107 MPa 'a kadar çıktığı, ICM için ise maksimum noktada 44 MPa basınca ihtiyaç duyulduğu tespit edilmiştir. IM ve ICM için doldurma işlemi sonunda sırasıyla 0.42 s ve 0.5 s 'de basınç en yüksek değere ulaşmıştır. IM işlemi için kısa sürede 107 MPa 'dan 45 MPa 'ya düşen basınç değeri, 2 s 'lik paketleme süresi boyunca sabit kalmıştır. ICM simülasyonunda, maksimum değere ulaştıktan sonra, tüm çevrim boyunca basıncın azaldığı ve son olarak basınç seviyesinin 7.7 s sonunda 0 MPa düştüğü tespit edilmiştir.



Şekil 5.12 İşlem boyunca hem IM hem de ICM için enjeksiyon konumunda hesaplanan basınç profilleri; a)IM, b)ICM

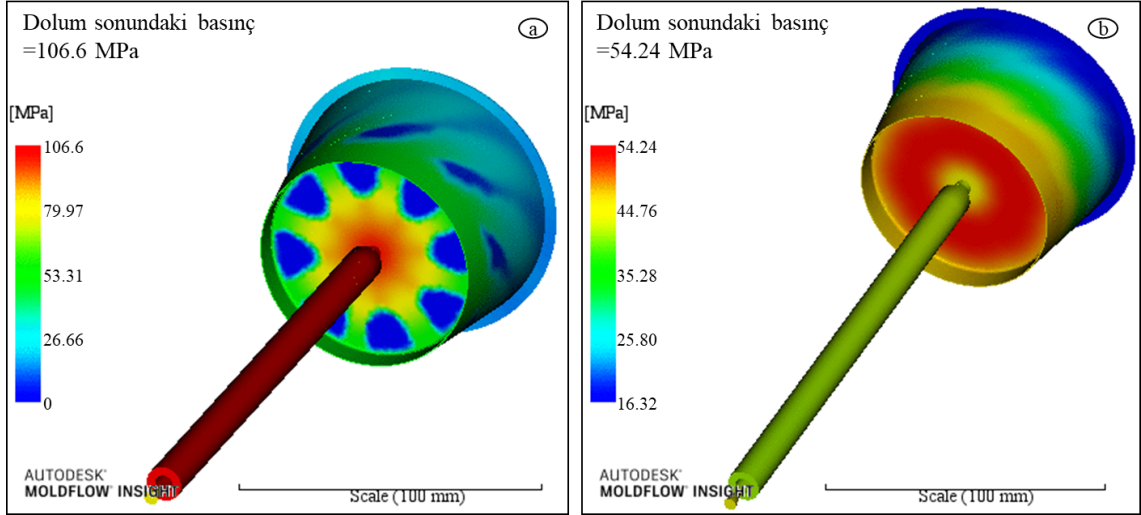
Enjeksiyon noktasındaki basıncın düşük olması durumunda, kalıplama için düşük kenetleme kuvvetlerine ihtiyaç duyulması beklenir. Şekil 5.13'de gösterildiği gibi kenetleme kuvvetlerinin değişim profilleri ve tüm sürecin sonuçları, iki ayrı grafikte IM ve ICM metodolojileri için gösterilmiştir. Enjeksiyon döngüsünün başlangıcında, her iki işlemin de kenetleme kuvveti keskin bir şekilde artmıştır. Ancak, IM yönteminin kenetlenme kuvveti 0.467 s sonra 42.3 ton 'a ulaşarak ICM için gerçekleştirilen simülasyondaki maksimum kenetlenme kuvveti değerini aşmıştır. Bu arada, ICM metodunun kenetleme kuvveti 0.5 s 'de 30 ton 'a kadar çıkmış ve ardından sıkıştırma süresinin sonuna kadar 2 s boyunca sabit kalmıştır.



Şekil 5.13 Simüle edilmiş kenetlenme kuvveti profillerinin karşılaştırılması; a)IM, b)ICM

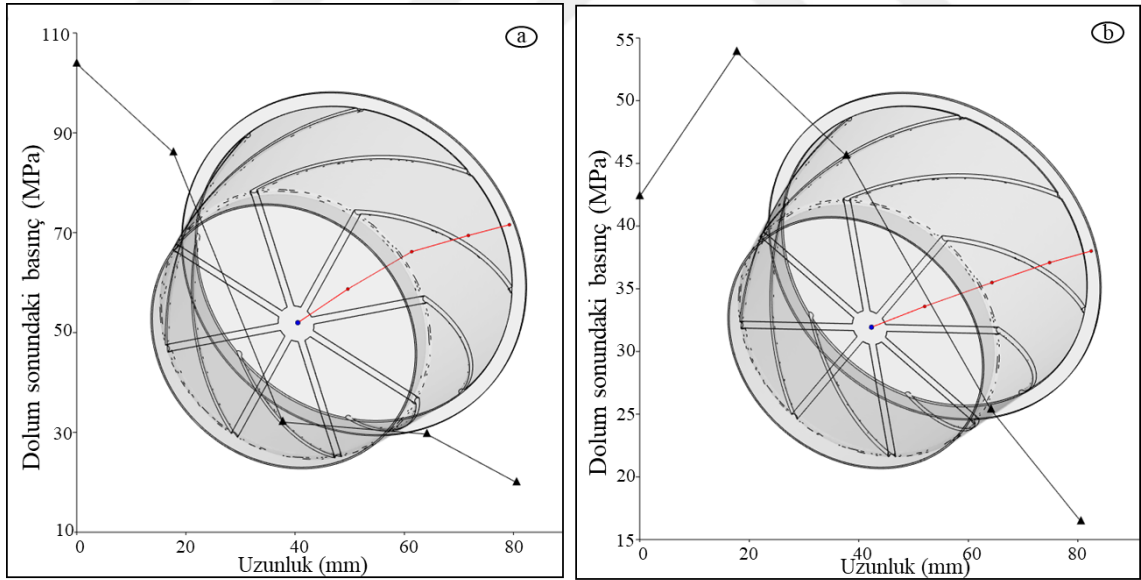
Genel olarak, optimum ayar parametrelerinden elde edilen gerekli kalıplama basıncı ve kenetleme kuvvetinin, ICM metodu kullanıldığında, IM metoduna göre daha düşük hale geldiği açıktır. ICM yönteminin kullanılması durumunda, geleneksel enjeksiyon metoduna (IM) göre, kenetlenme kuvveti ve basınçta, sırasıyla % 41 ve % 59'a varan azalmalar olduğu belirlenmiştir.

Dolum sonundaki basınç için, Şekil 5.14'te, kalıp boşluğu tamamen plastik ile dolduğunda boşluktaki basınç dağılımı gösterilmiştir. Dolum sonunda parça üzerinde tespit edilen basınç değerleri, iki yöntem arasında neredeyse iki kat fark olduğunu göstermiştir. ICM yönteminde homojen bir basınç dağılımı gözlemlenirken IM yöntemi ile üretilen parçada düzensiz bir basınç dağılımı olduğu belirlenmiştir. IM yönteminde 0.427 s sonunda dolumun tamamlanması ile maksimum basınç 107 MPa olarak tespit edilmiştir. ICM yönteminde ise prosesin başlangıcından dolumun tamamlanmasına kadar geçen süre 0.5 s'dir ve bu sürenin sonunda en yüksek basıncın 54 MPa ile taban bölgesinde olduğu belirlenmiştir. ICM yönteminde sıkıştırma aşaması prosesin başlangıç aşamasından 0.4 s sonra başlamıştır. Buna göre dolum % 100 tamamlanmadan 0.4 s sonunda sıkıştırma kuvveti uygulanmaya başlamış ve dolumun tamamlanmasına kadar yaklaşık 0.1 s boyunca sıkıştırma hareketi devam etmiştir. 0.1 s'lik süre içerisinde hareketli kalıp 0.98 mm kapanarak sıkıştırma kuvvetini uygulamıştır. Böylece sıkıştırma kuvvetinin uygulanması, parçada homojen bir basınç dağılımı ile daha düşük basınç değerleri oluşmasını sağlamıştır.



Şekil 5.14 Kalıp boşluğu tamamen plastik ile dolduğu andaki basınç dağılımı; a)IM, b)ICM

Yine beş nokta için dolum sonundaki basınç dağılımı, Şekil 5.15'te gösterilmiştir. İlk üç nokta için ICM metodunda 42–54 *MPa* civarında basınç değerleri tespit edilmiştir. IM metodunda ise başlangıç olarak belirlenen taban merkez noktasında yaklaşık 105 *MPa* basınç değeri ortaya çıkmıştır. Merkez noktasından uzaklaştıkça, basınç değeri şiddetli bir şekilde düşerek yaklaşık 20 *MPa* seviyelerine inmiştir.

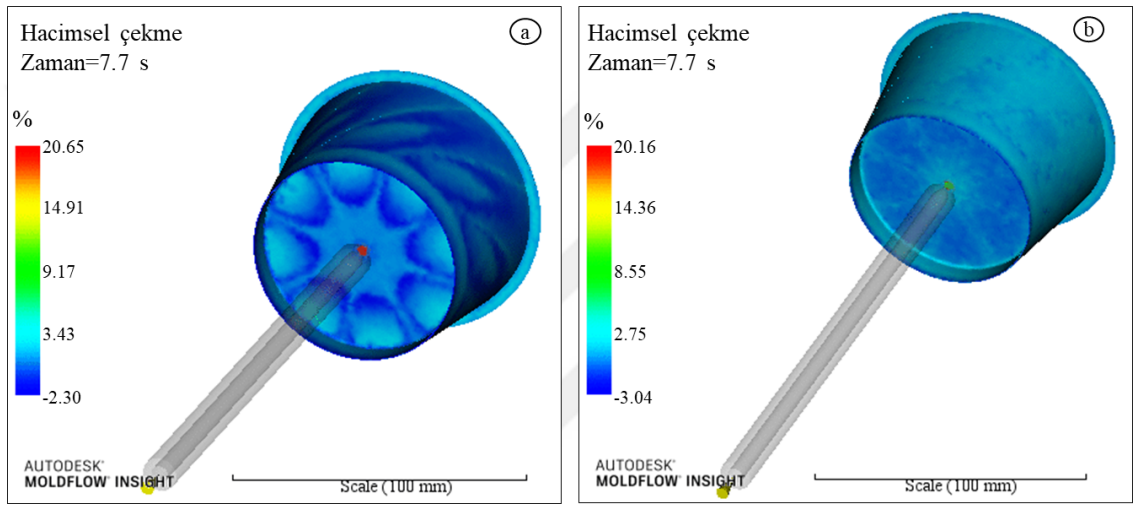


Şekil 5.15 Dolum sonundaki basınç dağılımının beş nokta üzerinden gösterimi; a)IM, b)ICM

Üretilen parçanın geometrik doğruluğunun, yapısal ve görsel bütünlüğünün sağlanması için kendini çekme sonuçları oldukça önemlidir. IM için iyi bir paketleme profili kullanılması, kendini çekme değerlerinin düşürülmesinde önemli katkı sunabilmektedir. Bunun dışında, parçadaki kendini çekme değerleri, termal ve

p, v, T özellikleri, parça geometrisi, kalıp özellikleri, sıcaklık basınç gibi birçok faktörden az veya çok etkilenmektedir.

Şekil 5.16, hacimsel kendini çekme profillerini karşılaştırmalı olarak göstermektedir. Enjeksiyon kalıplamada, en yüksek hacimsel kendini çekme değeri % 20.65 olarak görülürken, ICM metodunda ise en yüksek değer % 20.16 gibi bir değere sahiptir. Çarpılmayı en aza indirmek için, parça üzerindeki hacimsel çekmedeki değişim en aza indirilmeli ve kendini çekme değerleri parça boyunca homojen olmalıdır. Buna göre, IM metodu ile akışı simüle edilmiş parçada homojen olmayan bir renk skalası dağılımı görülürken, ICM yönteminde taban merkezi dışında oldukça homojen bir dağılım görülmektedir.

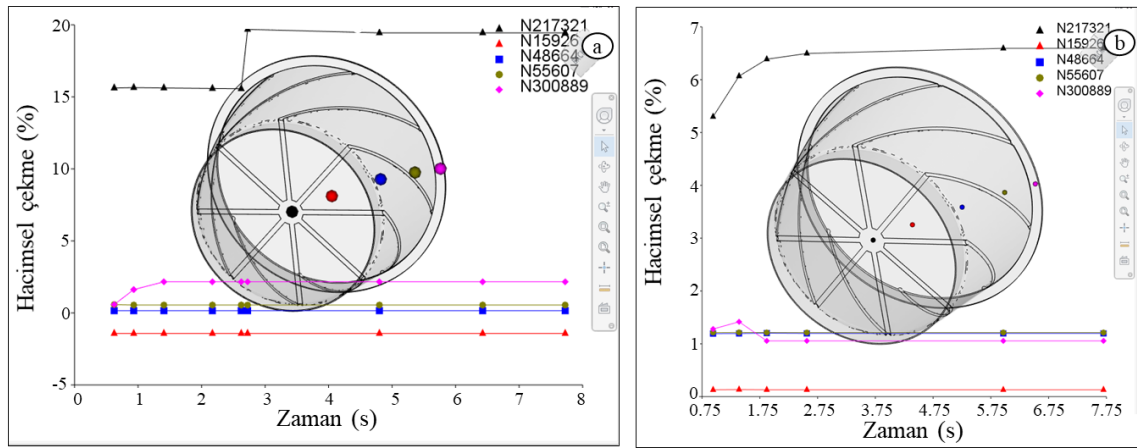


Şekil 5.16 Hacimsel kendini çekme profilleri; a)IM, b)ICM

Parçanın tabanını güçlendirmek için parça kalınlığı yan duvarlar ile taban bölgeleri arasında 0.7 mm olarak tasarlanmıştır. Ancak, enjeksiyon girişinde yani taban yüzeyinde parça kalınlığı 0.3 mm 'ye düşmektedir. Kalınlık farkı, taban yüzeyinin dış çevresinde soğumanın daha uzun sürmesine neden olurken, tabanda diferansiyel çekme ile bir sıcaklık farkı oluşur. Bu durum da hacimsel kendini çekme grafiğinde görüldüğü gibi kısmi çarpıklığa neden olur.

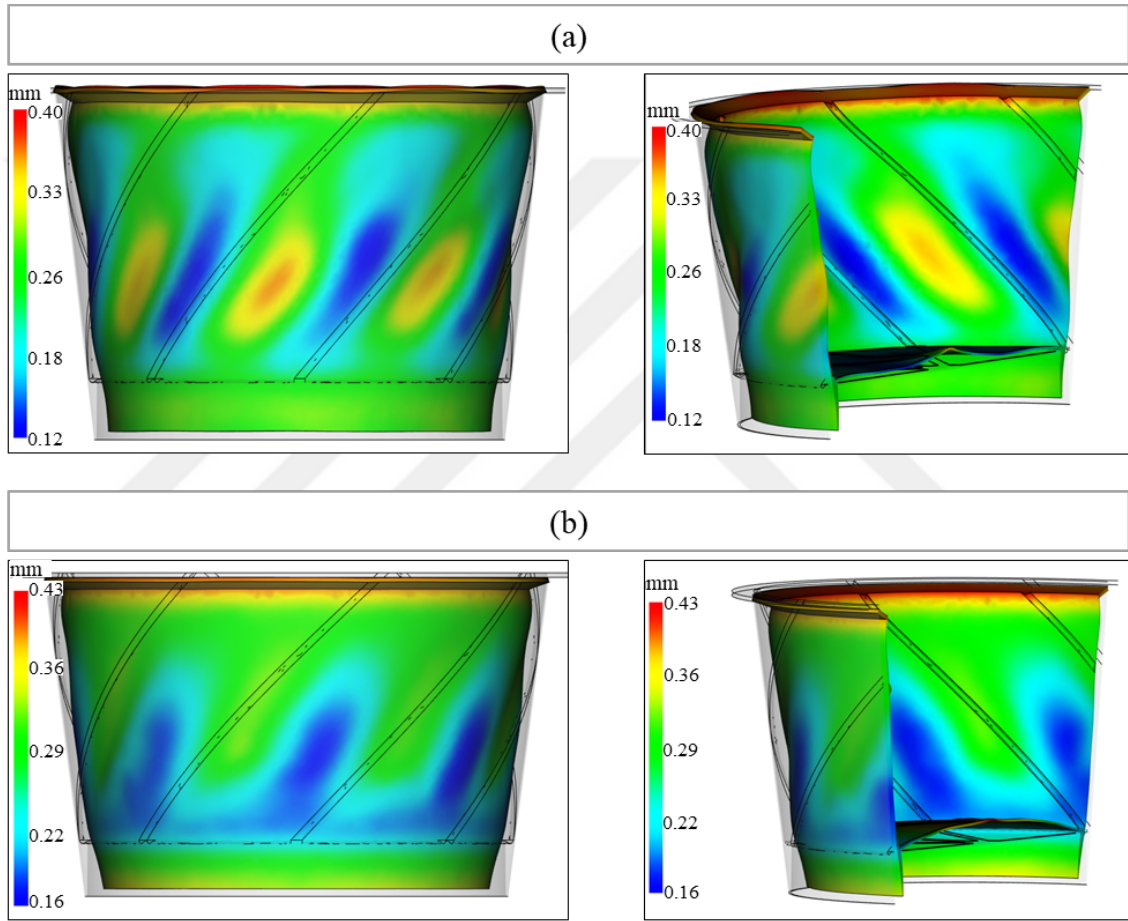
Şekil 5.17'de 5 noktadaki hacimsel kendini çekme profilleri karşılaştırmalı olarak gösterilmektedir. IM yönteminde, belirlenen noktalarda, farklı kendini çekme profilleri ve özellikle merkezdeki noktanın kalan diğer dört noktadan farklı hacimsel çekme değerlerine sahip olduğu görülmektedir. Dolayısıyla IM için tekdüze hacimsel çekme değerinin olmadığı tespit edilmiştir. Hacimsel kendini çekmenin, parça üzerindeki çarpılmanın azaltılması için tüm parça boyunca benzer olması istenen bir özelliktir. Buna göre, ICM sonucunda, IM yöntemine göre daha düşük hacimsel kendini çekme değeri olduğu görülürken, yine kalan dört nokta arasındaki fark, yok denecek kadar azdır. Bu sonuç parça üzerindeki çarpılmaların daha düşük

sonuçlanması için beklenen bir durum olarak görülebilir.



Şekil 5.17 Beş nokta için hacimsel kendini çekme profilleri; a)IM, b)ICM

Arttırılmış skala oranına bağlı olarak, her iki metot için parça üzerindeki çarpılma değerleri, Şekil 5.18’de gösterilmiştir. Buna göre, ICM yöntemindeki çarpılma değerleri özellikle tabanda ve yan duvarda daha homojen seyrederken, IM metodunda çarpılma davranışının, daha girintili çıkıntılı deformasyonlardan oluştuğu gözlemlenmiştir. Özellikle parçanın en uç noktasında, ICM yine oldukça homojen bir çarpılma davranışı sergilerken, IM yöntemiyle üretilen parça ise, dalgalı bir davranış sergilemektedir. Dolayısıyla maksimum çarpılma değerinin ICM yönteminde daha fazla (0.03 mm) olmasına rağmen, IM ile üretilen parçanın çarpılma davranışı nedeniyle parça kalitesinin daha düşük olduğu belirlenmiştir.

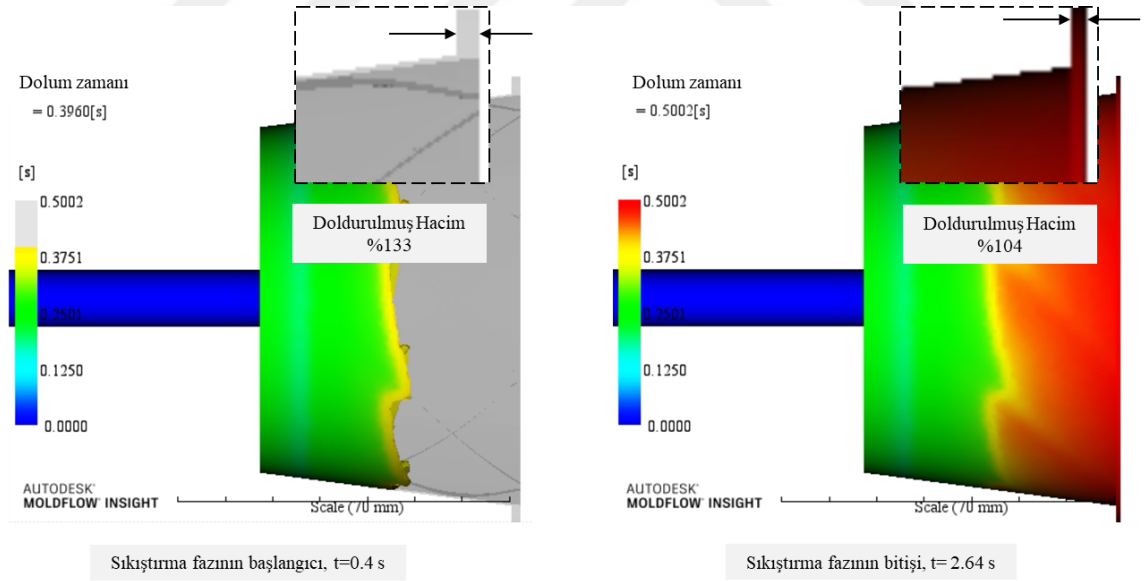


Şekil 5.18 Arttırılmış skala oranına bağlı olarak parça üzerindeki çarpılma değerleri; a)IM, b)ICM

5.3 Optimum Ayarlarla ICM Sayısal Simülasyonun Gerçekleştirilmesi

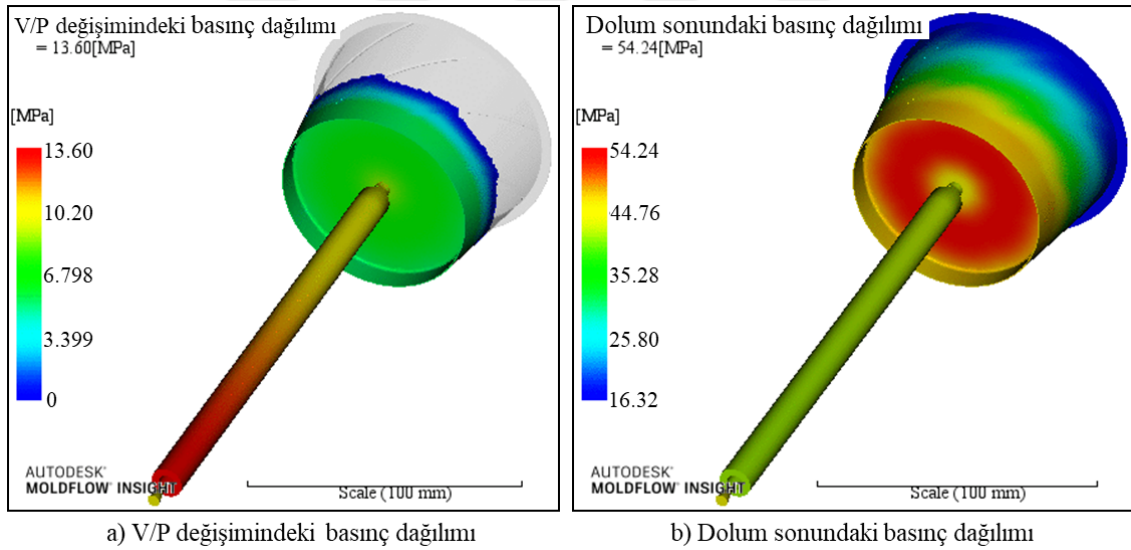
ICM prosesi ile kalıplanmış parçada, parçanın farklı yerlerindeki kendini çekme nedeniyle kalıntı gerilmeler indüklenir ve plastik parçada geometrik sapmalar ve dolayısıyla çarpılma meydana gelir. Kalıp ve parça tasarımı gibi faktörlerin yanı sıra malzeme seçimi, proses ayarları parçaların çarpılmasını önlemek için önemli bir rol oynar ve bu nedenle dikkate alınmalıdır. Bu bölümde, ICM metoduyla yapılan simülasyonda, doldurma ve doldurma sonrası aşamalar için optimum proses parametrelerinin parça üzerindeki sonuçları incelenmiştir.

Şekil 5.19’da ilk hacmin, yani kalıp mühürlenmeden önceki kalıp boşluğu hacminin, parça hacmine oranının yüzdesi olarak ifade edilen doldurulmuş hacim, % 137 değerine ulaşması ile yani 0.4 s sonunda sıkıştırma aşaması başlamaktadır. Sıkıştırma fazı ile birlikte parça, hareketli kalıp tarafından sıkıştırılır ve nihai şeklini alması için kalıp ileri doğru hareket eder. 30 ton olarak belirlenen sıkıştırma kuvvetine 0.5 s’de ulaşarak, parça 1 mm sıkıştırılır ve düğümlerin dolumu % 100’e ulaşır. Son olarak, hareketli kalıp 0.15 mm’lik mesafeyi 2 s’de alırken, 30 ton’luk sabit sıkıştırma kuvveti de parça üzerine uygulanır ve parça nihai şeklini almış olur.



Şekil 5.19 ICM için sıkıştırma aşaması

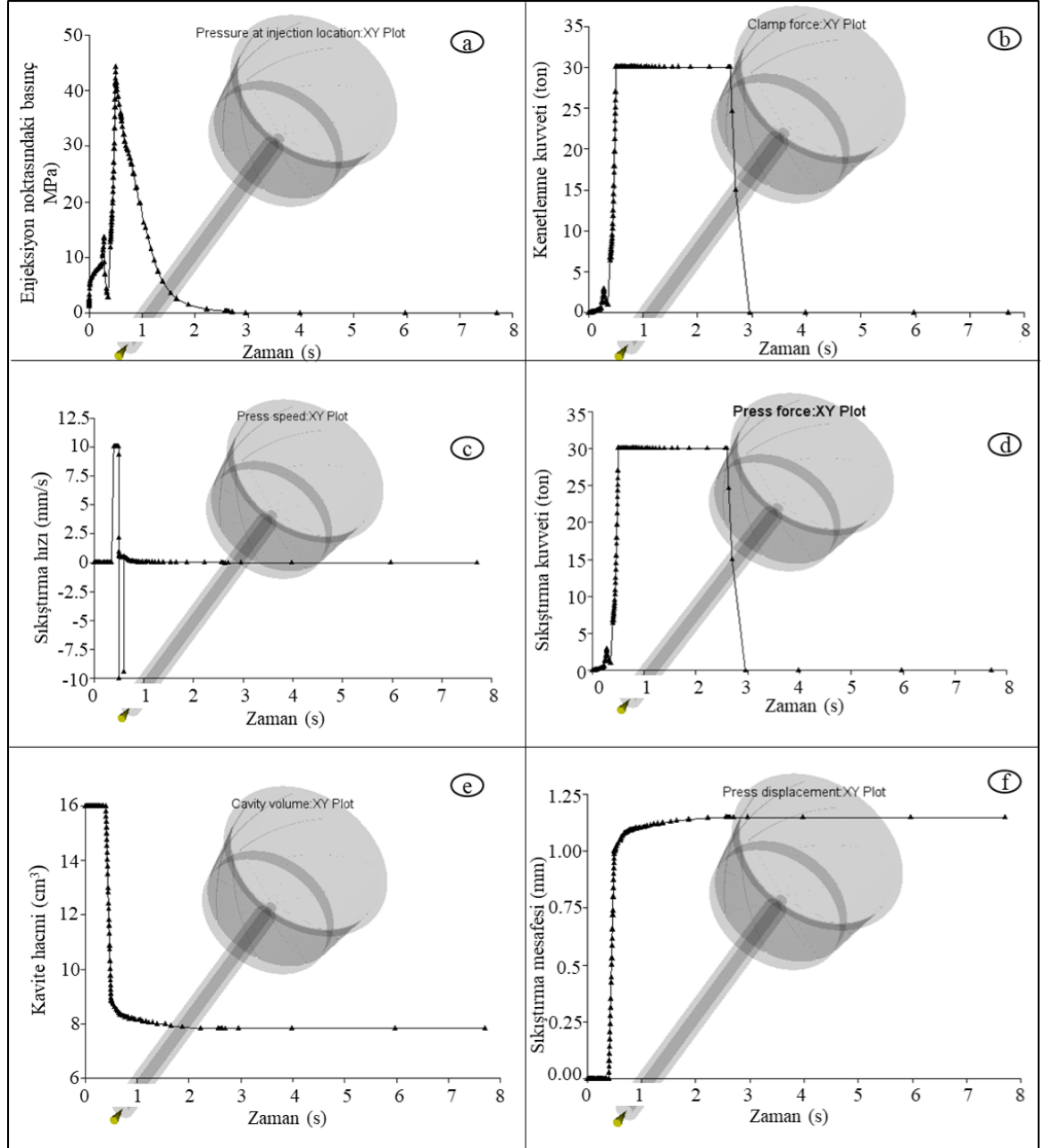
Şekil 5.20 a ve b’de optimum proses parametreleri için basınç dağılımları incelenmiştir. V/P geçişi, enjeksiyonlu kalıplama makinesinin, dolum sürecini hızdan basınç kontrolüne değiştireceği toplam hacmin yüzdesidir. Şekil 5.20 a’da, 13.6 MPa, 0.28 s’ye gelindiğinde parçanın % 128 oranında doldurulan hacim yüzdesindeki basınç değeridir. Geçiş kontrol yüzdesi, ICM yönteminde, özel dikkat gerektiren önemli bir parametredir. Bu parametrenin, belirtilen değerine bağlı olarak hareketli kalıp, istenilen kalıp boşluğunu, belirtilen sürede sıkıştırma kuvveti ile kapatabilir. Aksi takdirde, kısa atışla sonuçlanan enjeksiyon aşaması, sıkıştırma fazında sıkıştırma kuvvetinin oluşmamasıyla sonuçlanmaktadır. Şekil 5.20 b doldurma sonrası kalıp boşluğundaki basınç dağılımının sonuçlarını temsil eder. Basıncın en yüksek olduğu bölgeler girişe yakın alanlar iken, en düşük basınç değerleri ise artan akış uzunluğuna bağlı olarak eriyik ön akış cephesinde yani parçanın en uzak noktasında görülür. Dolum için gerekli olan basınçtan daha yüksek çıkan dolum sonundaki basınç 54.24 MPa ile maksimum değerine ulaşmıştır. Şekil 5.20 b’den görüleceği üzere dolum sonunda parça üzerinde, sıkıştırma yönünde eşit basınç dağılımı orta çıkmıştır. Kalıpta homojen ve düşük basınç oluşumu, plastik parçada boyutsal kararlılık sağlayan önemli faktörlerden biridir.



Şekil 5.20 Doldurma ve doldurma sonrası fazları için basınç dağılımları

Simülasyon sonuçları, doldurma, doldurma sonrası aşaması ve sıkıştırma hızı, sıkıştırma kuvveti ve zamanın bir fonksiyonu olarak yer değiştirme profili için Şekil 5.21’de gösterilmektedir. Şekil 5.21 a’da gösterildiği gibi, basınç 44.15 MPa’a artarken, sıkıştırma kuvveti Şekil 5.21 b’de 30 ton çıkmaktadır. Basınç ve sıkıştırma kuvveti zirve değerlerine ulaştıktan sonra, sıkıştırma aşaması boyunca, sıkıştırma kuvveti 2 s süresince sabit kalırken, enjeksiyon konumundaki basınç sert bir şekilde 0 MPa’a düşmektedir. Sıkıştırma kuvveti, kalıntı gerilmeyi ve çarpılmayı azaltmada önemli bir etmen olarak, kalıpta eşit basınç dağılımını sağlamaktadır. Sırasıyla Şekil

5.21 c ve d’de, sıkıştırma $10 \text{ mm} / \text{s}$ ’lik sabit bir hızda gerçekleşirken, 2 s’lik paketleme süresi boyunca sabit bir şekilde kalarak sıkıştırma kuvveti 30 ton ’a yükselmektedir. Daha sonra 0.2 s ’de kademeli olarak 0 ton ’a düşmektedir. Şekil 5.21 e, eriyiğin sıkıştırılmasına göre, kavite hacminin değişimini göstermektedir. Sıkıştırma aşaması başlayıncaya kadar hacim değişmez ancak, hareketli kalıbın, 0.4 s ’lik süre sonunda ileri hareketi ile 13.88 cm^3 ’ten 7.875 cm^3 ’e düşürülmesi ile nihai hacim elde edilir. Daha sonra 0.2 s ’de kademeli olarak 0 ton ’a düşmektedir. Şekil 5.21 f’de ise kalıp 1.15 mm ’lik sıkıştırma hareketi yaparak sıkıştırma kuvvetini uygulamaktadır.



Şekil 5.21 ICM için kritik parametre sonuçları; a) Basınç, b) Kenetlenme kuvveti c) Sıkıştırma hızı, d) Sıkıştırma kuvveti, e) Kalıp boşluk hacmi, f) Sıkıştırma mesafesi

5.4 Kalıntı Gerilmeler

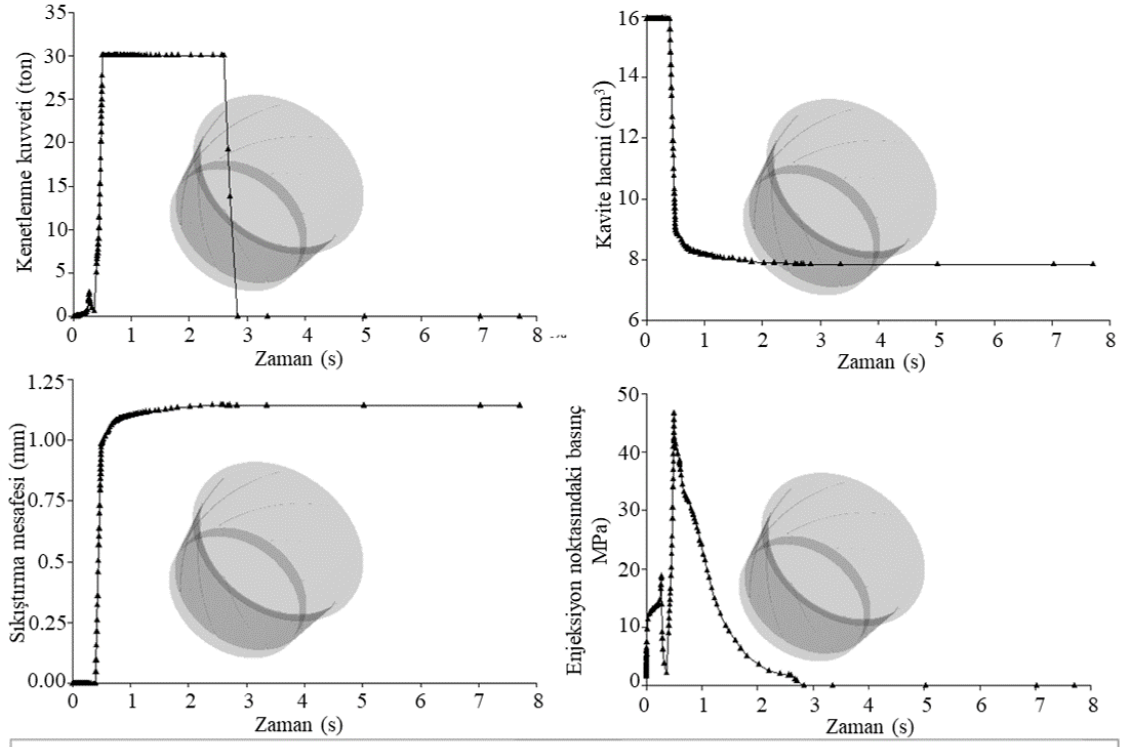
Çekme ve çarpılmanın proses öncesi belirlenmesi kadar kalıntı gerilmelerin de önceden simülasyon sonuçları ile tespiti, ürün kalitesi nedeniyle önemli bir parametre olarak göz önünde bulundurulmalıdır. Parça üzerinde ortaya çıkan geometrik deformasyonlar, yani diğer bir deyişle çarpılma, homojen olmayan soğutmanın sebep olduğu kendini çekme ve bunun sonucunda, parçanın kalıp içinden çıkarılmasından sonra, parça üzerinde oluşan kalıntı gerilmelerin serbest kalmasıyla ortaya çıkar. Dolayısıyla kalıntı gerilmelerin belirlenmesi, parçanın geometrik doğruluğunun istenilen seviyelere ulaşmasında önemli bir parametredir.

ICM metodunda enjeksiyon kalıplamadan farklı olarak, paketlenme aşaması yerine, sıkıştırma aşaması devreye girerek eriyik hareketli kalıp tarafından sıkıştırılır ve eriyiğin parçanın nihai şeklini alması sağlanır. Eriyik, kalıp duvarından uygulanan basınçla belirlenen süre zarfında sıkıştırılır. ICM ile dolum sonrasında, basınç daha homojen ve daha düşük hale gelir, bu da kalıntı gerilme değerlerini azaltmak, moleküler oryantasyonu en aza indirmek, düzensiz kendini çekmeyi düşürmek, çöküntü izlerinin ve çarpıklığın üstesinden gelmek, yoğunluk varyasyonunu azaltmak ve boyutsal doğruluğu artırmak gibi birçok avantaj sağlar [9]. Üretilen parça karmaşıktıkça, polimer eriyiğinin yolunun uzaması nedeniyle kalıntı gerilmeler yeterince düşürülemediğinden, ICM yöntemi ile bu sorun ortadan kaldırılmaya çalışılmıştır. Böylece kalıntı gerilmeler mümkün olduğunca düşük tutularak nihai parçanın geometrik doğruluğunun iyileştirilmesi hedeflenir [11].

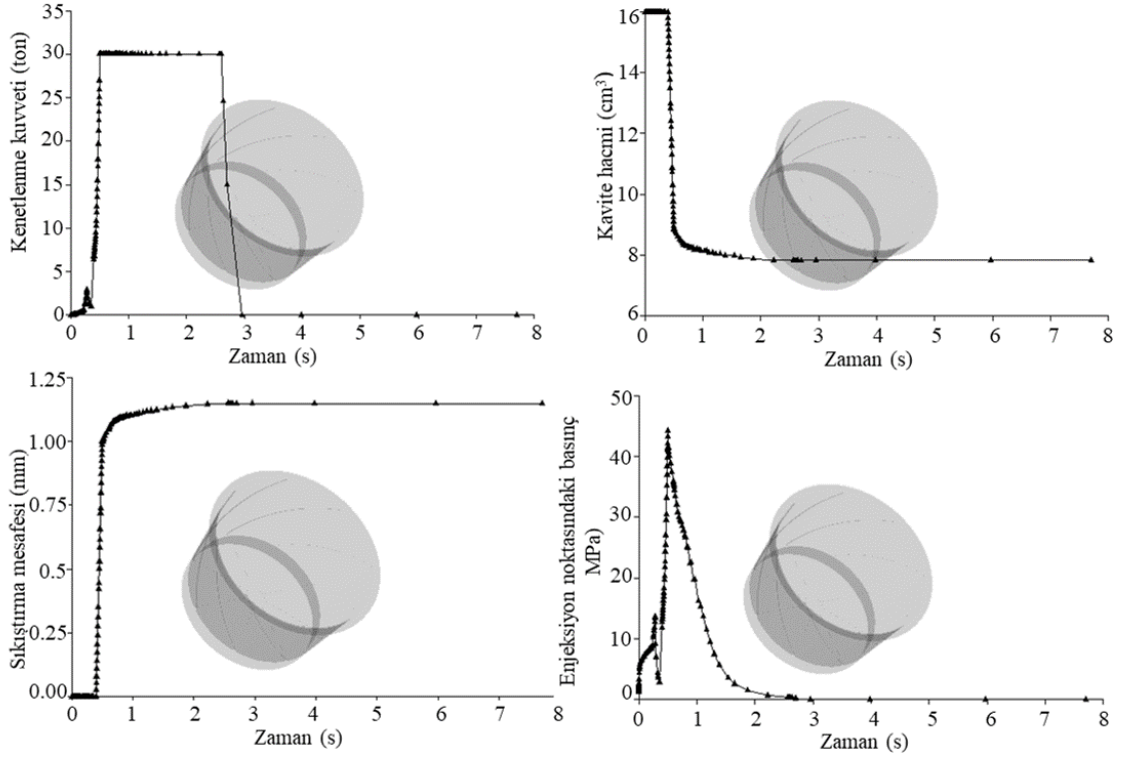
Kalıntı gerilmelerin incelenmesi için çalışmada yapılan analizlerde kullanılan bilgisayarın “RAM yetersiz” hatası vermesi nedeniyle, tetrahedral eleman sayısı IM ve ICM için 531283’e düşürülmüştür. Böylece, 1152422 tetrahedral elemanlı ağ yapısı ile yapılan simülasyonların “RAM yetersiz” hatası bertaraf edilerek, kalıntı gerilmeler için simülasyonlar gerçekleştirilebilmiştir. Deneysel sonuçlarla mümkün olduğunca benzer sonuçların elde edilebilmesi için, 1152422 tetrahedral sayısı ve 531283 eleman sayısı ile yapılan simülasyonların proses değerleri ve çarpılma sonuçları karşılaştırılmıştır. Nihayetinde, her iki tetrahedral eleman sayısı ile yapılan simülasyon sonuçları arasında korelasyon kurularak, kalıntı gerilmeler için gerçeğe yakın sonuçlar elde edilerek sonuçlar incelenmiştir. Şekil 5.22’de her iki tetrahedral eleman sayısı kullanılarak uygulanan analizlere ait proses parametreleri ve değerleri görülmektedir. Buna göre, 30 ton kenetlenme kuvveti ve 7.875 cm^3 nihai hacim ve son olarak 1.15 mm sıkıştırma mesafesi değerleri her iki tetrahedral eleman sayısı için aynı değerlerde bulunmuştur. Kalıp içi basınç değerlerinin ise yaklaşık 45 MPa’a denk geldiği ve birbirleri arasında çok düşük farklılık olduğu belirlenmiştir. Böylece tetrahedral eleman sayısının düşürülmesinin, ICM yönteminin temel parametrelerinde olumsuz

etkisinin olmadığı tespit edilmiştir.

a) 531283 tetrahedral eleman

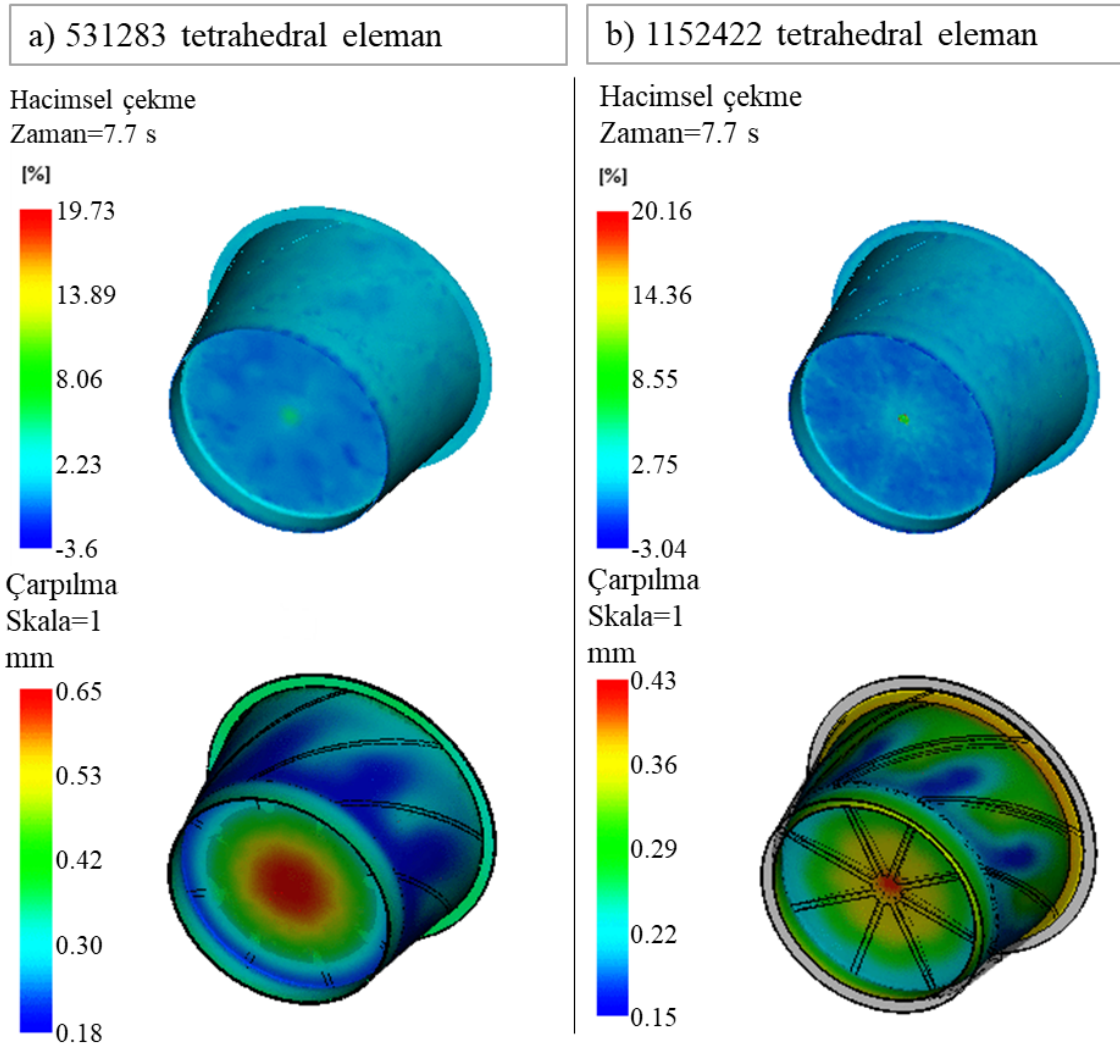


b) 1152422 tetrahedral eleman



Şekil 5.22 Tetrahedral eleman sayısının temel proses parametrelerine etkisi; a) 531283 tetrahedral eleman b) 1152422 tetrahedral eleman

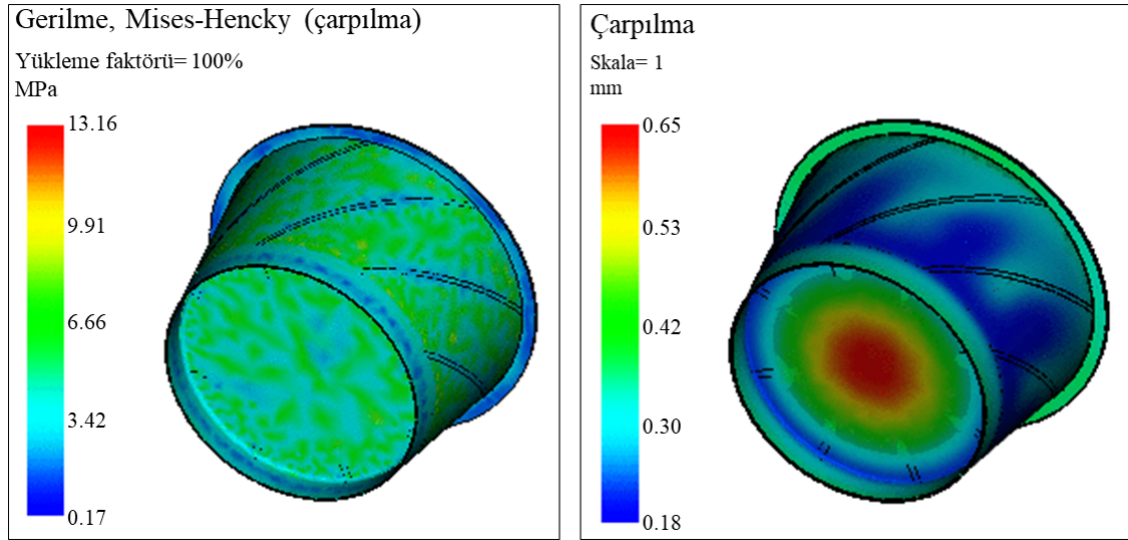
ICM metodunda, simülasyon sonuçlarından elde edilen kalıntı gerilmelerin doğrulaması için bir başka karşılaştırma metodu olarak, tetrahedral eleman sayısına bağlı olarak elde edilen hacimsel kendini çekme ve çarpılma değerleri Şekil 5.23'de kullanılmıştır. Hacimsel kendini çekme değerleri oldukça benzer çıkarken, tabandaki maksimum kendini çekme değerleri arasında farklılık tespit edilmiştir. Buna göre, tetrahedral eleman sayısı 531283 olan simülasyon sonucunda, enjeksiyon girişinin yapıldığı taban bölgesinde maksimum değer 0.65 mm 'lik çarpılma değeri çıkarken, tetrahedral eleman sayısı 1152422 olan simülasyon sonucunda ise maksimum çarpılma değeri 0.43 mm olarak bulunmuştur. Ancak, genel olarak renk skalasından da görüleceği üzere çarpılmalar parça üzerinde benzer dağılım göstermiştir.



Şekil 5.23 Tetrahedral eleman sayısının hacimsel kendini çekme ve çarpılmaya olan etkisi; a) 531283 tetrahedral eleman b), 1152422 tetrahedral eleman

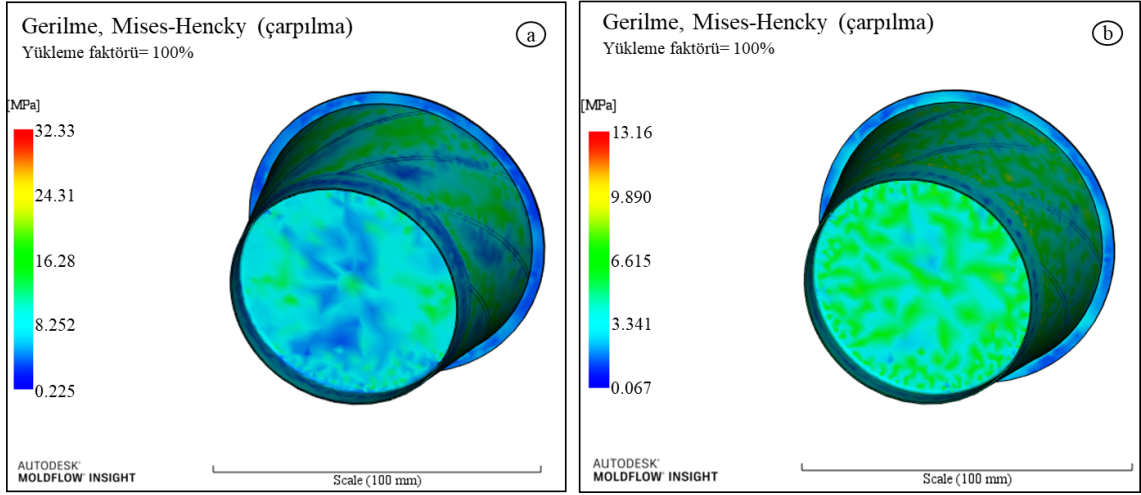
Parça üzerindeki kalıntı gerilmelerin ortaya çıkarılması amacıyla, simülasyon sonuçlarından biri olan Mises-Hencky metodundan faydalanılmıştır. Mises-Hencky metodu ile elde edilen gerilmeler, parça kalıptan çıkarıldıktan sonra oluşan

deformasyon durumunda, parçadaki gerilmeleri gösterir. Şekil 5.24'te sıkıştırmalı enjeksiyonla kalıplanmış parçanın kalıntı gerilme dağılımı gösterilmiştir. ICM yöntemiyle kalıplanan üründe, düşük kalıntı gerilmeleri ve gerilmelerin parçanın tümüne homojen olarak dağılması, diğer bir deyişle tavan ve yan duvarlarda benzer kalıntı gerilmelerin oluşmasına bağlı olarak ürünün daha iyi boyutsal kararlılık göstermesi beklenir.



Şekil 5.24 ICM yöntemi için Mises-Hencky gerilme sonuçları

ICM metodu sıkıştırma aşamasıyla sağladığı avantaj nedeniyle, parça üzerindeki erken soğuyan veya sıcaklık farkı olan bölgelerin üzerindeki gerilmelerin azaltılmasını, dolayısıyla homojen basınç dağılımı ile homojen kalıntı gerilme dağılımı oluşması sağlanır. Şekil 5.25'de IM ve ICM ile kalıplanmış parçalara ait simülasyon sonuçları görülmektedir. IM için geçerli simülasyonlarda yine ICM metodundaki gibi tetrahedral elaman sayısı 531283 olan ağ örgüsü kullanılarak gerçekleştirilmiştir. IM ile kalıplanmış parça üzerindeki kalıntı gerilmeler, bölgesel olarak farklılıklar göstermiş; tabandaki yer yer düşük olan kalıntı gerilmelerin, yan duvarlarda enjeksiyon noktasından uzaklaştıkça arttığı tespit edilmiştir. Benzer soğutma zamanları, kalıp ve eriyik sıcaklıkları kullanılmasına rağmen, ICM metodu çok daha homojen bir kalıntı gerilme dağılımı oluşmasını sağlamıştır. Bu sonuç, ICM yönteminin kalıntı gerilmelerin düşürülmesinde önemli bir avantaj sağladığını kanıtlayan önemli bir olgudur.



Şekil 5.25 Mises-Hencky gerilme sonuçları; a)IM, b)ICM

5.5 Taguchi Metodu ile Parametre Optimizasyonu

Kalıplama sonrası parça üzerinde oluşan çarpılma, plastik parça kalitesini etkileyen ana faktörlerden biridir ve temel olarak farklı soğutma, fiber yönelimi, kalıntı gerilmeler ve çekmeden kaynaklanmaktadır [15]. Çarpılma, malzeme özellikleri, parça geometrisi, kalıplama ve proses koşulları vb. gibi birçok parametreden etkilenirken, nihai üründe geometrik sapmalar, hedeflenen boyutsal ölçülerin karşılanmaması, daha yüksek iç gerilmeler vb. gibi farklı sonuçların ortaya çıkmasına neden olmaktadır [11]. Çalışmada, çarpılmanın parça kalitesi üzerindeki bozucu etkisini azaltmak ve optimum proses parametreleri ile parça kalitesini en üst seviyede tutmak için Taguchi tasarımı kullanılmıştır. Taguchi metodu prosesin, optimal parametre ayarlarını tayin etmek için çekici bir metottur ve sadece optimum parametrelerini belirlemekte değil, aynı zamanda genel olarak süreci anlamlandırmakta da önemli veriler sağlamak amacıyla kullanılan bir metottur.

5.5.1 Numerik Analiz Sonuçlarına Göre Taguchi Analizi

Çalışmada kullanılan Minitab 18, Taguchi tasarımının verilerini değerlendiren, görselleştiren ve analiz eden kullanışlı bir ticari istatistiksel yazılımdır. Deney tasarımının oluşturulmasında, BJ356MO hammaddesinin enjeksiyon kalıplama için önerilen proses parametre değerlerinden, Moldflow yazılımında BJ356MO malzemesinin reolojik özelliklerinden, simülasyon denemelerinden ve literatür taramasından elde edilen bilgilerden faydalanılmıştır. Özellikle kalıp yüzey sıcaklığı ve erime sıcaklığı seviyelerinin belirlenmesinde direk olarak BJ356MO malzemesinin üreticisi Borealis firması tarafından önerilen değerler seçilmiştir. Belirlenen faktörler ve seviyelerine istinaden, nihai olarak, parçanın geometrik kalitesi dolayısıyla çarpılma değerleri incelenmiştir. Öncelikli olarak ICM metodu için erime sıcaklığı

(°C), kalıp yüzey sıcaklığı (°C) ve sıkıştırma kuvveti (*ton*) ve sıkıştırma mesafesi (*mm*) kontrol parametreleri olarak belirlenmiş ve seviyeleri ile birlikte Tablo 5.4'te gösterilmiştir.

Tablo 5.4 Deney faktörleri ve seviyeleri (ICM)

Faktör	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3
Kalıp yüzey sıcaklığı (°C)	23	43	-
Erime sıcaklığı (°C)	220	240	260
Sıkıştırma kuvveti (ton)	20	24	30
Sıkıştırma mesafesi (mm)	1.75	1.5	1.15

Tablo 5.5'de IM prosesi için, proses faktörleri; erime sıcaklığı (°C) ve kalıp yüzey sıcaklığı (°C) ICM ile aynıken, tutma basıncı (*MPa*) ve enjeksiyon süresi (*s*) farklı faktörler olarak belirlenmiştir.

Tablo 5.5 Deney faktörleri ve seviyeleri (IM)

Faktör	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3
Kalıp yüzey sıcaklığı (°C)	23	43	-
Erime sıcaklığı (°C)	220	240	260
Tutma basıncı (MPa)	25	35	45
Enjeksiyon zamanı (s)	0.1	0.2	0.3

Hem IM hem de ICM için, optimum parametre değerlerinin belirlenmesinde *L18* ($2^1 \times 3^2$) ortogonal dizilimi kullanılarak deney tasarımı oluşturulmuştur, Tablo 5.6-5.7.

Tablo 5.6 L18 ortogonal dizilim (ICM)

Deney numarası	Kalıp yüzey sıcaklığı (°C)	Erime sıcaklığı (°C)	Sıkıştırma kuvveti (ton)	Sıkıştırma mesafesi (mm)
1	23	220	20	1.75
2	23	220	24	1.50
3	23	220	30	1.15
4	23	240	20	1.75
5	23	240	24	1.50
6	23	240	30	1.15
7	23	260	20	1.50
8	23	260	24	1.15
9	23	260	30	1.75
10	43	220	20	1.15
11	43	220	24	1.75
12	43	220	30	1.50
13	43	240	20	1.50
14	43	240	24	1.15
15	43	240	30	1.75
16	43	260	20	1.15
17	43	260	24	1.75
18	43	260	30	1.50

Tablo 5.7 L18 ortogonal dizilim (IM)

Deney numarası	Kalıp yüzey sıcaklığı (°C)	Erime sıcaklığı (°C)	Tutma basıncı (MPa)	Enjeksiyon zamanı (s)
1	23	220	25	0.1
2	23	220	35	0.2
3	23	220	45	0.3
4	23	240	25	0.1
5	23	240	35	0.2
6	23	240	45	0.3
7	23	260	25	0.2
8	23	260	35	0.3
9	23	260	45	0.1
10	43	220	25	0.3
11	43	220	35	0.1
12	43	220	45	0.2
13	43	240	25	0.2
14	43	240	35	0.3
15	43	240	45	0.1
16	43	260	25	0.3
17	43	260	35	0.1
18	43	260	45	0.2

S/N oranı değerlendirilirken «en küçük-en iyi» formülü kullanılmış, elde edilen değerler Tablo 5.8 ve Tablo 5.9'da sırasıyla ICM ve IM için gösterilmiştir. Analizde, bir sinyal-gürültü (S / N) oranı, gürültüden dolayı sinyaldeki varyasyonun gücüne bölünen bir yanıt sinyalinin gücünü temsil eden istatistiksel miktardır [25]. S / N oranının maksimize edilmesi, gürültüye duyarlı herhangi bir özelliğin minimize edilmesine yol açar.

$$\frac{S}{N} = -10 \log \left[\left(\frac{1}{n} \right) \frac{\sum_{i=1}^n y_i^2}{n} \right] \quad (5.1)$$

Burada y_i , i_{th} deneyde gözlemlenen verilerdir ve n deneyin gözlem sayısıdır.

Tablo 5.8 Çarpılma deney sonuçları ve S/N oranı değerleri (ICM)

Kalıp yüzey sıcaklığı (°C)	Erime sıcaklığı (°C)	Sıkıştırma kuvveti (ton)	Sıkıştırma mesafesi (mm)	Çarpılma (mm)	SNRA1
23	220	20	1.75	0.45	6.897
23	220	24	1.5	0.38	8.336
23	220	30	1.15	0.43	7.330
23	240	20	1.75	0.45	6.874
23	240	24	1.5	0.45	6.999
23	240	30	1.15	0.47	6.545
23	260	20	1.5	0.46	6.790
23	260	24	1.15	0.45	6.953
23	260	30	1.75	0.47	6.576
43	220	20	1.15	0.45	6.924
43	220	24	1.75	0.46	6.724
43	220	30	1.5	0.46	6.724
43	240	20	1.5	0.46	6.824
43	240	24	1.15	0.45	6.926
43	240	30	1.75	0.53	5.544
43	260	20	1.15	0.46	6.830
43	260	24	1.75	0.46	6.662
43	260	30	1.5	0.5	5.984

Tablo 5.9 Çarpılma deney sonuçları ve S/N oranı değerleri (IM)

Kalıp yüzey sıcaklığı (°C)	Erime sıcaklığı (°C)	Tutma basıncı (MPa)	Enjeksiyon zamanı (s)	Çarpılma (mm)	SNRA1
23	220	25	0.1	0.498	6.055
23	220	35	0.3	0.743	2.580
23	220	45	0.6	0.4	7.958
23	240	25	0.1	1.096	-0.796
23	240	35	0.3	0.998	0.017
23	240	45	0.6	0.775	2.213
23	260	25	0.3	1.12	-0.984
23	260	35	0.6	1.1	-0.827
23	260	45	0.1	1.3	-2.278
43	220	25	0.6	0.504	5.951
43	220	35	0.1	0.686	3.273
43	220	45	0.3	0.748	2.521
43	240	25	0.3	0.895	0.963
43	240	35	0.6	0.915	0.771
43	240	45	0.1	1.09	-0.748
43	260	25	0.6	1.18	-1.437
43	260	35	0.1	1.26	-2.007
43	260	45	0.3	1.13	-1.061

5.5.2 Proses Faktörlerinin Etkileri

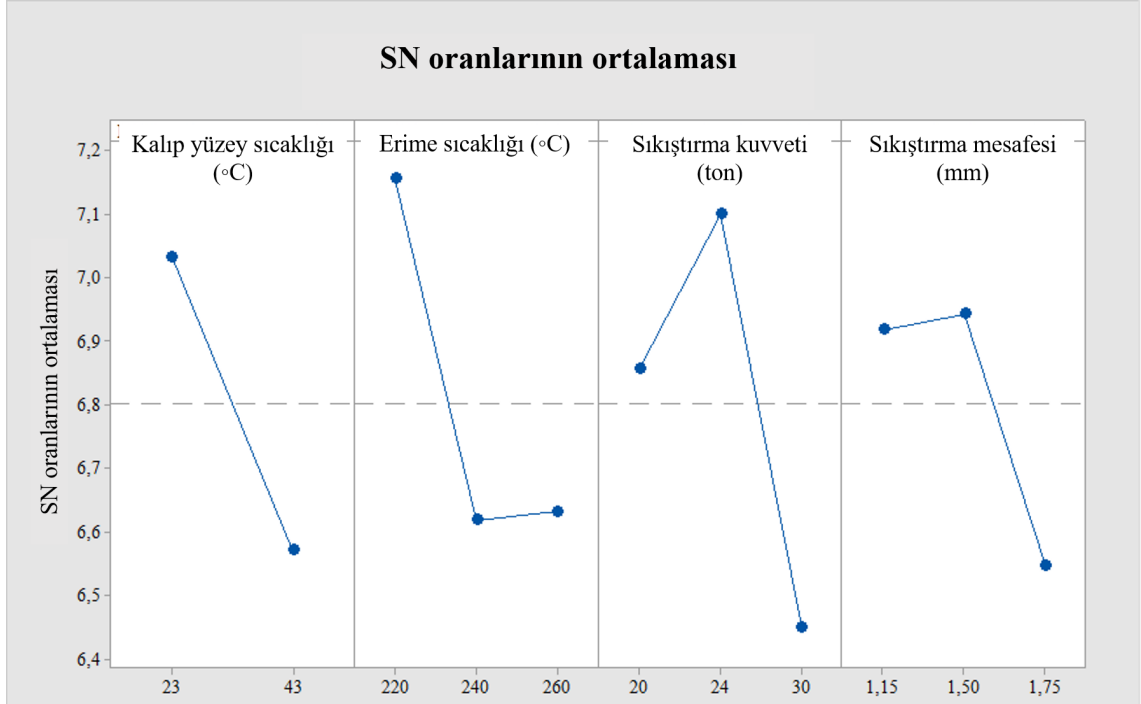
5.5.2.1 Enjeksiyon Sıkıştırılmalı Kalıplama (ICM)

Her kontrol faktörünün çarpılma üzerindeki etkisinin analizi S/N yanıt tablosu ile Tablo 5.10'da gösterilmiştir. Taguchi tekniği kullanılarak yapılan bu tablo, optimum çarpılma değerleri için optimal kontrol faktörü seviyelerini göstermektedir. Tablo 5.10'da verilen çarpılma için kontrol faktörlerinin seviye değerleri ile oluşturulan Şekil 5.26, çarpılmayı en aza indirmek için kullanılabilecek kontrol faktörlerinin optimum işleme parametrelerini gösterir.

Her kontrol faktörü için en iyi seviye, kontrol faktörü seviyelerinde en yüksek S / N oranına göre bulunur. Buna göre en iyi çarpılma değerini veren faktörlerin düzeyleri ve S / N oranları, faktör A (Seviye 1, S / N = 7.034), B faktörü (Seviye 1, S / N = 7.156), C faktörü (Seviye 2, S / N = 7.1) ve D faktörü (Seviye 2, S / N = 6.943) olarak belirlenmiştir. Diğer bir deyişle, 23 °C kalıp yüzey sıcaklığı 220 °C erime sıcaklığı, 24 ton sıkıştırma kuvveti ve 1.5 mm sıkıştırma mesafesi olarak belirlenen optimum parametreler ile parça üzerindeki en küçük değerdeki çarpılma değeri elde edilmiştir.

Tablo 5.10 ICM için S / N yanıt tablosu

Seviye	Kalıp yüzey sıcaklığı (°C)	Erime sıcaklığı (°C)	Sıkıştırma kuvveti (ton)	Sıkıştırma mesafesi (mm)
1	7.034	7.156	6.857	6.546
2	6.572	6.619	7.100	6.943
3		6.633	6.451	6.918
Delta	0.462	0.537	0.649	0.397
Rank	3	2	1	4

**Şekil 5.26** Proses parametrelerinin çarpılma için ortalama S / N oranı üzerine etkisi

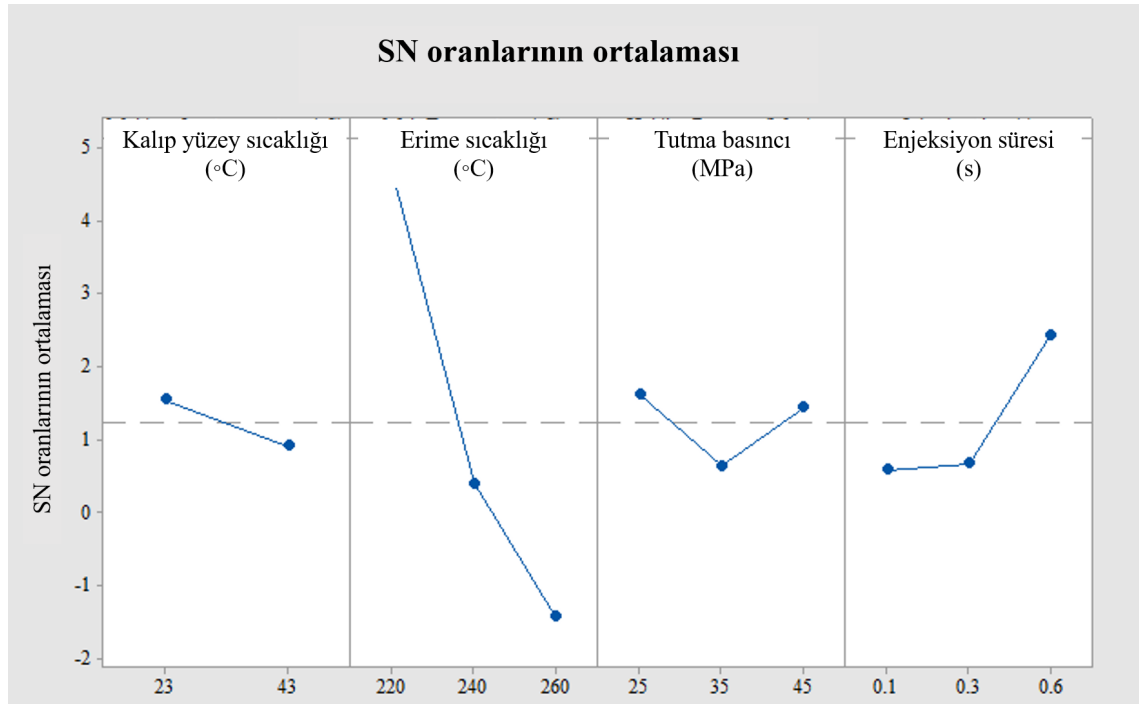
5.5.2.2 IM

Tablo 5.11’de her kontrol faktörü için en iyi seviye, kontrol faktörü seviyelerinde en yüksek S / N oranına göre bulunmuştur. Buna göre en iyi çarpılma değerini veren faktörlerin düzeyleri ve S / N oranları, faktör A (Seviye 1, S / N = 1.5487), B faktörü (Seviye 1, S / N = 4.7236), C faktörü (Seviye 1, S / N = 1.6254), D faktörü (Seviye 3, S / N = 2.4384) olarak belirlenmiştir. Diğer bir deyişle, optimum parametre değerleri; 23 °C kalıp yüzey sıcaklığı, 220 °C erime sıcaklığı, 25 MPa tutma basıncı ve 0.6 s enjeksiyon zamanı ile minimum bir çarpılma değeri elde edilmiştir.

Tablo 5.11 IM için S / N yanıt tablosu

Seviye	Kalıp yüzey sıcaklığı (°C)	Erime sıcaklığı (°C)	Tutma basıncı (MPa)	Enjeksiyon zamanı (s)
1	1.5487	4.7236	1.6254	0.583
2	0.9141	0.4036	0.6346	0.6729
3		-1.433	1.4343	2.4384
Delta	0.6346	6.1565	0.9908	1.8554
Rank	4	1	3	2

Şekil 5.27, IM metodu uygulandığında çarpılmayı en aza indirmek için kullanılabilecek kontrol faktörlerinin optimum işlem parametrelerini göstermektedir.

**Şekil 5.27** Proses parametrelerinin çarpılma için ortalama S / N oranı üzerine etkisi

Her bir kontrol faktörünün çarpılma üzerindeki katkısını analiz etmek için ANOVA yöntemi kullanılmıştır. ANOVA'daki kontrol faktörlerinin önemi, her kontrol faktörünün *P* değerleri (daha büyük değer) veya katkı yüzdesi karşılaştırılarak belirlenir. Toplam serbestlik derecesi (DF), verilerdeki bilgi miktarıdır ve analiz, bilinmeyen popülasyon parametrelerinin değerlerini hesaplamak için bu bilgileri kullanmaktadır. Ardışık karelerin toplamı (Seq SS), modelin farklı bileşenleri için varyasyon ölçüleridir. Ayarlanmış karelerin toplamlarından farklı olarak, karelerin ardışık toplamı, terimlerin modele girilme sırasına bağlıdır. Düzeltilmiş karelerin toplamı (Adj SS), modelin farklı bileşenleri için varyasyon ölçüleridir. Düzeltilmiş ortalama kareler (Adj MS), bir terimin veya modelin ne kadar varyasyonu açıkladığını ölçer ve Minitab, bir terimin *P* değerini hesaplamak için ayarlanmış karelerin

toplamlarını kullanır. P değeri için % 0.05 kritik bir değerdir ve bu değerden daha küçük faktörler en en fazla katkıyı yapmaktadırlar.

Tablo 5.12'nin dördüncü sütunu, ICM sürecindeki her bir parametre katkısı hakkında bilgi verir. ANOVA tablosundan görüldüğü gibi, sıkıştırma kuvveti (% 26.19) en önemli ICM parametresidir. İkinci etkili faktör ise, % 21.26 katkı ile erime sıcaklığı ve ardından kalıp yüzey sıcaklığı % 18.84 ve % 11.72 ile sıkıştırma mesafesi ICM sürecini etkileyen en düşük faktördür. Burada hata yüzdesi % 22 olarak bulunmuştur.

Tablo 5.12 Parçanın çarpılma değerleri için ANOVA sonuçları (ICM)

Parametre	DF	Seq SS	Katkı	Adj SS	Adj MS	F-değeri	P-değeri
Kalıp yüzey sıcaklığı (°C)	1	0,0026	18,84%	0,0026	0,0026	8,57	0,015
Erime sıcaklığı (°C)	2	0,0029	21,26%	0,0029	0,0014	4,83	0,034
Sıkıştırma kuvveti (ton)	2	0,00366	26,19%	0,003	0,0018	5,95	0,020
Sıkıştırma mesafesi (mm)	2	0,00164	11,72%	0,0016	0,0008	2,66	0,118
Hata	10	0,003	22,00%	0,0030	0,0003		
Toplam	17	0,014	100%				-

Tablo 5.13, dört farklı parametrenin, IM ile üretilmiş parçanın çarpılma değerlerine nasıl katkıda bulunduğunu göstermektedir. Eriyik sıcaklığı % 78.06 katkı ile en etkili faktör olarak bulunmuştur. Enjeksiyon süresi % 8.55 katkı ile ergime sıcaklığından sonra en etkili parametre iken, kalıp yüzey sıcaklığı % 1.18 katkı ile en düşük etkiye sahiptir.

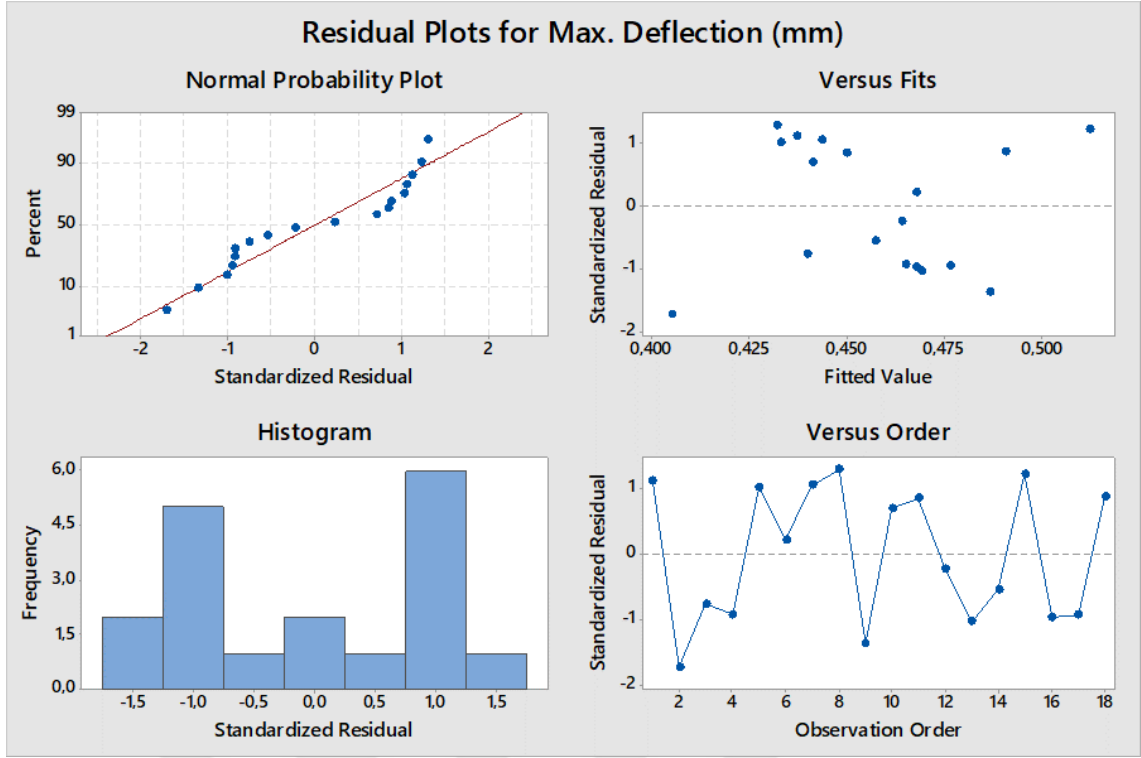
Tablo 5.13 Parçanın çarpılma değerleri için ANOVA sonuçları (IM)

Parametre	DF	Seq SS	Katkı	Adj SS	Adj MS	F-değeri	P-değeri
Kalıp yüzey sıcaklığı (°C)	1	1.812	1.18%	1.812	1.812	1.18	0.304
Erime sıcaklığı (°C)	2	119.875	78.06%	119.875	59.937	38.86	0.000
Tutma basıncı (MPa)	2	3.315	2.16%	3.315	1.658	1.07	0.378
Enjeksiyon zamanı (s)	2	13.135	8.55%	13.135	6.568	4.26	0.046
Hata	10	15.422	10.04%	15.422	1.542		
Toplam	17	153.560	100.00%				

ANOVA analizinden elde edilen $R - sq$ değeri, modelin yanıt verilerinin tüm değişkenliğini nasıl açıkladığını ve veri noktalarının uygun regresyon çizgisine ne kadar yakın olduğunu gösterir. % 0 ila % 100 aralığında tanımlanan $R - sq$ 'nin ideal olarak % 100'e yakın olması beklenir, yani tüm veriler regresyon çizgisinde ve tahmin edilebilir olmalıdır. Çalışmada kullanılan modeldeki maksimum sapma ile faktörler arasındaki ilişki, regresyon denklemi ile açıklanmıştır ve korelasyon katsayısı $R - sq$ % 78 olarak bulunmuştur. Diğer bir deyişle, model değişkenliğin % 78'ini açıklamaktadır. Maksimum çarpılma, regresyon denklemi Denklem(5.2) kullanılarak hesaplanmaktadır.

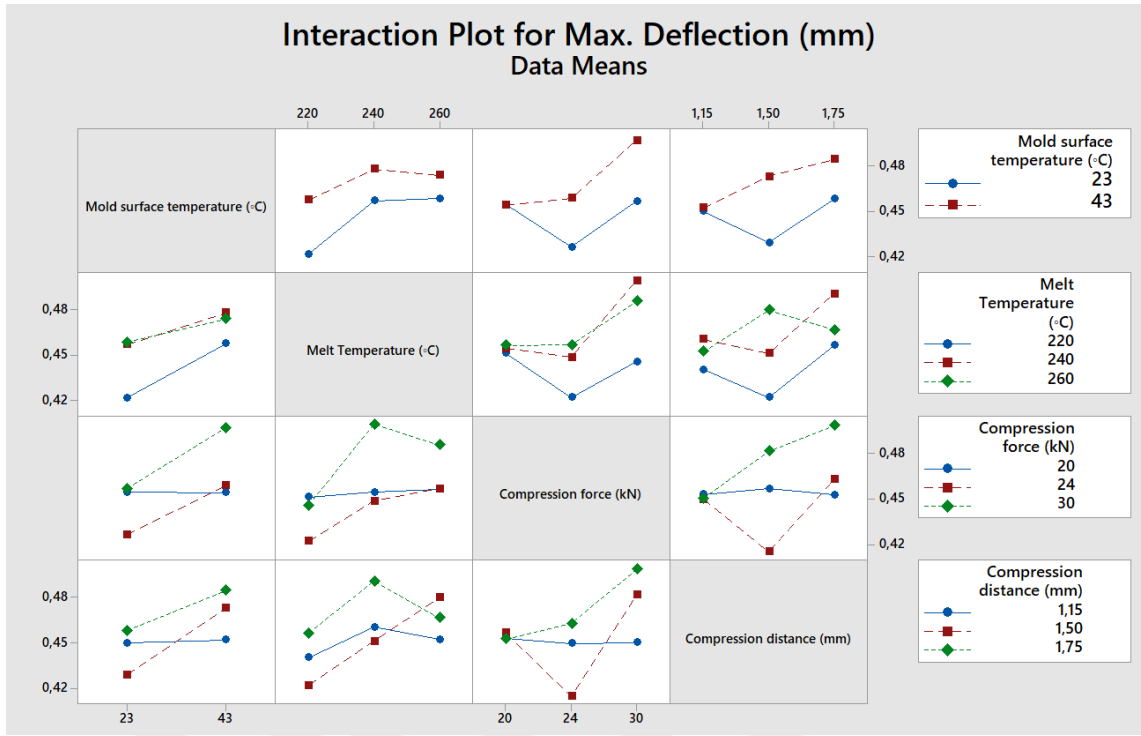
$$\begin{aligned} \text{Max. Çarpılma(mm)} = & 0.45781 - 0.01211(\text{Kalıp Yüzey Sıcaklığı}(23^{\circ}\text{C})) + \\ & 0.01211(\text{Kalıp Yüzey Sıcaklığı}(43^{\circ}\text{C})) - 0.01818(\text{Erime Sıcaklığı}(220^{\circ}\text{C})) + \\ & 0.00971(\text{Erime Sıcaklığı}(240^{\circ}\text{C})) + 0.00847(\text{Erime Sıcaklığı}(260^{\circ}\text{C})) - \\ & 0.00369(\text{Sıkıştırma Kuvveti}(20\text{ton})) - 0.01534(\text{Sıkıştırma Kuvveti}(24\text{ton})) + \\ & 0.01904(\text{Sıkıştırma Kuvveti}(30\text{ton})) + 0.01351(\text{Sıkıştırma Mesafesi}(1.75\text{mm})) - \\ & 0.00676(\text{Sıkıştırma Mesafesi}(1.5\text{mm})) - 0.00674(\text{Sıkıştırma Mesafesi}(1.15\text{mm})) \end{aligned} \quad (5.2)$$

Kurulan modelin doğruluğunu, yani gerçeğe yakınlığını belirlemek için farklı grafiksel araçlardan faydalanılır. Bu grafikler uygun optimizasyon değerlerinin elde edilmesinde önemli bir araç olarak kullanılmaktadır. Grafiksel araçlarla modelin doğrulanması için Şekil 5.28'deki kalıntı grafiklerinden yararlanılmıştır. Kalıntı grafikleri aracılığıyla gerçek sistem ile kurulan model arasındaki farklar ortaya çıkarılır.



Şekil 5.28 Maksimum çarpılma için kalıntı gerilmeleri

Şekil 5.29’da, her bloğa karşılık gelen satır ve sütun faktörleri arasındaki etkileşimleri temsil eden etkileşim grafiği gösterilmiştir. İki paralel çizgi, bu iki faktör arasında etkileşim olmadığını gösterirken, çapraz çizgiler etkileşimleri temsil eder. Çizgiler ne kadar paralel değilse, etkileşimin gücü o kadar büyük olur. Şekil 5.29’daki etkileşim grafiğinde erime sıcaklığı ve kalıp yüzey sıcaklığı çizgileri paralel değildir. Erime sıcaklığı ve kalıp yüzey sıcaklığı arasında etkileşim olmadığı görülürken, diğer tüm faktörler arasında bir etkileşimin önemli olduğu görülebilmektedir. Etkileşimlerin faktörler ve yanıt arasındaki ilişkiyi nasıl etkilediğini anlamak için bir örnekle inceleme yapılabilir. Etkileşim etkisi, örneğin grafikte, sıkıştırma kuvvetinin 24 *ton*, erime sıcaklığının 240 °C olduğu durumda, düşük çarpılma değeri ile ilişkilendirilirken, sıkıştırma kuvvetinin 30 *ton*, erime sıcaklığının 240 °C olduğu durumda en yüksek çarpılma değeri ile ilişkilendirilmektedir.



Şekil 5.29 Proses faktörlerinin etkileşim grafiği

6.1 Malzeme ve Deneysel Kurulum

Deneysel çalışmada tüm ICM sürecini gözlemlemenin zorlukları olduğundan, doğru bir sayısal analizden faydalanılarak prosesin tümü hakkında fikir edinilmeye çalışılmıştır. Ancak sayısal analiz ve optimizasyon çalışmalarının deneysel sonuçlarla karşılaştırılması ve proses boyunca kullanılan parametrelerin etkilerinin deneysel olarak kanıtlanması gerekmektedir. Her ne kadar kısıtlı deneysel olanaklar ve makine limitlerinden kaynaklı istenilen sayıda deneysel çalışma yapılamasa da ICM metodu ile gerçekleştirilen kısmi deneysel çalışmalardan, önemli sonuçlar elde edilmiştir. Simülasyon sonuçlarının, kısıtlı deneysel sonuçlarla karşılaştırılması yöntemin ve uygulanan parametrelerin, kalıp özelliklerinin değerlendirilmesine olanak sağlamıştır.

Çarpılma, polimerik parçanın geometrik doğruluğunu ve kalitesini etkileyen en temel faktör olduğu için bu çalışmanın birincil konusu olarak incelenmiştir. Ayrıca parçanın fonksiyonel bir özelliği olarak, basmaya karşı gösterdiği tepki kuvvetlerini incelemek amacıyla basma deneyi uygulanmıştır. Böylece parçanın hangi yükler altında deformasyona uğradığı belirlenerek, parçanın pratik hayattaki kullanımında (paketleme endüstrisinde) istenilen özellikleri karşılayıp karşılamayacağı konusunda veri elde edilmiştir.

Deneysel çalışmalarda, makina parametrelerinden; sıkıştırma kuvveti ve sıkıştırma mesafesinin parametrik olarak birbirine bağlı olması, deney tasarımı oluşumunda kısıtlamaya neden olduğu için, simülasyon çalışmalarında kullanılan deney tasarımlarından sadece altı adedi uygulanabilmiştir. Proses parametrelerinin uygulanmasındaki kalıplama makinesi sınırlamaları, 12 deney tasarımı bilgisinin eksik olmasına neden olmasına rağmen, elde edilen verilerle gerçekleştirebilecek korelasyon çalışması, deneysel sonuçlarla ilgili önemli bilgilerin elde edilmesini sağlamıştır. Ayrıca nümerik analizde elde edilen diğer 12 simülasyona ait çarpılma değerlerinin, birbirine ve kalan 6 deney tasarım sonuçlarına oldukça benzer olması, deneysel çalışmalardaki verilerin önemini arttırmıştır.



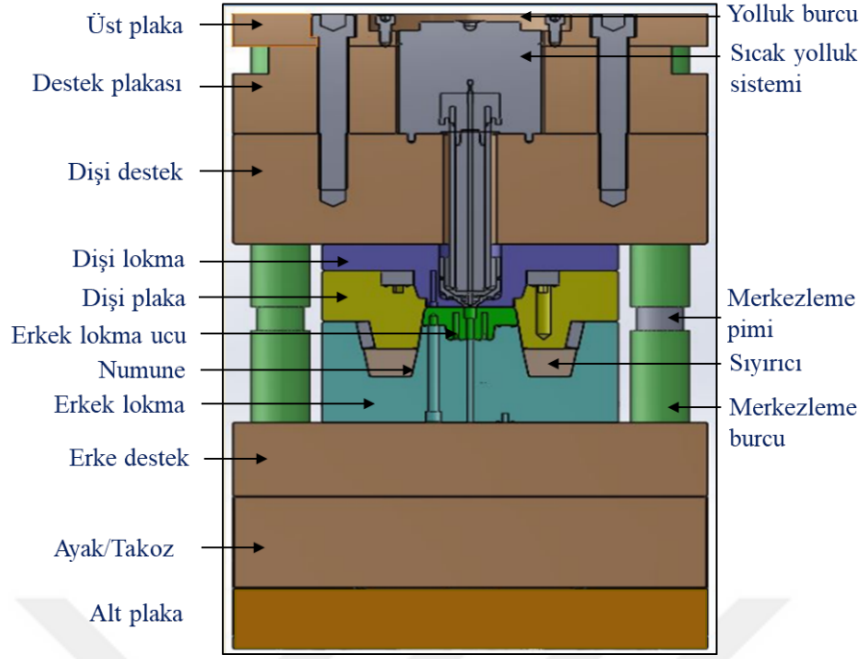
Şekil 6.1 Enjeksiyon kalıplama makinesi

Çalışmada kullanılan Toyo markasının Si-450-6S modeli enjeksiyon makinesinin (Şekil 6.1) özellikleri Tablo 6.1’de listelenmiştir.

Tablo 6.1 Si-450-6S JH750D (2015 Model) enjeksiyon makinası

Enjeksiyon	Vida çapı (mm)	68
	Enjeksiyon hızı (cm ³ /s)	1090
	Maks. Enjeksiyon hızı (mm/s)	300
	Maks. Enjeksiyon basıncı (MPa)	166.6
	Maks. Enjeksiyon tutma basıncı (MPa)	147
Kenetlenme	Kenetlenme kuvveti (kN)	4410
	Kenetlenme stroku (mm)	800
	Min. Kalıp yüksekliği (mm)	350
	Maks. Kalıp yüksekliği (mm)	900
	Ejektör kuvveti (kN)	98

Deneyisel çalışma için seçilen plastik malzeme, simülasyon çalışmalarında olduğu gibi, gıda ambalaj endüstrisi için yaygın olarak kullanılan BJ356MO kodlu PP plastiktir. Sadece ICM süreci ile uyumlu prototip kalıbı, ICM için özel olarak tasarlanmıştır. Çalışmada, tek gözlü ICM kalıbı kullanılmıştır ve kalıp sadece ICM prosesinin gerçekleştirilmesi amacıyla tasarlanmıştır. Sıkıştırılmalı enjeksiyon kalıplama makinasının kalıbında, sabit plaka üzerine monte edilen kalıp yarısı dişi kalıp olarak adlandırılırken, kalıbın hareketli kısmının bulunduğu kalıp yarısı erkek kalıp olarak isimlendirilir. Makinanın enjeksiyon ünitesinin kalıbın dişi yarısında olması nedeniyle, besleme sistemi dişi kalıp yarısına monte edilmiştir. Kalıp malzemesi olarak X 38 CrMoV 51 sıcak iş takım çeliği kullanılmıştır. Kalıbın patentlendirme aşamasında olması ve Üstün Plastik A.Ş’nin belirlediği şirket bilgi gizliliği kuralları nedeniyle, kalıpla ilgili, detaylı bilgi ve fotoğraflar teze eklenmemiştir. Bu nedenle, Şekil 6.2’de kalıpla ilgili detaylar, taslak çizim olarak verilmiştir.

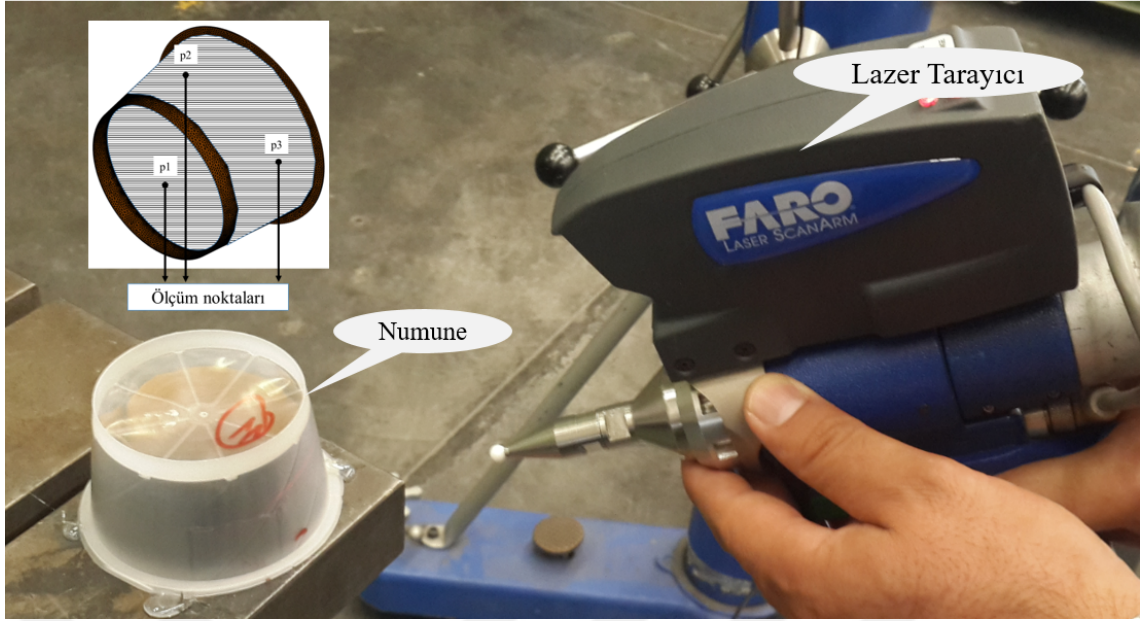


Şekil 6.2 ICM Kalıp Elemanları

Kalıp üzerindeki elemanlardan biri olan sıyırma halkası, parçayı iterek erkek kalıptan dışarı atar ve parçanın, kalıptan daha dengeli şekilde çıkarılmasını sağlar. Bir diğer kalıp elmanı, sıyrıcı plaka boyutları büyük olduğundan itici plakasına salınım yapmayacak şekilde dengeli bağlanmıştır. Valve-gate sıcak yolluk sistemi, elektrikle ısıtılan yolluklar vasıtasıyla, basınç kaybı olmadan, sıcak eriyiğin kontrollü bir şekilde kalıp boşluğuna iletmesi amacıyla kullanılırken, IM yönteminde paketlenme aşaması sırasında, eriyik donmadan enjeksiyon girişinin kapatılmasını sağlar. Her ne kadar sıkıştırma aşaması, enjeksiyon aşamasından sonra kapının mühürlenerek kapanması ve enjeksiyonun sona ermesi nedeniyle sıcak yolluk sistemine ihtiyaç azalsa da kalıp tasarımında sıcak yolluk sistemi kullanılmaya devam edilmiştir.

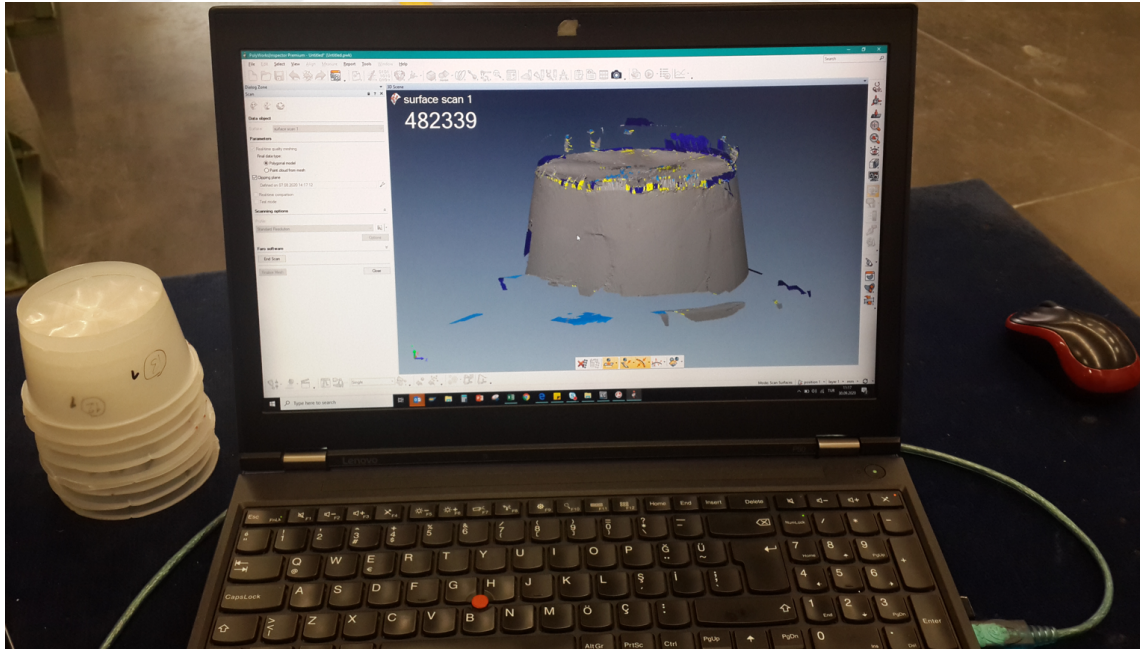
6.1.1 Sayısal ve Deneysel Sonuçlar için Çarpılma Değerlerinin Karşılaştırılması

Deney numunesinde, kalıplama sonrası ortaya çıkan çarpılma değerlerini ölçmek için Şekil 6.3'deki 3D lazer tarayıcı FARO sisteminden faydalanılmıştır. FARO, kalite kontrol için ideal, 8 Eksenli tarama kolu ile gelişmiş bir 3D tarama teknolojisidir. 3D lazer tarayıcı FARO sistemi, CAD çizimi ile deneysel numunenin, nokta bulutu yöntemiyle karşılaştırılması için mükemmel bir çözüm sunmaktadır. Parça yüzeyindeki yansımanın bozucu etkisinden dolayı, ölçüm için sadece yan duvar (p2 ve p3) ve alt taban (p1) bölgeleri dikkate alınmıştır.



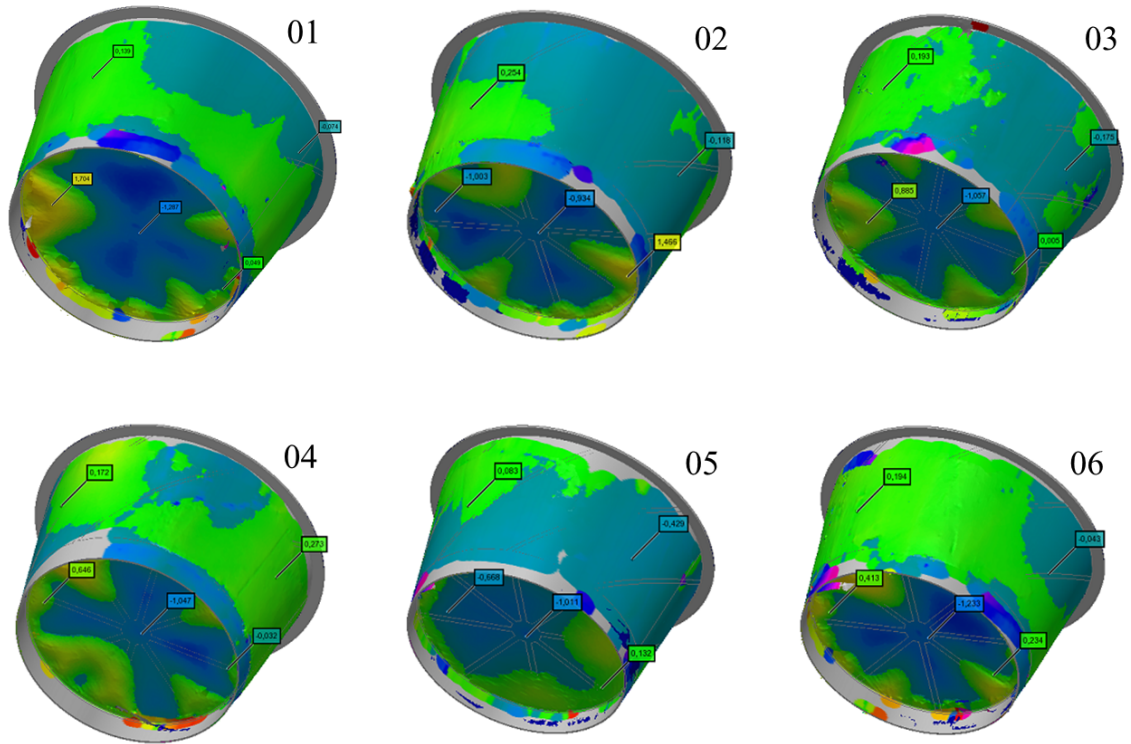
Şekil 6.3 FARO 3D tarama teknolojisi ve numune

Tarayıcı ile ölçülen uzay geometrisindeki noktalar bir bulut oluşturarak parçanın geometrisinin 3D çizim olarak elde edilmesini sağlar. Şekil 6.4'te FARO sistemi aracılığıyla oluşturulmaya başlanan numunenin geometrisi için kullanılan yazılımın ara yüzü görülmektedir.



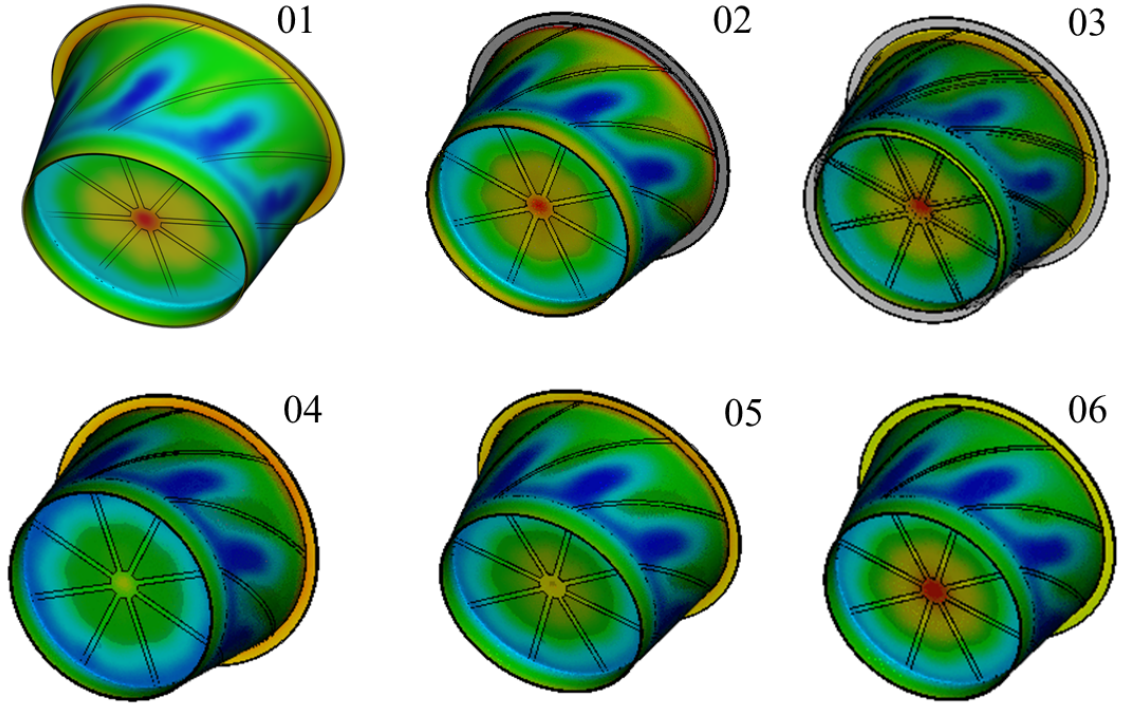
Şekil 6.4 FARO 3D tarama teknolojisinde kullanılan yazılım ve oluşturulan 3D parça geometrisi

Moldflow yazılımındaki nümerik simülasyonlardan elde edilen çarpılma dağılımı ile deneysel sonuçlardan elde edilen değerler milimetre cinsinden karşılaştırılmıştır. Deney tasarımında belirlenen 1-2-3-4-5-6 numaralı deneyler için parça üzerindeki çarpılma sonuçları Şekil 6.5'te görselleştirilmiştir. Deneysel çalışmada, parçanın sabitlendiği ve yansımaların olduğu bölgeler gri alanlar olarak görülmektedir ve bu alanlardan ölçüm alınamamıştır. Buna göre, numunenin deneysel çalışma sonuçlarının, özellikle numunenin yan duvarındaki sapmanın, nümerik analiz sonuçları ile oldukça benzer olduğu gözlemlenirken, taban bölgesinde farklılıklar tespit edilmiştir.



Şekil 6.5 Deney 1-2-3-4-5-6 için deneysel sonuçlar

Şekil 6.6'da parçanın yan duvarlarında, her iki durumda da benzer bölgelerde içe ve dışa doğru çarpılmalar görülmektedir. Çarpılma, enjeksiyon noktasından numunenin dış çapına doğru azalır. Bununla birlikte, deneysel olarak kalıplanan parçanın çarpılma değeri büyüktür, ancak enjeksiyon noktasından uzak konumlarda negatif yönde daha yüksek çarpılma değerine sahip olduğu görülmüştür.

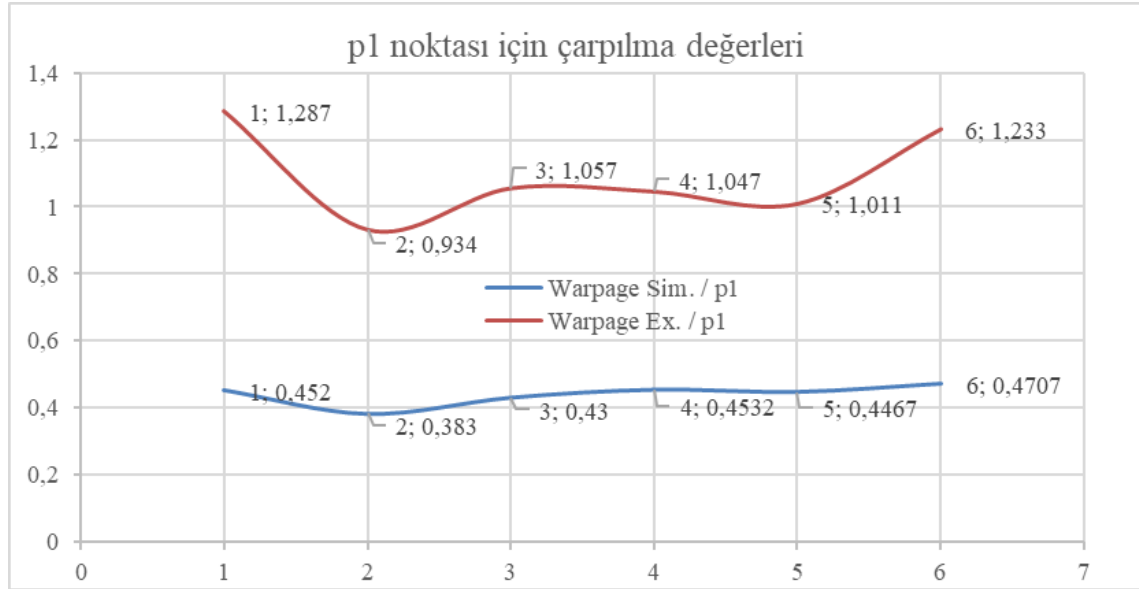


Şekil 6.6 Nümerik analizde ortaya çıkan çarpılma sonuçları

Deneysel çalışma sonuçlarına göre, enjeksiyon noktasındaki ortalama olarak çarpılma değerleri 0.5 mm 'den küçükken, diğer noktalarda çarpılma değerleri minimum 0.8 mm ve maksimum 1.7 mm olarak belirlenmiştir. Sayısal simülasyonda ise enjeksiyon noktalarında ortalama 0.4 mm çarpılma değerleri gözlemlenirken, diğer noktalarda maksimum 0.4 mm 'lik değerler gözlemlenmiştir. Çarpılma değerlerinin özellikle p2 ve p3 noktalarında, yani yan duvarlarda tahmin edilebileceği kanıtlanırken, p1 bölgesinin, diğer bir deyişle taban bölgesinin deneysel sonuçlarının, sayısal analize kıyasla daha yüksek değerlerde olduğu tespit edilmiştir. Buna göre, sayısal ve deneysel sonuçlar arasında, yan duvar ölçüm noktalarında iyi bir uyum olduğu belirlenirken, numunenin tabanında daha fazla çarpılma değerlerine sahip olduğu gözlemlenmiştir.

p1 noktasında çarpılma değerlerinin yüksek çıkması nedeniyle bu nokta Şekil 6.7'de detaylı incelenmiştir. Şekilde x ekseni deney tasarımı sayısını ifade ederken, y ekseni deney tasarımıyla ortaya çıkan çarpılma değerini göstermektedir. Buna göre deneysel çalışmayla elde edilen tüm değerler, her bir deney tasarımı için simülasyon deney tasarımlarından daha büyük çıkmıştır. 1. deney tasarımı ve 6. deney tasarımında fark en yüksek değerine çıkarak 0.8 mm 'yi bulmuştur. Ancak, genel olarak deney tasarımında her iki yöntemle elde edilen değerlerin davranışı grafikte benzer çıkmıştır. Deneysel çalışmada, deney tasarımı 1'de en yüksek değerine ulaşan çarpılma değeri, 2.deney tasarımı ile azalmış, sonrasında dalgalı bir şekilde değerlerde artma ve azalma devam etmiştir. Simülasyon çalışmasında da aynı davranış gözlemlenmiştir. Benzer

davranış sonuçları deneysel çalışmadaki değerlerin yüksek çıkmasına rağmen, kabul edilebilir sonuçların elde edildiğini ispatlamıştır. Genel olarak deneysel çalışmalarda çarpılma değeri ortalamama 1.1 mm , simülasyon çalışmaları için ortalama değer 0.44 mm olarak tespit edilmiştir. Buna göre deneysel çalışma değerlerindeki çarpılma değerlerinin, simülasyon sonuçlarından 0.65 mm daha büyük değerlere sahip olduğu belirlenmiştir.

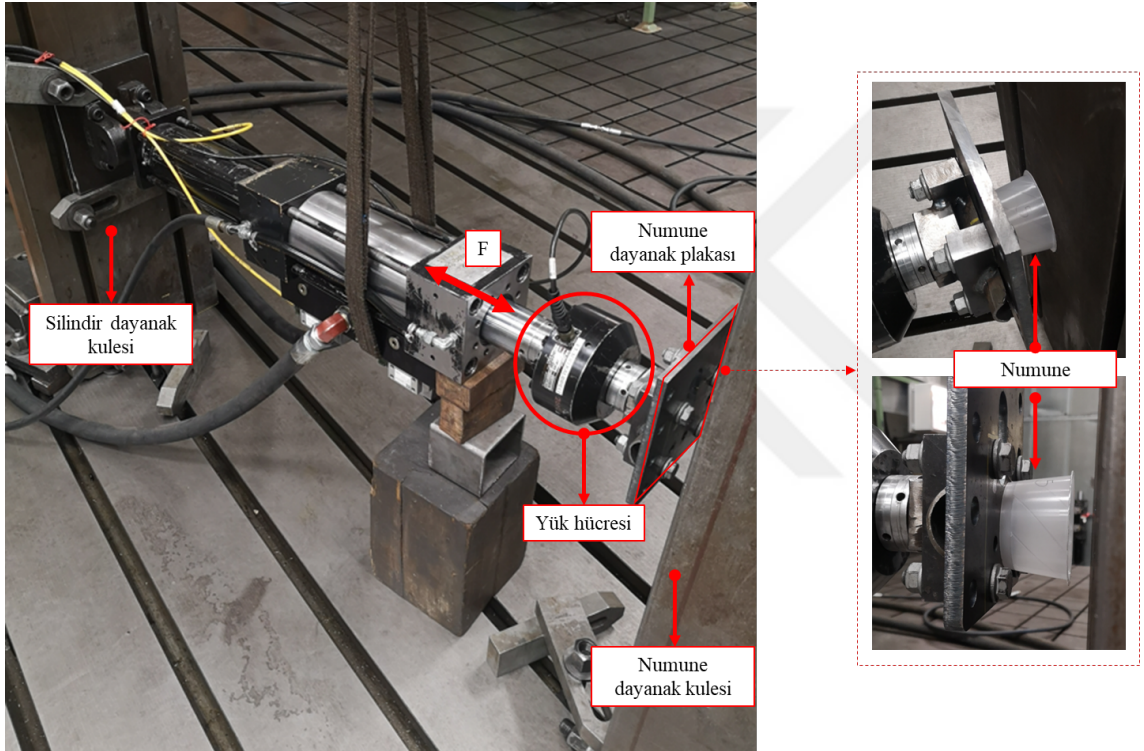


Şekil 6.7 Deneysel ve simülasyon çalışmaları için p1 noktasındaki çarpılma değerlerinin karşılaştırılması

ICM ile üretilen parçaların boyutsal doğruluğunun kanıtlanmasının yanı sıra yan duvar ve taban bölgelerinde elde edilen kalınlık değerleri de belirlenmiştir. Bu nedenle p1, p2 ve p3 noktalarından yapılan ölçümlerde, deneysel çalışmalardan elde edilen örneklerin kalınlık değerleri ölçülmüştür. Teknik resimde, aynı noktaların kalınlık değerleri 0.3 mm verilmiştir. Ölçümden elde edilen ortalama kalınlıklar ise, p1 için 0.265 mm ve p2-p3 için 0.305 mm olarak tespit edilmiştir. p2 ve p3 noktalarının kalınlığı teknik resim ile uyumlu iken, p1 noktası 0.035 mm farka sahiptir. 0.035 mm 'lik fark ihmal edilebilir olarak kabul edilebilmesine rağmen, parça kalınlığındaki ölçüm sonuçları, tabanda görülen çarpılma değerlerindeki farkların açıklanmasına yardımcı olacaktır. Çünkü parça tasarımında kalınlık değişiminin olduğu bölgeler, boyutsal hassasiyetin azalarak deformasyonların olduğu riskli bölgeler olarak ortaya çıkmıştır. Buna istinaden, taban merkezinin ince ve tabanın yan duvarla birleştiği bölgelerin daha büyük et kalınlığına sahip olması, numunenin çarpılmasındaki bir başka sebep olarak verilebilir.

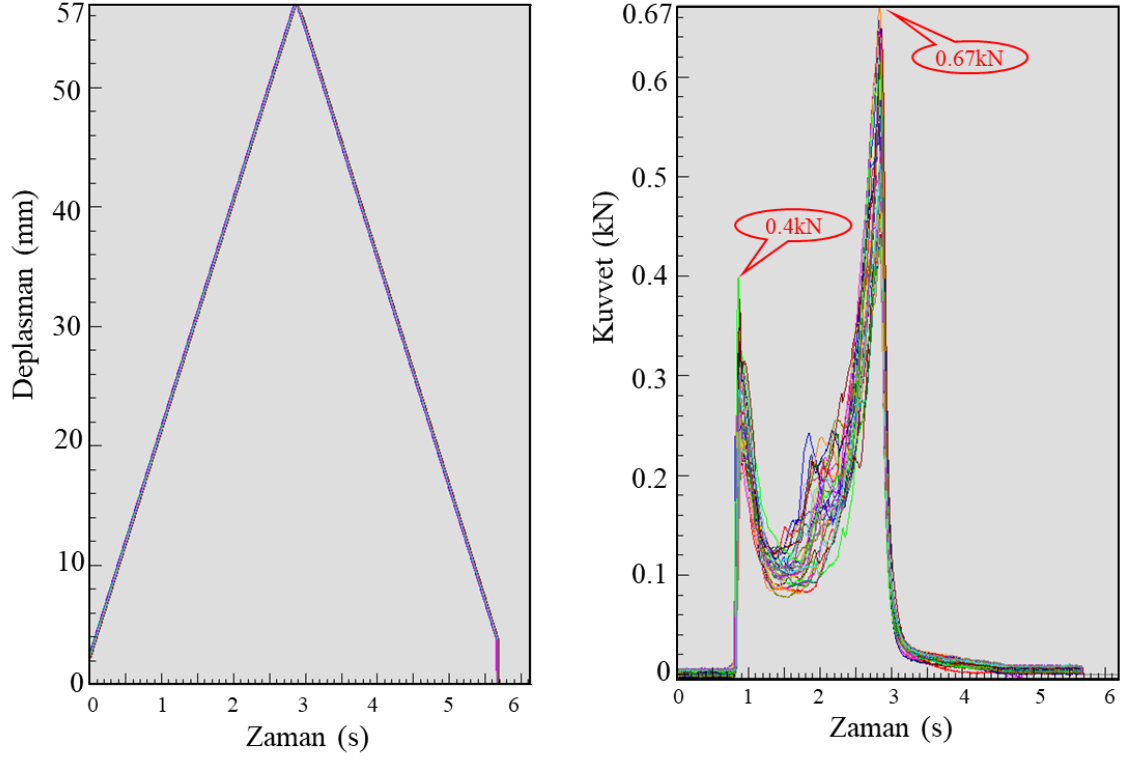
6.1.2 Basma Deneyleri ve Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Altı farklı deney tasarımı ile üretilen parçaların mekanik özellikleri basma deneyi ile değerlendirilmiştir. Basma deneyinin gerçekleştirilebilmesi için laboratuvar koşullarında, bir adet MTS marka servo hidrolik silindir, bağlama aparatları, karşı yükün uygulanacağı çelik kule (dayanak plakası), hidrolik silindir kontrolcüsü ve data toplama cihazından faydalanılmıştır. Şekil 6.8’de deney düzeneğinin genel görünüşü açıklanmıştır. Buna göre 10 ton’luk servo hidrolik silindir, deplasman (mm) bazlı hareketi ile ileri doğru hareket edip parçaya basma kuvveti uygularken, silindir üzerindeki yük hücresi ile uygulanan kuvvet değeri zamana bağlı olarak kaydedilmiştir.



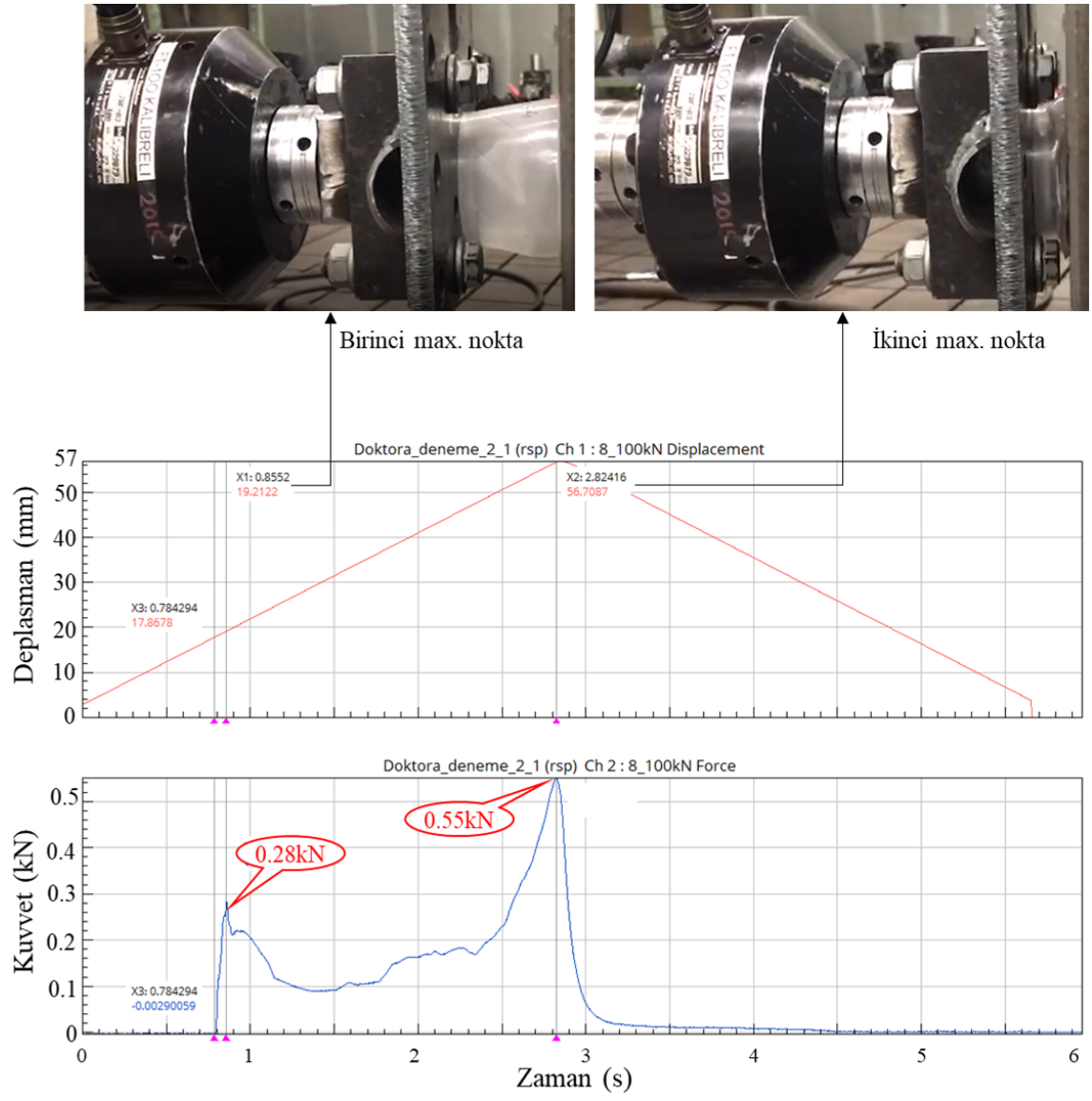
Şekil 6.8 Basma deney düzeneği

Deney hassasiyetinin artırılması amacıyla her bir numune tipinden 5’er adet seçilmiştir. Deney numuneleri 39 mm’lik bir mesafede sıkıştırılarak, numuneden yük hücresine olan tepki kuvvetleri ölçülmüştür. Böylece numunelerin, 39 mm sıkıştırılabilmesi için gerekli basma kuvvetleri belirlenmiştir. 30 numune için elde edilen deplasman ve kuvvet verileri Şekil 6.9’da iki ayrı grafikte toplanmıştır. Hidrolik silindirin kattığı yol her deneyde aynı olduğu için, deplasman değerleri tüm numuneleri için aynıdır. Basma kuvveti değerleri ise, maksimum noktalarda nispeten farklı bir dağılım göstermiştir. Fakat genel olarak tüm numuneler, kuvvet için zamana bağlı aynı davranışı göstererek, basma kuvveti grafiğini oluşturmuşlardır. Ortaya çıkan bu sonuç, birbirine oldukça benzer fiziksel özelliklere sahip numuneler için beklenen bir durumdur.



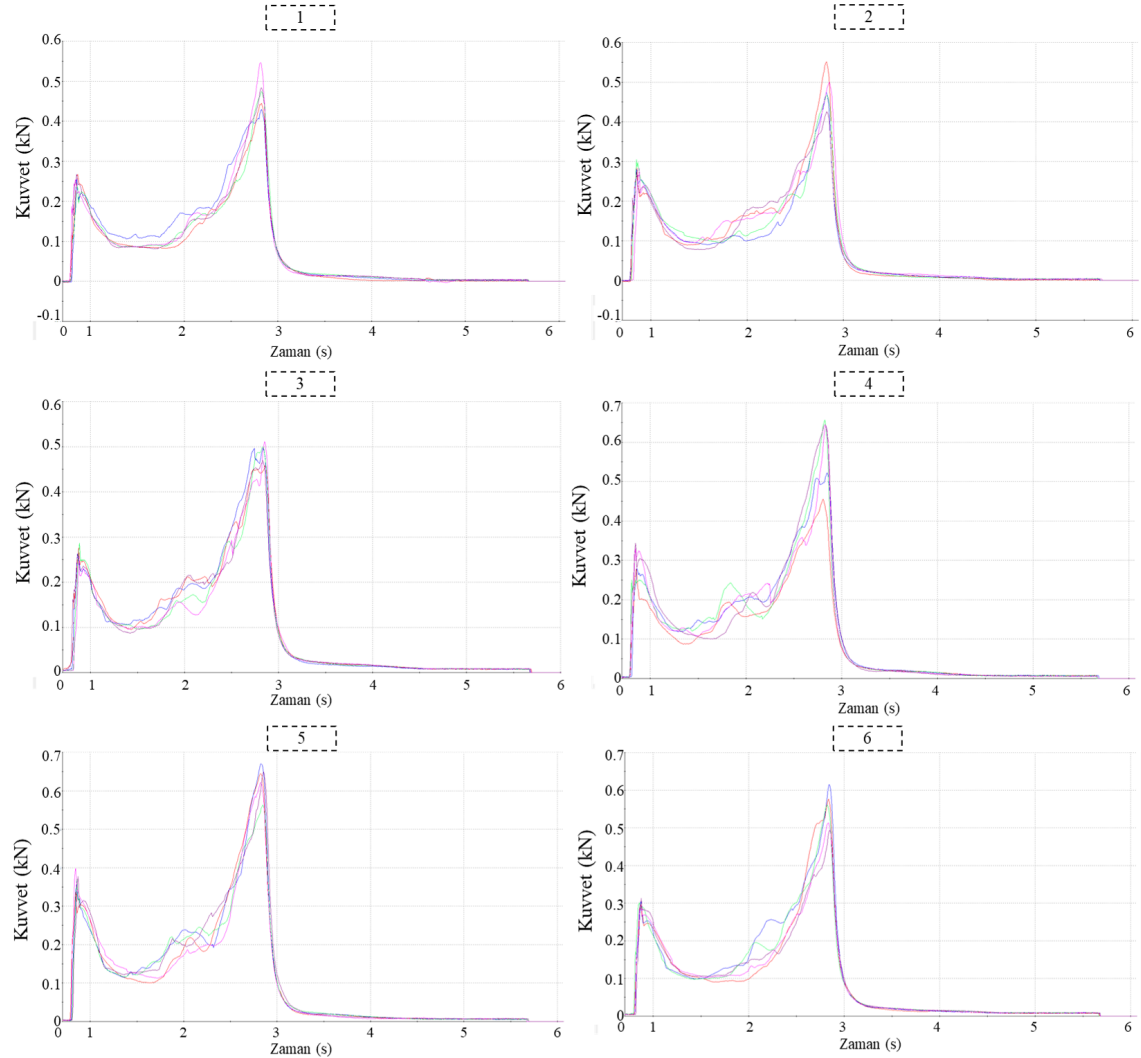
Şekil 6.9 Basma deneyi sonuçları

Şekil 6.10'daki grafiklerdeki 1. pik noktası, parçaların ilk burkulmaya başladığı dolayısıyla, parçaların hasarlanması için gerekli kuvvet değerlerini temsil eder. Buna göre 270 N ile 370 N arasında değerler elde edilmiştir. Dolayısıyla ICM ile üretilen bu parçayı basma kuvveti ile şekil değiştirebilmek için 27 kg'lık bir kütleye ihtiyaç duyulmaktadır. İlk üç numune için 2. pik noktasında maksimum 430 – 550 N'luk basma kuvvetleri belirlenirken, 4,5,6. numuneler için 510 – 660 N arasında kuvvetler tespit edilmiştir. Böylece her iki grup numune arasında yaklaşık 100 N'luk fark olduğu ortaya çıkarılmıştır.



Şekil 6.10 Basma deneyi ve maksimum kuvvetler

Her ne kadar bu fark ortaya çıksa da genel olarak tüm numunelerin basma kuvveti-zaman grafiği davranışı birbirine çok benzer bulunmuştur. Yine Şekil 6.11’de altı farklı deney tasarımı için elde edilen basma kuvveti grafikleri zamana bağlı olarak verilmiştir.

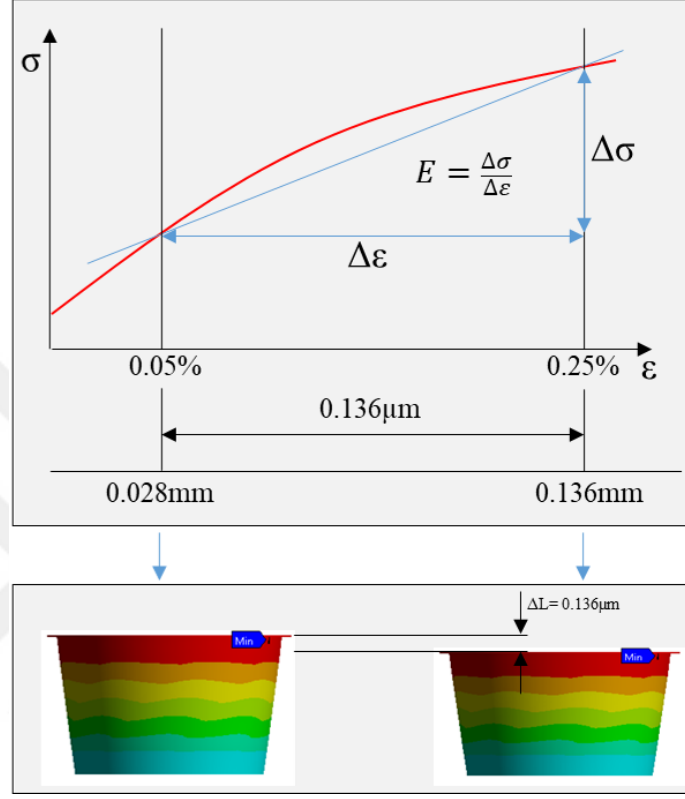


Şekil 6.11 Altı deney tasarımı için basma deneyi sonuçları

6.1.3 Basma Deneylerinin Nümerik Analiz Sonuçları ile Karşılaştırılması

Basma deneylerinin sayısal analiz sonuçları ile karşılaştırılabilmesi için deneysel çalışmalarda belirlenen lineer bölgeden elde edilen gerinme değerleri dikkate alınmıştır. Lineer bölgenin plastikler için belirlenmesinde ISO 527 standardından faydalanılmıştır. ISO 527, plastik malzemelerin çekme testlerinde, mekanik özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan bir standarttır. Buna göre Şekil 6.12’de gösterilen grafikte, lineer bölgenin dolayısıyla Young (E) modülünün hesaplanabilmesi için gerinme değerinin % 0.05 ile % 0.25 arasında olduğu lineer bölge, yani parçanın elastik davranış gösterdiği aralık kullanılır. Bu aralığın çok düşük değerlere sahip

olması, lineer bölge için analizlerin gerçekleştirilmesini ve deneysel çalışmalarla olan korelasyonunu güçleştirmektedir. Şekilden de görüleceği üzere ilk yüksekliği 54 mm olan parçanın % 0.05 ile % 0.25 aralığındaki gerinme değeri elde edilirken parça üzerine uygulanan basma kuvvetinin etkisiyle 0.028 mm ve 0.136 mm'lik şekil değişimleri dikkate alınmış böylece lineer bölgenin bu aralıkta olduğu kabul edilmiştir.

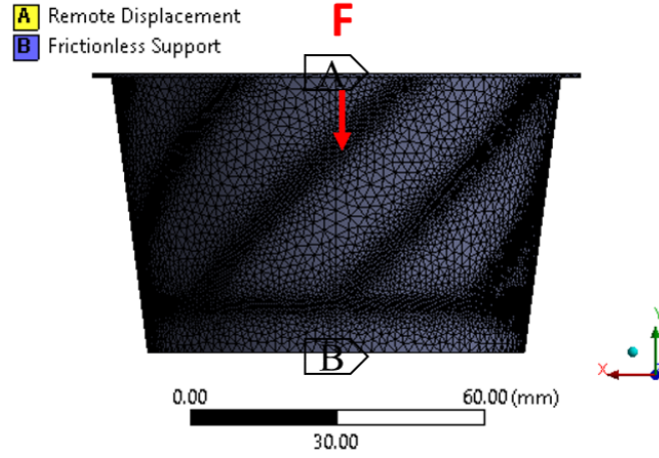


Şekil 6.12 Young (E) modülünün belirlenmesinde ISO 527 standartının kullanılması

Doğrusal bir statik yapısal analiz için, $\{x\}$ yer değiştirmeleri $[K]\{x\} = \{F\}$ matris denkleminde çözülür. Buna göre $[K]$ sabittir ve analiz için doğrusal elastik malzeme davranışı kabul edilir. $\{F\}$ statik olarak uygulanır. Zamanla değişen kuvvetler dikkate alınmazken, eylemsizlik etkisi analizlerde ihmal edilmiştir.

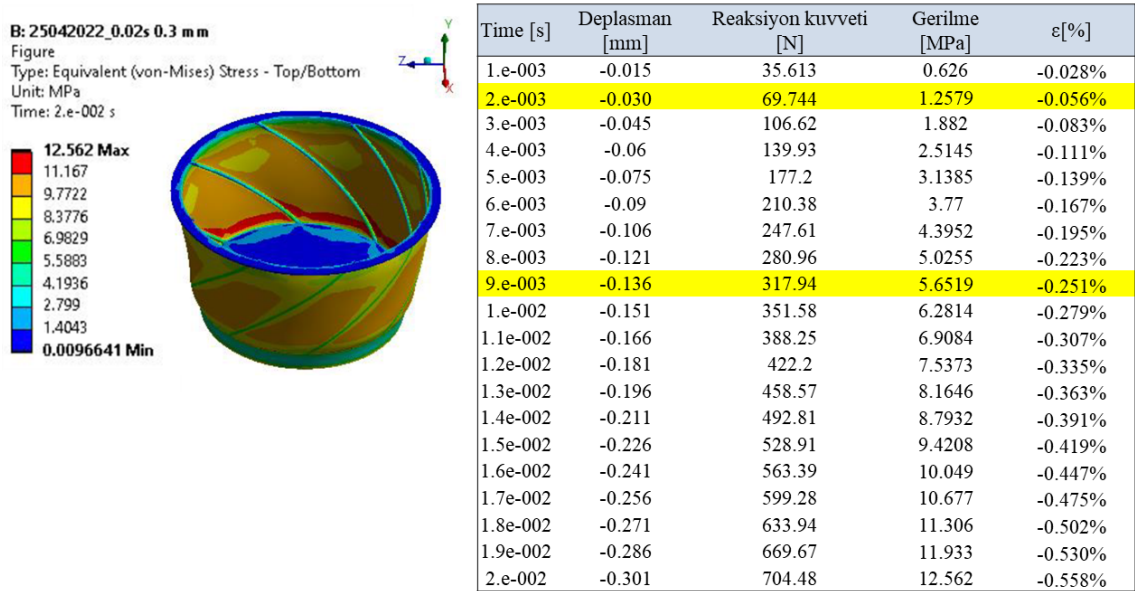
Lineer statik yapısal analiz için Ansys yazılımı kullanılmıştır. Analizin statik bölgede gerçekleştirilecek olmasından dolayı malzeme özelliklerinden Young Modülü ve Poisson Oranı'nın bilinmesi gerekmektedir. Tablo 5.1'de listelenmiş PP BJ356MO malzemesinin reolojik özelliklerinden faydalanılarak E modülü 1600 MPa, Poisson Oranı ise Moldflow yazılımındaki malzeme özelliklerinden elde edilerek 0.4 olarak alınmıştır. 128956 ağ elemanı ve 246072 düğüm ile oluşturulan modelde, taban bölgesi sabit, açık ağız kısmı ise sıkıştırma kuvvetinin bir yüzey alanı olarak uygulandığı eksen olarak kabul edilmiştir. Analiz metodu olarak 3-D analiz tipi uygulanırken, zamana bağlı transient analiz gerçekleştirilmiştir. Zaman adımları 0.001 s seçilmiş, kuvvetin uygulanacağı süre ise 0.01 s olarak deneysel çalışmalar

referans alınarak belirlenmiştir.



Şekil 6.13 Simülasyonda kullanılan gıda ambalajının sonlu eleman ağı

Şekil 6.14'te, lineer bölgede parça üzerinde oluşan 317.9 N'luk maksimum tepki kuvveti ve 5.65 MPa gerilme değeri görülmektedir. Deneysel çalışmalarda bu değerler ortalama 200 N civarında belirlenmiş ve bu kuvvetin üzerinde parça deformasyona uğrayarak burkulmuştur. Buna göre, sayısal analiz çalışması ile parça üzerinde elde edilen maksimum 5.65 MPa gerilme değerinin, flambaj için bir sınır değer olarak kabul edilebileceği belirlenmiştir.



Şekil 6.14 Basma deformasyonunun uygulanması ile elde edilen analiz sonuçları

7 SONUÇ VE ÖNERİLER

Çalışmada hem IM hem ICM yönteminin akış analizleri için sistematik bir yaklaşım sunulmuş, aynı parametreler için benzer değerler kullanılarak analiz sonuçları incelenmiştir. Her iki yöntemin sonuçları basınç, sıcaklık, kenetlenme kuvveti, kendini çekme ve çarpılma değerleri dikkate alınarak karşılaştırılmıştır. Akış analizlerinin ardından Taguchi metodunun uygulanması ile elde edilen parametre değerleri ile ICM için 6 adet deneysel çalışma gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmada, elde edilen ürünlerdeki çarpılma değerleri ölçülerek, nümerik analiz sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Son olarak parçanın dayanımı, basma deneyleri uygulanarak incelenmiştir. Çalışmanın sonuçları aşağıdaki gibi sıralanabilir:

1. Literatürdeki çalışmalarla karşılaştırıldığında, sıkıştırma kuvvetine hem dik hem de paralel yüzeyler barındıran nispeten karmaşık dönel simetride 3 boyutlu bir parçanın ICM yöntemine ait hassas parametre ayarları başarılı bir şekilde ortaya çıkarılmış ve nihayetinde akış analizleri gerçekleştirilmiştir. ICM yönteminin dezavantajlarından biri olarak gösterilen derin ve üç boyutlu parçaların üretimindeki sınırlarının uygun proses parametreleri aşılabileceği ispat edilmiştir.
2. Çalışma ile sıkıştırma aşamasında, hareketli kalıp tarafından uygulanan sıkıştırma kuvvetine paralel yüzeylerde de dik yüzeylerdeki gibi iyi sonuçlar elde edilebilmiş ve akış simülasyonları başarılı şekilde gerçekleştirilmiştir.
3. IM ve ICM yöntemlerinin nümerik analiz sonuçları karşılaştırılmıştır. Buna göre maksimum kalıp içi basınç değerleri 3 no'lu deney tasarımı için ICM yönteminde 44 MPa, IM yönteminde ise 107 MPa olarak tespit edilmiştir. Dolayısıyla ICM yönteminde enjeksiyon noktasındaki maksimum basınç değerlerinin IM yöntemine göre % 59 düştüğü ortaya çıkarılmıştır.
4. Kenetlenme kuvveti 3 no'lu deney tasarımı için yaklaşık olarak ICM yönteminde % 30'luk bir düşüş göstermiştir. Ancak IM metodunda 43 ton'luk maksimum

değer hızlıca 0 *ton*'a düşerken, ICM metodunda 2 s boyunca 30 *ton*'da sabit kalmıştır.

5. Akış analizi sonrasında parça üzerinde ortaya çıkan kalıntı gerilmeler karşılaştırıldığında, ICM yönteminde hem gerilmelerin homojen dağıldığı hem de IM yöntemine göre % 60 daha düşük değerde olduğu belirlenmiştir. Dolayısıyla IM yöntemi ile akış analizi yapılan parçanın, çarpılma ile atamadığı, ICM yöntemine göre iki kattan fazla kalıntı gerilme barındırdığı ortaya çıkarılmıştır.
6. ICM yöntemi kullanılarak 0.3 *mm* et kalınlığına sahip parçanın akış simülasyonları dışında deneysel çalışmaları da başarılı şekilde gerçekleştirilmiş ve nihai ürün elde edilmiştir.
7. Akış analizlerinde, ICM yöntemi kullanıldığında, kenetlenme kuvvetlerindeki ve özellikle kalıp içi basınçlardaki düşüş parçanın boyutsal kalitesinin düşmesine sebep olmamış tam tersine ICM yönteminin avantajları nedeniyle parçanın geometrik özelliklerini iyileştirmiştir. Buna göre IM yönteminde sadece üçüncü deney tasarımında çarpılma değeri 0.4 *mm*'ye kadar düşebilmiş, geriye kalan tüm deney tasarımlarında 0.5 *mm* ile 1.26 *mm* arasında farklı çarpılma değerleri gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar ICM yöntemi ile düşük basınç ve kenetlenme kuvvetlerinde dahi oldukça iyi ürün kaliteleri elde edilebileceğini göstermiştir.
8. Taguchi analizi sonucunda, ICM yönteminde üretilen parçadaki maksimum çarpılma değerlerinin 0.38 *mm*'ye kadar düşürülebildiği tespit edilirken, IM yönteminde bu değer maksimum 0.4 *mm* olduğu belirlenmiştir.
9. ICM yönteminde ANOVA analizleri ile sıkıştırma kuvvetinin % 26.19'lük yüzdesel katkı ile en etkili proses parametresi olduğu belirlenirken, IM yönteminde ise eriyik sıcaklığının % 78.06 katkı ile en etkili faktör olduğu tespit edilmiştir.
10. ICM metodu ile deneysel çalışmaların gerçekleştirilebilmesi için uygun altyapı hazırlanmış, kalıp üretimi gerçekleştirilmiş ve nihayetinde tespit edilen parametrelerde prototip parçalar üretilebilmiştir.
11. ICM için yapılan 6 adet deneysel çalışmada, tabanda 0.8 *mm* ile 1.7 *mm* arasında çarpılma değerleri ölçülürken, yan duvarlar için (p2 ve p3) deneysel çalışmalarda 0.5 *mm*'lik çarpılmalar gözlemlenmiştir. Nümerik analiz sonuçlarında ise taban için maksimum 0.43 *mm* çarpılma değerleri ortaya çıkarken, yan duvar bölgelerinde maksimum 0.4 *mm* çarpılma değerleri belirlenmiştir. Bu sonuçlar, akış analizleri ile deneysel çalışmalar arasında,

merkezde farklı çarpılma değerlerinin ortaya çıktığını ancak yan duvarlarda oldukça benzer sonuçlar elde edildiğini göstermiştir.

12. Parçanın yan duvarlarında teknik resimde belirtilen 0.3 mm kalınlık hedefine ulaşılırken, taban bölgesinde hedef değer 0.3 mm yerine 0.265 mm kalınlık değerleri tespit edilmiştir. Böylece, taban bölgesinde parçanın istenilen kalınlık değerine erişemediği belirlenmiştir.
13. Basma deneylerinden elde edilen sonuçlar, benzer yükleme koşulları için FEM analizi ile karşılaştırılmış, lineer bölge için parça üzerinde oluşan maksimum gerilmenin 5.65 MPa olarak akma gerilmesinin altında kaldığı belirlenmiştir.

Öneriler:

1. Plastik parçalarda kalıntı gerilmelerin ölçümü için parça kalınlığının minimum 2 mm olması gerekmektedir. Çalışmada kullanılan plastik numunenin maksimum taban ve yan duvar kalınlığı 0.3 mm olduğu için kalıntı gerilmelerin ölçümü mümkün olmamıştır. Bu nedenle gelecek çalışmalarda et kalınlığı daha fazla olan parçalar kullanılarak kalıntı gerilmeler deneysel olarak belirlenebilir.
2. Çalışmada kullanılan parçanın geometrisi, literatürde yapılmış çalışmalara göre oldukça kompleks ve et kalınlığı incedir. Bu nedenle deneysel çalışmaların güvenilirliğini arttırmak için basitten komplekse doğru parça geometrileri seçilip farklı kalıplarla çalışmalar gerçekleştirilebilir. Böylelikle prosesin tüm parametrelerinin doğru tayin edilmesinde büyük avantaj sağlanabilir.
3. Deneysel çalışmalarda kalıp içinde oluşan basınç ve gerilmelerin belirlenebilmesi ve anlık olarak takibi için, kalıp içine basınç, sıcaklık ve gerinim ölçer sensörleri yerleştirilebilir. Böylece, kalıp içindeki basınç, sıcaklık ve sıkıştırma kuvveti değerleri deneysel olarak incelenebilir ve sayısal analiz sonuçları ile karşılaştırılabilir.
4. Taban bölgesindeki 0.035 mm kalınlık farkının nedeninin tespit edilebilmesi için kalıp kapandıktan sonra tabanda boşluğun var olup olmadığı lazer ölçümleri ile kontrol edilebilir ve böylece, kalıp tasarımı veya fonksiyonu garanti altına alınabilir.
5. Tez çalışması, tek gözlü bir ICM kalıbıyla gerçekleştirilmiştir. Üretim hızının artırılmasında göz sayısının çoğaltılması büyük önem arz ettiğinden, farklı sayıdaki kalıp gözleri ile çalışmalar tekrarlanıp yöntemin endüstriyel uygulamalara uygun hale getirilmesi sağlanabilir.

6. Plastik malzemeler, geri dönüşüm oranlarının çok düşük olması sebebiyle, insan ve çevre sağlığı açısından büyük bir tehdit haline dönüşmüş durumdadır. Tek kullanımlık plastiklerin yasaklanması, plastik torbaların kullanımının kısıtlanması gibi tedbirler önemli adımlar olarak sayılabilir. Ancak, plastikler hala birçok sektörde yaygın olarak kullanılmaya devam etmektedir. Maalesef, gıda ve ilaç ürünlerinin uzun süre korunmasında sunduğu olanaklar nedeniyle, plastikler, insanlığın vazgeçilmez bir parçası haline gelmiş durumdadır. Plastiğin doğaya ve canlılara verdiği zararı azaltabilmek veya tamamen ortadan kaldıracabilmek için, ICM prosesine uyumlu, kolayca geri dönüştürülebilir, mümkünse organik hammaddeler kullanarak yeni çalışmalar gerçekleştirilebilir.



- [1] S. Hong, J. Hwang, J. Kang, K. Yoon, "Comparison of injection molding and injection/compression molding for the replication of microstructure," *Korea-Australia Rheology Journal*, vol. 27, no. 4, pp. 309–317, 2015.
- [2] W.-B. Young, "Effect of process parameters on injection compression molding of pickup lens," *Applied Mathematical Modelling*, vol. 29, no. 10, pp. 955–971, 2005.
- [3] W.-S. Guan, H.-X. Huang, "Back melt flow in injection–compression molding: Effect on part thickness distribution," *International communications in heat and mass transfer*, vol. 39, no. 6, pp. 792–797, 2012.
- [4] S. Han, J. Cho, S. Beak, J. Hong, Y. Lee, "Numerical and experimental studies of injection compression molding process for thick plastic gas valve stem," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 89, no. 1-4, pp. 651–660, 2017.
- [5] Y. I. Kwon, E. Lim, Y. S. Song, "Simulation of injection-compression molding for thin and large battery housing," *Current Applied Physics*, vol. 18, no. 11, pp. 1451–1457, 2018.
- [6] Y. Zhang, W. Yu, J. Liang, J. Lang, D. Li, "Three-dimensional numerical simulation for plastic injection-compression molding," *Frontiers of Mechanical Engineering*, vol. 13, no. 1, pp. 74–84, 2018.
- [7] J.-Y. Ho, J. M. Park, T. G. Kang, S. J. Park, "Three-dimensional numerical analysis of injection-compression molding process," *Polymer Engineering & Science*, vol. 52, no. 4, pp. 901–911, 2012.
- [8] B. Fan, D. O. Kazmer, R. P. Theriault, A. J. Poslinski, "Simulation of injection-compression molding for optical media," *Polymer Engineering & Science*, vol. 43, no. 3, pp. 596–606, 2003.
- [9] S. Hu, H. Chiu, C. Chien, C. Yu, R. Chang, "True 3d numerical simulation in injection compression molding (icm)," *SPE ANTEC, Orlando, FL*, pp. 716–720, 2010.
- [10] Y. C. Li, Y. S. Zhang, D. Q. Li, "Shrinkage analysis of injection-compression molding for transparent plastic panel by 3d simulation," in *Applied Mechanics and Materials*, Trans Tech Publ, vol. 44, 2011, pp. 1029–1033.
- [11] S. H. Lee, S. Y. Kim, J. R. Youn, B. J. Kim, "Warpage of a large-sized orthogonal stiffened plate produced by injection molding and injection compression molding," *Journal of applied polymer science*, vol. 116, no. 6, pp. 3460–3467, 2010.

- [12] Y. I. Kwon, Y. S. Song, "Application of injection-compression molding to thin-walled polymeric parts," *Korea-Australia Rheology Journal*, vol. 30, no. 3, pp. 161–167, 2018.
- [13] W. Cao, Z. Min, S. Zhang, T. Wang, J. Jiang, H. Li, Y. Wang, C. Shen, "Numerical simulation for flow-induced stress in injection/compression molding," *Polymer Engineering & Science*, vol. 56, no. 3, pp. 287–298, 2016.
- [14] M. Sortino, G. Totis, E. Kuljanic, "Comparison of injection molding technologies for the production of micro-optical devices," *Procedia Engineering*, vol. 69, pp. 1296–1305, 2014.
- [15] Q. Chuan-zhen, W. Yong-tao, Z. Jian, Z. Ya-jun, "The study of injection compression molding of thin-wall light-guide plates with hemispherical micro structures," in *Proceedings of the 1st International Conference on Mechanical Engineering and Material Science*, Atlantis Press, 2012, pp. 263–266.
- [16] J.-Y. Ho, J. M. Park, T. G. Kang, S. J. Park, "Three-dimensional numerical analysis of injection-compression molding process," *Polymer Engineering & Science*, vol. 52, no. 4, pp. 901–911, 2012.
- [17] S.-J. Liu, K.-Y. Lin, "Injection compression molding of wedge-shaped plates: Effects of processing parameters," *Journal of reinforced plastics and composites*, vol. 24, no. 4, pp. 373–383, 2005.
- [18] S. C. Chen, Y. C. Chen, H. S. Peng, "Simulation of injection–compression-molding process. II. influence of process characteristics on part shrinkage," *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 75, no. 13, pp. 1640–1654, 2000.
- [19] M.-S. Huang, C.-F. Chung, "Injection molding and injection compression molding of thin-walled light-guided plates with v-grooved microfeatures," *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 121, no. 2, pp. 1151–1159, 2011.
- [20] H.-S. Lee, Y.-G. Yoo, "Effects of processing conditions on cavity pressure during injection-compression molding," *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, vol. 13, no. 12, pp. 2155–2161, 2012.
- [21] Q. X. Bu, J. Y. Zhu, Q. Z. Yin, "Injection compression molding process and mould design of plastic optical lens," in *Key Engineering Materials*, Trans Tech Publ, vol. 501, 2012, pp. 321–324.
- [22] H. J. Oh, Y. S. Song, "Enhanced impact strength of injection-compression molded parts by controlling residual stress distribution," *Korea-Australia Rheology Journal*, vol. 31, no. 1, pp. 35–39, 2019.
- [23] S. C. Chen, Y. C. Chen, N. Cheng, M.-S. Huang, "Simulation of injection-compression mold-filling process," *International communications in heat and mass transfer*, vol. 25, no. 7, pp. 907–917, 1998.
- [24] W.-S. Guan, H.-X. Huang, "A proposed technique to acquire cavity pressure using a surface strain sensor during injection-compression molding," *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, vol. 135, no. 2, 2013.
- [25] C.-H. Wu, W.-S. Chen, "Injection molding and injection compression molding of three-beam grating of dvd pickup lens," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 125, no. 2, pp. 367–375, 2006.

- [26] C.-H. Wu, Y.-L. Su, "Optimization of wedge-shaped parts for injection molding and injection compression molding," *International communications in heat and mass transfer*, vol. 30, no. 2, pp. 215–224, 2003.
- [27] R. Janiwarad, B. Patham, H. Sharma, R. Heerkens, "Simulation methodology for large part processing using 2-shot injection compression molding (2k-1cm)," *SPE*, vol. 69, pp. 1627–1634, 2017.
- [28] W. Michaeli, S. Heßner, F. Klaiber, J. Forster, "Geometrical accuracy and optical performance of injection moulded and injection-compression moulded plastic parts," *CIRP annals*, vol. 56, no. 1, pp. 545–548, 2007.
- [29] S. Khalifeh, "1 - introduction to polymers for electronic engineers," in *Polymers in Organic Electronics*, S. Khalifeh, Ed., ChemTec Publishing, 2020, pp. 1–31, ISBN: 978-1-927885-67-3. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-1-927885-67-3.50006-7>. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9781927885673500067>.
- [30] P. F. Kusy, "Plastic materials selection guide," *SAE Transactions*, pp. 2079–2110, 1976.
- [31] A. Shrivastava, "1 - introduction to plastics engineering," in *Introduction to Plastics Engineering*, ser. Plastics Design Library, A. Shrivastava, Ed., William Andrew Publishing, 2018, pp. 1–16, ISBN: 978-0-323-39500-7. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-39500-7.00001-0>. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780323395007000010>.
- [32] "Introduction to plastics and elastomers," in *Chemical Resistance of Thermoplastics*, ser. Plastics Design Library, W. A. Woishnis, S. Ebnesajjad, Eds., Oxford: William Andrew Publishing, 2012, pp. xxi–xxxiv, ISBN: 978-1-4557-7896-6. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-1-4557-7896-6.00059-5>. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9781455778966000595>.
- [33] K. Balani, V. Verma, A. Agarwal, R. Narayan, *Biosurfaces: a materials science and engineering perspective*. John Wiley & Sons, 2015.
- [34] K. M. Cantor, P. Watts, "12 - plastics processing," in *Applied Plastics Engineering Handbook*, ser. Plastics Design Library, M. Kutz, Ed., Oxford: William Andrew Publishing, 2011, pp. 195–203, ISBN: 978-1-4377-3514-7. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-1-4377-3514-7.10012-1>. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9781437735147100121>.
- [35] M. T. MacLean-Blevins, "3 - process selection—which plastics process to use?" In *Designing Successful Products with Plastics*, ser. Plastics Design Library, M. T. MacLean-Blevins, Ed., William Andrew Publishing, 2018, pp. 51–77, ISBN: 978-0-323-44501-6. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-44501-6.00003-9>. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780323445016000039>.
- [36] S. N. L. Phadke, "Injection compression molding," *POPULAR PLASTICS PACKAGING*, vol. -, pp. 37–38, 2015.

- [37] S. Jay, "Moldflow design guide: A resource for plastics engineers," *Hanser, Cop*, 2006.
- [38] K. Van Canneyt, P. Verdonck, "Mechanics of biofluids in living body," 2014.
- [39] B. A. Dwiyanoro, "A numerical study of an injection-compression molding process by using a moving grid," in *Applied Mechanics and Materials*, Trans Tech Publ, vol. 249, 2013, pp. 472–476.
- [40] J. Werf, van der, A. Boshouwers, "Inject-3, a simulation code for the filling stage of the injection moulding process of thermoplastics," English, Ph.D. dissertation, Mechanical Engineering, 1988. DOI: 10.6100/IR288542.
- [41] H. Zhou, *Computer modeling for injection molding: simulation, optimization, and control*. John Wiley & Sons, 2012.
- [42] W. J. De Kock, "Numerical simulation of the plastics injection moulding process," 1994.
- [43] A. Östergren, "Prediction of residual stresses in injection moulded parts," M.S. thesis, 2013.
- [44] M. Zeneli, A. Nikolopoulos, S. Karellas, N. Nikolopoulos, "Numerical methods for solid-liquid phase-change problems," in *Ultra-High Temperature Thermal Energy Storage, Transfer and Conversion*, Elsevier, 2021, pp. 165–199.
- [45] J. Blazek, "Structured finite volume schemes," *Computational Fluid Dynamics: Principles and Applications*, 2nd ed.; Elsevier Science: Amsterdam, The Netherlands, pp. 210–213, 2005.
- [46] R. Shamey, X. Zhao, *Modelling, simulation and control of the dyeing process*. Elsevier, 2014.
- [47] S. Mazumder, "Chapter 1-introduction to numerical methods for solving differential equations," *Numerical Methods for Partial Differential Equations*. Cambridge, MA, USA: Academic Press, 2016.
- [48] A. Sharifahmadian, *Numerical models for submerged breakwaters: coastal hydrodynamics and morphodynamics*. Butterworth-Heinemann, 2015.
- [49] S. P. Neill, M. R. Hashemi, "Ocean modelling for resource characterization," *Fundamentals of ocean renewable energy*, pp. 193–235, 2018.
- [50] T. W. Kerlin, B. R. Upadhyaya, *Dynamics and Control of Nuclear Reactors*. Academic press, 2019.
- [51] E. Dick, "Introduction to finite element methods in computational fluid dynamics," in *Computational fluid dynamics*, Springer, 2009, pp. 235–274.
- [52] *Descriptions of fluid flow*. [Online]. Available: https://www.me.psu.edu/cimbala/Learning/Fluid/Introductory/descriptions_of_fluid_flows.htm (visited on 09/17/2021).
- [53] W. Cao, Y. Shen, P. Wang, H. Yang, S. Zhao, C. Shen, "Viscoelastic modeling and simulation for polymer melt flow in injection/compression molding," *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, vol. 274, p. 104 186, 2019.

- [54] J. Zhu, Y. Chen, W. Huang, Q. Zhang, X. Liao, Y. Huang, Z. Qiu, "Effect of injection compression process parameters on residual stress of products based on numerical simulation," in *Journal of Physics: Conference Series*, IOP Publishing, vol. 1187, 2019, p. 032 031.
- [55] *Anisotropic thermo-viscous-elastic residual stress model for warpage simulation of injection molded part*. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/333734297_Anisotropic_Thermo-viscous-elastic_Residual_Stress_Model_for_Warpage_Simulation_of_Injection_Molded_Part (visited on 09/17/2021).
- [56] S. Pashte, K. Wagle, S. Agrawal, D. Sudhakar, B. Patil, D. S. Singraur, "Simulation and optimization for a plastic component," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, IOP Publishing, vol. 872, 2020, p. 012 072.
- [57] A. Moldflow, "Three-dimensional anisotropic thermo-viscous-elastic residual stress model," 2016.
- [58] *Polypropylene bj998mo, product data sheet*. [Online]. Available: https://www.borealisgroup.com/storage/Datasheets/bj998mo/BJ998M0-PDS-REG_EUROPE-EN-V2-PDS-EUR-43147-10046362.pdf (visited on 09/17/2021).

Makale

1. Sönmez, D. and Eker, A. A.. "Numerical Simulation and Process Optimization of a 3D Thin-Walled Polymeric Part Using Injection Compression Molding" International Polymer Processing, vol. 36, no. 4, 2021, pp. 459-467. <https://doi.org/10.1515/ipp-2020-4075>
2. Sönmez, D. and Eker, A. A.. " Numerical simulation and experimental analysis for evaluating warpage of a 3d thin-walled polymeric part using the injection compression molding process" International Polymer Processing, vol. 37, no. 2, 2022, <https://doi.org/10.1515/ipp-2021-4197>

Konferans Bildirisi

1. D. SÖNMEZ, A. Akdoğan EKER , “Gıda Ambalaj Sektöründe İnce Cidarlı Parçaların Üretimi İçin Yeni Nesil Enjeksiyon Makinalarının Kullanımı”, 3. Uluslararası Mühendislik Mimarlık Ve Tasarım Kongresi, 04-05 Mayıs 2018, Wellborn Luxury Hotel • Başiskele, Kocaeli