

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MİKRO GÖZENEKLİ ENJEKSİYON KALIPLAMA
YÖNTEMİNİN OTOMOTİV UYGULAMALARI

HÜROL KOÇOĞLU

KOCAELİ 2015

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MİKRO GÖZENEKLİ ENJEKSİYON KALIPLAMA
YÖNTEMİNİN OTOMOTİV UYGULAMALARI

HÜROL KOÇOĞLU

Prof.Dr. Tamer SINMAZÇELİK
Danışman, Kocaeli Üniv.

Doç.Dr. Taner YILMAZ
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv.

Prof.Dr. Şenol YILMAZ
Jüri Üyesi, Sakarya Üniv.



Tezin Savunulduğu Tarih: 10.06.2015

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜRLER

Bu güncel çalışma konusunu bana öneren, çalışmalarım sırasında beni sürekli olarak destekleyen, yol gösteren, değerli bilgilerini benimle paylaşan, her olaya karşı soğukkanlı ve pozitif yaklaşımları ile kişisel gelişimimde de bana her zaman örnek ve yardımcı olan hocam Sayın Prof. Dr. Tamer SINMAZÇELİK'e sonsuz saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

3130309 numaralı TÜBİTAK-TEYDEB 1501 projesinin ortaya çıkmasını sağlayan ve beni bu çalışmaya dahil ederek Türkiye için yeni olan bu konuda yüksek lisans tez çalışması yapmama öncü olan Farplas Ar-Ge Merkezi Koordinatörü Dr. Altan YILDIRIM ve Kıdemli Ar-Ge Mühendisi Burcu GİRGİNER'e teşekkürlerimi sunarım.

Enjeksiyon deneyleri esnasında değerli yardımları için Proses Uzmanı Mehmet ÜNAL'a, çalışmanın her aşamasındaki çok değerli yardımları ve destekleri için can dostum Ar-Ge Mühendisi Umut YERLEŞEN'e ve çalışmanın tesislerinde gerçekleştirilmesini sağladığı için tüm FARPLAS ailesine teşekkürü bir borç bilirim.

Deneysel çalışmalar sırasındaki yardımları için değerli yol arkadaşım Makine Mühendisi Harun Arda BALYALI'ya ve hocam Arş. Gör. Alp Eren ŞAHİN'e, lisans yıllarımdan itibaren bana kişisel ve akademik her konuda değerli tecrübeleri ile yol gösterip adeta mental destekçim olan değerli hocalarım Arş. Gör. Yasemin YILDIRAN ve Yrd. Doç. Dr. Egemen AVCU'ya teşekkürlerimi sunarım.

Tüm hayatım boyunca hep yanımda olan değerli dostlarıma ve aileme bu süreçte bana gösterdikleri sabır ve verdikleri destek için çok teşekkür ederim.

Mayıs – 2015

Hürol KOÇOĞLU

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜRLER.....	i
İÇİNDEKİLER	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	v
TABLolar DİZİNİ	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	viii
ÖZET.....	ix
ABSTRACT.....	x
GİRİŞ	1
1. OTOMOTİV PLASTİKLERİ	4
1.1. Polimer ve Plastik.....	4
1.2. Plastiğin Tarihçesi ve Özellikleri	5
1.3. Plastiğin Sınıflandırılması	7
1.3.1. Termoplastikler	10
1.3.2. Termosetler.....	11
1.3.3. Elastomerler	11
1.4. Otomotiv Endüstrisinde Plastiğin Yeri	12
1.4.1. Plastiklerin otomotivdeki kullanım alanları	14
1.4.1.1. Yolcu bölümü / iç giydirme.....	14
1.4.1.2. Yol bölümü / kaporta.....	15
1.4.1.3. Kaput altı / motor bölümü	15
1.4.2. Otomotivde kullanılan termoplastik malzemeler	16
1.4.3. Otomotiv termoplastiklerine uygulanan üretim yöntemleri	17
1.4.3.1. Plastik enjeksiyon kalıplama	18
1.4.3.2. Ekstrüzyon.....	18
1.4.3.3. Plastik şişirme.....	20
1.4.3.4. Isıl şekil verme	21
1.4.3.5. Döner kalıplama	22
1.4.3.6. Eriyebilir maçalı enjeksiyon (lost core molding)	23
1.4.3.7. Haddeleme	24
1.4.3.8. Slush molding.....	24
1.4.3.9. Köpük kalıplama	26
2. PLASTİK ENJEKSİYON	27
2.1. Plastik Enjeksiyon Makinesi	27
2.1.1. Plastikleştirme (enjeksiyon) ünitesi	28
2.1.1.1. Besleme ünitesi (huni).....	28
2.1.1.2. Vida (helezon)	29
2.1.1.3. Geri dönüşsüz valfler.....	30
2.1.1.4. Isıtma (ocak-kovan) sistemi	30
2.1.1.5. Meme (nozül)	31
2.1.2. Mengene-kapama sistemi	31
2.1.3. Kontrol ünitesi.....	32
2.2. Plastik Enjeksiyon Kalıbı	32
2.3. Plastik Enjeksiyon Yöntemi Aşamaları.....	33

2.4. Plastik Enjeksiyon Çevrimi ve Parametreleri.....	34
2.4.1. Mal alma (plastifikasyon/ergitme)	34
2.4.1.1. Kovan sıcaklığı.....	34
2.4.1.2. Mal alma hızı ve süresi.....	35
2.4.1.3. Vida dönme hızı	35
2.4.1.4. Geri basınç.....	35
2.4.2. Enjeksiyon.....	35
2.4.2.1. Kapama basıncı	36
2.4.2.2. Enjeksiyon basıncı.....	36
2.4.2.3. Enjeksiyon hızı	36
2.4.2.4. Enjeksiyon zamanı	37
2.4.3. Soğuma.....	37
2.4.3.1. Tutma basıncı	37
2.4.3.2. Tutma zamanı	37
2.4.3.3. Kalıp sıcaklığı.....	38
2.4.3.4. Soğuma zamanı	38
3. MİKRO GÖZENEKLİ ENJEKSİYON KALIPLAMA YÖNTEMİ.....	39
3.1. Yöntemin Tarihsel Gelişimi	39
3.2. Yöntemin Aşamaları	40
3.2.1. Çözünme evresi	41
3.2.2. Çekirdeklenme evresi	44
3.2.3. Gözenek büyümesi evresi.....	45
3.2.4. Şekillendirme evresi	47
3.3. Makine ve Ekipman	47
3.3.1. Özel tasarımlı MuCell vidası.....	48
3.3.2. Kapama kontrollü meme (shut-off nozzle)	49
3.3.3. Orta ve ön tek yönlü valfler.....	50
3.3.4. SCF ünitesi	51
3.4. MuCell Proses Parametreleri.....	53
3.4.1. Plastikleştirme	54
3.4.1.1. Kovan sıcaklığı.....	54
3.4.1.2. Geri basınç.....	55
3.4.1.3. Mal alma hızı.....	56
3.4.1.4. Mal alma süresi	56
3.4.1.5. Kütlece % SCF miktarı.....	56
3.4.1.6. SCF giriş basıncı	57
3.4.1.7. SCF enjektör açık kalma süresi	58
3.4.1.8. SCF giriş debisi	58
3.4.2. Kalıplama	59
3.4.2.1. Enjeksiyon hızı	59
3.4.2.2. Kalıp ve kovan sıcaklığı	60
3.4.2.3. Kütlece % SCF miktarı.....	60
3.5. Yöntemin Avantajları	61
3.6. Yöntemin Dezavantajları.....	62
4. MİKRO GÖZENEKLİ ENJEKSİYON KALIPLAMA LİTERATÜR	
ÇALIŞMALARI.....	63
4.1. Malzeme ve Katkı Maddelerinin Etkisi	63
4.2. Üretim Parametrelerinin Etkisi.....	65
5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	67

5.1. Malzeme ve Kalıp	67
5.2. Yöntem	69
5.2.1. Enjeksiyon denemeleri	69
5.3.2. Çekme testleri.....	74
5.2.3. Mikroyapı gözlemleri	76
6. DENEYSEL SONUÇLAR VE İRDELEME	78
6.1. Standart Enjeksiyon ve MuCell Deneme Sonuçları ve Maliyet	
Analizleri	78
6.1.1. Polipropilen-Polietilen malzeme sonuçları	78
6.1.2. % 20 talk katkılı polipropilen malzeme sonuçları.....	79
6.1.3. % 40 talk katkılı polipropilen malzeme sonuçları.....	81
6.1.4. ABS malzeme sonuçları	82
6.1.5. ABS-PC malzeme sonuçları.....	83
6.2. Çekme Testi Sonuçları	84
6.2.1. Polipropilen-Polietilen malzeme sonuçları	84
6.2.2. % 20 talk katkılı polipropilen malzeme sonuçları.....	86
6.2.3. % 40 talk katkılı polipropilen malzeme sonuçları.....	87
6.3. Mikro Yapı Sonuçları	88
6.3.1. Polipropilen-Polietilen malzeme sonuçları	89
6.3.2. % 20 talk katkılı Polipropilen malzeme sonuçları	90
6.3.3. % 40 talk katkılı Polipropilen malzeme sonuçları	92
6.3.4. ABS malzeme sonuçları	94
6.3.5. ABS-PC malzeme sonuçları.....	95
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	97
7.1. Sonuçlar.....	97
7.2. Öneriler.....	101
KAYNAKLAR	102
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER	107
ÖZGEÇMİŞ	108

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1.	Etilen molekülü	4
Şekil 1.2.	Polietilen zinciri	4
Şekil 1.3.	Plastiklerin zincir yapıları zincir yapıları	9
Şekil 1.4.	Yarı kristalin plastik iç yapısı.....	9
Şekil 1.5.	Amorf, yarı kristalin ve kristalin polimerlerin termal davranışları	10
Şekil 1.6.	Araç yolcu bölümü plastik bileşenleri.....	15
Şekil 1.7.	Araç kaporta bölümü plastik bileşenleri.....	15
Şekil 1.8.	Motor altı bölümünde bulunan plastik bileşenleri.....	16
Şekil 1.9.	Plastik ekstrüzyon prosesi	19
Şekil 1.10.	Ekstrüzyon ile üretilmiş termoplastik elastomer conta	19
Şekil 1.11.	Plastik şişirme yöntemi şematik gösterimi	20
Şekil 1.12.	Isıl şekillendirme ile üretilen çeşitli otomotiv parçaları	21
Şekil 1.13.	Döner kalıplama yönteminin şematik gösterimi	22
Şekil 1.14.	Lost core molding şematik gösterimi	23
Şekil 1.15.	Hava giriş manifoldu	24
Şekil 1.16.	Haddeleme prosesi şematik gösterimi.....	25
Şekil 1.17.	Slush molding şematik gösterimi	25
Şekil 1.18.	Slush molding yöntemi ile üretilmiş otomotiv parçaları	25
Şekil 1.19.	Köpük kalıplama ile üretilmiş tampon iç parçası	26
Şekil 2.1.	Plastik enjeksiyon makinesi şematik gösterimi.....	27
Şekil 2.2.	Hammadde besleme ünitesi (huni)	28
Şekil 2.3.	Enjeksiyon vidası şematik gösterimi.....	29
Şekil 2.4.	Geri dönüşsüz valf.....	30
Şekil 2.5.	Isıtma sistemi şematik gösterimi	31
Şekil 2.6.	Mengene sistemi.....	32
Şekil 2.7.	Enjeksiyon kalıbı şematik gösterimi	33
Şekil 3.1.	MuCell SCF ayar ekranı görüntüsü.....	41
Şekil 3.2.	Ön ve orta valdlerin açık konuma geçişi	42
Şekil 3.3.	SCF'nin kovan içerisine girişi	42
Şekil 3.4.	Mal alma işleminin bitişi	43
Şekil 3.5.	Çekirdeklenme evresinin başlaması	44
Şekil 3.6.	MuCell'de iç yapı değişim evreleri	46
Şekil 3.7.	MuCell ekipmanları.....	47
Şekil 3.8.	MuCell özel tasarımı vidası	48
Şekil 3.9.	Standart ve uzun fiber katkılı malzeme için MuCell vida tasarımı	49
Şekil 3.10.	Kapama kontrollü meme tasarımı	49
Şekil 3.11.	Tek yönlü valfler a) ön valf b) orta valf	50
Şekil 3.12.	Tek yönlü orta valf tasarımı	51
Şekil 3.13.	SCF kontrol ünitesi.....	51
Şekil 3.14.	SCF basınç ayar ünitesi	52
Şekil 3.15.	SCF giriş enjektörü.....	53

Şekil 3.16.	Eriyik-SCF karışımının sıcaklık-çözünürlük ilişkisi (a) Genel trend (b) Ters çözünürlük durumu	54
Şekil 3.17.	Eriyik-SCF karışımının basınç-çözünürlük ilişkisi	55
Şekil 5.1.	Motor alt kapama parçası	69
Şekil 5.2.	Üst rüzgarlık parçası.....	69
Şekil 5.3.	Deneysel çalışma aşamaları şematik gösteri	70
Şekil 5.4.	Krauss Maffei marka MX1600-12000 model enjeksiyon makinesi	71
Şekil 5.5.	Desis marka T2B model elektronik tartı	72
Şekil 5.6.	Motor alt kapama parçası fikstürü.....	72
Şekil 5.7.	Üst rüzgarlık parçası fikstürü	73
Şekil 5.8.	Çalışmada kullanılan SCF ayar ünitesi	73
Şekil 5.9.	Motor alt kapama parçası ön görünüş ve numune alınan bölge	74
Şekil 5.10.	Motor alt kapama parçası arkadan görünümü	75
Şekil 5.11.	Test numunesi kesme aparatı	75
Şekil 5.12.	Shimadzu AG-X model universal test cihazı	76
Şekil 5.13.	Ceast 9050 darbe cihazı.....	76
Şekil 5.14.	Leica marka S8 APO model Stereo Mikroskop	77
Şekil 6.1.	PP-PE malzeme maksimum dayanım-yolluktan uzaklık grafiği.....	85
Şekil 6.2.	% 20 talk katkılı PP malzeme maksimum dayanım-yolluktan uzaklık grafiği	87
Şekil 6.3.	% 40 talk katkılı PP malzeme maksimum dayanım-yolluktan uzaklık grafiği	88
Şekil 6.4.	PP-PE malzeme - standart enjeksiyon mikroskop görüntüsü (8000 büyütme)	89
Şekil 6.5.	PP-PE malzeme - MuCell % 8 ağırlık düşüşü mikroskop görüntüsü (x80 büyütme)	90
Şekil 6.6.	% 20 talk katkılı PP malzeme - standart enjeksiyon mikroskop görüntüsü (x80 büyütme)	90
Şekil 6.7.	% 20 talk katkılı PP malzeme - % 4 MuCell mikroskop görüntüsü (x80 büyütme)	91
Şekil 6.8.	% 20 talk katkılı PP malzeme - % 8 MuCell mikroskop görüntüsü (x80 büyütme)	92
Şekil 6.9.	% 20 talk katkılı PP malzeme - % 14 MuCell mikroskop görüntüsü (x80 büyütme)	92
Şekil 6.10.	% 40 talk katkılı PP malzeme - standart enjeksiyon mikroskop görüntüsü (x80 büyütme)	93
Şekil 6.11.	% 40 talk katkılı PP malzeme - % 4 MuCell mikroskop görüntüsü (x80 büyütme)	93
Şekil 6.12.	% 40 talk katkılı malzeme - % 8 MuCell mikroskop görüntüsü (x80 büyütme)	94
Şekil 6.13.	ABS malzeme - standart enjeksiyon mikroskop görüntüsü (x80 büyütme).....	94
Şekil 6.14.	ABS malzeme - % 8 MuCell mikroskop görüntüsü (x80 büyütme).....	95
Şekil 6.15.	ABS-PC malzeme - % 8 MuCell mikroskop görüntüsü (x80 büyütme).....	95

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 1.1.	Plastikler içerisinde bulunan katkı malzemeleri.....	5
Tablo 1.2.	Sentetik polimerlerin tarihsel gelişimi	6
Tablo 1.3.	Plastiklerin sınıflandırılması	8
Tablo 1.4.	Yolcu bölmesindeki plastik parça kullanım fonksiyonları ve oranları	14
Tablo 1.5.	Otomotivde kullanılan termoplastik malzemeler	17
Tablo 3.1.	Çözünme evresine etki eden parametreler	43
Tablo 3.2.	Çekirdeklenme evresine etki eden parametreler	45
Tablo 3.3.	Gözenek büyümesine evresine etki eden parametreler	46
Tablo 5.1.	Hammadde özellikleri	68
Tablo 5.2.	Hammadde kurutma işlemi parametreleri	71
Tablo 6.1.	PP-PE malzeme deneme parametreleri ve maliyet analizi.....	79
Tablo 6.2.	% 20 talk katkılı PP malzeme deneme parametreleri ve maliyet analizi-1	80
Tablo 6.3.	% 20 talk katkılı PP malzeme deneme parametreleri ve maliyet analizi-2	80
Tablo 6.4.	% 40 talk katkılı PP malzeme deneme parametreleri ve maliyet analizi	81
Tablo 6.5.	ABS malzeme deneme parametreleri ve maliyet analizi	82
Tablo 6.6.	ABS-PC malzeme deneme parametreleri ve maliyet analizi	83
Tablo 6.7.	PP malzeme çekme testi sonuçları	84
Tablo 6.8.	% 20 talk katkılı PP malzeme çekme testi sonuçları.....	86
Tablo 6.9.	% 40 talk katkılı PP malzeme çekme testi sonuçları.....	87

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Kısaltmalar

ABS	: Acrylonitrile-Butadiene-Styrene (Akrilonitril Bütadien Stiren)
Ar	: Argon
ASA	: Acrylonitrile-Styrene-Acrylate (Akrilonitril Stiren Akrilat)
C	: Karbon
CO ₂	: Karbondioksit
H	: Hidrojen
HDPE	: High Density Polyethylene (Yüksek Yoğunluklu Polietilen)
He	: Helyum
LCP	: Thermotropic Polyester (Termotropik Polyester)
LDPE	: Low Density Polyethylene (Düşük Yoğunluklu Polietilen)
N ₂	: Azot
PA	: Polyamid (Poliamid)
PAI	: Polyamide-imide (Poliamid imid)
PBT	: Polybutylene Terephthalate (Polibütilen Tereftalat)
PC	: Polycarbonate (Polikarbonat)
PE	: Polyethylene (Polietilen)
PEEK	: Polyether Ether Ketone (Polietet Eter Keton)
PET	: Polyethylene Terephthalate (Polietilen Tereftalat)
PLA	: Polylactic acid (Polilaktikasit)
PMDA	: Pyromellitic Diandride (Piromelitik Diandrit)
POM	: Polyoxymethylene (Polioksimetilen)
PP	: Polypropylene (Polipropilen)
PS	: Polystyrene (Polistiren)
PVC	: Polyvinyl chloride (Polivinilklorür)
SCF	: Super Critical Fluid (Süper Kritik Akışkan)
Tg	: Camısı Geçiş Sıcaklığı
Tm	: Erime Sıcaklığı
TPE	: Thermoplastic Elastomer (Termoplastik Elastomer)
TPO	: Thermoplastic Olefin (Termoplastik Olefin)
TPX	: Polymethylpentene (Polimetilpenten)
UV	: Ultraviyole

MİKRO GÖZENEKLİ ENJEKSİYON KALIPLAMA YÖNTEMİNİN OTOMOTİV UYGULAMALARI

ÖZET

Mikro gözenekli enjeksiyon kalıplama yöntemi, polimer bazlı hammaddenin süper kritik akışkan (SCF) haline getirilmiş bir fiziksel köpürtme ajanı yardımı ile mikro gözenekli bir iç yapının eldesi amacıyla kullanılan, bir plastik enjeksiyon prosesidir. Bu teknoloji ticari olarak MuCell adıyla anılmaktadır. MuCell yöntemi fiziksel köpürtme ajanı etkisi ile standart enjeksiyon yöntemine göre viskozite, çevrim süresi ve kapama tonajı düşüşü, ağırlık düşüşü ve hammadde tasarrufu, daha iyi boyutsal kararlılık ve çarpılma özellikleri sağlaması açısından avantajları beraberinde getirmektedir. Bu çalışmada, her iki yöntemin seri üretim koşullarında karşılaştırılması ve MuCell yöntemi için tasarım girdileri elde edilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla, iki farklı otomotiv parçası kalıbı ve Polipropilen-Polietilen (PP-PE) kopolimeri, % 20 ve 40 talk katkılı polipropilen, Akrilonitril bitadien strien (ABS) ve Akrilonitril bütadien stiren-Polikarbonat (ABS-PC) gibi beş farklı otomotiv plastiği kullanılarak seri üretim koşullarında MuCell ve standart enjeksiyon üretimleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen numunelere çekme testi ve mikro yapı incelemesi uygulanmıştır. Daha sonra her iki yöntem için üretim parametreleri, parça başı maliyet, mekanik ve morfolojik özellikler açılarından karşılaştırmalar yapılmıştır. Sonuç olarak, MuCell yönteminin otomotiv parçalarının seri üretimine uygun olduğu, hammadde tüketimi, gerekli makine tonajı, çevrim süresi açısından avantajlar sağladığı ve bunların parça başı maliyette kazanç elde edilmesini sağladığı saptanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Ağırlık Düşüşü, Mikro Gözenekli Enjeksiyon Kalıplama, Otomotiv Plastikleri, Plastik Enjeksiyon.

MICROCELLULAR INJECTION MOLDING METHOD IN AUTOMOTIVE APPLICATIONS

ABSTRACT

Microcellular injection molding is a molding process which is used to obtain cellular microstructure with the help of a supercritical fluid (SCF) as a physical foaming agent for polymer-based raw materials. The commercial name of this method is called as MuCell. With the aid of supercritical fluid (SCF), MuCell method is superior in lower melt viscosity, less cycle time, clamping force reduction, weight reduction, less shrinkage and warpage, better dimensional stability compared to conventional injection molding method. In this study, it is aimed to compare these methods in mass production and to obtain design inputs of MuCell methods. In order to maintain these goals, five different raw materials; copolymer of Polypropylene-Polyethylene (PP-PE), % 20 and 40 talc filled Polypropylene, Acrylonitrile-Butadiene-Styrene (ABS) and Acrylonitrile-Butadiene-Styrene - Polycarbonate (ABS-PC) were injected into two different automotive parts' mold by using conventional injection molding and MuCell methods. Tensile tests and microstructural characterizations were applied. Afterwards, the conventional injection molding and MuCell methods were compared regarding to process parameters, unit cost, mechanical and morphological properties of manufactured parts. It is concluded that, MuCell method can be used to manufacture automotive parts. Furthermore, shorter cycle times, decrease in raw material usage, decrease in clamping force are determined as the most important beneficial outcomes of MuCell method, thus resulting cost reduction for plastic automotive parts.

Keywords: Weight Reduction, Microcellular Injection Molding, Automotive Plastics, Injection Molding.

GİRİŞ

Son yıllarda otomotiv sektöründe artan rekabet, araçların yakıt tüketimlerinin azaltılmasını önemli bir çalışma alanı haline getirmiştir. Geçtiğimiz on yıla bakarsak yakıt tüketimi için verimli motor-şanzıman tasarımları ile beraber en büyük çalışma araçların ağırlıklarını azaltma konusunda gerçekleştirilmiştir.

Bu noktada, öncelikle yüksek yoğunluğa sahip metal malzemeler yerine, daha düşük yoğunluk ve yüksek spesifik mukavemet değerlerine sahip polimerik malzemelere geçiş çalışmaları yapılmıştır. Günümüz otomobil tasarımlarına göz attığımızda, plastik malzeme kullanımı ciddi boyutlara ulaşmıştır. Plastik malzemelere geçiş hala önemini koruyan ve sürdürülen bir çalışma olması ile beraber, plastik hammadde tüketimindeki artış araç üreticileri açısından sorun teşkil eden bir konudur. Dünya üzerindeki petrol rezervlerinin gün geçtikçe azaldığı düşünüldüğünde, plastik hammadde fiyatlarının ileriki yıllarda düşmesi beklenmemektedir. Bu da plastik hammadde kullanımını azaltılmasını yeni araştırma konusu haline getirmiştir.

Plastik hammadde tasarrufu sağlama konsundaki çalışmalardan birisi 1984-1998 yılları arasında Dr.Nam Suh ve öğrencileri tarafından MIT’de (Massachusetts Institute of Technology) yapılan çalışmalardır. Bu çalışmalar sonucunda mikro gözenekli plastik enjeksiyon yönteminin (microcellular injection molding) keşfi gerçekleştirilmiştir. Gelişimini 2000’li yıllarda tamamlayan bu yöntem MuCell ticari adı ile anılmaktadır ve bu çalışma içerisinde de bu ismi kullanılarak anlatılacaktır.

MuCell iç yapısında mikro boyutta gözeneklere sahip parçaların üretimini mümkün kılan, bir çeşit plastik enjeksiyon yöntemidir. Standart enjeksiyon yönteminden farklı olarak bu yöntemde kovan içerisine süper kritik akışkan (SCF) haline getirilen bir fiziksel köpürtme ajanı gönderilmektedir. Kovan içerisine giren SCF eriyik haldeki malzeme içerisinde çözünerek tek fazlı bir çözelti oluşmasını sağlamaktadır. Daha sonra kalıp boşluğuna enjekte edilen çözelti içerisindeki gaz molekülleri ani basınç düşüşü sebebi ile çökelerek parça içerisinde mikro boyutta gözenekler elde

edilmektedir. Ticari olarak en sık kullanılan fiziksel köpürtme ajanları Azot (N₂) ve Karbondioksit (CO₂) gazlarıdır.

Yukarıda basitçe anlatılan yöntem sayesinde malzeme viskozitesi, parça ağırlığı ve hammadde tüketimi, gerekli kapama kuvveti, çevrim süresi açılarından düşüş elde edilebilmektedir. Ayrıca bu yöntemde parça içerisindeki gaz moleküllerinin parça yüzeyine yaptığı basınç sayesinde standart enjeksiyon yönteminde önemli bir parametre olan tutma basıncı elimine edilmekte ve daha iyi boyutsal kararlılık ve daha az çarpılma elde etmek mümkündür.

Sağladığı viskozite düşüşü sayesinde daha geniş bir parça tasarımı imkanı sağlayan MuCell, parça ağırlığı ve hammadde tüketiminde sağladığı düşüş ile de otomotiv sektöründe önem arz eden bir üretim yöntemidir.

Tez çalışması kapsamında standart enjeksiyon ve MuCell yöntemleri kullanılarak otomotiv parçaları üretimi gerçekleştirilmiştir. Üretimlerde Polipropilen (PP) bazlı üç (PP-PE kopolimer, % 20 talk katkılı PP, % 40 talk katkılı PP) ve Akrilonitril bütadien stiren (ABS) bazlı iki (ABS, ABS-PC) otomotiv plastiği kullanılmıştır. Her malzeme için kendi akış karakteristiğine uygun gelecek şekilde iki otomotiv parçasından (motor alt kapama parçası, üst rüzgarlık parçası) bir tanesi seçilmiş ve o parça kalıbında üretimi gerçekleştirilmiştir.

Her iki yöntem ile görsel ya da boyutsal kusuru bulunmayan parçaların üretimi amaçlanmış ve her üretim en az otuz baskı alınacak şekilde sürdürülmüştür. Yapılan otuz baskılık üretimlerde parçaların görsel kusura sahip olamaması durumunda üretimler tamamlanmış ve parçaların boyutsal kontrolleri yapılmıştır. Kontroller esnasında hata ya da tolerans dışı boyut gözlenmesi durumunda üretim yeniden optimize edilerek tekrarlanmıştır.

MuCell yöntemi ile yapılan üretimlerde maksimum ağırlık düşüşü hedeflenmiş ve buna göre proses optimizasyonu işlemi uygulanmıştır. Her malzemeye göre farklı oranlarda ağırlık düşüşleri elde edilmiştir.

Çalışma sonucunda her iki yöntem parça başı maliyet açısından analiz edilerek üretim parametreleri ve maliyet açısından karşılaştırılmıştır. Ayrıca üretimler

sonucunda elde edilen numunelere çekme testi uygulanmış ve iç yapı gözlemleri yapılmıştır.

Test numunesi almak için parçaların üzerinde bir yolluk bölgesi belirlenmiş ve belirlenen yolluk bölgesinden, yolluk giriş noktasına farklı uzaklıklarda üç test numuneleri kesilmiştir. Çekme testleri üç tekrarlı olarak gerçekleştirilmiştir. Çekme testi sonuçlarında her malzeme için iki farklı yöntem birbiri ile kıyaslanmıştır. Ayrıca her iki üretim yöntemi için de yolluktan uzaklık mesafesine göre çekme dayanımının değişimi gözlemlenmiştir.

Bu çalışmada elde edilen sonuçlar ışığında iki yöntem arasındaki farklar çeşitli açılardan ortaya konulup olası otomotiv uygulamaları için tasarım girdileri oluşturmak hedeflenmiştir.

Literatür çalışmaları incelendiğinde, yapılan çalışmaların büyük çoğunluğunda test çubuğu gibi küçük parçaların üretildiği ve küçük tonajlı makinelerin kullanıldığı görülmüştür. Bu bağlamda, 1600 ton kapama kuvveti kapasitesine sahip enjeksiyon makinesi ile ağırlıkları 1 kg'ı bulan parçaların seri üretim şartlarında üretilmesi ve incelenmesi çalışmanın özgünlüğü açısından önemli bir özelliğidir.

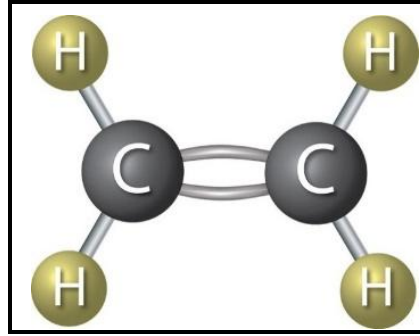
MuCell yöntemi ülkemizde halen yaygın olmayan bir üretim yöntemidir. Yerli kaynaklar araştırıldığında MuCell yöntemi ile ilgili çok az ve yüzeysel bilgilere ulaşılmıştır. Bu nedenle gerek yöntemin detaylı anlatımı gerekse yapılan deneysel çalışmalar ile bu tez çalışması, Türkçe literatür açısından önem arz etmektedir.

Yüksek lisans tez çalışmasının ilk iki bölümünde, otomotiv plastikleri ve plastik enjeksiyon ile ilgili genel bilgilere yer verilmiştir. Üç ve dördüncü bölümlerde ise MuCell yöntemi detayları ile açıklanarak bu konu hakkında yapılan çalışmalar irdelenmiştir. Beşinci ve daha sonraki bölümlerde ise yapılan deneysel çalışmalar anlatılmış ve sonuçları yorumları ile birlikte verilmiştir.

1. OTOMOTİV PLASTİKLERİ

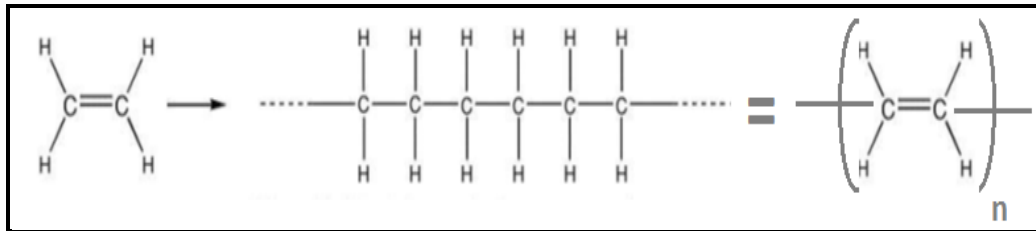
1.1. Polimer ve Plastik

Polimerler, monomer olarak adlandırılan küçük moleküllerin tekrarlı bir şekilde birbirine bağlanması sonucunda ortaya çıkan zincirli, büyük moleküllerdir. Şekil 1.1’de en basit ve en yaygın monomer olan etilenin şematik gösterimi verilmiştir. Şekil üzerinde görüldüğü üzere etilen molekülü iki adet C (karbon) ve dört adet H (hidrojen) atomundan meydana gelmektedir.



Şekil 1.1. Etilen molekülü

Etilen moleküllerinin polimerizasyonu ile çift karbon bağlarının açılması ve diğer etilen molekülleri ile bağlanması sonucunda polietilen polimeri elde edilmektedir (Şekil 1.2).



Şekil 1.2. Polietilen zinciri

Polimerler zincirleri üzerinde bulunan monomer sayısı, polimerleşme derecesini belirler. Şekil 1.2’deki n değeri polimerleşme derecesini sembolize etmektedir. Polimerleşme derecesi bir polimerin molekül kütlesini karakterize eder [1].

Temel olarak polimer ve plastik aynı malzemeyi ifade etse de aralarında farklılıklar vardır. Plastik, içerisinde proses sırasında karşılaşılan ısı, sürtünme, akışa karşı direnç, oksidasyon gibi zorlayıcı şartları minimize etmek ve depolama-kullanım esnasında maruz kalınan ısı değişimleri, ışık, oksijen, kimyasal ve neme karşı direnci arttırmak amacı ile eklenen katkı malzemeleri bulunan polimer bazlı malzemelerdir. Plastikler içerisinde bulunan katkı malzemelerinin bir kısmı Tablo 1.1’de verilmiştir [1-2].

Tablo 1.1. Plastikler içerisinde bulunan katkı malzemeleri

Antioksidantlar
Isı ve UV stabilizörleri
Takviye malzemeleri (Dayanım artırıcı)
Plastikleştiriciler
Bağlayıcılar
Renklendiriciler
Dolgu maddeleri
Kaydırıcılar ve işlemeyi kolaylaştırıcılar
Köpürtücüler
Kalıp ayırıcılar

1.2. Plastiğin Tarihçesi ve Özellikleri

Plastik, günümüzde hayatımızın her alanında karşımıza çıkmaktadır. Evimizin içerisinde kullandığımız birçok alet-cihazın üretiminde, taşıtlarımızın iç ve dış bölümlerinde, giydiğimiz kıyafetlerde, satın aldığımız gıdaların paketlenmesinde, yani neredeyse gün içerisinde etkileşime girdiğimiz herşeyde plastiğe rastlamaktayız. Plastik malzemelerin bu kadar yaygın kullanım alanı bulmasındaki en büyük etken şüphesiz işleme ve tasarımda getirdiği kolaylıklardır.

Plastik endüstrisinin, J. Hyatt’ın 1868 yılında yarı sentetik bir polimer olan selüloitin ticari üretimini gerçekleştirmesi ile başladığı kabul edilmektedir. Ancak doğal polimerlerin kullanımı 1400’lerde Christopher Columbus’un Haiti yerlilerinin oynadığı doğal kauçuk toplardan bahsettiğini göz önünde bulundurursak çok daha eski zamanlara dayanmaktadır. İlk tam sentetik polimer ise 1909 yılında L. Baekland tarafından keşfedilen bakalit polimeridir. Fenol-formaldehit reçinesi olan Bakalit, telefon ahizeleri gibi plastik ürünlerin yapımında kullanılmıştır. Bakalitin ticari üretimi ile günümüzdeki modern plastik sanayinin temeli atılmıştır [3].

1924'te H.Staudinger tarafından gerçekleştirilen kapsamlı çalışmalara kadar polimer iç yapısı hakkında kesin bilgiler mevcut değildi. Staudinger çalışmaları ile polimerlerin zincir şeklinde makro moleküllerden oluştuğunu ve bu moleküllerin birbirleri ile kovalent bağlanan küçük ünitelerden meydana geldiğini kanıtlamıştır. Bu gelişme ışığında polimer endüstrisi hızla gelişmiş ve birçok polimer malzeme geliştirilmiştir [4]. Günümüze kadar geliştirilen sentetik polimerler sırası ile Tablo 1.2'de verilmiştir [5].

Tablo 1.2. Sentetik polimerlerin tarihsel gelişimi

Polimer	Yıl	Polimer	Yıl
Selüloit	1870	Polipropilen	1959
Fenolikler	1909	Poliasetal	1959
Akrilikler	1926	Klorlanmış polieter	1959
Anilin-formaldehit	1926	Fenoksi	1962
Selüloz asetat	1927	İyonomerler	1964
Üre formaldehit	1928	Polifenilinoksit (Noryl)	1964
Polimetil metakrilat	1931	Perilen	1965
Etil selüloz	1931	Polibütillen	1965
Polivinilklorür (PVC)	1936	Poli 4-metil penten (TPX)	1965
Polivinil asetat	1938	Polibenzimidazol	1965
Polivinil bütiral	1938	Polisülfon	1965
Polistiren	1938	Poliäten sülfid	1966
Poliamid (naylon 6-6)	1939	Trogamid-T	1966
Poliäten (LDPE)	1939	Poliarileter	1968
Melaminler	1939	Polipropilen sülfid	1968
Polivinilidenklorür	1939	Polibütillen tereftalat	1971
Polyesterler	1942	Aromatik poliamidler	1972
Silikonlar	1943	(kevler)	
Politetrafloro etilen (Teflon)	1943	Poliamid-imin (PAI)	1973
Poliäten tetrafat (PET)	1945	Aromatik polyester	1974
Akilonitril bütadien stiren	1946	Poliarilat (Ardel)	1978
Epoksi	1947	Polieter-eter keton (PEEK)	1982
Poliüretan	1953	Polieterimid (Ultem)	1982
Poliäten (HDPE)	1954	Termotropik polyester	1984
Polikarbonat	1958	(LCP)	

Plastiklerin özelliklerinden basitçe bahsetmek gerekirse, 0,8-2,2 g/cm³ arasında değişen düşük yoğunluklara sahiplerdir. Düşük yoğunlukları günümüzde hafifletme çalışmaları amacıyla diğer malzemelerin yerine kullanılmasını sağlamaktadır.

Plastiklerin ısı ve elektrik iletkenlikleri özellikle metallere göre daha düşüktür. Hafif ve yalıtkan olmaları elektrik ve elektronik sektörü gibi alanlarda bolca kullanım alanı

bulmasını sağlamaktadır. Isıl iletkenliklerinin metallere göre düşük değerlerde olması nedeniyle plastikler ısı yalıtımı alanında da kullanılmaktadır.

Günümüzde metallerin en büyük problemlerinden birisi olan korozyon ve kimyasallara karşı direnç konusunda da plastikler büyük avantajlara sahiptir. Metallerden farklı atomik bağlara sahip olan polimerler, yüksek korozyon ve kimyasallara karşı dirence sahiptir.

Plastikler, metal ve seramiklere göre düşük mekanik özelliklere sahiptirler. Ancak fiberler gibi takviye malzemeleri ile beraber kullanımları sayesinde metal ve seramiklere yakın dayanımlara sahip olabilmektedirler. Düşük yoğunluğa sahip olmaları ise polimer matrisli kompozitlerin metal ve seramiklere göre daha yüksek spesifik mukavemet değerlerine sahip olmasını sağlayabilmektedir.

Bazı plastikler ise saydam bir görünüme sahiptirler. Bu özellik plastiklerin gözlük camı, kompakt disk, optik disk üretimine uygun kılmaktadır. Saydam görünümlü bu plastik malzemeler camdan daha kolay işlenebilmelerinin yanında oldukça gelişmiş optik ve mekanik özelliklere sahiptirler.

Plastik malzemeler 120-320°C gibi bir işleme sıcaklığı ve diğer malzemelere kıyasla düşük kuvvet ile işlenebilme özelliğine sahiptir. Bu avantajları sayesinde plastikler seri üretime uygun malzemelerdir. Seri üretimin getirdiği yüksek yatırım maliyetleri, üretim esnasında elde edilen enerji tasarrufu ile karşılanabilmektedir.

İşleme sıcaklıklarının düşük olması üretim ve ekonomik açıdan fayda sağlamasına karşın plastiklerin çalışma sıcaklıklarının düşük olmasına neden olur. Bu da plastik parçaların kullanım alanlarını sınırlamaktadır. Ayrıca plastikleri çalışma sıcaklıkları içerisinde sürünme dayanımları düşük olduğundan takviye edilmeden yük taşıyıcı olarak kullanılması sakıncalıdır.

1.3. Plastiğin Sınıflandırılması

Plastikler elde edilmelerinde, özelliklerinin incelenmesinde, işlenmesinde önemli olan çeşitli kriterlere göre sınıflandırılarak belli gruplara ayrılırlar. Plastikler: kökenine, sentezlenme tepkimesine, zincirlerinin yapısına, zincirlerinin uzaysal

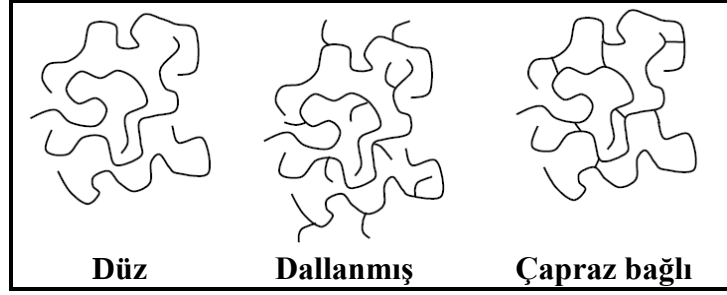
yönelimine, ısı davranışına ve kristalliliğine göre sınıflandırılabilirler (Tablo 1.3) [6, 8].

Tablo 1.3. Plastiklerin sınıflandırılması

Kökenine göre	Doğal Yarı Sentetik Sentetik
Sentezlenme tepkimesine göre	Katılma polimerizasyonu Basamaklı polimerizasyon
Zincir yapısına göre	Düz (lineer) Dallanmış Çapraz bağlı
Zincirlerin uzaysal yönelimine göre	İzotaktik Sindiyotaktik Ataktik
Isıl davranışlarına göre	Termoplastikler Termosetler Elastomerler
Kristalliliğine göre	Amorf Yarı Kristalin Kristalin

Plastikler, zincirlerinin fiziksel ve kimyasal yapılarına göre üç gruba ayrılırlar. Bunlar, düz, dallanmış ve çapraz bağlı zincir yapılarıdır. Düz zincir yapısında monomerler tek sıra dizilmiş haldedirler. Dallanmış yapıda ise monomerler zincirlerin belirli bölgelerinden bağlanarak dallanma gösterirler. Düz ve dallanmış yapıdan farklı olarak çapraz bağlı zincir yapısında zincirler birbirlerine kuvvetli kovalent bağlar ile balanmışlardır. Bu tip polimerler üç boyutlu polimerler olarak adlandırılır (Şekil 1.3) [3, 6].

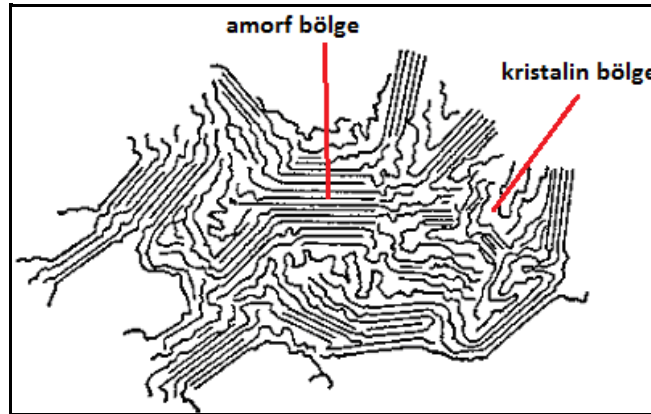
Plastiklerin en önemli sınıflandırmalarından birisi de ısı davranışlarına göre yapılanıdır. Plastikler ısı davranışlarına göre, Termoplastik, Termoset ve Elastomer olarak üçe ayrılırlar. Günümüz plastik sektöründe de plastik üretim yöntemleri plastiklerin bu özelliklerine göre değişkenlik göstermektedir.



Şekil 1.3. Plastiklerin zincir yapıları zincir yapıları

Bilimsel olarak termoplastik ve termosetler arasında ayrım esasen moleküllerin şekillerine göre yapılır. Bu bakımdan termoplastikler düz (lineer) moleküllere, termosetler ise üç boyutlu çapraz bağlı moleküllere sahip malzemelerdir [4].

Zincir yapılarının dışında zincirlerin birbirine göre konumu da plastiklerin özelliklerine etki etmektedir. Örneğin düz zincirler, birbirlerine dallanmış zincirlerden daha fazla yaklaşabilmektedir. Zincirlerin birbirine yaklaşması ise aralarındaki bağ kuvvetini artırır ve paketlenmiş bir yapıyı oluşturur. Oluşan bu kısmen düzenli yapı kristalin yapı olarak adlandırılır. Dallanmış zincirler ise birbirlerine yeterince yaklaşamazlar. Bu nedenle düzensiz amorf yapıyı oluştururlar [4].



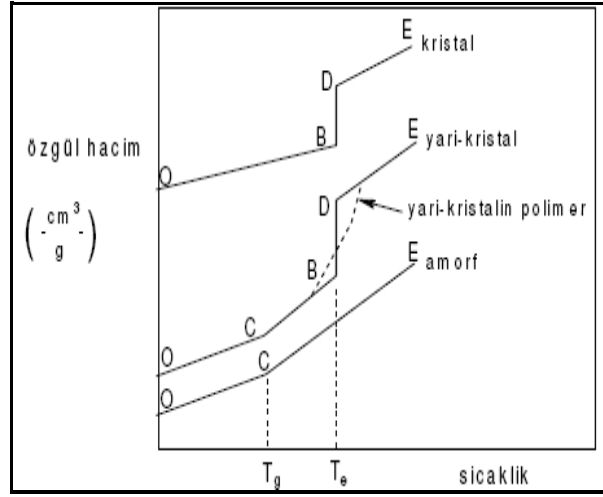
Şekil 1.4. Yarı kristalin plastik iç yapısı

Şekil 1.4'te yarı kristalin yapıdaki bir plastiğin iç yapısı şematik olarak verilmiştir. Şekil üzerinde de görüldüğü üzere birbirlerine yakın ve düzenli haldeki yapılar kristalin, birbirine uzak ve düzensiz yapılar amorf bölgeleri temsil etmektedir.

1.3.1. Termoplastikler

Termoplastikler fiziksel olarak düz ve dallanmış zincir yapısına sahiptirler. Termoplastikler zincirlerin dizilimine göre amorf, yarı kristalin ya da kristalin yapıda olabilirler ve zincirleri arasında zayıf Van der Walls bağları bulunur [7].

Amorf termoplastikler camsı geçiş (T_g), yarı kristalinler camsı geçiş ve erime sıcaklığı (T_m), kristalinler ise sadece erime sıcaklığı gösterirler. Plastik endüstrisinde tam kristalin malzeme üretimi mümkün değildir. Bu nedenle kullanılan termoplastikler yarı kristalin ya da amorf yapıdadırlar (Şekil 1.5).



Şekil 1.5. Amorf, yarı kristalin ve kristalin polimerlerin termal davranışları

Termoplastikler ısıtılıp T_g üzerine çıkarıldığında, zincirleri arasındaki zayıf bağlar çözülüp zincir hareketleri kolaylaştığı için yumuşayarak viskoelastik davranış gösterirler. Bu sıcaklık değerlerinde termoplastiklerin şekillendirilmesi kolaydır. Amorf yapıdaki termoplastikler T_g üzerinde ısıtmaya devam edilirse erime göstermez ve zamkimsi bir yapıya bürünürler. Kristalin termoplastikler ise T_m değerine geldiklerinde sıvı hale geçiş yaparlar.

Amorf ve kristalin olmasına göre yüksek sıcaklıklara farklı tepki verseler de tüm termoplastikler tekrar soğutulmaları halinde eski hallerine dönerler (bozunma sıcaklığına çıkılmadığı takdirde). Bu özellikleri termoplastiklerin geri dönüşümünü ve tekrar tekrar işlenebilmesini sağlamaktadır.

1.3.2. Termosetler

Termosetler, yapılarında yüksek oranda çapraz bağ içeren ağ yapılı (üç boyutlu) plastiklerdir. Termoplastiklerin aksine termosetler ısıtıldıklarında yumuşamazlar. Bunun nedeni yapılarında bulunan kuvvetli çapraz bağların (kovalent bağlar) zincir hareketlerini kısıtlamasıdır. Isıtılan termosetler yumuşamanın dışında erime de göstermezler. Sıcaklık etkisi ile sertleşen ağ yapı malzemenin bozunmasına sebep olmaktadır [4, 7].

Termoset üretimi ise reçine halindeki ön polimerin çeşitli katkı malzemeleri (çapraz bağ yapıcılar gibi) karıştırılarak yüksek sıcaklıkta kürlenmesi ile gerçekleştirilir. Kürlenene kadar istenilen şekle sokulabilen malzeme bu işlem sonrasında sıcaklık ile şekillendirilemez. Ancak çubuk, şerit, levha ve kütük şeklinde üretilen termosetler talaşlı şekil verme yöntemleri ile işlenebilmektedir [9].

Termosetler, termoplastiklere göre yüksek çalışma sıcaklığına, yüksek mekanik özelliklere, yüksek yüzey kalitesine, yüksek sertliğe ve boyutsal kararlılığa sahiptirler [3].

1.3.3. Elastomerler

Elastomerler, kristallenmeye dirençli amorf iç yapıya sahip polimerlerdir ve termosetler kadar yüksek olmasa da çapraz bağ içerirler. Tg değerleri oda sıcaklığının altında olduğundan yüksek sünekliğe ve hareket kabiliyetine sahiptirler.

Elastomerler üretimleri esnasında başta termoplastik malzemelere benzer özellikler taşıırken vulkanizasyon ile çapraz bağ oluşumundan sonra termosetlere benzer özellikler gösterirler.

Elastomerlerin üzerine yük uygulandığında, iç yapısında bulunan amorf zincirler açılarak kuvvet doğrultusundaki boyunun uzamasını sağlar. Buna karşın uygulanan kuvvet kaldırıldığında iç yapısındaki çapraz bağlar sayesinde ilk boyuna geri dönüş yapar [7].

İki çeşit elastomer çeşiti mevcuttur. Bunlardan ilki yapısında çok sayıda çapraz bağ barındıran termoset elastomerlerdir. Elastomerler uzun bir süre termoset grubu

plastik olarak kabul edilmiştir. Ancak daha sonra yapısındaki çapraz bağ miktarı azaltılarak üretilen termoplastik elastomerler (TPE) geliştirilmiştir [10].

TPE'lerin termoset elastomerlere göre en büyük üstünlüğü geri dönüştürülebilir olmalarıdır. Bunun dışında daha kısa çevrim süresi ile üretilmeleri, renklendirilebilmeleri TPE'lerin termoset elastomerler yerine kullanımını sağlamaktadır [10].

1.4. Otomotiv Endüstrisinde Plastiğin Yeri

Bir araba göz önüne alındığında, malzeme giderlenin toplam maliyetin neredeyse yarısını teşkil ettiği görülmektedir. Bu nedenle de malzeme maliyetlerinde elde edilebilecek en küçük azalmanın dahi küresel rekabetin yaşandığı otomotiv endüstrisinde önemi büyüktür. Plastik malzemeler getirdiği ekonomik avantajlar sayesinde otomotiv endüstrisinde önemli bir yere sahiptirler.

Otomotiv endüstrisinde plastiğin ilk kullanımı 1950'lerde ABS malzeme ile gerçekleştirilmiştir. Başlangıçta plastik, elektriksel parçalar ve basit iç donanımlarda maliyet azaltma amacı ile kullanılmıştır. Bu tarihten itibaren binek araçlarda plastik malzeme kullanımı sürekli olarak artış göstermiştir. Günümüzde bir otomobilde ortalama 150 kg plastik malzeme kullanılırken, bu miktar aracın toplam ağırlığının % 10-15'ine tekabül etmektedir. Plastik malzemelerin kullanımının artması araçların toplam ağırlıklarında ciddi düşüşler elde edilmesini ve dolayısıyla yakıt tüketiminin de düşmesini sağlamıştır [11].

Plastiğin otomotiv endüstrisindeki kullanımı artışını en büyük sebebi, II. Dünya Savaşı sonrasında petrol fiyatlarında meydana gelen düşüştür. Başlangıçta, keşfedilen ucuz malzemelere kullanım alanı bulma olarak yapılan çalışmalar, daha sonra plastiğin fiberler gibi takviye elemanları ile birlikte kullanılması ile farklı bir boyuta taşınmıştır. Takviyeli plastikler birçok temel malzemenin mekanik özelliğini sağlayabildiğinden yeni tasarımlar ortaya çıkmış ve plastiğin otomotivde kullanımı daha hızlı bir şekilde artmıştır. Bu artış günümüzde de ivmesini kaybetmeden devam etmektedir [12].

Otomotiv endüstrisi, her geçen gün artan ölçüde yeni taleplerle karşı karşıyadır. Sürücüler sahip olmak istedikleri otomobillerde;

- Daha yüksek performans,
- Daha üstün güvenilirlik ve güvenlik,
- Daha yüksek konfor,
- Daha az yakıt tüketimi,
- Daha güzel stil,
- Daha düşük fiyatlar,
- Çevresel etkilerin minimum boyutta zarara sebebiyet vermesi istenmektedir.

Bu talepler aslında potansiyel olarak birbirine zıttır. Ancak birbirine zıt olan bu talepleri optimum şekilde karşılayan ve geleceğin otomobillerini şekillendirecek olan tek malzeme plastik olarak kabul edilmektedir. Plastiklerin taşıt araçlarında beklenen ve birbirine zıt talepleri optimize eden üstün özellikleri şunlardır;

- Düşük yoğunluk ve yüksek spesifik mukavemet değerlerine sahip olması,
- Hafif parçaları meydana getirmesinin daha yüksek güvenlik sağlaması,
- Parça başı maliyetlerinin düşük olması,
- Yüksek görsellik,
- Çok yönlü kullanım sayesinde tasarım özgürlüğü,
- Elektronik parçalarda kullanım imkanı,
- Geri dönüştürülebilme [13].

Aslında plastikler hammadde kilogram fiyatları göz önüne alındığında özellikle çeliklere göre daha yüksek seviyelerdedir. Ancak yoğunluklarının, montaj, ikincil işlem, bakım, kalıp ve ekipman maliyetinin düşüklüğü, daha ucuz ve basit proseslere sahip olmaları, parça başı maliyette plastiklerin büyük avantajlara sahip olmasını sağlamaktadır.

Araçların yakıt tüketimlerinin büyük önem taşıdığı günümüzde plastiklerin metaller yerine kullanılması araç ağırlıklarında büyük düşüşleri de beraberinde getirir. Ayrıca üretim kolaylığının verdiği rahatlık ile çok karmaşık yapılı parçaların tasarımı da plastiklerle mümkündür. Plastiklerin düzgün yüzey kaliteleri ve boyanabilirlikleri görsel parçalarda tercih edilmelerine sebep olmaktadır.

1.4.1. Plastiklerin otomotivdeki kullanım alanları

Otomobillerde plastik kullanımını temel olarak üç bölümde incelemek mümkündür. Bunlar, aracın kontrol panelleri, iç süslemeleri, döşemelerini kapsayan yolcu bölümü/iç giydirme, ışıklandırma, tampon sistemleri, çamurluklar gibi dış parçaları kapsayan yol bölümü/kaporta ve yakıt depolama-temin sistemleri, kanallar ve koruyucu kapak gibi bölümleri içeren motor/kaput altı bölümleridir.

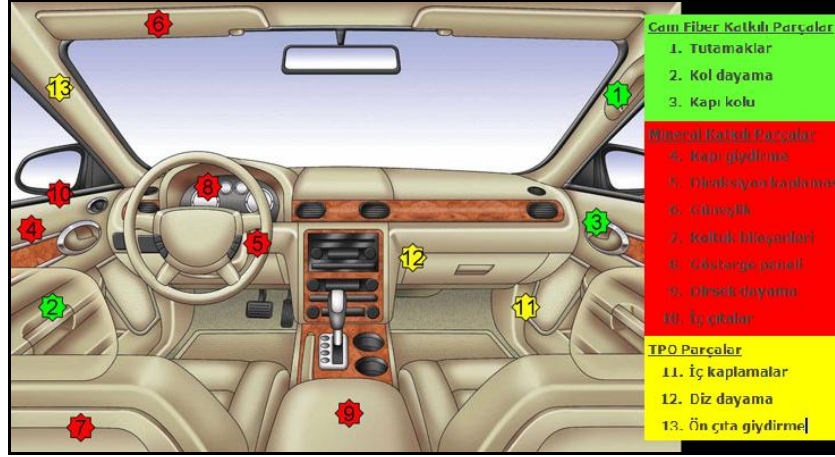
1.4.1.1. Yolcu bölümü / iç giydirme

Herhangi bir otomobilin yolcu bölümünde plastiklerin hakim olduğunu görülebilir. Burası plastiklerin daha geleneksel olarak yerleşmiş olduğu yerdir. Bu bölmede her görsel parçada plastik parça ya da kumaş görmek mümkündür. Dahası bir otomobilde kullanılan plastiğin % 56'sı yolcu bölümünde yer almaktadır. Yolcu bölümündeki plastiklerin kullanım şekline göre oranları Tablo 1.4'te verilmiştir [12].

Tablo 1.4. Yolcu bölümündeki plastik parça kullanım fonksiyonları ve oranları

Kullanım fonksiyonu	% oranı
Katı (dekoratif ya da yarı-yapısal)	38
Köpük	25
Esnek yüzeye ve halılar	20
Akustik kaplamalar	15
Yapısal ve mekanik	2

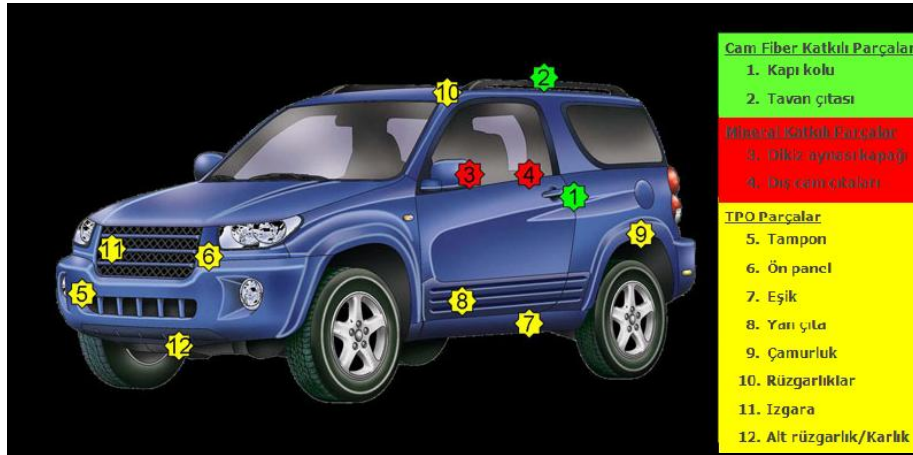
Şekil 1.6'da otomobillerin yolcu bölümünde kullanılan plastik parçalara örnekler bulunmaktadır [14]. Şekilde gösterilenlerin dışında birçok parçayı saymak da mümkündür. Bunlara bir kaç örnek vermek gerekirse; hava yastıkları, pedallar, vites kolu ve levhası, emniyet kemeri, kontrol ve kilit tuşları, kapı iç panelleri, torpidolar, ön göğüs iskeleti sayılabilir.



Şekil 1.6. Araç yolcu bölümü plastik bileşenleri [14]

1.4.1.2. Yol bölümü / kaporta

Günümüzde, araçların kaporta bölümünde de birçok plastik parça kullanımı mevcuttur. Plastikler, esneklikleri, darbe mukavemeti ve korozyon dirençleri ile bu bölümde kullanım alanı bulduğu gibi rijitliği ve yüzek kalitesi ile de kullanım alanı bulabilmektedir. Örneğin araç tamponlarında esnek TPE malzemeler kullanılırken, üst rüzgarlık parçasında, rijit yapıdaki ABS kullanılmaktadır. Bu örnekten de anlaşılacağı gibi esnek mekanik özellikler, plastik malzemenin büyük tasarım avantajına sahip olmasını sağlamaktadır. Şekil 1.7’de araçlarda bulunan dış plastik parçalara örnekler verilmiştir.

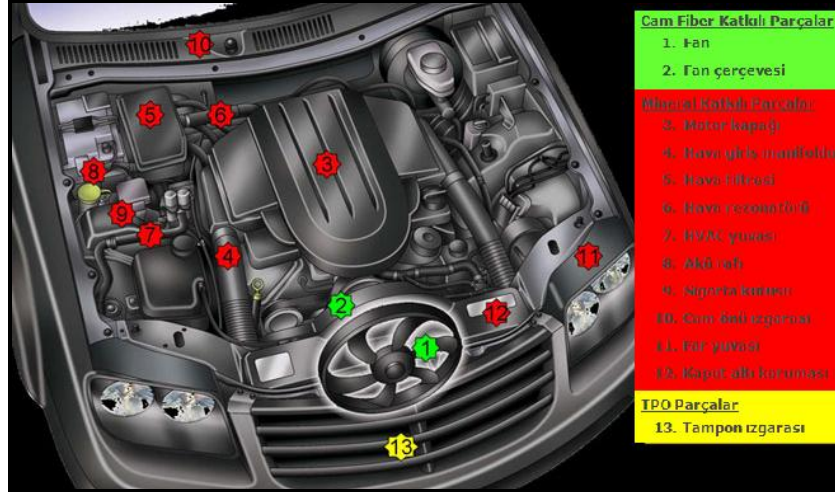


Şekil 1.7. Araç kaporta bölümü plastik bileşenleri [14]

1.4.1.3. Kaput altı / motor bölümü

Son yıllarda plastikler, kaput-altı bölgesini gerçekten işgal etmiş ve hava manifoldları için yaygın şekilde büyük kalıplar kullanılmaya başlanmıştır. Bunlar sadece metal

mukabillerinin yarı ağırlığında olmakla kalmamakta, aynı zamanda mühendislerin motora giren hava akışını en iyi şekilde düzenlemesi sayesinde motorun daha verimli hale getirilmesine yardımcı olmakta önemli bir rol oynamaktadırlar. Şekil 1.8’de kaput altında bulunan çeşitli plastik parçalara örnekler verilmiştir [13-14].



Şekil 1.8. Motor altı bölümünde bulunan plastik bileşenleri [14]

Bir başka önemli gelişme alanı da yakıt sistemleridir. Yakıt tasarrufu yapmak ve emisyonları en alt seviyeye indirmek amacıyla plastik esaslı yakıt depoları üretilmektedir. On yıldan daha uzun bir süredir, ultra-yüksek moleküler ağırlıklı yüksek yoğunluklu polietilenin şişirmeli kalıplamasıyla tamamen plastikten yakıt depoları imal edilmektedir. Ek yeri bulunmayan bu tek parça depolar metal mukabillerine oranla çok daha hafiftir ve aynı zamanda, iyi şekilde kalıplanabildiklerinden, depoların zor yerlere yerleştirilmesi konusunda daha fazla tasarım özgürlüğü sağlamaktadırlar [13].

1.4.2. Otomotivde kullanılan termoplastik malzemeler

Daha önceki bölümlerde de anlatıldığı gibi plastiklerin otomotiv sektöründe kullanım alanı çok geniş bir yelpazede yer almaktadır. Plastikler içinde ise termoplastiklerin kullanım alanı olarak üstünlüğü göze çarpmaktadır. Bunun sebebi termoplastiklerin işlenme kolaylığı ve karmaşık şekilli parçaların seri halde üretimine elverişli olmasıdır. Otomotiv endüstrisinde kullanılan termoplastiklerin listesi Tablo 1.5’ te verilmiştir [11].

Tablo 1.5. Otomotivde kullanılan termoplastik malzemeler

Termoplastikler	Kısaltmalar
Polietilen	PE
Polipropilen	PP
Polivinil klorür	PVC
Polistiren	PS
Akrilonitril bütadien stiren	ABS
Akrilonitril stiren akrilat	ASA
Stiren akrilonitril	SAN
Stiren maleikandrit	SMA
Poliamid	PA
Polibütilen teraftalat	PBT
Polietilen teraftalat	PET
Polimetilen teraftalat	PTT
Polietilen naftenat	PEN
Likid kristal polimerler	LCP
Poliasetal	POM
Polifenileneter	PPE
Termoplastik elastomerler	TPEs
Termoplastik poliolefin elastomerler	TPE-O
Termoplastik poliolefin vulkanizeler	TPE-V
Termoplastik polyester elastomerler	TPE-E
Stiren blok kopolimerler	TPE-S
Termoplastik kopoliamid elastomerler	TPE-A
Termoplastik poliüretanlar	TPE-U

Otomotivde polietilenin en yaygın kullanımı, yüksek yoğunluklu polietilenin basınçlı kalıplanması (şişirme) ile üretilen yakıt tankları ve boru sistemleridir. HDPE malzemenin yakıt tanklarında kullanılmasının nedeni sahip olduğu yüksek kimyasal direnç ve darbe dayanımından gelmektedir.

1.4.3. Otomotiv termoplastiklerine uygulanan üretim yöntemleri

Termoplastik malzemelerin sahip olduğu avantajların onların otomotiv endüstrisinde birçok soruna çözüm olmasını sağlamıştır. Günümüzde termoplastikler, araçlarda bir birinden alakasız birçok bölge ve parçada, farklı fonksiyonları yerine getirmek amacıyla kullanılmaktadır. Kullanım alanlarının ve üretilen parçaların çeşitliliğinin fazla olması termoplastiklerin çok farklı prosesler ile üretimini gerçekleştirilmesine neden olmuştur. Örneğin; termoplastik bir benzin deposunun geometrisi ve ondan istenen özellikler ile torpido ön göğüs parçasının geometri ve beklenen özellikleri birbirinden çok farklıdır. Bu nedenle de özellikle otomotiv endüstrisinde

termoplastik parçaların üretim yöntemleri büyük farklılıklar göstermekte ve sektördeki gelişme hızından dolayı sürekli kendisini yenilemektedir.

Günümüzde birçok yeni üretim yöntemine sahip olsalar da bu özellikle farklı geometrilerin eldesi için kullanılan temel üretim yöntemleri bulunmaktadır. Geliştirilen yeni yöntemler ise daha çok temel yöntemlere ek olarak yapılan çalışmalardır.

Günümüzde otomotiv endüstrisinde termoplastik parça üretiminde kullanılan temel yöntemler;

- Plastik Enjeksiyon Kalıplama,
- Ekstrüzyon,
- Plastik Şişirme (Blow Molding),
- Isıl şekillendirme (Thermoforming),
- Döner Kalıplama (Rotational Molding),
- Döküm,
- Eriyebilir maçalı enjeksiyon (Lost Core Molding),
- Slush Molding,
- Haddeme ,
- Köpük kalıplama, şeklinde sıralanabilir [11].

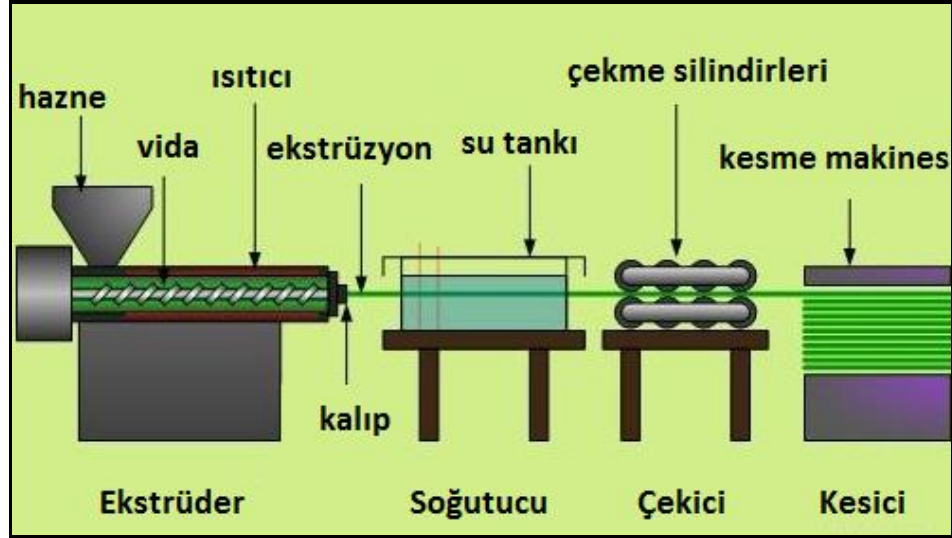
1.4.3.1. Plastik enjeksiyon kalıplama

Termoplastik parçaların üretimi için kullanılan en yaygın yöntem şüphesiz plastik enjeksiyon yöntemidir. Parça geometrisi ve büyüklüğündeki genişlik, düşük çevrim süresi, geniş tasarım olanakları ve düşük parça başı maliyet gibi özellikleri, bu yöntemin yaygın kullanım alanı bulmasının temel sebeplerindendir. Plastik enjeksiyon prosesi tez çalışması içerisinde bulunan bölüm 2’de detaylı bir şekilde anlatılacaktır.

1.4.3.2. Ekstrüzyon

Ekstrüzyon yöntemi, uzunlukları belli olmayan ancak kesitleri sabit olan levha, film, boru, çubuk gibi yarı mamüllerin işlendiği ya da kaplamaların yapıldığı bir yöntemdir. Yöntemde bir besleme ünitesi yardımıyla hammadde granül ya da toz halde ergitme ünitesine iletilir. Bu bölümde tek ya da çift olarak bulunabilen sonsuz

vida sayesinde hammadde ergitilir. Elde edilen eriyik sürekli besleme ile parça formuna sahip nozuldan geçirilerek soğutulur (Şekil 1.9) [20-21].



Şekil 1.9. Plastik ekstrüzyon prosesi

Bu yöntemin en büyük avantajı kalıp ve ekipman maliyetinin düşük olması ve hammadde beslemesi sürdükçe üretimin standart şekilde sağlanabilmesidir. Üretimde elde edilen bu monotonluk parça maliyetlerinde ciddi düşüşün elde edilmesini sağlamaktadır.



Şekil 1.10. Ekstrüzyon ile üretilmiş termoplastik elastomer conta

Otomotivde ekstrüzyon yöntemiyle üretilen parçaların başında ise kablo kaplamaları ile beraber kapı ve pencere kenarlarında kullanılan contalar gelmektedir (Şekil 1.10).

Bunun dışında ise ses yalıtım amaçlı motor bölmesinde bulunan düz parçaların üretimi de bu yöntem ile yapılmaktadır [11].

1.4.3.3. Plastik şişirme

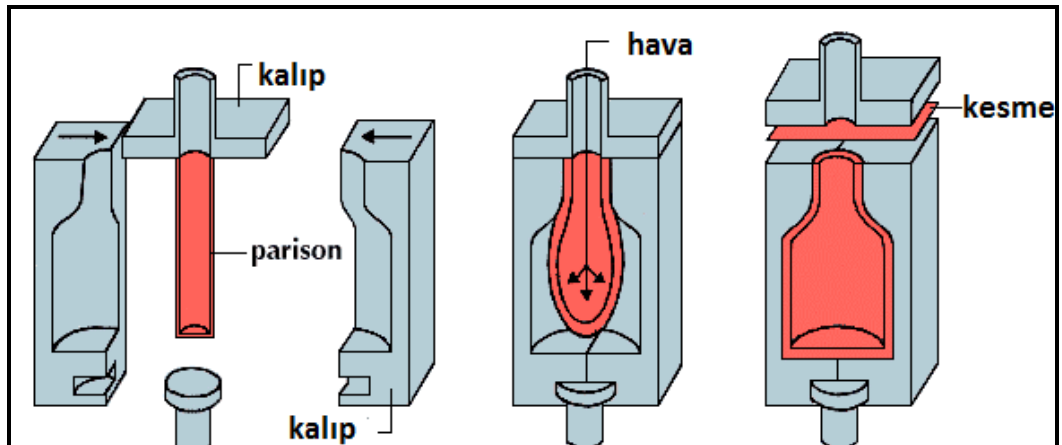
Şişirme kalıpcılığı prosesi, termoplastik malzemelerden içi boş objeler üretmek için kullanılan bir üretim yöntemidir. Bu yöntemle üretilen ürünlerin yaklaşık % 80'i PE ve geri kalan kısmın büyük çoğunluğu PET malzemeden üretilmektedir [1].

Plastik şişirme yöntemi;

- Plastiğin eritilmesi
- Eritilmiş plastiğin içi boş silindir haline getirilmesi (parison)
- Parison'un kalıp içerisinde şişirilmesi ve kalıp çeperlerinde soğuyarak şekillendirilmesi
- Parçanın kalıptan çıkarılması
- Fazlalıkların alınması (trim) basamaklardan oluşmaktadır [20-21].

Eritme ve şekillendirme işlemi ekstrüder' de yapılabildiği gibi enjeksiyon şişirme makinesinde de yapılabilir. Bu iki şişirme yönteminin farklılıkları olmasına rağmen temel olarak şişirme aşaması iki yöntemde de aynıdır.

Plastik şişirme yöntemi otomotiv endüstrisinde genellikle yakıt tanklarının ve klima hava iletim borularının üretiminde kullanılmaktadır [11].



Şekil 1.11. Plastik şişirme yöntemi şematik gösterimi [1]

1.4.3.4. Isıl şekil verme

Isı ile şekillendirme, termoplastik düzlemsel levhaların ısıtılarak, kullanılan kalıplar yardımıyla istenen şeklin verilmesi aşamalarından oluşan bir prosestir. Bununla birlikte ısı ile şekillendirme üretim yöntemiyle, belirli ayrıtlara sahip olan parçalar üretilmektedir.

Isı ile şekillendirme yöntemi, proses içerisinde gerçekleşen süreç göz önüne alındığında iki ana başlık altında incelenebilir. Bu ana başlıkları ısıtma ve şekillendirme olarak sıralayabiliriz. Isıtma, çoğunlukla başlangıçta kullanılan şekil verilecek levhaya altından ve üstünden, yaklaşık olarak 125 mm mesafede konumlandırılmış radyant ısıtıcılarla sağlanır. Levhanın ısıtılmasında, ışınlama ısı geçişi söz konusu olduğundan levha ile ısıtıcı arasında herhangi bir engelleyici unsur bulunmamaktadır. Isıtma aşaması sırasında şekillendirilecek levha, imal edildiği polimer türüne, kalınlığına ve rengine bağlı olarak şekil vermeye uygun sıcaklık seviyesine çıkarılmalıdır. Şekillendirme aşaması söz konusu olduğunda ise, ısı ile şekillendirme yöntemi üç farklı şekilde incelenebilir [1, 20-21].

- Vakum ve ısı şekillendirme
- Basıncılı hava ile ısı şekillendirme
- Mekaniksel ısı şekillendirme.



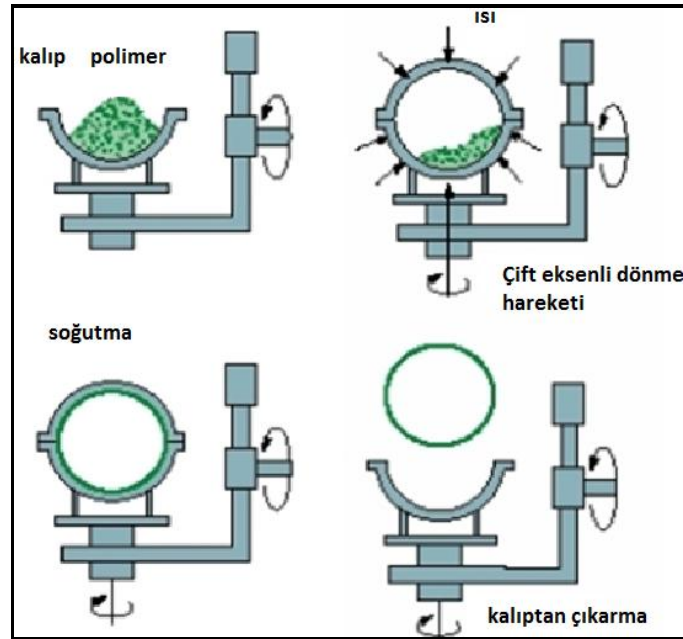
Şekil 1.12. Isıl şekillendirme ile üretilen çeşitli otomotiv parçaları

Otomotiv sektöründe, motor üst koruyucu, oturma birimi parçaları, stepne koruyucusu, dirsek dayama parçaları, jant kapağı, ses yalıtım parçaları ve otomobillerdeki çeşitli bölmeler bu yöntemle üretilirler [1]. Şekil 1.12’de ısıl şekillendirme yöntemi ile üretilen çeşitli otomotiv parçaları verilmiştir.

1.4.3.5. Döner kalıplama

Döner kalıplama, yükleme-boşaltma, ısıtma ve soğutma istasyonlarından oluşan ve düşük basınç gerektiren, öngörülen büyüklük ve biçimlerde, eksiz, içi boş ve sağlam yapılı plastik ürünlerin yapılması için geliştirilmiş yavaş bir prosestir.

Bu yöntemin aslı kuru ve eriyebilir toz halindeki plastiğin bir veya daha çok ekseni etrafında dönen kalıp iç yüzeyinde sıvı hale dönüştürülmesi ve soğutularak biçimlendirilen parçanın dışarı alınmasından ibarettir [20-22].



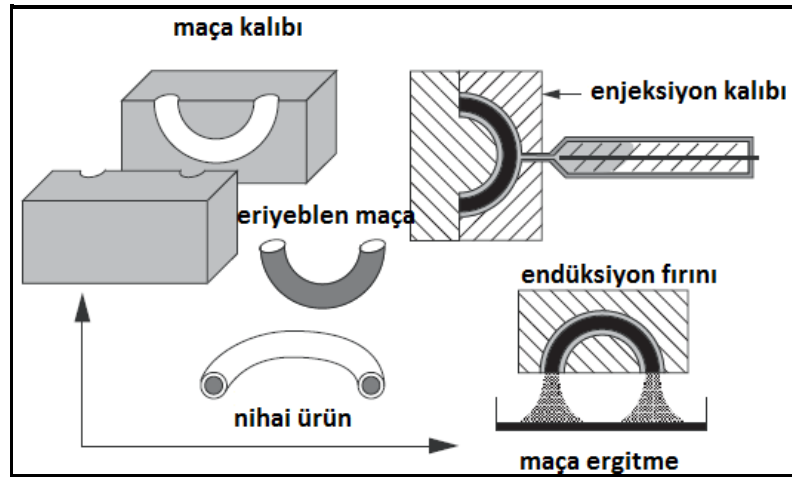
Şekil 1.13. Döner kalıplama yönteminin şematik gösterimi [1]

Döner kalıplamada daha çok ısıya dayanıklı plastikler kullanılsa da son zamanlarda dallanmış zincir ve çapraz bağlı polietilen türleriyle bazı termoset plastiklerin de biçimlendirilmesi yaygınlaşmıştır. Yöntem termoplastik ve termoset malzemelerin şekillendirilmesi için uygundur. Yöntemde; PE, PP ve PVC gibi termoplastikler ile epoksi ve polyester gibi termoset malzemeler şekillendirilebilir [1].

Bu yöntem yüksek çevrim sürelerine sahip olmasına karşın, özellikle Almanya ve İngiltere’de ticari boyutta otomotiv parçası üretimi için kullanılmaktadır. Rover MG RV8 spor model aracının kalorifer muhafazası, Ford ve Audi firmalarının çeşitli parçaları plastik şişirme ile üretilmektedir [11].

1.4.3.6. Eriyebilir maçalı enjeksiyon (lost core molding)

Eriyebilir maçalı enjeksiyon (Lost core molding) yöntemi parçanın karmaşık geometrisinden kaynaklanan kalıptan çıkmama sorununu gidermek amacıyla geliştirilmiş bir yöntemdir. Maçalar ile oluşturulamayan boşluklar kalıp içerisine yerleştirilen erime noktası düşük bir parça üzerine enjeksiyon yapılması ile elde edilmektedir. Yöntemde öncelikle iç parça kalıp içerisine yerleştirilir. Daha sonra kalıp kapatılarak enjeksiyon işlemi gerçekleştirilir. Son olarak içeride kalan iç parça ısı ile ortamdan uzaklaştırılarak istenilen geometri elde edilir (Şekil 1.14) [15, 20].



Şekil 1.14. Lost core molding şematik gösterimi [20]

Eriyebilir maçalı enjeksiyon yöntemi, hava giriş manifoldları, soğutma suyu muhafazası, termostat yuvaları gibi içerisinden akışkan geçen parçaların üretiminde kullanılmaktadır. Şekil 1.15 ‘te lost core molding ile üretilen hava giriş manifoldu görülmektedir.



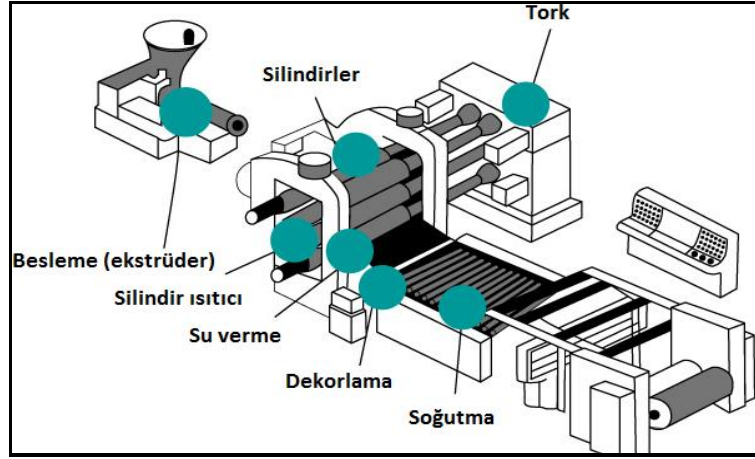
Şekil 1.15. Hava giriş manifoldu [16]

1.4.3.7. Haddeleme

Haddeleme çok eski üretim yöntemlerinden birisidir. Otomotiv plastiklerinde kullanımı ise ekstrüderden gelen levha şeklindeki plastiklerin silindirler arasından geçirilmesi ile gerçekleştirilir. Bu yöntemde amaç levhaların kalınlıklarının istenen boyutlara getirilmesi ve son yüzey işleminin uygulanmasıdır. Genellikle ABS, PVC, ASA (Akrilonitril stiren akrilik ester) ve TPO (Termoplastik oleofin) levhalara uygulanmaktadır. Yöntem ile elde edilen parçalar, araçlarda torpido ön panel, kapı iç kaplama ve tavan döşemesinde kullanım alanı bulabilmektedir (Şekil 1.16) [11, 17]

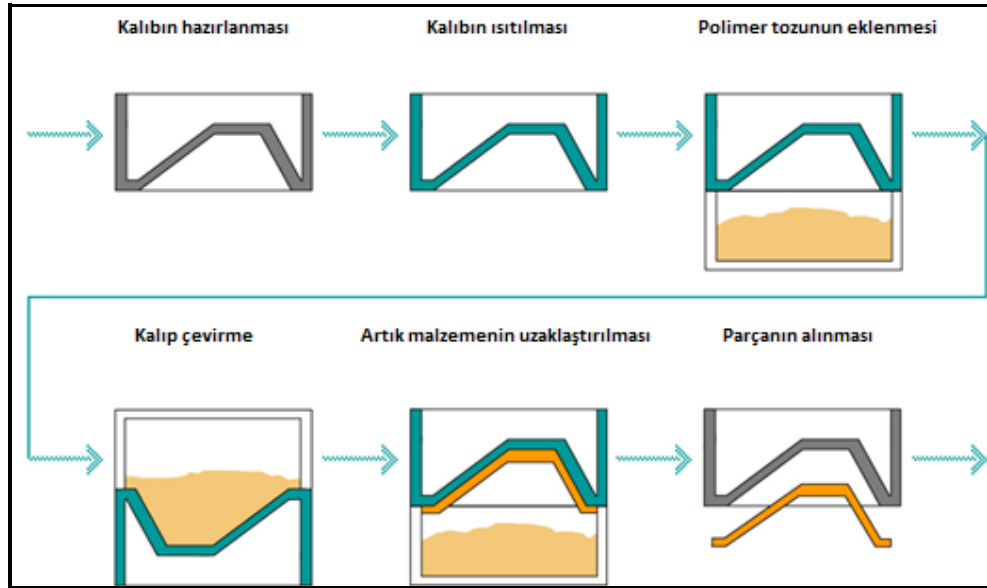
1.4.3.8. Slush molding

Bu yöntem temel olarak polimer tozlarının yüzeyi ısıtılmış bir kalıp üzerine dökülür. Ergiyen polimerler yüzeye yapıştıktan sonra kalıp ters çevirilerek ergimeyen tozlar kalıptan uzaklaştırılır (Şekil 1.17). Daha sonra kalıp soğutulur ve parça alınır. Bu yöntem genellikle PVC, TPO ve ASA malzemelere uygulanmakta ve araç iç parçalarının yüzeylerinin üretiminde kullanılmaktadır [11, 17].



Şekil 1.16. Haddeme prosesi şematik gösterimi [17]

Bu yöntem yumuşak torpido ön panel ve kapı içi kol dayama bölgeleri gibi yumuşak görsel yüzeyli parçaların üretiminde kullanılmaktadır. Şekil 1.18’te yöntemin ürünlerine örnekler verilmiştir.



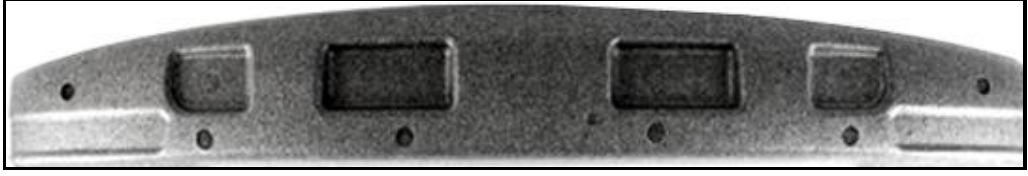
Şekil 1.17. Slush molding şematik gösterimi [17]



Şekil 1.18. Slush molding yöntemi ile üretilmiş otomotiv parçaları [18, 19]

1.4.3.9. Köpük kalıplama

Köpük kalıplama yöntemi polimer ve kimyasal köpürtme ajanı karıştırılarak bir kalıp içerisinde tepkimeye sokulması prensibine dayanır. Kullanılan kalıplar maliyet düşürme amaçlı alüminyumdan yapılmaktadır. Bu yöntem sonucunda gözenekli hafif malzemeler elde edilir. Otomotivde bu tarz malzemeler tampon içlerinde, kapı içlerinde, güneşliklerde genellikle enerji abzorbe etmesi amacı ile kullanılmaktadır [11].



Şekil 1.19. Köpük kalıplama ile üretilmiş tampon iç parçası

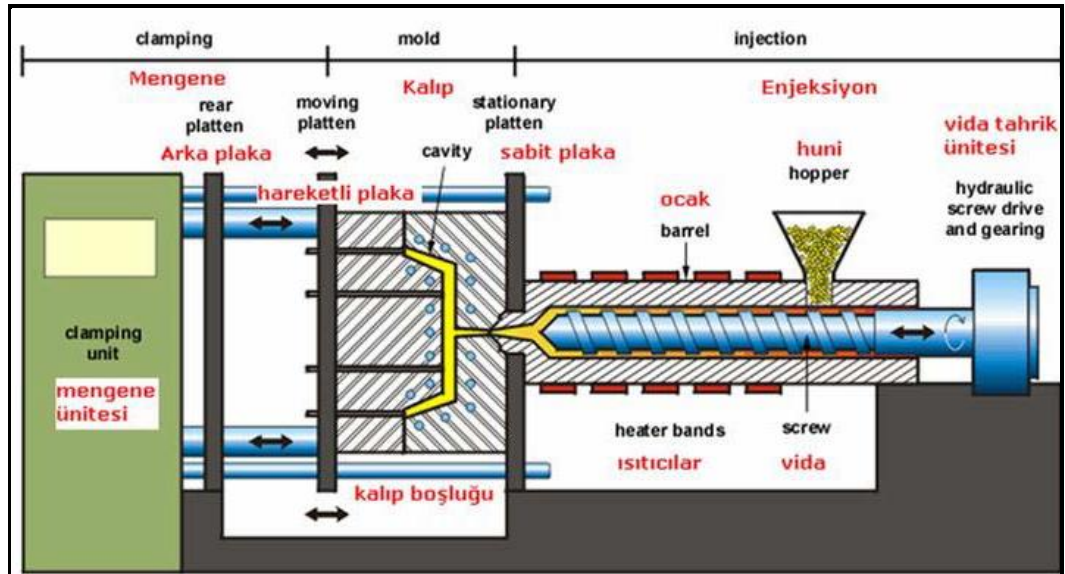
2. PLASTİK ENJEKSİYON

Plastik enjeksiyon yöntemi, termoplastik malzemelerin şekillendirilmesi için kullanılan bir üretim yöntemidir. Bu yöntem temel olarak, granül ya da toz halinde bulunan hammaddenin eritilip bir kalıp boşluğuna enjekte edilerek soğutulması işlemlerini içermektedir.

2.1. Plastik Enjeksiyon Makinesi

Enjeksiyon makinesi çalışırken plastiği eritme, erimiş plastiğin kalıba enjeksiyonu, ürünün soğutulması ve alınması şeklinde dört ana işlem gerçekleştirir. Bu makinelerde plastiği eritmek için kullanılan ısı, elektrik enerjisiyle, enjeksiyon işlemi için gerekli basınç ise hidrolik sistemlerle sağlanır. Ayrıca parçanın şeklinin bulunduğu kalıp ve bu kalıbın kapatılma işlemi makine için büyük önem arz etmektedir. Enjeksiyon makineleri üç ana bölümden meydana gelmektedir. Bunlar;

- Plastikleştirme ünitesi,
- Mengene ünitesi,
- Kontrol ünitesi olarak sıralanmaktadır.



Şekil 2.1. Plastik enjeksiyon makinesi şematik gösterimi [23]

Sayılan her bir ünite içerisinde bir çok ekipmanı içermektedir. Şekil 2.1’de plastik enjeksiyon makinesinin şematik gösterimi verilmiştir.

2.1.1. Plastikleştirme (enjeksiyon) ünitesi

Plastikleştirme ünitesi, makineye hammadde beslemesinin, malzeme ergitme ve kalıp içerisine eriyik enjekte edilme işlemlerinin gerçekleştirildiği bölümdür. Plastikleştirme ünitesi, huni, vida, geri dönüşüz valfler, nozul ve kovan parçalarından oluşmaktadır.

2.1.1.1. Besleme ünitesi (huni)

Besleme ünitesi kurutma işlemi uygulanmış (nemi alınmış) hammaddenin vida kovan takımına sürekli ve standart bir hız ve şekilde girişini sağlamak amacı ile kullanılan makine bölümüdür. Hunide sadece plastik malzeme beslemesinin dışında plastiklere katılmak istenen katkı maddelerinin oranlaması ve karıştırması da gerçekleştirilebilmektedir. Şekil 2.2’de enjeksiyon makinelerinde kullanılan bir huni görülmektedir.



Şekil 2.2. Hammadde besleme ünitesi (huni)

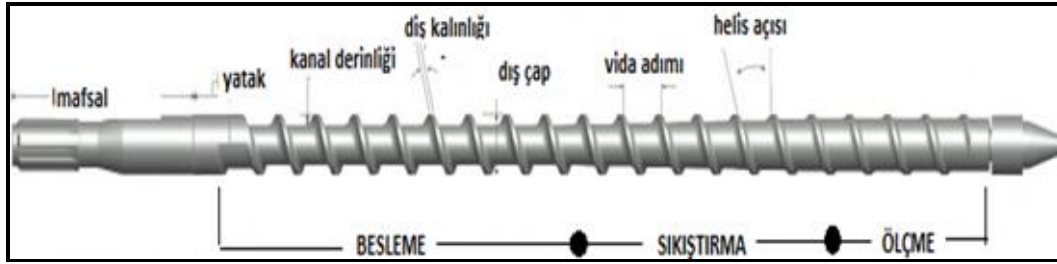
2.1.1.2. Vida (helezon)

Enjeksiyon vidası bir çeşit sonsuz vidadan meydana gelmektedir. Bu vida mekanik hareket ile dönel, hidrolik hareket ile de doğrusal hareket yapma kabiliyetine sahiptir.

Vidanın enjeksiyon makinesindeki görevleri;

- Malzemenin kovan içerisinde taşınımı,
- Malzemenin ergitilmesi,
- Eriyik malzemenin kalıp içerisine enjekte edilmesi, olarak sayılabilir.

Enjeksiyon vidaları besleme, sıkıştırma ve ölçme olarak üç bölümden meydana gelmektedir ve her bölümdeki helis karakteristiği değişim göstermektedir. Şekil 2.3'te enjeksiyon vidasının şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 2.3. Enjeksiyon vidası şematik gösterimi [28]

1.Besleme bölgesi: Tanecikli halindeki katı malzeme sıkıştırma bölgesine iletilir. kanlal derinliği, düşük yoğunluktaki malzemeyi yeterli akış sağlayabilmek için oldukça geniş tutulmuştur.

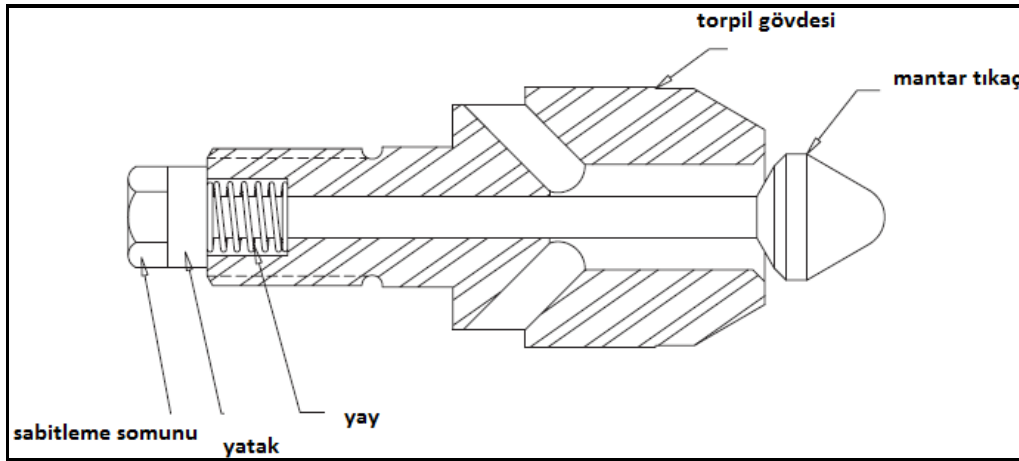
2.Sıkıştırma bölgesi: Malzeme sıkıştırılarak eritme işleminin büyük bölümü gerçekleştirilir.

3.Ölçme bölgesi: Eritme işlemi tamamlanarak erimiş malzeme vidanın ön tarafına itilir. Vida, biriken malzemenin karşı basıncı ile kalıbı doldurmak için yeterli miktarda malzeme birikinceye kadar geri itilir. Bu karşı basınç değeri enjeksiyon silindirisinin yağının basıncı ayarlanarak elde edilir [1, 20-21].

Enjeksiyon vidasının dış çapı sabittir. Ancak vida dişlerinin yükseklikleri farklıdır. Besleme bölgesinde yüksek, sıkıştırma bölgesinde daha düşüktür.

2.1.1.3. Geri dönüşsüz valfler

Enjeksiyon vidalarına enjeksiyon veya tutma basıncı esnasında hammaddeye uyguladığı basınçta, kayıp yaşamaması için bir takım parçalar takılmaktadır. Bu tür parçalar vidanın uç kısmına takılan “geri dönüşsüz valf” veya “çek valf” olarak adlandırılan parçalardır. Çek valfler erimiş hammaddenin vidanın arka kısmına geri dönüşünü engellemektedir. Bu parça grubunun hepsine birden “yüzük-torpil” veya “yüksük-torpil takımı” denilmektedir [23].

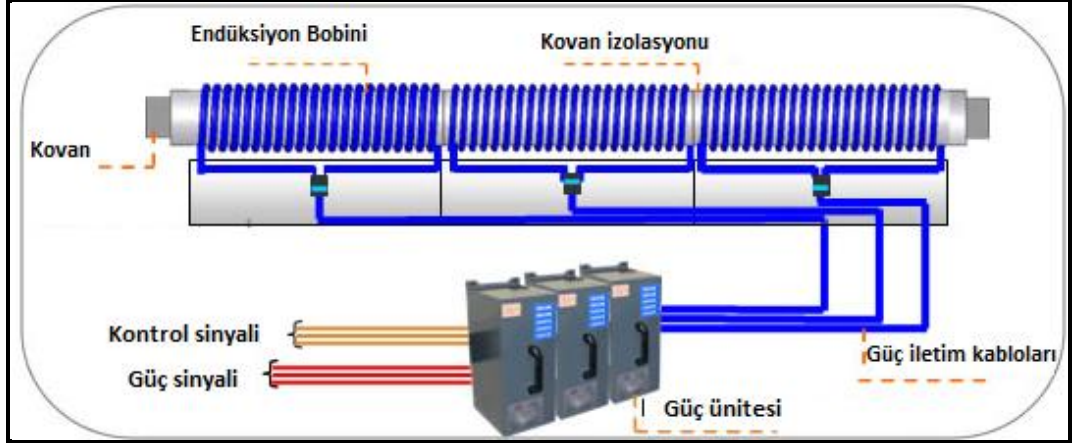


Şekil 2.4. Geri dönüşsüz valf [26]

2.1.1.4. Isıtma (ocak-kovan) sistemi

Ocak sistemi, hammaddenin içerisinde ergitildiği enjeksiyon ünitesinin bir bölümüdür. Ocak sistemi içi boş silindir şeklindeki kovan ve kovan çevresinde bulunan ısıtıcılardan oluşmaktadır. Isıtıcılar genellikle rezistanslı olsa da sıvı ısıtmalı sistemler de mevcuttur. Enjeksiyon makinesinde hammaddeyi ergitmek için gerekli ısı kovan çevresindeki ısıtıcılardan elde edilmektedir. Ancak vidanın dönme hareketi ile oluşan ısı enerjisi de işlemi kolaylaştıran bir faktördür.

Kovan sistemi üzerinde bulunan ısıtıcılar kovanın kademeli olarak ısıtılmasını mümkün kılar. Yani kovanın farklı noktalarında farklı sıcaklık değerleri elde edilebilir. Proses sırasında sıcaklıklar genellikle beslemeden nozula doğru artacak şekilde ayarlanırlar. Şekil 2.5’te Isıtma sisteminin şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 2.5. Isıtma sistemi şematik gösterimi

2.1.1.5. Meme (nozül)

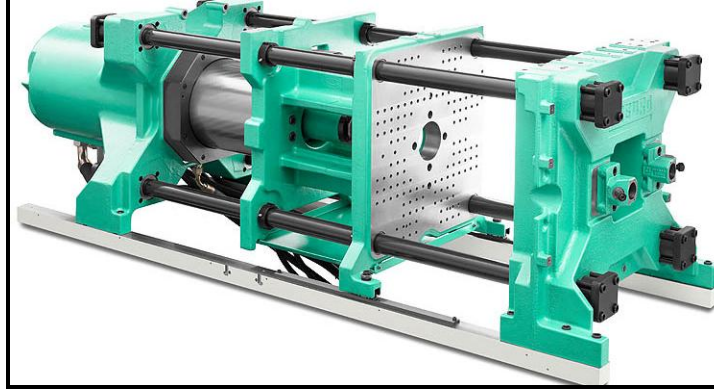
Nozul, kovanın uç kısmına monte edilen ve kovan ile kalıp yolluğu arasındaki bağlantıyı sağlayan parçadır. Nozul ergitme işlemi sırasında kovan dışarısına, enjeksiyon sonrasındaki soğuma aşamasında da kalıp dışarısına malzeme çıkışını engellemektedir. Nozulların açık ya da kapalı (kapatılabilir) çeşitleri bulunmaktadır. Kapalı nozullar, dışarıdan ya da kendiliğinden kontrollü olabilmektedir. Açık nozullar ise belirli basınç seviyesine kadar kapalı kalmasını sağlayan bir yay mekanizmasına sahiptirler.

2.1.2. Mengene-kapama sistemi

Mengene-Kapama sistemi enjeksiyon kalıbını kaptmaya, enjeksiyon ve soğuma sırasında kalıbı kapalı tutmaya ve soğuma sonrasında kalıbı açmaya yarayan mekanizmalardır. Bu mekanizma temel olarak yatay bir prese benzemektedir. Mengene sistemi, sabit ve hareketli birer plaka, bir destek plakası ve hareketli bölgenin hareketini sağlayan bir tahrik sisteminden meydana gelmektedir.

Mengene mekanizmaları, tahrik sistemlerine göre üç gruba ayrılmaktadır. Bunlar;

- Mekanik mengene sistemleri,
- Hidrolik mengene sistemleri,
- Hidromekanik mengene sistemleridir [22].



Şekil 2.6. Mengene sistemi [27]

2.1.3. Kontrol ünitesi

Kontrol ünitesi tüm enjeksiyon proses parametrelerinin (basınç, sıcaklık, hız ve zamanlar) ayarlanması, kalıp-menge ve motor bölümlerinin kontrol edilmesi ve olası güvenlik problemlerinin tespitini sağlayan sistemdir. Kontrol ünitesi saydığımız bu işlevleri yerine getirmek için genellikle birden fazla panelden oluşur [3].

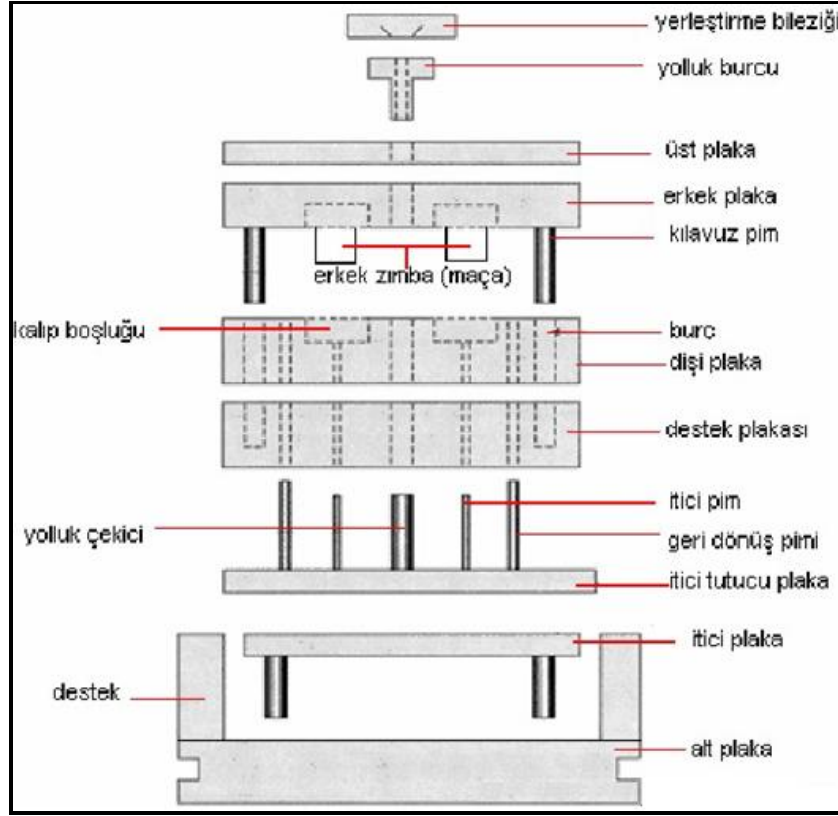
2.2. Plastik Enjeksiyon Kalıbı

Plastik enjeksiyonda ergitilen malzemenin istenen nihai ürüne dönüşmesi için içerisine enjekte edildiği aparata kalıp denir. Plastik enjeksiyonda kalıbın işlevleri;

- Eriyiğin kalıp içerisine alınması,
- Eriyiğin şekillendirilmesi,
- Malzemenin soğutulması,
- Parçanın kalıp dışına çıkarılması, olarak sayılabilir [23].

Enjeksiyon kalıbı hareketli ve hareketsiz olmak üzere iki temel bileşenden oluşmaktadır. Kalıbın hareketli ve hareketsiz bölümleri ise taşıyıcı plakalar, iticiler, itici plakası, destek plakası, hareketli maçalar, yolluk burcu gibi birçok parçadan oluşmaktadır. Sayılan bu parçaların herbiri gereksinime göre kalıp tasarımında yer bulur. Enjeksiyon kalıbı;

- Yolluk sistemi,
- Kalıp boşluğu,
- Soğutma sistemi,
- İtici sistemi, olarak dört bölümden oluşmaktadır [6].



Şekil 2.7. Enjeksiyon kalıbı şematik gösterimi [29]

2.3. Plastik Enjeksiyon Yöntemi Aşamaları

Plastik enjeksiyon yöntemi granül halindeki hammaddenin ısı ve mekanik enerji ile ergitilerek, içerisinde üretilecek parçanın formunda bir boşluğa sahip kalıba enjekte edilmesi ve soğutulması prensibine göre çalışmaktadır. Yöntemin aşamaları

- Hammadde beslemesi ve plastifikasyon (ergitme/mal alma),
- Kalıbın kapanması ve eriyiğin enjekte edilmesi (enjeksiyon)
- Kalıp içerisindeki malzemenin soğuması (soğuma)
- Ürünün kalıptan dışarıya alınması, şeklinde sıralanabilir [1].

Besleme ünitesinden vida kovan takımına giriş yapan malzeme vidanın dönme hareketi sayesinde vidanın ön bölümüne doğru hareket etmeye başlar. Kovan ısıtıcıları ve vidanın oluşturduğu kesme hareketi sayesinde malzemenin sıcaklığı yükselerek ergir. Bu işlem plastik enjeksiyonun ilk aşamasını oluşturur.

Malzeme plastifikasyonu esnasında enjeksiyon makinesinin mengene bölümü açık halde bulunan kalıbı kapatarak kalıp boşluğunu enjeksiyona hazır hale getirir. Vida

önünde eriyik halde bulunan malzeme daha sonra vidanın doğrusal hareketi sayesinde kalıp boşluğuna enjekte edilir.

Enjeksiyon işlemi bittiğinde kalıp içerisindeki malzeme soğumaya başlar. Soğutma işlemi serbest olarak yapılabildiği gibi kalıp içerisinde bulunan soğutma sistemi ile hızlandırılarak da gerçekleştirilebilir.

Malzemenin soğuması tamamlandığında ise makinenin mengene bölümü kalıbı açarak iticiler yardımı ile nihai ürünü kalıp dışarısına çıkarır. Böylece enjeksiyon çevrimi tamamlanılarak ilk basamağa dönülür. Ek işlem gerektirmeksizin tekrarlanabilen bir yöntem olması, plastik enjeksiyonun seri üretim şartları için büyük bir avantaja sahip olmasını sağlar [20-21].

2.4. Plastik Enjeksiyon Çevrimi ve Parametreleri

Plastik enjeksiyon, yöntem aşamaları bölümünde anlatıldığı gibi dört ana adımda gerçekleştirilmektedir. Bu dört adım da gerçekleştirilmesi esnasında çeşitli işlemleri içermektedir. Bu işlemler plastik enjeksiyon parametrelerini meydana getirir. Bu bölümde her bir enjeksiyon parametresi bulunduğu adımın içerisinde incelenecektir.

2.4.1. Mal alma (plastifikasyon/ergitme)

Bu aşama kovan içerisine hammadde beslemesi ile başlayarak yeterli miktarda malzeme eriyiğinin elde edilmesi ile sonuçlanmaktadır. Mal alma işleminin gerçekleştirilmesi esnasında etkin olan parametreler; kovan sıcaklığı, vida dönme hızı ve geri basınçtır.

2.4.1.1. Kovan sıcaklığı

Üç ana bölgeden oluşan enjeksiyon vida-kovan sisteminin çevresinde bulunan rezistanslar sayesinde elde edilen sıcaklık değeridir. Bu parametrenin belirlenmesi hammaddenin enjeksiyon sıcaklığı ile alakalıdır. Rezistanslar kontrollü olarak ısıtılıp soğutulularak eriyiğin enjekte edilmek istenen sıcaklık değerine ulaşmasını ve o değerde kalmasını sağlamaktadır.

Bu sıcaklığın olabildiğince düşük tutulması bir yandan enerji tasarrufu sağlarken, diğer yandan da eriyiğin soğuma süresini düşüremektedir. Enerji tüketimi ve çevrim

süresinde elde edilen bu düşüşler ise parça başı maliyetin azalmasını sağlamaktadır [25].

2.4.1.2. Mal alma hızı ve süresi

Bu parametre hammadde beslemesinin başladığı an ile bittiği an arasındaki süreyi temsil etmektedir. Bu süre plastik enjeksiyon makinesinde direkt olarak ayarlanan bir parametre değildir.

2.4.1.3. Vida dönme hızı

Vida dönme hızı, mal alma esnasında vidanın eksenini etrafında yaptığı dönme hareketinin hızıdır. Vidanın dönme hareketi aynı zamanda hammaddenin kovan içerisindeki ilerleme hareketini sağlamaktadır. Bu hareketin hızının artması birim zamanda hareket eden malzeme miktarını değiştireceğinden mal alma süresine direkt olarak etki etmektedir. Yani başka bir deyişle, mal alma süresi vida dönme hızına bağlı bir parametredir. Ayrıca enjeksiyon vidası dönme hareketini mal alma işlemi bittikten sonra sonlandırmaktadır.

2.4.1.4. Geri basınç

Vidanın dönme hareketi yaparak hammaddenin vida önüne akışısını sağladığı sırada, vidanın ön bölümündeki hammadde üzerinde meydana gelen basınca, geri basınç adı verilmektedir. Geri basınç değeri kontrol edilebilen bir değerdir. Geri basıncın artırılması mal alma süresini arttırıcı bir etki yapmaktadır.

Geri basıncın kullanılmasındaki en temel amaç malzeme içerisinde kalmış hava kabarcıkları ve kurutma ile alınamamış nemin ortamdan uzaklaştırılmasını sağlamaktır. Bu işlemin uygulanması parça ağırlığında, yoğunluğunda ve görüntüsünde istikrarın yakalanması için önemlidir [24].

2.4.2. Enjeksiyon

Bu adımda, enjeksiyon kalıbının kapatılıp eriyik hammaddenin kalıp boşluğuna enjekte edilmektedir. Eriyik hammaddenin kalıba enjeksiyonunun tamamlanması ile bu aşama bitirilerek soğuma aşamasına geçilir. Enjeksiyon aşaması, kapama basıncı, enjeksiyon basıncı, enjeksiyon hızı, enjeksiyon zamanı parametrelerini içermektedir.

2.4.2.1. Kapama basıncı

Kapama basıncı mengene ünitesinin kalıbı kapatmak için oluşturduğu basınçtır. Kapama basıncı her zaman enjeksiyon ve soğuma işlemleri sırasında kalıp içerisinde oluşan basıncın üzerinde ayarlanmalıdır. Aksi takdirde malzemenin oluşturduğu basınç kalıbın açılmasına ve parça formunun bozulmasına neden olacaktır.

Kapama basıncının yeterli ayarlanmaması başta çapak oluşumunu tetiklemektedir. Bunun dışında ise enjeksiyon basıncının malzemeye yeteri kadar etki etmemesi sonucunda malzeme iç yapısının yeterli sıkılığa sahip olmamasına da neden olmaktadır [24].

2.4.2.2. Enjeksiyon basıncı

Enjeksiyon basıncı, vida önündeki eriyik malzemenin enjeksiyon vidasının ileri geri hareket eden bir piston gibi kullanılarak kalıp içerisine enjekte edilmesi sırasında meydana gelmektedir. Bu parametre, enjeksiyon makinesi ile kontrol edilebilen bir parametredir. Enjeksiyon basıncının temel amacı akış esnasında eriyiğin maruz kaldığı akış direncini yenmektir.

Enjeksiyon basıncı ile elde edilmek istenen kalıp boşluğunun olabildiğince hızlı bir şekilde eriyik malzeme ile doldurulmasıdır. Bu nedenle enjeksiyon basıncı yüksek seçilmelidir. Yüksek enjeksiyon basıncı hammaddenin daha rahat akışını sağlamasının dışında daha düşük sıcaklıklarda çalışmayı da mümkün kılar.

Enjeksiyon basıncının düşük seçilmesi kalıbın tamamen doldurulamamasına, hızlı soğuyan bölgeler oluşması ve akış izlerine, akış birleşme izlerine (kaynak izleri), çöküntü ve çarpılmalara neden olabilmektedir. Parametrenin aşırı yüksek seçilmesi ise kalıp ve makine üzerinde aşınmaların meydana gelmesine ve daha yüksek kapama kuvveti gereksinimine sebep olmaktadır [24].

2.4.2.3. Enjeksiyon hızı

Enjeksiyon hızı, enjeksiyon vidasının aksenal doğrultudaki hareketinin hızıdır. Enjeksiyon hızının prosesteki etkisini anlamak için malzemenin akış konumundaki durumunu incelemek gerekmektedir. Enjeksiyon işlemi sırasında plastik eriyik kalıp yüzeyine temas ederek donmaya başlar ve zaman geçtikçe donan bölgenin kalınlığı

artmaya devam eder. Kalıp yüzeyinde oluşan bu kabuğun kalınlığı arttıkça eriyik malzemenin akabileceği kesit azalmaktadır. Enjeksiyon işlemi kesitin tamamen donarak akışı engellemesinden önce tamamlanmalıdır. Bu nedenle enjeksiyon hızının doğru belirlenmesi çok önemlidir [24-25].

Düşük enjeksiyon hızları ile üretim yapılırken; kabuk kalınlığı hızla artacağından gerçek akış kesitinde ciddi bir azalma ve dolayısıyla daha yüksek akış dirençlerinin meydana gelmesine neden olmaktadır. Ortaya çıkan dirençleri alt etmek için yüksek enjeksiyon basıncı gereksini ortaya çıkmaktadır. Bu durum da nihai üründe artık gerilmelerin oluşmasına neden olmaktadır [24].

2.4.2.4. Enjeksiyon zamanı

Enjeksiyon zamanı, eriyik plastiğin kalıba enjekte edilmeye başlanması ile enjeksiyon işleminin bitimi arasında geçen süredir. Bu süre enjeksiyon hızına bağlı olarak değişmektedir.

2.4.3. Soğuma

Bu aşama enjeksiyon işleminin bitimi ile parçanın tamamen soğuması arasındaki olayları kapsar. Soğuma aşaması, tutma basıncı, tutma zamanı, kalıp sıcaklığı ve soğuma zamanı gibi parametreleri içermektedir.

2.4.3.1. Tutma basıncı

Tutma basıncı, enjeksiyon işlemi sonrasında eriyik malzemeye uygulanan ikinci basınçtır. Tutma basıncının uygulanmasının amacı kalıp içerisinde soğumaya başlayan plastik malzemenin kendini çekmesinden kaynaklanan hacim küçülmesi ve şekil bozukluklarını engellemektir. Bu parametre nihai ürünün kalitesi üzerindeki çok yüksektir. Özellikle görsel parçalar için tutma basıncının iyi ayarlanması önemlidir.

2.4.3.2. Tutma zamanı

Tutma zamanı, tutma basıncının uygulanma süresidir. Tutma basıncı normal şartlarda yolluğun donmasının gerçekleşmesine kadar sürdürülmelidir. Dolayısıyla da tutma zamanının optimum koşuludur da budur. Erken sonlandırılan tutma basıncı

parçanın çarpılma, çekme ve çöküntü gibi bozukluklara sahip olmasına neden olmaktadır.

2.4.3.3. Kalıp sıcaklığı

Kalıp sıcaklığı kalıbın soğutma sistemi ile ayarlanan kalıp yüzeyi sıcaklığıdır. Kalıp sıcaklığı kalıbın ısı abzorbe etme özelliğini değiştirmektedir ve kalıp sıcaklığı ne kadar düşük ise soğuma hızı da o kadar düşük olur. Ancak soğuma hızının çok artması malzemenin erken donmasına sebep olabileceğinden kalıp sıcaklığı iyi ayarlanmalıdır.

2.4.3.4. Soğuma zamanı

Soğuma zamanı direkt olarak parça kalitesine etki eden bir parametredir ve belki de en önemli zamandır. Soğuma zamanı, tutma basıncı safhasından parçanın itici yarım ile kalıptan çıkabilecek kıvama gelene kadar soğuması arasındaki süreyi kapsamaktadır. Soğuma süresinin düşük ayarlanması, parçanın yeterli rijitliğe sahip olmadan itici kuvvetlerine maruz kalarak hasar almasına sebep olur. Çevrim süresinin büyük kısmını kapsayan soğuma süresi olabildiğince düşük seçilmelidir.

3. MİKRO GÖZENEKLİ ENJEKSİYON KALIPLAMA YÖNTEMİ

Mikro gözenekli enjeksiyon yöntemi, polimer bazlı malzemelerin süper kritik akışkan haline getirilmiş bir fiziksel köpürtme ajanı kullanılarak iç yapılarında mikro boyutta gözeneklerin elde edildiği bir üretim yöntemidir. Temel olarak plastik enjeksiyon yöntemine benzerdir. Bu yöntemin alışlagelmiş enjeksiyon kalıplama yönteminden başlıca farkı, düşük ağırlıkta parça üretimini sağlamasıdır. Parça ağırlıklarında meydana gelen bu azalma sonucunda, hammadde maliyetlerinde % 20 ye varan azalmalar elde edilebilmektedir.

Bu yöntemin gerçekleştirilebilmesi için, fiziksel köpürtme ajanı olarak kullanılacak gazın süper kritik hale getirildiği bir sisteme, çözünmenin sağlanması için özel tasarımı bir enjeksiyon vidasına ve çeşitli valf ve meme sistemlerine gereksinim vardır.

3.1. Yöntemin Tarihsel Gelişimi

80’li yıllardaki petrol kıtlığından dolayı polimer hammadde fiyatlarında artışlar meydana gelmiştir. Bu nedenle de plastik hammadde tasarrufu önemli bir araştırma konusu olmuştur. Dr.Nam Suh ve öğrencileri aynı yıllarda MIT’de mikro gözenekli plastik üretimini gerçekleştirmiştir. Geliştirilen bu yöntemin iki amacı vardır; birincisi malzeme tüketimini düşürmek, ikincisi ise plastik içerisinde çatlak ilerlemesini önleyici etkiler sağlayan küçük küresel hücreler elde etmektir [30].

1984 yılında Amerika’da ilk gözenekli plastik üretim yöntemi olan, kesikli üretim yöntemi (batch process) patenti MIT tarafından alınmıştır. Kesikli üretim yönteminde (BP) elde edilen gözenekli yapılar tatmin edici olsa da gaz çözünme süresinin uzunluğundan dolayı çok yüksek çevrim elde edilmiştir. Yüksek çevrim süresi bu yöntemin ticari kullanımı açısından büyük bir engel teşkil etmiştir [30-31].

Jonathan Colton belirli çözünürlükte polimer içerisine eklenen katkıların etkisi ile heterojen çekirdeklenme mekanizmasını ortaya çıkarmıştır [32]. Colton ayrıca PP gibi yarı kristalin yapıdaki polimerlerin köpürtülmesi hakkında çalışmalar yapmıştır.

Colton'ın geliştirdiği heterojen çekirdeklenme teorisi günümüz endüstriyel uygulamalarında kristalin malzemelerin köpürtülmesinde kullanılmaktadır [30-32].

Chul Park ve Dan Baldwin sürekli ekstrüzyon yöntemi ile mikro gözenekli köpük polimer üretimi konusunda çalışmalar yapmışlardır. Park kabul edilebilir üretim hızındaki gaz çözünmesi ve ani basınç düşüşü sağlayarak, çekirdeklenme hızını arttırıcı etki yapan nozul uygulamaları hakkında incelemeler yaparken [33], Baldwin, kristalin ve amorf malzemelerin mikro gözenek yapısını incelemiştir [34].

Sung Cha'nın süper kritik akışkan (SCF) fazındaki CO₂'yi keşfetmesine kadar, BP yöntemi ile amorf-yarı kristalin ve kristalin yapıdaki polimerlerin köpürtülmesi ile ilgili çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Sung Cha SCF CO₂'nin polimer içerisinde daha hızlı çözündüğünü, daha küçük boyut ve daha yüksek yoğunluklarda gözenekler elde edilebildiğini gözlemlemiştir. Süper kritik akışkan ile gözenek yoğunluğu 10⁹ cell/cm³'ten 10¹⁵ cell/cm³'lere kadar yükselmiştir. Ayrıca Cha yüksek gaz çözündüren polimerlerin camsı geçiş sıcaklıklarının düştüğünü ve böylece oda sıcaklığında köpürtmenin mümkün olduğu sonucuna varmıştır [35-36]. Vipin Kumar ise SCF ile doyurulmuş plastik levhaları ısıl şekillendirme yöntemi ile üç boyutlu şekillendirme çalışmaları yapmıştır [37]. Tüm bu yaratıcı çalışmalar sonucunda mikro gözenekli plastik üretimi laboratuvar aşamasını tamamlamış ve ticari uygulamalara adapte edilme çalışmaları hızlanmıştır

Ticari uygulama olarak gözenekli yapı teknolojisi 1995'te adı daha sonra Trexel olarak değiştirilen, Aximoatics Şirketi tarafından başlatılmıştır. 1998 yılında Trexel, Engel firmasının da yardımıyla ilk mikro gözenekli plastik enjeksiyon makinesini üretmiştir. Bu teknoloji için kullanılan en yaygın ad olan MuCell'in lisansı 2000 yılında Trexel tarafından alınmıştır [30, 38].

3.2. Yöntemin Aşamaları

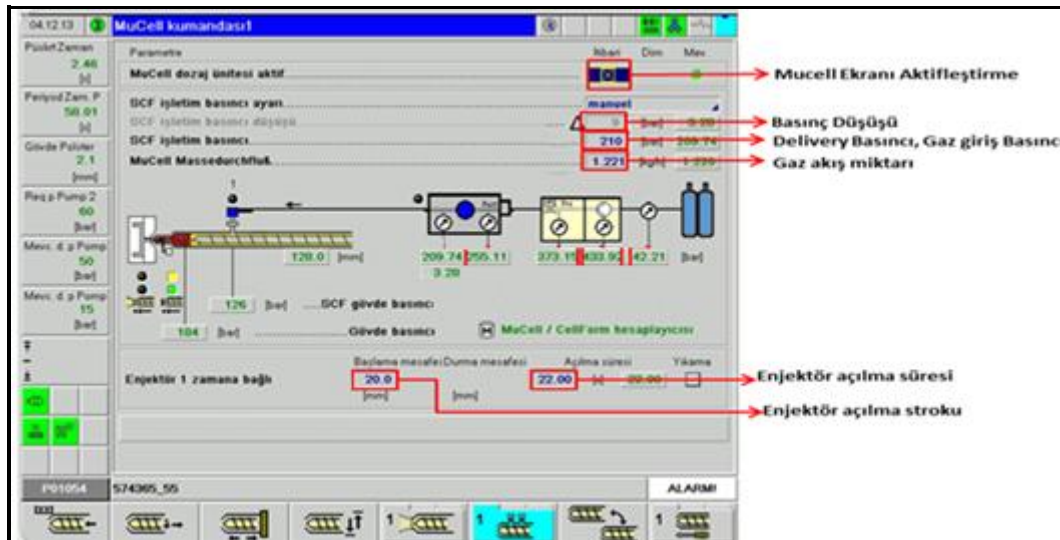
Mikro gözenekli enjeksiyon, diğer adıyla fiziksel köpürtme yönteminin anlatımına bu bölümden itibaren ticari ismi olan MuCell kullanılarak devam edilecektir. MuCell yöntemi temel olarak polimer içerisinde fiziksel köpürtme ajanı olarak süper kritik fazda bir gazın çözündürülmesi ve tek fazlı bir çözeltinin elde edilmesi ile başlar.

Daha sonra ise tek fazlı karışımın kalıp boşluğuna enjekte edilerek mikro gözenekli yapıda parçalar elde edilmesi ile sonlanır [39].

Yöntemde fiziksel köpürtme ajanı olarak kullanılan gazlar bugüne kadar yapılan çalışmalar incelendiğinde; CO₂, N₂, He ve Ar gazları olarak sayılabilmektedir [30]. MuCell yönteminde başarıya ulaşmak için ise dört ana basamağı başarılı bir şekilde gerçekleştirmek gerekmektedir. Bunlar, gaz moleküllerinin polimer içerisinde çözünerek tek fazlı çözeltinin elde edildiği “çözünme”, elde edilen çözeltinin kalıp boşluğuna enjekte edilmesi sırasında gaz moleküllerinin çökerek gözenekleri oluşturduğu “çekirdeklenme”, kalıp içerisindeki malzemenin soğuması süresince gözeneklerin yapılarının değiştiği “büyüme” ve malzemenin tamamen soğuyup katılaştığı “şekillendirme” evreleridir [40-41].

3.2.1. Çözünme evresi

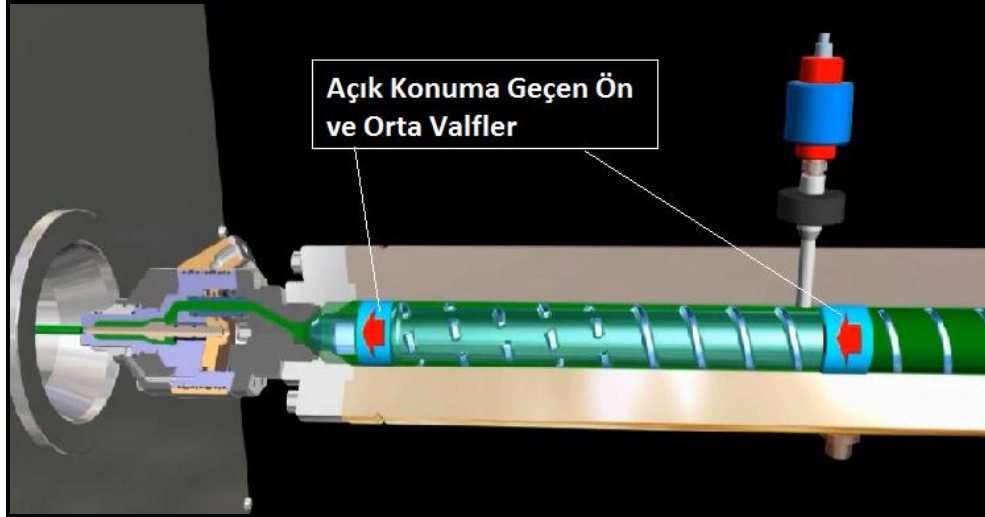
Çözünme evresi basitçe mal alma işlemi olduğu söylenebilir. Ancak bu mal alma standart enjeksiyona göre biraz farklıdır. Öncelikle süper kritik akışkan fazına getirilmiş olan fiziksel köpürtme ajanı parametreleri sistemden ayarlanır. Bunlar ağırlıkça gaz yüzdesi, gaz giriş basıncı, enjektör açılma mesafesi ve süresi, gaz giriş debisi olarak sıralanabilir.



Şekil 3.1. MuCell SCF ayar ekranı görüntüsü [42]

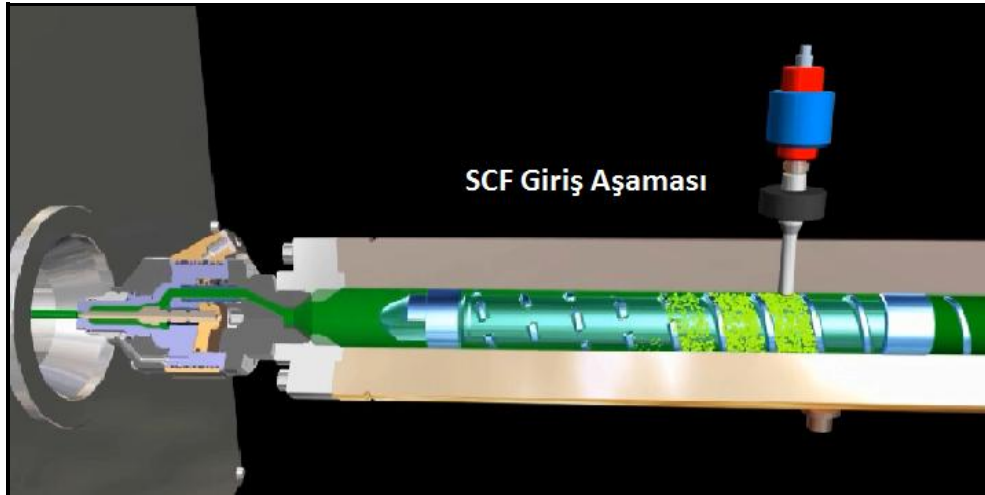
SCF ayarları yapıldıktan sonra makine normal enjeksiyonda olduğu gibi besleme hunisi yoluyla kovana malzeme almaya başlar. Kovan sıcaklığı ve vida hareketi

sayesinde ergiyen malzeme vida boyunca ilerlemeye başlar. Bu işlem esnasında özel tasarımı vida üzerinde bulunan orta ve uç valfler açık konuma geçerek malzeme ilerlemesine olanak sağlar (Şekil 3.2).



Şekil 3.2. Ön ve orta valdlerin açık konuma geçişi [28]

Kovana malzeme girişi ve ergitilmesi başladıktan sonra SCF vidanın karıştırma bölümünden sisteme giriş yapar. Böylece gaz-polimer birbiri içerisinde karışarak çözünmeye başlar (Şekil 3.3).



Şekil 3.3. SCF'nin kovan içerisine girişi [28]

Mal alma ve karıştırma işlemi sonlandığında vidanın orta valfi kapalı konuma geçerek karıştırma bölümüne daha fazla malzeme girişini engeller. Valfin kapanma işlemi vidanın geriye doğru hareketi bittiğinde otomatik olarak gerçekleşir (Şekil 3.4).



Şekil 3.4. Mal alma işleminin bitişi [28]

MuCell yönteminin bu adımında amaç eriyik polimer ile SCF haldeki köpürtme ajanının birbiri içerisinde tamamen çözünerek tek fazlı bir çözelti yapısını oluşturmayı sağlamaktır. Daha önce basitçe mal alma işlemi olarak nitelendirilse de çözünme evresi enjeksiyon işlemi başlayana kadar devam eden bir süreçtir.

Tablo 3.1. Çözünme evresine etki eden parametreler

Parametre	Direk Kontrol Edilebilir	Direk Kontrol Edilemez
Ağırlıkça % SCF	+	
SCF giriş basıncı	+	
SCF giriş debisi	+	
Mal alma stroğu	+	
Mal alma süresi	+	
Mal alma hızı	+	
SCF giriş süresi	+	
Geri basınç	+	
Kovan sıcaklığı	+	
SCF difüzyon hızı		+
SCF çözünürlüğü		+
SCF çözünme süresi		+
Eriyik viskozitesi (malzeme)		+

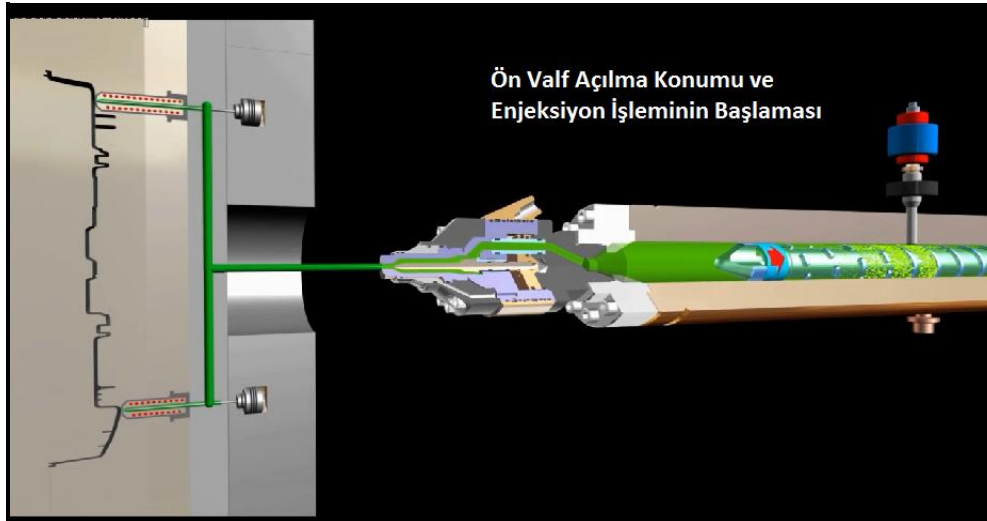
Mal alma işleminde sadece SCF ve eriyik polimer karıştırma işlemi gerçekleştirilirken, enjeksiyon işlemine kadar geçen sürede gazın difüzyonu ve eriyik içerisinde çözünmesi devam etmektedir. Çözünme evresinin başarı ile tamamlanması tüm SCF'nin eriyik içerisinde çözünmesi ile mümkündür. Aksi halde daha sonraki çözünmemiş gazdan kaynaklı çeşitli problemler meydana gelebileceği gibi nihai

ürünün iç yapısında istenilen özelliklerde gözenek eldesinin de sağlanamaması söz konusudur. Çözünme evresindeki önemli değişkenler tablo 3.1’de verilmiştir [59-63].

Tablo 3.1’de verilen parametrelerden direkt kontrol edilebilenler enjeksiyon makinesi ile ayarlanabilen parametrelerken, diğerleri kontrol edilen parameteler yardımı ile dolaylı yoldan ayarlanabilen parametrelerdir.

3.2.2. Çekirdeklenme evresi

Çözünme evresinde tek fazlı çözeltinin elde edilmesinden sonra bu karışımın kalıp boşluğuna enjekte edilmesi ile çekirdeklenme evresi başlamaktadır. Çekirdeklenme evresi, yöntemin en kısa süren işlemidir. Enjeksiyon esnasında malzeme yükek basınçtan düşük basınca ani bir şekilde geçiş yapar. Basıncıdaki bu ani düşüş gazın eriyik içerisindeki çözünürlüğünü düşürerek gaz moleküllerinin çökmesine sebep olur. Çökelen gaz parça içerisindeki mikro gözenekleri oluşturur ve bu çökelmeye çekirdeklenme adı verilmektedir [59-63].



Şekil 3.5. Çekirdeklenme evresinin başlaması [28]

MuCell yönteminde nihai ürünün iç yapısındaki gözeneklerin karakteristiğinin belirlendiği ilk aşama çekirdeklenme evresidir. Bu evrede oluşan gözenek (çekirdek) sayısı nihai üründeki gözenek yoğunluğu ve büyüklüğüne direkt olarak etki etmektedir. Homojen bir gözenek dağılımı ve darbe mukavemetinde iyileşmenin sağlanabilmesi için olabildiğince çok sayıda ve küre biçiminde gözenegın oluşması temel amaçlardan birisidir.

Oluşacak mikro gözenek sayısının bağlı olduğu basınç düşüş hızı (dp/dt) basitçe aşağıdaki formüller ile;

$$\frac{dp}{dt} = \frac{32\mu D^4 V^2}{n^2 d_g^6} \quad \left(\frac{\text{Pa}}{\text{S}} \right) \quad (3.1)$$

hesaplanabilir [30].

Bu formülde, Q enjeksiyon hacimsel debisini, V enjeksiyon vidası doğrusal hızını, D vida çapını, V_n Yolluktaki akış hızını, n yolluk sayısını, d_g yolluk çapını, μ ise eriyik viskozitesini ifade etmektedir.

Tablo 3.2. Çekirdeklenme evresine etki eden parametreler

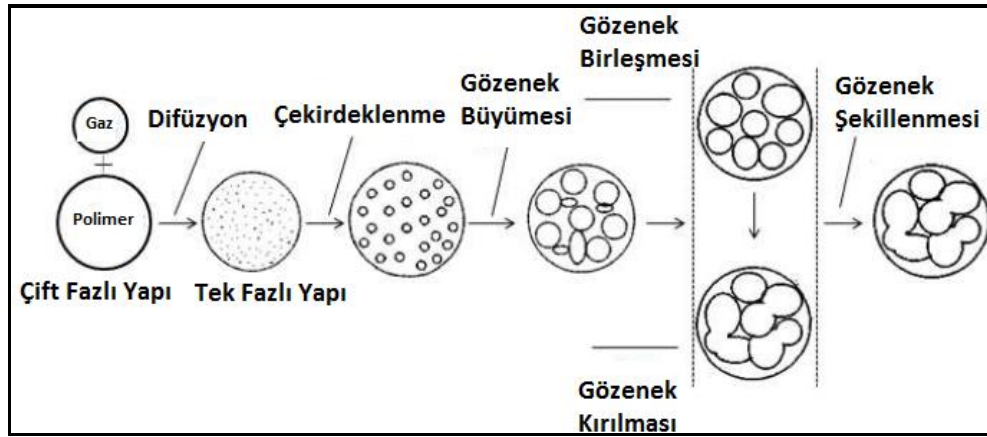
Parametre	Direk Kontrol Edilebilir	Direk Kontrol Edilemez
Ağırlıkça % SCF	+	
Enjeksiyon hızı	+	
Enjeksiyon basıncı	+	
Kovan sıcaklığı	+	
Vida çapı		+
Yolluk çapı		+
Katkı maddeleri (talk, cam fiber vb)		+
Eriyik viskozitesi (malzeme)		+

Eşitlikten anlaşılabacağı gibi nihai üründe oluşacak mikro gözenek sayısına malzeme, vida çapı, enjeksiyon hızı, yolluk sayısı ve yolluk giriş çapı etki etmektedir. Bu parametrelerden kalıp, makine ve malzemeye bağlı değişkenleri göz ardı edersek (bunların değişimi tamamen tasarım değişimine yol açacaktır) proses parametrelerinden sadece enjeksiyon hızı bu aşama için kontrol edilebilen bir parametredir. Ancak daha önceki çözünme evresinde belirlenen parametrelerden de çekirdeklenmeye ve gözenek sayısına etki edenler bulunmaktadır.

3.2.3. Gözenek büyümesi evresi

Malzemenin kalıp boşluğuna enjeksiyonu ile gaz çekirdeklenmesinin oluşumundan sonra kalıp yüzeyine temas eden malzemeler ani soğuma sebebiyle katılaşır. Katılaşma parçanın dış yüzeyinde gözeneksiz bir katmanın oluşmasını sağlar. Bu esnada parçanın merkezinde sıcaklık katılaşmanın gerçekleşmesine yetecek kadar

düşük değildir. Ayrıca MuCell yönteminde standart enjeksiyon yöntemine göre daha düşük bir strok kullanıldığından oluşan gözenekler büyümek için yeterli alana sahip olur. Diğer yandan çekirdeklenemeyip halen polimer içerisinde bulunan gaz molekülleri yakınında bulunan gözeneklere katılarak gözenek büyümesini tetikler. Gözenek büyümesi malzemenin genişleyerek kalıp boşluğunu doldurmasını sağlar ve parçanın tamamen katılaşması gerçekleşene kadar devam eder (Şekil 3.6) [30, 43]. Gözenek büyümesi evresinde etkin parametreler ise Tablo 3.3'te verilmiştir.



Şekil 3.6. MuCell'de iç yapı değişim evreleri [30]

Gözenek büyüme evresi enjeksiyon işlemi ile tamamen katılaşana kadarki geçen sürede gerçekleşmektedir. Bu nedenle nihai ürün et kalınlığındaki farklılıklar soğuma karakteristiğini değiştireceğinden parçada bölge bölge çeşitli gözenek yapıları oluşabilmektedir. Bunun önüne geçmek için ise tüm parça boyunca homojen bir soğutmanın sağlanmasıdır.

Tablo 3.3. Gözenek büyümesine evresine etki eden parametreler

Parametre	Direk Kontrol Edilebilir	Direk Kobtrol Edilemez
Ağırlıkça % SCF	+	
Enjeksiyon hızı	+	
Enjeksiyon basıncı	+	
Eriyik sıcaklığı	+	
Kalıp sıcaklığı	+	
Strok mesafesi	+	
Kalıp içi basınç değişimi		+
Ara yüzey kesme kuvveti		+

3.2.4. Şekillendirme evresi

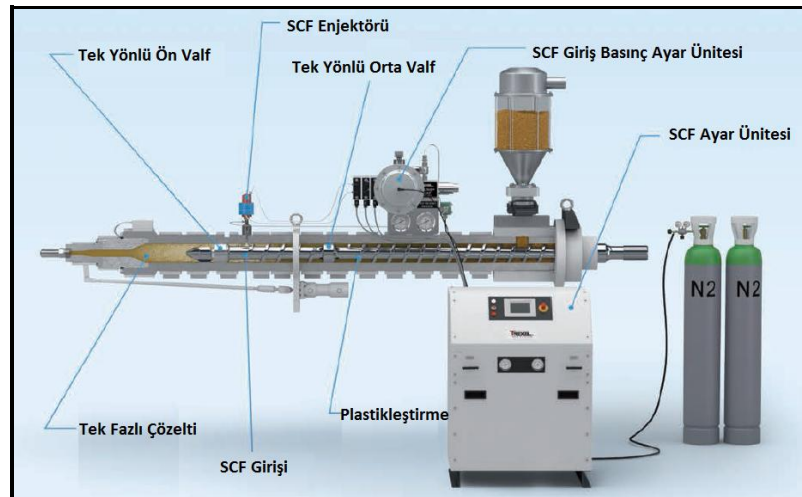
Yöntemin son basamağı olan şekillendirme işleminde parça kalıp içerisinde soğumasını tamamlayarak nihai şeklini alır. Bu işlemde daha çok parçanın kontrolleri yapılmaktadır. Yapılan kontroller;

- Yüzey kontrolü
- Çöküntü kontrolü
- Çarpılma kontrolü
- Havalandırma kontrolü
- Ağırlık düşüşü ölçümü
- Parça morfolojisinin kontrolü
- Kaynak çizgilerinin kontrolü

Bu kontrollerin yapılmasının sebebi parçada istenen ağırlık düşüşünün elde edilip edilmediği, çözünme evresinde aksaklık olup olmadığının gözlemlenmesidir. Yapılan bu kontroller sayesinde proses parametrelerinde değişikliklere gidilerek parça kalitesi istenen düzeylere getirilmektedir [30].

3.3. Makine ve Ekipman

Mikro gözenekli enjeksiyon yöntemi ekipmanları, enjeksiyon kalıplama makinesi, enjeksiyon kalıbı, sıcaklık kontrol ünitesi, özel tasarımı vida-kovan sistemi ile birlikte SCF sisteminden oluşmaktadır. Bu bileşenlerin her biri mikro gözenekli yapının oluşması ve kalitesi açısından ayrı ayrı önem arz etmektedir.

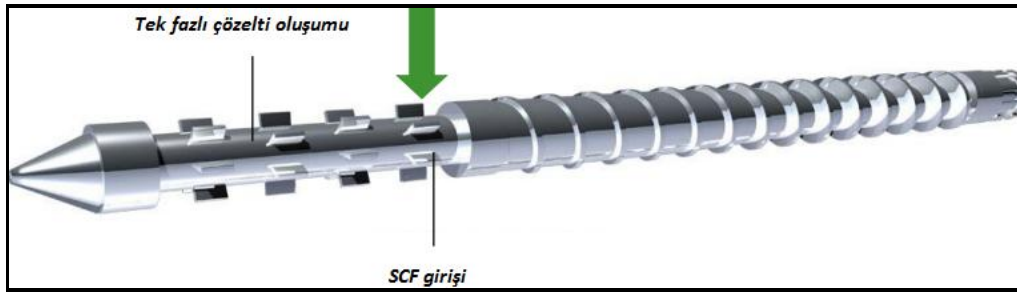


Şekil 3.7. MuCell ekipmanları [25]

Bir önceki bölümde MuCell yönteminin dört temel aşamadan meydana geldiğine değinilmiştir. Bu aşamalardan ilki olan çözünme evresi özel tasarımı vida-kovan sistemi ve SCF ünitesi yardımı ile gerçekleştirilmektedir. Çekirdeklenme, gözenek büyümesi ve soğuma evreleri ise kalıp, kapama kontrollü meme (shut-off nozzle) ya da kontrollü yolluklar, enjeksiyon ünitesi, mengene ünitesi ve kalıp sıcaklık ayar üniteleri yardımı ile gerçekleştirilir.

3.3.1. Özel tasarımı MuCell vidası

MuCell yönteminin ilk amacı olan tek fazlı gaz-polimer karışımının elde edilmesi için temel gereksinimlerden bir tanesi gazın yeterli difüzyon hızına sahip olmasıdır. Çünkü vida kovan sistemi içerisinde karıştırılan gaz ve polimer malzemenin birbiri içerisinde çözünmesi işleminin, enjeksiyon işlemine kadar gerçekleşmesi gerekmektedir. Belirli sıcaklık ve basınçta malzemelerin çözünürlükleri sabitken, çözünme süreleri gazın difüzyon hızına göre değişiklik göstermektedir. Difüzyon hızını ise üç ana faktör belirlemektedir. Bunlar, gazın cinsi, sıcaklık ve kesme hızı'dır.

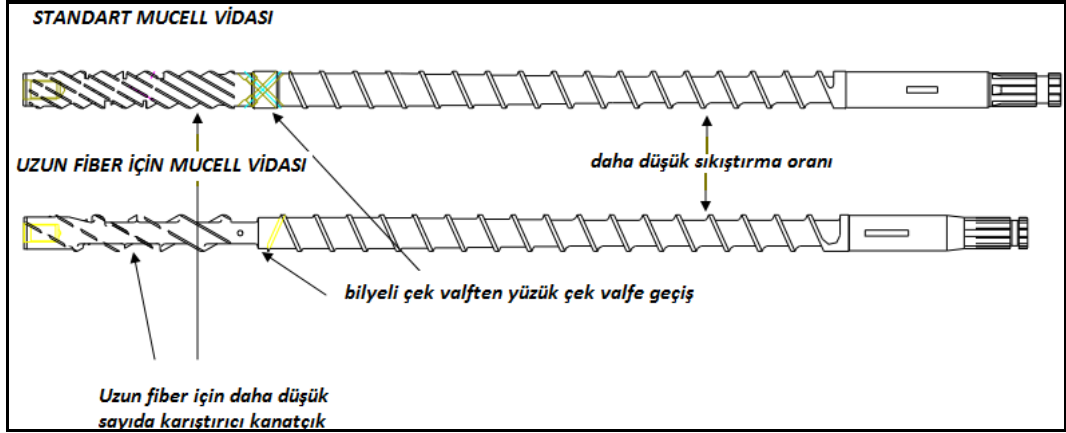


Şekil 3.8. MuCell özel tasarımı vidası [26]

Bu noktada kullanılacak enjeksiyon vidasının difüzyon hızını arttırmak için gerekli kesme hızını sağlaması gerekmektedir. Bunun için MuCell yönteminde standart enjeksiyon vidasından farklı olarak tasarlanmış bir vida kullanılmaktadır. MuCell vidasında normal plastikleştirme işlemine ek olarak gaz difüzyonunu arttırmak ve tek fazlı çözeltinin elde edilmesini kolaylaştıran yeni bir bölüm mevcuttur.

MuCell vida tasarımları temel olarak birbirlerine çok benzeseler de kullanılacak malzeme cinsine göre değişimler gösterebilmektedir. Şekil 3.9'da bu duruma örnek olarak standart bir MuCell vida tasarımı ile uzun fiber katkılı malzemeler için tasarlanmış bir MuCell vidası görülmektedir. Bu iki vida arasındaki farklılıkların en

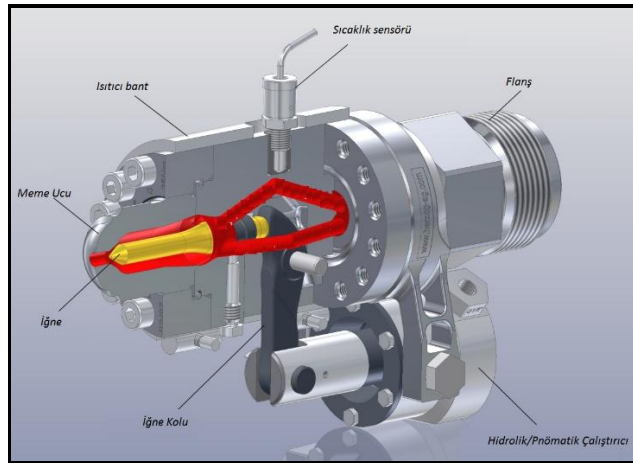
büyükü vida ön kısmında bulunan gaz karışım bölgesindeki kanatçıkların uzun fiberleri kırmasını engellemek adına azaltılmasıdır.



Şekil 3.9. Standart ve uzun fiber katkılı malzeme için MuCell vida tasarımı [26]

3.3.2. Kapama kontrollü meme (shut-off nozzle)

Standart bir enjeksiyon prosesinde mal alma süresince vida önünde depolanan eriyik haldeki malzeme düşük basınç altındadır ve genellikle de standart bir meme kullanılmaktadır. MuCell yönteminde ise mal alma esnasında SCF kovana yüksek basınç ile giriş yapar ve malzemeyi memeden dışarı itme eğilimi gösterir. Buna ek olarak SCF çözünürlüğünün artırılması için eriyik malzeme vida önünde yüksek bir geri basınç ile depolanmaktadır.



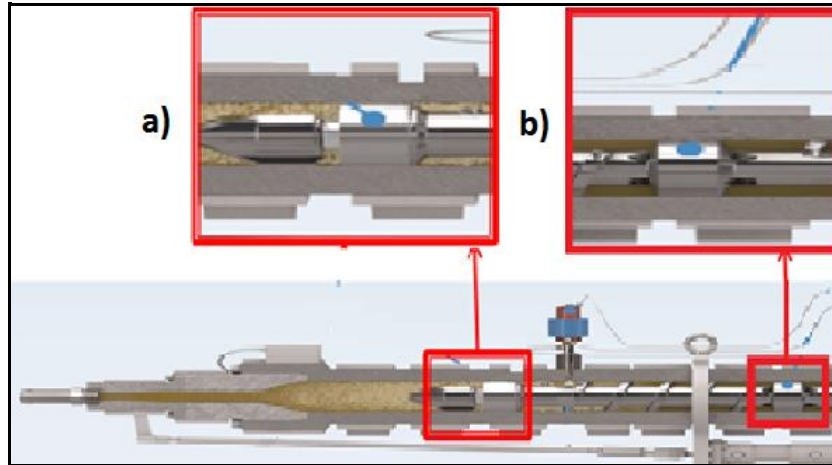
Şekil 3.10. Kapama kontrollü meme tasarımı [34]

Gerek SCF'nin malzemeyi kovan dışına itmesini engellemek, gerek de yeterli geri basıncın sağlanması için MuCell yönteminde kapama kontrollü bir meme sistemi

kullanılmaktadır (Şekil 3.10). MuCell yönteminde kullanılan memenin yüksek geri basınçta dahi kapalı durması ve enjeksiyon işlemi sırasında gecikmeden açılabilmesi gerekmektedir.

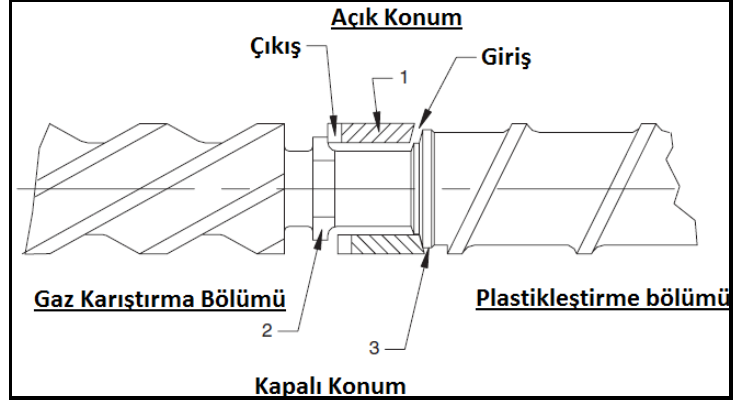
3.3.3. Orta ve ön tek yönlü valfler

MuCell yönteminde özel tasarımlı vidaya ek olarak bazı ekipmanların kullanılması gerekmektedir. Bunlardan ilki standart enjeksiyon yönteminde de kullanılan ve vidanın uç kısmında bulunan ön tek yönlü valfidir (Şekil 3.11-a). Bu valfin görevi mal alma süresi esnasında basınçlı şekilde vida önünde biriken malzemenin vidanın gaz karıştırma bölümüne geçişini engellemektir. Ön tek yönlü valf mal alma esnasında vidanın geriye doğru hareketi boyunca açık konunda iken mal alma işlemi bittiğinde ve enjeksiyon pozisyonunda kapalı konuma geçerek malzeme geçişini engellemektedir.



Şekil 3.11. Tek yönlü valfler a) ön valf b) orta valf [26]

Vida tasarımındaki büyük farklılıklardan bir diğeri ise orta tek yönlü valf kullanımıdır. Bu valf yüzük ya da bilyeli olarak çeşitli tasarımlarda yer bulabilmektedir. Özellikle bilyalı orta valf kullanımı fiber katkılı malzemelerin üretimlerinde tercih edilmektedir. Şekil 3.12’de yüzük model bir orta valf tasarımı verilmiştir. Şekilde 1 valf yüzüğü, 2 açık konum sabitleyici, 3 ise yüzük yatağını temsil etmektedir. Şematik gösterimde üst kısımdaki yüzük yerleşimi açık pozisyonda iken çizimin alt kısmındaki yüzük kapalı konumdadır.



Şekil 3.12 Tek yönlü orta valf tasarımı [30]

Şekilden de anlaşılacağı üzere bu valf ergitmenin gerçekleştirildiği plastikleştirme bölümü ile gaz girişinin ve karşımının gerçekleştiği karıştırma bölümlerini birbirinden ayırmaktadır. Orta tek yönlü valfin görevi ise gaz-polimer karışımının vidanın ergitme kısmına geçişini ve bu bölümdeki basınç düşüşünü engellemektir.

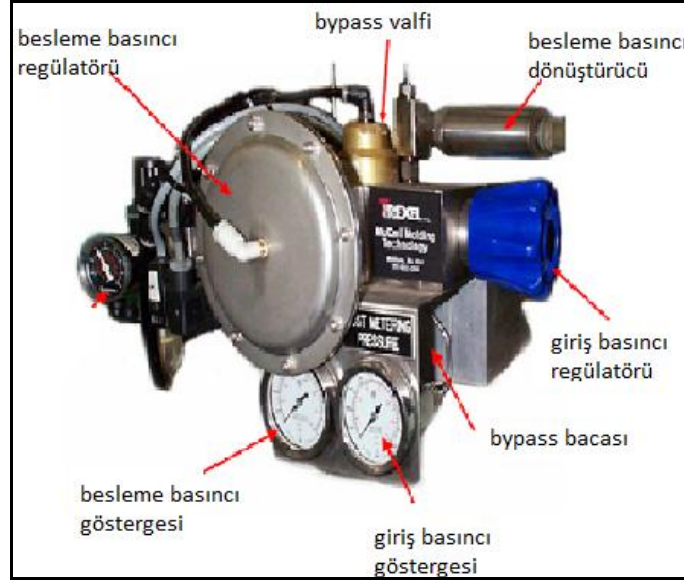
3.3.4. SCF ünitesi

MuCell yönteminin gerçekleştirilmesi için en temel gereksinim fiziksel köpürtme ajanı olarak kullanılacak olan gazın süper kritik akışkan hale getirilmesi ve bu halde istenilen basınçta kovana girişinin sağlanmasıdır. Gazın süper kritik sıcaklık ve basınç değerine getirilmesindeki amaç polimer içerisindeki çözünürlüğü ve çözünme hızının artırılmasıdır.



Şekil 3.13. SCF kontrol ünitesi [26]

Şekil 3.13’de verilen SCF kontrol ünitesi, sisteme giriş yapan köpürtme ajanını o gaz için belirli olan süper kritik faz basınç ve sıcaklığına getirmeyi sağlamaktadır. Ayrıca kovan içerisine giren gazın debisine göre işlem hızını ayarlayarak sürekli olarak aynı özelliklerde gaz girişini sağlamaktadır.



Şekil 3.14. SCF basınç ayar ünitesi [26]

Şekil 3.14’te ise SCF ünitesinde istenen basınç ve sıcaklıkta elde edilen gazın istenilen giriş basıncına getirildiği SCF basınç ayar ünitesi verilmiştir.

Fiziksel köpürtme ajanı istenilen hal ve giriş basıncına getirildikten sonra mal alma esnasında istenilen zamanda kovan içerisine gaz girişinin sağlanması gerekmektedir. Gaz moleküllerinin eriyik içerisine olabildiğince küçük boyutlarda girmesi sağlanmalıdır. Böylece yüzey alanı artan gaz daha hızlı bir çözünme gerçekleştirebilecektir. Tüm bu gereksinimi karşılaması için tasarlanan SCF enjektörü (Şekil 3.15) enjeksiyon makinesi tarafından kontrol edilerek açılıp kapanmaktadır. Gazın kovan içerisine küçük damlalar halinde girmesini sağlamak için ise enjektör nozulunda kevgire benzer bir yapı bulunmaktadır.



Şekil 3.15. SCF giriş enjektörü [26]

3.4. MuCell Proses Parametreleri

MuCell yönteminin daha önceki bölümlerde anlatıldığı üzere dört adımdan oluştuğu bilinmektedir. Bu dört adım da yalnızca uygun bir kalıp ve makinede gerçekleştirilebilmektedir. Ancak prosesin başarısı doğru malzeme ve ekipman seçiminden sonra doğru parametrelerin seçimine de bağlıdır. Standart enjeksiyon ve MuCell yöntemleri ile üretilen parçalar karşılaştırıldığında, kısa çevrim süresi ve boyutsal kararlılık açısından avantajlar elde edilebilmektedir. Yanlış proses parametrelerinin kullanılması bu avantajların yeterli elde edilememesine, hatta hatalı parça üretimine neden olabilmektedir [30, 32-35].

Birçok çalışmada MuCell parametreleri anlatılırken plastikleştirme ve kalıplama bölümleri birbiri içerisinde anlatılmaktadır. Bu nedenle de anlaşılması zordur. Bu çalışmada yöntem parametreleri daha basit anlaşılması adına, plastikleştirme ve kalıplama olarak iki ayrı bölümde anlatılacaktır.

Plastikleştirme bölümü malzeme ergitme, kovan içerisindeki gaz beslemesi, gaz karışması ve gazın malzeme içerisindeki difüzyonunu içermektedir. Bu aşamanın tamamı enjeksiyon makinesinin plastikleştirme ünitesi ve SCF ünitesinde gerçekleşmektedir.

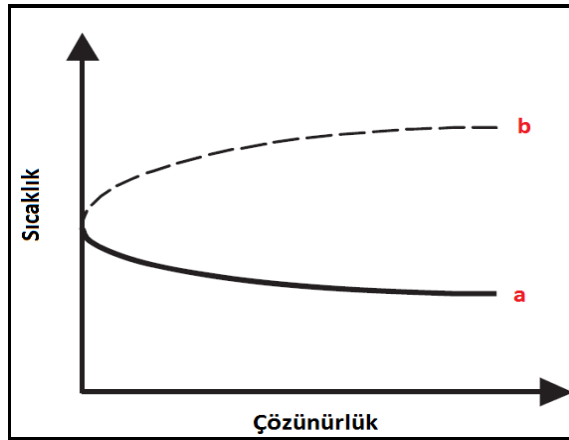
Kalıplama bölümü ise çekirdeklenme, gözenek büyümesi, kalıp doldurma ve soğuma evrelerini içermektedir. Kalıplama bölümü enjeksiyon makinesi ve kalıp ikilisinde gerçekleşmektedir.

3.4.1. Plastikleştirme

MuCell prosesinin bu bölümünde amaç tek fazlı bir polimer-SCF karışımının elde edilmesidir. Bu nedenle de SCF'nin polimer içerisinde çözünürlüğü, çözünme hızı, polimer içerisindeki difüzyon hızı, giriş yapan SCF damlacıklarının yüzey alanı, çözünme süresi gibi dikkat edilmesi gereken konular bulunmaktadır. Fakat bunların kontrolü dolaylı yoldan proses parametreleri ile yapılabilmektedir. Bu bölümde sırası ile tek fazlı karışımın elde edilmesi için önemli olan parametreler ve etki ettikleri değişkenler anlatılacaktır.

3.4.1.1. Kovan sıcaklığı

Tek fazlı çözeltinin oluşmasında temel değişken gaz ve polimerin birbiri içerisindeki çözünürlükleridir. Çünkü çözünürlük değerinin bilinmesi malzeme içerisine eklenmesi gereken SCF'nin miktarının belirlenmesini kolaylaştıracaktır. Ancak bu sıvı gaz karışımının çözünürlüğü de sıcaklık ve basınç parametrelerine göre değişkenlik göstermektedir.



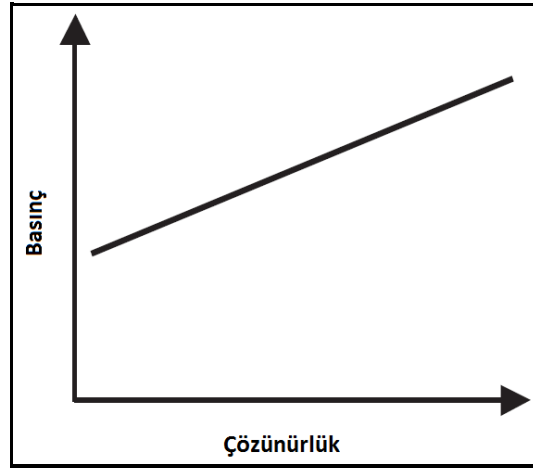
Şekil 3.16. Eriyik-SCF karışımının sıcaklık-çözünürlük ilişkisi (a) Genel trend (b) Ters çözünürlük durumu [30]

Kovan sıcaklığı karışımın sıcaklığını belirlediğinden direkt olarak çözünürlük değerini belirleyen parametrelerdendir. Çözünürlük-Sıcaklık ilişkisi ters orantılı olarak çalışmaktadır. Genel trend olarak ortam sıcaklığı arttıkça gazın çözünürlüğü düşerken, sıcaklık düştükçe çözünürlük artmaktadır (Şekil 3.16-a). Ancak malzeme ve gaz cinsine göre tersi istisnai değişimler olabilmektedir (Şekil 3.16-b) [30, 35].

Kovan sıcaklığının etki ettiği bir başka değişken ise gaz moleküllerinin eriyik içerisindeki difüzyon hızıdır. Difüzyon hızı temel olarak gaz moleküllerinin eriyik içerisindeki hareket hızını belirlemektedir. Yani başka bir deyişle difüzyon hızı çözünme hızını belirleyen bir değişkendir. Çözünmenin gerçekleşmesi için sınırlı bir zamana sahip olduğu düşünülürse, difüzyon hızının artması istenen bir durumdur. Ancak sıcaklığın çözünürlükle ters orantılı çalışması ve ikinci bölümde anlatılacak olan etkilerinden dolayı ticari üretimlerde genel olarak kovan sıcaklığı standart enjeksiyon sıcaklığı ile aynı seçilmektedir.

3.4.1.2. Geri basınç

Çözünürlük ve difüzyon hızına etki eden önemli parametrelerden birisi de basınçtır. Proses koşulları düşünüldüğünde çözünmenin gerçekleştiği basınç, mal alma esnasındaki geri basınç olarak göze çarpmaktadır.



Şekil 3.17. Eriyik-SCF karışımının basınç-çözünürlük ilişkisi [30]

Basınç parametresi sıcaklığın aksine çözünürlükle doğru orantılı olarak çalışmaktadır. Hatta basınç-çözünürlük ilişkisinin lineer bir karakter gösterdiği söylenebilir (Şekil 3.17). Yani geri basınç arttıkça eriyik içerisinde çözebileceğimiz gaz miktarı artmaktadır. Geri basıncın gaz difüzyon hızına etkisi incelendiğinde ise geri basınçtaki artışın gaz difüzyon hızını arttırdığı görülmüştür [30, 35].

Tek fazlı karışımın eldesi için geri basınç ve kovan sıcaklığı karşılaştırıldığında, çözünürlük ve difüzyon hızını arttırıcı etki yaptığından, geri basınç daha efektif ve önemli bir parametredir.

3.4.1.3. Mal alma hızı

Mal alma hızı temel olarak vidanın çevresel hareket hızına bağlıdır. Vidanın çevresel hızının artması ise malzeme kovan içerisindeki malzeme akış hızını artırırken, oluşturduğu kesme kuvveti ile mekanik olarak sıcaklığın artmasına sebep olur. Malzeme hareketinin artması gazın difüzyon hızını artırıcı bir etki gösterir. Buna ek olarak kovana giriş yapan SCF damlacıklarının kesme kuvveti ile daha küçük damlalar haline gelmesini ve eriyik ile yüzey alanının artmasını sağlamaktadır. Tüm bu etkiler düşünüldüğünde mal alma hızının artırılması çözünme hızını artırıcı etki göstermektedir [30].

3.4.1.4. Mal alma süresi

Mal alma süresi vidanın çevresel hızının yanında geri basınçla da alakalıdır. Vida hızı arttıkça mal alma süresi kısalırken, geri basınç artışı vida önündeki basıncın sağlanması için daha fazla hammadde akışı gerekeceğinden mal alma süresini artırıcı bir etki yapmaktadır. Mal alma süresinin MuCell prosesi için iki önemli etkisi bulunmaktadır. Bunlardan birincisi, gaz giriş hızı ve debisinin belirlenmesi, diğeri ise çözünmenin gerçekleşmesi için gerekli süreyi sağlamasıdır [30].

Mal alma süresinin gereğinden fazla kısa olması durumunda, gazın daha yüksek debide girişinin sağlanması gerekir. Bu da SCF damlacıklarının daha büyük boyutta olması dolayısıyla eriyik-damlacık yüzeyinin azalması ve çözünme hızının azalması demektir. Hatta mal alma süresi belirli bir seviyenin altında kalırsa SCF'nin tam olarak çözünmemesi söz konusu olabilir.

Her ne kadar vida hızının artması çözünme hızını arttırsa da mal alma hızı gaz çözünmesinin tamamlanmasını için gerekli süreyi sağlayacak şekilde seçilmelidir. Aksi takdirde çözünmemiş gaz bir sonraki aşamada parçanın hatalı olmasına sebep olacaktır.

3.4.1.5. Kütlece % SCF miktarı

Kütlece % SCF miktarı, malzeme, SCF cinsi, mevcut geri basınç ve kovan sıcaklığına göre belirli aralıklarda seçilebilmektedir. Çünkü bu miktar eriyik içerisinde çözündürülecek gaz miktarından fazla olmamalıdır. Çözünürlük ne kadar yüksek ise bu değer o kadar yüksek seçilebilir.

SCF miktarı belirlenirken tek düşünülmesi gereken çözünürlük olmamalıdır. Çünkü diğer proses parametrelerine bağlı olarak her zaman optimum miktarda SCF'nin çözündürülmesi mümkün olmayabilir.

SCF miktarının belirlenme kısıtlarından bahsettikten sonra bu parametrenin parça ve mikro gözenek yapısına etkisine de değinmek gerekmektedir. Birinci aşamada oluşturulan çözeltinin içerdiği SCF miktarı ne kadar çok ise nihai ürün iç yapısında oluşacak gözenek büyüklüğü o kadar küçük ve uniform olacaktır. Küçük ve uniform dağılımlı gözenekler ise parçanın mukavemet değerlerindeki düşüşü azaltıcı etki yapmaktadır. Ayrıca gözenek yapısının istenen şekilde oluşması çarpılma ve çekme açısından normal enjeksiyona göre avantaj eldesini sağlamaktadır [30, 64-66].

3.4.1.6. SCF giriş basıncı

Kovan sıcaklığı, basıncı ve bu değerlere uygun miktarda gaz girişi belirlendikten sonra bir diğer önemli parametre de SCF giriş basıncı olarak göze çarpmaktadır. Gaz çözünürlüğünün büyük oranda kovan içerisindeki basınca bağlı olmasından ve gaz miktarının buna göre ayarlanmasından dolayı kovan basıncının sabit tutulması istenmektedir. Bu nedenle SCF giriş basıncının kovan basıncı ile birlikte sürekli olarak kontrol edilmesi ve olabildiğince sabit bir basınçta gazın kovana girişi sağlanmalıdır. Ancak SCF enjektörünün açılış ve kapanışı sırasında gaz giriş basıncında önemli miktarlarda düşüşler gözlemlenmektedir [30].

Kovan içerisindeki basıncın sabit tutulması için SCF giriş basıncının geri basınçtan daha yüksek seçilmesi gerekmektedir. Bu durum için Trexel kullanım klavuzlarının önerdiği değer ise +13,8 bar basınç olarak verilmiştir. Ayrıca ticari olarak kullanılan MuCell makinelerinde SCF giriş basıncındaki düşüş değerleri anlık olarak kontrol edilebilmektedir. Her çevrim için basınç düşüş değerinin 3,5 ila 13,8 bar aralığında kalması istenmektedir. Bu değer 3,5 barın altına kalırsa SCF giriş basıncı yükseltilmeli, 13,8 barın üzerine çıkarsa; geri basınç arttırılmalı ya da SCF basıncı düşürülmelidir [51].

SCF giriş basıncının bir diğer etkisi ise giriş yapan gaz damlacıklarının boyutudur. SCF giriş basıncı ne kadar yüksek olursa bu damlacıkların boyutu o kadar büyük

olacaktır. Bu da damlacık yüzey alanını küçülteceğinden çözünme hızını yavaşlatıcı bir etki yapacaktır.

3.4.1.7. SCF enjektör açık kalma süresi

SCF enjektör açık kalma süresi temel olarak SCF giriş debisine etki eden bir parametredir. Giriş yapacak olan gaz miktarı belirli ise enjektör ne kadar açık kalırsa giriş debisi de o kadar düşük olacaktır. Bazı proses ayarlarında giriş debisinin belirli bir değerde olması istenirken, bir kısmında da enjektör açık kalma süresine göre denk gelen debi kullanılmaktadır.

MuCell prosesinde SCF enjektörünün açık kalma süresi birçok etken tarafından sınırlanmaktadır. Bunların başında mal alma süresi gelmektedir. Çünkü işlem sadece mal alma esnasında yapılabilmektedir. Ayrıca enjektörün açılma zamanı mal alma işleminin başlangıcına denk getirilmemelidir. Bunun sebebi ise mal alma işlemi başladığı anda kovan içi basıncının sabit olmamasıdır [30].

SCF enjektörünün açıldığı anda kovan basıncının sabit olduğuna dikkat edilmesi gerekmektedir. Bu nedenle de genel olarak enjektör açık kalma süresi belirlenirken ilk adım olarak enjektörün açılacağı mesafe belirlenmelidir. Trexel önerilerine göre mal alma işleminin başladığı strok mesafesinden en az 15 mm sonra enjektör açılmalıdır. Enjektör açılma mesafesi belirlendikten sonra toplam enjektör açık kalma süresi, toplam mal alma süresinin % 80'ini geçmemesi gerekmektedir [51].

3.4.1.8. SCF giriş debisi

SCF giriş debisi, gazın eriyik içerisinde çözünme hızına etki eden bir parametredir. SCF girişi ne kadar yavaş olursa gaz damlacıklarının boyutu o kadar küçük olacaktır. Bu da daha önce anlatıldığı gibi çözünme hızını arttırıcı bir etki yapacaktır. Ancak enjektör açık kalma süresinin çeşitli kısıtlara sahip olması giriş debisini sınırlı olarak düşürebilmeyi beraberinde getirir [30].

SCF giriş debisinin enjektör açılma süresi dışındaki bir başka kısıtı ise SCF ayar ünitesinin sağlayabileceği belirli bir debi aralığının olmasıdır. Eğer ki maksimum enjektör açık kalma süresi sağlanmasına karşın istenen SCF giriş debisi elde edilemese, öncelikle vida çevresel hızı düşürülerek mal alma süresi artırılmalıdır.

3.4.2. Kalıplama

Kalıplama aşaması kovan içerisinde elde edilen tek fazlı çözeltinin kalıp boşluğuna hareket etmesi ile başlamaktadır. Daha sonra kalıbı dolduran malzemenin tamamen soğuması ile bu aşama tamamlanmaktadır. Bu aşamada nihai ürün iç yapısı elde edildiğinden en az tek fazlı çözeltinin elde edildiği ilk aşama kadar önemlidir.

Gözenek boyutu, sayısı, yoğunluğu ve homojen dağılıp dağılmadığı bu aşama için dikkat edilmesi ve kontrol edilmesi gereken konulardır. MuCell proses parametreleri düşünüldüğünde bu aşamada etkin olan parametreler; enjeksiyon hızı, kalıp sıcaklığı olarak sıralanabilmektedir. Ancak bir önceki aşama parametreleri olan; geri basınç, eriyik sıcaklığı(kovan sıcaklığı), ve eriyik içerisindeki SCF miktarının kalıplama aşamasında da etkin olduğu görülmektedir [30, 36].

3.4.2.1. Enjeksiyon hızı

Nihai ürün içerisindeki gözenek sayısını belirleyen en önemli olay enjeksiyon esnasındaki çekirdeklenme miktarıdır. Çekirdeklenme, eriyik içerisinde çözünmüş halde bulunan gazın ani basınç düşüşü etkisi ile çökelerek gözenekleri oluşturması işlemidir. Çekirdeklenme sayısına etki eden en önemli değişken daha önce “çekirdeklenme evresi” başlığı altında anlatıldığı gibi basınç düşüş hızıdır. Yine aynı bölümde belirtildiği üzere proses parametrelerinden bu hıza etki eden tek parametre enjeksiyon hızıdır.

Enjeksiyon hızı arttırıldıkça basınç düşüş hızı, dolayısıyla çekirdeklenme miktarı artmaktadır. Çekirdeklenme miktarının artması ise nihai ürün iç yapısında daha fazla sayıda ve daha küçük boyutta gözeneklerin elde edilmesini sağlamaktadır [30, 64-66].

MuCell yönteminin başlıca amaçlarından birisi olabildiğince küçük ve çok sayıda homojen dağılımlı gözenekler elde etmek olduğundan enjeksiyon hızı bu anlamda çok büyük önem taşımaktadır. Ancak enjeksiyon hızının arttırılması iç yapıya sağladığı avantajların aksine, parça yüzeyindeki akış izleri ve yüzey pürüzlülüğünü arttıran bir parametredir.

3.4.2.2. Kalıp ve kovan sıcaklığı

Malzemenin kalıp boşluğuna enjeksiyonu ile gaz çekirdeklenmesinin oluşumundan sonra kalıp yüzeyine temas eden malzemeler ani soğuma sebebiyle katılaşır. Katılaşma parçanın dış yüzeyinde gözeneksiz bir katmanın oluşmasını sağlar. Bu esnada parçanın merkezinde sıcaklık katılaşmanın gerçekleşmesine yetecek kadar düşük değildir. Ayrıca MuCell yönteminde standart enjeksiyon yöntemine göre daha düşük bir strok kullanıldığından oluşan gözenekler büyümek için yeterli alana sahip olur. Diğer yandan çekirdeklenemeyip halen polimer içerisinde bulunan gaz molekülleri yakınında bulunan gözeneklere katılarak gözenek büyümesini tetikler. Gözenek büyümesi malzemenin genişleyerek kalıp boşluğunu doldurmasını sağlar ve parçanın tamamen katılaşması gerçekleşene kadar devam eder [30, 43].

Kalıp sıcaklığı bu aşamada malzemenin soğuma hızını belirleyen bir parametredir. Kalıp sıcaklığı ne kadar düşük seçilirse malzemenin soğuma hızı o kadar artar ve soğuma süresi bir o kadar kısalır. Kovan sıcaklığı için ise bu durumun aynısı geçerlidir. Kovan sıcaklığı ne kadar düşük seçilirse soğuma hızı orantılı olarak düşecektir. Kalıp ve kovan sıcaklıklarının düşük seçilmesi soğuma hızını arttırırken nihai ürün iç yapısına da etki etmektedir. Yüksek hızda soğuyan malzeme içerisinde gözenek büyüme evresi de kısa sürmektedir. Bu da nihai ürünlerde daha küçük boyutlu gözeneklerin elde edilmesini sağlamaktadır [47, 48].

3.4.2.3. Kütlece % SCF miktarı

Kalıplama bölümünde kütlece % SCF miktarının etkisi oluşacak gözeneklerin boyutu ve yoğunluğu açısından önemli bir parametredir. Eriyik içerisinde çözündürülen SCF miktarı ne kadar yüksek olursa, enjeksiyon esnasında ani basınç düşüşü ile çökecek gaz miktarı ve çekirdeklenme sayısı bir o kadar artar. Bu da daha küçük boyutlarda ve daha yüksek sayıda gözenek miktarının elde edilebilmesini sağlamaktadır. Yani SCF miktarı plastikleştirme bölümünde belirlenen bir parametre olmasına karşın kalıplama bölümünde yaptığı etki ile nihai ürün iç yapısının belirlenmesini sağlamaktadır [30, 47-48].

3.5. Yöntemin Avantajları

MuCell yöntemi standart enjeksiyon yöntemi ile karşılaştırıldığında karşımıza bir çok avantajı çıkmaktadır. Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde MuCell'in avantajları;

- Hammadde tasarrufu
- Viskozite düşüşü
- Çevrim süresi düşüşü
- Kapama tonajı düşüşü
- Daha küçük boyutlu makinede üretim (düşük makine yatırımı)
- Çöküntü oluşumunun engellenmesi
- Boyutsal kararlılık
- Enerji tasarrufu
- Tasarım kolaylığı gibi sıralanabilir [30, 38-41, 43-57].

İki yöntem arasındaki en belirgin farklılık tabiki parça ağırlıklarındaki düşüştür. MuCell yönteminde kullanılan fiziksel köpürtme ajanının parça içerisinde oluşturduğu gözenekler proses esnasındaki strok boyunun azaltılabilmesini böylece hammadde tüketiminde tasarruf elde edilmesini sağlamaktadır [53].

Fiziksel köpürtme ajanı hammaddenin özelliklerini değiştirici bir etki göstermektedir. Bu değişimlerin başında ise malzemenin viskozitesi ve polimer malzemenin camsı geçiş sıcaklığı gelmektedir. Viskozitesi düşen malzeme, akıcılığı arttığından kalıp boşluğunda aldığı yol mesafesi artmaktadır. Rahat akışın sağlanması enjeksiyon süresinin belirgin şekilde azalmasını sağlamaktadır [54].

Viskozite ve camsı geçiş sıcaklığındaki düşüş prosesin daha düşük sıcaklık ve basıçta gerçekleştirilebilmesini elverişli kılar. Ayrıca viskozite düşüşü kalıp içerisindeki süretünme kuvvetlerini arttırdığından kapama tonajında düşüş elde edilebilmektedir. Bu da daha düşük tonajlı makinede üretimin ve soğuma süresinde düşüşün gerçekleşmesinin önünü açmaktadır. Düşük tonajlı bir makine kullanımı ise daha az enerji sarfiyatının yanında daha düşük bir ilk yatırım maliyeti sağlamaktadır [48].

Viskozitedeki düşüşün bir diğer avantajı ise tasarım açısında elde edilmektedir. Fiziksel köpürtme ajanı sayesinde daha düşük bir viskoziteye sahip olan eriyip kalıp

içerisinde daha rahat ve uzun bir mesafe kaydebilmektedir. Yüksek hızlarda enjeksiyonu mümkün kılmaktadır. Yüksek hızda enjeksiyon işlemi yapılabilmesi ve yüksek akıcılık sayesinde daha düşük et kalınlıklarında çalışmak MuCell ile mümkün kılınmaktadır [55].

MuCell yönteminde parça içerisinde oluşan mikro gözeneklerin parça içerisinde oluşturduğu basınç çökütü oluşumunun engellemektedir. Standart enjeksiyonda çöküntü oluşumunu engellemek için uygulanan tutma basıncı ise gözeneklerin oluşturduğu basınç sayesinde elimine edilmektedir. Mikro gözeneklerin parça yüzeyine yaptığı basınç ayrıca boyutsal kararlılığın artmasını, dolayısıyla da çekme ve çarpılmanın azalmasını sağlamaktadır [56-57].

Oluşan iç basınç sayesinde tutma süresinin elimine edilmesi, hücre büyümesi esnasında oluşan endotermik reaksiyonlar, soğutulacak daha az malzemenin oluşu ve viskozite düşüşünün kesme kuvveti nedeniyle oluşturduğu sıcaklık artışının azaltması MuCell yönteminde % 50'lere varan çevrim süreleri elde edilebilmektedir [58].

3.6. Yöntemin Dezavantajları

Anlatılan bunca avantaja rağmen MuCell kusursuz bir yöntem değildir. Mikro gözeneklerin yüzeyde oluşturduğu akış izleri bu yöntem ile görsel parçaların üretimini kısıtlamaktadır. Ayrıca boyanabilirlik konusunda şuana kadar tamamlanmış yeterli miktarda çalışma mevcut değildir. Bunlara ek olarak MuCell yönteminin uygulanması enjeksiyon prosesinde çeşitli değişiklik gereksinimini de yanında getirmektedir. Yönteme uygun yeni bir vida-kovan sistemi ve SCF ünitesinin ilk yatırım maliyetini arttırdığı bilinmektedir. Standart enjeksiyon yöntemine göre kontrol edilmesi gereken değişkenlerin artması da MuCell prosesinin optimizasyonunu zorlaştıran bir faktördür. Günümüzde bu yöntem ile ilgili birçok şirket tarafından çok sayıda çalışma yapılsa da standartlaştırma ve know-how konusundaki eksiklikler yöntemin bir diğer dezavantajı olarak göze çarpmaktadır [30].

4. MİKRO GÖZENEKLİ ENJEKSİYON KALIPLAMA LİTERATÜR ÇALIŞMALARI

MuCell yönteminde kullanılan malzeme, malzeme içerisine katılan katkı maddeleri ve proses parametreleri nihai ürün mikro yapısındaki gözenek boyutu, gözenek yoğunluğu ve dağılımını etkileyen önemli parametrelerdir. Gözenek yapısı MuCell yöntemi ile üretilen parçaların özellikle mekanik özelliklerine direkt olarak etki eden bir unsurdur. Standart enjeksiyon yöntemine göre MuCell yönteminin mekanik özelliklerde dezavantaja sahip olduğu düşünüldüğünde, gözenek yapısının olabildiğince küçük, yoğun ve homojen dağılım göstermesi önem arz etmektedir. Bu nedenle de MuCell parça gözenek yapısına ve dolayısıyla diğer özelliklerine etki eden parametrelerin irdelenmesi adına bu bölüm kapsamında literatürde gerçekleştirilen çalışmalar özetlenmiştir.

4.1. Malzeme ve Katkı Maddelerinin Etkisi

S-S. Hwang, P.P. Hsu, C-H. Hu ve K-C. Chang PS (Polistiren) malzemeyi % 0-3 oranlarında organik kil ile birleştirerek standar enjeksiyon ve MuCell yöntemleri ile üretimler gerçekleştirmişlerdir. MuCell üretimleri için fiziksel köpürtme ajanı olarak azot gazı kullanılan çalışmada üretim parametreleri her iki yöntem için de sabit tutulmuştur. Böyle organik kil miktarının gözenek yapısı, mekanik ve termal özelliklere etkisi gözlemlenmiştir. Çalışma sonucunda organik kil miktarının % 1 oranına kadar artışının gözenek boyutunu küçültüp yoğunluğunu ve ağırlık düşüşünü arttırdığı gözlemlenmiştir. Organik kil oranının % 1 üzerine çıkması ise tam tersi sonuçlar vermiştir. Çekme dayanımı ve gözenek yapısı sonuçları incelendiğinde ise % 1 üzerindeki karışımlarda gözenek büyümesi sebebi ile gözenek duvarlarının küçülmesi sebebi ile dayanımın düştüğü yorumu yapılmıştır [59].

S-S. Hwang, S.P. Liu, P.P. Hsu, J-M. Yeh ve K-C. Chang PBT (Polibütilen tereftalat) malzemeye 8 ve 35 µm boyutlarında ve % 0-4 oranlarında organik kil katılak nanokompozitler elde ederek standart enjeksiyon ve MuCell (Azot gazı fiziksel köpürtme ajanı olarak kullanılmıştır) yöntemleri ile üretimler

gerçekleştirilmiştir. Çalışmada kil boyutunun ve karışım oranın gözenek yapısı, mekanik ve termal özelliklere etkisi incelenmiştir. Çalışma sonucunda ise % 1 oranına kadar kil miktarı artışının ağırlık düşüşü, gözenek boyutu düşüşü ve gözenek yoğunluğu artışını sağladığı gözlemlenmiştir. Kil oranının % 1 üzerine çıkması bu özellikleri ters oranda etkilemiştir. Ayrıca çekme testi sonuçlarına göre gözenek miktarı artan % 1 kil katkılı nano kompozitlerde dayanımın gözenekler arasındaki malzeme miktarı artışına bağlı olarak arttığı sonucuna ulaşılmıştır [60].

S-S. Hwang ve P.P. Hsu yaptıkları çalışmada PP malzemeye boyutları mikrometre ve nanometre seviyelerinde değişen iki çeşit silika partiküllerini % 0-10 aralığında değişime oranlarada karıştırarak çeşitli kompozitler elde etmişlerdir. Elde edilen kompozitler ile daha sonra standart enjeksiyon ve MuCell (Azot gazı fiziksel köpürtme ajanı olarak kullanılmıştır) yöntemlerini kullanarak üretimler gerçekleştirilmiştir. Çalışmada partikül boyutu ve karışım oranının mikro yapı, mekanik ve reolojik özelliklere etkileri gözlemlenmiştir. Çalışma sonucunda nano boyutlu partiküllerin gözenek boyutu ve yoğunluğu açısından mikro boyutlu partikül katkısına göre daha iyi sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir [61].

P.P. Hsu ve arkadaşları maleik anhidrit ile graft edilmiş LDPE malzeme ile % 0-5 oranları arasında kil takviyesi ile elde edilmiş kompozitlerin standart enjeksiyon ve MuCell yöntemleri (Azot gazı fiziksel köpürtme ajanı olarak kullanılmıştır) ile üretimlerini gerçekleştirmiştir. Çalışmada kil oranının termal, mekanik özelliklere etkisi ve gözenek yapısına etkisi incelenmiştir. Çalışma sonucunda kil miktarındaki artış ile gözenek boyutunda düşüş yoğunluğunda ise artış gözlemlenmiş ve kil miktarının çekirdeklenmeyi arttırıcı etki gösterdiği sonucuna varılmıştır [62].

A. Ameli ve arkadaşları % 0-5 oranında takviye edilmiş PLA (Polilaktik asit) malzeme ile yaptıkları MuCell üretimlerinde enjeksiyon hızı ve talk miktarının gözenek morfolojisine etkisini gözlemlemiştir. Çalışma sonucunda artan talk miktarının gözenek boyutunu düşürüp yoğunluğunu arttırdığı sonucuna varılmıştır [63].

4.2. Üretim Parametrelerinin Etkisi

S.C. Chen ve arkadaşları MuCell üretim parametrelerinin parça mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini gözlemlemek amacı ile PC malzeme ile farklı et kalınlıklarında test numuneleri üretmiştir. Fiziksel köpürtme ajanı olarak azot gazı kullanılarak her numunen için ortalama % 20 ağırlık düşüşü elde edilmiştir. Çalışma sonucunda, kovan sıcaklığı ve kalıp sıcaklığı arttıkça çekme ve darbe dayanımı arttığı, geri basınç arttıkça çekme dayanımı küçük bir artış gösterirken darbe dayanımı düştüğü, enjeksiyon hızı arttığında 1.2 mm et kalınlığındaki numunelerde çekme dayanımı ciddi şekilde artarken 2,5 mm et kalınlığında çok az bir artış olduğu ve darbe dayanımına etkisi olmadığı, malzeme miktarı arttıkça çekme dayanımında artış elde edilirken darbe dayanımında değişim gözlemlenmediği, kalıp içi basınç değerlerinde ise standart enjeksiyon yöntemine göre et kalınlığı arttıkça artan bir düşüş elde edildiği gözlemlenmiştir [40].

S.J.A. Rizvi ve N. Bhatnagar yaptıkları çalışmada PS malzeme kullanarak MuCell üretim parametrelerinin gözenek morfolojisine etkisini incelemiştir. Çalışmada enjeksiyon hızı ve malzemenin kovanda bekleme süresi arttıkça gözenek boyutunun azaldığı, geri basınç artışının gaz çözünürlüğünü arttırdığı ve daha küçük boyutta ve yüksek yoğunlukta gözenek yapısı elde edildiği ve kovan sıcaklığındaki artışın gözenek boyutunu arttırdığı ve yoğunluğunu azalttığı sonuçları elde edilmiştir [64].

S.A. Edwards ve arkadaşları yaptıkları çalışmada PP ve POM (Polioksimetilen) hammaddelerini MuCell yöntemi ile otomotiv dış trim parçalarını üretmek için kullanılmıştır. Çalışmada her iki malzeme için de MuCell parametrelerinin mekanik özellikler üzerindeki etkilerini incelenmiştir. Çalışmada her iki malzeme için de ağırlık düşüşündeki artışın çekme, eğilme ve darbe dayanımlarını düşürdüğü, enjeksiyon hızının artışının çekme ve eğilme dayanımlarını arttırdığı, kovan sıcaklığı artışının ise darbe dayanımını arttırdığı gözlemlenmiştir [53].

L-S. Turng ve H. Kharbas, Taguchi deney tasarımı kullanarak (L9 dikey sıralama) MuCell proses parametrelerinin kaynak hattı dayanımına etkisini incelemiştir. Çalışmada hem standart enjeksiyon hem de MuCell yöntemleri ile üretimler gerçekleştirilmiştir. PC hammadde ve azot fiziksel köpürtme ajanı kullanılan çalışmada dört farklı parametrenin (kovan sıcaklığı, malzeme miktarı, SCF miktarı,

enjeksiyon hızı) kaynak izi mukavemeti incelenmiştir. Çalışma sonucunda kovan sıcaklığı, malzeme miktarı, enjeksiyon hızı artışı ile kaynak mukavemetinde yükselme gözlemlenirken, SCF miktarı artışı ile düşüş gözlemlenmiştir. Ayrıca bu parametreler arasında en büyük etkiyi malzeme miktarı yapmıştır [65].

Zhang ve arkadaşları yaptıkları çalışmada MuCell üretim parametrelerinin mekanik özelliklere etkilerini gözlemlemeyi amaçlamıştır. Bu noktada pentaeritritol ve piromellitik diandrit (PMDA) ile modifiye edilmiş iki farklı PET malzeme kullanılmış ve standart enjeksiyon ve MuCell yöntemleri ile üretimleri gerçekleştirilmiştir. MuCell yöntemi azot gazı ile gerçekleştirilirken, kalıp sıcaklığı, enjeksiyon hızı, SCF miktarı, malzeme miktarı parametreleri kullanılarak Taguchi yöntemi yardımı ile deney tasarımı yapılmıştır. Pentaeritritol-PET malzeme sonuçlarında çekme dayanımına etki eden parametreler önem sırasına göre malzeme miktarı, kalıp sıcaklığı, enjeksiyon hızı, SCF miktarı gözlemlenirken, PMDA-PET malzemede ise malzeme miktarı, kalıp sıcaklığı ve SCF miktarının enjeksiyon hızına göre daha büyük bir etki yaptığı gözlemlenmiştir [66].

5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada, beş farklı otomotiv plastiği ve iki farklı otomotiv enjeksiyon kalıbının standart enjeksiyon ve MuCell yöntemleri kullanılarak, seri üretim şartlarında üretimleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen numunelerin özellikleri, üretim parametreleri, üretim maliyetleri, çekme dayanımları ve mikro yapıları açısından karşılaştırılmıştır. Deneysel çalışmalarda kullanılan malzemeler, kalıplar, numune hazırlık işlemleri ve testler bu bölüm altında anlatılmıştır.

5.1. Malzeme ve Kalıp

Deneysel çalışmada beş farklı polimerik hammadde kullanılmıştır. Bunlardan üç tanesi polipropilen bazlı iken diğer ikisi ise akrilonitril bütadien stiren bazlı malzemelerdir. Polipropilen bazlı malzemeler; polipropilen-polietilen kopolimeri ve % 20 ve % 40 talk katkılı polipropilen hammaddelerdir.

MuCell yöntemi akış ve gaz izleri gibi çeşitli görsel kusurlara neden olduğundan otomotiv sektöründe araçların görsel olmayan parçalarında tercih edilen bir üretim yöntemidir. Bu nedenle çalışmada, araçlarda genellikle görsel olmayan parçaların üretiminde kullanılan türdeki PP bazlı malzemeler seçilmiştir. Kullanılan diğer malzemeler ise daha çok görsel parçalarda kullanılan ABS ve ABS-PC kopolimerleridir. Bu tarz malzemelerin seçilmesinin sebebi ise görsel kusurların proses parametreleri ile ne seviyede kontrol edilebildiğini gözlemektir. Tablo 5.1’de kullanılan malzemelerin özellikleri verilmiştir.

Çalışma kapsamında PP ve ABS bazlı malzeme üretimleri, akış ve enjeksiyon özelliklerine uygun (yakın) olacak şekilde iki farklı kalıpta gerçekleştirilmiştir. Üretimler ilk önce standart enjeksiyon daha sonra ise MuCell yöntemi ile yapılmıştır.

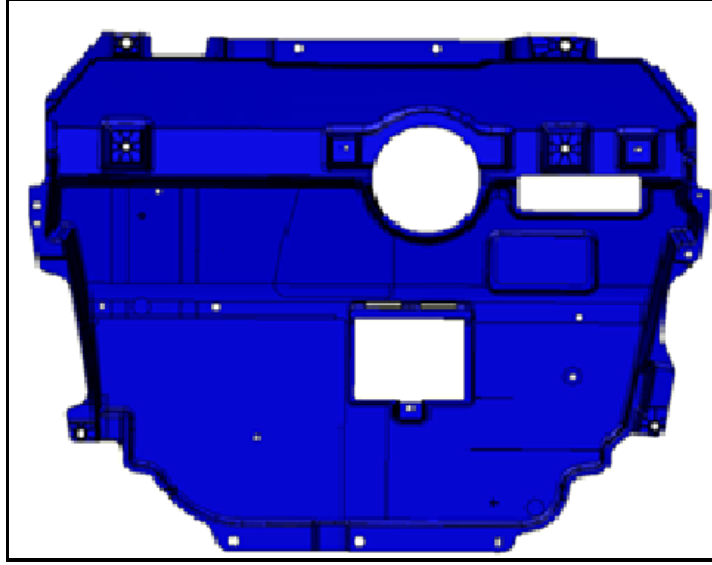
PP bazlı malzemeler, Şekil 5.1’de verilen motor alt kapama parçasının kalıbında uygulanırken, ABS bazlı malzemeler, Şekil 5.2’de verilen üst rüzgarlık parçasının kalıbında uygulanmıştır. Motor alt kapama kalıbı kontrollü 6 adet yolluğa ve 1,65

mm ortalama et kalınlığına sahip iken üst rüzgarlık parçası kontrollü 5 adet yolluğa ve 3,8 mm et kalınlığına sahiptir.

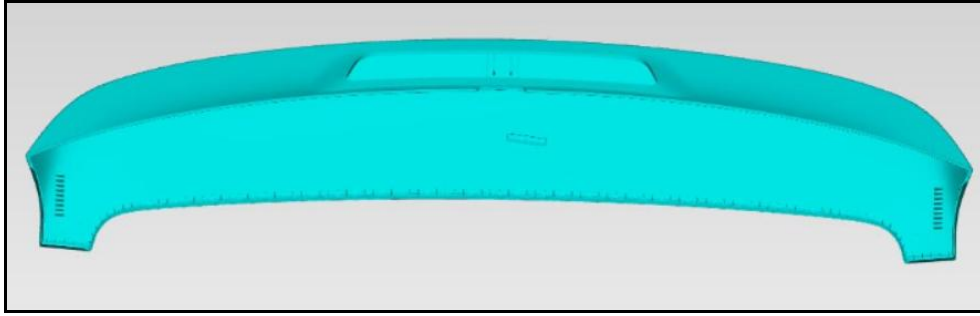
Bu çalışma kapsamında yapılan bütün MuCell üretimlerinde fiziksel köpürtme ajanı olarak azot gazı kullanılmıştır.

Tablo 5.1. Hammadde özellikleri

Polipropilen-Polietilen Kopolimeri	
Üretici Firma	Basell
Ticari Adı	Moplen 2000 Hexp
Yoğunluk (ISO 1183) (g/cm ³)	0,9
Melt Flow Rate (ISO 1133)(230°C-2,16kg)(g/10dk)	16
Polipropilen % 20 Talk Katkılı	
Üretici Firma	Basell
Ticari Adı	Hostacom X M2 V05
Yoğunluk (ISO 1183) (g/cm ³)	1,05
Melt Flow Rate (ISO 1133)(230°C-2,16kg)(g/10dk)	20
Polipropilen % 40 Talk Katkılı	
Üretici Firma	Basell
Ticari Adı	SuPol HT980
Yoğunluk (ISO 1183) (g/cm ³)	1,21
Melt Flow Rate (ISO 1133)(230°C-2,16kg)(g/10dk)	18
Akrilonitril Bütadien Stiren	
Üretici Firma	Dow Plastic
Ticari Adı	Magnum 3416 SC
Yoğunluk (ISO 1183) (g/cm ³)	1,05
Melt Flow Rate (ISO 1133)(230°C-3,8kg)(g/10dk)	2,2
Akrilonitril Bütadien Stiren-Polikarbonat	
Üretici Firma	GE Plastic
Ticari Adı	CYCOLON C1200HF
Yoğunluk (ISO 1183) (g/cm ³)	1,15
Melt Flow Rate (ISO 1133)(260°C-2,16kg)(g/10dk)	9,2



Şekil 5.1. Motor alt kapama parçası

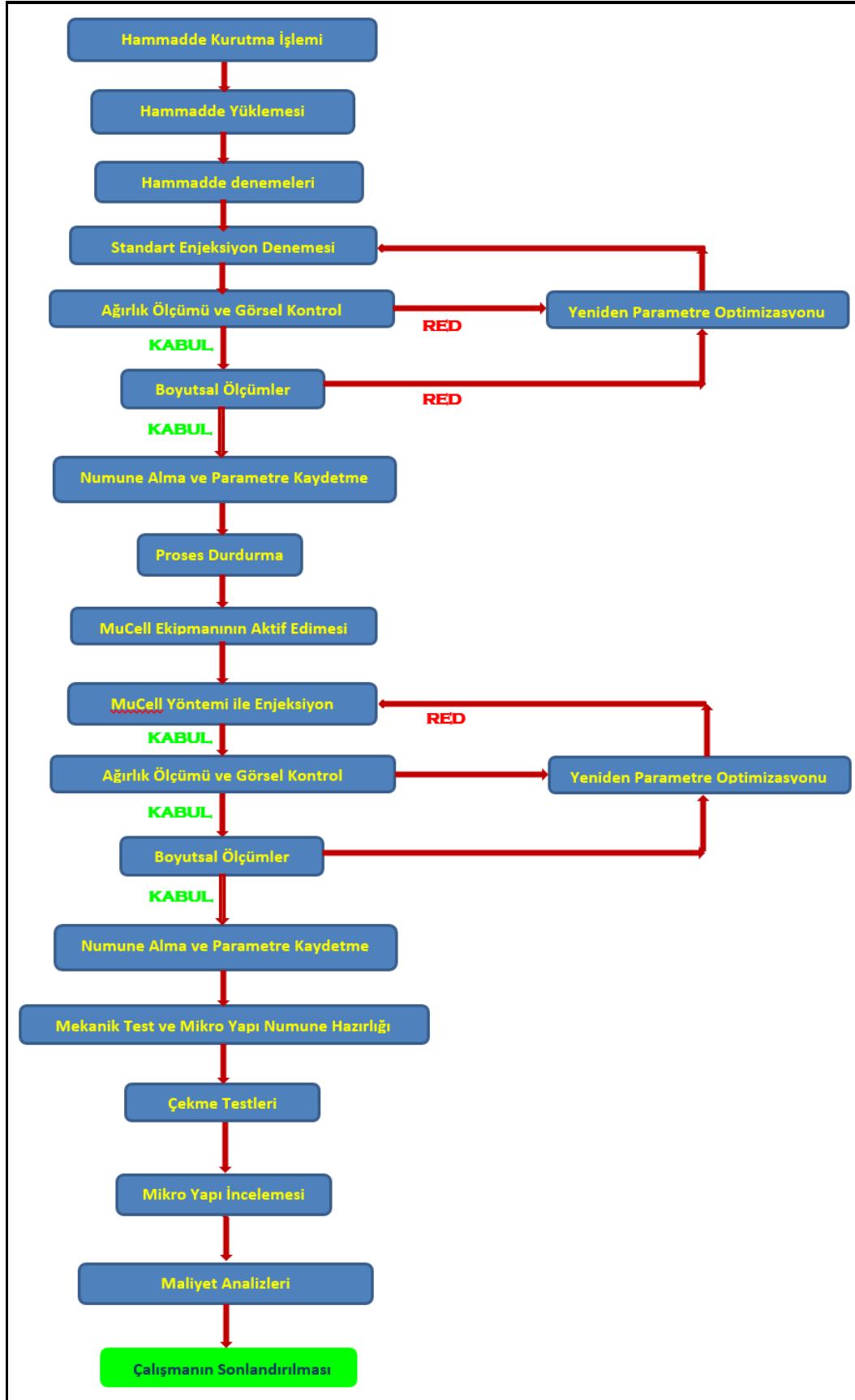


Şekil 5.2. Üst rüzgarlık parçası

5.2. Yöntem

5.2.1. Enjeksiyon denemeleri

Enjeksiyon denemeleri esnasındaki aşamalar şematik olarak Şekil 5.3'te verilmiştir. Enjeksiyon denemelerinin başlangıcında, üretimi yapılacak malzemeye nemden arındırma amacı ile kurutma işlemi uygulanmıştır. Kurutma işleminin gerçekleştirildiği kurutma parametreleri Tablo 5.2'de verilmiştir.



Şekil 5.3. Deneysel çalışma aşamaları şematik gösteri

Tablo 5.2. Hammadde kurutma işlemi parametreleri

Hammadde	Kurutma Süresi	Kurutma Sıcaklığı
PP+PE	2-4 saat	50°C
PP+TD20	4 saat	60°C
PP+TD40	4 saat	60°C
ABS	4 saat	80°C

Kurutma işlemi gerçekleştirildikten sonra, sisteme bu malzemenin girişi yapılarak standart enjeksiyon işlemine geçilmiştir. Standart enjeksiyon ve MuCell üretimleri her iki yöntemde de uygun olarak tasarlanmış olan Krauss Maffei marka MX1600-12000 model 1600 ton kapama kuvveti kapasiteli enjeksiyon makinesi ve Trexel marka MuCell uyumlu vida-kovan sistemi ve SCF ünitesinde gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.4'te çalışmada kullanılan makine verilmiştir.



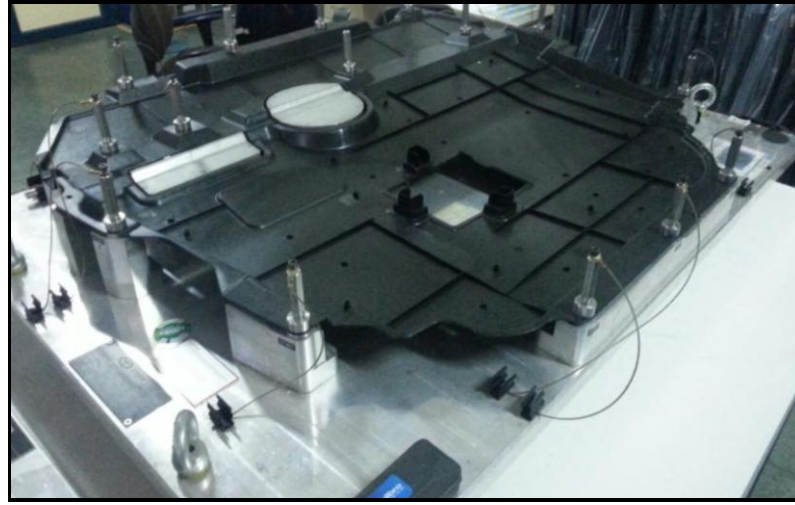
Şekil 5.4. Krauss Maffei marka MX1600-12000 model enjeksiyon makinesi

Standart enjeksiyon denemelerinde amaç; çarpılma, çöküntü, eksik baskı, gramaj hatası gibi herhangi bir problem oluşmayacak şekilde üretimi gerçekleştirmektir. Bu noktada üretim esnasında öncelikle görsel kontroller ve ağırlık ölçümü yapılmıştır. Ağırlık ölçümlerinin yapıldığı Desis marka T2B model elektronik tartı Şekil 5.5'te verilmiştir. Gözle görülür bir problem olmaması durumunda ise seri üretim koşullarının gözlemlenmesi için belirlenen üretim parametrelerinde otuz adet parça üretimi gerçekleştirilmiştir. Seri üretim esnasında herhangi bir hata gözlemlenmemesi durumunda, parçalar paketlenerek boyusal ölçümlerin yapılmak üzere depoya yollanmıştır.



Şekil 5.5. Desis marka T2B model elektronik tartı

Üretilen numunelerin boyutsal kontrolü parça geometrisine göre, Şekil 5.6 ve 5.7’de verilen fişstürlerde gerçekleştirilmiştir. Görsel ya da boyutsal kontrol esnasında problemler çıkması durumunda ise parametre optimizasyonu yapılarak deneme tekrar edilmiştir. Parçaların boyutsal olarak belirlenen tolerans aralıklarında olması durumunda testler için belirlenen sayıda parça paketlenerek üretim durdurulmuştur.



Şekil 5.6. Motor alt kapama parçası fişstürü

Standart enjeksiyon üretimi gerçekleştirildikten sonra MuCell ekipmanları aktif edilerek gözenekli parça üretimine geçilmiştir. MuCell yöntemi ile üretimde ilk olarak hedeflenen ağırlık düşüşüne göre gerekli SCF parametreleri Şekil 5.8’de verilen MuCell SCF ayar ünitesi yardımı ile belirlenmiştir. SCF parametre (SCF giriş basıncı, SCF giriş debisi, enjektör açılma pozisyonu ve süresi, SCF miktarı) ayarları yapıldıktan sonra üretime geçilmiştir.



Şekil 5.7. Üst rüzgarlık parçası fikstürü

MuCell yöntemi ile yapılan üretimlerde de aynı standart enjeksiyon denemeleri gibi ağırlık ölçümü ve görsel kontrol yapılmış hata gözlenmemesi durumunda otuz adet parça üretimi gerçekleştirilmiştir. Daha sonra boyutsal ölçümleri yapılan parçalarda problem gözlemlenmesi durumunda, parametre optimizasyonuna dönülerek üretim tekrar edilmiştir.



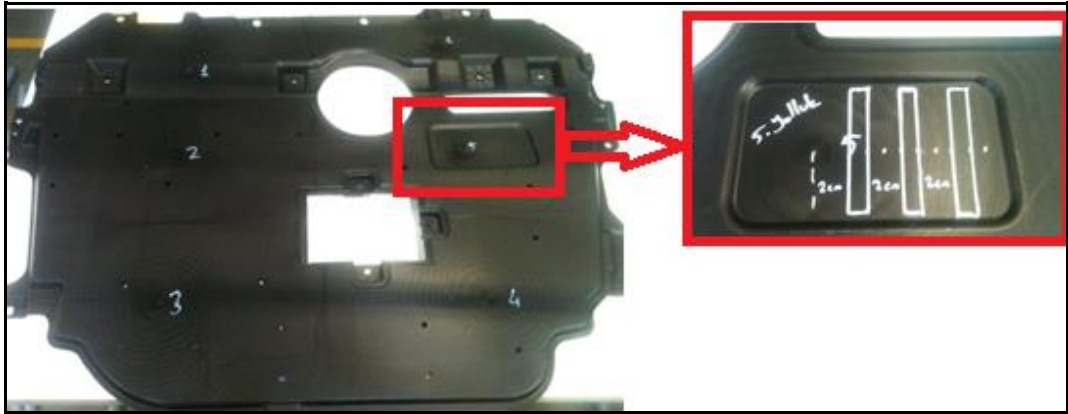
Şekil 5.8. Çalışmada kullanılan SCF ayar ünitesi

5.3.2. Çekme testleri

Bu bölümde ilk olarak enjeksiyon denemelerinde elde edilen parçalardan, mekanik testler için test numunesi alınması işlemi anlatılacaktır. Denemelerde iki farklı geometride parça üretimi yapılmasına karşın üst rüzgarlık parçasının geometrisi test çubuğu kesimi için uygun bulunmamıştır. Bu nedenle yalnızca motor alt kapama parçalarının mekanik testleri yapılmıştır.

Çekme testlerinde yalnızca gözenekli ve gözeneksiz parçaların mekanik özelliklerinin karşılaştırılması amaçlanmamış, akış doğrultusunda 3 farklı mesafede numuneler alınarak akış mesafesinin çekme testi sonuçlarına etkisi de gözlemlenmiştir. Bu noktada, 6 yolluğa sahip motor alt kapama parçası üzerinde çalışmalar yapılarak en uygun numune bölgesine karar verilmiştir.

Ön yüzü incelendiğinde çoğunluğu düz yüzeyli olan bu parçanın arka yüzeyi, mukavemet sağlaması açısından federli yapıdadır. Numune kesim işleminin yolluklar çevresinde yapılması gerektiğinden, federli yapı numune alma işlemini kısıtlamıştır. Bu noktada en uygun bölgenin parçanın 5 numaralı yolluk bölgesi olduğuna kanaat getirilmiştir. Şekil 5.9'da motor alt kapama parçası ön görünüşü ve test numunesi alınan 5 numaralı yolluk bölgesi, Şekil 5.10'da ise bu parçanın arka görüntüsü verilmiştir.



Şekil 5.9. Motor alt kapama parçası ön görünüş ve numune alınan bölge

Test numunelerinin alınacağı bölge belirlendikten sonra her bir parça üzerinden Şekil 5.9'da görüldüğü gibi yolluk merkezinden 2 cm mesafeden bir adet ve yine her biri arasında 2 cm bulunacak şekilde iki adet numune kesilerek alınmıştır.



Şekil 5.10. Motor alt kapama parçası arkadan görünümü

Bu çalışmada üretilen parçanın büyüklüğü ve geometrik zorluklar nedeni ile standart çekme numunesi yerine 10x80 mm boyutlarında numuneler hazırlanmıştır. İlk başta işlem tezgah tipi testere ile gerçekleştirilmiştir. Ancak numunelerin çapaklı olması ve çentik etkisi yaratması sonucunda bu yöntemden vazgeçilmiştir. Daha sonra ise tasarlanan hidro-pnömatik bir piston ve karşılıklı çalışan kesme kalıbına sahip bir kesme aparatı yaptırılmıştır. Çekme testi ve iç yapı gözlemi için numune alımı bu aparat ile gerçekleştirilmiştir. Tasarlanıp üretimi gerçekleştirilen aparat Şekil 5.11’de verilmiştir.



Şekil 5.11. Test numunesi kesme aparatı

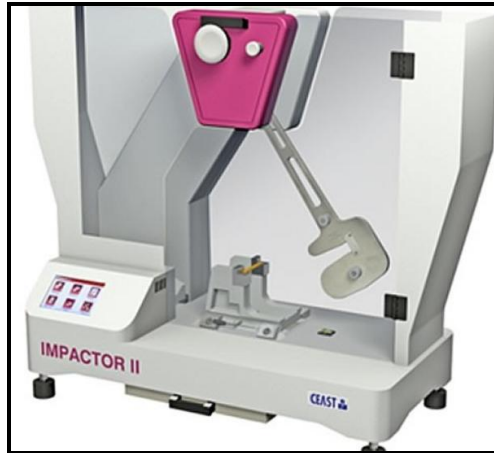
Hazırlanan numunelerin çekme testleri, Kocaeli Üniversitesi Makine Mühendisliği İleri Malzeme Laboratuvarı’nda bulunan “Shimadzu AG-X model universal tester” cihazında gerçekleştirilmiştir. Cihazı Şekil 5.12’te verilmiştir. Çekme testlerinin her biri 50 mm/dakika hızında ve üç tekrarlı gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.12. Shimadzu AG-X model universal test cihazı

5.2.3. Mikroyapı gözlemleri

Mikroyapı gözlemi tıpkı çekme testinde olduğu gibi parça üzerinden kesilen dikdörtgen test çubuklarına uygulanmıştır. Ancak aparat ile kesilen parçaların yan yüzeyleri sıvı azot içerisinden bu bölgede gözlem mümkün olmamıştır. Bu nedenle test çubukları sıvı azot içerisinde 20 dakika bekletilerek Ceast 9050 izod darbe cihazında kırılmışlardır. Şekil 5.13'te Ceast 9050 darbe cihazı verilmiştir.



Şekil 5.13. Ceast 9050 darbe cihazı

Düşük sıcaklık ve ani yük ile kırılan numunelerin mikro gözenek yapılarının incelenmesi için Leica marka S8 APO model stereo mikroskop kullanılmıştır. Bu cihaz Şekil 5.14’te verilmiştir.



Şekil 5.14. Leica marka S8 APO model Stereo Mikroskop

6. DENEYSEL SONUÇLAR VE İRDELEME

6.1. Standart Enjeksiyon ve MuCell Deneme Sonuçları ve Maliyet Analizleri

Bu bölümde, standart enjeksiyon ve MuCell yöntemleri ile gerçekleştirilen üretimlerin proses parametreleri ve parça maliyetleri açısından karşılaştırılması yapılacaktır. Bu nedenle de her hammadde için gerçekleştirilen üretimlerin önemli parametreleri ve maliyete etki eden unsurları bir araya getirilmiş ve tablolar halinde verilmiştir.

Maliyet hesapları yapılırken parça hammadde fiyatları ve makine-saat ücretleri, Farplas A.Ş.'den yardım alınarak, yaklaşık değerler olarak verilmiştir. Bunun dışında üretimlerin tamamı aynı makinede gerçekleştirilmiş, ancak makine maliyetleri olası en küçük kapasiteli makine baz alınarak yapılmıştır. Bunun sebebi iki yöntemin makine kapasitesi gereksinimini kıyaslamak ve makine maliyetine etkisini görmektir.

6.1.1. Polipropilen-Polietilen malzeme sonuçları

Çalışma kapsamında, PP-PE hammadde kullanılarak motor alt kapama parçası kalıbında iki adet enjeksiyon denemesi gerçekleştirilmiştir. Bunlardan bir tanesi standart enjeksiyon yöntemi ile diğeri ise MuCell yöntemi ile yapılan denemelerdir. MuCell yöntemi ile yapılan denemede parçaların % 8 ağırlık düşüşü hedeflenmiş ve buna göre bir optimizasyon işlemi yapılmıştır.

PP-PE malzeme enjeksiyon denemelerinin üretim parametreleri ve maliyet analizleri Tablo 6.1'de verilmiştir. Tablodaki sonuçlar incelendiğinde, proses parametreleri açısından MuCell ile üretilen parçaların, enjeksiyon süresinde yaklaşık % 62, çevrim süresinde % 22 ve kapama kuvvetinde % 25 daha düşük değerler elde edilmiştir.

Enjeksiyon sürelerinde MuCell ile % 62 daha kısa sürede enjeksiyon işleminin gerçekleşmesinin sebebi, daha önceki bölümlerde de anlatıldığı üzere malzeme içerisinde çözündürülen fiziksel köpürtme ajanının viskozite düşüşünü sağlaması olarak gösterilebilir. Çevrim süresindeki % 22 düşüş ise MuCell tutma süresinin

elimine edilmesi ve daha hızlı enjeksiyon yapılabilmesini mümkün kılması ile sağlanmıştır.

Tablo 6.1. PP-PE malzeme deneme parametreleri ve maliyet analizi

Parametreler	Birim	Gözeneksiz	% 8 MuCell
Enjeksiyon Süresi	s	2,98	1,15
Enjeksiyon Süresi Kazancı	%	0	61,4
Tutma Süresi	s	5	0,3
Soğuma Süresi	s	20	20
Çevrim Süresi	s	50	39
Çevrim Süresi Kazancı	%	0	22
Kapama Kuvveti	ton	1600	1200
Kapama Kuvveti Kazancı	%	0	25
Parça Başı Makine Maliyeti Kazancı	%	0	43,27
Parça Ağırlığı	g	923	845
Hammadde Kazancı	%	0	8,45
Parça Başı Toplam Maliyet Kazanç	%	0	21,56

Maliyet hesapları incelendiğinde, kapama tonajı gereksiniminin 1600 ton'dan 1200 ton'a düşmesi daha küçük boyutlu ve düşük maliyetli makine kullanılabilmesini sağlamıştır. MuCell ile elde edilen % 22 çevrim süresi düşüşünün ve düşük tonajlı makinelerde üretimin mümkün kılmasının etkisiyle, % 8 ağırlık düşüşünde, yaklaşık % 43 oranında parça başı makine maliyeti kazancı elde edilmiştir. Bu denemeler sonucunda ise MuCell yöntemi ile parça başına yaklaşık olarak % 22 oranında kazanç elde edilebileceği ön görülmüştür.

6.1.2. % 20 talk katkılı polipropilen malzeme sonuçları

Bu denemede, öncelikle standart enjeksiyon yöntemi ile gözeneksiz parçalar üretilmiş, ardından MuCell yöntemi ile sırasıyla % 4 % 8 ve % 14 ağırlık düşüşü elde edilecek şekilde üretimler gerçekleştirilmiştir. Denemeler sonucunda elde edilen üretim parametreleri ve mali analizler Tablo 6.2 ve 6.3'te verilmiştir.

Üretim parametreleri incelendiğinde, MuCell yönteminin ağırlık düşüşüne bağlı olarak % 57 (% 4 ağırlık düşüşünde), %58 (% 8 ağırlık düşüşünde) ve % 68 (% 14 ağırlık düşüşünde) oranlarında enjeksiyon süresi kazancı sağladığı görülmektedir. Ağırlık düşüşünün enjeksiyon süresini azaltıcı bir etki yaptığını söylemek mümkündür. Ağırlık düşüşünün enjeksiyon süresini azaltmasının sebebi ise strok

mesafesinin dolayısıyla kalıp içerisine enjekte edilen malzeme miktarının azalmasıdır.

Tablo 6.2. % 20 talk katkılı PP malzeme deneme parametreleri ve maliyet analizi-1

Parametreler	Birim	Gözeneksiz	% 4 MuCell
Enjeksiyon Süresi	s	3,04	1,29
Enjeksiyon Süresi Kazancı	%	0	57,6
Tutma Süresi	s	5	0,3
Soğuma Süresi	s	23	23
Çevrim Süresi	s	50	44
Çevrim Süresi Kazancı	%	0	12
Kapama Kuvveti	ton	1600	1200
Kapama Kuvveti Kazancı	%	0	25
Parça Başı Makine Maliyeti Kazancı	%	0	36
Parça Ağırlığı	g	1069	1022
Hammadde Kazancı	%	0	4,39
Parça Başı Toplam Maliyet Kazanç	%	0	13,56

Çevrim süreleri karşılaştırıldığında, beklenildiği gibi MuCell yöntemi ile düşüş sağlanmıştır. Ancak ağırlık düşüşünden bağımsız olarak bütün MuCell denemelerinin her birinde % 12 oranında çevrim süresi düşüşü elde edilmiştir.

Kapama kuvvetleri incelendiğinde ise viskozite düşüşünün etkisi ile MuCell yöntemi ile 1600 ton'dan 1200 ton'a % 25 oranında bir düşüş elde edilmiştir. Bu da daha önceki deneme de olduğu gibi parça başı makine maliyetine çevrim süresi ile beraber etki ederek her ağırlık düşüşü için % 36 oranında kazanç sağlamıştır.

Tablo 6.3. % 20 talk katkılı PP malzeme deneme parametreleri ve maliyet analizi-2

Parametreler	Birim	% 8 MuCell	% 14 MuCell
Enjeksiyon Süresi	s	1,27	0,98
Enjeksiyon Süresi Kazancı	%	58,22	67,76
Tutma Süresi	s	0,3	0,3
Soğuma Süresi	s	23	23
Çevrim Süresi	s	44	44
Çevrim Süresi Kazancı	%	12	12
Kapama Kuvveti	ton	1200	1200
Kapama Kuvveti Kazancı	%	25	25
Parça Başı Makine Maliyeti Kazancı	%	36	36
Parça Ağırlığı	g	984	920
Hammadde Kazancı	%	7,95	13,93
Parça Başı Toplam Maliyet Kazanç	%	16,08	20,33

Maliyet hesapları incelendiğinde, MuCell yönteminin ağırlık düşüşüne göre parça başı toplam maliyette farklı oranlarda kazanç sağladığı görülmektedir. Bu noktada % 4 ağırlık düşüşünde % 14, % 8 ağırlık düşüşünde % 16, % 14 ağırlık düşüşünde ise % 20 oranlarında parça başı kazanç elde edilebildiği hesaplanmıştır.

6.1.3. % 40 talk katkılı polipropilen malzeme sonuçları

% 40 oranında talk katkılı polipropilen malzeme ve motor alt kapama kalıbı ile yapılan enjeksiyon denemelerinde, öncelikle standart enjeksiyon ile gözeneksiz parçalar üretilmiştir. Ardından MuCell yöntemi ile % 4 ve % 8 ağırlık düşüşünün elde edildiği gözenekli parça üretimleri gerçekleştirilmiştir. Bu denemenin üretim parametreleri ve mali analizleri Tablo 6.4'te verilmiştir.

Tablo 6.4 incelendiğinde enjeksiyon sürelerinde MuCell yöntemi ile her iki ağırlık düşüşünde de yaklaşık % 58 oranında bir düşüş elde edildiği görülmektedir. Çevrim süreleri karşılaştırıldığında, ağırlık düşüşüne bağlı kalmaksızın % 16 oranında bir düşüş gözlemlenmektedir. Kapama kuvveti değerlerinde ise daha önceki çalışmalarda olduğu gibi 1600 ton'dan 1200 ton'a % 25 oranında bir düşüş görülmektedir.

Tablo 6.4. % 40 talk katkılı PP malzeme deneme parametreleri ve maliyet analizi

Parametreler	Birim	Gözeneksiz	% 4 MuCell	% 8 MuCell
Enjeksiyon Süresi	s	3,04	1,29	1,27
Enjeksiyon Süresi Kazancı	%	0	57,56	58,22
Tutma Süresi	s	5	0,3	0,3
Soğuma Süresi	s	25	25	25
Çevrim Süresi	s	50	42	42
Çevrim Süresi Kazancı	%	0	16	16
Kapama Kuvveti	ton	1600	1200	1200
Kapama Kuvveti Kazancı	%	0	25	25
Parça Başı Makine Maliyeti Kazancı	%	0	38,9	38,9
Parça Ağırlığı	g	1370	1310	1254
Hammadde Kazancı	%	0	4,37	8,46
Parça Başı Toplam Maliyet	%	0	14,27	17,18

Standart enjeksiyon ve MuCell üretimleri maliyet açısından karşılaştırıldığında, makine maliyetlerinde, çevrim süresi ve kapama kuvveti etkisi ile her iki ağırlık düşüşü için de parça başına % 39 oranında kazanç görülmektedir.

Sonuç olarak, MuCell yöntemi ile parça başı maliyetlerde, % 4 ağırlık düşüşünde (% 14, % 8 ağırlık düşüşünde ise % 17 oranlarında kazanç elde edilebileceği sonucuna varılmıştır.

6.1.4. ABS malzeme sonuçları

İlk üç denemeden farklı olarak bu üretimler, üst rüzgarlık parçasının kalıbında gerçekleştirilmiştir. Hammadde olarak daha çok görsel parçalarda tercih edilen ABS malzemesi kullanılmıştır. Bu denemede amaç standart enjeksiyon yöntemini MuCell ile sadece üretim parametreleri ve maliyet hesapları açısından karşılaştırmaya ek olarak görsel bir parçanın üretiminde çıkabilecek sıkıntıları gözlemlemektir.

Bu enjeksiyon denemesinde de diğer denemelerdeki gibi standart enjeksiyon yöntemi ile gözeneksiz parçalar üretilmiş, ardından MuCell yöntemi ile % 8 ağırlık düşüşü sağlanacak şekilde üretim yapılarak deneme sonlandırılmıştır. Denemede elde edilen parametreler ve mali analizler Tablo 6,5'te verilmiştir.

Tablo 6.5. ABS malzeme deneme parametreleri ve maliyet analizi

Parametreler	Birim	Gözeneksiz	% 8 MuCell
Enjeksiyon Süresi	s	13,5	9,8
Enjeksiyon Süresi Kazancı	%	0	27,4
Tutma Süresi	s	17	0,3
Soğuma Süresi	s	30	30
Çevrim Süresi	s	90	60
Çevrim Süresi Kazancı	%	0	27,78
Kapama Kuvveti	ton	1200	1000
Kapama Kuvveti Kazancı	%	0	20
Parça Başı Makine Maliyeti Kazancı	%	0	45,83
Parça Ağırlığı	g	1103	1013
Hammadde Kazancı	%	0	8,15
Parça Başı Toplam Maliyet Kazanç	%	0	18,30

Üretim parametreleri incelenip standart enjeksiyon ve MuCell yöntemleri karşılaştırıldığında, % 8 ağırlık düşüşünde % 27 daha kısa enjeksiyon süresi elde edilmiştir. Çevrim süresinde ise diğer denemelere göre neredeyse iki kat daha fazla oranda (% 28) düşüş elde edilmiştir. Bunun sebebi ise bu parçanın standart yöntem ile üretiminde yüzey kalitesinin öneminden dolayı 17 saniye civarında bir tutma süresi uygulanmasıdır. MuCell yönteminin elimine ettiği tutma süresi çevrim süresindeki bu büyük düşüşün başlıca sebebi olarak ortaya çıkmıştır. Kapama

kuvvetleri göz önüne alındığında ise yine MuCell yönteminin % 20 lik bir avantaja sahip olduğu görülmüştür.

Çalışmanın maliyet analizleri incelendiğinde, % 8 ağırlık düşüşünde parça başı makine maliyetinde % 45 kazanç sağlandığı görülmektedir. Sonuç olarak ise deneme sonucunda % 8 ağırlık düşüşünde parça başı % 18 oranında kazanç elde edilmiştir. Gerek PP bazlı hammaddelere göre ABS hammaddenin daha yüksek fiyata sahip olması, gerekse çevrim süresindeki düşüşün diğer denemelere göre daha yüksek oranda olması, bu çalışmada daha yüksek oranda bir kazanç elde edilebileceğini göstermiştir.

6.1.5. ABS-PC malzeme sonuçları

ABS-PC hammaddesi ile yapılan denemeler ise diğer tüm denemelerden farklı şekilde gerçekleşmiştir. Üst rüzgarlık kalıbında yapılan çalışmada parçanın standart enjeksiyon yöntemi ile üretimi oluşan hatalar nedeni ile gerçekleştirilememiştir. Yetersiz akıcılık nedeni ile kalıbın tamamının doldurulamaması ve parça geometrisindeki bozukluklar standart enjeksiyon denemesinin bitirilmesi ile sonuçlanmıştır.

Tablo 6.6. ABS-PC malzeme deneme parametreleri ve maliyet analizi

Parametreler	Birim	Gözeneksiz	% 8 MuCell
Enjeksiyon Süresi	s	-	14
Enjeksiyon Süresi Kazancı	%	-	-
Tutma Süresi	s	-	18
Soğuma Süresi	s	-	30
Çevrim Süresi	s	-	65
Çevrim Süresi Kazancı	%	-	-
Kapama Kuvveti	ton	-	1000
Parça Başı Makine Maliyeti Kazancı	%	-	-
Parça Ağırlığı	g	-	1127
Hammadde Kazancı	%	-	-
Parça Başı Toplam Maliyet Kazanç	%	-	-

Gözeneksiz parça üretimi yapılamamasına karşın deneme MuCell ekipmanının aktif edilmesi ile devam ettirilmiş ve % 8 ağırlık düşüşü elde edilerek gözenekli parçaların üretimi yapılabilmektedir.

Bu deneme planlanan şekilde yapılamasa da standart enjeksiyonda yetersiz akıcılıktan dolayı üretilmeyen bir parçanın MuCell yöntemi ile hatasız şekilde üretilmesi, yöntemin viskozite düşüşünü sağladığının açık bir göstergesi olarak kabul edilmiştir.

6.2. Çekme Testi Sonuçları

Mekanik testler daha önce de belirtildiği gibi geometrik kısıtlamalardan dolayı yalnızca Polipropilen bazlı hammadde ile üretilen parçalar üzerinde gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında üretimi gerçekleştirilen her numunenin 5. Yolluk bölgesinden üç farklı uzaklıkta alınan test numuneleri çekme testine tabi tutulmuştur.

Çekme testi sonucunda elde edilen maksimum gerilme değerleri üretim yöntemi ve ağırlık düşüşüne göre karşılaştırılmıştır. Ayrıca yolluktan üç farklı uzaklıkta alınan numunelerin test sonuçları aralarında karşılaştırılarak yorumlanmıştır.

6.2.1. Polipropilen-Polietilen malzeme sonuçları

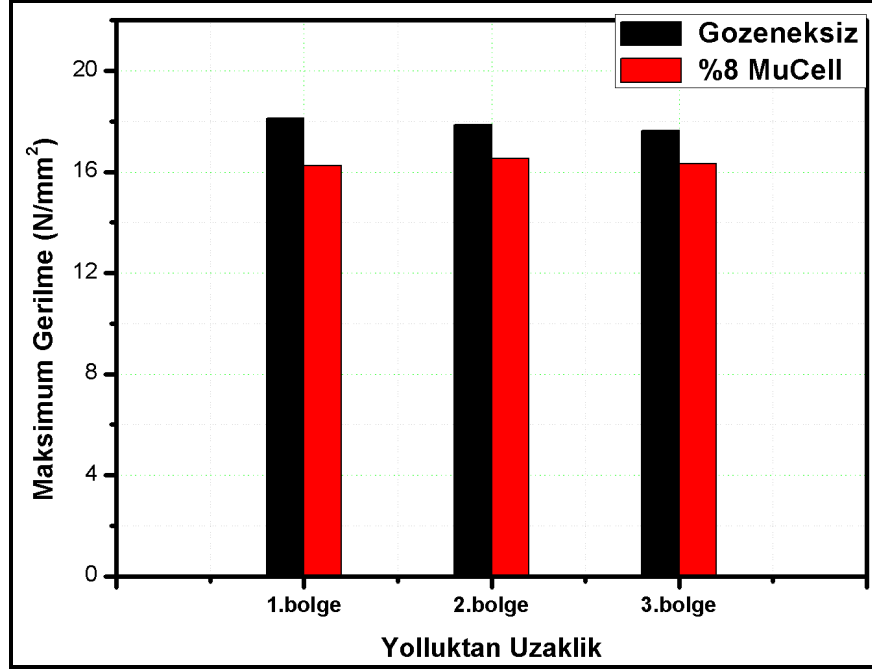
Standart enjeksiyon ve MuCell yöntemleri ile gerçekleştirilen üretimlerde PP-PE malzeme ve motor alt kapama kalıbı kullanılarak üretilen parçaların test sonuçları bu bölümde verilmiştir. Standart enjeksiyon ile üretilen gözeneksiz parçalar ve MuCell yöntemi ile üretilen % 8 ağırlık düşüşüne sahip parçaların maksimum çekme gerilmeleri açısından karşılaştırılması yapılmıştır. Tablo 6.7’de çekme testi sonucunda elde edilen maksimum gerilme değerleri, Şekil 6.1’de maksimum gerilme grafikleri verilmiştir.

Tablo 6.7. PP malzeme çekme testi sonuçları

Numune Bölgesi	Parametreler	
	Gözeneksiz	% 8 MuCell
1.Bölge	18,13 (N/mm ²)	15,82 (N/mm ²)
2.Bölge	17,86 (N/mm ²)	16,52 (N/mm ²)
3.Bölge	17,64 (N/mm ²)	16,31 (N/mm ²)

Test sonuçları her deneme için kendi içerisinde yolluktan uzaklığa göre incelendiğinde, standart enjeksiyonda yolluktan uzaklaştıkça maksimum gerilme değerlerinde düşüş gözlenmiştir. % 8 ağırlık düşüşü elde edilen MuCell

numunelerinde ise en yüksek maksimum gerilme değeri 2. bölgeden alınan numunelerde elde edilmiştir. Gözeneksiz olarak üretilen numunelerde yolluktan uzaklık değişimine bağlı olarak yaklaşık % 3 oranında değişim gözlenirken, MuCell ile üretilen numunelerde yolluk uzaklığına göre değişim % 2 seviyelerindedir.



Şekil 6.1. PP-PE malzeme maksimum dayanım-yolluktan uzaklık grafiği

Şekil 6.1’de 1. bölge’den alınan standart enjeksiyon ve MuCell numuneleri karşılaştırıldığında, % 8 ağırlık düşüşü elde edilen parçaların maksimum gerilme değerlerinde % 11 oranında bir düşüş gözlemlenmiştir. 2. ve 3. yolluk bölgelerinde ise MuCell ile üretilen numuneler standart enjeksiyon ile üretilenlere göre yaklaşık % 8 maksimum gerilme düşüşüne sahiptir.

Bu sonuçlara göre gözeneksiz olarak üretilen parçaların yolluktan uzaklaştıkça maksimum gerilme dayanımlarının düştüğü yorumu yapılabilirken, MuCell numunelerinde yolluktan uzaklığa bağlı düzenli bir değişim söz konusu değildir.

Sonuçlara göre her yolluk uzaklığında da gözenekli parçaların dayanımlarında düşüş olduğu açıktır. Ancak bölge değişimine göre dayanım düşüş oranlarının farklı olduğu görülmüştür. Bunun sebebinin gözenek yapısı ve dağılımının değişimi olabileceği düşünülmüştür.

6.2.2. % 20 talk katkılı polipropilen malzeme sonuçları

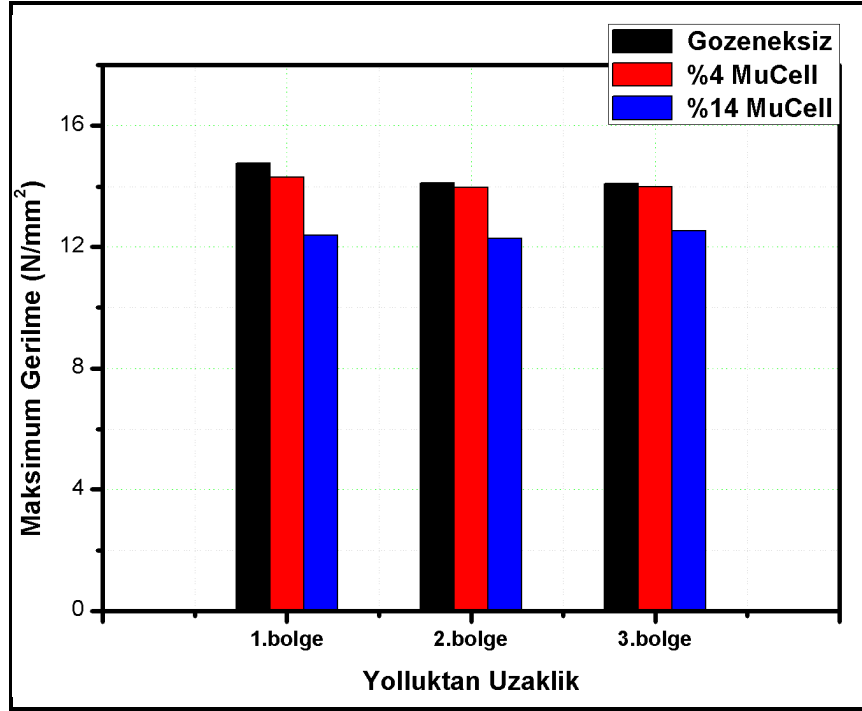
Motor alt kapama kalıbında % 20 talklı Polipropilen hammadde ile yapılan üretimler sonucunda elde edilen numunelerle yapılan çekme testlerinin sonuçları bu bölümde verilmiştir. Çekme testleri, standart enjeksiyon ile üretilen gözeneksiz numuneler ve MuCell yöntemi ile üretilen % 4 ve % 14 ağırlık düşüşü sağlanan gözenekli numunelere uygulanmıştır. Bu sonuçlar Tablo 6.8 ve maksimum gerilme değerleri Şekil 6.2’de verilmiştir.

Tablo 6.8. % 20 talk katkılı PP malzeme çekme testi sonuçları

Numune Bölgesi	Parametreler		
	Gözeneksiz	% 4 MuCell	% 14 MuCell
1.Bölge	14,77 (N/mm ²)	14,31 (N/mm ²)	12,38 (N/mm ²)
2.Bölge	14,11 (N/mm ²)	13,96 (N/mm ²)	12,28 (N/mm ²)
3.Bölge	14,09 (N/mm ²)	14,00 (N/mm ²)	12,53 (N/mm ²)

Her üretim yolluktan uzaklık mesafesine göre kendi içerisinde incelendiğinde, standart enjeksiyon ile üretilen gözeneksiz numunelerde en yüksek dayanım 1. bölgede elde edilmiş, 2. ve 3. bölgelerde 1. bölgeye göre yaklaşık % 5 oranında dayanım düşüşü gözlemlenmiştir. % 4 MuCell numuneler de gözeneksizlere benzer olarak en büyük dayanımı 1. Bölgede göstermiş ve 2. ve 3. bölgelerde % 2-3 aralığında bir dayanım düşüşü elde edilmiştir. Ancak % 14 MuCell numunelerinde en yüksek dayanım 3. bölge elde edilmiş ve yolluktan uzaklık mesafesine göre maksimum gerilme değerleri % 2 oranında değişim göstermiştir.

Tablo 6.8 ve Şekil 6.2 incelendiğinde, gözeneksiz numunelere kıyasla MuCell ile üretilen % 4 ve % 14 ağırlık düşüşüne sahip gözenekli numunelerin maksimum gerilme değerleri her bölgede düşüş göstermiştir. % 4 ağırlık düşüşüne sahip numuneler 1. bölge için % 4 oranında bir dayanım düşüşüne sahipken, 2. ve 3. bölgelerden alınan numuneler % 1 dayanım düşüşü göstermiştir. % 14 ağırlık düşüşü gösteren numuneler incelendiğinde ise 1. bölgede % 16, 2. bölgede % 13, 3. bölgede % 11 oranında dayanım düşüşü gözlemlenmiştir.



Şekil 6.2. % 20 talk katkılı PP malzeme maksimum dayanım-yolluktan uzaklık grafiği

6.2.3. % 40 talk katkılı polipropilen malzeme sonuçları

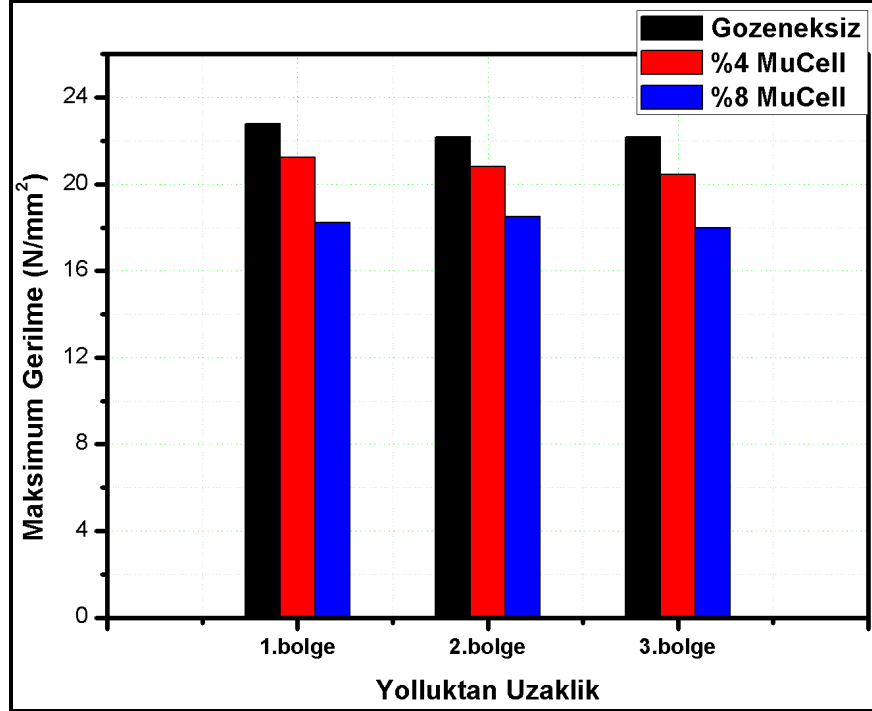
Bu bölümde % 40 talk katkılı Polipropilen hammadde ile üretilen numunelerin çekme testi sonuçları Tablo 6.9 ve Şekil 6.3 ile verilmiştir. Enjeksiyon denemelerinde elde edilen gözeneksiz, % 4 ve % 8 ağırlık düşüşüne sahip parçaların maksimum gerilme dayanımlarına göre karşılaştırması yine bu bölüm altında yapılmıştır.

Tablo 6.9. % 40 talk katkılı PP malzeme çekme testi sonuçları

Numune Bölgesi	Parametreler		
	Gözeneksiz	% 4 MuCell	% 8 MuCell
1.Bölge	22,78 (N/mm ²)	21,23 (N/mm ²)	18,23 (N/mm ²)
2.Bölge	22,17 (N/mm ²)	20,23 (N/mm ²)	18,49 (N/mm ²)
3.Bölge	22,20 (N/mm ²)	20,44 (N/mm ²)	17,98 (N/mm ²)

Her deneme kendi içerisinde yolluktan uzaklığa göre karşılaştırıldığında, standart enjeksiyonda en yüksek dayanım 1. bölgede gözlemlenmiştir. 2. ve 3. Bölgelerde ise 1.'ye göre % 3 civarında bir dayanım düşüşü elde edilmiştir. % 4 ağırlık düşüşüne sahip numunelerde de gözeneksiz numunelere benzer şekilde en yüksek dayanım 1. bölgede elde edilmiş ve 2. bölgede % 2, 3. bölgede % 4 oranında bir dayanım düşüşü

olmuştur. Gözeneksiz ve % 4 ağırlık düşüşü elde edilen numunelerden farklı olarak % 8 ağırlık düşüşlü numunelerde en yüksek dayanım 2. bölgede elde edilmiş ve 1. bölgede yaklaşık % 2, 3. bölgede yaklaşık % 3 oranında dayanım düşüşü gözlemlenmiştir.



Şekil 6.3. % 40 talk katkılı PP malzeme maksimum dayanım-yolluktan uzaklık grafiği

Bu hammadde ile yapılan çekme testlerinde de daha öncekilerde görüldüğü gibi ağırlık düşüşü ile artan bir dayanım düşüşü gözlemlenmiştir. Gözeneksiz ve % 4 ağırlık düşüşüne sahip numuneler karşılaştırıldığında 1. bölgede % 7, 2. bölgede % 6 ve 3. bölgede % 8 oranında bir düşüş gözlenmiştir. % 8 ağırlık düşüşüne sahip numunelerde ise 1. yolluk bölgesinde % 20, 2.sinde % 17 ve 3.sünde % 19 dayanım düşüşü elde edilmiştir.

6.3. Mikro Yapı Sonuçları

Daha önceki bölümlerde üretimi yapılan parçaların maliyet analizleri ve çekme testi sonuçları verilmiştir. Bu bölümde ise üretilen parçaların iç yapılarının incelenmiştir. Çekme testleri ve maliyet analizlerinin aksine bu çalışmanın amacı standart enjeksiyon yöntemi ile MuCell yöntemini karşılaştırmak değil, MuCell yöntemi ile yapılan üretimlerde iç yapıda kusur sayılabilecek bir gözenek yapısının olup

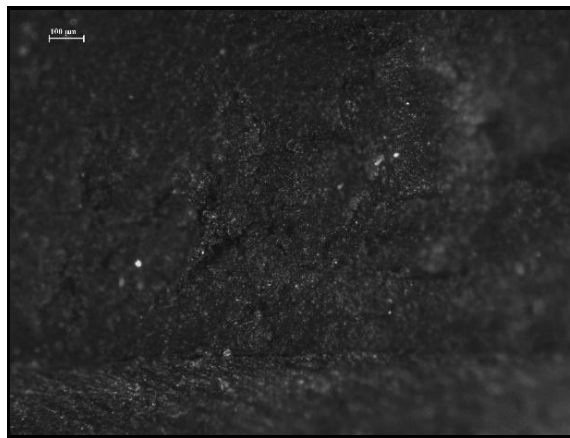
olmadığını gözlemlemektir. Bu noktada mikro yapı inceleme sonuçları hammadde cinslerine göre sırasıyla verilmiş ve gözenek yapıları hakkında yorumlar yapılmıştır.

Tez çalışması kapsamında iç yapı gözlemi için numune hazırlığı ilk önce maket bıçağı ve jilet kullanılarak hazırlanmıştır. Ancak bu numunelerin gözlemleri sırasında gözeneklerin sıvı azot içinde çözünmediği fark edilmiştir. Bunun üzerine ise sünek bir yapıya sahip olan polipropilen bazlı parçalar üzerine bir çentik açılarak yırtılmıştır. Bu işlemde de gözeneklerin sıvı azot içinde çözünmediği görülmüştür. Son olarak ise deneysel çalışmalar bölümünde anlatıldığı üzere mikro yapı incelemeleri için hazırlanan numuneler önce sıvı azot içerisinde soğutulmuş, sonra da darbe cihazında kırılmıştır.

Test numunelerinin sıvı azot içerisinde soğutulması, parçalarında camsı geçiş sıcaklıklarının altında bir sıcaklığa düşürülmesini sağlamıştır. Bu sıcaklık altında kırılabilir bir yapıya sahip olan numuneler ise darbe cihazında ani bir kuvvet etkisi ile kırılarak gözeneklerin gözlenmesi sağlanmıştır.

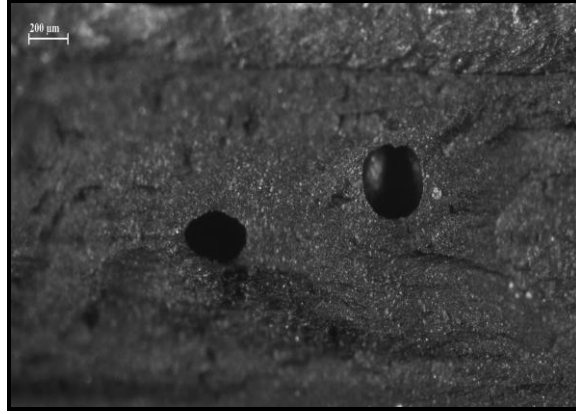
6.3.1. Polipropilen-Polietilen malzeme sonuçları

PP-PE hammadde, standart enjeksiyon yöntemi ile gözeneksiz ve MuCell yöntemi ile % 8 ağırlık düşüşü sağlanarak gözenekli bir şekilde motor alt kapama parçası üretiminde kullanılmıştır. Standart enjeksiyon yöntemi ile üretilen gözeneksiz parçaların mikroskop görüntüsü Şekil 6.4'te, MuCell ile üretilen parçaların mikroskop görüntüsü ise Şekil 6.5'te verilmiştir.



Şekil 6.4. PP-PE malzeme - standart enjeksiyon mikroskop görüntüsü (x80 büyütme)

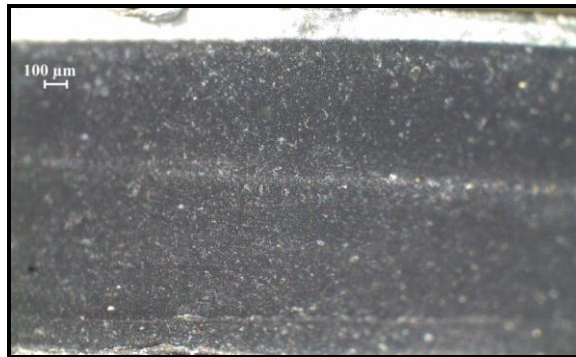
Şekil 6.4 ve 6.5 incelendiğinde standart enjeksiyon yöntemi ile üretilen paçanın mikroskop görüntüsünde beklenildiği üzere düz bir yapı görülmekte hiçbir boşluk ya da gözeneğe rastlanmamaktadır. % 8 ağırlık düşüşü sağlanan MuCell parçanın mikroskop görüntüsünde ise parça kesitinin ortasında az sayıda ve 200-300µm boyutlarında gözenekler görülmektedir.



Şekil 6.5. PP-PE malzeme - MuCell % 8 ağırlık düşüşü mikroskop görüntüsü (x80 büyütme)

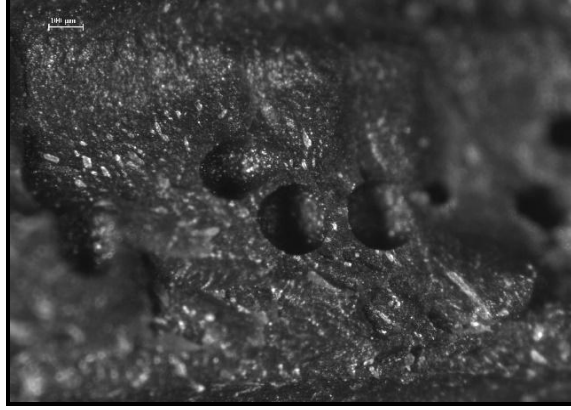
6.3.2. % 20 talk katkılı Polipropilen malzeme sonuçları

Bu bölümde % 20 talk katkılı hammadde ile üretilen parçaların mikroskop görüntüleri verilmiş ve yorumları yapılmıştır. Standart enjeksiyon ile üretimi gerçekleştirilen gözeneksiz parçaların mikroskop görüntüsü Şekil 6.6’da, MuCell ile üretilen gözenekli parçaların mikroskop görüntüleri ise Şekil 6.7 (% 4 MuCell), Şekil 6.8 (% 8 MuCell) ve Şekil 6.9’da (% 14 MuCell) verilmiştir.



Şekil 6.6. % 20 talk katkılı PP malzeme - standart enjeksiyon mikroskop görüntüsü (x80 büyütme)

Şekil 6.6 incelendiğinde beklendiği üzere kırılma yüzeyinde beklendiği gibi hiçbir boşluk ya da gözenek görülmezken, Şekil 6.7’de 120-160 μm boyutlarında gözenekler gözlemlenmiştir. Şekil 6.8’de ise % 8 MuCell iç yapısındaki 200 μm boyutlarına yakın büyüklüklerde gözenekler görüntülenmiştir.



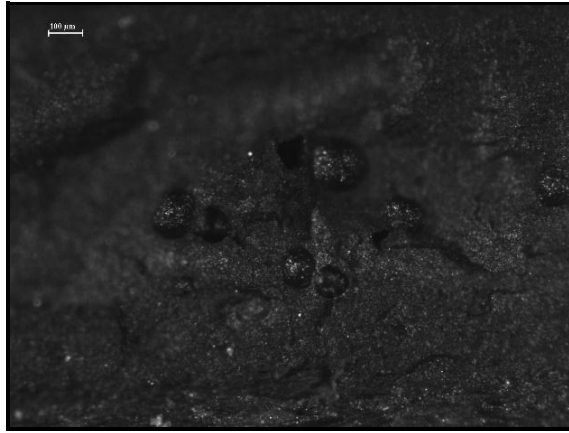
Şekil 6.7. % 20 talk katkılı PP malzeme - % 4 MuCell mikroskop görüntüsü (x80 büyütme)

% 4 MuCell parça iç yapısındaki gözenek büyüklükleri MuCell yöntemi için hedeflenen 100 μm boyutlu gözenek yapısına yakın olsa da kırılma yüzeyinde görüntülenen az sayıdaki gözenek prosesin daha iyileştirilebileceği yorumunu yaptırmıştır. % 8 MuCell iç yapı görüntüsündeki 200 μm boyutlarındaki gözenekler ise istenen gözenek yapısından uzaktır. Ancak parça üretimlerinin MuCell için tasarlanmış özel bir kalıpta yapılması durumunda (örneğin yolluk çaplarında daha düşük bir değer seçilmesi durumunda) bu gözenek yapısının daha uygun boyut ve sıklıkta elde edilebileceği kanısına varılmıştır. Bu gözenek yapısında iyileştirme yapmak için bir başka öneri ise SCF miktarını arttırmak olabilirdi. Fakat proses optimizasyonu esnasında kullanılabilecek en yüksek oran kullanılmış ve gaz miktarı daha fazla arttırıldığında çözünmeme sorunundan kaynaklı parça kusurları elde edilmiştir.



Şekil 6.8. % 20 talk katkılı PP malzeme - % 8 MuCell mikroskop görüntüsü (x80 büyütme)

Şekil 6.9’da ise diğer iki gözenekli parçaya göre daha düşük boyutlarda gözenekler elde edilmiştir. 80-160 µm boyutlarında değişim gösteren gözeneklerin görüntülenebilen sıklığı ise yeterli seviyede değildir. % 14 MuCell parçalarında daha küçük gözenek yapısının elde edilmesinin sebebi ise kovan içerisinde daha yüksek oranda SCF çözündürülebilmesi olarak yorumlanmıştır.

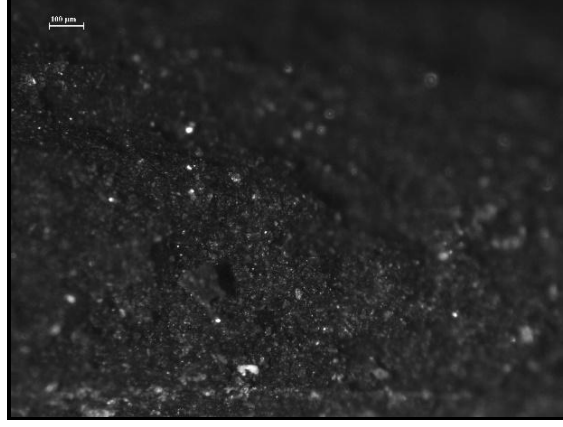


Şekil 6.9. % 20 talk katkılı PP malzeme - % 14 MuCell mikroskop görüntüsü (x80 büyütme)

6.3.3. % 40 talk katkılı Polipropilen malzeme sonuçları

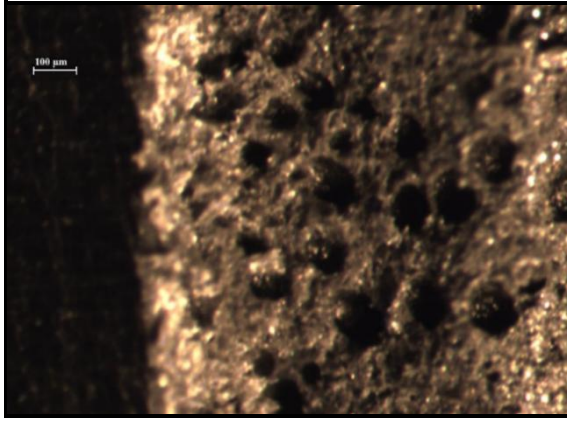
Bu bölümde % 40 talk katkılı Polipropilen hammadde ile üretilen parçaların iç yapı sonuçları yorumlanmıştır. Şekil 6.10’da standart enjeksiyon ile üretilen gözeneksiz parça mikroskop görüntüsü, Şekil 6.11’de % 4 ağırlık düşüşüne sahip MuCell ile

üretilen gözenekli parça mikroskop görüntüsü ve Şekil 6.12’de ise yine MuCell ile üretilen % 8 ağırlık düşüşüne sahip gözenekli parça mikroskop görüntüsü verilmiştir.

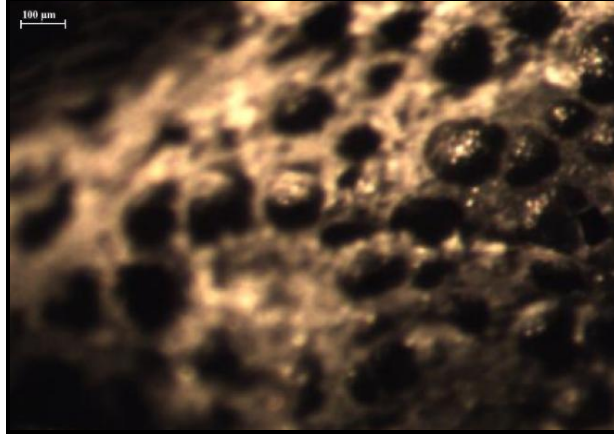


Şekil 6.10. % 40 talk katkılı PP malzeme - standart enjeksiyon mikroskop görüntüsü (x80 büyütme)

Şekil 6.10’da ve Şekil 6.11 incelendiğinde daha önceki üretilere nazaran daha düşük gözenek yapısı ve istenen daha yakın bir gözenek dağılımı elde edildiği gözlemlenmiştir. % 4 MuCell parçanın mikroskop görüntüsünde de gözenek boyutla 50-130 µm aralığında değişirken, % 8 MuCell parçanın mikroskop görüntüsünde 50-200 µm aralığında değişen boyutlarda gözenekler elde edilmiştir.



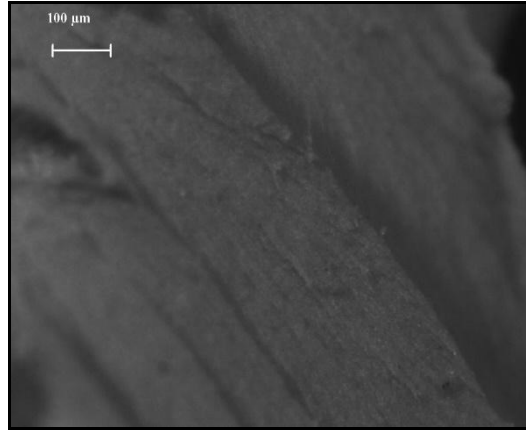
Şekil 6.11. % 40 talk katkılı PP malzeme - % 4 MuCell mikroskop görüntüsü (x80 büyütme)



Şekil 6.12. % 40 talk katkılı malzeme - % 8 MuCell mikroskop görüntüsü (x80 büyütme)

6.3.4. ABS malzeme sonuçları

Bu bölümde üst rüzgarlık kalıbında, ABS hammadde ile yapılan üretimlerde elde edilen parçaların mikroskop görüntüleri verilmiş ve yorumlanmıştır. Şekil 6.13'te standart enjeksiyon üretimi olan gözeneksiz parça mikroskop görüntüsü, Şekil 6.14'te ise MuCell ile % 8 ağırlık düşüşü elde edilen gözenekli parça mikroskop görüntüsü verilmiştir.



Şekil 6.13. ABS malzeme - standart enjeksiyon mikroskop görüntüsü (x80 büyütme)

6.14 incelendiğinde çoğunluğu 30-100 µm boyutları arasında değişen ve az sayıda 100 µm'den büyük boyutta gözenekler gözlemlenmiştir. Yapılan diğer çalışmalara kıyasla daha yüksek yoğunlukta gözenek sayısına ulaşılmıştır. Bunun nedeni ise parça geometrisinde et kalınlığının iki kat daha yüksek olması etkilidir. Çünkü et

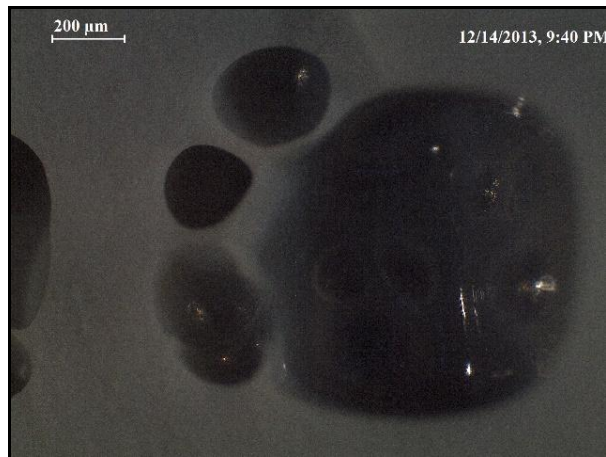
aklınlığının artması çekirdeklenme için enjekte edilen eriyiğin daha fazla alan bulmasına neden olmuştur.



Şekil 6.14. ABS malzeme - % 8 MuCell mikroskop görüntüsü (x80 büyütme)

6.3.5. ABS-PC malzeme sonuçları

Bu bölümde ise üst rüzgarlık kalıbında, ABS-PC hammadde kullanılarak yapılan üretimlerden elde edilen parçaların iç yapı görüntüsü verilmiş ve yorumlanmıştır. Daha öncede anlatıldığı üzere bu hammadde ile yapılan üretimlerde, standart enjeksiyon üretimi başarısız olmuştur. Bu nedenle yalnızca MuCell ile gerçekleştirilen % 8 ağırlık düşüşüne sahip parçanın mikroskop görüntüsü Şekil 6.15'te verilmiştir.



Şekil 6.15. ABS-PC malzeme - % 8 MuCell mikroskop görüntüsü (x80 büyütme)

Şekil 6.15 incelendiğinde 150 ile 800 μm arasında değişen az sayıda gözenekler gözlemlenmektedir. Elde edilen bu büyük boyutlu gözenekler parçanın mekanik özelliklerine yapacağı etki sebebi ile kusur olarak kabul edilebilir.

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

7.1. Sonuçlar

Tez çalışması kapsamında standart enjeksiyon ve MuCell yöntemleri kullanılarak otomotiv parçaları üretimi gerçekleştirilmiştir. Üretimlerde Polipropilen bazlı üç (PP-PE kopolimer, % 20 talk katkılı PP, % 40 talk katkılı PP) ve Akrilonitril bütadien stiren bazlı iki (ABS, ABS-PC) otomotiv plastiği kullanılmıştır. Her malzemenin için kendi akış karakteristiğine uygun gelecek şekilde iki otomotiv parçasından (motor alt kapama parçası, üst rüzgarlık parçası) bir tanesi seçilmiş ve o parça kalıbında üretimi gerçekleştirilmiştir.

Her iki yöntem ile görsel ya da boyutsal kusuru bulunmayan parçaların üretimi amaçlanmış ve her üretimden sonra kontrolleri yapılmıştır. Kontroller esnasında hata ya da tolerans dışı boyut gözlenmesi durumunda üretim yeniden optimize edilerek tekrarlanmıştır.

MuCell yöntemi ile yapılan üretimlerde maksimum ağırlık düşüşü hedeflenmiş ve buna göre proses optimizasyonu işlemi uygulanmıştır. Her malzemeye göre farklı oranlarda ağırlık düşüşleri elde edilmiştir.

Çalışmada elde edilen proses parametreleri her iki yöntem için kıyaslanmıştır. Buna ek olarak her iki yöntem parça başı üretim maliyeti açısından analiz edilip, karşılaştırılmıştır.

Üretimler sonucunda elde edilen numunelere çekme testi uygulanmış, iç yapı gözlemleri gerçekleştirilmiştir. Çekme testleri her üretim parametresi için belirlenen yolluktan üç farklı uzaklıkta alınan numunelere uygulanmıştır. Çekme testi sonuçlarında her malzeme için iki farklı yöntem sonuçları birbiri ile kıyaslanmıştır. Her iki üretim yöntemi için de yolluktan uzaklık mesafesine göre çekme dayanımının değişimi gözlemlenmiştir.

Bu bölümde tez çalışması kapsamında elde edilen sonuçlar özetlenmiş ve yorumları yapılmıştır.

- MuCell yönteminin standart enjeksiyon yöntemine göre sağladığı avantajlardan biri üretim esnasında kovan içerisinde ergitilen malzemenin viskozitesinde meydana getirdiği düşüştür. Viskozite düşüşü ise enjeksiyon hızını ve dolayısıyla enjeksiyon süresini etkileyen önemli bir parametredir. Çünkü viskozitesi düşen akışkan, sürtünme kuvvetinin azalması nedeniyle daha yüksek hızlarda enjekte edilebilmekte ve enjeksiyon işlemi daha kısa sürelerde sonuçlanabilmektedir. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar göz önüne alındığında, viskozite düşüşü sayesinde MuCell yöntemi ile enjeksiyon sürelerinde, % 27 ile % 61 arasında değişen oranlarada bir azalma elde edilmiştir.

Enjeksiyon sürelerindeki düşüşler kendi aralarında incelendiğinde, ağırlık düşüşünün viskozite ve enjeksiyon süresindeki düşüş ile doğru orantılı olarak değiştiği söylenebilir. Bunun sebebi ise daha fazla ağırlık düşüşü için daha fazla SCF'nin eriyik içerisinde çözündürülüyor olmasıdır.

Viskozite düşüşü ile ilgili yapılan çalışma içerisinde verilebilecek en güzel örnek ABS-PC hammaddesi ile yapılan üretimdir. Standart enjeksiyon ile düşük akışkanlık sebebiyle üretilemeyen bir parçanın MuCell yöntemi ile hata oluşturmaksızın üretilmiştir. Bu da MuCell yönteminin viskozite düşüşü sağladığına açık bir örnektir.

- Çevrim süreleri karşılaştırıldığında, MuCell yönteminin tutma basıncını elimine etmesi ve daha hızlı enjeksiyon işlemi yapılmasını mümkün kılması, hammadde cinsine göre % 12 ila % 28 arasında değişen bir kazanç sağlamıştır.
- Kapama kuvvetleri karşılaştırıldığında, MuCell yönteminin standart enjeksiyon yöntemine göre % 20 ila % 25 aralığında bir kazanç sağladığı gözlemlenmiştir. Bunun sebebi, viskozitesi düşen akışkanın daha düşük enjeksiyon basıncı ile enjekte edilebilmesi ve kalıp yüzeyinde oluşturduğu sürtünme kuvvetinin azalmasıdır. Kalıp içerisine daha düşük bir basınçla giren ve kalıp yüzeyinde daha düşük bir sürtünme kuvveti oluşturan malzeme sayesinde kalıbın daha düşük bir kapama kuvveti ile kapalı tutulması sağlanabilmiştir. Ayrıca gerekli kapama kuvvetinin düşmesi daha küçük tonajlı bir makinede üretimi mümkün kılmıştır.

- Her iki yöntem hammadde tüketimi açısından karşılaştırıldığında, yapılan çalışmalarda % 4 ila % 14 arasında hammadde tasarrufu sağlanmıştır. Her hammadde için farklı oranlarda maksimum ağırlık düşüşü elde edilmesinin nedeni, SCF'nin her malzeme içerisindeki çözünürlüğünün farklı olması ve her malzemenin akış özelliklerinin farklılık göstermesi olarak açıklanabilir.
- Standart enjeksiyon ve MuCell yöntemleri parça başı üretim maliyetleri açısından karşılaştırıldığında, MuCell yönteminin % 13 ila % 22 arasında kazanç sağladığı görülmüştür. Parça başı üretim maliyeti hammadde ve makine maliyetine bağlıdır. MuCell yönteminde daha düşük miktarda hammadde kullanılması bu açıdan yöntemi avantajlı yapmaktadır. Ayrıca sağladığı çevrim süresi düşüşü ve daha düşük tonajlı makine gereksinimi bu kazançların sağlanmasındaki temel sebeptir.
- MuCell yöntemi ile hammadde maliyeti açısından en büyük kazanç % 14 ağırlık düşüşünün elde edildiği % 20 talk katkılı PP malzeme üretiminde elde edilmiştir. Makine maliyetindeki en yüksek kazanç ise % 45 ile ABS hammaddesi ile yapılan % 8 ağırlık düşüşlü MuCell üretimidir. Bu üretimin makine maliyetinde en yüksek oranda kazancı sağlamasının sebebi standart enjeksiyon yönteminde tutma basıncının çok yüksek olmasıdır. Çünkü MuCell ile tutma basıncının elimine edilmesi daha yüksek oranda çevrim süresi düşüşüne dolayısıyla da daha yüksek oranda makine maliyeti düşüşüne neden olmuştur.

Bu çalışmada benzer hammaddeler aynı kalıplarda kullanılarak üretimler gerçekleştirilmiştir. Hammadde özellikleri değişim gösterdiği için her üretimde farklı maksimum ağırlık düşüşleri elde edilmiştir. Kalıp tasarımlarının farklı hammadde ve standart enjeksiyon yöntemine göre tasarlanmasından dolayı elde edilen ağırlık düşüşlerinin, iç yapıların ve dolayısıyla çekme testi sonuçlarının optimum olduğu söylenemez. Ancak tek bir hammaddeye ve MuCell yöntemine göre bir tasarım yapılması durumunda elde edilebilecek ağırlık düşüşünün ve gözenek yapısının daha da iyileştirilebileceği yorumu yapılabilir.

Çekme testi sonuçları incelendiğinde, MuCell yöntemi ile üretilen numunelerin maksimum gerilme dayanımı açısından düşüş gösterdiği gözlemlenmiştir. Ayrıca dayanımda gözlemlenen düşüşlerin ağırlık düşüşü arttıkça arttığı görülmektedir.

Ancak ağırlık düşüş oranı ile dayanımdaki düşüşün oranının doğrusal olarak değişmediği sonucuna varılmıştır.

Çekme testi sonularına göre maksimum gerilme değerlerinde yolluktan uzaklığa göre değişimler gözlemlenmiştir. Standart enjeksiyon ile üretilen numunelerde yolluktan uzaklığa göre en iyi maksimum gerilme değerleri her malzeme için yolluğa en yakın bölge edilirken, MuCell yöntemi ile üretilen numunelerde maksimum gerilme değerinin yolluktan uzaklığa göre belirli bir değişim trendi göstermediği sonucu elde edilmiştir.

- % 20 talk katkılı polipropilen malzeme ve iki gözden oluşan başka bir motor alt kapama parçası kalıbı ile yapılan denemeler sonucunda, hedeflenen ağırlık düşüşü toplamda elde edilirken, iki parçada da farklı oranlarda ağırlık düşüşü gözlemlenmiştir. Sonuçların tutarsızlığından dolayı bu deneme sonuçlarına çalışma içerisinde yer verilmemiştir. Ancak standart enjeksiyon yöntemi ile beklenen ağırlığın elde edilmesine karşın MuCell yönteminde farklı oranlarda ağırlık düşüşü gözlemlenmesi, birden fazla parçanın aynı anda üretildiği kalıplarda yolluk tasarımının dikkatli yapılması gerektiği sonucunu ortaya çıkarmıştır.
- ABS hammadde ile yapılan üretimlerin bir amacının da MuCell'in görsel parçalar için uygunluğunu gözlemlemek olduğu belirtilmiştir. Bu noktada üretilen % 8 ağırlık düşüşüne sahip MuCell parçaların yüzey kalitesi gazların oluşturduğu akış izleri nedeni ile uygunsuz bulunmuştur.
- Yine bir önceki paragrafta anlatılan denemelerde kullanılan kalıpta ani et kalınlığı değişimi bulunmaktadır. Et kalınlığının ani olarak değiştiği bu bölgelerin iç yapıları incelendiğinde gözenek boyutlarının çok fazla arttığı ve kusur sayılabilecek boyutlara ulaştığı gözlemlenmiştir. Bu nedenle MuCell için kalıp tasarımı yapılırken ani et kalınlığı değişimlerinden kaçınılmalı, kademeli bir değişim sağlanmalıdır.
- PP-PE hammaddenin MuCell yöntemi ile yapılan üretimleri esnasında kapama tonajının düşürülmesi parça ağırlığında düşüşe neden olmuştur. Standart enjeksiyon yönteminde ise kapama tonajı düşüşün parça üzerindeki kuvvetleri azaltacağından artacağı bilinmektedir. Bu gözlemden sonra yapılan araştırmalar sonucunda, kalıp kavalandırmasının yeterli seviyede yapılmamasının akış önündeki

gaz sıkışmasını tetiklediği ve bu nedenle oluşan karşı basıncın çekirdeklenme ve dolayısıyla ağırlık düşüşüne engel teşkil edebildiği bilgisine ulaşılmıştır. Daha sonra kalıptaki son dolum noktalarına yapıştırılan bantlarla deneme tekrar edilmiş ve kapama tonajı düşürülmeden daha fazla ağırlık düşüşü elde edilmiştir. Bu da araştırma sırasında elde edilen bilgiyi doğrulamıştır.

7.2. Öneriler

- MuCell yöntemine uygun parça ve kalıp tasarımı yapılırken, özellikle son dolum noktaları ve ince kesitli bölümlerin havalandırmaları standart enjeksiyon yöntemine göre daha iyi tasarlanmalıdır. Aksi takdirde kalıp içi karşı basıncı nedeniyle eksik dolum ya da yetersiz ağırlık düşüşü problemleri ile karşılaşılabilir.
- Çift ya da daha fazla gözlü kalıp tasarımı yapılırken hammaddenin her iki kalıba girerken de eşit miktarda mesafe kat etmesine dikkat edilmelidir. Yolluk tasarımında iki parça için farklı uzunluklarda yolluk tasarlanması her iki parçada da farklı oranda ağırlık düşüşüne sebep olabilir.
- Kusur sayılabilecek büyüklükte gözeneklerden kaçınmak için parça tasarımında ani et kalınlığı değişimlerinden kaçınılmalıdır.
- Parça iç yapısının olabildiğince küçük boyutta ve yüksek sıklıkta gözeneklere sahip olması için yolluk çaplarının olabildiğince küçük seçilmesi, proses optimizasyonunu kolaylaştırabilecek bir etkidir.

KAYNAKLAR

- [1] Şahin T., *Polimer İşleme Teknolojisi Ders Notları*, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli, 2014.
- [2] Aytaç A., *Polimer Karakterizasyonu Ders Notları*, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli, 2014.
- [3] Kafalı M. S., *Bilgisayar Destekli Plastik Enjeksiyon Kalıp Tasarımı*, Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri, 2011, 317997.
- [4] Akkurt S., *Plastik Malzeme Bilimi, Teknolojisi ve Kalıp Tasarımı*, Birsen Yayınevi, İstanbul, 2007.
- [3] Harper C. A., *Modern Plastics Handbook*, McGraw-Hill, New York, 2000.
- [5] Ram A., *Fundamentals of Polymer Engineering*, Plenum Press, New York, 1997.
- [6] Topal M. M., *Plastik Enjeksiyon Kalıplarında Üründeki Kaynak Yeri Hatalarının Mukavemet Özelliklerine Etkisi*, Yüksek Lisans Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Gebze, 2010, 271524.
- [7] Saçak M., *Polimer Kimyasına Giriş*, A.Ü.F.F. Döner Sermaye İşletmesi Yayınları, Ankara, 1998.
- [8] Ghosh P., *Polymer Science and Technology*, 2. Edition, Tata McGraw-Hill, New Delhi, 2002.
- [9] Ünlü K., *EPDM Atıkların Otomotiv Endüstrisinde Değerlendirilmesi Üzerine Bir İnceleme*, Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2007, 201567.
- [10] Cengiz İ., *Polietilen ve Polipropilen Esaslı Ürünlerin Plastik enjeksiyon İşlem Parametreleri ve Termodinamik Yöntemlerle Isıl Yayılımının İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Kastamonu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kastamonu, 2012, 307592.
- [11] Mann D., *Automotive Plastics and Composites*, 2nd Edition, Elsevier Advanced Technology, Oxford, 1999.
- [12] Maxwell J., *Plastics in the Automotive Industry*, 1st edition, Woodhead Publishing Limited, Cambridge, 1994.

- [13] <http://www.subconturkey.com/2012/Kasiimmm/arsiv.html> (Ziyaret Tarihi: 12 Ağustos 2014)
- [14] <http://washingtonpennplastic.com/markets-served/automotive/> (Ziyaret Tarihi: 8 Eylül 2014)
- [15] Schmidt H., Lost Core Plastic Molding Process for Transferring, Positioning and Molding Inserts Into A Plastic Part, 2003, U. S. Patent No. 7,344,670., *U.S. Patent and Trademark Office*.
- [16] <http://www.completeprototype.com/lost-core-molding.html> (Ziyaret Tarihi: 8 Eylül 2014)
- [17] <http://www.tpu.bayer.com/Technologies/Processing/Specialprocesses/Calendring.aspx> (Ziyaret Tarihi: 16 Eylül 2014)
- [18] http://www.softergroup.com/en/info-center/news/kraton-polymers-and-softer_-develop-an-innovative-solution-for-slush-molded-interior-soft-skins_ (Ziyaret Tarihi: 22 Eylül 2014)
- [19] <http://www.polyone.com/en-us/products/vinylpowderdipmold/Pages/default.aspx> (Ziyaret Tarihi: 22 Eylül 2014)
- [20] Reyne M., *Plastic Forming Processes*, 1st edition, John Wiley & Sons, Inc., New Jersey, 2008.
- [21] Strong A. B., *Plastics Materials and Processing*, 3rd Edition, Pearson Education Inc., New Jersey, 2006.
- [22] Harper C. A., *Handbook of Plastic Processes*, 1st edition, John Wiley & Sons Inc., New Jersey, 2006.
- [23] Keçe A., Yapay Sinir Ağları ile Plastik Enjeksiyon Başlangıç Parametrelerinin Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, Bursa, 2006, 202252.
- [24] Kamber Ö. Ş., Plastik Enjeksiyon Kalıplarında Basınç ve Sıcaklık Parametrelerinin Ürün Kalitesine Etkileri ve Taguchi Yöntemi ile Optimizasyonu, Doktora Tezi, Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Eğitimi Programı, İstanbul, 2008, 178882.
- [25] Kayı Y., Plastik Enjeksiyon Prosesindeki Parametrelerin Çekme Problemine Etkilerinin Taguchi Metodu ile İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Sakarya, 2006, 181891.
- [26] <http://www.trexel.com> (Ziyaret Tarihi: 9 Aralık 2014)
- [27] <http://www.arburg.com> (Ziyaret Tarihi: 9 Aralık 2014)

- [28] <http://www.engel.com> (Ziyaret Tarihi: 9 Aralık 2014)
- [29] <http://www.tekrikrehber.com> (Ziyaret Tarihi: 27 Mart 2015)
- [30] Xu J., *Microcellular Injection Molding*, 2nd Edition, Willey, New Jersey, 2010.
- [31] Martine-Vvedensky J. E. , Suh N. P. Waldman F. A., *Microcellular Closed Cell Foams and Their Method of Manufacture*, 1984, U. S. Patent No. 4,473,665., *U.S. Patent and Trademark Office*.
- [32] Colton J. S., *The Nucleation of Microcellular Thermoplastic Foams*, Doktora Tezi, Massachusetts Institute of Technology, Dept. of Mechanical Engineering, Cambridge, 1985.
- [33] Park C. B., *The Role of Polymer/Gas Solutions in Continious Processing of Microcellular Polymers*, Doktora Tezi, Massachusetts Institute of Technology, Dept. of Mechanical Engineering, Cambridge, 1993.
- [34] Baldwin D. F., *Microcellular Polymer Processing and The Design of Continious Sheet Processing System*, Doktora Tezi, Massachusetts Institute of Technology, Dept. of Mechanical Engineering, Cambridge, 1994.
- [35] Cha S. W., *A Microcellular Foaming Proces Performed at Ambient Temperature and A Super-Microcellular Foaming Process*, Doktora Tezi, Massachusetts Institute of Technology, Dept. of Mechanical Engineering, Cambridge, 1994.
- [36] Cha S. W., Suh N. P., Baldwin D. F., Park C. B., *Microcellular Thermoplastic Foamed with Supercritical Fluid*, 1992, U. S. Patent No. 5,158, 986., *U.S. Patent and Trademark Office*.
- [37] Kumar V., *Process Synthesis for Manufacturing Microcellular Parts: A Case Study in Axiomatic Design*, Doktora Tezi, Massachusetts Institute of Technology, Dept. of Mechanical Engineering, Cambridge, 1988.
- [38] Shun T-Y., Chang Y-J., Huang C-T., Hsu D., Chang R-Y., *Dynamic Behavior and Experimental Validation of Cell Nucleation and Growing Mechanism in Microcellular Injection Molding Process*, *SPE ANTEC*, Chicago, Amerika, 10-15 September 2012.
- [39] Lee J., Turng L., Dougherty E., Gorton P., *A Novel Method for Improving The Surface Quality of Microcellular Injection Molded Parts*, *Elsevier Polymer*, 2011, **52**(6), 1436-1446.
- [40] Chen S. C., Yang J. P., Hwang J. S., Chung M. H., *Effects of Process Conditions on The Mechanical Properties of Microcellular Injection Molded Polycarbonate Parts*, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2008, **27**(2), 153-165.

- [41] Hyde L. J., Kishbaugh L. A., Katterman J. A., How Microcellular Foam Molding Changes the Cost Structure of Injection Molded Automotive Components: A Review of the Process and Automotive Applications, *SAE 2002 World Congress Detroit*, Michigan, Amerika, 4-7 Mart 2002.
- [42] Anonim, *MuCell Proses Eğitimi Notları*, Farplas A.Ş., Gebze, 2014.
- [43] Osorio A., Turng L-S., Numerical Simulation of Cell Growth in Microcellular Injection Molding, *SPE ANTEC*, New York, Amerika, 10-13 November 2004.
- [44] <http://www.herzogsystemsag.com/cms/content/view/13/27/lang,en/> (Ziyaret Tarihi: 5 Ocak 2015)
- [45] Li G., Li H., Wang J., Park C. B., The Solubility of CO₂ in Polypropylene: Comparison of Various EOS Models, *SPE ANTEC*, Houston, Amerika, 22-25 August 2005.
- [46] Leung S. N., Wong A., Park C. B., Pressure Drop Threshold for Nucleation of PS/CO₂ Foaming, *SPE ANTEC*, New Jersey, Amerika, 16-19 May 2007.
- [47] Juan P. Hernandez J. P., Chandra A., Winardi A., Turng L-S., Osswald T., Modeling Cell Nucleation During Microcellular Injection Molding, *SPE ANTEC*, Washington, Amerika, 6-8 February 2003.
- [48] Turng L-S., Microcellular Injection Molding, *SPE ANTEC*, Washington, Amerika, 6-8 February 2003.
- [49] Zhu Z., Wang J., Lee J. W. S., Park C.B., Numerical Analysis of Cell Growth During Filling and Post-Filling Stages in Injection Foam Molding, *SPE ANTEC*, Miami, Amerika, 3-5 June 2008.
- [50] Han S., Zheng R., Kennedy P., Xu J., Kishbaugh L., Numerical Analysis of Microcellular Injection Molding, *SPE ANTEC*, Washington, Amerika, 6-8 February 2003.
- [51] Anonim, *A Guide to the MuCell Microcellular Foam Injection Molding Process*, Trexel Inc, Washington, 2014.
- [52] Cha S. W., Yoon J. D., Label Behavior Property Attached on Microcellular Foamed Parts, *Journal of Applied Polymer Science*, 2005, **98** (22), 289-293.
- [53] Edwards S. A., Kennedy J., Nicholson J., Choudhury N. R., Provatas M., An Investigation of Microcellular Injection Moulding on The Structure-Property Relationships of Engineering Thermoplastics Used in Exterior Automotive Applications, *SPE ANTEC*, 2004, New York, Amerika, 10-13 November 2004.
- [54] Moon Y., Jung P. U., Park C. B., The Effect of Viscosity Change on Flow Length and Cell Morphology in Microcellular Foam Injection Molding, *SPE ANTEC*, Chicago, Amerika, 8-11 May 2010.

- [55] Kishbaugh L., Kolshorn U., Boss Design and Optimization for Microcellular Foam Injection Molded Parts, *SPE ANTEC*, Houston, Amerika, 9-12 May 2011.
- [56] Kramschuster A., Cavitt R., Ermer D., Chen Z., Turng L-S., Warpage Comparison Between Microcellular and Conventional Injection Molding, *SPE ANTEC*, Houston, Amerika, 22-25 August 2005.
- [57] Hwang S-S., Hsu P. P., Chiang C-W., Shrinkage Study of Textile Roller Molded by The Microcellular Injection Process, *SPE ANTEC*, New Jersey, Amerika, 16-19 May 2007.
- [58] Jacobsen K., Pierick D., Microcellular Foam Molding: Advantages and Application Examples, *SPE ANTEC*, Toronto, Kanada, 25-28 July 2000.
- [59] Hwang S-S., Hsu P. P., Yeh J-M., Hu C-H., Chang K-C., Effect of Organoclay on The Mechanical / Thermal Properties of Microcellular Injection Molded Polystyrene–Clay Nanocomposites, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2009, **36**(6), 799-805.
- [60] Hwang S-S., Liu S-P., Hsu P. P., Yeh J-M., Chang K-C., Effect of Organoclay on The Mechanical/Thermal Properties of Microcellular Injection Molded PBT–Clay Nanocomposites, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2010, **37** (8), 1036-1043.
- [61] Hwang S-S., Hsu P. P., Effects of Silica Particle Size on The Structure and Properties of Polypropylene/Silica Composites Foams, *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2013, **19** (7), 1377-1383.
- [62] Hsu P., Yang J-P., Hwang S-S., Lai Y-Z., Effect of Clay on The Mechanical / Thermal Properties of Microcellular Injection Molded Low Density Polyethylene Nanocomposites, *SPE ANTEC*, Los Angeles, Amerika, 12-14 December 2009.
- [63] Ameli A., Jahani D., Jung P. U., Park C. B., Microcellular Injection Molding of Polylactide with Talc, *SPE ANTEC*, Chicago, Amerika, 10-15 September 2012.
- [64] Rizvi S .J. A., Bhatnagar N., Optimization of Microcellular Injection Molding Parameters, *International Polymer Processing*, 2009, **5**(2), 517-524.
- [65] Turng L-S., Kharbas H., Effect of Process Conditions on Weld-Line Strength and Microstructure of Microcellular Injection Molded Parts, *Polymer Engineering and Science*, 2003, **43** (22), 157-168.
- [66] Xi Z., Zhang F., Liu T., Zhao L., Turng L-S., Microcellular Injection Molding of In-Situ Modified Poly(ethylene terephthalate) with Supercritical Nitrogen, *Polymer Engineering and Science*, 2014, **54** (28), 2739-2745.

KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

- [1] **Koçoğlu H.**, Yerleşen U., Girginer B., Yalçın M., Yıldırım F. A., Sınmazçelik T., Plastik Enjeksiyonda Fiziksel Köpürtme ile Elde Edilen Mikro Gözenekli Yapıların İncelenmesi ve Optimizasyonu, *15th International Materials Symposium (IMSP'2014)*, Denizli, Türkiye, 15-17 Ekim 2014.
- [2] Balyalı H. A., **Koçoğlu H.**, Harbelioğlu E., Yıldırım Y., Avcu E., Sınmazçelik T., Aşındırıcı Partikül Özelliklerinin Ti6Al4V Alaşımının Eroziyon Aşınma Davranışına Etkileri, *15th International Materials Symposium (IMSP'2014)*, Denizli, Türkiye, 15-17 Ekim 2014.
- [3] Balyalı H. A., **Koçoğlu H.**, Öztürk A., Yıldırım Y., Avcu E., Fidan S., Şahin A. E., Sınmazçelik T., Cam Fiber Takviyeli Polyester Matrisli Kompozitlerin Eroziyon Aşınma Davranışlarının Taguchi Deney Tasarımı ile İncelenmesi, *II. Ulusal Ege Kompozit Malzemeler Sempozyumu*, İzmir, Türkiye, 07-09 Kasım 2013.

ÖZGEÇMİŞ

Ekim 1989'da Gönen'de doğdu. 2008 yılında Gönen Anadolu Lisesinden mezun olarak, aynı sene Kocaeli Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümünde öğrenimine başlamıştır. 2013 yılında bu bölümden mezun olarak aynı sene içerisinde Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans programına başlamıştır. 2015 yılından beri Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümünde, Araştırma Görevlisi olarak görev yapmaktadır.