

**TİCARİ PLASTİKLERDE (POLİETİLEN, POLİPROPİLEN, POLİSTİREN)
ENJEKSİYON PARAMETRELERİNİN ARTIK GERİLMELERE
ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI**

Şükran KATMER

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE EĞİTİMİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ŞUBAT 2010
ANKARA**

Şükran KATMER tarafından hazırlanan TİCARİ PLASTİKLERDE (POLİETİLEN, POLİPROPİLEN, POLİSTİREN) ENJEKSİYON PARAMETRELERİNİN ARTIK GERİLMELERE ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Yrd. Doç. Dr. Çetin KARATAŞ
Tez Danışmanı, Makine Eğitimi Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Makine Eğitimi Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Halil İbrahim ÜNAL
(Kimya, Gazi Üniversitesi)

Yrd. Doç. Dr. Çetin KARATAŞ
(Makine Eğitimi, Gazi Üniversitesi)

Prof. Dr. Ahmet ÖZDEMİR
(Makine Eğitimi, Gazi Üniversitesi)

Yrd. Doç. Dr. Kasım HABALI
(Makine Eğitimi, Gazi Üniversitesi)

Yrd. Doç. Dr. Hakan GÜRÜN
(Makine Eğitimi, Gazi Üniversitesi)

Tarih: 26 /02/2010

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

Prof. Dr. Bilal TOKLU
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

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

Şükran KATMER

**TİCARİ PLASTİKLERDE (POLİETİLEN, POLİPROPİLEN, POLİSTİREN)
ENJEKSİYON PARAMETRELERİNİN ARTIK GERİLMELERE
ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI
(Yüksek Lisans Tezi)**

Şükran KATMER

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Şubat 2010**

ÖZET

Plastik enjeksiyon kalıplama polimer ergiyiğın kalıp boşluğuna enjekte edildiğı ve burada katılaşarak plastik ürün haline geldiğı bir süreçtir. Plastik enjeksiyon kalıplamada, kalıplama şartları, kalıplanmış parçalardaki kalıntı gerilmeler üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Bu çalışmada, kalıplanmış ticari plastik parçalardaki kalıntı gerilmeler ve eğrilik yarıçaplarına (çarpılma) kalıplama şartlarının etkileri araştırılmıştır. Yapılan deneysel çalışmada, altı faktör ve her bir faktör için üç seviye belirlenmiştir. Bu faktörler, enjeksiyon basıncı, enjeksiyon sıcaklığı, kalıp sıcaklığı, ütüleme basıncı, ütüleme süresi ve soğutma süresidir. Deney sayısının azaltılması için Taguchi deney tasarımı uygulanmıştır. Düz dikdörtgen parçalar yüksek yoğunluklu polietilen (YYPE), polipropilen (PP) ve polistiren (PS) malzemeler kullanılarak kalıplanmıştır. Kalıntı gerilmelerin ölçülmesi için katman kaldırma tekniğı uygulanmıştır. Katman kaldırma işleminden sonra gerçekleşen deformasyonlar, bir ışık mikroskobu yazılımı ile fotoğraf üzerinden ölçü alma esasına dayanarak geliştirilmiş bir ölçüm sistemi ile ölçülmüştür. Sonuçlar, enjeksiyonla kalıplanmış plastik parçalardaki çarpılma ve kalıntı gerilmelerin, kalıplama faktörleri ve şartları

ile değiştiğini göstermiştir. Ayrıca kalıplanan malzemenin türü ve özelliklerinin de çarpılma ve kalıntı gerilme üzerinde etkili olduğu görülmüştür.

Bilim Kodu :708.3.028
Anahtar Kelimeler : Kalıntı gerilme, plastik enjeksiyon kalıplama, plastikler,
Taguchi deney tasarımı, katman kaldırma tekniği
Sayfa Adedi :100
Tez Yneticisi : Yrd. Do. Dr. etin KARATAş

**INVESTIGATION OF EFFECTS OF INJECTION MOLDING
PARAMETERS ON RESIDUAL STRESSES IN TRADITIONAL PLASTICS
(POLYETHYLENE, POLYPROPYLENE, POLYSTYRENE)
(M. Sc. Thesis)**

Şükran KATMER

**GAZI UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY
February 2010**

ABSTRACT

Plastic injection moulding is a process where polymer melt is injected into a mould cavity, and solidifies to form a plastic part. In the injection molding of plastic parts, the processing conditions have critical effects on the residual stresses of the molded parts. In this study the effects of the molding conditions on the residual stresses and curvature radius of injection molded traditional plastic parts were experimentally investigated. Six factors and three levels of each factors were examined. These factors were the injection pressure, the melt temperature, the mold temperature, the packing pressure, the packing time and the cooling time. Taguchi experimental setup was used to reduce the number of experiments. The rectangular in shape flat parts were molded using high density polyethylene (HDPE), polypropylene (PP) and polystyrene (PS). The layer removal technique was used to measure the residual stresses. The deformations after that layer removal of the parts were measured using an image based measurement system.

The results showed that the melt temperature had the greatest influence on the residual stresses of molded parts, followed by mold temperature, injection pressure, and cooling time.

Science Code :708.3.028
**Key Words : Residual stress, plastic injection molding, plastics,
Taguchi's experimental design, layer removal method**
Page Number :100
Adviser : Assist. Prof. Dr. Çetin KARATAŞ

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca kıymetli bilgi ve tecrübeleriyle bana yol ve sınırsız sabır gösteren değerli Danışmanım Sayın Yrd. Doç. Dr. Çetin KARATAŞ' a, çalışmayı yüksek lisans projesi (proje no: 07/2009-07) kapsamında maddi olarak destekleyen Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi' ne, kalıntı gerilme konusunda bilgilerini benimle paylaşan Sayın Dr. Fırat KAFKAS' a, deney numunelerini ürettiğim "Prof. Dr. Süleyman SARITAŞ Toz Metalurjisi Laboratuvarı"nın kapılarını açan Sayın Doç. Dr. İbrahim USLAN' a, katman kaldırma deneyleri süresince bana her türlü desteği sağlayan Sayın Prof. Dr. Ahmet ÖZDEMİR' e, D.P.T. 2001K120590 nolu proje çerçevesinde satın alınmış olan ARBURG Enjeksiyon Presinin kullanımı hakkında bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşan değerli meslektaşlarım Sayın Şükrü UPRAK ve Sami ERGÜNEY' e, rahmetli hocam Sayın Hüseyin TUNÇ' a ve hayatım boyunca maddi ve manevi destekleriyle yanımda olan sevgili aileme teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	xii
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	xiv
RESİMLERİN LİSTESİ	xvii
1. GİRİŞ	1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR.....	3
2.1. Kalıplama Şartlarının Kalıntı Gerilmelere Etkisi.....	7
2.1.1. Enjeksiyon sıcaklığı	8
2.1.2. Kalıp sıcaklığı	9
2.1.3. Enjeksiyon basıncı	10
2.1.4. Ütüleme basıncı.....	11
2.1.5. Ütüleme süresi.....	11
3. PLASTİKLERE GİRİŞ.....	13
3.1. Polimerlerin Yapısı ve Tipik Özellikleri.....	13
3.2. Plastikler.....	14
3.2.1. Termoplastik malzemeler.....	14
3.2.2. Termoset plastik malzemeler	16
3.2.3. Elastomerler (kauçuklar).....	17
4. PLASTİK ENJEKSİYON KALIPLAMA	18

Sayfa

4.1. Plastik Enjeksiyon Kalıplama Süreci	18
4.2. Plastik Enjeksiyon Presi	20
4.2.1. Mengene mekanizması	21
4.2.4. Yumuşatma ünitesi	21
4.2.3. Enjeksiyon ünitesi	22
4.2.4. Kontrol üniteleri	22
5. PLASTİK ENJEKSİYON KALIBI	23
5.1. Yolluk, Dağıtıcı, Giriş Tipleri ve Özellikleri	23
5.2. Kalıplarda Sıkışan Havanın Çıkartılması ve Önemi	29
5.3. Kalıp Sıcaklık Kontrolü	30
5.4. Ürünün Kalıptan Alınması	30
6. PLASTİK ENJEKSİYONLA KALIPLANMIŞ PARÇALARDA KALINTI GERİLMELER	31
6.1. Akış Nedenli Gerilmeler	33
6.2. Isıl Nedenli Gerilmeler	33
7. PLASTİK MALZEMELERDE KALINTI GERİLME ÖLÇÜMÜ	35
7.1. Çift Kırınım (Fotoelastik) Yöntem	35
7.2. Delik Delme Tekniği	35
7.3. Kimyasal Çözücü Tekniği	36
7.4. Katman Kaldırma Tekniği	36
8. MATERYAL VE METOT	40
8.1. Malzemeler	41
8.1.1. Polipropilen (PP)	41

	Sayfa
8.1.2. Yüksek yoğunluklu polietilen (YYPE)	41
8.1.3. Polistiren (PS)	42
8.2. Enjeksiyon Kalıplama	43
8.2.1. Plastik enjeksiyon kalıbı	43
8.2.2. Plastik enjeksiyon presi.....	44
8.2.3. Kalıp şartlandırıcısı	46
8.2.4. Kalıplama şartları ve deney tasarımı.....	46
8.3. Katman Kaldırma İşlemi	52
8.4. Eğrilik Ölçümlerinin Yapılması ve Kalıntı Gerilmelerin Hesaplanması	54
9. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA	56
9.1. Enjeksiyon Sonrası Eğrilik Ölçümleri	56
9.1.1. Polipropilen (PP).....	56
9.1.2. Yüksek yoğunluklu polietilen (YYPE)	59
9.1.3. Polistiren (PS)	62
9.2. Kalıntı Gerilme Değerleri	68
9.2.1. Polipropilen (PP).....	69
9.2.2. Yüksek yoğunluklu polietilen (YYPE)	75
9.2.3. Polistiren (PS)	82
10. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	90
KAYNAKLAR	93
EKLER.....	98
EK-1. Kritik F Değerleri ($\alpha=0,05$)	99
ÖZGEÇMİŞ	100

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1 PC/ABS karışımı malzemenin farklı enjeksiyon sıcaklıklarına göre çarpılma değerleri	9
Çizelge 3.1 En çok kullanılan termoplastikler ve kullanım alanları	15
Çizelge 3.2 Sık kullanılan termoset malzemeler ve kullanım alanları	16
Çizelge 3.3 Termoplastik elastomer örnekleri	17
Çizelge 8.1 PP malzemenin özellikleri	41
Çizelge 8.2 YYPE malzeme özellikleri	42
Çizelge 8.3 PS malzeme özellikleri	42
Çizelge 8.4 Plastik enjeksiyon presinin teknik özellikleri	44
Çizelge 8.5 Kalıp şartlandırıcısının teknik özellikleri.....	46
Çizelge 8.6 PP, YYPE ve PS için deney şartları.....	47
Çizelge 8.7 Taguchi Deney Tasarımına göre PP malzeme için deney planı	49
Çizelge 8.8 Taguchi Deney Tasarımına göre YYPE malzeme için deney planı	50
Çizelge 8.9 Taguchi Deney Tasarımına göre PS malzeme için deney planı	51
Çizelge 8.10 Takım ve frezeleme parametreleri	54
Çizelge 9.1. PP numuneler için eğrilik yarıçap değerlerine göre delta istatistiği tablosu	58
Çizelge 9.2 PP numuneler için SN oranlarının varyans analizi tablosu.....	59
Çizelge 9.3 YYPE için eğrilik yarıçap değerlerine göre delta istatistiği etki tablosu	62
Çizelge 9.4 YYPE numuneler için SN oranları varyans analizi tablosu.....	62
Çizelge 9.5 PS numuneler için ortalama eğrilik yarıçap değerlerine göre delta istatistiği tablosu	65
Çizelge 9.6 PS numuneler için SN oranlarının varyans analizi tablosu.....	65

Çizelge	Sayfa
Çizelge 9.7 PP, YYPE ve PS numunelerin kalıplama şartlarına göre ortalama eğrilik yarıçapları	66
Çizelge 9.8 Kalıplama şartlarının enjeksiyonla kalıplanmış PP, YYPE ve PS numunelerdeki eğilmeye etkileri	68
Çizelge 9.9 Kalıplama faktörlerinin kalıntı gerilme bölgeleri üzerindeki etkilerinin varyans analizi sonucu	75
Çizelge 9.10 Kalıplama faktörlerinin yüzey, ara katman ve çekirdekdeki kalıntı gerilmelere etkileri varyans analizi sonuçları	81
Çizelge 9.11 Kalıplama faktörlerinin yüzey, ara katman ve çekirdekdeki kalıntı gerilmelere etkileri varyans analizi sonuçları	86

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1 Enjeksiyonla kalıplanmış plastik parçalardan simülasyon ve deneylerle elde edilmiş kalıntı gerilme profilleri	4
Şekil 2.2 Kalıplanan parçalar için önemli parametreler ve etki yönleri	8
Şekil 2.3 Kalıntı gerilmenin farklı enjeksiyon sıcaklıklarına göre kalınlık kesiti boyunca değişimi	9
Şekil 2.4 Enjeksiyon basıncına göre kalınlık kesiti boyunca gerilme profili	10
Şekil 2.5 Kalınlık kesiti boyunca kalıntı gerilmenin ütüleme basıncıyla değişimi ...	11
Şekil 2.6 Parçanın giriş, merkez (orta) ve son bölgelerinden ütüleme süresi etkisiyle kalınlık kesitinde kalıntı gerilme değişimi	12
Şekil 3.1. Bir etilen molekülü	13
Şekil 3.2 Polietilen molekülü	13
Şekil 3.3 Düz, dallanmış, çapraz bağlanmış polimer yapıları	14
Şekil 3.4 Termoplastik ve Termoset plastikler molekül zincirleri arasındaki farklar	16
Şekil 4.1 Plastik enjeksiyon kalıplama çevrimi a) Dolum, b) Ütüleme ve soğutma c) Soğutma ve mal alma d) Kalıbın açılıp ürünün alınması	18
Şekil 4.2 Enjeksiyon basınç grafikleri a) gerçekleşen, b)ideal	19
Şekil 4.3 Bir plastik enjeksiyon kalıplama presinin elemanları	20
Şekil 5.1 Bir plastik enjeksiyon kalıbı ve oluşturan elemanlar	23
Şekil 5.2 Enjeksiyon kalıbında besleme sistemi	24
Şekil 5.3 Dağıtıcı Kesitleri	25
Şekil 5.4 Dağıtıcı yerleşimlerine örnekler	26
Şekil 5.5 Farklı ürünlerin aynı kalıptaki yerleşimlerine örnekler	26
Şekil 5.6 Giriş tipleri örnekler	27

Şekil	Sayfa
Şekil 7.1 Koordinat sistemi ve kesit üzerinde yüzey kuvvetleri	37
Şekil 7.2 Katman kaldırmanın gösterimi	38
Şekil 7.3 Deforme olmuş bir çubuğun eğriliğinin saptanması	39
Şekil 8.1 Deneysel çalışma sürecinin şematik gösterimi	40
Şekil 8.2 Kalıp çekirdek şekilleri (a- Dikdörtgen prizma, b- çekme çubuğu, c- Kutu)	43
Şekil 8.3 HDPE malzeme L24 deneyi için, enjeksiyon presinden alınmış grafik ekranı	45
Şekil 8.4 Tasarlanmış katman kaldırma sisteminin yan görünüşü.....	53
Şekil 8.5 Katman kaldırma işlemi taslak görünümü	53
Şekil 9.1 PP için kalıplama şartlarının, SN oranlarına göre etki grafikleri.....	57
Şekil 9.2 PP için kalıplama şartlarının, eğrilik yarıçaplarına göre etki grafikleri.....	58
Şekil 9.3 YYPE için kalıplama şartlarının, SN oranlarına göre etki grafikleri.....	60
Şekil 9.4 YYPE için kalıplama şartlarının, eğrilik yarıçaplarına göre etki grafikleri.....	61
Şekil 9.5 PS için kalıplama şartlarının, SN oranlarına göre etki grafikleri.....	63
Şekil 9.6 PS için kalıplama şartlarının, eğrilik yarıçap değerlerine göre etki grafikleri.....	64
Şekil 9.7 PP numunelerin ortalama kalıntı gerilme profili	69
Şekil 9.8 PP numunelerde kalıplama faktörlerinin; yüzey, ara katman ve çekirdekteki kalıntı gerilmelere etki grafikleri.....	71
Şekil 9.9 PP numunelerde enjeksiyon sıcaklığının kalıntı gerilme dağılımına etkisi	72
Şekil 9.10 PP numunelerde soğutma süresinin kalıntı gerilme dağılımına etkisi	73
Şekil 9.11 PP numunelerde kalıp sıcaklığının kalıntı gerilme dağılımına etkisi	74
Şekil 9.12 YYPE numunelerin ortalama kalıntı gerilme profili	76

Şekil	Sayfa
Şekil 9.13 YYPE numunelerde kalıplama faktörlerinin; yüzey, ara katman ve çekirdekdeki kalıntı gerilmelere etki grafikleri.....	77
Şekil 9.14 YYPE numunelerde soğutma süresi ile ortalama kalıntı gerilme değişimi	78
Şekil 9.15 YYPE numunelerde enjeksiyon sıcaklığının kalıntı gerilme dağılımına etkisi	79
Şekil 9.16 YYPE numunelerde ütüleme basıncının kalıntı gerilmelere etkisi.....	79
Şekil 9.17 Kalıp sıcaklığının ortalama kalıntı gerilmelere etkisi.....	80
Şekil 9.18 PS numunelerde kalınlık kesiti boyunca kalıntı gerilme dağılımı	82
Şekil 9.19 PS numunelerde kalıplama faktörlerinin; yüzey, ara katman ve çekirdekdeki kalıntı gerilmelere etki grafikleri.....	83
Şekil 9.20 PS numunelerde enjeksiyon basıncının kalıntı gerilme dağılımına etkisi	84
Şekil 9.21 PS numunelerde kalıp sıcaklığının kalıntı gerilme dağılımına etkisi	85
Şekil 9.22 PS numunelerde kalıp sıcaklığının kalıntı gerilme dağılımına etkisi	85
Şekil 9.23 PP, YYPE ve PS numunelerin kalıntı gerilme dağılımları	89

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 8.1. Plastik enjeksiyon kalıbı hareketli kısmı	44
Resim 8.2 Plastik enjeksiyon presi.....	45
Resim 8.2 CNC freze tezgahında katman kaldırma işlemi	54

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklama
L	eğrilmiş numunenin boyu
ρ	numunedeki eğrilik yarıçapı
Φ	katman kaldırılmış yüzeyin tepe noktasının düzleme uzaklığı
z_0	katman kaldırılmamış parçanın orta eksene kadar kalınlığı
z_1	katman kaldırılmış parçanın orta eksene kadar kalınlığı
E	Malzemenin Elastiklik katsayısı
ν	Poisson oranı
σ_x	x yönündeki gerilme
σ_y	y yönündeki gerilme
κ_x	x yönündeki eğrilik yarıçapının tersi
κ_y	y yönündeki eğrilik yarıçapının tersi

Kısaltmalar	Açıklama
PP	Polipropilen
PS	Polistiren
YYPE	Yüksek yoğunluklu polietilen
AYPE	Alçak yoğunluklu polietilen
ABS	Akrilonitril butadien stiren
PC	Polikarbonat
KO	Kareler ortalaması
KT	Kareler toplamı
SD	Serbestlik derecesi

1. GİRİŞ

Plastik enjeksiyon kalıplama, plastik parça üretiminde en yaygın kullanılan yöntemlerden biridir. Enjeksiyonla kalıplamanın en önemli avantajı, karmaşık geometrili parçaların kontrollü bir kalıplama süreciyle son bir işleme gerek kalmaksızın üretilmesidir. Enjeksiyon kalıplama, dolum, ütüleme ve soğutma olmak üzere üç ana safhadan oluşur. Üretilen ürünün özellikleri, kalıp tasarımı, plastik malzeme, kalıplama şartları gibi değişkenlere bağlıdır [1-43].

Kalıntı gerilmeler dış kuvvetler kaldırıldığında cisim içerisinde varlığını koruyan gerilmeler olarak tanımlanır. Böyle gerilmeler cisim içerisindeki homojen olmayan gerinim alanlarının sonucudur. [44].

Enjeksiyonla kalıplanmış ürünlerdeki iç gerilmeler çekme ve çarpılmanın başlıca nedenidir. Kalıntı gerilmeler, ürünlerin kullanılabilirliği, özellikle ölçüsel kararlılık, mekanik dayanım, kimyasal direnç ve diğer özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Enjeksiyonla kalıplanmış plastik parçalardaki kalıntı gerilmelerin bilinmesi, parçanın ölçüsel ve şekilsel hatalarının önceden tahmini için gereklidir. Enjeksiyonla kalıplanmış parçalardaki kalıntı gerilmeler, oluşma sebeplerine göre ikiye ayrılırlar: Akış gerilmeleri ve ısıl gerilmeler [7].

Kalıntı gerilmelerin saptanmasında kullanılan birçok yöntem vardır. Bunlardan bazıları, katman kaldırma, delik delme, çift kırınım, kimyasal prob yöntemleridir. En yaygın kullanılan yöntem, katman kaldırma tekniğidir. Katman kaldırma tekniğinde frezeleme, su jeti veya excimer lazer gibi işlemler uygulanmaktadır. Bu yöntemin tek dezavantajı karmaşık geometrili parçalara uygulanamamasıdır [9].

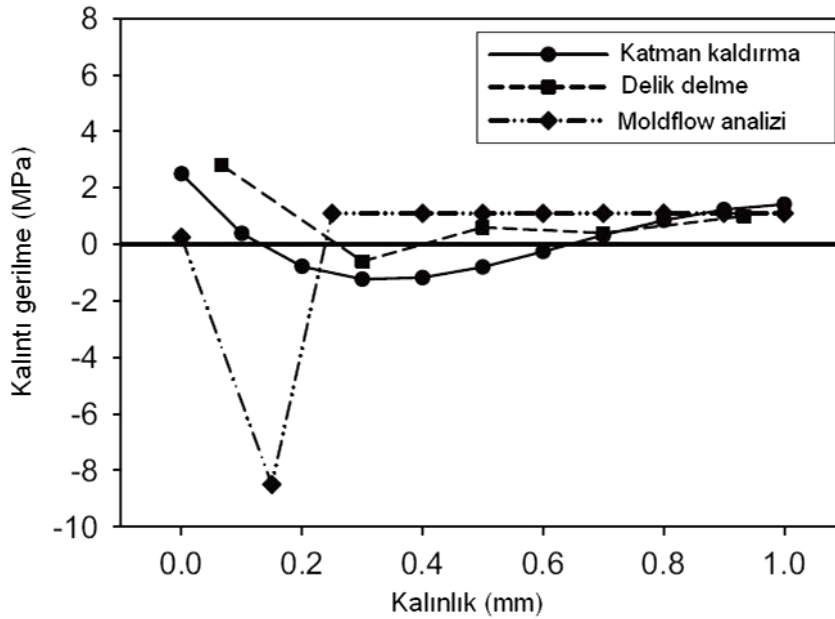
Bu çalışmada plastik enjeksiyonla kalıplanmış ticari plastiklerde, kalıntı gerilmenin enjeksiyon parametrelerinden nasıl etkilendiği araştırılmıştır. Kalıntı gerilme üzerinde en etkili görülen enjeksiyon basıncı, enjeksiyon sıcaklığı, kalıp sıcaklığı, ütüleme basıncı, ütüleme süresi ve soğutma süresi gibi enjeksiyon parametreleri ve bunların üzer seviyeleri dikkate alınarak PS, PP ve YYPE malzemelerden numuneler

üretilmiştir. Deney sayısının azaltılabilmesi için Taguchi Deney Tasarımı (L₂₇) uygulanmıştır. Kalıplanan numunelerde eğrilmeler gözlemlenmiş ve bu eğrilikler katman kaldırma işlemi öncesinde ölçülmüştür. Numunelere frezeleme ile katman kaldırma yöntemi uygulanmış ve her bir katman için kalıntı gerilme değerleri saptanmıştır. Elde edilen eğrilik ve kalıntı gerilme sonuçları analiz edilmiş ve yorumlanmaya çalışılmıştır.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Maxwell ve Turnbull (2002) mühendislik plastiği (ABS) parçada, akış yönünde ve akış yönüne zıt yöndeki kalıntı gerilme değerlerini, katman kaldırma ve delik delme teknikleri ile araştırmışlardır. Katman kaldırma yöntemi ile bulunan kalıntı gerilme değerlerinin her iki yönde de çok yakın çıktığını belirtmişlerdir. Yüzeyde (0,1 mm – 0,4 mm) basma (negatif), en yüksek 3 MPa, merkeze doğru çekme, en yüksek 2 MPa, olduğunu ifade etmişlerdir. Delik delme tekniği ile elde edilen kalıntı gerilme değerlerini, basma parçanın yüzeyinde (0,1 mm), maksimum 7 MPa, çekme, merkeze yakın (0,5 mm) maksimum 5 MPa bulmuşlardır. Elde edilen sonuçlara göre delik delme tekniğinin katman kaldırma tekniğinden daha esnek olmasına rağmen sonuçlarının daha az güvenilir olduğunu ifade etmişlerdir [8].

Kim, ve Youn, (2007) enjeksiyonla kalıplanmış düz parçalarda, kalıntı gerilme dağılımını simülasyon ve deneylerle araştırmışlardır. Deneyler için 120x30x2 mm ebatlarında polistiren (PS) parçalar kullanmışlardır. Kalıntı gerilme değerlerini üç farklı yöntemle saptamışlardır. Katman kaldırma tekniğinden elde edilen kalıntı gerilme sonuçları, delik delme tekniği ve ticari yazılımdan elde edilen sonuçlarla (MoldFlow) kıyaslamışlardır. Deneylerden ve yazılımdan elde edilen kalıntı gerilme grafiklerini uyumlu bulmuşlardır (Şekil 2.1). Delik delme yönteminin plastiklerde, özellikle de karmaşık geometrili plastik parçalardaki kalıntı gerilmelerin ölçümünde kullanılabileceğini belirtmişlerdir [9].



Şekil 2.1 Enjeksiyonla kalıplanmış plastik parçalardan simülasyon ve deneylerle elde edilmiş kalıntı gerilme profilleri [9]

Kabanemi ve ark. (1998) polikarbonat (PC) ve yüksek yoğunluklu polietilen (YYPE) malzemeden enjeksiyonla kalıplanmış 123,4x48,3x26,1 mm ebatlarında, taban kalınlığı 3,8 mm, kenar kalınlıkları 2,2 mm olan, kutu şeklindeki parçaların kalıntı gerilme, çekme ve çarpılma davranışlarını sayısal analiz ve deneylerle araştırmışlardır. Ayrıca çarpılmanın soğutma süresi ve enjeksiyon sıcaklığına göre değişimini de ortaya koymuşlardır. Deneysel çalışmada, kalıntı gerilme ölçümü için delik delme tekniğini kullanmışlardır. Çekme ve çarpılma değerlerini ölçmek için PC ile üretilmiş parçalarda üç boyutlu lazer tarayıcı sistem, YYPE ile üretilmiş parçalarda görüntü işleme tekniği kullanmışlardır. PC'den üretilmiş parçalarda, delik delme tekniği (4 MPa ile -13 MPa arasında) ve sayısal analizden (3 MPa ile -10 MPa arasında) elde edilen kalıntı gerilme değerlerinin örtüştüğünü belirtmişlerdir. YYPE ile üretilmiş parçalarda, çarpılma oranının enjeksiyon sıcaklığının artırılmasıyla arttığını, soğutma süresinin artmasıyla azaldığını ifade etmişlerdir [10].

Young (2004) plastik enjeksiyon kalıplamada, sıcaklık ve basınç değişimlerinin dolmuş sonrasında gelişen kalıntı gerilmeler üzerindeki etkisini temel bir termo-viskoelastik model kullanarak hesaplamıştır. Simülasyonlarda polistiren (PS) ve

polikarbonat (PC) malzemeler kullanmıştır. 90 mm x 49 mm x 7 mm ebatlarında ve 1 mm kalınlığında kutu bir parçayı modellemiştir. Sayısal analizden elde etmiş olduğu sonuçları daha önce yapılmış olan benzer çalışmalarla kıyaslamıştır ve geliştirmiş olduğu sayısal modelin kalıntı gerilmelerin hesaplanmasında kullanılabileceğini belirtmiştir [11].

Zoetelief ve ark. (1996) enjeksiyonla kalıplanmış iki farklı numunede kalıntı gerilme değerlerini sayısal ve deneysel olarak araştırmışlardır. Numuneleri polistiren, akrilonitril bütadien stiren (ABS) malzeme kullanarak üretmişlerdir. Katman kaldırma tekniği ile numuneler üzerindeki kalıntı gerilme değerlerini, iki farklı yönde (akış yönüne paralel ve akış yönüne dik) ölçmüşlerdir. Yapmış oldukları hesaplamalar enjeksiyonla kalıplanmış parçanın yüzeyinde tespit edilmiş olan çekme gerilmelerinin, ütüleme aşaması esnasında doğduğunu ve çekme gerilmesinin nedeninin yüksek enjeksiyon basıncı olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca farklı yönlerdeki (akış yönü, akış yönünün zıttı) kalıntı gerilme değerlerinin aynı değerde çıkmış olmasına dayanarak, parçalardaki kalıntı gerilme dağılımının izotropik olduğunu ifade etmişlerdir [12].

Chen ve ark. (2000) enjeksiyonla kalıplanmış bir kabuk parçanın iç gerilimlerini anlamak için teorik bir çalışma hazırlamışlardır. Plastik enjeksiyon kalıplamanın özellikleri ve soğutma esnasında hacim değişiminin etkisinin de dikkate alındığı, termo-visko-elastisite teorisi tabanlı bir model geliştirmişlerdir. Amorf polimerlerde kalıntı gerilmenin gelişimini saptayan matematiksel bir model kurmuşlardır. Analiz parçası olarak, oyuncak bir otomobilin dış kabuğunu (300 mm x 100 mm x 80 mm, kalınlık 2 mm) kullanılmışlar ve parça çevresine bir soğutma sistemi tasarlamışlardır. Malzeme olarak ABS kullanmışlardır. Homojen olmayan sıcaklık dağılımı nedeniyle, parçanın her yerinde aynı olmayan kalıntı gerilme dağılımı ve çekme saptamışlardır. Genel olarak gerilme dağılımının, parçanın köşelerinde, tabanında ve delik kenarlarında, diğer alanlardan daha karmaşık olduğunu ifade etmişlerdir [13].

Lee ve ark. (2002), enjeksiyon veya sıkıştırma ile kalıplanmış merkezden girişli disk şeklinde parçalardaki akış ve ısıl nedenli kalıntı gerilmeleri ve çift kırınımı sayısal

bir yöntemle hesaplamayı amaçlamışlardır. Sayısal analiz ile akış ve ısıl nedenli kalıntı gerilmeleri enjeksiyon kalıplamanın her safhası için hesaplamışlardır. Analizlerde, merkezden girişli 101,6 mm çapında ve 2,01 mm kalınlığında simetrik, dairesel bir parçayı modellemişler ve malzeme olarak polisitiren (PS) kullanmışlardır. Sayısal analiz sonuçlarını, aynı kalıplama şartlarının sağlandığı deneysel bir çalışmadan elde edilmiş verilerle kıyaslamışlardır. Isıl nedenli kalıntı gerilmenin parçanın merkezinde çekme gerilmesine, ara katmanlarda basma gerilmesine neden olduğunu saptamışlardır. Yüzey katmanında ise, ütüleme basıncı, ütüleme süresi ve diğer süreç şartlarına bağlı olarak çekme veya basma şeklinde geliştiğini ifade etmişlerdir [14].

Chen ve ark. (2001), klasik enjeksiyon kalıplama ve RTR (rapid thermal response – hızlı ısıl değişim) kalıplama ile kalıplanmış plastik numunelerdeki, ısı nedenli ve akış nedenli kalıntı gerilmeler ve çift kırınım değerlerini kıyaslamışlardır. 80 mm x 35 mm x 3 mm ebatlarında dikdörtgen prizma şeklinde polistiren malzemedan üretilmiş numuneler kullanmışlardır. Kalıntı gerilmelerin ölçümü için katman kaldırma yöntemi, çift kırınım ölçümleri için “StrainOptics PS100 Polarimeter system” kullanmışlardır. Deneyler sonucunda, RTR ile kalıplanmış polistiren parçalarda, çift kırınım seviyesinin klasik enjeksiyon kalıplamaya göre düşük gerçekleştiğini ve RTR ile kalıplanmış numunelerin parça girişindeki gerilme değerlerinin toplamda bir azalma gösterdiğini ifade etmişlerdir [15].

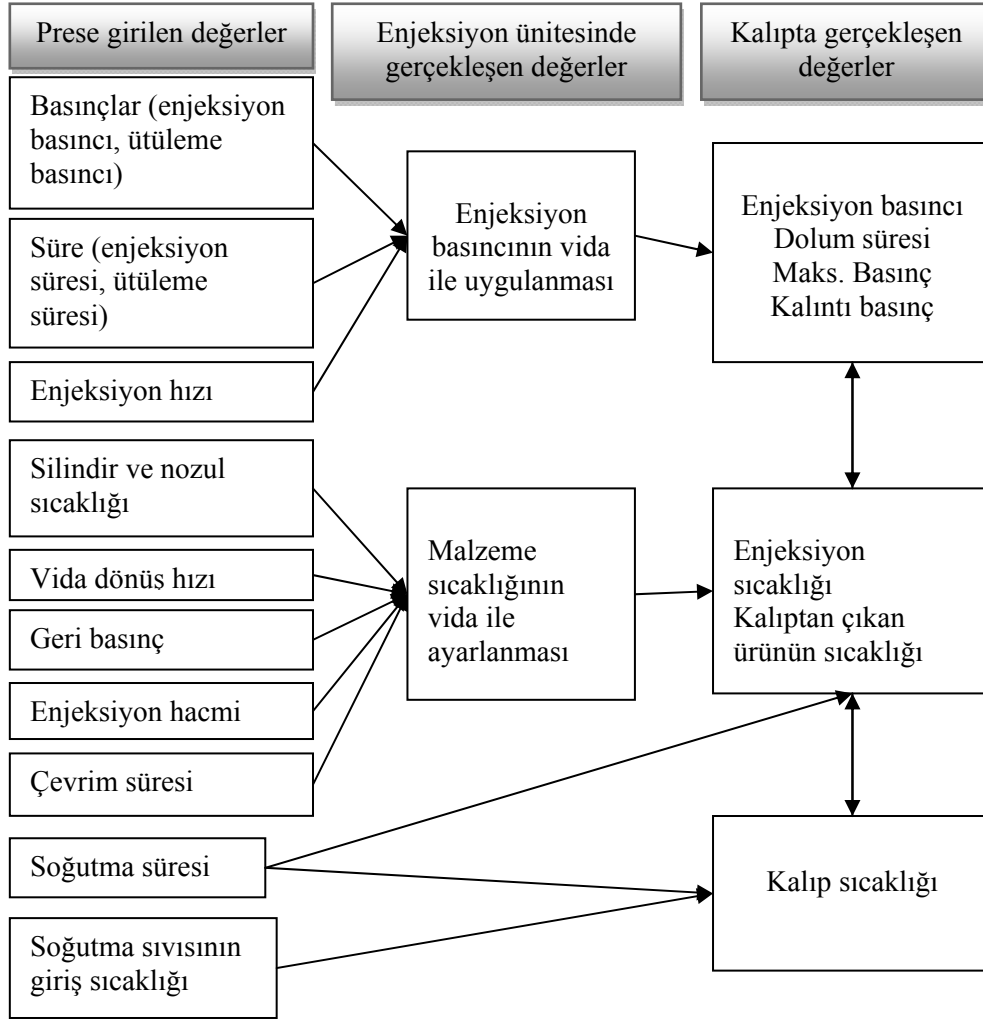
Huang ve Tai (2001), plastik enjeksiyonla kalıplanmış ürünler üzerindeki çarpılmaları etkileyen faktörleri belirleyebilmek için ticari bir yazılım kullanarak, simülasyon çalışması gerçekleştirmişlerdir. 6 deney faktörü ve her bir faktör için 2 seviye belirlemişlerdir ve Taguchi Deneysel Tasarım yöntemini uygulamışlardır. Taguchi Deneysel Tasarım Analizine göre, belirlemiş oldukları faktörlerden kalıplanmış ürünlerdeki çarpılmaya en fazla etki eden faktörün ütüleme basıncı olduğu ve onu sırasıyla, kalıp sıcaklığı, enjeksiyon sıcaklığı ve ütüleme süresinin takip ettiğini ifade etmişlerdir. Dolum süresi ve giriş ölçüsünün, çarpılma üzerinde etkili olmadığını belirtmişlerdir [16].

2.1. Kalıplama Şartlarının Kalıntı Gerilmelere Etkisi

Günümüzde enjeksiyonla kalıplanmış numuneler üzerine yapılan kalıntı gerilme çalışmaları, enjeksiyon parametrelerinin kalıntı gerilme üzerinde etkili olduğunu ortaya koymaktadır. Seçilen malzemeler için enjeksiyon sıcaklığı, kalıp sıcaklığı, enjeksiyon basıncı, enjeksiyon hızı, ütüleme basıncı ve süresi, soğutma süresi temel parametrelerdir [3].

Kalıplanmış parçanın özellikleri, kullanılan malzeme, kalıp tasarımı ve süreç şartlarıyla değişir. Kalıplanmış ürünlerin ağırlık, çarpılma, ölçüsel kararlılık ve yüzey özellikleri gibi özelliklerinde, kalıplama şartları ile net farklılıklar oluşabilir. Bu farklılıkların boyutu, üretim yapılan tezgaha ve malzemeye göre değişecektir [3].

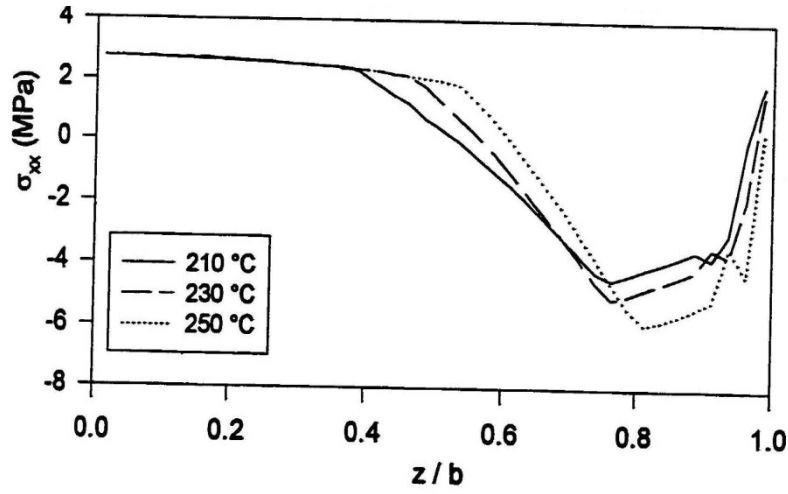
Şekil 2.2’de kalıplanan parçalar için önemli süreç parametreleri ve bunların etki yönleri ifade edilmiştir.



Şekil 2.2 Kalıplanan parçalar için önemli parametreler ve etki yönleri [36]

2.1.1. Enjeksiyon sıcaklığı

Ferhadi (1998) tarafından PS malzeme ile yapılmış çalışmada, enjeksiyon (ergiyik) sıcaklığının, düz bir parçanın giriş civarında ve merkezinden alınan değerlere göre yüzey gerilmelerini artırdığı fakat parçanın girişe en uzak bölgesinde bu durumun zıttının gözlemlendiği ifade edilmiştir [40]. Şekil 2.2'deki grafikte enjeksiyon sıcaklık değerlerinin birbirine çok yakın ve gerilmelerdeki farklılıkların da az olduğu görülmektedir [40]. Ayrıca sıcaklık değeri yükseldikçe gerilmeli bölgenin küçüldüğü fakat maksimum gerilme değerinin arttığı gözlemlenebilir. (z/b =katman kaldırma işleminden sonra parçanın orta eksenine kalan mesafenin parça kalınlığının yarısına oranı (Şekil 2.3))



Şekil 2.3 Kalıntı gerilmenin farklı enjeksiyon sıcaklıklarına göre kalınlık kesiti boyunca değişimi [40]

Huang ve ark. (2001) tarafından yapılan bir çalışma enjeksiyon sıcaklığının parçaların çarpılma davranışları üzerinde de etkili olduğunu ortaya koymuştur. Çizelge 2.1 de PC/ABS karışımı malzemenin kalıplandığı enjeksiyon sıcaklıkları ve bunlara bağlı olarak değişen çarpılma ölçüleri verilmiştir. Çizelge 2.1'e göre enjeksiyon sıcaklığının artışıyla ürünlerdeki çarpılma değerleri azalmıştır [16].

Çizelge 2.1 PC/ABS karışımı malzemenin farklı enjeksiyon sıcaklıklarına göre çarpılma değerleri [16]

Ergiyik Sıcaklığı (°C)	230	240	245	250	270	280	290	310	330	350
Çarpılma (mm)	0,104	0,108	0,121	0,163	0,164	0,129	0,090	0,092	0,114	0,094

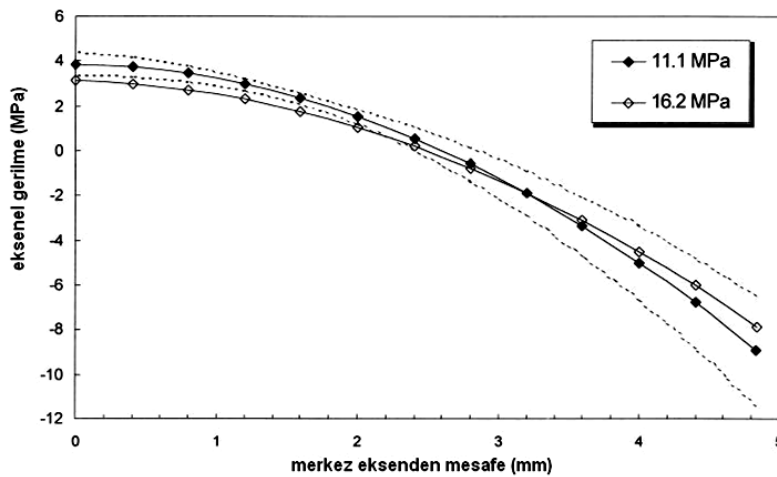
2.1.2. Kalıp sıcaklığı

Kalıp sıcaklığı enjeksiyonla kalıplanmış parçaların çarpılma değerlerini etkilemektedir. Çok düşük ve yüksek kalıp sıcaklıkları, çarpılma oranını artırmaktadır. Özellikle düşük kalıp sıcaklıklarının çarpılmanın artışıdaki etkisi daha fazladır [16].

Lu ve Khim (2001) polikarbonat (PC) malzemeden üretilmiş optik lensler üzerinde süreç şartlarının etkilerini araştırdıkları bir çalışmada kalıp sıcaklığının lenslerdeki gerilme, çekme ve yüzey biçimi üzerinde etkili olduğunu ortaya koymuşlardır. Kalıp sıcaklığının artırılması ile yüzey biçim hatalarının %34 oranında arttığını ve kalıp sıcaklığı ile yüzey formu hataları arasındaki bu ilişkinin kalıp sıcaklığına bağlı olarak değişen çekme ve basma gerilme değerleriyle ilişkili olduğunu ifade etmişlerdir. Kalıp sıcaklığı arttıkça ürünlerdeki gerilme değeri de artmaktadır [27].

2.1.3. Enjeksiyon basıncı

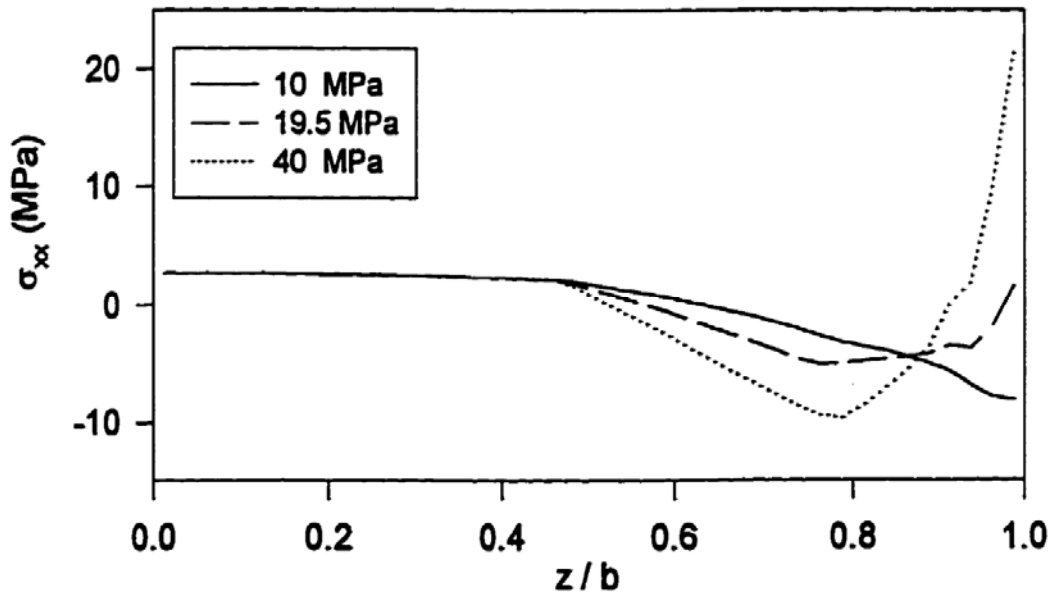
Bhattacharya ve Sen (2000) yapmış oldukları çalışmada, enjeksiyon basıncının 11,1 Mpa dan 16,2 Mpa'ya yükseltilmesiyle yüzeydeki çekme gerilmeleri ve iç kısımdaki çekme gerilmelerinin toplamının azalmış olduğunu ifade etmişlerdir (Şekil 2.4). Yüzeydeki basma gerilmesinin azalmış olmasını, %95 güvenilirlik seviyesine göre önemsiz bulmuşlardır [17]. Siegmann (1982) yüzey gerilmelerinin, enjeksiyon basıncının artışı ile arttığını bulmuştur [41]. Kubat ve Rigdahl (1975) enjeksiyon basıncının, 100 MPa dan 450 MPa' a yükseltilmesi ile alçak yoğunluklu polietilen (AYPE) ve yüksek yoğunluklu polietilen (YYPE) malzemelerle kalıplanmış ürünlerde ki iç gerilmelerin basma gerilmesinden çekme gerilmesine dönüştüğünü ifade etmişlerdir [42].



Şekil 2.4 Enjeksiyon basıncına göre kalınlık kesiti boyunca gerilme profili [17]

2.1.4. Ütöleme basıncı

Tai ve Huang (2001) yapmış oldukları bir çalışmada, farklı ütöleme basıncı oranlarının ürünlerdeki çarpılma değerine etkisini araştırmışlar ve ütöleme basıncı değerinin enjeksiyon basıncının %85'inin üzerine çıkartıldığında parçalardaki çarpılmanın arttığını gözlemlemişlerdir [16]. Farhoudi (1998) polistiren (PS) malzeme ile kalıplanmış ürünler üzerinde yapmış olduğu çalışmada, ütöleme basıncının 10MPa'dan 40MPa'a artırılması ile yüzey gerilmelerinin basma'dan (-9 MPa) çekme'ye (+20 MPa) değişim gösterdiğini saptamıştır (Şekil 2.5). Yüksek ütöleme basıncı etkisiyle, maksimum basma gerilmesinin yükseldiği fakat çekirdekdeki çekme gerilmesinin, ütöleme basıncı ile değişmediğini ifade etmiştir [40]. (z/b =katman kaldırma işleminden sonra parçanın orta eksenine kalan mesafenin parça kalınlığının yarısına oranı (Şekil 2.5))

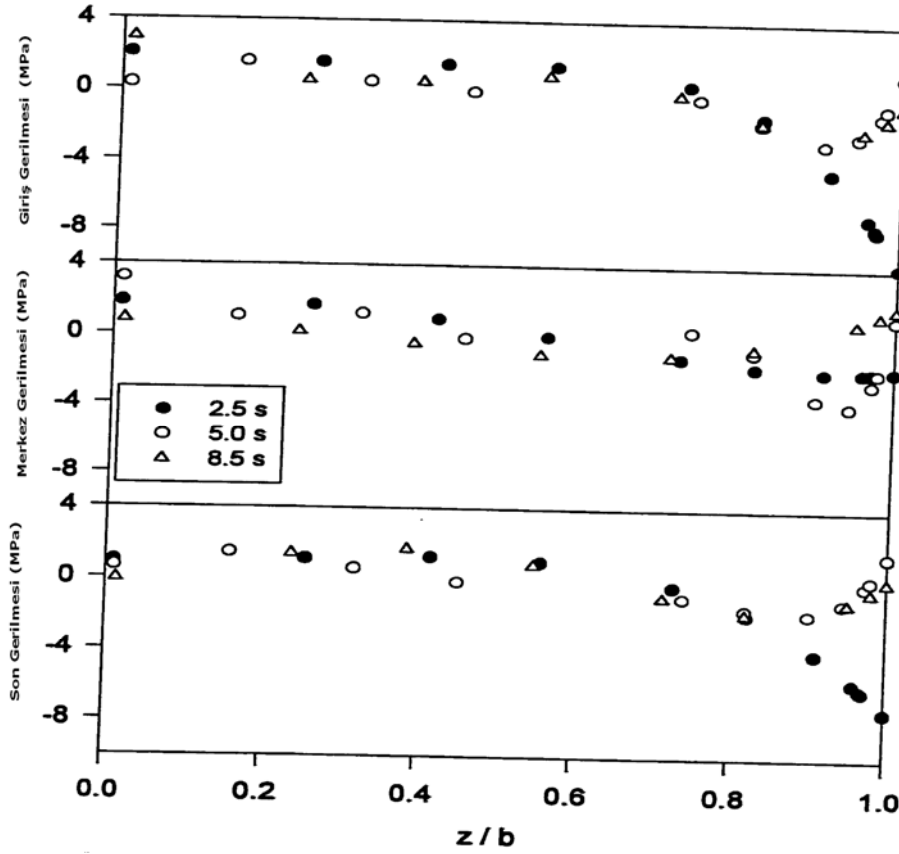


Şekil 2.5 Kalınlık kesiti boyunca kalıntı gerilmenin ütöleme basıncıyla değişimi [40]

2.1.5. Ütöleme süresi

PS malzeme için Farhoudi (1998) tarafından yapılan bir çalışmada (Şekil 2.6) kısa ütöleme sürelerinin, yüzey gerilmelerinin eksi değere (basma) düşmesine neden

olduğunu gözlemlemiştir (Şekil 2.6). Merkezde bu etkinin daha zayıf olduğunu ifade etmiştir [40].



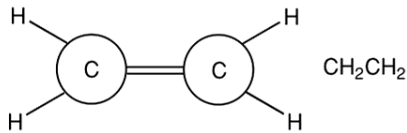
Şekil 2.6 Parçanın giriş, merkez (orta) ve son bölgelerinden ütleme süresi etkisiyle kalınlık kesitinde kalıntı gerilme değişimi

Tai ve Huang (2001) enjeksiyon kalıplama şartlarının çarpılmaya etkilerini araştırdıkları bir çalışmada, ütleme süresini en etkili dört faktör arasında göstermişlerdir. Yapılmış olan bu çalışmaya göre; 0,1 s ile 2 s arasında değişen ütleme süreleri kullanılmış ve 1 s'den uzun ütleme sürelerinde çarpılmanın arttığı belirtilmiştir [16].

3. PLASTİKLERE GİRİŞ

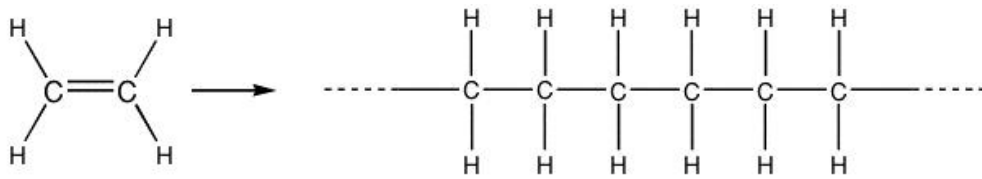
3.1. Polimerlerin Yapısı ve Tipik Özellikleri

Kelime olarak polimer, Latince de birçok anlamına gelen “poli” ve parçalar anlamına gelen “meros” kelimelerinin birleşimidir. Polimer malzemeler, yüksek molekül ağırlıklı, uzun polimer zincirlerinden oluşurlar. Polimerler ufak, tekrarlayan bir yapıya sahip olan monomerlerden oluşmuşlardır. En basit ve sık karşılaşılan monomer etilen’dir. Kimyasal olarak iki karbon (C) atomu ve dört hidrojen (H) atomundan meydana gelmiştir [3, 47, 48]. Şekil 3.1.’de bir etilen molekülü görülmektedir.



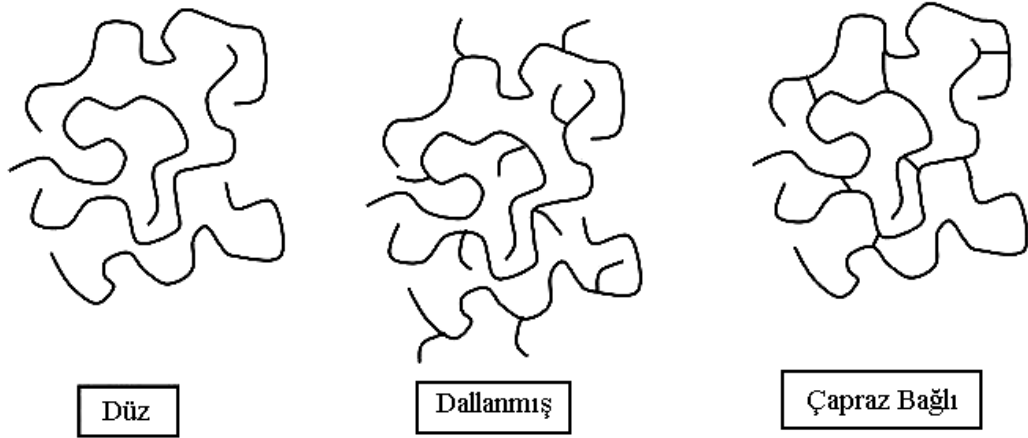
Şekil 3.1. Bir etilen molekülü [3]

Etilen’deki karbon atomları arasında bulunan çift bağ, polietilenin oluşmasına izin vermektedir (Şekil 3.2) [3].



Şekil 3.2 Polietilen molekülü [3]

Polimer zincirleri eğer uzun-zincir şeklinde ise “doğrusal lineer”, bu zincire bağlı olarak bazı yan zincirler varsa “dallanmış”, polimer zincirleri birbirine ara zincirler ile bağlanarak bir ağ yapı (üç boyutlu) oluşturuyorsa “çapraz bağlı” olarak tanımlanmışlardır (Şekil 3.3) [47].



Şekil 3.3 Düz, dallanmış, çapraz bağlanmış polimer yapıları [5]

3.2. Plastikler

Plastikler, polimerler ve fonksiyonelliğini artırmak için katılan diğer malzemelerden oluşurlar. Plastiklerdeki asıl polimer içeriği %20 ile %100 arasında değişebilir. Kullanılan diğer katkıların tipleri ve oranları uygulamada plastikten beklenenler doğrultusunda belirlenir [3, 47].

Plastikler moleküler yapı ve uygulanabilen süreç yöntemlerine göre üç ana sınıfa ayrılırlar, termoplastikler, termoset plastikler ve elastomerler [3].

3.2.1. Termoplastik malzemeler

Bu malzemeler, ısıtıldıkları zaman ergir ve akarlar, soğutuldukları zaman katılaşırlar. Tekrar ısıtıldıklarında yeniden akışkan hale gelebilirler. Bunun anlamı, bu plastikler yeniden işlenebilirler ve yeniden ergitilerek geri dönüştürülebilirler. En çok kullanılan termoplastik malzemeler ve kullanım alanları Çizelge 3.1' de verilmiştir.

Çizelge 3.1 En çok kullanılan termoplastikler ve kullanım alanları [3]

Termoplastik Polimer	Uygulamalar
Yüksek yoğunluklu polietilen (YYPE)	Paketleme, borular, tanklar, şişeler, kasalar
Alçak yoğunluklu polietilen (AYPE)	Paketleme, sebze çantaları, oyuncaklar, kapaklar
Polipropilen (PP)	Şapkalar, yoğurt kapları, bavullar, borular, kovalar, halılar, batarya kılıfı
Polistiren (PS)	Çoğunlukla saydam parçalar, yoğurt kapları, fast food köpük paketleri, kasetler
Polyamid (PA)	Yataklar, dişliler, civatalar, paten tekerleri, misina
Polietilen Terafitalat (PET)	Saydam karbonlu içecek şişeleri
Polivinil Klorür (PVC)	Gıda paketleri, ayakkabılar, zemin

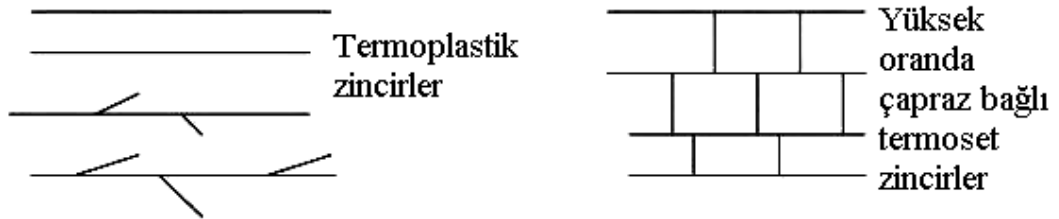
Termoplastikler katılaştığı zaman iki tip moleküler yapıdan birine sahip olurlar: *amorf* veya *yarı kristal yapı*[3, 47, 48].

Amorf polimerlerde, polimer zincirleri yapısal bir düzen göstermez. Moleküller arasında kendi kendini tekrar eden, düzenli boşluklar ve mesafeler yoktur. Amorf polimerler yeterince düşük sıcaklıklarda sert ve kırılındırlar. Isıtıldıklarında camsı geçiş sıcaklığı (T_g) denilen bir sıcaklıkta yumuşar ve kauçuk gibi özellikler gösterirler [47, 48].

Yarı kristal polimerlerin örgüsünde amorf ve kristal yapılar bir arada bulunur. Bu polimerler camsı geçiş sıcaklıkları altında, amorf polimerler gibi kırılındırlar. Camsı geçiş sıcaklığı üzerine çıktıklarında belli derecede yumuşaklık kazanmakla birlikte, yapı içerisindeki yarı kristal bölgeler, polimer örgüsünü sıkıca bir arada tutarlar. Bu malzemeler, amorf malzemelerin yumuşamasından farklı olarak keskin ergime noktaları gösterirler. Soğutuldukları zaman moleküler yapıları yüksek oranda düzenlidir ve kristal yapıdadırlar. Kristal bölgelerin ölçüsü, zincirlerin yapısı ve soğutma hızına bağlıdır. Yarı-kristalin malzemeler, moleküler yeniden düzenlenme nedeniyle çekerler. Bazı malzemelerde bu çekme %20'lere varabilir [3].

3.2.2. Termoset plastik malzemeler

Termoset plastikler, ısıya maruz kaldığı zaman yapıları değişir. Kalıplama veya ısı süreci öncesinde, termoplastiklere benzer ip şeklindeki zincirler oluştururlar. Fakat kalıplama esnasında ısının etkisiyle moleküller çapraz bağlar ile yüksek yoğunlukta ağ oluştururlar. Bu nedenle kalıplanmış termoset parçalar tekrar ergitilemez. Sıcaklık uygulandığında ergimeden kimyasal yapıları bozunur, bu sebeple termoset plastikler, termoplastik malzemeler gibi yeniden işlenemezler. Termoplastik ve termoset plastiklerin moleküler düzenlenmesi arasındaki farklar Şekil 3.4’de görülebilir. Termosetler, çoğunlukla dayanım gerektiren yerlerde kullanılırlar [3, 47, 48]. Çizelge 3.2’de termosetlerin kullanım alanlarından bazı örnekler verilmiştir.



Şekil 3.4 Termoplastik ve Termoset plastikler molekül zincirleri arasındaki farklar [3]

Çizelge 3.2 Sık kullanılan termoset malzemeler ve kullanım alanları [3]

Termoset Polimerler	Uygulamalar
Epoksi	Yapıştırıcılar, elektrik yalıtımı
Melamin	Isı dayanımlı tabakalı yüzeyler,vb., mutfak tezgahları
Fenoliks	Tava/tencere kulpu, ütüler, ütüler, ekmek kızartma makineleri
Poliüretan (PU)	Yalıtım ve döşemecilik için esnek veya rijit köpük
Doymamış polyester	Duvarlar, ekmek kızartma makinelerinin kenarları, uydu çanakları

3.2.3. Elastomerler (Kauçuklar)

ASTM (American Society for Testing and Materials) bir polimer elastomeri “oda sıcaklığında, gerçek uzunluğunun en az iki katına kadar defalarca esnetilebilen ve tekrar orijinal uzunluğuna geri dönebilen malzemeler” olarak tanımlanmışlardır [3].

Termoplastik Elastomerler: Uzun bir süre, elastomerler sık çapraz bağlanma nedeniyle termoset tip malzemeler (örneğin; poliisoprene (doğal kauçuk)) olarak tanımlanmışlardır. Bu malzemelerin büyük bir dezavantajı, termoplastik elastomerlerde (TPEs) var olan, geri dönüşümün olmamasıdır. En sık kullanılan termoplastik elastomer örnek, stiren-bütadien-stirendir (SBS). TPEs’lerin termoset tip elastomerlere göre avantajları şunlardır [3]:

- Daha düşük parça yoğunluğu nedeniyle daha düşük parça maliyetleri
- Daha kısa çevrim süresi
- Artıkların ve parçaların geri dönüşebilmesi
- Renklendirilebilmek.

Termoplastik elastomerleri ticari açıdan daha başarılı yapan özellikleri, daha düşük esneklik ve elastiklidir. Gerilimden kurtulma kabiliyeti ve gerçek şekline geri dönmesi, sızdırmazlık elemanları gibi uygulamalar için onları uygun yapmaktadır. Elbette termoplastik kauçuklar, uzun süredir geçerlidir ve bu malzemeler günümüzde TPE’lerle yer değiştirmektedir [3]. Çizelge 3.3’de bazı termoplastik elastomer örnekleri ve onların temel molekülleri verilmiştir.

Çizelge 3.3 Termoplastik elastomer örnekleri [3]

Tip	Elastomer Açıklama	Alt Grup
TPE-O	Polyolefin karışımları	PP/EPDM, PP/EPDM çapraz bağlı
TPE-V	Polyolefin alaşımları	çeşitli
TPE-S	Stiren	SEBS, SBS, SEBS/PPE
TPE-A	Polyamid	PA 12 tabanlı, PA 6 tabanlı
TPE-E	Polyester	Polyesterester, Polieterester
TPE-U	Poliüretan	Polyester üretan, Polieterester üretan, Polieter
SEBS = stiren-etilen/bütiren-stiren terblok kopolimer		

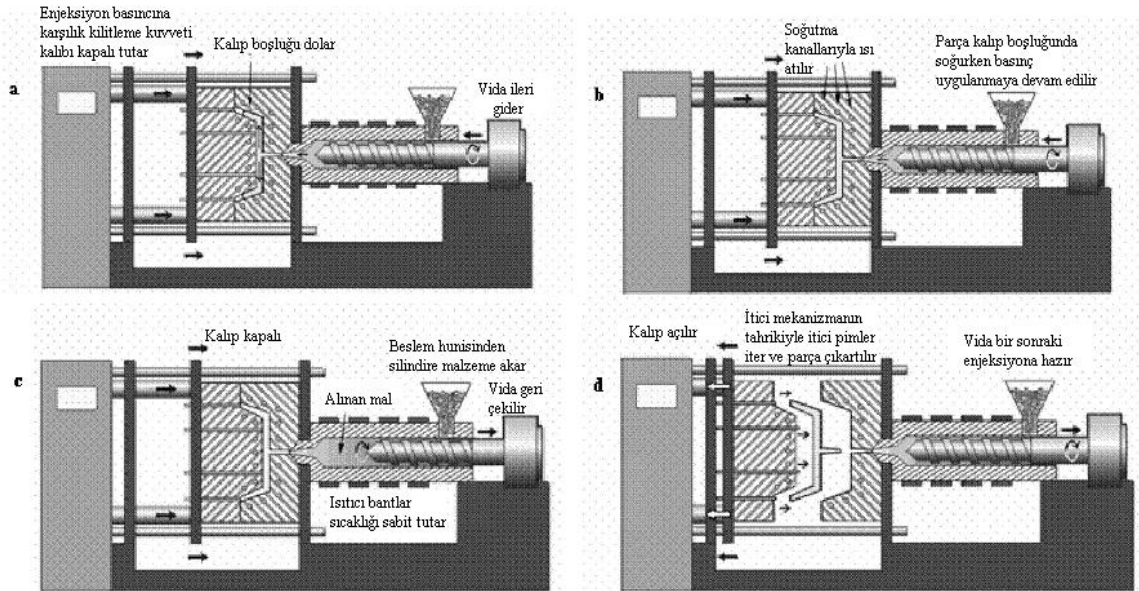
4. PLASTİK ENJEKSİYON KALIPLAMA

4.1. Plastik Enjeksiyon Kalıplama Süreci

Plastik enjeksiyon kalıplama, ergimiş veya yumuşatılmış plastik malzemenin kalıp boşluğuna yüksek basınç altında doldurulması ve kalıp boşluğunun şeklinde katılaştırılması sürecidir. Bir enjeksiyon kalıplama sisteminin temel adımları;

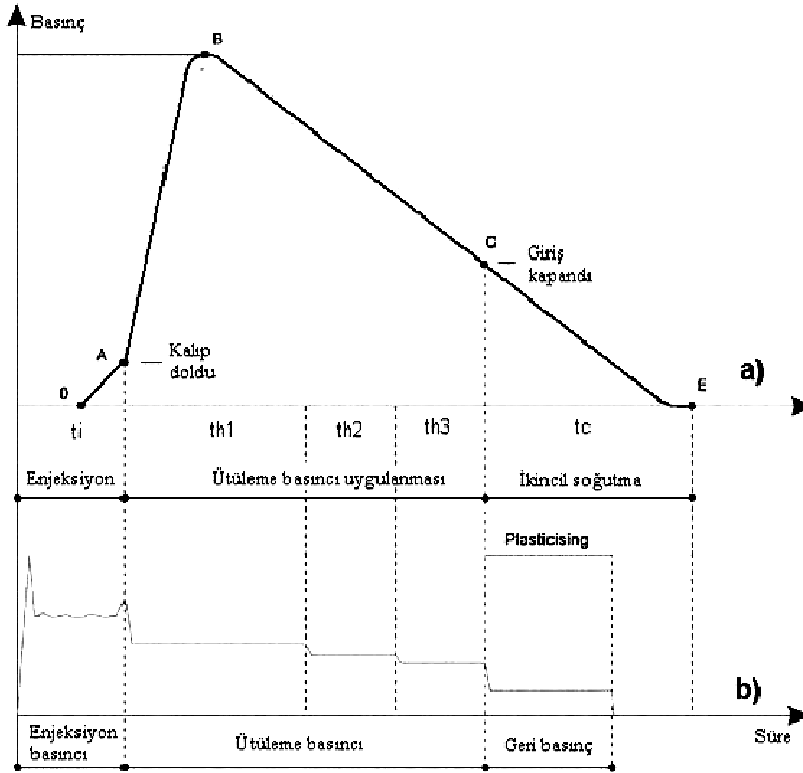
- Kalıbın kapanması
- Ergimiş veya yumuşatılmış plastiğin kalıp boşluğuna enjekte edilmesi
- Plastik soğuyup kalıptan çıkmaya hazır olana kadar kalıbın kapalı tutulması
- Kalıbın açılması ve
- Bitmiş ürünün kalıptan alınması [1-3,5, 43].

Plastik enjeksiyon kalıplama çevriminin adımları şematik olarak Şekil 4.1'de verilmiştir.



Şekil 4.1 Plastik enjeksiyon kalıplama çevrimi a) Dolu, b) Ütuleme ve soğutma c) Soğutma ve mal alma d) Kalıbın açılıp ürünün alınması [43]

Plastik enjeksiyon kalıplama esnasında uygulanan ve gerçekleşen enjeksiyon basınç grafikleri Şekil 4.2’de verilmiştir. Şekilde t_i enjeksiyon süresi, t_{HP1} , t_{HP2} , t_{HP3} ütleme süreleri, t_C soğutma süresini ifade etmektedir.



Şekil 4.2 Enjeksiyon basınç grafikleri a) gerçekleşen, b)ideal [3]

Herhangi bir malzeme için başarılı bir kalıplama işlemi; malzeme seçimi ve kalıp tasarımı ile birlikte enjeksiyon parametrelerini doğru ayarlamakla mümkündür. Ekonomik bakış açısına göre kalıplamada amaç, her parçanın, yüksek kalitede ve kısa süreli bir kalıplama çevriminde üretilmesidir [2, 35].

Kalıplama çevriminin üç temel aşaması bulunur: Dolu, ütleme ve soğutma [35].

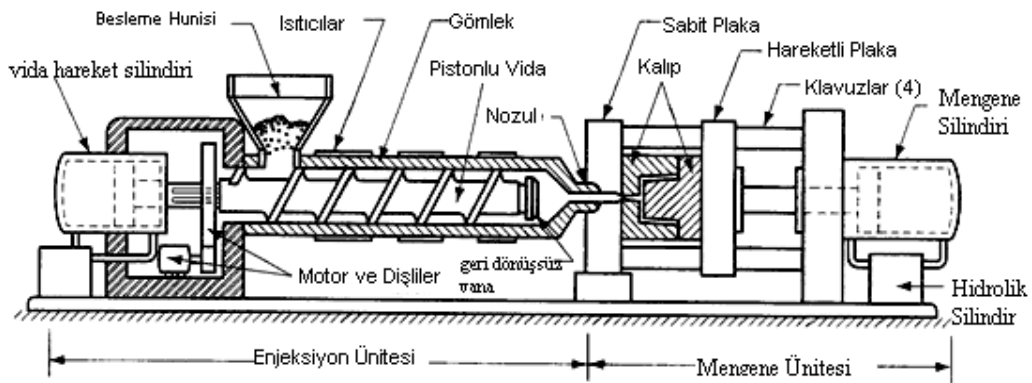
1- *Dolu*: Plastik malzemenin sıcaklığı, basınç altında akabileceği bir noktaya kadar yükseltilir. Bu işlemde, enjeksiyon kalıplama presinin silindiri içinde pistonlu vida ile katı granüller her noktada aynı sıcaklık ve viskozite değerine sahip ergiyik haline gelene kadar ısıtılır ve karıştırılır. Bu safhada son olarak, ergitilmiş malzeme

basınç altında, şeklini alması istenen kalıp boşluğuna enjekte edilir. Dolum safhasının önemli parametreleri, enjeksiyon basıncı, enjeksiyon sıcaklığı, enjeksiyon hızı ve dolum süresidir [35].

2- *Ütüleme:* Kalıp boşluğunun doldurulması sonrasında, malzemede soğuma nedeniyle çekme meydana gelir. Çekme sonucunda meydana gelen hacim kaybı ütüleme safhasına ekstra malzeme enjekte edilerek tamamlanır. Bu safha ütüleme olarak adlandırılmaktadır Ütüleme safhasında en önemli parametreler, ütüleme basıncı ve süresidir. Bu safhada basınç ve süre, parçanın ölçüsel kararlılığını ve görünüşünü etkileyen parametrelerdir [1, 35].

3- *Soğutma ve kalıptan çıkartma:* Ütüleme safhası sonrasında, ürün kalıptan çıkma sıcaklığına kadar soğutulur. Herhangi bir enjeksiyon kalıplama çevriminde soğutma süresi toplam çevrim süresinin %70 ini tutar. Gerçekte soğutma safhası, malzemenin enjeksiyonunun hemen ardından başlar enjeksiyon, ütüleme ve tutma safhalarını kapsar. Son olarak kalıp açılır, sıcaklık ve basınç altında kalıp boşluğu şeklini almış olan parça kalıptan dışarı alınır [1, 35].

4.2. Plastik Enjeksiyon Presi



Şekil 4.3 Bir plastik enjeksiyon kalıplama presinin elemanları [3]

Plastik enjeksiyon preslerinin (Şekil 4.3), farklı tipte ürünlerin, farklı ekonomi ve performanslarda üretilmesini sağlayan birçok tipleri vardır [1].

Enjeksiyon kalıplama presleri; enjeksiyon kapasiteleri, ergitme kapasiteleri, vida çapı, enjeksiyon hızı, enjeksiyon basıncı ve kalıp kapama kuvvetlerine göre sınıflandırılırlar [2].

Bir enjeksiyon kalıplama tezgahının temel kısımları aşağıdaki gibi tanımlanmıştır:

- 1- Mengene mekanizması
- 2- Yumuşatma ünitesi
- 3- Enjeksiyon ünitesi
- 4- Kontrol üniteleri [5].

Kontrol ve yardımcı ünitelerle birlikte bu ünitelerin yapıları tezgah tiplerine ve markalarına göre değişiklik gösterebilir [31].

4.2.1. Mengene mekanizması

Mengene mekanizması, çevrim esnasında ihtiyaç duyulduğu zaman kalıbı açar ve kapatır. Mengene mekanizmasının görevi iki kalıp yarımını aynı ekseninde kapalı tutmaktır. Enjeksiyon esnasında kalıbın kapalı tutulması için gerekli kalıp kilitleme kuvvetini sağlamalıdır. Açma/kapama üniteleri; hidrolik, hidrolik ve mafsal birleşimi veya elektrik gücüyle hareket ettirilebilirler [3, 5].

4.2.4. Yumuşatma ünitesi

Yumuşatma aşamasının amacı, malzemenin kalıba gönderilmesi için homojen bir ergiyik elde etmektir. Soğuk olan plastik malzemeyi enjeksiyon için gerekli olan sıcaklık değerine veya ergiyene kadar karıştırarak olan (tezgah tipine göre) pistonlu vidalı mil ve silindirden oluşur. Pistonlu vidalı mil silindir içinde dönerek plastiği karıştırır. Silindirin dış çevresinde ısıtıcılar bulunur ve çoğunlukla üçten fazla ısıtıcı bölge vardır [3, 5]. Enjeksiyon sıcaklığı (ergiyik sıcaklığı) bu ısıtıcılar üzerinden kontrol edilir.

4.2.3. Enjeksiyon ünitesi

Enjeksiyon ünitesi, ergiyik malzemeyi yüksek basınç ile kalıp içerisine iter. Uygulanacak basıncın değeri, ürünün uzunluğu ve et kalınlığı oranına (L/t) göre belirlenir. Enjeksiyon hızı, enjeksiyon süresi, enjeksiyon basıncı, geri basınç, ütüleme basıncı, ütüleme süresi gibi kalıplama parametreleri, enjeksiyon ünitesinden kontrol edilmektedir [3, 5].

4.2.4. Kontrol üniteleri

Veri Paneli: Bu panel, operatörün kalıbı gözlemleyebilmesi için mengenenin güvenlik kapısının yanındadır. Operatör, bütün fonksiyonları buradan yönetebilmektedir.

Akıllı Kontrol: Pozisyon sensörleri, zamanlayıcılar... vb. algılayıcılardan gelen sinyalleri ve makine ayarlarını yönetir. Günümüzde akıllı tezgâhlarda elektronik sviçler veya mikrobilgisayarlar kullanılmaktadır.

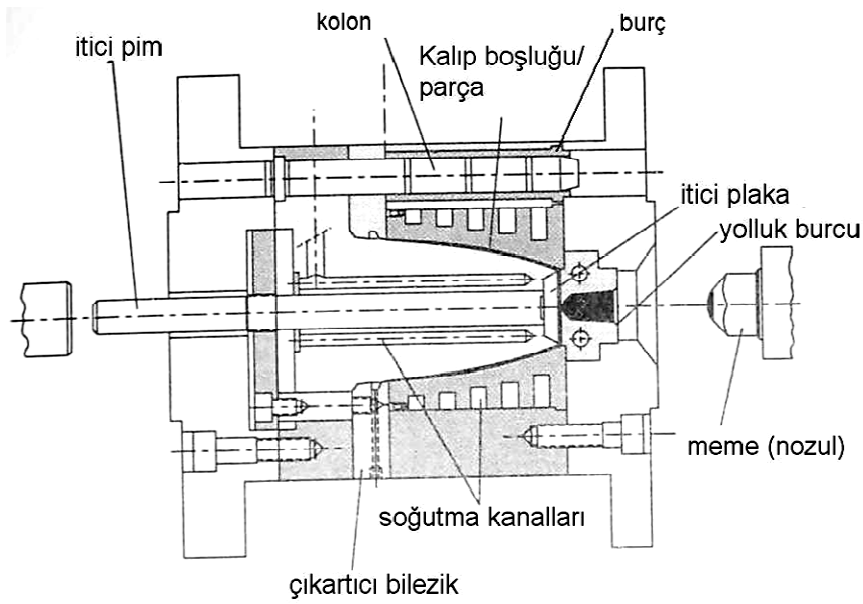
Güç Kontrolleri: Motorlara ve ısıtıcılara güç kontrolü ve dağılımı ile tezgâhın ve kalıbın ısı kontrollerini kapsar.

5. PLASTİK ENJEKSİYON KALIBI

Bir enjeksiyon presinin temel noktası kalıptır. Kalıp (Şekil 5.1), plastik ergiyiğin parça olarak şekillendirilmesini, bu formda soğutulmasını ve bitmiş ürünün elde edilmesini sağlar.

Parçanın şekillenmesinde etkili olan unsurlar sırasıyla aşağıdaki gibidir:

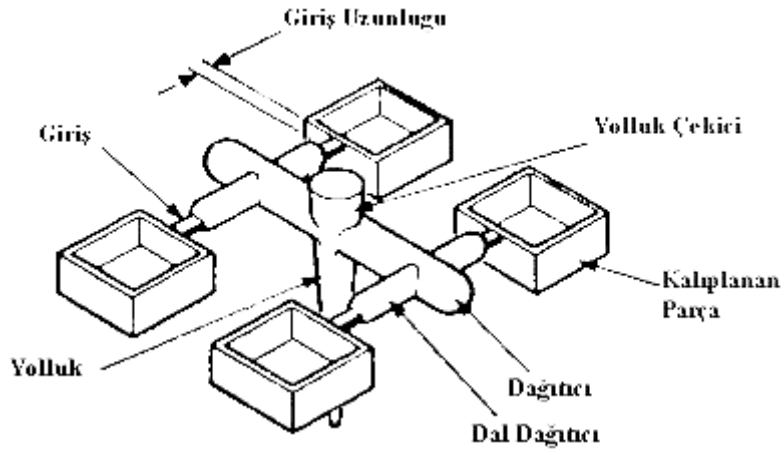
- Yolluk ve dağıtıcılar
- Giriş
- Kalıp boşluğu
- Soğutma sistemi (termoplastikler için)
- Ürün çıkartma sistemi [49].



Şekil 5.1 Bir plastik enjeksiyon kalıbı ve oluşturan elemanlar [49]

5.1. Yolluk, Dağıtıcı, Giriş Tipleri ve Özellikleri

Kalıpta, dolum esnasında, ergiyik yolluktan geçer ve dağıtıcılarla kalıp boşluklarına dağılır (Şekil 5.2).



Şekil 5.2 Enjeksiyon kalıbında besleme sistemi [43]

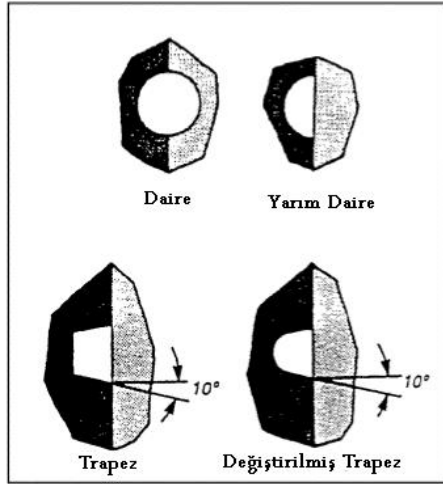
Yolluk; ergimiş plastiği yumuşatma ünitesinden kalıp boşluğuna veya dağıtıcı sisteme ileten bir kanaldır. Eğer dağıtıcı sistem yoksa ve plastik doğrudan yolluktan kalıp boşluğuna taşıyorsa, bu yolluk giriş tipi, yolluk giriş olarak adlandırılır [1].

Dağıtıcı sistem; tasarlandığı zaman üç ana başlık takip edilir: dağıtıcı şekli, dağıtıcı yerleşimi ve dağıtıcı ölçüleri.

Dağıtıcı tasarımında parçanın tam dolumu açısından dikkat edilmesi gereken noktalar şunlardır:

1. Kalıp boşluğu en az kaynak hattı ile dolmalı
2. Bütün kalıp gözleri aynı sürede dolmalı
3. Akış bölünmesi mümkün olanın en azı olmalı
5. Ürünün kalıptan çıkartılması kolay olmalı
6. Ürünün görünüşü etkilenmemeli (giriş yeri ürünün görünüşünü etkilememeli)
7. Dağıtıcı; sıcaklık ve basınç kayıplarının ve bozulmanın en az olması için mümkün olan, en kısa uzunlukta olmalı
8. Dağıtıcı kesiti, parçaların tam olarak dolmasına ve ütülenmesine imkân verecek kadar geniş olmalıdır [3].

Dağıtıcı Şekli: Şekil 5.3’de örnek dağıtıcı kesitleri verilmiştir. İdeal dağıtıcı kesiti, malzemenin akışını kolaylaştırmak ve minimum ısı kaybı için mümkün olan en az temas alanına sahip olmalıdır [3].

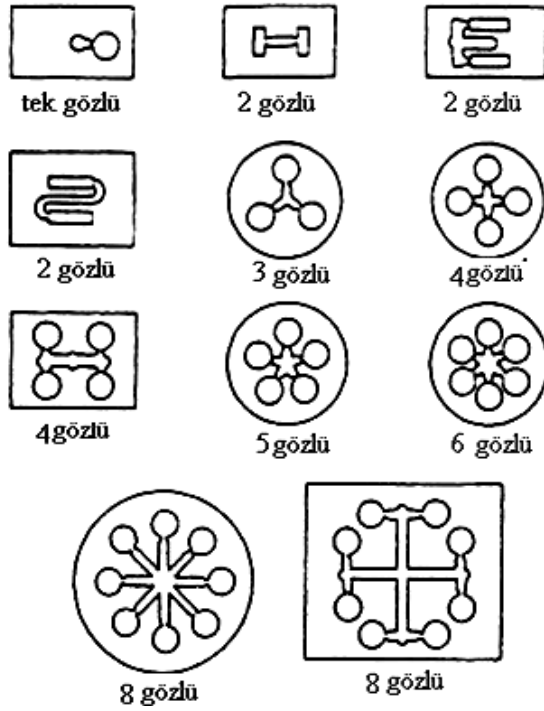


Şekil 5.3 Dağıtıcı Kesitleri [3]

Ergiyik plastik, dağıtıcıda ilerlerken, soğuk kalıp yüzeyine temas eden malzeme hızla sıcaklığını kaybeder ve katılaşır. Plastik akışı, bu katılaşmış tabakanın merkezinden devam eder, çünkü termoplastikler düşük ısı iletimine sahiptir. Bu nedenle çevredeki katılaşmış plastik malzeme, merkezdeki ergiyik akışının sıcaklığını korumaktadır [3].

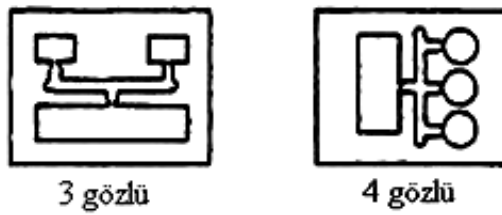
Dağıtıcı Yerleşimi: Dağıtıcı yerleşimi; kalıp göz sayısı, parçaların şekli, kalıp tipi, giriş yeri ve tipi faktörlerinden etkilenmektedir.

Dağıtıcı uzunluğu, basınç kaybını ve malzeme firesini azaltmak için mümkün olduğunca kısa tutulmalıdır. Ayrıca dağıtıcılar malzemeyi yolluktan girişe, her bir kalıp gözüne aynı mesafe ve sürede taşınmalıdır. Şekil 5.4’de farklı dağıtıcı yerleşimleri verilmiştir [3].



Şekil 5.4 Dağıtıcı yerleşimlerine örnekler [3]

Bazen, farklı parçaların aynı kalıptan üretilmesi istenir. Bu durumda, kalıp boşluğunun dengeli dolması için dağıtıcı ve giriş ölçüleri birbirinden farklı verilebilir (Şekil 5.5) [3].



Şekil 5.5 Farklı ürünlerin aynı kalıptaki yerleşimlerine örnekler [3]

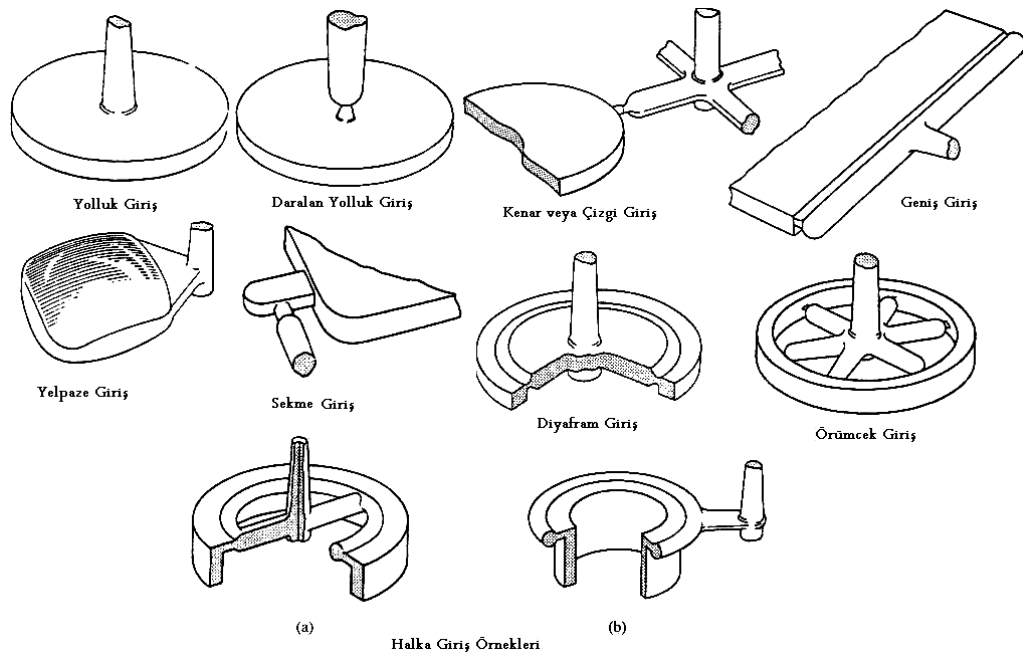
Giriş

Giriş, ergiyiğin kalıp boşluğuna girdiği bölgeye verilen addır. Kalıp dolumun da en önemli kararlardan biri, plastik parça için kullanılan girişin tipi, sayısı ve yerinin saptanmasıdır. Girişler, parça üzerinde bir veya daha fazla noktaya yerleştirilebilir ve farklı tasarımlarda olabilirler. Farklı giriş tasarımları ve yerleri parça kalitesi

üzerinde çarpıcı etkiler yapabilir. Giriş şekli, kalıplama sürecinin dolun ve ütüleme safhalarında etkili olacaktır. Bir parçanın son ölçüleri (en iyi performans ve görünüm) üzerine önemli bir etkisi vardır [4]. Çeşitli giriş tipleri Şekil 5.6'de verilmiştir.

Giriş şekli parça kalitesini birçok yönde etkileyebilir:

- Kalıp dolumu
- Kalıp boşluğunda basınç dağılımı
- Kaynak veya birleşme kalitesi ve yeri
- Gaz sıkışmaları ve kalıbın dolmaması
- Moleküler dağılım ve yönü
- Girişin parçadan ayrılma kolaylığı
- Ölçüsel toleranslar
- Giriş ölçüsü ve yeri
- Çökme izlerinin kontrol kabiliyeti
- Çekme boşluklarının kontrol kabiliyeti
- Kalıntı gerilme
- Çarpılma ve düzgünlük [4].



Şekil 5.6 Giriş tipleri örnekler [3]

Yolluk Giriş: Bu giriş tipi özellikle tek gözlü kalıplar (bardak ve bir ekseninde döndürülmüş şekilde parçalar) için tercih edilen bir giriş tipidir. Kenar girişten farkı, malzeme doğrudan kalıp boşluğuna akar, basınç kaybı ve paylaşımı en alt düzeydedir (Şekil 5.6)[3, 49].

İğne Yolluk Giriş: (Daralan yolluk giriş) Bu tip giriş iki açılma çizgili kalıplarda kullanılır. Bitirme operasyonlarını elimine eder çünkü küçük giriş parçanın çıkartılması esnasında kırılır. Diğer taraftan giriş, kalıp dolmuş esnasında tıkanmaması için çok küçük olmamalıdır. Yüksek enjeksiyon basıncı altında girişten geçen malzemenin sürtünme ısısı ürün üzerinde benek (splash) ve yanıklara neden olabilir (Şekil 5.6) [3, 49].

Kenar veya Çizgi Giriş: Bu giriş tipi, çoğunlukta düz veya derin olmayan, nispeten küçük parçaların çok gözlü kalıplarında kullanılır. Girişin boyutları, kalıplanan parçanın şekli ve kalınlığına göre belirlenir. Kesit için giriş kalınlığı, parça kalınlığının yaklaşık olarak %75'i alınabilir ve dağıtıcı kadar geniş olabilir (Şekil 5.6) [3, 49].

Geniş (Flash) Giriş: Bu giriş tipinin uzun, düz, ince kesitli parçalar için kullanımları oldukça başarılıdır. Geniş bir kalıp boşluğunu hızlı ve dengeli bir şekilde doldurur. Parçanın uzunluğu, genişliği ve akış etkileri girişin uzunluğunu belirler. Bazı örneklerde parçanın uzunluğunun tamamı giriş olması faydalıdır, genellikle uzunluğun %50 si yeterlidir (Şekil 5.6) [3].

Yelpaze (Fan) Giriş: ince kesitli kalıplamalar örneğin optik lensler, için bu giriş tipi sıklıkla kullanılır. Bunun nedeni, malzeme donmadan yavaş bir dolmuş için yeterli boyutta yapılmış dağıtıcı sağlamasıdır (Şekil 5.6) [3].

Sekme (Tab) Giriş: Bu giriş, özellikle düz veya derin olmayan parçaların üretiminde, çoklu kalıp gözlerinde kenar girişe alternatif olarak kullanılabilir. Kenar girişe göre avantajları; kalıp boşluğunda malzemenin püskürmesini en aza indirerek kaynak

hatları ve akış izlerini kontrol etmesidir. Renklendirilmiş malzeme kullanıldığı zaman girdap yaratarak dağılmasına yardım eder (Şekil 5.6) [3].

Diyafram (Disk) Giriş: Bu giriş tipi, boru şeklindeki bir parçanın tek gözlü kalıplamasında, üniform bir dolum elde etmek için kullanılabilir. Diyafram giriş parçadan son bir işlemle ayrılır (Şekil 5.6) [3, 49].

Örümcek (Spider) Giriş: Bu diyafram girişin bir türüdür. Normalde geniş çaplı parçaların kalıplanmaları ve malzeme firesini azaltmak için kullanılırlar. Bir dezavantajı kaynak hatlarına neden olur (Şekil 5.6) [3].

Halka Giriş: Boru tipi parçaların çoklu kalıplamalarında bu tip bir giriş, kalıbın dengeli dolmasını sağlar (Şekil 5.6) [3].

5.2. Kalıplarda Sıkışan Havanın Çıkartılması ve Önemi

Bir diğer tasarım unsuru, kalıplama esnasında sıkışan hava ve gazların atılması için ihtiyaç duyulan tahliye noktalarıdır. Sıkışan hava ve gazlar, kalıplanan parçalarda farklı hatalara neden olurlar. Bunlar:

- Kalıbın tam dolmaması
- Yanma veya kavrulma
- Çekme (bitmiş parçalarda bastırmalar veya dalga şeklinde çizgiler sıklıkla görülür)
- Uç durumlarda; alevlenen gazlar kalıp yüzeyinde kimyasal aşındırmaya neden olabilirler

Kalıp açılma çizgisinden, vana tıparlar ve pimlerle hava atımı yaygın kullanılan yöntemlerdir. Son gelişmeler, gaz ve hava çıkışına izin veren fakat polimeri geçirmeyen gözenekli metallerin kullanımını içerir [3].

5.3. Kalıp Sıcaklık Kontrolü

Kalıp sıcaklığı veya kalıp duvar sıcaklığı enjeksiyon kalıplamada en önemli süreç parametrelerinden biridir. Kalıp sıcaklığı, çekmeyi dolayısıyla kalıptan çıkan parçanın boyutlarını, parçanın son görünümünü, çevrim süresini (soğutma süresini) dolayısıyla parça maliyetlerini etkiler. Enjeksiyon kalıplamada ekonomik kalite gelişimi, doğru, tekrarlanabilir ve dengeli kalıp sıcaklığı olmaksızın mümkün değildir [36].

Termoplastik kalıplama sisteminde ana amaç, çevrim süresini ve kalıplanan parçanın soğutulmasında ısı farklılıklarını en aza indirmektir. Kalıbın soğutulması, parça şeklinin korunumu ve kalite kontrol için gereklidir. Dengeli (uniform) soğutma, çarpılma ve yüksek kalıntı gerilmeyi önleyerek parça kalitesini artırır [3]. Bu nedenlerle, bir enjeksiyon kalıbı tasarımında, soğutma kanallarının boyutları ve yerleşimi en önemli tasarım unsurudur.

Yüksek kalıp sıcaklıkları ($>30^{\circ}\text{C}$) için ısı transfer yağı kullanmak gerekir. Yağ soğutuculu bir sistem 350°C ' ye kadar olan sıcaklıklar için uygundur. Düşük kalıp sıcaklığı ($<30^{\circ}\text{C}$) istendiği durumlarda, soğutma için kanallarda su dolaşımı yeterlidir. Sıcaklık 25°C den düşükse bir su/glikol (antifriz) karışımı gerekir [3].

5.4. Ürünün Kalıptan Alınması

Bir parça katılaştıktan ve soğutulduktan sonra, kalıp boşluğundan çıkartılması gerekir. İdeal olanı, yerçekimi ile yapılması ve parçanın yere düşmesidir. Fakat yan maçalar, yapışma veya iç gerilime gibi tasarım unsurlarına sahip bazı parçalar kalıptan elle veya robot ile çıkartılmalıdırlar [3].

Çıkartma takımları, genellikle kalıplama tezgâhının açılma mesafesi ile mekanik olarak hareket ederler. Eğer var olan çıkartma takımları yeterli gelmezse, pnömatik veya hidrolik sistemlerde kullanılabilir [3].

6. PLASTİK ENJEKSİYONLA KALIPLANMIŞ PARÇALARDA KALINTI GERİLMELER

Kalıntı gerilmeler dış kuvvetler kaldırıldığında cisim içerisinde varlığını koruyan gerilmeler olarak tanımlanır. Böyle gerilmeler cisim içerisindeki homojen olmayan gerinim alanlarının sonucudur. [44].

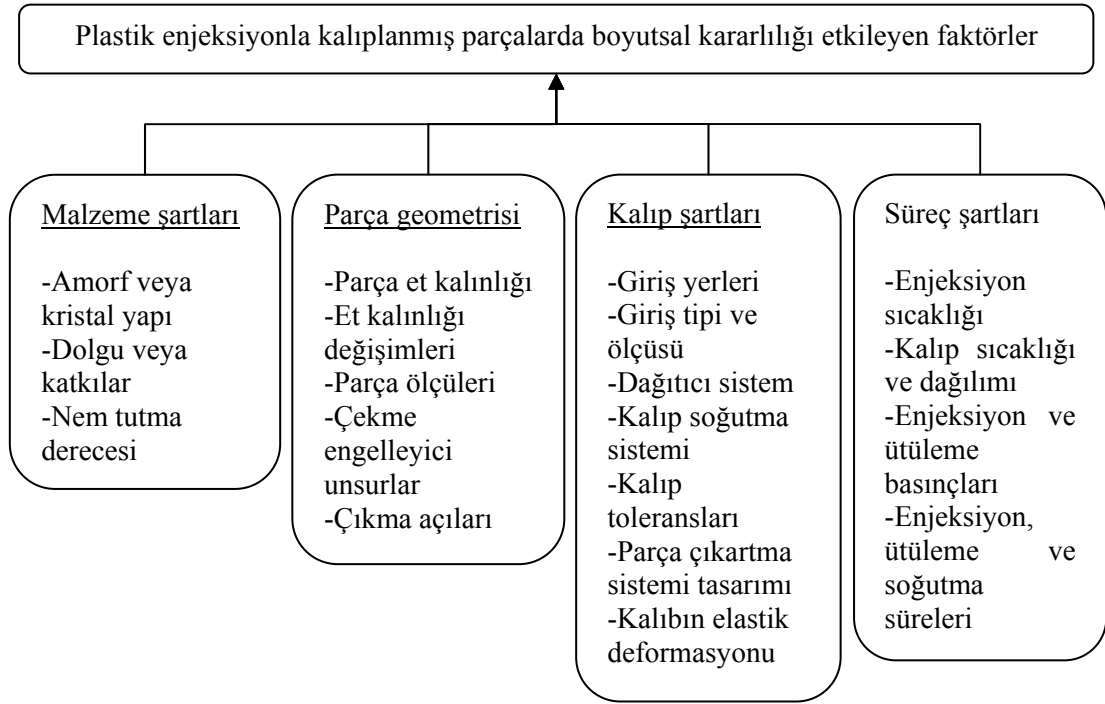
Mekanik süreçlerin tamamı kalıntı gerilmelere neden olur [7-21]. Plastik enjeksiyon kalıplamada kalıntı gerilmeler, kalıplama esnasında parçada oluşmuş ve kalıptan alınıp oda sıcaklığına kadar soğutulduğunda, hala parçada kalmış uzantılarıdır. Kalıntı gerilmelerin tespit edilebilmesi için, enjeksiyon kalıplama sürecinin tamamının bilinmesi gereklidir [40].

Enjeksiyonla kalıplama hızlı ve kaliteli ürün elde etme imkânı sağladığı halde, ürünlerde kalıntı gerilmeler, çekme ve çarpılma gibi istenmeyen özelliklere de neden olabilmektedir. Karşılaşılan bu problemler parçaların kalitesini ciddi şekilde etkiler. Özellikle kalıntı gerilmeler, uzun vadede veya yüksek sıcaklıklara maruz kaldığında parçada visko-elastik deformasyonlara neden olabilirler [9].

Bir ürünün biçim ve ölçü hatalarının belirlenebilmesi için kalıntı gerilme bilgisi gereklidir. Kalıntı gerilmeler, ürünün kullanılabilirliği, özellikle ölçüsel kararlılık, mekanik dayanım, kimyasal dayanım ve diğer özellikleri üzerinde önemli bir etmendir [7, 9].

Kalıplanmış ürünlerin son özellikleri, kalıplama şartları ve polimerik malzemenin özelliklerine göre gelişir. Enjeksiyonla kalıplanmış parçalarda sıklıkla görülen problemlerden bazıları, boyutsal düzensizlik ve dengesizliktir. Bunlar, çekme ve çarpılmaya bağlıdır ve tamamen kalıntı gerilmeler ile ilişkilidirler. Kalıntı gerilmeler ile ilişkili diğer problemler, darbe dayanımı (yüzey gerilmeleri ile ilişkilidir) ve parçanın uzun vadeli deformasyonu, gerilim rahatlamasının veya sürünmenin bir sonucudur. Bu nedenle kalıntı gerilmelerin, numunedeki dağılımı ve süreç esnasında gelişiminin bilgisi, büyük öneme sahiptir [5].

Pratikte, bir plastik parça için çarpılma ve iç gerilme seviyesi; malzemenin, parça geometrisinin, kalıbın ve süreçle ilişkili faktörlerin değişiminden etkilenecektir. Boyutsal kararlılık ile bütünleşmiş faktörlerin bazıları Şekil 6.1’de verilmiştir [4].



Şekil 6.1 Plastik enjeksiyonla kalıplanmış parçalarda boyutsal kararlılığı etkileyen faktörler

Kalıntı gerilmeyi etkileyen faktörlerdeki herhangi bir değişim, enjeksiyonla kalıplanmış plastik parçaların üniform olmayan çekme davranışını ortaya çıkarır. Enjeksiyonla kalıplanmış parçalardaki kalıntı gerilmeler, iki farklı oluşma sebebine sahiptir ve bu sebeplere göre ikiye ayrılırlar: akış gerilmeleri ve ısıl gerilmeler [4, 7].

6.1. Akış Nedenli Gerilmeler

Enjeksiyon kalıplamanın dolun aşamasında, polimer ergiyik yüksek gerinme (uzama) oranı sergiler. Bunun sonucunda parçada kayma ve uzama gerilmeleri oluşur. Uzama gerilmeleri polimer ergiyikteki, genişleme ve büzülme nedeniyle oluşur. Uzama gerilmelerinin başlıca sebebi, soğuk kalıp yüzeyiyle temas edip katılaştan “akış burnu (fountain flow)” dur. Akış gerilmelerinin temel nedeni, polimer ergiyiğin doğasındaki visko-elastiklik ve moleküler yapının ihtiyaç hissettiği geniş rahatlama süresinin sağlanmamasıdır [40].

Akış gerilmeleri sonucunda malzemedede;

1. Akıştan etkilenmiş moleküler dağılım nedeniyle, anizotropik malzeme davranışı
2. Üniform olmayan hacimsel çekme, davranışları gözlemlenir [4].

Akış gerilmelerinin doğrudan ölçülmesi zordur. Buna rağmen akış gerilmeleri, moleküler dağılım ile ilişkili olduğu için donmuş çift kırınım (in frozen birefringence) yöntemiyle dolaylı olarak ölçülebilirler [40].

6.2. Isıl Nedenli Gerilmeler

Enjeksiyonla kalıplamanın ütüleme ve soğutma safhalarında, parça kalıp boşluğunda tamamen katılaştıkça kadar hızlıca soğutulur. Polimerlerin düşük ısı geçirgenlikleri nedeniyle, parçada kalınlık boyunca geniş sıcaklık oranı ile homojen olmayan bir sıcaklık dağılımı oluşur. Soğutmanın etkisiyle, malzeme büzölmeye çalışır ve düzenli olmayan sıcaklık dağılımı nedeniyle parçada farklı çekme oranları oluşur. Parçanın bir bütün olması nedeniyle, her elemandaki deformasyon, bitişindeki diğer elemanın etkisiyle yeniden gerinir. Böylece çekme ve basma gerilmeleri oluşur. Polimerlerde elastik özellikler ve rahatlama davranışları sıcaklık ile önemli değişiklikler gösterdiği için, bu gerilmeler sürekli ve kalıntı gerilmeler olarak

adlandırılırlar. Isıl gerilmeler dolum esnasında süreç şartlarına bağlı olarak gelişirler [40].

Isıl gerilmeler parçaların;

1. Parçanın her noktasının dengeli soğutulmaması nedeniyle, ısıl nedenli asimetric çekme
2. Geometri etkileri (kesit farklılıkları) nedeniyle, farklı ısıl gerinme davranışları sergilemesine neden olur [4].

7. PLASTİK MALZEMELERDE KALINTI GERİLME ÖLÇÜMÜ

Plastiklerde kalıntı gerilme ölçümü için kullanılan yöntemler, tahribatlı, yarı tahribatlı ve tahribatsız yöntemler olarak üçe ayrılabilir.

- Tahribatsız yöntemler: fotoelastik yöntem
- Yarı tahribatlı yöntemler: delik delme tekniği
- Tahribatlı Yöntemler: kimyasal çözücü, katman kaldırma tekniğidir [9,22, 24, 25, 45, 46].

7.1. Çift Kırınım (Fotoelastik) Yöntem

Saydam bir malzeme gerilmeye maruz kaldığı zaman, malzeme içerisindeki ışığın hızı anizotropik olarak değişme eğilimi gösterecektir. Bu eğilim fotoelastik etki olarak adlandırılmaktadır. Gerilmeli saydam cisimler çapraz kutuplar arasındaki beyaz veya tek renkli ışıkta gözlemlendiği zaman, fotoelastik etki saçaklı yapıların araya girmesine neden olur. Optik gerilme katsayısı n bir kalibrasyon deneyi ile belirlendikten sonra, oluşmuş olan saçaklı yapıların yerel maksimum gerilmeyi verdiğini söylemek mümkündür [45]. Bu yöntemin uygulanabilirliği, saydam parçalarla sınırlıdır [46].

7.2. Delik Delme Tekniği

Delik delme yöntemi yarı tahribatlı bir kalıntı gerilme ölçme tekniğidir. Bu yöntemde numune üzerine kademe kademe bir delik delinir. Gerilimli malzemenin kaldırılması, bölgesel gerilim rahatlamasına ve delik çevresinde deformasyona neden olur. Gerilme dağılımı ile neden olunan deformasyon, gerinim ölçer rozetler kullanılarak ölçülür. Prosedür oldukça basittir ve metal plakalar için ASTM E837 Standart Prosedürü ile standardize edilmiştir. Üç elemanlı bir gerinim ölçer rozet, numune üzerinde kalıntı gerilmelerin saptanacağı noktaya yapıştırılır. Hassas frezeleme kılavuzu, numuneye eklenir ve matkap rozetlerin ortasına merkezlenir. Kalıntı gerilme seviyesinin saptanması için delmenin her adımında gerinme ölçülür

ve gerinme ile ana gerilimler arasındaki ilişki karşılaştırılır [9,22-25]. Delik delme yöntemi, karmaşık geometri bir parça üzerinde küçük bir alana uygulanabilir.

7.3. Kimyasal Çözücü Tekniği

Kimyasal çözücü tekniği, kalite kontrol uygulamalarında rahatlıkla kullanılan hızlı ve basit bir yöntemdir. Bu teknik, polimerin yüzeyine kimyasalların uygulanmasını ve polimerin bozunma süresinin ölçülmesini içerir. Polimer parçadaki çok yüksek kalıntı gerilmeler, çevresel gerilme çatlağı nedeniyle bozunmayı hızlandırır. Bu yöntemdeki sıkıntı, sadece çekme gerilmelerinin saptanmasıdır. Oysaki enjeksiyonla kalıplanmış plastiklerde, gerilmelerin çoğu basmadır [46].

7.4. Katman Kaldırma Tekniği

Katman kaldırma tekniği ilk olarak Treuting and Read tarafından metal plakalardaki kalıntı gerilme değerlerini saptamak için kullanılmıştır. Daha sonra Isayev bu tekniği polimer malzemelere başarıyla uygulamıştır [12]. Katman kaldırma yöntemi kalıntı gerilmelerin ölçülmesi için en yaygın kullanılan tekniklerdendir [5].

Katman kaldırma yönteminde temel prensip, malzemedeki kalıntı gerilmeler içeren ince tabakaların kaldırılması sonucunda iç gerilmelerin ve momentlerin dengelenmesine dayanmaktadır. İç gerilmelerin yeniden dengelenmesinden dolayı oluşan gerinme veya şekil değiştirmeler, kaldırılan tabakadaki gerilmelerle ilişkilendirilebilmektedir. Elastisite teorisi kullanılarak kalıntı gerilmeleri hesaplamak amacıyla bu gerilmeler ölçülür [45].

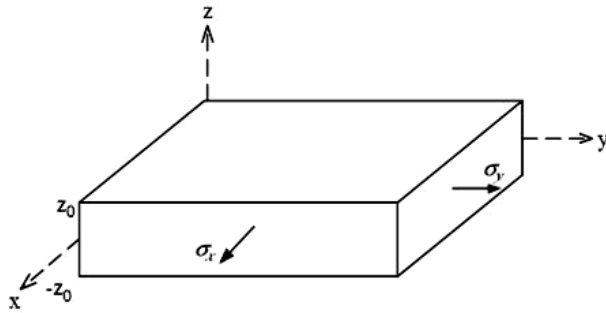
Kalıntı gerilmeleri içeren düz bir levhanın bir yüzeyinden ardı ardına tabakalar kaldırıldığı zaman gerilmeler dengesiz hale gelir ve levha eğrilir. Levhanın eğriliği kaldırılan tabakadaki orijinal gerilme dağılımına ve levhanın elastik özelliklerine bağlıdır. Numunenin eğriliği uzama teli (strain-gauge), lazer tarama, optik mikroskop ve görüntü işleme gibi teknikler kullanılarak saptanabilir [45].

Ardı ardına kaldırılan katmanlar için deformasyon şekilleri, parçanın orta düzlemine kadar ölçülür. Bu şekilde, parçanın kalınlığı boyunca, kalıntı gerilme dağılımı ölçülür. Şekil 7.1’de kalıplanmış bir parça ve koordinat sistemi görülmektedir [21].

x-yönündeki yüzey için, eşitlik;

$$\int_{-z_0}^{z_0} \sigma_x(z) dz = \int_{-z_0}^{z_0} \sigma_x(z) z dz = 0 \quad (7.1) [21]$$

Burada z_0 kalınlığın yarısıdır. *z*- eksenini kalınlık yönü olarak belirlenmiştir ve *x*- eksenini enjeksiyon esnasında akış yönüdür.



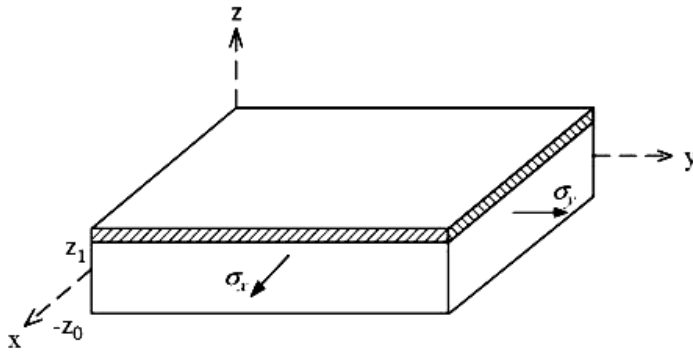
Şekil 7.1 Koordinat sistemi ve kesit üzerinde yüzey kuvvetleri [21]

Yüzeyden bir katman kaldırıldığı zaman, kesitte toplam kuvvet ve momentin dengede olmadığı Şekil 7.2’de görülmektedir. Sonuçta *x*-yönü için kuvvet ve moment eşitliği;

$$F_x(z_1) = \int_{-z_0}^{z_1} \sigma_x(z) dz \quad (7.2) [21]$$

$$M_x(z_1) = \int_{-z_0}^{z_1} \sigma_x(z) \left[z + \frac{z_0 - z_1}{2} \right] dz \quad (7.3) [21]$$

Burada z_1 parçanın gerçek orta düzleminin üzerindeki son kalınlıktır. Moment hesaplanmasında dikkate alınması gereken, yeni orta düzlem yüzeyden katmanlar kaldırıldıktan sonra $(z_0-z_1)/2$ değiştirilmiştir.



Şekil 7.2 Katman kaldırmanın gösterimi [21]

y -yönündeki net kuvvet ve momentler x yerine y yazılması değişikliği haricinde eşitlik 2 ve 3 ile aynı formdadır. Bir plakadaki bükme momenti, bükme eğriliği ile belirtilmiştir.

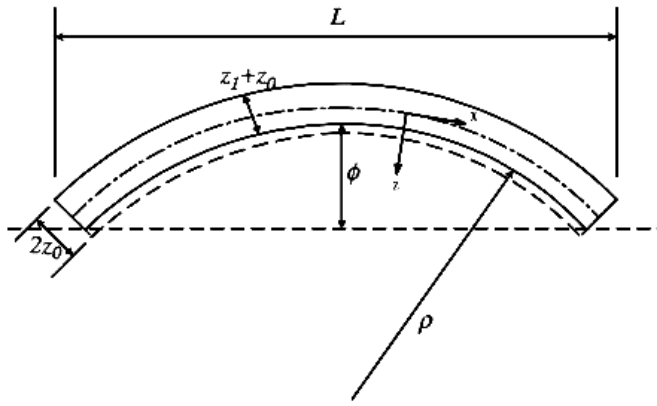
$$M_x = -\frac{E(z_0 + z_1)^3}{12(1 - \nu^2)} [\kappa_x(z_1) + \nu\kappa_y(z_1)] \quad (7.4) [21]$$

Burada κ_x ve κ_y , x - ve y -yönlerindeki eğrilikler, E Young modülü (elastiklik modülü), ν Poisson oranıdır. Eş. 7.4, Eş. 7.3'te yerine konunca x -yönündeki kalıntı gerilme türetilir.

$$\sigma_x(z_1) = -\frac{E}{6(1 - \nu^2)} \left\{ (z_0 + z_1)^2 \left[\frac{d\kappa_x(z_1)}{dz_1} + \nu \frac{d\kappa_y(z_1)}{dz_1} \right] + 4(z_0 + z_1)[\kappa_x(z_1) + \nu\kappa_y(z_1)] - 2 \int_{-z_0}^{z_0} [\kappa_x(z_1) + \nu\kappa_y(z_1)] dz \right\} \quad (7.5) [21]$$

y -yönündeki kalıntı gerilme, x yerine y yazılarak türetilir. Eş gerilimler ve eğrilikler ile bir parçanın kesiti için kalıntı gerilmenin formülü;

$$\sigma_x(z_1) = -\frac{E}{6(1-\nu)} \left\{ (z_0 + z_1)^2 \frac{d\kappa_x(z_1)}{dz_1} + 4(z_0 + z_1)\kappa_x(z_1) - 2 \int_{-z_0}^{z_0} \kappa_x(z_1) dz \right\} \quad (7.6) [21]$$



Şekil 7.3 Deforme olmuş bir çubuğun eğriliğinin saptanması [21]

Bükülme eğrisi aşağıdaki formüllerle hesaplanır:

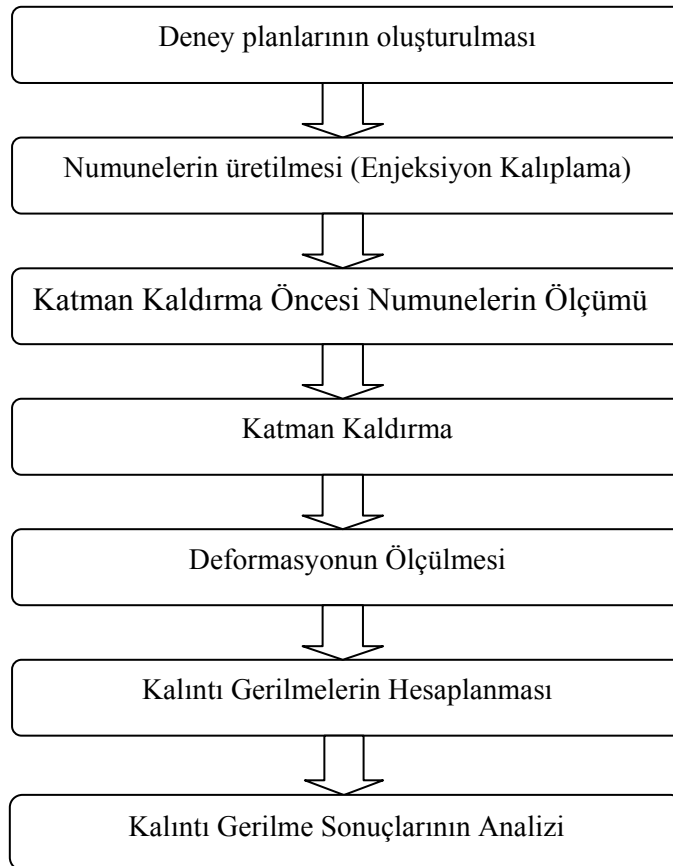
$$\kappa_x = \frac{1}{\rho} \quad (7.7) [21]$$

$$\rho = \frac{L^2 + 4\phi^2}{8\phi} \quad (7.8) [21]$$

L , bükülmüş numunenin boyu, ρ , numunedeki eğrilik yarıçapı ve ϕ katman kaldırılmış yüzeyin tepe noktasının düzleme uzaklığıdır.

8. MATERYAL VE METOT

Bu çalışmada, enjeksiyon kalıplama yöntemiyle kalıplanmış plastik parçalarda, kalıplama parametrelerinin kalıntı gerilmelere etkisi deneysel olarak araştırılmıştır. Enjeksiyon basıncı, enjeksiyon sıcaklığı, kalıp sıcaklığı, ütüleme basıncı, ütüleme süresi ve soğutma süresi deney parametreleri olarak seçilmiştir. Her parametre için üç seviye belirlenmiştir. Deney sayısının azaltılabilmesi için, Taguchi deney tasarımı uygulanmıştır. Parçalardaki kalıntı gerilmenin belirlenmesi için katman kaldırılma tekniği uygulanmıştır. Katman kaldırılma işleminden sonra parçalarda oluşan deformasyon fotoğraf tabanlı bir sistem ile ölçülmüştür. Ölçümlerden elde edilen deformasyon verileri, gerilme formülüne yazılarak, her bir katman için ayrı kalıntı gerilme değerleri hesaplanmıştır. Çalışmanın adımları aşama aşama Şekil 8.1’de verilmiştir.



Şekil 8.1 Deneysel çalışma sürecinin şematik gösterimi

8.1. Malzemeler

Bu çalışmada ticari plastiklerden polipropilen (PP), yüksek yoğunluklu polietilen (YYPE) ve polistiren (PS) kullanılmıştır. Malzemelerin teknik özellikleri ve enjeksiyon kalıplama şartları aşağıda verilmiştir. Bu malzemelerden PP ve YYPE yarı kristalin, PS ise amorf yapıdadır.

8.1.1. Polipropilen (PP)

Polipropilen olarak PETKİM PETOPLN MH 418 malzeme kullanılmıştır. Çizelge 8.1' de malzeme özellikleri verilmiştir.

Çizelge 8.1 PP malzemenin özellikleri

Özellik	Değer	Birim
Erime Akış İndeksi (EAI) (2160gr, 230°C)	4.0-6.0	g/10dak
Akma Gerilme Dayanımı	350	kg/cm ²
Kopma Gerilme Dayanımı	430	kg/cm ²
Elastiklik katsayısı (E)	1300	MPa
Poisson oranı (ν)	0,35	

8.1.2. Yüksek yoğunluklu polietilen (YYPE)

PETKİM PETİLEN YY I668 (UV) yüksek yoğunluklu polietilen (YYPE) malzeme kullanılmıştır. Malzeme özellikleri Çizelge 8.2'te verilmiştir.

Çizelge 8.2 YYPE malzeme özellikleri

Özellik	Değer	Birim
Erime Akış İndeksi (EAI) (2160gr, 190°C)	4.0-6.0	g/10dak
Yoğunluk (23°C)	0.966-0.970	g/cm ³
Akma Gerilme Dayanımı	295	kg/cm ²
Kopma Gerilme Dayanımı	240	kg/cm ²
Kopmada Uzama	1250	%
Bükülme Dayanımı	10450	Kg/cm ²
İzod Darbe Dayanımı	5	Kgcm/cm
Çev. Bas. Kır. Day. (F50)	4	saat
Elastiklik katsayısı (E)	1200	MPa
Poisson oranı (ν)	0,35	

8.1.3. Polistiren (PS)

DOW STYRON 678E polistiren (PS) malzeme kullanılmıştır. Malzeme özellikleri Çizelge 8.3’de verilmiştir.

Çizelge 8.3 PS malzeme özellikleri

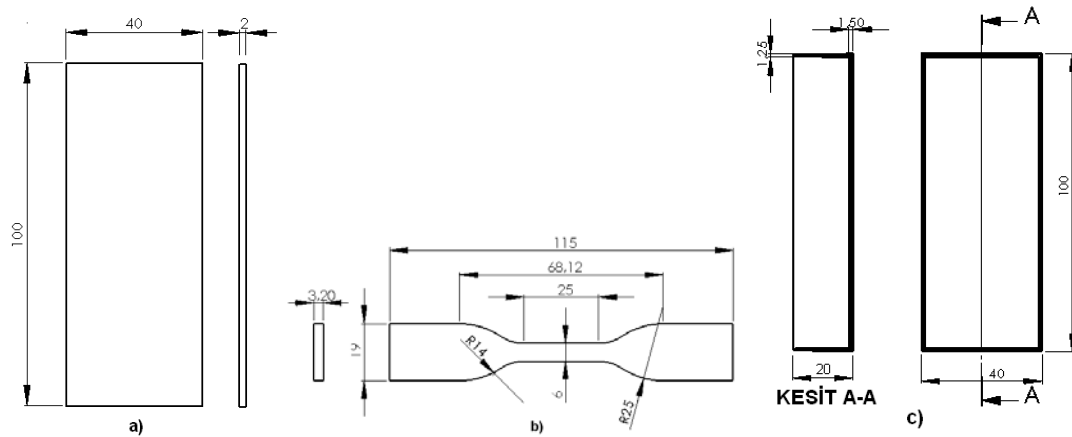
Özellik	Değer	Birim
Erime Akış İndeksi (EAI) (5kg, 200°C)	10,5	g/10dak
Yoğunluk (23°C)	1050	kg/m ³
Akma Gerilme Dayanımı	43	MPa
Kopmada Uzama	1-3	%
Bükülme Dayanımı	80	MPa
Elastiklik katsayısı (E)	3000	MPa
Poisson oranı (ν)	0,38	

8.2. Enjeksiyon Kalıplama

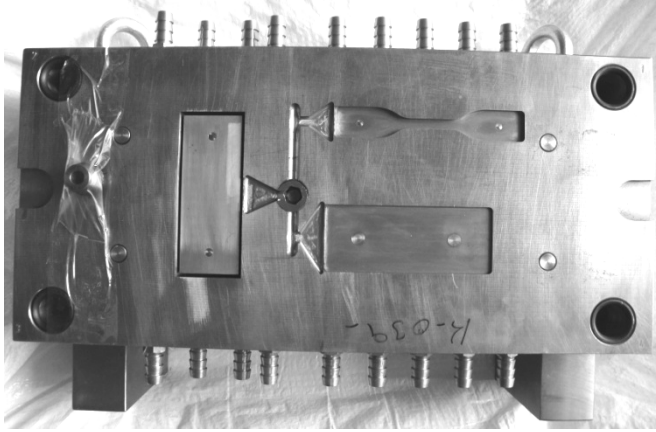
8.2.1. Plastik enjeksiyon kalıbı

Bu çalışmada, ürünlerdeki kalıntı gerilmelerin belirlenmesinde kullanılmak üzere 100 x 40 x 2 mm ebatlarında düz plastik parçaların kalıplanabileceği bir kalıp tasarlanmıştır. Ayrıca bu kalıpta, ilerdeki çalışmalarda kullanılmak üzere, enjeksiyonla kalıplanmış ürünlerde, kalıplama şartlarının kalıplanmış ürünlerdeki çarpılma davranışları ve çekme dayanımlarına etkilerinin saptanabileceği iki göz daha kalıp tasarımı eklenmiştir. Bu amaçla üç gözlü bir plastik enjeksiyon kalıbı tasarlanmış ve imal edilmiştir. Bu kalıpla;

- Kalıntı gerilme saptamaları için 100 x 40 x 2 mm ebatlarında düz plakalar (Şekil 8.2.a),
- Enjeksiyon parametrelerinin malzemelerin çekme dayanımlarını nasıl etkilediğinin saptanabilmesi için ASTM D638-08 TİP IV çekme çubuğu (Şekil 8.2.b),
- Enjeksiyon parametreleri, kalıntı gerilme ve çarpılma arasındaki ilişkinin görülebilmesi için kutu (Şekil 8.2.c) parçalar kalıplanmıştır.



Şekil 8.2 Kalıp çekirdek şekilleri (a- Dikdörtgen prizma, b- çekme çubuğu, c- Kutu)



Resim 8.1. Plastik enjeksiyon kalıbı hareketli kısmı

8.2.2. Plastik enjeksiyon presi

Kalıplama işlemleri ARBURG ALLROUNDER 220S 250-60 marka pistonlu vidalı enjeksiyon kalıplama presinde (Resim 8.1) yapılmıştır. Bu tezgâhla ilgili teknik bilgiler Çizelge 8.4’de verilmiştir. Silindir sıcaklık kontrolü ± 5 toleranslarında yapılmıştır.

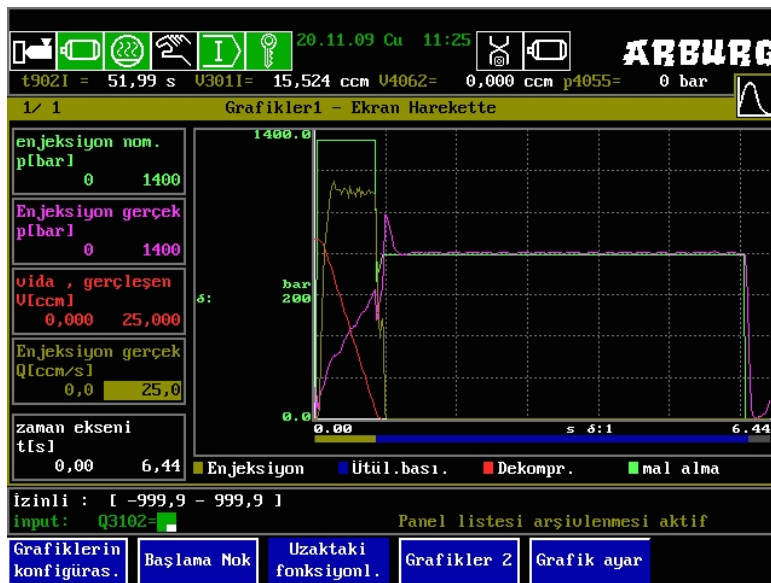
Çizelge 8.4 Plastik enjeksiyon presinin teknik özellikleri

Kilitleme kuvveti	max. kN	150/250
Kapama kuvveti	max. kN	20
Açılma mesafesi	max. mm	275
Kalıp yüksekliği	min. mm	150/200
Kalıp mengene plakaları (b x h)	mm	400x400
Taşınabilir kalıp yarımı ağırlığı	max. kg	300
İtici kuvveti	max. kN	15
İtici mesafesi	max. mm	95
Vida çapı	mm	18
Vida uzunluğu	L/D	24,5/20/17,5
Teorik enjeksiyon hacmi	max. cm ³	20
Kalıplanan parça ağırlığı	max. g/PS	17/25
Enjeksiyon basıncı	max. Bar	2500
Enjeksiyon hızı	max. cm ³ /sn	50
Geri basınç pozitif/negatif	max. Bar	350/100
Vida dönüş hızı	max. m/dk	43/53/60
Vida dönme momenti	max. Nm	147/180/205
Nozul etki mesafesi	max. mm	220
Isıtıcı bölge sayısı		3+1
Besleme hunisi kapasitesi	lt	25
Net ağırlık	kg	1900



Resim 8.2 Plastik enjeksiyon presi

Kullanılan plastik enjeksiyon kalıplama presinde; kalıp açılma kapanma hızı, kilitleme kuvveti, silindir sıcaklıkları, enjeksiyon hızı, enjeksiyon hacmi, enjeksiyon basıncı, ütüleme basıncı ve süresi, soğutma süresi, vida dönme hızı, itici itme hızı ve kuvveti kontrol edilebilen parametrelerdir. Tezgâhın grafik menüsünden alınmış olan ekran görüntülerinden bir örnek Şekil 8.3’de verilmiştir. Şekilde öngörülen enjeksiyon basıncı, gerçekleşen enjeksiyon basıncı, gerçekleşen vida hacmi ve enjeksiyon hızı grafikleri görülmektedir.



Şekil 8.3 HDPE malzeme L24 deneyi için, enjeksiyon presinden alınmış grafik ekranı

8.2.3. Kalıp şartlandırıcısı

Kalıp sıcaklık kontrolü için Tool-Temp B-0375 TT-157E (Çizelge 8.5) kalıp şartlandırıcısı kullanılmıştır. Soğutma/ısıtma için, şartlandırıcı üreticisinin önermiş olduğu ısı transfer yağı (Mobiltherm 32) kullanılmıştır.

Çizelge 8.5 Kalıp şartlandırıcısının teknik özellikleri

Sıcaklık Aralığı	Su ile +90°C / yağ ile +150°C
Sıcaklık Kontrolü	Mikroişlemeri kontrol MP – 694 C
Isıtma Gücü	Su için: 9 kW, 3/6/9kW aşamalarda sviç kontrollü yağ için: 3 kW
Pompa Kapasitesi	0,75 kW Basınç modu max. 4,0 Bar / max. 75 lt/dak Emme modu – vakum max. 8 mss
Soğutma Gücü	+90°C de yaklaşık 18000 kcal/saat
Depo Hacmi	yaklaşık 6 litre
Bağlantılar	Isıtıcı (yağ/su) R 1/2" dişi diş Soğutucu (su) R 3/8" erkek diş
Ölçüler (UxGxY)	600x230x600 mm ³
Ağırlık	Boşken 47 kg
Ses seviyesi (desibel - dB)	<70 (3m mesafe)

8.2.4. Kalıplama şartları ve deney tasarımı

Deney için belirlenmiş olan üç malzeme için, hammadde üretici firmaların önermiş olduğu alt ve üst değerler doğrultusunda 6 kalıplama şartı ve her bir faktörün 3 seviyesi belirlenmiştir (Çizelge 8.6).

Çizelge 8.6 PP, YYPE ve PS için deney şartları

	SEVİYELER								
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
FAKTÖRLER	PP			YYPE			PS		
(A) Enjeksiyon Basıncı (Bar)	800	1100	1400	600	950	1350	650	1000	1550
(B) Enjeksiyon Sıcaklığı (°C)	220	250	280	220	250	280	220	250	280
(C) Kalıp Sıcaklığı (°C)	20	45	70	30	45	60	30	45	60
(D) Ütuleme Basıncı (Bar)	500	800	1100	300	550	800	300	500	700
(E) Ütuleme Süresi (s)	3	5.1	7.2	3	5.1	7.2	3	5.1	7.2
(F) Soğutma Süresi (s)	7.0	11.5	16.5	7.0	11.5	16.5	7.0	11.5	16.5

Etkili faktörlerin saptanması için Taguchi Deney Tasarımı uygulanmıştır. Altı faktör ve her bir faktörün üç seviyesi için Taguchi deney tasarımı yöntemi ile deney düzenleri belirlenmiştir. Her malzeme için Taguchi'nin L_{27} (3^6) standart ortogonal dizisi uygulanmıştır.

Taguchi Deney Tasarımı; ürün geliştirme için kalite iyileştirme de oldukça etkili bir yöntemdir. Deney sayısını öngörülen gerçek değer altına düşüren, ortogonal diziliş denilen kesirli faktöriyel bir deney tasarımı kullanır. Taguchi analizi, SN oranı (Signal/Noise, Sinyal/Gürültü) denilen bir kıyas faktörü kullanır.

SN oranı aşağıdaki şekilde tanımlanmıştır:

$$SN \text{ oranı} = \frac{\text{istenen sonuç}}{\text{istenmeyen sonuç}}$$

SN oranları dinamik (aktif) ve statik (pasif) olarak ikiye ayrılır. Dinamik SN oranları, çoklu hedefler veya hedeflerin geçerli bir sıralaması çalışmalarında kullanılırken statik SN oranları tek hedefli çalışmalarda kullanılır. Statik tanımlamanın üç tipi vardır: *Hedef değer en iyi, küçük değer en iyi ve büyük değer en iyi* [50].

Hedef değer en iyi, Tip I; bir hedef değer ve bu değer alt ve üst limitleri olduğu zaman kullanılır. Sonuç verilerinin hedef değere eşit olması istenir. Örneğin; bir

parça üzerindeki kaplama kalınlığı, bir parçanın uzunluğu veya silindirik bir parçanın çap ölçüsü [50].

Küçük değer en iyi; sonuç verilerinin, ortalama ve değişkenliğini (varyans) azaltmak için kullanılır. İdeal sonuç verisi sıfır olarak kabul edilir. Örneğin; hava kirliliği, bir makinenin sesi, ısı kaybı ,...vb. sistem fonksiyonları [50].

Büyük değer en iyi; sonuç verilerinin ortalamasını yükseltmek, değişkenliği (varyans) azaltmak için kullanılır. Sonuç verilerinin sonsuza eşit olması istenir. Örneğin; malzemenin dayanımı, yakıt verimi vb. [50].

Bu üç tanımlamanın hiçbiri sonuç verisi olarak eksi (-) değer kabul etmez. Negatif değer içeren sonuç verileri varsa, *hedef değer en iyi, tip II* tanımlaması kullanılmalıdır [50].

Polipropilen (PP) (Çizelge 8.7), yüksek yoğunluklu polietilen (YYPE) (Çizelge 8.8) ve polistiren (PS) (Çizelge 8.9) malzemeler için Taguchi deney tasarımına göre oluşturulmuş deney planları aşığıda verilmiştir.

Çizelge 8.7 Taguchi Deney Tasarımına göre PP malzeme için deney planı

No	(A) Enjeksiyon Basıncı (Bar)	(B) Enjeksiyon Sıcaklığı (°C)	(C) Kalıp Sıcaklığı (°C)	(D) Ütüleme Basıncı (Bar)	(E) Ütüleme Süresi (sn)	(F) Soğutma Süresi (sn)
L1	800	220	20	500	3.0	7.0
L2	800	220	20	800	5.1	11.5
L3	800	220	20	1100	7.2	16.5
L4	800	255	40	500	3.0	11.5
L5	800	255	40	800	5.1	16.5
L6	800	255	40	1100	7.2	7.0
L7	800	290	60	500	3.0	16.5
L8	800	290	60	800	5.1	7.0
L9	800	290	60	1100	7.2	11.5
L10	1100	220	60	500	5.1	7.0
L11	1100	220	60	800	7.2	11.5
L12	1100	220	60	1100	3.0	16.5
L13	1100	255	20	500	5.1	11.5
L14	1100	255	20	800	7.2	16.5
L15	1100	255	20	1100	3.0	7.0
L16	1100	290	40	500	5.1	16.5
L17	1100	290	40	800	7.2	7.0
L18	1100	290	40	1100	3.0	11.5
L19	1400	220	40	500	7.2	7.0
L20	1400	220	40	800	3.0	11.5
L21	1400	220	40	1100	5.1	16.5
L22	1400	255	60	500	7.2	11.5
L23	1400	255	60	800	3.0	16.5
L24	1400	255	60	1100	5.1	7.0
L25	1400	290	20	500	7.2	16.5
L26	1400	290	20	800	3.0	7.0
L27	1400	290	20	1100	5.1	11.5

Çizelge 8.8 Taguchi Deney Tasarımına göre YYPE malzeme için deney planı

No	(A) Enjeksiyon Basıncı (Bar)	(B) Enjeksiyon Sıcaklığı (°C)	(C) Kalıp Sıcaklığı (°C)	(D) Ütüleme Basıncı (Bar)	(E) Ütüleme Süresi (sn)	(F) Soğutma Süresi (sn)
L1	600	220	30	300	3.0	7.0
L2	600	220	30	550	5.1	11.5
L3	600	220	30	800	7.2	16.5
L4	600	250	45	300	3.0	11.5
L5	600	250	45	550	5.1	16.5
L6	600	250	45	800	7.2	7.0
L7	600	280	60	300	3.0	16.5
L8	600	280	60	550	5.1	7.0
L9	600	280	60	800	7.2	11.5
L10	950	220	60	300	5.1	7.0
L11	950	220	60	550	7.2	11.5
L12	950	220	60	800	3.0	16.5
L13	950	250	30	300	5.1	11.5
L14	950	250	30	550	7.2	16.5
L15	950	250	30	800	3.0	7.0
L16	950	280	45	300	5.1	16.5
L17	950	280	45	550	7.2	7.0
L18	950	280	45	800	3.0	11.5
L19	1350	220	45	300	7.2	7.0
L20	1350	220	45	550	3.0	11.5
L21	1350	220	45	800	5.1	16.5
L22	1350	250	60	300	7.2	11.5
L23	1350	250	60	550	3.0	16.5
L24	1350	250	60	800	5.1	7.0
L25	1350	280	30	300	7.2	16.5
L26	1350	280	30	550	3.0	7.0
L27	1350	280	30	800	5.1	11.5

Çizelge 8.9 Taguchi Deney Tasarımına göre PS malzeme için deney planı

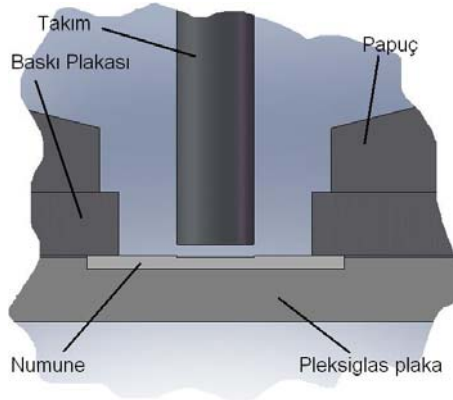
No	(A) Enjeksiyon Basıncı (Bar)	(B) Enjeksiyon Sıcaklığı (°C)	(C) Kalıp Sıcaklığı (°C)	(D) Ütüleme Basıncı (Bar)	(E) Ütüleme Süresi (sn)	(F) Soğutma Süresi (sn)
L1	650	220	30	300	3,0	7,0
L2	650	220	30	500	5,1	11,5
L3	650	220	30	700	7,2	16,5
L4	650	250	45	300	3,0	11,5
L5	650	250	45	500	5,1	16,5
L6	650	250	45	700	7,2	7,0
L7	650	280	60	300	3,0	16,5
L8	650	280	60	500	5,1	7,0
L9	650	280	60	700	7,2	11,5
L10	1000	220	60	300	5,1	7,0
L11	1000	220	60	500	7,2	11,5
L12	1000	220	60	700	3,0	16,5
L13	1000	250	30	300	5,1	11,5
L14	1000	250	30	500	7,2	16,5
L15	1000	250	30	700	3,0	7,0
L16	1000	280	45	300	5,1	16,5
L17	1000	280	45	500	7,2	7,0
L18	1000	280	45	700	3,0	11,5
L19	1550	220	45	300	7,2	7,0
L20	1550	220	45	500	3,0	11,5
L21	1550	220	45	700	5,1	16,5
L22	1550	250	60	300	7,2	11,5
L23	1550	250	60	500	3,0	16,5
L24	1550	250	60	700	5,1	7,0
L25	1550	280	30	300	7,2	16,5
L26	1550	280	30	500	3,0	7,0
L27	1550	280	30	700	5,1	11,5

Her deney planı için 5'er adet numune üretilmiştir. Toplamda, kalıntı gerilme ölçümleri için kullanılacak olan düz plakalardan, bir malzeme için $27*5=135$ adet numune üretilmiştir. Üç malzeme için toplam numune sayısı $135*3=405$ tir.

Üretilmiş olan numunelerde, kalıptan çıktıktan ve ortam sıcaklığına ($\approx 23^{\circ}\text{C}$) kadar soğuduktan sonra eğrilmeler gözlemlenmiştir. Gözlemlenen bu eğriliklerin yarıçapları, Bölüm "8.4. Eğrilik Ölçümlerinin Yapılması ve Kalıntı Gerilmelerin Hesaplanması"nda anlatılan prosedürle ölçülmüştür. Her deney düzeni için 5 ayrı numuneden alınan değerlerin, en büyük ve en küçük değerleri dışarıda bırakılarak ortalamaları hesaplanmıştır. Bu veriler, kalıplama faktörleri ve seviyelerinin numunelerin ilk eğrilik yarıçaplarına (eğilme veya çarpılma) etkisinin anlaşılması amacıyla, Taguchi Deney Tasarımı Analizinde, Minitab 14 paket programı kullanılarak çözümlenmiştir.

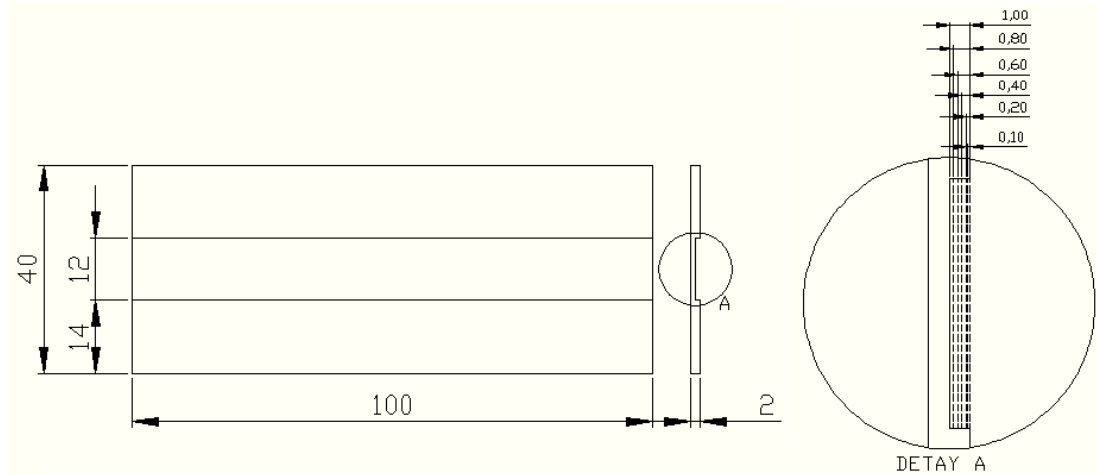
8.3. Katman Kaldırma İşlemi

Bu çalışmada, kalıntı gerilmelerin saptanması için katman kaldırma yöntemi kullanılmıştır. Katman kaldırma işlemleri için DynaMyte 2900 marka masaüstü CNC freze tezgâhı kullanılmıştır. Katman kaldırma işlemi, parçaların orta kısmından akış yönüne paralel bir kanal şekilde gerçekleştirilmiştir. Şekil 8.4'te frezeleme için tasarlanmış olan bağlama kalıbı verilmiştir. Parçalar tezgâhın tablasına sabitlenmiş 10 mm kalınlığında akrilik plaka (Pleksiglas, PMMA) üzerine 42 mm genişliğinde 1,8 mm derinliğinde kanal açılmış ve parçalar kanalın bir kenarı referans alınarak, üstten baskı plakalarıyla sabitlenmiştir.



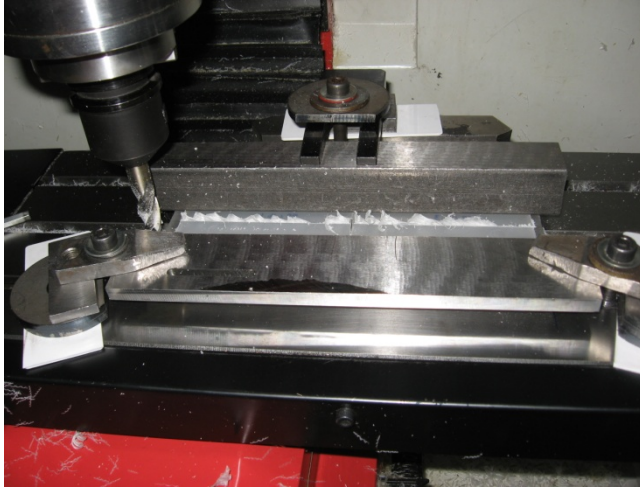
Şekil 8.4 Tasarlanmış katman kaldırma sisteminin yan görünüşü

Katmanlar, numunelerin merkezinden akış yönüne paralel 12 mm genişliğinde bir kanal şeklinde kaldırılmıştır (Şekil 8.5). Katman kaldırma işlemi parçanın merkezine kadar (parça kalınlığı 1 mm kalana kadar) yapılmıştır ve toplamda 6 katman kaldırılmıştır. İlk iki katman 0,1 mm, diğer katmanlar 0,2 mm derinliğinde kaldırılmıştır.



Şekil 8.5 Katman kaldırma işlemi taslak görünümü

Frezeleme işlemi için HSS Ø12mm 4 ağızlı parmak freze çakısı kullanılmıştır. Freze işleme parametreleri Çizelge 8.10'de verilmiştir. Resim 8.2'de katman kaldırmak için kullanılan sistem görülmektedir. Katman kaldırma işlemi her deney düzeninden üretilen beşer numuneye, 6 kez talaş kaldırılarak uygulanmıştır.



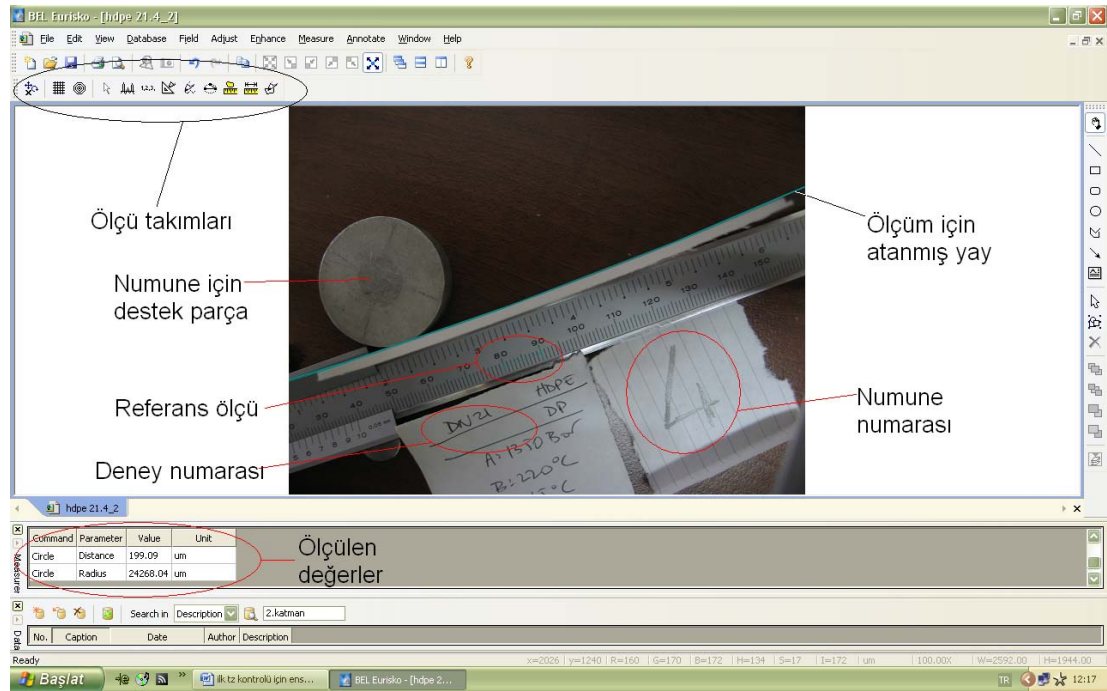
Resim 8.2 CNC freze tezgahında katman kaldırma işlemi

Çizelge 8.10 Takım ve frezeleme parametreleri

Parametre	Değer	Birim
Takım Çapı	12	mm
Kesici Ağız Sayısı	4	adet
Dönme Hızı	1000	dev/dak
İlerleme Hızı	500	mm/dak

8.4. Eğrilik Ölçümlerinin Yapılması ve Kalıntı Gerilmelerin Hesaplanması

Katman kaldırma işlemi sonucunda gerilim rahatlaması nedeniyle numunelerde deformasyon ortaya çıkmıştır. Gerçekleşen bu deformasyon, numunelerde eğrilme olarak gözlemlenmiştir. Her bir katman (talaş) kaldırma işleminden sonra parçalar kumpas (MİTUTOYO) ve silindirik bir parça yardımıyla sabitlenmiş ve CANON A550 fotoğraf makinesiyle fotoğraflanmışlardır. Çekilen bu fotoğraflar üzerinden eğrilik yarıçapı, BEL Eurisko Version 2.9. (Şekil 8.5) ticari yazılımında “üç noktadan geçen bir daire” komutu kullanılarak ölçülmüştür.



Şekil 8.5 Eğrilik ölçümü ekran görüntüsü

Yazılımdan (BEL Eurisko) alınan ölçüler EXCEL programında referans bir ölçü ile kalibre edilmiştir. Kalibrasyon için fotoğrafta kumpas üzerinden ölçü alınmış ve okunan değer, gerçek değerle oranlanmıştır. Bulunan katsayı ölçülen yarıçap değeriyle çarpılmış ve gerçek yarıçap değerine ulaşılmıştır.

Kalıntı gerilme hesaplamaları, EXCEL'de oluşturulan tablolar yardımıyla yapılmıştır. Elde edilen kalıntı gerilme değerleri Minitab 14.0 yazılımına aktarılarak, Taguchi Deney Tasarımında analiz edilmiş ve her bir faktör için, kalıntı gerilme üzerindeki etki grafikleri oluşturulmuştur. Parçanın kalınlık kesiti boyunca kalıntı gerilme değişimini gösteren grafikler Microcal Orijin 6.0'de çizilmiştir.

9. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA

9.1. Enjeksiyon Sonrası Eğrilik Ölçümleri

Enjeksiyon kalıplama ile üretilmiş olan plastik numunelerde, kalıplama işlemi sonrasında herhangi bir ek işlem uygulanmaksızın eğrilmeler gözlemlenmiştir. Katman kaldırma işleminden önce, numunelerdeki eğrilme değerleri ölçülmüş ve kalıplama şartlarının eğrilik yarıçaplarına (çarpılma) etkisi ve bu etkinin istatistiksel açıdan öneminin anlaşılması amaçlanmıştır. Bu amaçla H_0 hipotezi ve karşıt H_1 hipotezi kurulmuştur.

H_0 : $\mu_A=\mu_B=\mu_C=\mu_D=\mu_E=\mu_F$ (Kalıplama faktörlerinin etkileri arasında önemli bir fark yoktur)

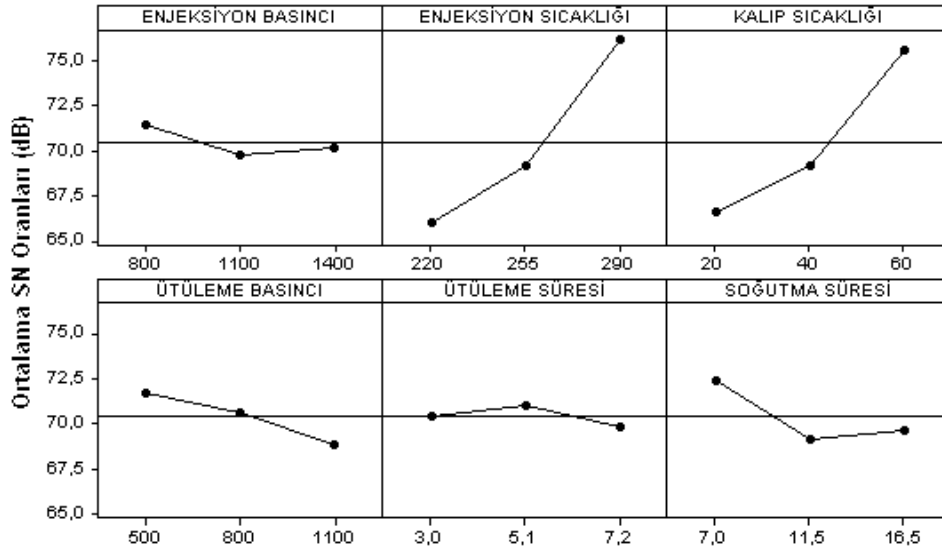
H_1 : En az bir ortalama (μ_j) diğerlerinden farklıdır.

PP, YYPE ve PS malzemelerin her biri için varyans analizi sonucunda H_0 hipotezinin kabulü veya reddine karar verilmiştir.

Çözümlenmeler, Minitab V14 ticari yazılımında, Taguchi Deney Tasarımı Analizi (statik) ile çözümlenmiştir. Eğrilik yarıçap değerinin büyük olması numunelerin daha düz olması anlamına geldiği için SN oranları *büyük değer en iyi* seçeneği ile hesaplanmıştır. Taguchi Analizi; faktörler ve seviyelerinin etkilerini ifade etmek için etki grafikleri, faktörleri etki derecelerine göre sıralamak için delta istatistiği ve faktörlerin etkileri arasındaki olası farkı saptamak için varyans analizi kullanılmaktadır. Çözümleme sonunda, SN oranları ve eğrilik yarıçapı değerlerine göre; etki grafikleri, delta istatistiği ve varyans analizi tabloları elde edilmiştir.

9.1.1. Polipropilen (PP)

SN oranlarına göre kalıplama şartlarının PP numunelerdeki eğrilme değerleri üzerindeki etki grafikleri Şekil 9.1’de verilmiştir. Grafikler incelendiğinde eğimi en fazla olan grafiklerin, enjeksiyon sıcaklığı ve kalıp sıcaklığı faktörlerine ait olduğu, böylece enjeksiyon ve kalıp sıcaklığının en etkili faktörler olduğu görülmektedir.

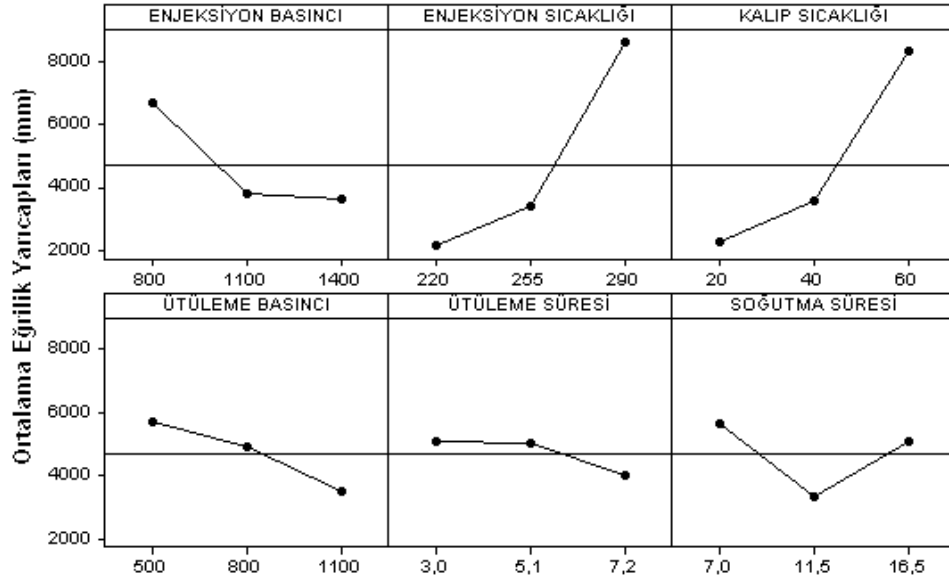


Şekil 9.1 PP için kalıplama şartlarının, SN oranlarına göre etki grafikleri

Şekil 9.2'de verilen ortalama eğrilik yarıçap (çarpılma) değerlerine göre faktörlerin etki grafikleri incelendiğinde; enjeksiyon sıcaklığının birinci, ikinci, üçüncü seviye (220, 255, 280°C) için eğrilik yarıçap değerleri sırasıyla, 2116, 3350, 8615 mm, olarak gerçekleşmiştir. Enjeksiyon sıcaklığının artırılmasıyla PP numunelerdeki çarpılma değerinin (eğriliğin) azaldığı fark edilmiştir. Huang ve ark. (2001), Gao ve Wang (2009), Ciang (2007) enjeksiyon kalıplama şartlarının ürünlerdeki çarpımlara etkisini araştırdıkları çalışmalarında, enjeksiyonla kalıplanmış PC/ABS karışımı parçalarda çarpılma değerlerinin enjeksiyon sıcaklığı ile azaldığını belirtmişlerdir [16, 51,52]. Gao ve Wang (2009), düşük sıcaklıktaki ergiyiğin iyi bir akışkan olmadığı için dolum esnasında yüksek kayma gerilmelerinin oluştuğunu ve bu gerilmelerin rahatlamak için yeterli süreyi bulamadığı durumlarda çarpılmaya neden olduğunu ifade etmişlerdir [52].

Kalıp sıcaklığı etki grafiği (Şekil 9.2) incelendiğinde eğrilik yarıçap değerlerinin; 20°C kalıp sıcaklığında 2222 mm, 40°C kalıp sıcaklığında 3541 mm, 60°C kalıp sıcaklığında 8319 mm olarak gerçekleştiği görülmektedir. Kalıp sıcaklığı artırıldıkça numunelerdeki eğrilik yarıçapı artmış, çarpılma oranı azalmıştır. Birçok çalışmada araştırmacılar, kalıp sıcaklığının plastik ürünler üzerindeki etkilerini incelemişler ve farklı sonuçlar elde etmişlerdir. Lu ve Khim (2001) polikarbonat (PC) malzemenin

üretmiş optik lensler üzerinde süreç şartlarının etkilerini araştırdıkları bir çalışmada kalıp sıcaklığının lenslerdeki yüzey formu hatalarının %34 oranında arttığını saptamışlardır. Kalıp sıcaklığının bu etkisine sebep olarak, kalıp sıcaklığına bağlı değişen çekme ve basma gerilme değerlerini göstermişlerdir [27].



Şekil 9.2 PP için kalıplama şartlarının, eğrilik yarıçaplarına göre etki grafikleri

Delta istatistiği, kalıplama faktörlerinin her bir seviyesinde gerçekleşmiş olan ortalama eğrilik yarıçap değerleri arasındaki farkın (delta) büyüklüğüne göre sıralama yapmaktadır. Çizelge 9.1'deki Taguchi Analizi sonucunda elde edilmiş olan delta istatistiği tablosunda, numunelerin eğrilmesinde etkililik derecelerine göre faktörler arasındaki sıralama; enjeksiyon sıcaklığı, kalıp sıcaklığı, enjeksiyon basıncı, soğutma süresi, ütuleme basıncı ve ütuleme süresi şeklindedir.

Çizelge 9.1. PP numuneler için eğrilik yarıçap değerlerine göre delta istatistiği tablosu

Seviye	Enjeksiyon Basıncı	Enjeksiyon Sıcaklığı	Kalıp Sıcaklığı	Ütuleme Basıncı	Ütuleme Süresi	Soğutma Süresi
1	6687	2116	2222	5692	5070	5647
2	3776	3350	3541	4924	5023	3338
3	3619	8615	8319	3466	3989	5097
Delta	3068	6500	6098	2226	1081	2309
Sıralama	3	1	2	5	6	4

%95 güven aralığı, gruplar arası serbestlik derecesi 2 ve grup içi serbestlik derecesi 26 için standart F değeri, $F_{0,05;2;26}=3,37$ 'dir (EK-1). SN oranları varyans analizi sonucu (Çizelge 9.2), F testine göre enjeksiyon sıcaklığı ($F=19,67$) ve kalıp sıcaklığı ($F=15,64$) faktörlerinin F değerleri, standart F değerinden büyük çıkmış olduğu için H_0 hipotezi reddedilmiş, H_1 hipotezi kabul edilmiştir. Enjeksiyon sıcaklığı ve kalıp sıcaklığı faktörlerinin PP numunelerdeki çarpılmaya etkileri varyans analizi sonucunda önemli bulunmuştur.

Çizelge 9.2 PP numuneler için SN oranlarının varyans analizi tablosu

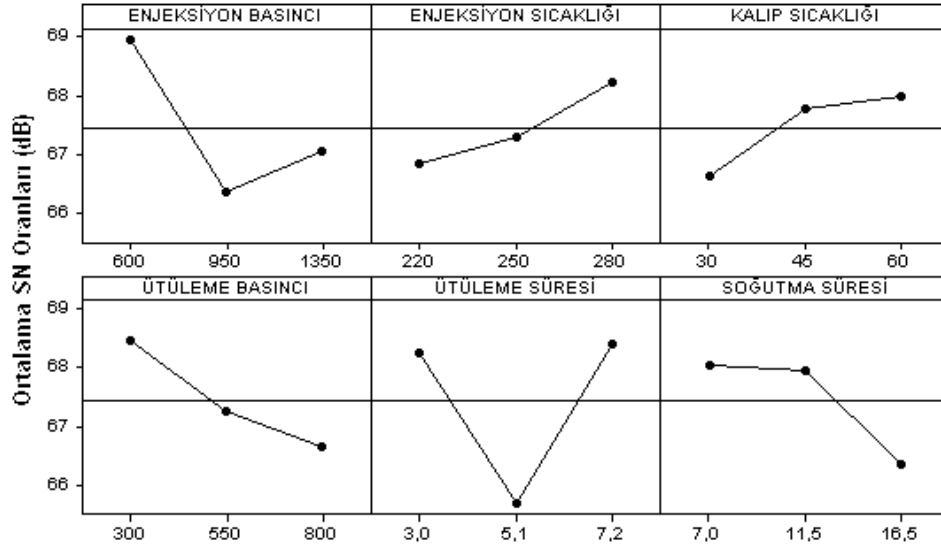
Faktörler	SD	KT	KO	F	P
Enjeksiyon Basıncı	2	13,08	6,542	0,54	0,596
Enjeksiyon Sıcaklığı	2	478,82	239,411	19,67	0,000
Kalıp Sıcaklığı	2	380,69	190,343	15,64	0,000
Ütüleme Basıncı	2	37,96	18,981	1,56	0,245
Ütüleme Süresi	2	6,19	3,094	0,25	0,779
Soğutma Süresi	2	56,30	28,152	2,31	0,136
Hata	14	170,41	12,172		
Toplam	26	1143,46			

SD: serbestlik derecesi, KT: kareler toplamı, KO: kareler ortalaması

Chen ve ark. (2009) ısıl dayanımı yüksek bir mühendislik plastiği olan Polyamid (PA9T) malzemedен enjeksiyonla kalıplanmış parçaların, çarpılma değerleri üzerinde yapmış oldukları çalışmada enjeksiyon sıcaklığı ve ütüleme basıncının etkili faktörler olduğunu, kalıp sıcaklığı ve enjeksiyon hızının etkilerinin düşük olduğunu saptamışlardır. Sayısal analiz sonuçlarının da deneysel çalışmanın sonuçlarını desteklediğini ifade etmişlerdir [53].

9.1.2. Yüksek yoğunluklu polietilen (YYPE)

SN oranlarına göre kalıplama şartlarının YYPE numunelerdeki eğrilik yarıçaplarına etki grafikleri Şekil 9.3'te verilmiştir. Grafiklere göre, eğrilik yarıçapları üzerinde etkili kalıplama faktörlerinin ütüleme süresi, enjeksiyon basıncı ve ütüleme basıncı olduğu görülmüştür.



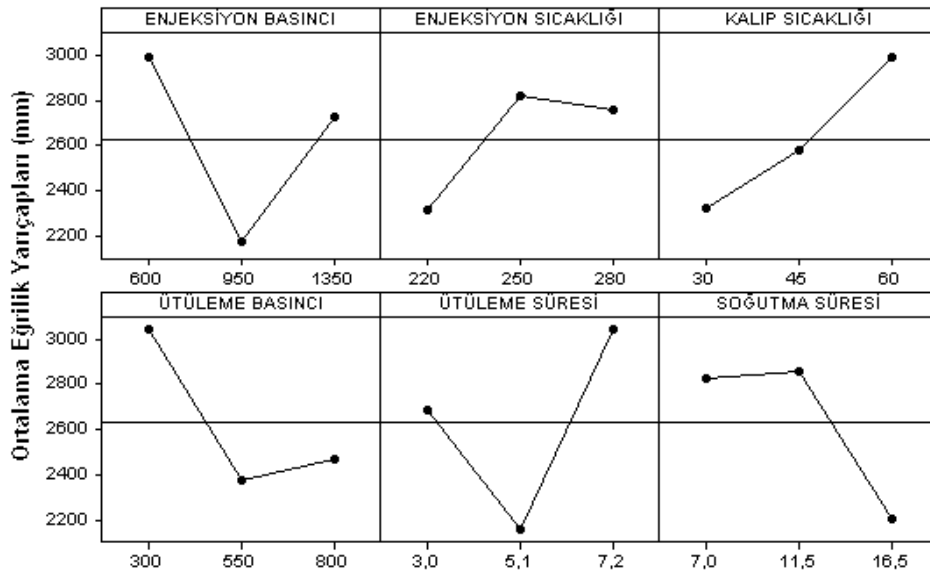
Şekil 9.3 YYPE için kalıplama şartlarının, SN oranlarına göre etki grafikleri

Şekil 9.4'teki ortalama eğrilik yarıçapı değerleri üzerinden çizilmiş etki grafiklerinde; ütuleme süresinin eğrilik yarıçaplarına etkisi üç seviye için de farklı yönlerde gerçekleşmiştir. Ortalama eğrilik yarıçap değerleri, birinci seviye (3 s) için 2687 mm, ikinci seviye (5,1 s) için 2154 mm gerçekleşmiştir. Yani ütuleme süresinin ikinci seviyeye yükseltilmesiyle numunelerde gözlemlenen eğrilme davranışı (çarpılma) artmıştır. Ütuleme süresinin üçüncü seviyesinde (7,2 s) ortalama eğrilik yarıçap değeri tekrar artmış (3045 mm) ve parçalar birinci ve ikinci seviyeye oranla daha düz hale gelmiştir.

Enjeksiyon basıncının etki grafiği (Şekil 9.4) incelendiğinde, en yüksek eğrilik yarıçap değeri 2991 mm olarak, düşük enjeksiyon basıncında (600 Bar) gerçekleşmiştir. Ütuleme basıncı etki grafiğine benzer olarak, orta seviye enjeksiyon basıncında (950 Bar) eğrilik yarıçap değeri azalmış (2169 mm), yüksek enjeksiyon basıncında (1350 Bar) tekrar artış göstermiştir (2725 mm). Grafiğe göre numunelerin daha düz üretilmesi için enjeksiyon basınç değeri düşük seviyelerde kalmalıdır.

Ütuleme basıncı etki grafiği incelendiğinde, 300, 550, 800 Bar seviyeleri için ortalama eğrilik yarıçap değerlerinin sırasıyla, 3048, 2371, 2467 mm gerçekleştiği görülmektedir. Düşük ütuleme basıncında numunelerdeki eğrilme oranı daha az

gerçekleşmiştir. Zhilt'sova ve ark. (2009) YYPE numunelerin ölçüsel kararlılığı üzerinde en etkili kalıplama şartının ütüleme basıncı olduğunu ve ütüleme basıncının artışı ile ölçüsel kararlılığın arttığını ifade etmişlerdir [54]. Burada ölçüsel kararlılıktan kastedilen, hacimsel çekmenin etkisi ile parçanın ölçü hatalarına sahip olmasıdır. Ütüleme basıncı ürünlerdeki çekmeyi azaltırken, çarpılmayı artırıcı etki göstermesi muhtemeldir. Nitekim Gao ve Wang (2009) çalışmalarında, yüksek ütüleme basıncının daha fazla gerilmeye dolayısıyla daha fazla çarpılmaya neden olacağını ifade etmişlerdir [52].



Şekil 9.4 YYPE için kalıplama şartlarının, eğrilik yarıçaplarına göre etki grafikleri

Kabanemi ve arkadaşları (1998) YYPE malzeme ile enjeksiyonla kalıplanmış kutu parçaların çarpılma değerlerinin en fazla, enjeksiyon sıcaklığı ve soğutma süresinden etkilendiğini bulmuşlar ve çarpılmanın enjeksiyon sıcaklığı ile doğru, soğutma süresi ile ters orantılı olduğunu belirtmişlerdir [10]. Bu çalışmada enjeksiyon sıcaklığı ve soğutma süresinin YYPE numunelerin eğrilik değerlerine (çarpılma) en az etkili süreç faktörleri olduğu bulunmuştur. Farklılığın sebebi olarak parça geometrilerinin ayrı olması düşünülmüştür.

Delta istatistiği sonuçlarına (Çizelge 9.3) göre kalıplama faktörlerinin YYPE ile kalıplanmış numunelerin eğrilik değerleri üzerinde sıralamaları, ütüleme süresi,

enjeksiyon basıncı, ütüleme basıncı, kalıp sıcaklığı, soğutma süresi ve enjeksiyon sıcaklığı olarak gerçekleşmiştir.

Çizelge 9.3 YYPE için eğrilik yarıçap değerlerine göre delta istatistiği etki tablosu

Seviye	Enjeksiyon Basıncı	Enjeksiyon Sıcaklığı	Kalıp Sıcaklığı	Ütüleme Basıncı	Ütüleme Süresi	Soğutma Süresi
1	2991	2309	2315	3048	2687	2823
2	2169	2822	2580	2371	2154	2860
3	2725	2755	2991	2467	3045	2202
Delta	822	513	676	676	892	658
Sıralama	2	6	4	3	1	5

Çizelge 9.4'de verilmiş olan varyans analizi sonuçları F testine göre incelendiğinde H_0 hipotezi kabul edilmiştir. Kalıplama faktörlerinden hiçbirinin YYPE ile kalıplanmış numunelerdeki eğrilik yarıçap değerleri üzerindeki etkisi, standart F değerine ($F_{0,05;2;26}=3,37$) göre anlamlı değildir.

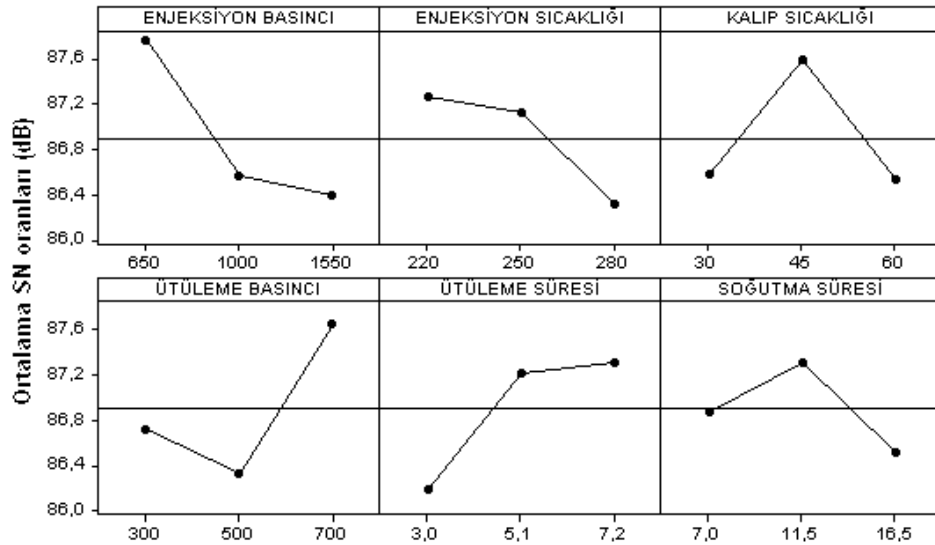
Çizelge 9.4 YYPE numuneler için SN oranları varyans analizi tablosu

Faktörler	SD	KT	KO	F	P
Enjeksiyon Basıncı	2	32,394	16,197	0,70	0,511
Enjeksiyon Sıcaklığı	2	8,675	4,338	0,19	0,830
Kalıp Sıcaklığı	2	9,626	4,813	0,21	0,814
Ütüleme Basıncı	2	15,184	7,592	0,33	0,724
Ütüleme Süresi	2	41,236	20,618	0,90	0,430
Soğutma Süresi	2	16,036	8,018	0,35	0,712
Hata	14	322,038	23,003		
Toplam	26	445,190			

SD: serbestlik derecesi, KT: kareler toplamı, KO: kareler ortalaması

9.1.3. Polistiren (PS)

SN oranlarına göre kalıplama faktörlerinin etki grafikleri Şekil 9.5'te verilmiştir. Bu grafiklerde kalıplama faktörlerinin eğrilik yarıçap değerleri üzerinde etkili olduğu görülmektedir. Özellikle ütüleme basıncı ve enjeksiyon basıncı etkili faktörler çıkmıştır. Soğutma süresi, enjeksiyon ve kalıp sıcaklıklarının etkisi daha düşük kalmıştır.



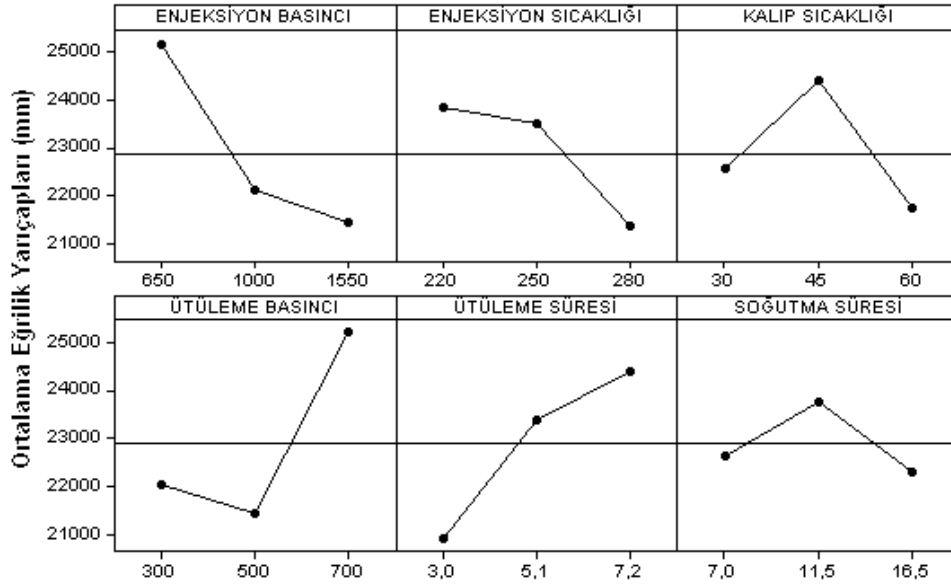
Şekil 9.5 PS için kalıplama şartlarının, SN oranlarına göre etki grafikleri

Şekil 9.6'da verilmiş olan, ortalama eğrilik yarıçap değerlerine göre etki grafikleri incelendiğinde, yüksek ütüleme basıncında (700 Bar) numunelerin eğrilik yarıçap değerinin 25201 mm, orta düzey ütüleme basıncında (500 Bar) numunelerin eğrilik yarıçap ortalama değerinin 22036 mm olduğu görülmektedir. Düşük (300 Bar) ütüleme basıncında eğrilik yarıçapı ortalama değeri 22036 mm gerçekleşmiştir. Gao ve Wang (2009) PC/ABS karışımı malzemenin (amorf) enjeksiyonla kalıplanmasında yüksek ütüleme basıncının parça girişi ve girişe yakın bölgelerde basınç farkına neden olarak kalıntı çarpılmayı artırdığını ifade etmişlerdir. Huang ve Tai (2001) de benzer bir çalışmada, ütüleme basıncının artırılması ile çarpılmanın arttığını saptamışlardır [16, 52]. Bu çalışmada ütüleme basıncının orta seviyeye yükseltilmesi ile çarpılma artmış fakat yüksek ütüleme basıncında numunelerdeki çarpılma azalmıştır. Malzemenin ve parça geometrilerinin farklı olmasının bu sonucu ortaya çıkarttığı düşünülmüştür.

Enjeksiyon basıncı etki grafiğine bakıldığında (Şekil 9.6) ütüleme basıncı etki grafiğinde gerçekleşen etkinin tam tersi görülmektedir. Düşük enjeksiyon basıncında (650 Bar) eğrilik yarıçap değeri 25127 mm, yüksek enjeksiyon basıncında (1150 Bar)

ise 21427 mm olarak gerçekleşmiştir. Enjeksiyon basıncının artırılmasıyla numunelerdeki gözlemlenen çarpılma artmıştır.

Ütüleme süresine göre maksimum eğrilik yarıçapı 24404 mm (7,2 s' de), minimum eğrilik yarıçapı 20907 mm (3,0 s' de) olarak gerçekleşmiştir. Ütüleme süresinin artırılması ile numunelerdeki eğrilme (çarpılma) azalmıştır. Huang ve Tai (2001) orta seviye ütüleme süresinde çarpılmanın düştüğünü, yüksek ütüleme süresinde maksimum değeri aldığını tespit etmişlerdir. Ütüleme süresinin etkisi için benzer sonuçları Gao ve Wang (2009)'da rapor etmiştir [16, 52].



Şekil 9.6 PS için kalıplama şartlarının, eğrilik yarıçap değerlerine göre etki grafikleri

Delta istatistiği sonuçlarında (Çizelge 9.5) kalıplama faktörlerinin eğrilik yarıçaplarına etki sıralaması; ütüleme basıncı, enjeksiyon basıncı, ütüleme süresi, kalıp sıcaklığı, enjeksiyon sıcaklığı ve soğutma süresi şeklinde çıkmıştır. Fakat Çizelge 9.6' deki varyans analizi sonucu F testi değerlendirmesine göre PS numuneler için H_0 hipotezi kabul edilmiştir. Faktörlerden hiçbirinin etkisi $F_{0,05;2,26}=3,37$ değerine göre anlamlı bulunmamıştır.

Çizelge 9.5 PS numuneler için ortalama eğrilik yarıçap değerlerine göre delta istatistiği tablosu

Seviye	Enjeksiyon Basıncı	Enjeksiyon Sıcaklığı	Kalıp Sıcaklığı	Ütüleme Basıncı	Ütüleme Süresi	Soğutma Süresi
1	25127	23822	22556	22036	20907	22649
2	22122	23487	24385	21436	23366	23738
3	21427	21367	21736	25201	24404	22290
Delta	3699	2455	2648	3762	3496	1448
Sıralama	2	5	4	1	3	6

Çizelge 9.6 PS numuneler için SN oranlarının varyans analizi tablosu

Faktörler	SD	KT	KO	F	P
Enjeksiyon Basıncı	2	9,967	4,984	0,72	0,503
Enjeksiyon Sıcaklığı	2	4,752	2,376	0,34	0,715
Kalıp Sıcaklığı	2	6,500	3,250	0,47	0,634
Ütüleme Basıncı	2	8,380	4,190	0,61	0,559
Ütüleme Süresi	2	7,038	3,519	0,51	0,612
Soğutma Süresi	2	2,826	1,413	0,20	0,817
Hata	14	96,967	6,907		
Toplam	26	136,161			
SD: serbestlik derecesi, KT: kareler toplamı, KO: kareler ortalaması					

Chiang (2007), kalıp sıcaklığı, soğutma süresi, ütüleme süresi ve enjeksiyon sıcaklığını şartlarının, PC/ABS ile kalıplanmış cep telefonu kapağı üzerindeki etkilerini, numunelerdeki hataları azaltan, kaliteyi artıran ve üretim maliyetlerini düşüren, özellikler olarak açıklamış ve özellikle ölçülen çekme, çarpılma değerlerini azaltan en etkili faktörün, kalıp sıcaklığı olduğunu belirtmiştir [51].

Kalıplama şartlarının, kullanılan malzemelerdeki (PP, YYPE, PS) çarpılma davranışlarına etkileri bir arada incelenecek olursa (Çizelge 9.7);

- Kalıplama sonucunda eğrilme (çarpılma) oranı büyüklüğüne göre malzemelerin sıralanması; YYPE, PP ve PS şeklindedir. PS parça geometrisini ve ölçüsel kararlılığını en fazla koruyan malzeme olmuştur.

Çizelge 9.7 PP, YYPE ve PS numunelerin kalıplama şartlarına göre ortalama eğrilik yarıçapları

Seviye	Enjeksiyon Basıncı	Enjeksiyon Sıcaklığı	Kalıp Sıcaklığı	Ütüleme Basıncı	Ütüleme Süresi	Soğutma Süresi
PP						
1	6687	2116	2222	5692	5070	5647
2	3776	3350	3541	4924	5023	3338
3	3619	8615	8319	3466	3989	5097
YYPE						
1	2991	2309	2315	3048	2687	2823
2	2169	2822	2580	2371	2154	2860
3	2725	2755	2991	2467	3045	2202
PS						
1	25127	23822	22556	22036	20907	22649
2	22122	23487	24385	21436	23366	23738
3	21427	21367	21736	25201	24404	22290

- PP malzeme üzerinde sıcaklığın etkisi basıncın ve zamanın etkisine oranla daha yüksek çıkmıştır.
- YYPE malzeme basınç ve süre değişimlerinden, sıcaklık değişimlerine oranla daha fazla etkilenmiştir.
- PS malzeme üzerinde basıncın etkisi sıcaklık ve sürelerin etkisine göre daha fazladır.

Eğrilik ölçümleri ve analizler sonucunda elde edilen bilgiler bir tablo haline getirilmiş ve Çizelge 9.8 sunulmuştur.

- ✓ Enjeksiyon basıncının artırılması, PP, YYPE ve PS numunelerdeki eğrilme değerlerini artırmıştır.
- ✓ Enjeksiyon sıcaklığının artırılması, PP ve YYPE numunelerdeki çarpılmayı azaltırken, PS numunelerin daha fazla çarpılmasına neden olmuştur.

- ✓ Kalıp sıcaklığının artırılması ile PP ve YYPE numunelerdeki çarpılma azalmış, PS numunelerde orta seviye kalıp sıcaklığı eğilmeyi azaltırken, düşük ve yüksek seviye kalıp sıcaklıkları çarpılmayı artırmıştır.
- ✓ Ütüleme basıncının artışı; PP ve YYPE numunelerdeki eğilmeyi artırmış, PS numunelerde zıt bir etki yaparak eğilme oranını azaltmıştır.
- ✓ Ütüleme süresinin artırılması; PP numunelerde eğilmeyi artırmış, YYPE numunelerde orta seviye ütüleme basıncı eğilmeyi arttırırken, yüksek seviye ütüleme basıncı eğilmeyi azaltmıştır. PS numunelerde ütüleme basıncının artırılması ile eğilme oranlarının azaldığı görülmüştür.
- ✓ PP numuneler üzerinde düşük ve yüksek soğutma sürelerinin etkisi değişmemiş fakat orta seviye soğutma süresi eğilmeyi artırmıştır. PS malzemedeki soğutma süresinin etkisi buna zıt olarak, orta seviye soğutma süresi kullanıldığında daha düz numuneler elde edilmiştir.
- ✓ Soğutma süresinin arttırılması YYPE numunelerdeki eğilmeyi arttırmıştır.

Kalıplama parametrelerinin PP ve YYPE numuneleri üzerinde benzer sonuçlar oluşturduğu görülmektedir. Özellikle amorf yapıdaki PS malzemedeki üretilmiş numunelerdeki eğilme değerleri üzerinde kalıplama şartlarının etkileri incelendiğinde, her iki malzemenin de (PP, YYPE) yarı kristal yapıda olmasının bu sonuç üzerinde etkili olduğu ifade edilmelidir.

Çizelge 9.8 Kalıplama şartlarının enjeksiyonla kalıplanmış PP, YYPE ve PS numunelerdeki eğilmeye etkileri

		Enjeksiyon basıncı ↑	Enjeksiyon sıcaklığı ↑	Kalıp sıcaklığı ↑	Ütuleme basıncı ↑	Ütuleme süresi ↑	Soğutma süresi ↑
Eğilme Davranışı (Çarpılma)	PP	↑ Orta ve yüksek seviye etkileri yakın	↓	↓	↑	Etkisiz	Orta seviyede artmış, düşük ve yüksek değerler birbirine yakın etki yapmış.
	YYPE	↑ Orta seviyede artmış, yüksek seviyede azalmış	↓ Orta ve yüksek seviyede değişim az ve artırmış	↓	↑ orta ve yüksek seviye etkileri yakın	Orta seviyede artmış, yüksek seviyede azalmış.	↑ Düşük ve orta seviye etkileri yakın
	PS	↑	↑	Düşük ve yüksek seviyelerde artmış, orta seviyede azalmış	↓	↓	Orta seviyede azalmış, düşük ve yüksek değerler birbirine yakın etki yapmış.
↑ artmış, ↓ azalmış							

9.2. Kalıntı Gerilme Değerleri

Numunelerin sahip olduğu kalıntı gerilme değerleri bütün malzeme (PP, YYPE, PS) ve deney düzenleri için parça kalınlık kesiti boyunca katman katman hesaplanmıştır. Her bir katman için edilen kalıntı gerilme değerleri birleştirilerek parçaların 1 mm derinliğine kadar sahip oldukları kalıntı gerilme grafikleri çizilmiştir. Ayrıca her bir katmandaki kalıntı gerilme değerleri üzerinde etkili olan kalıplama faktörleri ve seviyeleri, Taguchi Deney Tasarımı Analizi, “*hedef değer en iyi*” kabulü ile bulunmuş ve kalıntı gerilme değerlerine göre kalıplama faktörleri etki grafikerli elde edilmiştir. Faktörlerin etkilerinin istatistiksel açıdan anlamlılığını test etmek için varyans analizi uygulanmıştır. Kalıntı gerilme için;

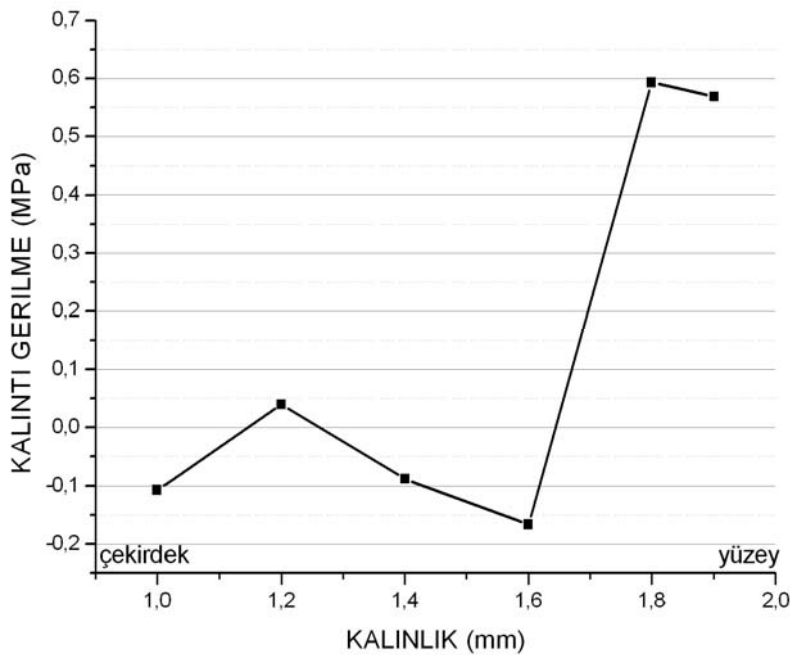
$H_0: \mu_A = \mu_B = \mu_C = \mu_D = \mu_E = \mu_F$ (Kalıplama faktörlerinin etkileri arasında önemli bir fark yoktur)

H_1 : En az bir ortalama (μ_j) diğerlerinden farklıdır.

PP, YYPE ve PS malzemelerin her biri için varyans analizi sonucunda H_0 hipotezinin kabulü veya reddine karar verilmiştir.

9.2.1. Polipropilen (PP)

Katman kaldırma yöntemiyle elde edilmiş olan kalıntı gerilme değerlerinden, PP numunelerin kalınlık kesiti boyunca sahip olduğu kalıntı gerilme dağılımı ortalama (27 numunenin kalıntı gerilme grafiklerinin) grafiği Şekil 9.7' de verilmiştir. Kalıntı gerilme kalınlık boyunca, çekme-basma-çekme-basma bölgeleri şeklinde dağılmıştır ve kalıntı gerilme değerleri 0,57 MPa ile -0,17 MPa aralığında değişmiştir. Maksimum çekme gerilmesi yüzeye yakın bölgede (1,8 mm), maksimum basma gerilmesi de ara yüzey ile merkez arasında (1,6 mm) gerçekleşmiştir. Kwok (1996) enjeksiyonla kalıplanmış PP numuneler üzerinde yapmış olduğu çalışmada kalıntı gerilmelerin yüzeyde çekme, iç bölgede basma gerilmesi olduğunu ve 1,9 MPa ile -3,8 MPa aralığında değer aldığını bulmuştur [20]. Bu veriler bizim bulmuş olduğumuz verilerden çok farklıdır.

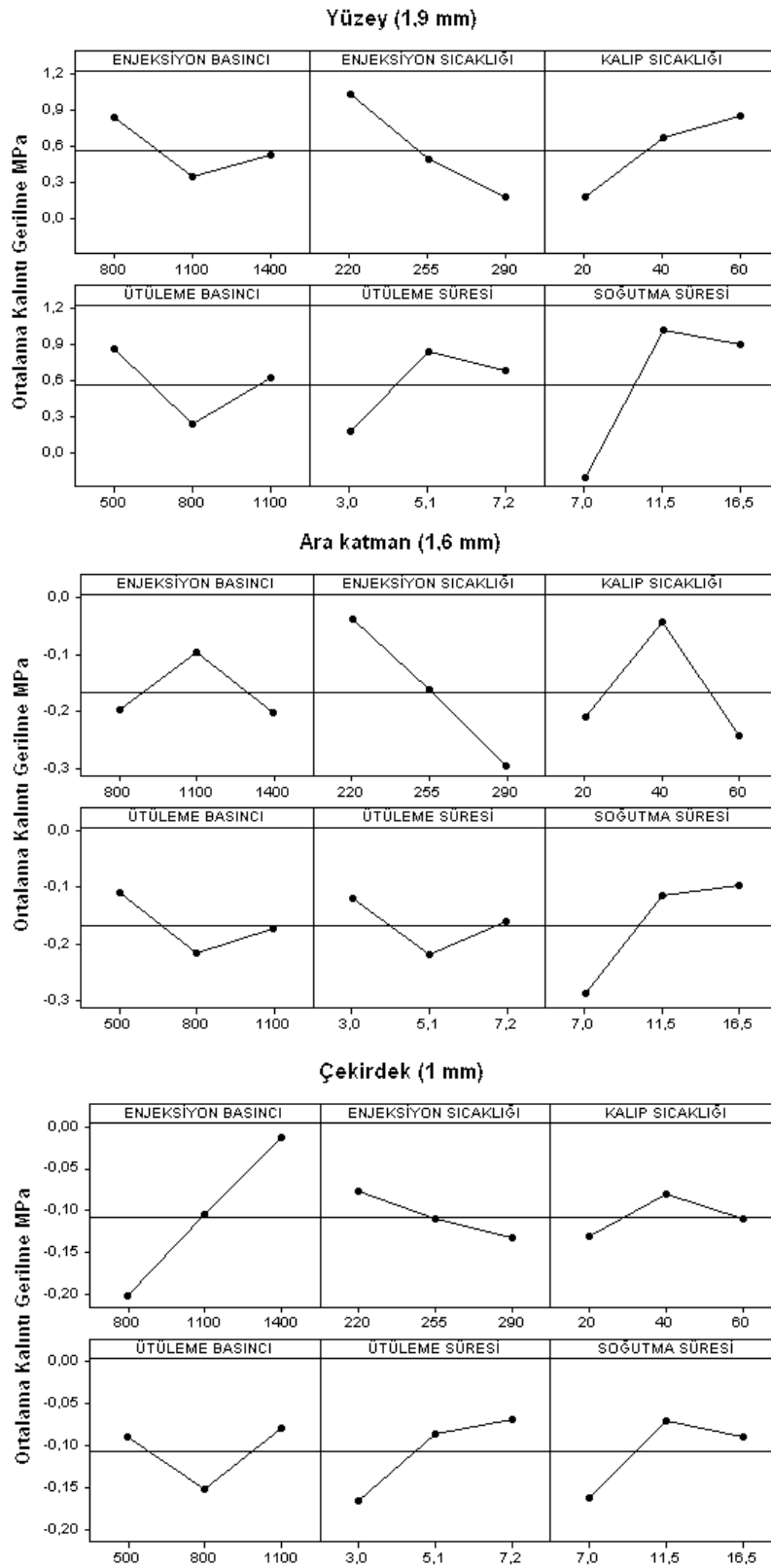


Şekil 9.7 PP numunelerin ortalama kalıntı gerilme profili

Kwok ve ark. (1996) çalışmalarında, enjeksiyonla kalıplanmış PP numunelerde kalıntı gerilme dağılımının kalınlık kesiti boyunca çekme-basma bölgeleri olarak gerçekleştiğini ve 1,9 ile -3,8 MPa aralığında değerler almış olduğunu bulmuşlardır [20]. Hindle ve ark. (1992) da PP parçalarda kalıntı gerilme dağılımının basma-

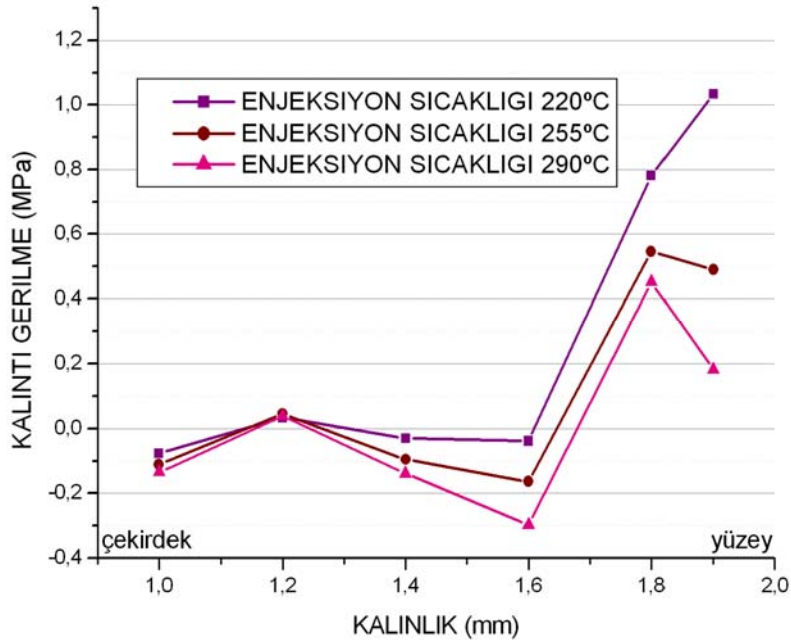
çekme gerilmesi şeklinde dağıldığını bulmuşlar ve yüzeydeki basma gerilmesinin parçayı çatlak oluşumuna karşı koruduğunu ifade etmişlerdir [55]. Kalıntı gerilme dağılımı ve değerleri bu çalışmadaki bulgulardan çok farklıdır. Bunun sebebi malzeme özelliklerindeki ve süreç şartlarındaki farklılıklar olarak görülmüştür.

PP ile kalıplanmış numunelerde kalıplama faktörlerinin ve şartlarının; yüzey, çekirdek ve ara katmanlardaki (1,2 mm ve 1,6 mm) kalıntı gerilmelere etkileri Taguchi Yöntemi ile analiz edilmiştir. Şekil 9.8'deki grafiklere göre yüzeydeki kalıntı gerilmeler üzerinde en etkili faktörler soğutma süresi, enjeksiyon sıcaklığı ve kalıp sıcaklığıdır. Ara katmandaki kalıntı gerilmeler üzerinde en etkili faktörler enjeksiyon sıcaklığı, kalıp sıcaklığı ve soğutma süresi çıkmıştır. Enjeksiyon basıncının, çekirdekteki kalıntı gerilmeler üzerinde en etkili faktör olduğu belirlenmiştir.



Şekil 9.8 PP numunelerde kalıplama faktörlerinin; yüzey, ara katman ve çekirdekteki kalıntı gerilmelere etki grafikleri

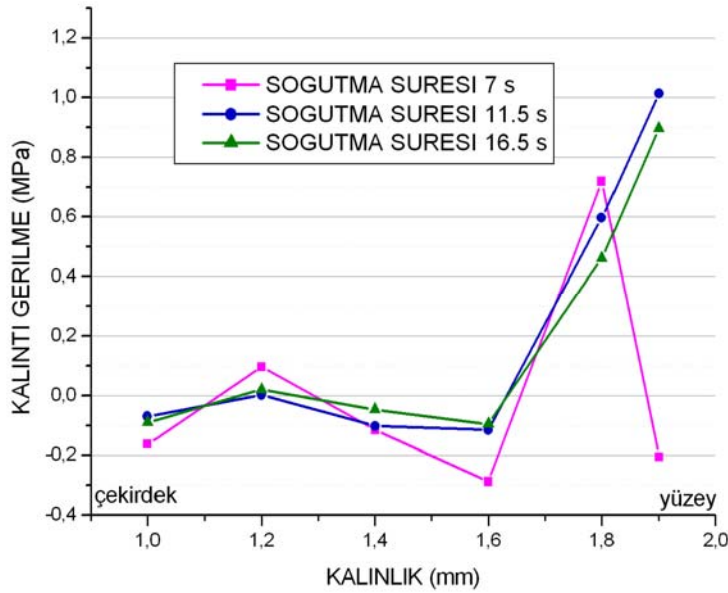
Şekil 9.9’ da üç farklı enjeksiyon sıcaklığı seviyesine göre kalıntı gerilme değişimleri verilmiştir. Grafikte üç enjeksiyon sıcaklığı seviyesi için de kalıntı gerilme profilleri yüzeyde (1,9 mm) çekme, merkezde (1 mm) basma, ara katmanlarda ise (1,6 - 1,4 mm) basma, (1,2 mm) çekme olarak gerçekleşmiştir. Düşük enjeksiyon sıcaklığında (220°C) numunelerin yüzeyindeki çekme gerilmesinin arttığı, enjeksiyon sıcaklığının artırılmasıyla yüzeydeki çekme gerilmesinin değerinin düştüğü bulunmuştur. Yüksek enjeksiyon sıcaklığı (290°C) ile parçanın ara katmanlarındaki basma gerilmesinin değerinin arttığına dikkat edilmelidir. Parçaların yüzeylerindeki çekme gerilmeleri, gerilme çatlaklarına neden olduğu için yüzeydeki çekme gerilmesini azaltma yönünde etki eden yüksek enjeksiyon sıcaklığının, ürün dayanımı açısından daha yararlı olduğu belirtilmelidir.



Şekil 9.9 PP numunelerde enjeksiyon sıcaklığının kalıntı gerilme dağılımına etkisi

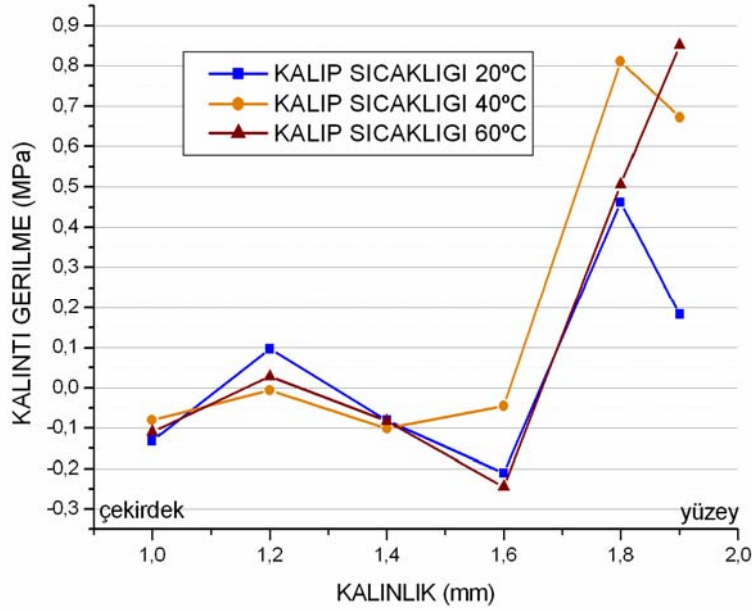
İkinci etkili faktör bulunan soğutma süresinin üç seviyesi için kalıntı gerilme profilleri Şekil 9.10’ da verilmiştir. Kısa soğutma süresi (7 s) numunelerin yüzeyinde basma gerilmesi (-0,2 MPa) oluşturmuştur, soğutma süresi artırıldığında yüzeyde çekme gerilmesi (0,85 MPa, 1 MPa) oluşumu artmıştır. Yüzeydeki kalıntı gerilme değişimi haricinde soğutma süresinin üç seviyesi için parça kesiti boyunca kalıntı gerilme dağılımı ara katmanlarda (1,6 – 1,4 mm) basma, 1,2 mm’ de çekme ve

merkezde tekrar basma olmak üzere paralel devam etmiştir. Numunelerin yüzeyindeki basma gerilmeleri, numunenin dayanımı artırması ve gerilme çatlakları oluşumunu engellemesi açısından istenen bir durum olduğu için soğutma süresinin düşük tutulması parça dayanımı açısından daha iyi sonuçlar verecektir.



Şekil 9.10 PP numunelerde soğutma süresinin kalıntı gerilme dağılımına etkisi

Üç farklı kalıp sıcaklığı seviyesi için kalıntı gerilme profilleri Şekil 9.11’de verilmiştir. Kalıp sıcaklığı arttıkça yüzeydeki çekme gerilmesi artmıştır ve yüzeydeki maksimum çekme gerilmesi 0,85 MPa olarak 60°C kalıp sıcaklığında gerçekleşmiştir. Maksimum basma gerilmesi de ara katmanda (1,6 mm) -0,25 MPa çıkmıştır. Hindle ve ark. (1992) enjeksiyonla kalıplanmış PP ve GFPP malzemeler üzerinde yapmış oldukları çalışmada, kalıp sıcaklık değerindeki değişimin (her iki kalıp yarımı sıcaklığı eşit) kalıntı gerilmeleri etkilemediği, kalıp yarımalarının farklı sıcaklık değerlerine sahip olmasının kalıntı gerilmeleri artırdığını ifade etmişlerdir [55].



Şekil 9.11 PP numunelerde kalıp sıcaklığının kalıntı gerilme dağılımına etkisi

Kalıplama faktörlerinin yüzey, ara katman ve çekirdekteki kalıntı gerilmeler üzerinde etkisi varyans analizi (ANOVA) ile de test edilmiştir. Analiz sonuçları Çizelge 9.9'de görülmektedir. %95 güven aralığı, gruplar arası serbestlik derecesi 2 ve grup içi serbestlik derecesi 26 için, standart F değeri ($F_{0,05;2;26}=3,37$) ile faktörlerin F değerleri kıyas sonucunda H_0 hipotezi yüzey ve ara katmanlardaki kalıntı gerilmeler için reddedilmiş, çekirdekteki kalıntı gerilmeler için kabul edilmiştir. Yüzeydeki kalıntı gerilmeler üzerinde soğutma süresinin ($F=5,51$), ara katmanda enjeksiyon sıcaklığının ($F=4,24$) etkili olduğu bulunmuştur. Çekirdekteki kalıntı gerilmeler üzerinde kalıplama faktörlerinin etkisi F testine göre önemsizdir.

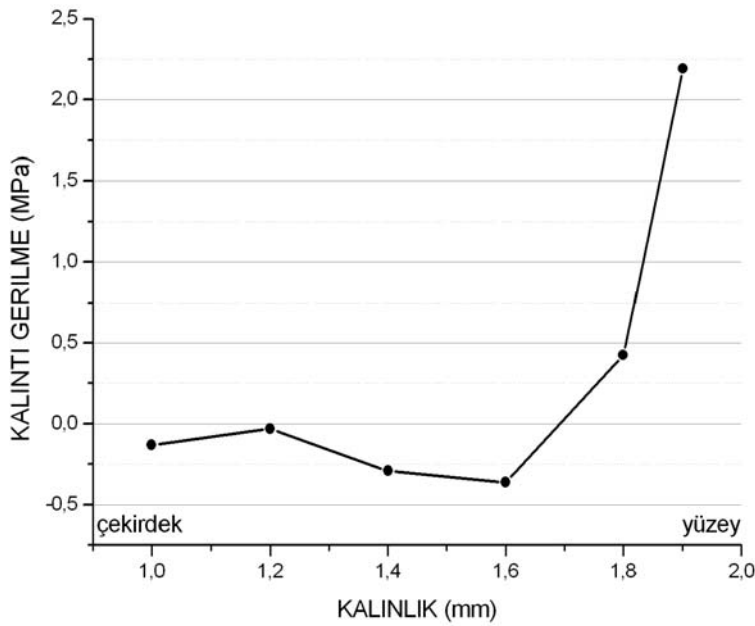
Çizelge 9.9 Kalıplama faktörlerinin kalıntı gerilme bölgeleri üzerindeki etkilerinin varyans analizi sonucu

Faktörler	Yüzeydeki Kalıntı Gerilmeler için				
	SD	KT	KO	F	P
Enjeksiyon Basıncı	2	1,1175	0,5588	0,76	0,487
Enjeksiyon Sıcaklığı	2	3,3475	1,6738	2,27	0,140
Kalıp Sıcaklığı	2	2,1492	1,0746	1,46	0,266
Ütüleme Basıncı	2	1,7800	0,8900	1,21	0,329
Ütüleme Süresi	2	2,1854	1,0927	1,48	0,261
Soğutma Süresi	2	8,1336	4,0668	5,51	0,017
Hata	14	10,3358	0,7383		
Toplam	26	29,0491			
Ara Katmandaki (1,6 mm) Kalıntı Gerilmeler için					
Enjeksiyon Basıncı	2	0,06505	0,03252	0,91	0,424
Enjeksiyon Sıcaklığı	2	0,30229	0,15114	4,24	0,036
Kalıp Sıcaklığı	2	0,20488	0,10244	2,87	0,090
Ütüleme Basıncı	2	0,05206	0,02603	0,73	0,5
Ütüleme Süresi	2	0,04317	0,02159	0,61	0,56
Soğutma Süresi	2	0,19956	0,09978	2,8	0,095
Hata	14	0,49946	0,03568		
Toplam	26	1,36647			
Çekirdekdeki Kalıntı Gerilmeler için					
Enjeksiyon Basıncı	2	0,16376	0,08188	1,44	0,27
Enjeksiyon Sıcaklığı	2	0,01482	0,00741	0,13	0,879
Kalıp Sıcaklığı	2	0,01210	0,00605	0,11	0,9
Ütüleme Basıncı	2	0,02783	0,01392	0,24	0,786
Ütüleme Süresi	2	0,04849	0,02425	0,43	0,661
Soğutma Süresi	2	0,04257	0,02129	0,37	0,695
Hata	14	0,79652	0,05689		
Toplam	26	1,10610			
SD: serbestlik derecesi, KT: kareler toplamı, KO: kareler ortalaması					

9.2.2. Yüksek yoğunluklu polietilen (YYPE)

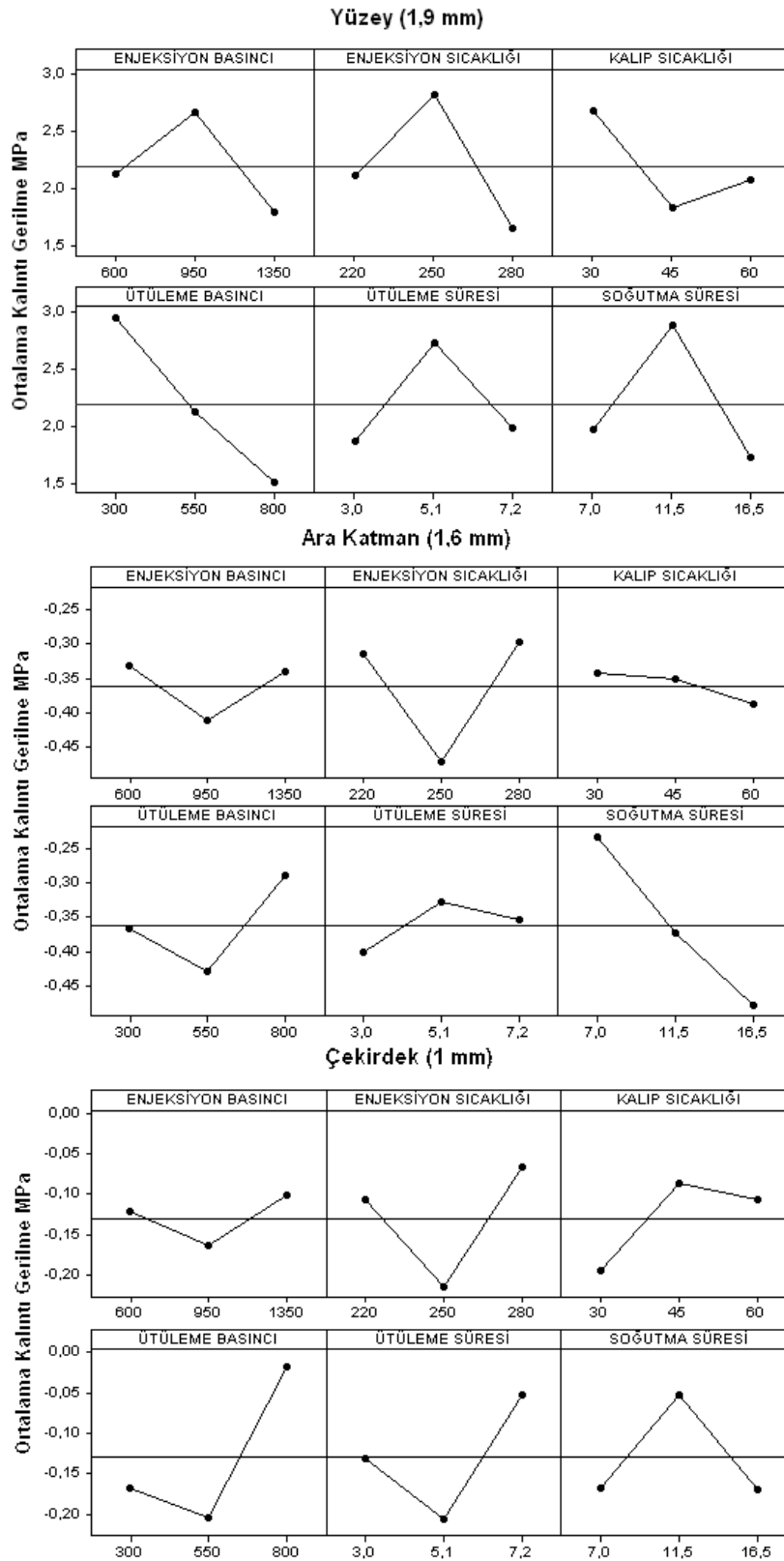
Katman kaldırma yöntemiyle elde edilmiş olan kalıntı gerilme değerlerinden, YYPE numunelerin kalınlık kesiti boyunca sahip olduğu ortalama kalıntı gerilme dağılımı Şekil 9.12' de verilmiştir. Kalıntı gerilme dağılımı kalınlık boyunca çekme-basma şeklinde gerçekleşmiştir ve kalıntı gerilme değerleri 2,4 MPa ile -0,7 MPa aralığında değişmiştir. Maksimum çekme gerilmesi yüzeyde (1,9 mm), maksimum basma

gerilmesi de ara yüzey ile merkez arasında (1,6 mm) gerçekleşmiştir. Farhoudi (1998) de yapmış olduğu bir çalışmada enjeksiyonla kalıplanmış YYPE numunelerin kalıntı gerilme dağılımlarının yüzeyde çekme çekirdekte basma olarak değiştiğini ifade etmiştir ve yüzeydeki çekme gerilmelerinin ısı etkileri ile değiştiğini basıncın yüzeydeki çekme gerilmeleri üzerinde etkisinin daha az olduğunu ifade etmiştir [40].



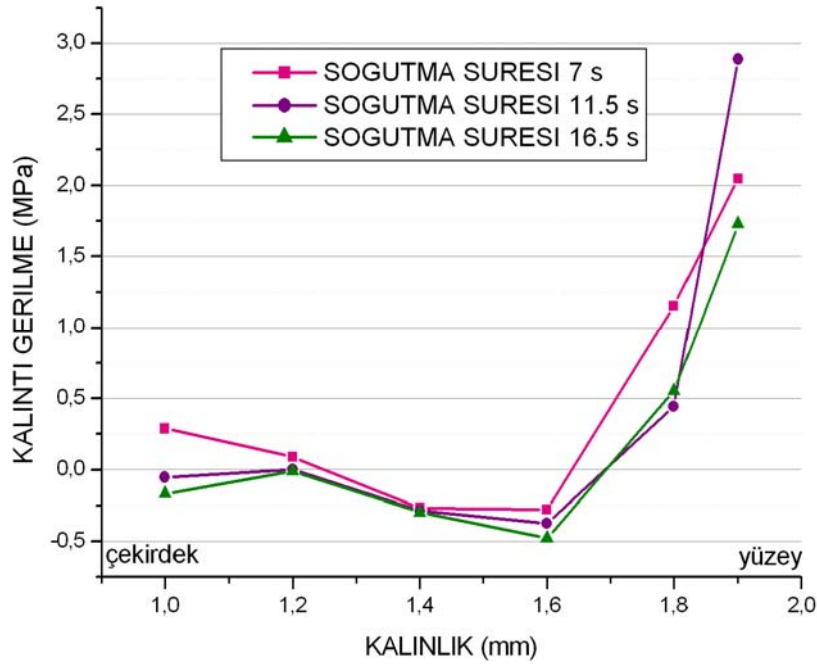
Şekil 9.12 YYPE numunelerin ortalama kalıntı gerilme profili

YYPE malzemeyle kalıplanmış numunelerin yüzey, ara katman ve çekirdekdeki kalıntı gerilme dağılımları üzerinde kalıplama şartlarının etkisi Taguchi analizi ile test edilmiştir. Taguchi Analizi sonucunda elde edilen etki grafikleri Şekil 9.13'te görülmektedir. Grafikler, Fahoudi (1998)' nin ifadesine benzer olarak yüzeydeki gerilmeler üzerinde birinci etkili faktörün ütleme basıncı olduğunu göstermiştir. İkinci etkili faktör ise enjeksiyon sıcaklığı çıkmıştır. Hindle ve ark. (1992) çalışmalarında ifade etmiş olduğu gibi sıcaklık yarı kristal malzemelerin moleküler dağılımını etkilemiş ve gerilme rahatlaması sağlamış olduğu düşünülmüştür [40, 55].



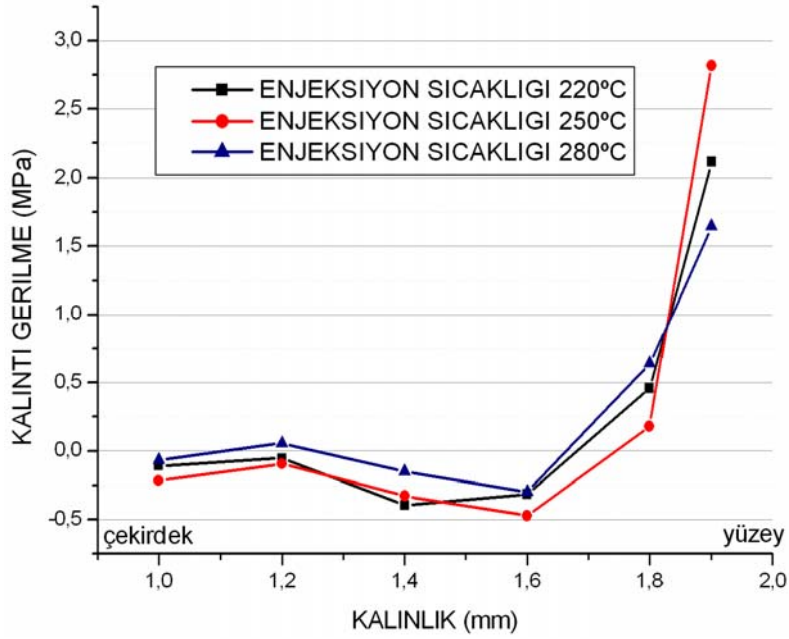
Şekil 9.13 YYPE numunelerde kalıplama faktörlerinin; yüzey, ara katman ve çekirdekteki kalıntı gerilmelere etki grafikleri

Soğutma süresi ile ortalama kalıntı gerilme dağılımı grafikleri (Şekil 9.14) incelendiğinde 11,5 s soğutma süresinde yüzeydeki çekme kalıntı gerilmesi maksimum değerini (2,5 MPa) almıştır. Yüksek seviye soğutma süresinde (16,5 s) ise yüzeydeki çekme gerilmesinin azaldığı (1,54 MPa) görülmektedir.



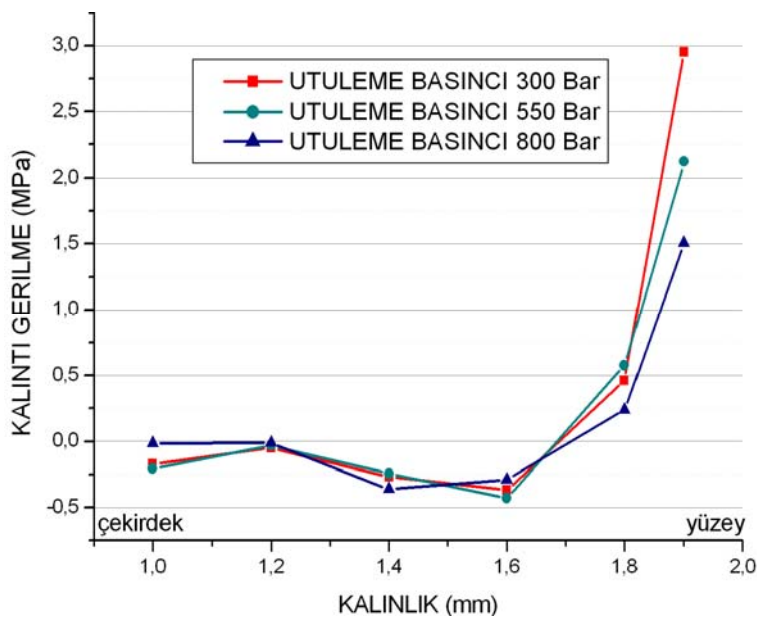
Şekil 9.14 YYPE numunelerde soğutma süresi ile ortalama kalıntı gerilme değişimi

Şekil 9.15'te üç farklı enjeksiyon sıcaklığı seviyesi için kalıntı gerilme dağılımları karşılaştırılmıştır. Parça kesiti boyunca maksimum çekme (2,8 MPa) ve basma (-0,5 MPa) gerilmeleri orta seviye enjeksiyon sıcaklığında (250°C) gerçekleşmiştir. Yüksek enjeksiyon sıcaklığında (280°C) yüzeydeki çekme gerilmesi minimum değerdedir (1,6 MPa). Farhoudi (1998) çalışmasında enjeksiyon sıcaklığının yüzeydeki çekme gerilmelerini artırdığını belirtmiştir. Bu çalışmada da orta seviye enjeksiyon sıcaklığında yüzeydeki çekme gerilmeleri artmış fakat yüksek enjeksiyon sıcaklığı azaltmıştır [40].



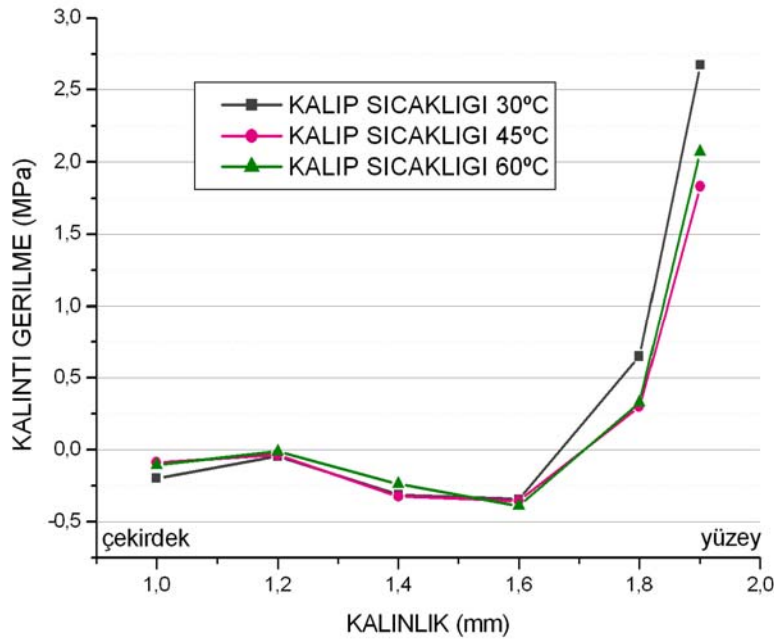
Şekil 9.15 YYPE numunelerde enjeksiyon sıcaklığının kalıntı gerilme dağılımına etkisi

Şekil 9.16’da üç farklı ütüleme basıncı seviyesi için ortalama kalıntı gerilme profilleri kıyaslanmıştır. Bu grafikte ütüleme basıncı arttıkça yüzeydeki çekme gerilmesinin azaldığı görülmektedir. Bu sonuç Farhoudi’nin (1998) bahsetmiş olduğu “katılma basıncı” sonuçları ile benzerdir [40].



Şekil 9.16 YYPE numunelerde ütüleme basıncının kalıntı gerilmelere etkisi

Kalıp sıcaklığının ortalama kalıntı gerilmeler üzerindeki etkileri üç farklı kalıp sıcaklığı seviyesi için (Şekil 9.17) incelendiğinde, kalıp sıcaklığının kalıntı gerilme üzerinde fazla etkili olmadığı görülmektedir. En yüksek kalıntı gerilme değeri yüzeyde çekme gerilmesi olarak (2,3 MPa), düşük kalıp sıcaklığı (30°C) için gerçekleşmiştir.



Şekil 9.17 Kalıp sıcaklığının ortalama kalıntı gerilmelere etkisi

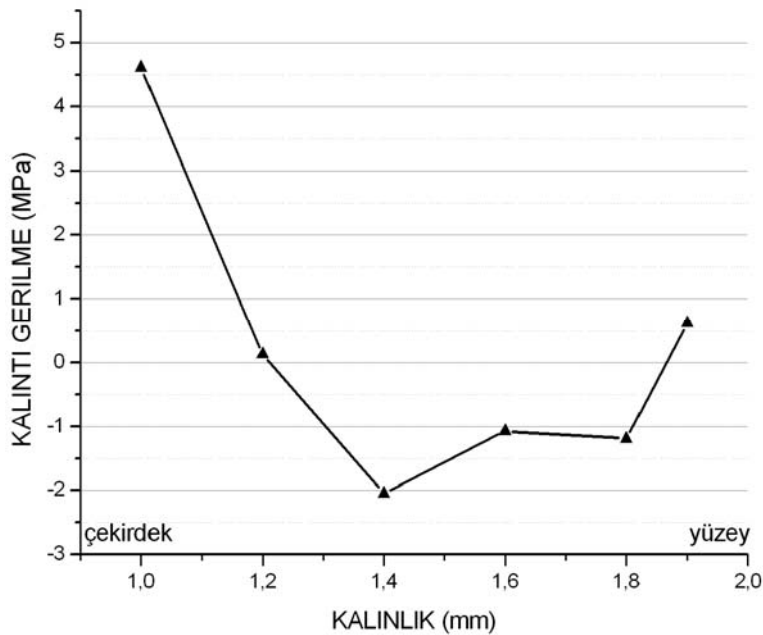
Çizelge 9.10'deki kalıplama şartlarının yüzey, ara katman ve çekirdekdeki kalıntı gerilmeler üzerindeki etki varyans analizi sonuçları incelendiğinde $F_{0,05;2;14}=3,37$ standart değerine göre H_0 hipotezi sadece ara katmandaki kalıntı gerilmeler için reddedilmiştir. Yüzey ve çekirdek bölgeleri için H_0 hipotezi kabul edilmiştir. Ara katmandaki kalıntı gerilmeler üzerinde soğutma süresi ($F=6,10$) ve enjeksiyon sıcaklığının ($F=3,72$) etkisi anlamlı bulunmuştur.

Çizelge 9.10 Kalıplama faktörlerinin yüzey, ara katman ve çekirdekdeki kalıntı gerilmelere etkileri varyans analizi sonuçları

Faktörler	Yüzeydeki Kalıntı Gerilmeler için				
	SD	KT	KO	F	P
Enjeksiyon Basıncı	2	3,556	1,778	0,48	0,627
Enjeksiyon Sıcaklığı	2	6,300	3,150	0,85	0,447
Kalıp Sıcaklığı	2	3,408	1,704	0,46	0,639
Ütüleme Basıncı	2	9,518	4,759	1,29	0,306
Ütüleme Süresi	2	3,893	1,946	0,53	0,601
Soğutma Süresi	2	6,775	3,387	0,92	0,422
Hata	14	51,654	3,960		
Toplam	26	85,104			
Ara Katmandaki (1,6 mm) Kalıntı Gerilmeler için					
Enjeksiyon Basıncı	2	0,03455	0,01728	0,77	0,482
Enjeksiyon Sıcaklığı	2	0,16687	0,08344	3,72	0,051
Kalıp Sıcaklığı	2	0,01047	0,00524	0,23	0,795
Ütüleme Basıncı	2	0,08936	0,04468	1,99	0,173
Ütüleme Süresi	2	0,02476	0,01238	0,55	0,588
Soğutma Süresi	2	0,27366	0,13683	6,10	0,012
Hata	14	0,31413	0,02244		
Toplam	26	0,91381			
Çekirdekdeki Kalıntı Gerilmeler için					
Enjeksiyon Basıncı	2	0,01872	0,00936	0,32	0,732
Enjeksiyon Sıcaklığı	2	0,10482	0,05241	1,79	0,203
Kalıp Sıcaklığı	2	0,06077	0,03038	1,04	0,380
Ütüleme Basıncı	2	0,17838	0,08919	3,05	0,080
Ütüleme Süresi	2	0,10641	0,05320	1,82	0,199
Soğutma Süresi	2	0,08036	0,04018	1,37	0,286
Hata	14	0,40986	0,02928		
Toplam	26	0,95931			
SD: serbestlik derecesi, KT: kareler toplamı, KO: kareler ortalaması					

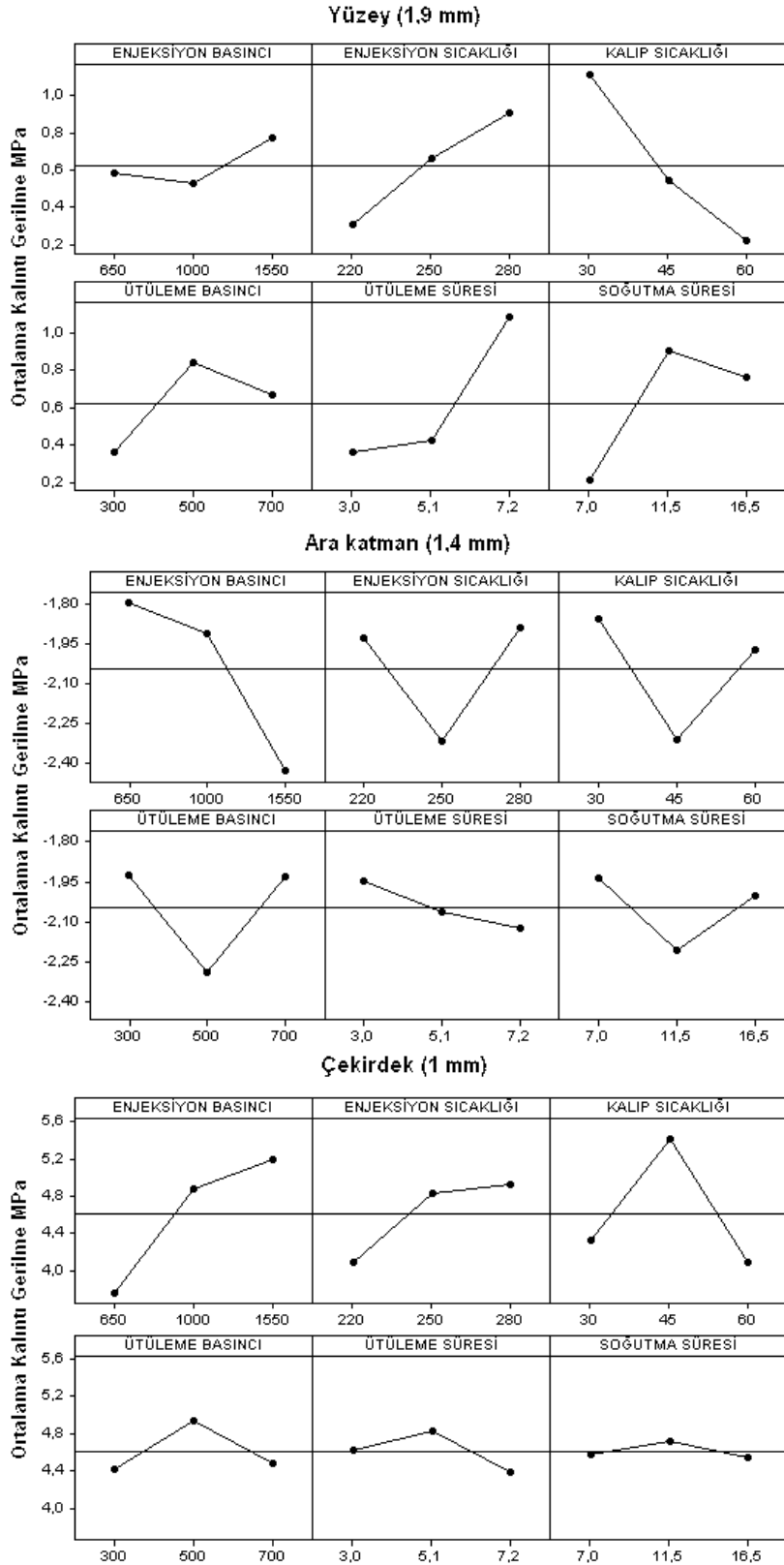
9.2.3. Polistiren (PS)

PS numunelerden katman kaldırma yöntemiyle hesaplanmış ortalama kalıntı gerilme dağılımı Kim (2007), Farhoudi (1998), Kim (2009)'in çalışmalarına benzer olarak, yüzeyde ve merkezde çekme gerilmesi, ara katmanda basma gerilmesi şeklinde gerçekleşmiştir (Şekil 9.18). Kalıntı gerilme değerleri 4,6 MPa (çekirdekte) ile -2 MPa (ara katmanda) aralığında değişmiştir [9,40,].



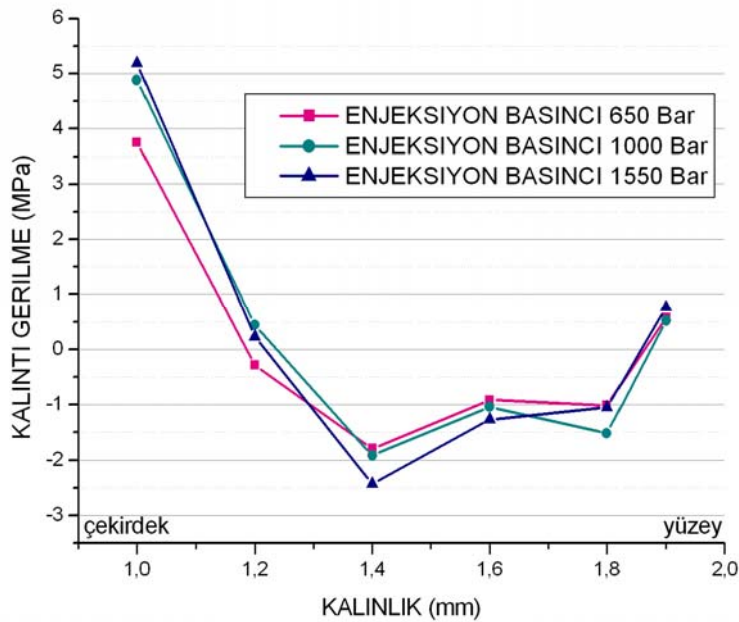
Şekil 9.18 PS numunelerde kalınlık kesiti boyunca kalıntı gerilme dağılımı

PS ile kalıplanmış numunelerde yüzey, çekirdek ve ara bölgelerdeki kalıntı gerilmeler üzerinde kalıplama faktörlerinin ve şartlarının etki grafikleri verilmiştir. Şekil 9.19'deki grafiklere göre yüzeydeki kalıntı gerilmeler üzerinde en etkili faktörler kalıp sıcaklığı, ütüleme süresi ve soğutma süresi, ara katmanlarda oluşan kalıntı gerilmeler üzerinde etkili faktörler, enjeksiyon basıncı, kalıp sıcaklığı ve enjeksiyon sıcaklığı, çekirdekte gerçekleşen kalıntı gerilme değerleri üzerinde en etkili faktörler ise enjeksiyon basıncı, kalıp sıcaklığı ve enjeksiyon sıcaklığı olmuştur.



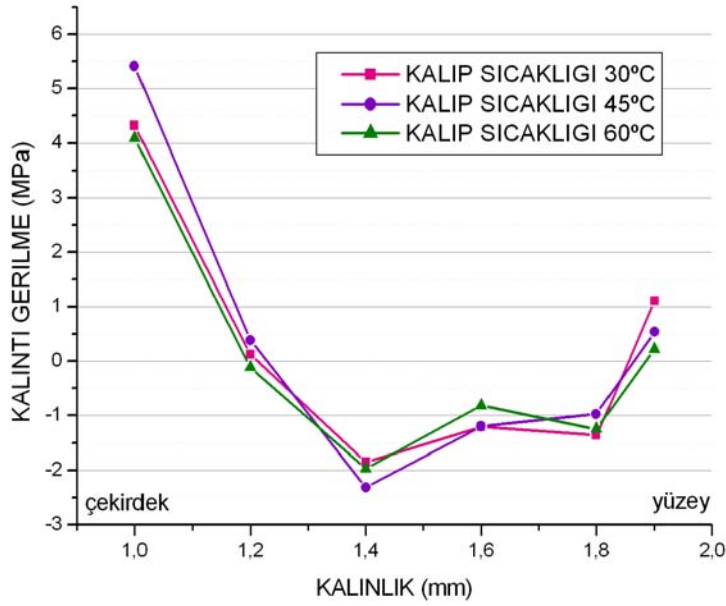
Şekil 9.19 PS numunelerde kalıplama faktörlerinin; yüzey, ara katman ve çekirdek deki kalıntı gerilmelere etki grafikleri

Analizler sonucunda PS numunelerdeki ortalama kalıntı gerilme değerleri üzerindeki etkili faktörlerden bir diğeri olan enjeksiyon basıncının, üç farklı seviyesinde gerçekleşen ortalama kalıntı gerilme grafikleri Şekil 9.20’de kıyaslanmıştır. Grafikteki maksimum çekme (5,2 MPa) ve basma (-2,4 MPa) gerilmeleri yüksek enjeksiyon basıncında (1550 Bar) oluşmuştur. Enjeksiyon basıncı ara katmanda basma, çekirdekte çekme gerilmesini artırmıştır. Yüzeydeki gerilmelere enjeksiyon basıncının etkili olmadığı görülmektedir.



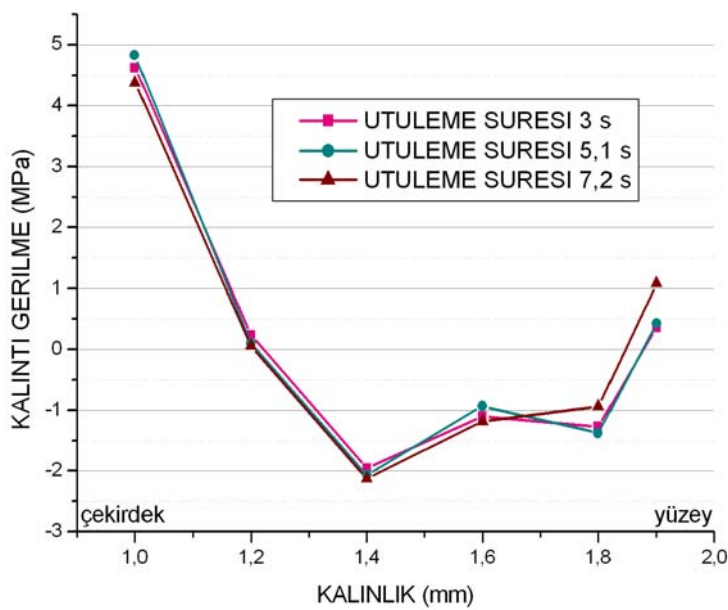
Şekil 9.20 PS numunelerde enjeksiyon basıncının kalıntı gerilme dağılımına etkisi

Kalıp sıcaklığı yüzeydeki ve çekirdekteki kalıntı gerilmeler üzerinde en etkili faktör çıkmıştır. Şekil 9.21’de üç farklı kalıp sıcaklığının kesit boyunca kalıntı gerilme dağılımlarına etkileri karşılaştırılmıştır. Yüksek kalıp sıcaklığı uygulandığında yüzeydeki ve çekirdekteki çekme gerilmeleri azalmıştır. Yüzeydeki maksimum çekme gerilmesi (1,1 MPa) düşük kalıp sıcaklığında (30°C) gerçekleşmiştir. Orta düzeyde kalıp sıcaklığı çekirdekte çekme gerilmesini (5,5 MPa) ara katmanda ise basma gerilmesini (-2,3 MPa) artırmıştır.



Şekil 9.21 PS numunelerde kalıp sıcaklığının kalıntı gerilme dağılımına etkisi

Ütuleme süresinin üç farklı seviyesi için gerçekleşmiş olan kalıntı gerilme dağılımları Şekil 9.22’ de görülmektedir. Kalıntı gerilme maksimum değeri, çekirdekte 5,1 s ütuleme süresi için 4,9 MPa olarak gerçekleşmiştir. Ütuleme süresinin yüzeydeki çekme gerilmesini artırdığı, ara katmanlarda da basma gerilmesi üzerinde azaltma yönünde etki yaptığı bulunmuştur.



Şekil 9.22 PS numunelerde kalıp sıcaklığının kalıntı gerilme dağılımına etkisi

Kalıplama faktörlerinin yüzey, ara katman ve çekirdekdeki kalıntı gerilmeler üzerinde etkisi varyans analizi test sonuçları Çizelge 9.11’de görülmektedir. Standart F değeri ($F_{0,05;2;26}=3,37$) ile faktörlerin F değerleri kıyaslanınca, H_0 hipotezi yüzey, ara katman ve çekirdekdeki kalıntı gerilmeler için reddedilmiştir. Yüzeydeki kalıntı gerilmeler üzerinde kalıp sıcaklığının ($F=4,44$) ve ütüleme süresinin ($F=3,52$), ara katmanda enjeksiyon basıncının ($F=4,62$), çekirdekte enjeksiyon basıncı ($F=4,89$) ve kalıp sıcaklığının ($F=4,31$) etkili olduğu görülmektedir.

Çizelge 9.11 Kalıplama faktörlerinin yüzey, ara katman ve çekirdekdeki kalıntı gerilmelere etkileri varyans analizi sonuçları

Faktörler	Yüzeydeki Kalıntı Gerilmeler için				
	SD	KT	KO	F	P
Enjeksiyon Basıncı	2	0,2901	0,1450	0,35	0,711
Enjeksiyon Sıcaklığı	2	1,6364	0,8182	1,97	0,176
Kalıp Sıcaklığı	2	3,6841	1,8421	4,44	0,032
Ütüleme Basıncı	2	1,0784	0,5392	1,30	0,304
Ütüleme Süresi	2	2,9228	1,4614	3,52	0,058
Soğutma Süresi	2	2,4364	1,2182	2,94	0,086
Hata	14	5,8087	0,4149		
Toplam	26	17,8569			
Ara Katmandaki (1,4 mm) Kalıntı Gerilmeler için					
Enjeksiyon Basıncı	2	2,0474	1,0237	4,62	0,029
Enjeksiyon Sıcaklığı	2	0,9910	0,4955	2,24	0,143
Kalıp Sıcaklığı	2	1,0133	0,5066	2,29	0,138
Ütüleme Basıncı	2	0,7995	0,3997	1,81	0,201
Ütüleme Süresi	2	0,1453	0,0726	0,33	0,726
Soğutma Süresi	2	0,3656	0,1828	0,83	0,458
Hata	14	3,1001	0,2214		
Toplam	26	8,4620			
Çekirdekdeki Kalıntı Gerilmeler için					
Enjeksiyon Basıncı	2	10,202	5,101	4,89	0,025
Enjeksiyon Sıcaklığı	2	3,851	1,926	1,84	0,194
Kalıp Sıcaklığı	2	8,991	4,495	4,31	0,035
Ütüleme Basıncı	2	1,516	0,758	0,73	0,501
Ütüleme Süresi	2	0,899	0,450	0,43	0,658
Soğutma Süresi	2	0,160	0,080	0,08	0,927
Hata	14	14,612	1,044		
Toplam	26	40,231			
SD: serbestlik derecesi, KT: kareler toplamı, KO: kareler ortalaması					

PP, YYPE ve PS malzemeden enjeksiyonla kalıplanmış numunelerdeki kalıntı gerilmeler üzerine kalıplama faktörlerinin ve seviyelerinin deneysel bulguları incelendiğinde aşağıdaki sonuçlara varılmıştır.

- Enjeksiyon sıcaklığının artırılması; PP numunelerin yüzeyindeki çekme gerilmelerini azaltmış, ara katmanlardaki basma gerilmelerini artırmıştır. YYPE numunelerde yüksek enjeksiyon sıcaklığı yüzeydeki çekme gerilmesini azaltmış, orta seviye enjeksiyon sıcaklığında yüzeydeki çekme gerilmesi maksimum çıkmıştır.
- Kalıp sıcaklığının artırılması; PP numunelerin yüzeyindeki çekme gerilmelerini artırmış, YYPE numunelerin yüzeyinde ve yüzeye yakın bölgedeki çekme gerilmelerini azaltmıştır. PS numunelerin yüzeyindeki çekme gerilmelerini azaltmıştır. Orta seviye kalıp sıcaklığında PS numunelerin çekirdekdeki basma gerilmesi maksimum çıkmıştır.
- Ütüleme basıncının artırılması, YYPE numunelerin yüzeyindeki çekme gerilmelerini azaltmış ara katmanlara ve çekirdeğe etki etmemiştir.
- Ütüleme süresinin artırılması PS numunelerin yüzeyindeki çekme gerilmelerini artırmıştır.
- Düşük seviye soğutma süresinin PP numunelerin yüzeyindeki çekme gerilmelerini basmaya çevirmiş, ara katmanlardaki basma gerilmesini artırmıştır. YYPE numunelerde yüksek ve düşük soğutma süreleri yüzeydeki çekme gerilmesini azaltmıştır.
- Enjeksiyon basıncının artırılması PS numunelerin çekirdekdeki çekme gerilmesini ve ara katmandaki basma gerilmesini artırmıştır.

Basınç, sıcaklık ve sürenin etkileri;

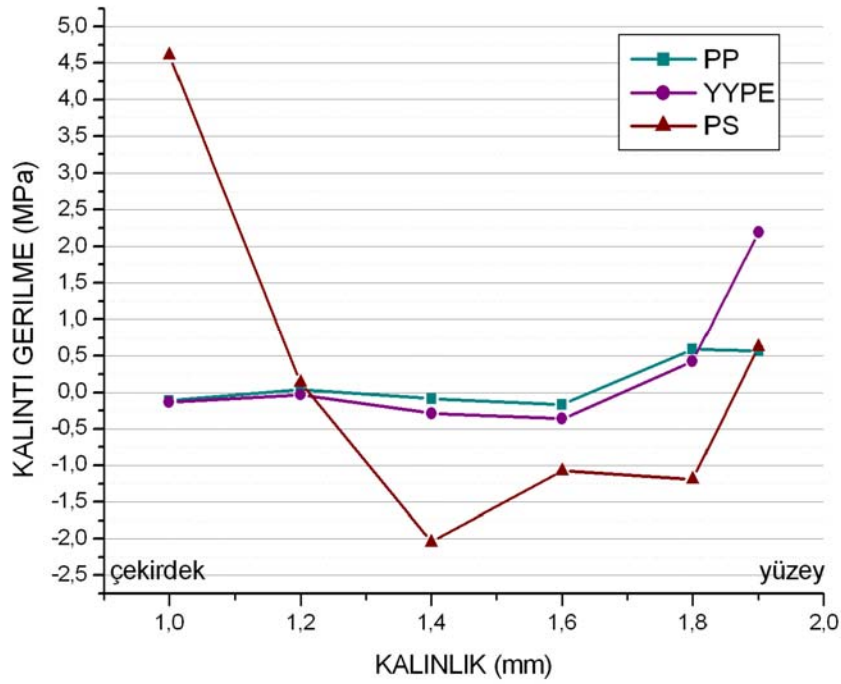
- PP malzemedeki kalıntı gerilmeler üzerinde sıcaklık ve süre, basınca göre daha etkilidir.

- YYPE malzemedeki kalıntı gerilmeler üzerinde basınç ve süre, sıcaklığa oranla daha etkili bulunmuştur.
- PS malzemelerdeki kalıntı gerilmeleri, basınç ve sıcaklık faktörleri, süreye oranla daha fazla etkilemiştir.

Malzemelerin kalıplama faktörlerine vermiş olduğu tepkilere göre;

- Sıcaklık faktörlerinden, enjeksiyon sıcaklığı PP ve YYPE malzemeler üzerinde toplamda kalıp sıcaklığından daha etkili olmuştur.
- Benzer şekilde soğutma süresi PP ve YYPE malzemelerdeki kalıntı gerilmeler üzerinde, ütüleme süresinden daha etkilidir.
- Basınç faktörlerinin etkisi PP üzerinde zayıf kalırken, YYPE malzeme ütüleme basıncından, PS malzeme enjeksiyon basıncından etkilenmiştir.
- Kalıp sıcaklığı PS malzeme üzerinde enjeksiyon sıcaklığından daha fazla etkilidir.
- Ütüleme süresinin etkisi PS üzerinde diğer malzemelere oranla daha yüksek çıkmıştır.

Şekil 9.23' te polipropilen, yüksek yoğunluklu polietilen ve polistiren malzemelerin kalıntı gerilme ortalama dağılımları kıyaslanmıştır. Bu grafikte PP ve YYPE numunelerdeki kalıntı gerilme değerleri ara katmanlar ve çekirdekte birbirine yakın çıkmıştır. PS malzeme, PP ve YYPE ye oranla çok farklı, gerilme dağılımı ve değerlerine sahip olmuştur. PP ve YYPE malzemelerdeki gerilme dağılımının ve değerlerinin birbirine yakın gerçekleşmesinin sebebi her iki malzemenin de yarı kristalin yapıya sahip olması görülmüştür. Bu yorum PS malzemenin amorf yapıda olması ve farklı kalıntı gerilme davranışı göstermesi dikkate alınarak yapılmıştır.



Şekil 9.23 PP, YYPE ve PS numunelerin kalıntı gerilme dağılımları

Bölüm 9.1’de verilmiş olan PP, YYPE ve PS malzemelerden aynı kalıplama şartları ile üretilmiş numunelerdeki çarpılma değerlerinin malzemelere göre sıralaması $YYPE > PP > PS$ şeklinde olmuştur. Toplam kalıntı gerilme değerleri için de bu sıralama $PS > YYPE > PP$ şeklindedir. Buradan, yarı kristal malzemelerde toplam kalıntı gerilme daha az olmasına rağmen çarpılmanın daha fazla olduğu görülmektedir. Yarı kristalin olan PP ve YYPE malzemeler için kalıntı gerilme ile çarpılma arasında doğru orantı bulunmuştur. Bu iki malzemenin aksine PS numunelerde toplam kalıntı gerilme daha yüksek çıkmış olmasına rağmen, eğrilme (çarpılma) oranları düşük gerçekleşmiştir.

10. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Yapılan ilk eğrilik değerleri ölçüm sonuçlarından aşağıdaki sonuçlara varılmıştır.

- ✓ Enjeksiyon basıncının artırılması, PP, YYPE ve PS numunelerdeki eğrilme değerlerini artırmıştır.
- ✓ Enjeksiyon sıcaklığının artırılması, PP ve YYPE numunelerdeki çarpılmayı azaltırken, PS numunelerin daha fazla çarpılmasına neden olmuştur.
- ✓ Kalıp sıcaklığının artırılması ile PP ve YYPE numunelerdeki çarpılma azalmış, PS numunelerde orta seviye kalıp sıcaklığı eğilmeyi azaltırken, düşük ve yüksek seviye kalıp sıcaklıkları çarpılmayı artırmıştır.
- ✓ Ütüleme basıncının artışı; PP ve YYPE numunelerdeki eğilmeyi artırmış, PS numunelerde zıt bir etki yaparak eğrilme oranını azaltmıştır.
- ✓ Ütüleme süresinin artırılması; PP numunelerde eğilmeyi artırmış, YYPE numunelerde orta seviye ütüleme basıncı eğilmeyi arttırırken, yüksek seviye ütüleme basıncı eğilmeyi azaltmıştır. PS numunelerde ütüleme basıncının artırılması ile eğrilme oranlarının azaldığı görülmüştür.
- ✓ PP numuneler üzerinde düşük ve yüksek soğutma sürelerinin etkisi değişmemiş fakat orta seviye soğutma süresi eğilmeyi artırmıştır. PS malzemedeki soğutma süresinin etkisi buna zıt olarak, orta seviye soğutma süresi kullanıldığında daha düz numuneler elde edilmiş.
- ✓ Soğutma süresinin arttırılması YYPE numunelerdeki eğilmeyi arttırmıştır.

Kalıntı gerilme sonuçları analiz edildiğinde aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

- Enjeksiyon sıcaklığının artırılması; PP numunelerin yüzeyindeki çekme gerilmelerini azaltmış, ara katmanlardaki basma gerilmelerini artırmıştır. YYPE

numunelerde yüksek enjeksiyon sıcaklığı yüzeydeki çekme gerilmesini azaltmış, orta seviye enjeksiyon sıcaklığında yüzeydeki çekme gerilmesi maksimum çıkmıştır.

- Kalıp sıcaklığının artırılması; PP numunelerin yüzeyindeki çekme gerilmelerini arttırmış, YYPE numunelerin yüzeyinde ve yüzeye yakın bölgedeki çekme gerilmelerini azaltmıştır. PS numunelerin yüzeyindeki çekme gerilmelerini azaltmıştır. Orta seviye kalıp sıcaklığında PS numunelerin çekirdekdeki basma gerilmesi maksimum çıkmıştır.
- Ütülleme basıncının artırılması, YYPE numunelerin yüzeyindeki çekme gerilmelerini azaltmış ara katmanlara ve çekirdeğe etki etmemiştir.
- Ütülleme süresinin artırılması PS numunelerin yüzeyindeki çekme gerilmelerini artırmıştır.
- Düşük seviye soğutma süresinin PP numunelerin yüzeyindeki çekme gerilmelerini basmaya çevirmiş, ara katmanlardaki basma gerilmesini artırmıştır. YYPE numunelerde yüksek ve düşük soğutma süreleri yüzeydeki çekme gerilmesini azaltmıştır.
- Enjeksiyon basıncının artırılması PS numunelerin çekirdekdeki çekme gerilmesini ve ara katmandaki basma gerilmesini artırmıştır.

Eğrilik değerleri ve kalıntı gerilme sonuçları bir arada incelendiğinde aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

1. Polipropilen, yüksek yoğunluklu polietilen ve polistiren malzemelerdeki çarpılma ve kalıntı gerilmeler kalıplama şartlarından etkilenmektedir.
2. Malzemenin cinsi ve özelliklerine göre çarpılma ve kalıntı gerilmeyi etkileyen kalıplama faktörleri değişmektedir.

3. PP malzemedeki çarpılma üzerinde en etkili kalıplama faktörleri; enjeksiyon sıcaklığı, kalıp sıcaklığı ve enjeksiyon basıncı, kalıntı gerilmeler üzerinde en etkili faktörler; enjeksiyon sıcaklığı ve soğutma süresidir.
4. YYPE malzemedeki çarpılma üzerinde en etkili kalıplama faktörleri; ütüleme basıncı, enjeksiyon basıncı, ütüleme süresi, kalıntı gerilmeler üzerinde en etkili faktörler; soğutma süresi, ütüleme basıncı ve enjeksiyon sıcaklığıdır.
5. PS malzemedeki çarpılma üzerinde en etkili kalıplama faktörleri; kalıp sıcaklığı, enjeksiyon basıncı ve ütüleme süresi, kalıntı gerilmeler üzerinde en etkili faktörler; ütüleme basıncı, enjeksiyon basıncı ve ütüleme süresidir.
6. Yarı kristal malzemelerde toplam kalıntı gerilme daha az çıkmasına rağmen çarpılmanın daha fazla olduğu görülmüştür.

Bu çalışmanın daha fazla geliştirilmesi için aşağıdaki çalışmaların yapılması uygundur.

1. Benzer bir çalışma sık kullanılan mühendislik plastikleri üzerinde gerçekleştirilerek, enjeksiyon kalıplama şartlarının mühendislik plastikleri üzerindeki etkileri araştırılabilir.
2. Farklı bir katman kaldırma (su jeti, excimer lazer..vb) veya kalıntı gerilme ölçme yöntemi (delik delme tekniği gibi) kullanılarak, kalıntı gerilme ölçüm yönteminin kalıntı gerilmeler üzerinde etkisi araştırılabilir.
3. PS haricinde bir amorf malzeme üzerinde de aynı çalışma tekrarlanarak, amorf yapılı malzemelerin kalıplama şartlarına göre çarpılma ve kalıntı gerilme özellikleri incelenebilir ve amorf malzemelerin bu davranışları üzerinde kalıplama şartlarının etkisi daha fazla genellenebilir.

KAYNAKLAR

1. Rosato, D.V., Rosato D. V., “Injection Molding Handbook”, *Kluwer Academic Publishers*, 23-26 (1999).
2. Miles, D. C., Briston, J. H., “Polymer Technology”, *Chemical Publishing Co. Inc.*, New York, 557-570 (1996).
3. Goodship, V., “Arburg Practical Guide to Injection Moulding”, *Smithers Rapra*, 1-65 (2004).
4. Malloy, R. A., “Plastic Part Design for Injection Molding”, *Hanser Publishers*, 14-108 (1994).
5. Rees, H., “Mold Engineering”, *Hanser Publishers*, 3-26 (1995).
6. Harper, C. A., “Modern Plastic Handbook”, *McGraw-Hill Professional Publishing*, 5.1-5.121 (2000).
7. Kamal, M. R., Lai-Fook, R. A., Hernandez-Aguilar, J. R., “Residual Thermal Stresses in Injection Moldings of Thermoplastics: A Theoretical and Experimental Study”, *Polymer Engineering and Science*, 42 (5): 1098-1114 (2002).
8. Maxwell, A.S. , Turnbull, A. , “Measurement of Residual Stress in Engineering Plastics Using The Hole-Drilling Technique”, *Polymer Testing* 22: 231-233 (2002).
9. Kim, C., H., Youn, J., R. , “Determination of residual stresses in injection-moulded flat plate: Simulation and experiments”, *Polymer Testing*, 26: 862–868 (2007).
10. Kabanemi, K. K. , Vaillancourt, H. , Wang, H. ,Salloum, G. “Residual Stresses, Shrinkage, and Warpage of Complex Injection Molded Products: Numerical Simulation and Experimental Validation”, *Polymer Engineering and Science*, 38 (1): 21-37 (1998).
11. Wen-Bin Young , “Residual stress induced by solidification of thermoviscoelastic melts in the postfilling stage”, *Journal of Materials Processing Technology* , 145: 317–324 (2004).
12. Zoetelief, W.F. , Douven, L. F. A. , Ingen Housz, A.J. , “Residual Thermal Stresses in Injection Molded Products”, *Polymer Engineering and Science*, 36 (14): 1886-1896 (1996).

13. Chen, X. , Lam, Y.C. , Li, D.Q., “Analysis of thermal residual stress in plastic injection molding” , *Journal of Materials Processing Technology*, 101: 275-280 (2000).
14. Lee, Y. B. , Kwon, T. H. , Yoon, K., “Numerical Prediction of Residual Stresses and Birefringence in Injection Compression Molded Center-Gated Disk. Part I: Basic Modeling and Results for Injection Molding”, *Polymer Engineering and Science*, 42 (11): 2246-2272 (2002).
15. Chen, M., Yao, D., Kim, B., “Eliminating Flow Induced Birefringence and Minimizing Thermally Induced Residual Stresses in Injection Molded Parts”, *Polymer – Plastics Technology and Engineering*, 40 (4): 491-503 (2001).
16. Huang, M. C., Tai, C. C., “The Effective Factors in The Warpage Problem of an Injected Molded Part With a Thin Shell Future”, *Journal of Materials Processing Technology*, 110: 1-9 (2001).
17. Bhattacharya, M., Sen, A., “Residual stresses and density gradient in injection molded starch/synthetic polymer blends”, *Polymer*, 41: 9177-9190 (2000).
18. Grujicic, M., Sellappan, V., Pandurangan, B., Li, G., Vahidi, A., Seyr, N., Erdmann, M., Holzleitner, J., “Computational analysis of injection-molding residual-stress development in direct-adhesion polymer-to-metal hybrid body-in-white components”, *Journal of Materials Processing Technology*, 203: 19-36 (2008).
19. Miller, K., Ramani, K., “Process-Induced Residual Stresses in Compression Molded UHMWPE”, *Polymer Engineering and Science*, 39 (1): 110-118 (1999).
20. Kwok, C. S., Tong, L., White, J. R., “Generation of Large Residual Stresses in Injection Moldings”, *Polymer Engineering and Science*, 36 (5): 651-657 (1996).
21. Wang, T. H., Young, W. B., “Study on residual stresses of thin-walled injection molding”, *European Polymer Journal*, 41: 2511-2517 (2005).
22. Min, Y., Hong, M., Xi, Z., Jian, L., “Determination of Residual Stress by Use of Phase Shifting Moire Interferometry And Hole-Drilling Method”, *Optics and Lasers in Engineering*, 44: 68-79 (2006).
23. Mordfin, L., "Standards for Residual Stress Measurement," Residual Stress Effects in Fatigue, ASTM STP 776, *American Society for Testing and Materials*, 6-12 (1982).

24. Sicot, O., Gong, X. L., Cherouat, A., Lu, J., “Influence of Experimental Parameters on Determination of Residual Stress Using The Incremental Hole-Drilling Method”, *Composites Science And Technology*, 64: 171-180 (2004).
25. Parlevliet, P. P., Bersee, H. E. N., Beukers, A., “Residual Stresses in Thermoplastic Composites –A study of the literature- Part II: Experimental Techniques”, *Composites: Part A*, 38: 651-665 (2007).
26. Lee, Y. B., Kwon, T. H., “Modeling And Numerical Simulation of Residual Stresses And Birefringence in Injection Molded Center Gated Disks”, *Journal of Materials Processing Technology*, 111: 214-218 (2001).
27. Lu, X., Khim, L. S., “A Statistical Experimental Study of The Injection Molding of Optical Lenses”, *Journal of Materials Processing Technology*, 113: 189-195 (2001).
28. Isayev, A. I., Shyu, G. D., Li, C. T., “Residual Stresses and Birefringence in Injection Molding of Amorphous Polymers: Simulation And Comparison With Experiment”, *Journal of Polymer Science: Part B: Polymer Physics*, 44: 622-639 (2006).
29. Jacques, M.S. , “An analysis of thermal warpage in injection molded parts due to unbalanced cooling”, *Polymer Engineering and Science*, 22: 241-247 (1982).
30. Paterson, M.W.A. , White, J.R. , “Layer removal analysis of residual stress”, *Journal of Material Science*, 24: 3521-3528 (1989).
31. Güneş, A. T., “Plastik Enjeksiyon Kalıpları”, *TMMOB*, 1-61 (2005).
32. Jung, J.H. , Lee, S.W. , Youn, J.R. ,”Characterization of deformation in injection molded parts after packing and cooling”, *Macromol. Symp.*, 148-263, (1999).
33. Wang, T.H. , Young, W.B. “Study on residual stresses of thin walled injection molding”, *Eur. Polym. Journal*, 41: 2511 (2005).
34. Chung, T.S. , Ryan, M.E. ,”Analysis of the packing stage in injection molding” *Polymer Engineering and Science*, 21 (5): 271 (1981).
35. Nirkhe, C., “Comparison of Approaches for Optimizing Molding Parameters”, Yüksek Lisans Tezi, *Massachusetts Lowell Üniversitesi*, 33-37 (2003).
36. Goodship, V., “Troubleshooting Injection Moulding”, *Smithers Rapra*, 40-44 (2004).

37. Turnbull, A., Maxwell, A. S., Phillai, S., “Residual stress in polymers—evaluation of measurement techniques”, *Journal of Material Science*, 34: 451-459 (1999).
38. Liu, F., Zhou, H., Li, D., “Numerical Simulations of Residual Stresses and Warpage in Injection Molding”, *Journal of Reinforced Plastics And Composites*, 28 (05): 571-585 (2009).
39. Zhou, H., Li, D., “Residual stress analysis of the post-filling stage in injection moulding”, *Adv. Manuf. Technology.*, 25: 700–704 (2005).
40. Farhoudi, Y., “Measurement and Computation of Thermal Stresses in Injection Molding of Amorphous and Crystalline Polymers”, Doktora Tezi, *McGill University Department of Chemical Engineering*, Montreal, 2-19, 95-213 (1998).
41. Siegmann A, Buchman A, Kenig S., “Residual stresses in polymers I: the effect of thermal history”, *Polymer Engineering and Science*, 22 (1): 40–7 (1982).
42. Kubát J, Rigdahl M. “Influence of high injection pressures on the internal stress level in injection moulded specimens”, *Polymer*, 16: 925 (1975).
43. Harper, Charles, A., “Handbook of Plastics Technologies”, *McGraw-Hill Professional*, 26-53 (2006).
44. Kafkas, F., “Vidaların Talaşlı İmalatında İmalat Parametrelerinin Vida Dış Dindeki Kalıntı Gerilmeler Üzerine Etkilerinin Deneysel Olarak Araştırılması”, Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 1-2 (2009).
45. Yiğit, O., Dilmeç, M., Halkacı, S., “Tabaka Kaldırma Yöntemi İle Kalıntı Gerilmelerin Ölçülmesi Ve Diğer Yöntemlerle Karşılaştırılması”, *Mühendis ve Makine*, 49 (579): 20-27 (2008).
46. Maxwell, A.S., “Measurement of Residual Stress in Plastics”, *National Physical Laboratory Report, Middlesex*, DEPC-MN 027: 1-8 (2005).
47. Savaşçı, Ö. T., Uyanık, N., Akovalı, G., “Plastikler ve Plastik Teknolojisi”, *Çantay Kitabevi*, 1-25: 199-203 (1998).
48. Saçak, M., “Polimer Teknolojisi”, *Gazi Kitabevi*, 71-73 (2005).
49. Osswald, T. A., “Polymer Processing”, *Hanser Publishers*, 117-139 (1998).
50. Genichi, T., Chowdhury, S., Wu, Y., “Taguchi’s Quality Engineering Handbook”, *John Wiley & Sons. Inc.*, 221-311 (2005).

51. Chiang, K. T., “The optimal process conditions of an injection-molded thermoplastic part with a thin shell feature using grey-fuzzy logic: A case study on machining the PC/ABS cell phone shell”, *Materials And Design*, 28: 1851–1860 (2007).
52. Gao, Y., Wang, X., “Surrogate-based process optimization for reducing warpage in injection molding”, *Journal of Materials Processing Technology*, 209: 1302–1309 (2009).
53. Chen, C. P., Chuang, M. T., Hsiao, Y. H., Yang, Y. K., Tsai, C. H., “Simulation and experimental study in determining injection molding process parameters for thin-shell plastic parts via design of experiments analysis”, *Expert Systems with Applications*, 36: 10752–10759 (2009).
54. Zhil'tsova, T. V., Oliveira, M. S. A., Ferreira, J. A. F., “Relative influence of injection molding processing conditions on HDPE acetabular cups dimensional stability”, *Journal of Materials Processing Technology*, 209: 3894–3904 (2009).
55. Hindle, C. S., White, J. R., Dawson, D. Thomas, K., “Internal Stress, Molecular Orientation, and Distortion in Injection Moldings: Polypropylene and Glass-Fiber Filled Polypropylene”, *Polymer Engineering And Science*, 32 (3): 157-171 (1992).

EKLER

EK-1. Kritik F Değerleri ($\alpha=0,05$)

Kritik F Değerleri ($\alpha = 0.05$)

	Payın Serbestlik Derecesi																		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	15	20	24	30	40	60	120	∞
1	161	200	216	225	230	234	237	239	241	242	244	246	248	249	250	251	252	253	254
2	18.5	19.0	19.2	19.2	19.3	19.3	19.4	19.4	19.4	19.4	19.4	19.4	19.4	19.5	19.5	19.5	19.5	19.5	19.5
3	10.1	9.55	9.28	9.12	9.01	8.94	8.89	8.85	8.81	8.79	8.74	8.70	8.66	8.64	8.62	8.59	8.57	8.55	8.53
4	7.71	6.94	6.59	6.39	6.26	6.16	6.09	6.04	6.01	5.96	5.91	5.86	5.80	5.77	5.75	5.72	5.69	5.66	5.63
5	6.61	5.79	5.41	5.19	5.05	4.95	4.88	4.82	4.77	4.74	4.68	4.62	4.56	4.53	4.50	4.46	4.43	4.40	4.37
6	5.99	5.14	4.76	4.53	4.39	4.28	4.21	4.15	4.10	4.06	4.00	3.94	3.87	3.84	3.81	3.77	3.74	3.70	3.67
7	5.99	4.74	4.35	4.12	3.97	3.87	3.79	3.73	3.68	3.64	3.57	3.51	3.44	3.41	3.38	3.34	3.30	3.27	3.23
8	3.32	4.46	4.07	3.84	3.69	3.58	3.50	3.44	3.39	3.35	3.28	3.22	3.15	3.12	3.08	3.04	3.01	2.97	2.93
9	1.12	4.26	3.86	3.63	3.48	3.37	3.29	3.23	3.18	3.14	3.07	3.01	2.94	2.90	2.86	2.82	2.79	2.75	2.71
10	4.96	4.10	3.71	3.48	3.33	3.22	3.14	3.07	3.02	2.98	2.91	2.85	2.77	2.74	2.70	2.66	2.62	2.58	2.54
11	4.84	3.98	3.59	3.36	3.20	3.09	3.01	2.95	2.90	2.85	2.79	2.72	2.65	2.61	2.57	2.53	2.42	2.45	2.40
12	4.75	3.89	3.49	3.26	3.11	3.00	2.91	2.85	2.80	2.75	2.69	2.62	2.54	2.51	2.47	2.43	2.38	2.34	2.30
13	4.67	3.81	3.41	3.18	3.03	2.92	2.83	2.77	2.71	2.67	2.60	2.53	2.46	2.42	2.38	2.34	2.30	2.25	2.21
14	4.60	3.74	3.34	3.11	2.96	2.85	2.76	2.70	2.65	2.60	2.53	2.46	2.39	2.35	2.31	2.27	2.22	2.16	2.13
15	4.54	3.68	3.29	3.06	2.90	2.79	2.71	2.64	2.59	2.54	2.48	2.41	2.33	2.29	2.25	2.20	2.16	2.11	2.07
16	4.49	3.63	3.24	3.01	2.85	2.74	2.66	2.59	2.54	2.49	2.42	2.35	2.28	2.24	2.19	2.15	2.11	2.06	2.01
17	4.45	3.59	3.20	2.97	2.81	2.70	2.61	2.55	2.49	2.45	2.38	2.31	2.23	2.19	2.15	2.10	2.06	2.01	1.96
18	4.41	3.55	3.16	2.93	2.77	2.66	2.58	2.51	2.46	2.41	2.34	2.27	2.19	2.15	2.11	2.06	2.02	1.97	1.92
19	4.38	3.52	3.13	2.90	2.74	2.63	2.54	2.48	2.42	2.38	2.31	2.23	2.16	2.11	2.07	2.03	1.98	1.93	1.88
20	4.35	3.49	3.10	2.87	2.71	2.60	2.51	2.45	2.39	2.35	2.28	2.20	2.12	2.08	2.04	1.99	1.95	1.90	1.84
21	4.32	3.47	3.07	2.84	2.68	2.57	2.49	2.42	2.37	2.32	2.25	2.18	2.10	2.05	2.01	1.96	1.92	1.87	1.81
22	4.30	3.44	3.05	2.82	2.66	2.55	2.46	2.40	2.34	2.30	2.23	2.15	2.07	2.03	1.98	1.94	1.89	1.84	1.78
23	4.28	3.42	3.03	2.80	2.64	2.53	2.44	2.37	2.32	2.27	2.20	2.13	2.05	2.01	1.96	1.91	1.86	1.81	1.76
24	4.26	3.40	3.01	2.78	2.62	2.51	2.42	2.36	2.30	2.25	2.18	2.11	2.03	1.98	1.94	1.89	1.84	1.79	1.73
25	4.24	3.39	2.99	2.76	2.60	2.49	2.40	2.34	2.28	2.24	2.16	2.09	2.01	1.96	1.92	1.87	1.82	1.77	1.71
30	4.17	3.32	2.92	2.69	2.53	2.42	2.33	2.27	2.21	2.16	2.09	2.01	1.93	1.89	1.84	1.79	1.74	1.68	1.62
40	4.06	3.23	2.82	2.61	2.45	2.34	2.25	2.18	2.12	2.07	2.00	1.92	1.94	1.79	1.74	1.69	1.64	1.58	1.51
60	4.00	3.15	2.74	2.53	2.37	2.26	2.17	2.10	2.04	1.99	1.92	1.84	1.75	1.70	1.65	1.59	1.53	1.47	1.39
120	3.92	3.07	2.68	2.45	2.29	2.18	2.09	2.02	1.96	1.91	1.83	1.75	1.66	1.61	1.55	1.50	1.43	1.35	1.25
∞	3.84	3.00	2.60	2.37	2.21	2.10	2.01	1.94	1.88	1.83	1.75	1.67	1.57	1.52	1.46	1.39	1.32	1.22	1.00

Paydanın Serbestlik Derecesi

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : KATMER, Şükran
 Uyuğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri: 15.10.1984 Rize
 Medeni hali : Bekar
 Telefon : 05427691984
 Faks :
 e-mail : sukatmer@hotmail.com

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Lisans	Gazi Üniversitesi / Kalıpcılık Öğrt.	2006
Önlisans	Karadeniz Teknik Üniversitesi / Makine	2002
Lise	Rize İmam Hatip Lisesi	2000

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2006-2008	Mesa İmalat Sanayi A.Ş.	Teknik Tasarım
2008-2009	Gazi Üniv. Atatürk M.Y.O.	Öğretim Elemanı (Yarı Zamanlı)

Yabancı Dil

İngilizce

Ödüller

2005/2006 Gazi Üniversitesi Kalıpcılık Öğretmenlik Programı Birinciliği

Hobiler

Seyahat etmek, doğa yürüyüşü, yabancı dil öğrenmek