

PLASTİK ENJEKSİYON KALIPLAMA ŞARTLARININ POLİSTİREN DÜZ PARÇALARDAKİ KALINTI GERİLMELERE ETKİLERİ

Şükran KATMER*, Çetin KARATAŞ**

*Yalova Üniversitesi, Yalova Meslek Yüksekokulu, Malzeme ve Malzeme İşleme Teknolojileri Bölümü, Yalova
sukran.katmer@yalova.edu.tr

**Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İmalat Mühendisliği Bölümü, Teknikokullar, Ankara
cetink@gazi.edu.tr

(Geliş/Received: 12.01.2011; Kabul/Accepted: 03.04.2012)

ÖZET

Plastik enjeksiyon kalıplama, plastik parça üretiminde en yaygın kullanılan yöntemlerden biridir. Kalıplanan ürünün özellikleri, ürün ve kalıp tasarımı, plastik malzeme, kalıplama şartları gibi değişkenlere bağlıdır. Kalıntı gerilmeler, ürünlerin, kullanılabilirlik, ölçüsel kararlılık, mekanik dayanım, kimyasal direnç ve diğer özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Bu çalışmada polistiren (PS) malzemeden üretilmiş düz parçalardaki kalıntı gerilmelere, enjeksiyon kalıplama şartlarının etkisi deneysel olarak araştırılmıştır. Bu amaçla, enjeksiyon basıncı, enjeksiyon sıcaklığı, kalıp sıcaklığı, ütüleme basıncı, ütüleme süresi ve soğutma süresi deney faktörleri olarak seçilmiş ve Taguchi deney tasarımının L_{27} ortogonal dağılımı uygulanmıştır. Deney sonuçları, PS malzemedeki kalıntı gerilmelere sırasıyla enjeksiyon basıncı, kalıp sıcaklığı ve ütüleme süresi faktörlerinin en etkili olduğunu göstermiştir. Sonuç olarak, kalıntı gerilmelerin enjeksiyon basıncındaki artış, kalıp sıcaklığındaki azalış ve ütüleme süresindeki artış ile arttığı bulunmuştur.

Anahtar kelimeler: Enjeksiyon kalıplama, kalıntı gerilmeler, amorf plastikler, katman kaldırma yöntemi

THE EFFECTS OF MOLDING CONDITIONS ON THE RESIDUAL STRESSES IN INJECTION MOLDED POLYSTYRENE FLAT PARTS

ABSTRACT

The plastic injection molding is a process which polymer melt is injected into a mould cavity, and solidifies to form a plastic part. The properties of the molded parts are related design of the products and the molds, the plastic materials and the molding conditions. The residual stresses can cause usability, dimensional stability, mechanical properties, and resistance of chemical etc. of product. In this study, the effects of molding conditions on the residual stresses in molded polystyrene (PS) flat parts were experimentally investigated. Six factors were examined and Taguchi experimental setup L_{27} orthogonal array was used. These factors were the injection pressure, the melt temperature, the mold temperature, the packing pressure, the packing time and the cooling time. The results showed that the injection pressure, the mold temperature and the packing time had greatest influence on the residual stresses in molded polystyrene parts. As a result, the residual stresses were increased by increasing the injection pressure, decreasing the mold temperature and increasing the packing time.

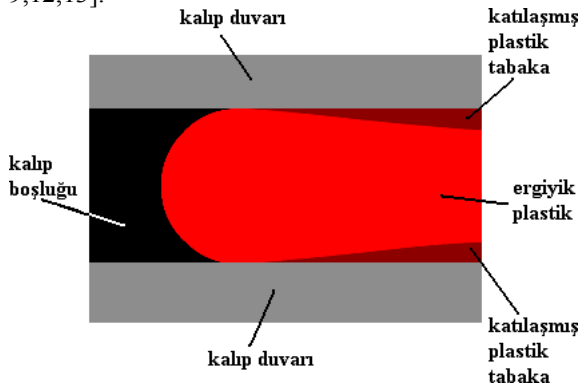
Keywords: Plastic injection molding, residual stresses, amorphous polymers, layer removal method

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Plastik enjeksiyon kalıplama, plastik parça üretiminde en yaygın kullanılan yöntemlerden biridir. Enjeksiyonla kalıplamanın en önemli avantajı, karmaşık geometriye parçaların kontrollü bir kalıplama

süreciyle son bir işleme gerek kalmaksızın üretilmesidir. Enjeksiyon kalıplama döngüsü, dolum, ütüleme ve soğutma olmak üzere üç ana safhadan oluşur. Üretilen ürünün özellikleri, plastik malzeme, ürün ve kalıp tasarımı, kalıplama şartları gibi değişkenlere bağlıdır [1-9].

Enjeksiyonla kalıplamada ergiyik haldeki sıcak plastik basınç ile daha soğuk olan kalıp boşluğuna itilir. Ergiyik kalıp boşluğunu doldururken kalıp duvarı ile temas eden dış katman sıcaklığını kaybeder ve katılaşır. Katılan dış katman ile hala ergiyik olan çekirdek arasında sıcaklık farkı oluşur (Şekil 1.1). Dolumun ve ütülemenin ileriki safhalarında katılma yüzeyden çekirdeğe doğru devam eder. Katılan tabakalarda plastik, soğumanın etkisiyle büzülmeye çalışır (hacmi küçülür) fakat dolum ve ütüleme safhalarında devam eden malzeme akışı ve basınç molekül zincirlerinin istediği konumu almasına (rahatlamasına) izin vermez. Bu gerilmeler, giriş tamamen katlaşıp (ütülemenin sonu) soğutma aşamasına geçildiğinde moleküllerin üzerinde donar. Bu tür gerilmelere kalıntı gerilme adı verilmiştir [4-9,12,13].



Şekil 1.1 Plastik kalıpta katılma (The solidification of the plastics in the mold cavity)

Kalıntı gerilmelere sahip molekül zincirleri parça kalıptan çıkartıldıktan sonra da rahatlamaya çalışır. Enjeksiyonla kalıplanmış ürünlerdeki kalıntı gerilmeler çekme ve çarpılmanın başlıca nedenidir. Kalıntı gerilmeler, ürünlerin kullanılabilirlik, ölçüsel kararlılık, mekanik dayanım, kimyasal direnç ve diğer özellikleri üzerinde önemli 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 nedenli ve ısıl nedenli kalıntı gerilmeler. Akış nedenli kalıntı gerilmeler, kalıbın dolumu esnasında oluşan kayma ve normal gerilmelerinin tam olarak rahatlayamaması neticesinde parçanın moleküler dağılımında gerilmeli bölgelerin kalmasıyla oluşur. Isıl nedenli kalıntı gerilmeler ise kalıbın dolum, ütüleme ve soğutma safhalarında sürekli ve dengeli olmayan soğutma ile oluşurlar [4].

Plastiklerde kalıntı gerilmelerin ölçümü için kullanılan yöntemler, malzeme özelliklerinden dolayı metallere oranla sınırlıdır. Plastiklerde sıklıkla uygulanan yöntemler katman kaldırma, delik delme, fotoelastisite (çift kırınım) ve kimyasal çözücü teknikleridir [5,6,14]. Katman kaldırma yöntemi sadece düz parçalara uygulanabilmektedir. Delik

delme tekniği karmaşık geometriye parçalara uygulanabilen esnek bir yöntem olmasına rağmen, sonuçları katman kaldırmadaki kadar güvenli değildir [15]. Çift kırınım tekniği sadece saydam plastiklere uygulanabilen bir yöntemdir. Kimyasal yöntemde ise sadece yüzeydeki çekme gerilmeleri için sonuçlar elde edilebilmektedir [16,17].

Bu çalışmada polistiren (PS) malzemeden üretilmiş düz parçalardaki kalıntı gerilmelere, enjeksiyon kalıplama şartlarının etkisi katman kaldırma yöntemi kullanılarak deneysel olarak araştırılmıştır.

2. KATMAN KALDIRMA YÖNTEMİ (THE LAYER REMOVAL METHOD)

Katman kaldırma tekniği ilk olarak Treuting and Read tarafından metal plakalardaki kalıntı gerilme değerlerini saptamak için kullanılmıştır [10]. Daha sonra Isayev bu tekniği polimer malzemelere başarıyla uygulamıştır [11]. Katman kaldırma yöntemi kalıntı gerilmelerin ölçülmesi için en yaygın kullanılan tekniklerdendir [4].

Katman kaldırma ve delik delme yöntemlerinin temelinde elastisite teorisi vardır. Elastisite teorisi, bir cismin üzerine etkiyen kuvvetin büyüklüğü ile cismin uğrayacağı deformasyonun doğru orantılı olduğunu ifade eder. Katman kaldırma yönteminde temel prensip, parçadan ince tabakaların kaldırılması ile iç gerilmelerin ve momentlerin yeniden dengelenmesi sonucunda parçada oluşan deformasyonun ölçülmesi esasına dayanmaktadır. Oluşan gerilme veya şekil değiştirmeler (deformasyon), kaldırılan tabakadaki gerilmelerle ilişkilidir. Parçalarda bu deformasyon eğilme (bükülme) olarak ortaya çıkmaktadır. Parçadaki deformasyonlar, uzama teli (strain-gauge), lazer tarama, optik mikroskop ve görüntü işleme gibi teknikler kullanılarak saptanmaktadır. Bu deformasyonlar, elastisite teorisi kullanılarak kalıntı gerilmeleri hesaplamak amacıyla ölçülmektedir [14, 18, 19].

Kaldırılan bir katmandaki kalıntı gerilmenin hesaplanmasında kullanılan formül, Eşitlik 2.1'de verilmiştir. Parçanın akışa paralel ve dik (x ve y yönü) yönlerindeki gerilmeler eşit kabul edilmiştir [18].

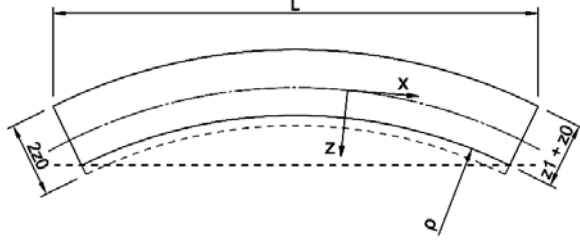
Bükülme eğrisi aşağıdaki formüllerle hesaplanır:

$$\sigma_x(z_1) = -\frac{E}{6(1-\nu)} \left\{ (z_0+z_1)^2 \frac{dKx(z_1)}{dz_1} + 4(z_0+z_1)Kx(z_1) - 2 \int_{-z_0}^{z_1} Kx(z_1) dz \right\} \quad (2.1) [18]$$

$$Kx = \frac{1}{\rho} \quad (2.2) [18]$$

$$\rho = \frac{L^2 + 4\phi^2}{8\phi} \quad (2.3) [18]$$

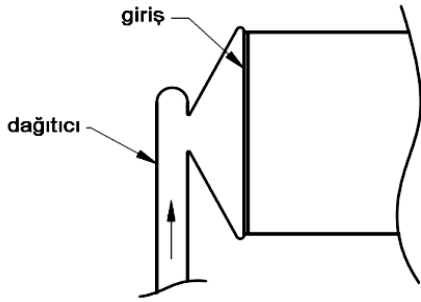
Burada, E , elastikiyet modülü, ν , poisson oranı, ρ , numunedeki eğiklik yarıçapı, L , bükülmüş numunenin boyu ve Φ , katman kaldırılmış yüzeyin tepe noktasının düzleme uzaklığıdır. $2Z_0$, numune kalınlığını ve Z_1+Z_0 , katman kaldırma işleminden sonra kalan kalınlığı ifade eder (Şekil 2.1).



Şekil 2.1 Eğiklik yarıçapı [18] (The radius of curvature)

3. DENEYSEL ÇALIŞMA (EXPERIMENTAL)

Polistiren, plastik parça üretiminde sıklıkla tercih edilen bir malzemedir. Bu çalışmada polistiren parçalardaki kalıntı gerilmelere kalıplama şartlarının etkisi araştırılmıştır.



Şekil 3.1 Giriş tasarımı (The design of the gate)

Tablo 3.1 Polistirenin özellikleri (Properties of polystyrene)

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	
Camsı geçiş sıcaklığı (T_g)	100	°C

100 x 40 x 2 mm³ ebatlarında dikdörtgen prizma parçalar özellikleri Tablo 3.1'de verilen polistiren (DOW Styron 678E) malzeme kullanılarak, ARBURG ALLROUNDER 220S 250-60 marka enjeksiyon presinde kalıplanarak üretilmiştir. Kalıp boşluğuna giriş, Şekil 3.1'de görüldüğü gibi parçanın kısa kenarı boyunca verilmiştir.

3.1. DENEY TASARIMI (The Design of Experiment)

Plastik enjeksiyon kalıplamada sağlıklı ürün elde etmek için belli başlı parametreler vardır. Bunlardan temel olan altı kalıplama şartı deney faktörleri olarak alınmıştır. PS üretici firmanın önerileri doğrultusunda her faktör için üç seviye belirlenmiştir (Tablo 3.2). Etkili faktörlerin saptanması için, Taguchi deney tasarımının L_{27} (3^6) standart ortogonal dizisi uygulanmıştır (Tablo 3.3).

Tablo 3.2 DENEY faktörleri (The factors of the experiment)

KALIPLAMA ŞARTLARI	SEVİYELER		
	1	2	3
(A) Enjeksiyon Basıncı (Bar)	650	1000	1550
(B) Enjeksiyon Sıcaklığı (°C)	220	250	280
(C) Kalıp Sıcaklığı (°C)	30	45	60
(D) Ütülme Basıncı (Bar)	300	500	700
(E) Ütülme Süresi (s)	3	5.1	7.2
(F) Soğutma Süresi (s)	7.0	11.5	16.5

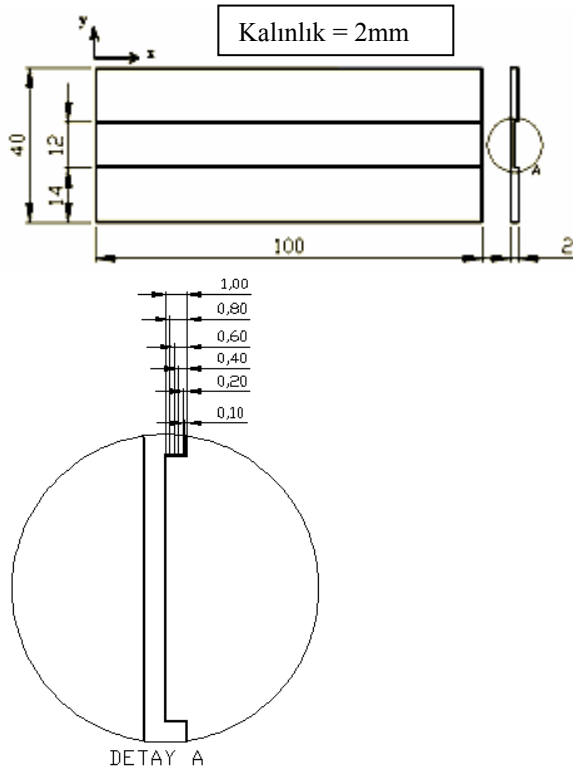
Tablo 3.3 Taguchi L_{27} ortogonal dağılımı (Taguchi's L_{27} orthogonal array)

No	A	B	C	D	E	F
L1	1	1	1	1	1	1
L2	1	1	1	1	2	2
L3	1	1	1	1	3	3
L4	1	2	2	2	1	1
L5	1	2	2	2	2	2
L6	1	2	2	2	3	3
L7	1	3	3	3	1	1
L8	1	3	3	3	2	2
L9	1	3	3	3	3	3
L10	2	1	2	3	1	2
L11	2	1	2	3	2	3
L12	2	1	2	3	3	1
L13	2	2	3	1	1	2
L14	2	2	3	1	2	3
L15	2	2	3	1	3	1
L16	2	3	1	2	1	2
L17	2	3	1	2	2	3
L18	2	3	1	2	3	1
L19	3	1	3	2	1	3
L20	3	1	3	2	2	1
L21	3	1	3	2	3	2
L22	3	2	1	3	1	3
L23	3	2	1	3	2	1
L24	3	2	1	3	3	2
L25	3	3	2	1	1	3
L26	3	3	2	1	2	1
L27	3	3	2	1	3	2

3.2. Kalıntı Gerilme Ölçümleri (The Measurement of Residual Stresses)

Tablo 3.3'deki şartlar kullanılarak $27 \times 5 = 135$ adet numune üretilmiştir. Katman kaldırma işlemleri HSS parmak freze kesici takım ile ($S=1000$ dev/dak, $F=500$ mm/dak) CNC freze tezgâhında yapılmıştır. Şekil 3.2'te katman kaldırma işlemi şematik olarak görülmektedir. İlk iki katman 0,1 mm, diğer dört katman 0,2 mm kalınlıkta kaldırılmıştır. Her bir katman kaldırma işlemi sonrasında, parçalar x-y düzlemine konumlandırılarak fotoğraflanmışlardır.

Daha sonra, görüntü işleme yazılımı kullanılarak bu fotoğraflar üzerinden eğiklik ölçümleri yapılmıştır.

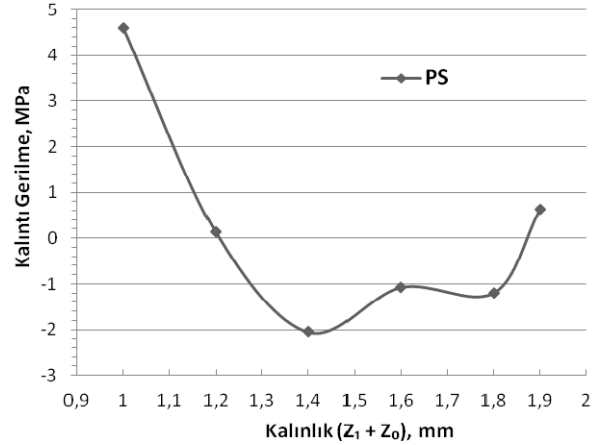


Şekil 3.2 Kaldırılan katmanların yönü ve derinliği (The way and thickness of removed layers)

4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

Bu çalışmada enjeksiyon kalıplama şartlarının düz şekilli kalıplanmış polistiren parçalardaki kalıntı gerilmelere etkileri katman kaldırma yöntemi kullanılarak tespit edilmiştir. Şekil 4.1'de PS numunelerin kalınlık kesiti boyunca ortalama kalıntı gerilme dağılımı grafiği görülmektedir. Kalıntı gerilme değerleri 4,6 MPa ile -2 MPa aralığında değişmiştir. Gerilme dağılımı yüzeyde ve merkezde çekme gerilmesi, ara katmanda basma gerilmesi şeklinde olmuştur. En yüksek çekme gerilmesi çekirdekte, en yüksek basma gerilmesi ise yüzeyden 0,6 mm derinlikte tespit edilmiştir.

Kim ve ark. (2007), Farhoudi (1998), Kamal ve ark. (2002) çalışmalarında, PS parçalarda kalıntı gerilme dağılımının kalınlık boyunca çekme-basma-çekme gerilmesi olarak değiştiğini bulmuşlardır [5, 6, 20]. Bu çalışmadan da elde edilen sonuçlar Şekil 4.1'de görüldüğü gibi çekme-basma-çekme şeklinde çıkmıştır.



Şekil 4.1 PS de kalınlık boyunca kalıntı gerilme dağılımı (Residual stress profile along thickness for PS parts)

Kalıplama şartlarının enjeksiyonla kalıplanmış PS parçalardaki kalıntı gerilmelere etkilerinin istatistiksel açıdan anlamlılığını test etmek için, çekme ve basma kalıntı gerilme değerlerinin en yüksek çıktığı katmanlara varyans analizi (ANOVA) uygulanmıştır. Kalıplama şartlarının yüzey, ara katman ve çekirdekdeki kalıntı gerilmeler üzerinde etkisi varyans analizi sonuçları Tablo 4.1'te verilmiştir. F testi ($\alpha=0,05$) değerlendirmesine göre kalıntı gerilmeler üzerinde;

yüzeyde (C) kalıp sıcaklığının ($F = 4,44$) ve (E) ütüleme süresinin ($F = 3,52$), ara katmanda (A) enjeksiyon basıncının ($F = 4,62$), çekirdekte ise (A) enjeksiyon basıncı ($F = 4,89$) ve (C) kalıp sıcaklığının ($F = 4,31$) etkili olduğu bulunmuştur. Varyans analizi sonucunda PS numunelerdeki kalıntı gerilmeler üzerinde en etkili faktörler sırasıyla, *enjeksiyon basıncı*, *kalıp sıcaklığı* ve *ütüleme süresi* bulunmuştur.

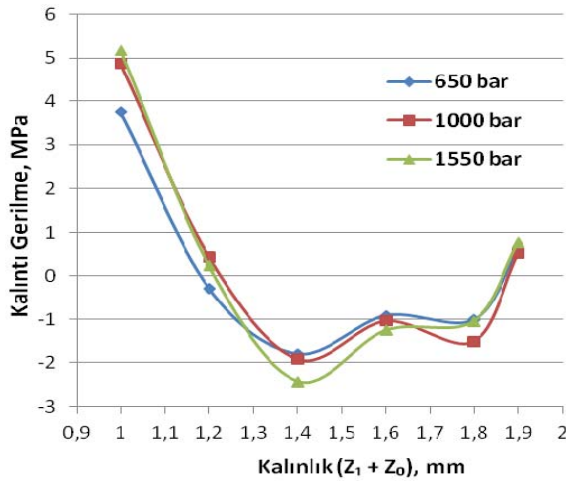
4.1 Enjeksiyon Basıncının Etkisi (The Effects of The Injection Pressure)

PS numunelerdeki kalıntı gerilme dağılımı üzerinde en etkili faktör bulunan enjeksiyon basıncının, üç farklı seviyesi için gerçekleştirilen kalıntı gerilme grafikleri Şekil 4.2'de verilmiştir. Grafikte üç farklı seviye için aynı kalıntı gerilme bölgelerinin oluştuğu ve kıyaslanan üç bölgede de en yüksek kalıntı gerilme değerlerinin, 1550 Bar enjeksiyon basıncında gerçekleştiği görülmektedir. 1550 Bar ve 1000 Bar enjeksiyon basıncı değerleri için çekirdekdeki kalıntı gerilme değerleri birbirine yakın çıkmıştır ve en düşük çekme kalıntı gerilme değeri 650 Bar basınçta gerçekleşmiştir. Üç enjeksiyon basıncı seviyesinde de parça yüzeyindeki çekme kalıntı gerilmeleri yakın değerlerde çıkmıştır.

Tablo 4.1 Yüze, ara katman ve çekirdek kalıntı gerilmeleri varyans analizi sonuçları (Table of ANOVA of residual stresses in surface, near of surface and core regions)

Kalıplama Şartları	SD	Yüze'deki Kalıntı Gerilmeler				Ara Katmandaki (1,4 mm) Kalıntı Gerilmeler				Çekirdek'teki Kalıntı Gerilmeler			
		KT	KO	F	F _s	KT	KO	F	F _s	KT	KO	F	F _s
Enjeksiyon Basıncı	2	0,290	0,145	0,35	3,37	2,047	1,023	4,62	3,37	10,202	5,101	4,89	3,37
Enjeksiyon Sıcaklığı	2	1,636	0,818	1,97	3,37	0,991	0,495	2,24	3,37	3,851	1,926	1,84	3,37
Kalıp Sıcaklığı	2	3,684	1,842	4,44	3,37	1,013	0,506	2,29	3,37	8,991	4,495	4,31	3,37
Ütuleme Basıncı	2	1,078	0,539	1,30	3,37	0,799	0,399	1,81	3,37	1,516	0,758	0,73	3,37
Ütuleme Süresi	2	2,922	1,461	3,52	3,37	0,145	0,072	0,33	3,37	0,899	0,450	0,43	3,37
Soğutma Süresi	2	2,436	1,218	2,94	3,37	0,365	0,182	0,83	3,37	0,160	0,080	0,08	3,37
Hata	14	5,808	0,414			3,100	0,221			14,612	1,044		
Toplam	26	17,856				8,462				40,231			

SD: serbestlik derecesi, KT: kareler toplamı, KO: kareler ortalaması,
Fs: Standart F değeri ($\alpha=0,05$; pay serbestlik derecesi=2, payda serbestlik derecesi = 26)

**Şekil 4.2** Enjeksiyon basıncının etkisi (The effect of the injection pressures)

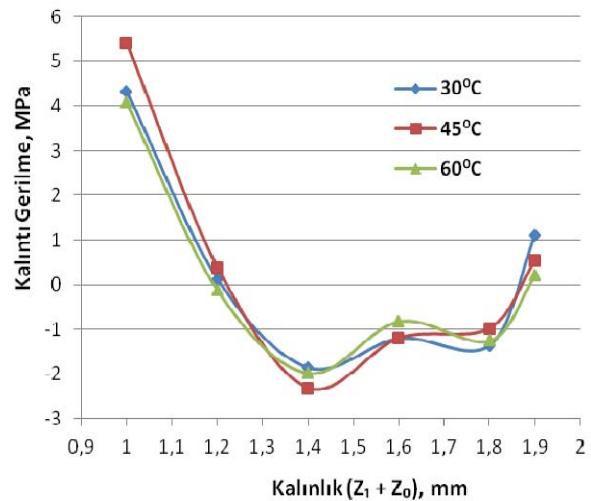
Sonuç olarak, düşük enjeksiyon basıncı seviyesinde, PS parçalardaki toplam kalıntı gerilmelerin en az değerde oluştuğu bulunmuştur. Sen ve Bhattacharya (2000) nişasta/sentetik polimer karışımı malzemeler üzerinde yaptıkları bir çalışmada enjeksiyon basıncının ve kalıp sıcaklığının artırılmasının çekme kalıntı gerilmelerini azalttığını fakat basma kalıntı gerilmeleri üzerinde etkili olmadığını ifade etmişlerdir [21].

4.2. Kalıp Sıcaklığının Etkisi (The Effects of The Mold Temperature)

Kalıp sıcaklığı, literatürde kalıntı gerilmeler üzerinde etkisi en fazla araştırılan kalıplama parametresidir. Bu çalışmada, PS numunelerdeki kalıntı gerilmeler üzerinde ikinci etkili faktör bulunmuştur. Sen ve Bhattacharya (2000), Wang ve Young (2005), Lu ve Khim (2001) çalışmalarında kalıp sıcaklığının kalıntı gerilmeler üzerinde etkili olduğunu ifade etmişlerdir [18, 21, 22]. Şekil 4.3'de üç farklı kalıp sıcaklığı için

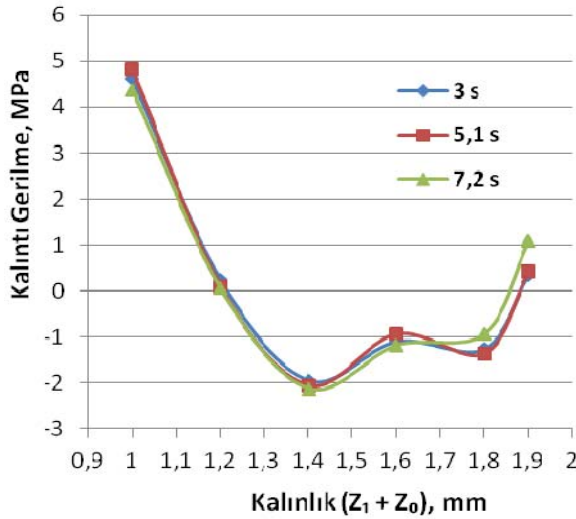
numunelerde oluşan kalıntı gerilme dağılımları karşılaştırılmıştır. Üç sıcaklık değeri için de kalıntı gerilme dağılımı yüze'den çekirdeğe doğru çekme-basma-çekme olarak gerçekleşmiştir.

Grafikte, 60°C kalıp sıcaklığı için yüze'de ve çekirdekte çekme gerilmelerinin azaldığı, 45°C kalıp sıcaklığında çekirdekte ve 0,6 mm derinlikte gerilmelerin en yüksek değeri aldığı, 30°C kalıp sıcaklığında ise yüze'deki en yüksek çekme gerilmesinin oluştuğu görülmektedir. Sen ve Bhattacharya (2000)'da nişasta/sentetik polimer karışımı malzemeler üzerinde yaptıkları bir çalışmada kalıp sıcaklığının artırılmasıyla kalıntı gerilmelerin azaldığını ifade etmişlerdir [21]. Wang ve Young (2005) çalışmalarında, ABS malzeme ile kalıplanmış parçalardaki kalıntı gerilmeler üzerinde kalıp sıcaklığının ve ütuleme basıncının etkili olduğunu bulmuşlardır [18]. Bu çalışmada da kalıp sıcaklığının artırılmasının PS parçalarda kalıntı gerilme oluşumunu azalttığı bulunmuştur.

**Şekil 4.3** Kalıp sıcaklığının etkisi (the effect of the mold temperatures)

4.3. Ütuleme Süresinin Etkisi (The Effects of Packing Time)

Üçüncü etkili faktör bulunan ütuleme süresinin üç farklı seviyesi için elde edilmiş olan kalıntı gerilme dağılımları Şekil 4.4'de verilmiştir. Grafiklerde yüzey ve çekirdek bölgelerindeki kalıntı gerilmelerin farklı ütuleme sürelerinde değişiklik gösterdiği göze çarpmaktadır. Aynı grafikte, yüzeydeki çekme gerilmelerinin, 7,2 s ütuleme süresinde, çekirdekteki çekme gerilmelerinin ise 5,1 s ütuleme süresinde en yüksek değeri aldığı ve 3 s ütuleme süresinde toplam kalıntı gerilmenin azaldığı görülmektedir. Ütuleme süresinin artırılmasının PS parçalardaki kalıntı gerilmeleri artırdığı sonucuna ulaşılmıştır. Sen ve Bhattacharya (2000)'da ütuleme süresinin kalıntı gerilme üzerindeki etkisinin zayıf olduğunu ifade etmişlerdir [21]. Bu çalışmada ütuleme süresinin de kalıntı gerilmeler üzerinde etkili olduğu bulunmuştur.



Şekil 4.4 Ütuleme süresinin etkisi (the effect of the packing times)

5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, altı enjeksiyon kalıplama faktörünün PS numunelerdeki kalıntı gerilmeler üzerinde etkileri araştırılmıştır. Bu faktörlerden enjeksiyon basıncı, kalıp sıcaklığı ve ütuleme süresi faktörlerinin enjeksiyonla kalıplanmış polistiren parçalardaki kalıntı gerilmeler üzerinde etkili faktörler olduğu bulunmuştur. Bu faktörlerin etkileri aşağıda maddeler halinde özetlenmiştir.

- 650 Bar enjeksiyon basıncında parçalardaki kalıntı gerilme değerleri, 1000 Bar ve 1550 Bar basınç değerlerine oranla düşük gerçekleşmiştir. Yüksek ve orta seviye enjeksiyon basıncında ara katmanlar ve çekirdekteki kalıntı gerilme artarken yüzeydeki kalıntı gerilmelerin bu değişimden fazla etkilenmediği bulunmuştur.
- 60°C ve 45°C kalıp sıcaklık değerlerinde parçaların çekirdekteki kalıntı gerilme değerleri

birbirine yakın etki göstererek azalmıştır. Yüzeydeki çekme kalıntı gerilmeleri ise kalıp sıcaklığı artırıldıkça azalmıştır. Ara katmanda oluşan en büyük basma gerilmesi 45°C kalıp sıcaklığında gerçekleşmiştir. Bunlara göre PS parçalarda kalıntı gerilmenin düşük tutulabilmesi için kalıp sıcaklığının yüksek tutulması gerektiği sonucuna ulaşılmıştır.

- 7,2 s ütuleme süresinde parçaların yüzeyindeki çekme ve ara katmandaki basma gerilmeleri artarken, çekirdekteki çekme gerilmeleri azalmıştır. 5,1 s ve 3 s ütuleme sürelerinin parçaların yüzeyindeki kalıntı gerilmelere etkisi çok yakın değerlerde gerçekleşmiştir. Buradan, enjeksiyon esnasında PS parçaların yüksek kalıntı gerilmelerle yüklenmemesi için uzun ütuleme sürelerinin kullanılmaması gerektiği sonucu elde edilmiştir.

SEMBOLLER (NOMENCLATURE)

- L*: bükülmüş numunenin boyu
ρ: numunedeki eğiklik yarıçapı
 Φ : katman kaldırılmış yüzeyin tepe noktasının, düzleme uzaklığı
E: Elastikiyet modülü
v: Poisson oranı
SD: serbestlik derecesi
KT: kareler toplamı
KO: kareler ortalaması
F_s: standart F değeri ($\alpha=0,05$; pay serbestlik derecesi=2, payda serbestlik derecesi = 26)

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışma Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından yüksek lisans projesi (proje no: 07/2009-07) kapsamında maddi olarak desteklenmiştir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Rosato, D.V., Rosato D. V., **Injection Molding Handbook**, Kluwer Academic Publishers, Boston, A.B.D., 1999.
2. Miles, D. C., Briston, J. H., **Polymer Technology**, Chemical Publishing Co. Inc., New York, A.B.D., 1996.
3. Rees, H., **Mold Engineering**, Hanser Publishers, Münih, Almanya, 1995.
4. 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**, Cilt 42, No 5, 1098-1114, 2002.
5. Kim, C., H., Youn, J., R., "Determination of residual stresses in injection-moulded flat plate:

- Simulation and experiments”, **Polymer Testing**, Cilt 26, 862–868, 2007.
6. 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**, Cilt 38, No 1, 21-37, 1998.
 7. Wen-Bin Young, “Residual stress induced by solidification of thermoviscoelastic melts in the postfilling stage”, **Journal of Materials Processing Technology**, Cilt 145, 317–324, 2004.
 8. Zoetelief, W.F., Douven, L. F. A., Ingen Housz, A.J., “Residual Thermal Stresses in Injection Molded Products”, **Polymer Engineering and Science**, Cilt 36, No 14, 1886-1896, 1996.
 9. Chen, X., Lam, Y.C., Li, D.Q., “Analysis of thermal residual stress in plastic injection molding”, **Journal of Materials Processing Technology**, Cilt 101, 275-280, 2000.
 10. W. T. Read, Jr., and R. G. Treuting, “A Mechanical Determination of Biaxial Residual Stress in Sheet Materials”, **Journal of Applied Physics**, Cilt 22, 130 (1951).
 11. A. I. Isayev, ed., **Injection and Compression Molding Fundamentals**, Marcel Dekker Inc., New York, A.B.D., 1987.
 12. Kafkas, F., Karataş, Ç., Sarıtaş, S., “Effect of heat treatment conditions and densities on residual stresses at Hyrid (FLN2-4405) P/M steels”, **Material Science Forum**, Trans Tech Publications Switzerland, Vols. 534-536, pp 669-672, 2007.
 13. F. Kafkas, Ç. Karataş, A. Sözen, E. Arcaklıoğlu, S. Sarıtaş, Determination of Residual Stresses Based on Heat Treatment Conditions and Densities on a Hybrid (FLN2-4405) P/M Steel Using Artificial Neural Network, **Materials & Design**, Volume 28, Issue 9, 2007, Pages 2431-2442, 2007.
 14. Yiğit, O., Dilmeç, M., Halkacı, S., “Tabaka Kaldırma Yöntemi İle Kalıntı Gerilmelerin Ölçülmesi ve Diğer Yöntemlerle Karşılaştırılması”, **Mühendis ve Makine**, Cilt 49, No 579, 20-27, 2008.
 15. Turnbull, A., Maxwell, A. S., Phillai, S., “Residual stress in polymers—evaluation of measurement techniques”, **Journal of Material Science**, Cilt 34, 451-459, 1999.
 16. Wang, C., Lee, W. B., To, S., “Birefringence techniques for characterization of residual stresses in injection molded microlens arrays”, **Polymer Testing**, Cilt 28, 709–714, 2009.
 17. Savaşçı, Ö. T., Uyanık, N., Akovalı, G., **Plastikler ve Plastik Teknolojisi**, Çantay Kitabevi, İstanbul, Türkiye, 1998.
 18. Wang, T. H., Young, W. B., “Study on residual stresses of thin-walled injection molding”, **European Polymer Journal**, Cilt 41, 2511-2517, 2005.
 19. Katmer, Ş., Karataş, Ç., Ünal, H.İ., “Effects of Injection Molding Conditions on Residual Stresses in Injection Molded Amorphes and Semi-Crystalline Flat Plates: Experiments”, **PPS 26 – IST (Proceeding of the Polimer Processing Society 26th Regional Meeting)**, October 20-23, 2010, Istanbul, TURKEY.
 20. Farhoudi, Y., **Measurement and Computation of Thermal Stresses in Injection Molding of Amorphous and Crystalline Polymers**, Doktora Tezi, McGill Üniversitesi, Kimya Mühendisliği Bölümü, 1998.
 21. Sen, A., Bhattacharya, M., “Residual stresses and density gradient in injection molded starch/synthetic polymer blends”, **Polymer**, Cilt 41, 9177–9190, 2000.
 22. Lu, X., Khim, L. S., “A Statistical Experimental Study of The Injection Molding of Optical Lenses”, **Journal of Materials Processing Technology**, Cilt 113, 189-195, 2001.

