

YYPE VE PP PARÇALARDAKİ KALINTI GERİLMELERE ENJEKSİYON KALIPLAMA ŞARTLARININ ETKİLERİ

Şükran KATMER¹, Çetin KARATAŞ²

¹Yalova Üniversitesi, Yalova Meslek Yüksekokulu, Malzeme ve Malzeme İşleme Teknolojileri Bölümü Yalova

²Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İmalat Mühendisliği Bölümü, Teknikokullar Ankara

sukran.katmer@yalova.edu.tr, cetink@gazi.edu.tr

(Geliş/Received: 13.03.2014; Kabul/Accepted: 29.06.2015)

ÖZET

Bu çalışmada enjeksiyon kalıplama şartlarının kalıplanmış plastik parçalardaki kalıntı gerilmelere ve çekme dayanımlarına etkileri araştırılmıştır. Altı kalıplama şartı (enjeksiyon basıncı, enjeksiyon sıcaklığı, kalıp sıcaklığı, ütüleme basıncı, ütüleme süresi ve soğutma süresi) ve her bir faktörün üç seviyesi çalışılmıştır. Deney sayısının azaltılması için Taguchi Deney Tasarımı kullanılmıştır. Dikdörtgen şekilli deney parçaları yüksek yoğunluklu polietilen (YYPE) ve polipropilen (PP) malzemelerden kalıplanmıştır. Kalıntı gerilmelerin ölçümü için katman kaldırma yöntemi kullanılmıştır. Kalıntı gerilme olarak YYPE’de 3,5 MPa, PP’de 0,6 MPa çekme kalıntı gerilmesi; YYPE’de -0,6 MPa, PP’de - 0,16 MPa basma kalıntı gerilmesi elde edilmiştir. Kalıntı gerilmeye YYPE parçalarda etkinlik sırasıyla, soğutma süresi, enjeksiyon sıcaklığı ve ütüleme basıncı etkili olurken, PP parçalarda ise, soğutma süresi, enjeksiyon sıcaklığı ve kalıp sıcaklığı etkili olmuştur.

Anahtar Kelimeler: Enjeksiyon kalıplama, kalıntı gerilme, çekme dayanımı, katman kaldırma tekniği, YYPE, PP, Taguchi deney tasarımı

EFFECTS OF INJECTION MOLDING CONDITIONS ON RESIDUAL STRESS IN HDPE AND PP PARTS

ABSTRACT

This research examines effects of molding conditions on residual stress and tensile strength of injection molded plastic parts. Six factors (injection pressure, melt temperature, mold temperature, packing pressure, packing time and cooling time) and three levels of each factor were examined. Taguchi experimental setup was used to reduce the number of experiments. The rectangular shaped flat parts were molded using high density polyethylene (HDPE) and polypropylene (PP) samples. The layer removal technique was used to prediction of the residual stresses. Results show that the influential factors are cooling time, melt temperature and packing pressure on HDPE parts, and cooling time, melt temperature and mold temperature on PP parts.

Keywords: Injection molding, residual stress, tensile strength, layer removal technique, HDPE, PP, Taguchi’s experimental design

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Plastik enjeksiyon kalıplama polimer ergiyiğın kalıp boşluğuna belirlenen kalıplama şartlarıyla itildiğı ve plastik parça formunda soğutulurak katılaştırıldığı bir süreçtir. Enjeksiyon kalıplamanın en önemli avantajı karmaşık geometrili parçaların kolayca kalıplanabilmesidir. Enjeksiyon kalıplama şartları; kalıp sıcaklığı, enjeksiyon basıncı, enjeksiyon hızı, enjeksiyon sıcaklığı, ütüleme basıncı ütüleme süresi, soğutma süresi, vb. olarak sıralanabilir. Bu kalıplama

şartları optimum olarak verilmezse parçada çarpılma, orantısız çekme, kalıntı gerilme, vb. hatalar oluşur. Huang ve Tai (2001) bir çalışmalarında [1] ütüleme basıncının enjeksiyonla kalıplanmış Polikarbonat/ Akrlonitril bütadien stiren (PC/ABS) karışımı ince cidarlı parçaların çarpılmaları üzerindeki en önemli faktör olduğunu ve bunu kalıp sıcaklığı, enjeksiyon sıcaklığı ve ütüleme süresinin takip ettiğini belirtmişlerdir. Kalıplanmış parçalardaki hatalar, kalıplama esnasında birçok faktörün etkisiyle oluşmaktadır. Bu hatalar parçanın ölçüsel kararlılığını

ve kalitesini etkilemektedir. Kalıntı gerilmelerin tahmin edilmesi için Young (2004) [2] tarafından teorik bir visko-elastik model, Kabanemi ve ark. (1998) [3] tarafından da, visko-elastik yaklaşıma sahip başka bir teorik model geliştirilmiştir. Çalışmalarında, simülasyon çalışmaları sonucunda kalıntı gerilmelerin teorik olarak tahmin edilebileceğini belirtmektedirler [2, 3].

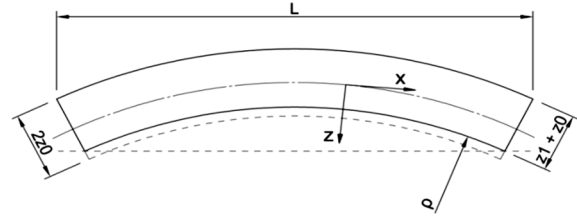
Kalıplama şartlarının parçalar üzerindeki etkisini gösteren, Ozcelik ve Erzurumlu (2006)'nun yaptığı bir çalışmada da; ütüleme basıncının, kalıp sıcaklığının, ütüleme süresinin, enjeksiyon sıcaklığının ve soğutma süresinin kalıplanan parçalardaki çarpılmalar üzerinde önemli etkiye sahip olduğu belirtilmektedir [4].

Kalıntı gerilmeler kalıplamanın akış, sıcaklık ve basınç geçişinin sonucu oluşur ve oluşma nedenlerine göre ikiye ayrılırlar: akış gerilmeleri ve ısıl gerilmeler. Bunlar, enjeksiyonla kalıplanmış parçalardaki orantısız çekme ve çarpılmaların temel sebepleridir. Kalıntı gerilmeler, kalıplama sırasında kalıp boşluğundaki farklı sıcaklık dağılımı nedeniyle oluşmakta ve parça kalıptan çıkartılıp, ortam sıcaklığına kadar soğutulduğunda da hâlâ parça üzerinde kalmaktadırlar. Kamal ve ark. (2002) [5], enjeksiyon kalıplama esnasında kalıntı gerilmelerin rahatlaması için soğutma hızının önemine değinmişlerdir. Sen ve Bhattacharya (2000) [6] da nişasta ve sentetik polimer karışımlarından kalıplanmış parçalardaki kalıntı gerilmeler üzerine yaptıkları bir çalışmada, enjeksiyon sıcaklığının etkisiz, kalıp sıcaklığının etkili olduğunu ve ütüleme basıncının ütüleme süresine oranla daha etkili olduğunu ifade etmişlerdir. Katmer ve Karataş (2012) [7], enjeksiyonla kalıplanmış polistiren (PS) parçalardaki kalıntı gerilmeler üzerinde en etkili kalıplama şartlarının; enjeksiyon basıncı, kalıp sıcaklığı ve ütüleme süresi olduğunu tespit etmişlerdir.

Kalıntı gerilmelere parça yüzeyinde kalıp sıcaklığı ve ütüleme süresi daha etkin, parçanın iç kısımlarda ise enjeksiyon basıncı ve kalıp sıcaklığının etkili olduğunu belirtmişlerdir [7].

Katman kaldırma tekniği, düz bir parçanın yüzeyinden ince tabakalar kaldırılması ve katman kaldırma sonrasında kaldırılan tabakadaki gerilme değeriyle orantılı olarak parçanın deforme olması esasına dayanan kalıntı gerilme ölçme yöntemidir. Numune Şekil 1'de görüldüğü gibi katman kaldırma işleminden sonra dairesel şekilde çarpılır ve bu eğilme kaldırılan tabakadaki gerilmenin bir fonksiyonudur.

Eşitlik (1) ve (2) kullanılarak, deformasyon ile kaldırılan katmanın kalıntı gerilme değeri arasında ilişki kurulabilmektedir [8]. Akışa paralel ve dik (x ve y yönü) yönlerdeki gerilmeler eşit kabul edilmiştir.



Şekil 1. Eğikliğin ölçümü (Determination of the curvature of a deformed bar)

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

$$Kx = 1/\rho \quad (2)$$

Burada, E, elastikiyet modülü, ν , poisson oranı, ρ , numunedeki eğiklik yarıçapı, L, bükülmüş numunenin boyudur. $2Z_0$, numune kalınlığını ve Z_1+Z_0 , katman kaldırma işleminden sonra kalan kalınlığı ifade eder (Şekil 1).

Kalıplama şartları parçaların mekanik özellikleri üzerinde de etkilidir. Zhou ve Mallick (2005) enjeksiyon sıcaklığı ve ütüleme basıncının, %40 talk katkılı PP numunelerin çekme ve yorulma dayanımları üzerinde etkili olduğunu belirttiktedirler [9]. Vianna (2005) kalıplama şartlarının polimerlerin mekanik özellikleri ve morfolojisi üzerine etkilerini araştırmıştır [10]. Çalışmada, enjeksiyon sıcaklığı, kalıp sıcaklığı ve enjeksiyon hızı parametrelerinin PP'nin morfolojisi ve çekme dayanımına etkilerini incelemiştir. PP'nin çekme dayanımı, enjeksiyon sıcaklığı ve enjeksiyon hızının azaltılmasıyla artarken, kalıp sıcaklığının düşürülmesiyle de azalmaktadır [10]. Plastik parçaların çekme dayanımı çekme test hızıyla da değişmektedir, yüksek çekme hızlarında random PP daha yüksek çekme dayanımı göstermektedir [11].

Bu çalışmada, enjeksiyon kalıplama işleminin bütün aşamalarını kapsayan altı kalıplama şartının ve bunların üçer seviyesinin (enjeksiyon basıncı, enjeksiyon sıcaklığı, kalıp sıcaklığı, ütüleme basıncı ve süresi, soğutma süresi), yüksek yoğunluklu polietilen ve polipropilen parçalardaki kalıntı gerilmelere ve çekme dayanımlarına etkisi deneysel olarak araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar üzerinden kalıplanan parçalarda minimum kalıntı gerilme oluşumu için kalıplama şartlarının optimum seviyeleri belirlenmiştir.

2. DENEYSEL ÇALIŞMA (EXPERIMENTAL STUDY)

Bu çalışmada Tablo 1'de özellikleri verilen YYPE (PETKIM Petilen YY I668 (UV)) ve PP (PETKIM Petoplen MH 418) malzemeler kullanılmıştır. $100 \times 40 \times 2 \text{ mm}^3$ boyutlarında dikdörtgen kesitli plaka şeklinde ve çekme çubuğu (ASTM D638-08 Tip IV) numuneler enjeksiyonla kalıplanmıştır. Kalıplama şartlarının YYPE ve PP parçalardaki kalıntı

gerilmelere etkilerinin belirlenmesi için Tablo 2’de verilen seviyeler kullanılmıştır. Kalıplama şartlarının alt ve üst sınır değerleri belirlenirken “Arburg Practical Guide to Injection Moulding” kitabındaki değerler esas alınmıştır [12]. Çekme çubuğu 3,2 mm dikdörtgen düz plaka numuneler de 2 mm et kalınlığındadır. Ayrıca, uygulanan Taguchi Deney Tasarımı, L27 ortogonal dağılım, Tablo 3’te verilmiştir.

Tablo 1. YYPE ve PP Malzemelerin Özellikleri (The properties of materials (PP and HDPE))

Özellikler	Birim	YYPE	PP
Ergime Akış İndeksi	g/10 dak.	4.5-6.0	4.0-6.0
Yoğunluk (23°C)	g/cm ³	0.963-0.967	0.905
Akmada Çekme Dayanımı	MPa	30	34
Kopmada Çekme Dayanımı	MPa	17	42
Kopmada Uzama	%	1250	
Izod Darbe Dayanımı	J/m	50	
Çevresel Yüzey Çatlağı	saat	4	
Elastiklik Modülü (E)	MPa	1100	1300
Poisson Oranı (ν)	-	0,35	0,35

Ütüleme ve soğutma süreleri numunelerin et kalınlıklarına göre Eşitlik 3, 4, ve 5 kullanılarak belirlenmiştir.

$$t_{kn} = d(1+2d) \quad (3)$$

$$t_n = 0,3t_{kn} \quad (4)$$

$$t_k = 0,7 t_{kn} \quad (5)$$

Eşitlik 3’te t_{kn} soğutma ve ütüleme süresinin toplamını; d, parça et kalınlığını göstermektedir. Eşitlik 4’te t_n ütüleme süresini, Eşitlik 5’te de t_k kalan soğutma süresini ifade etmektedir.

Tablo 2. Numunelerin kalıplama şartları (The molding conditions of specimens)

Faktörler	Seviyeler					
	YYPE			PP		
(A) Enjeksiyon Basıncı (bar)	600	950	1350	800	1100	1400
(B) Enjeksiyon Sıcaklığı (°C)	220	250	280	220	255	290
(C) Kalıp Sıcaklığı (°C)	30	45	60	20	40	60
(D) Ütüleme Basıncı (bar)	300	550	800	500	800	1100
(E) Ütüleme Süresi (s)	3° / 5.2*	5.1° / 7.9*	7.2° / 9.4*	3° / 5.2*	5.1° / 7.9*	7.2° / 9.4*
(F) Soğutma Süresi (s)	7.0° / 12.1*	11.5° / 16.4*	16.5° / 20.6*	7.0° / 12.1*	11.5° / 16.4*	16.5° / 20.6*

° dikdörtgen prizma numuneler için uygulanan ütüleme süresi ve soğutma süresi değerleridir.

* çekme çubuğu numuneler için uygulanan ütüleme süresi ve soğutma süresi değerleridir.

Tablo 3. Taguchi L₂₇ otogonal dağılım deney tasarımı (Taguchi’s experiment design (L₂₇ orthogonal pattern))

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

Kalıntı gerilmelerin tespit edilmesi için katman kaldırma işlemi yapılmıştır. Yüzeyden itibaren, parça kalınlığı 1 mm’ye düşene kadar, 0,2 mm kalınlığında tabakalar kaldırılmıştır. Her tabaka kaldırma işleminden sonra numunelerdeki deformasyon fotoğraf tabanlı ölçüm sistemiyle ölçülmüştür. Katmanlardaki ölçülen deformasyon değerleri üzerinden Eşitlik 1 ve 2 kullanılarak, tabakalardaki kalıntı gerilmeler hesaplanmıştır.

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

Kalıntı Gerilmeler

Kalıntı gerilmeler YYPE ve PP dikdörtgen kesitli numuneler (100x40x2) için kalınlığı 1mm’ye düşene kadar beş katmanda ölçülmüştür. Her iki malzemenin kalıntı gerilme verilerine varyans analizi uygulanmış ve sonuçlar F testi ($\alpha=0,05$; pay serbestlik derecesi=2; payda serbestlik derecesi=26 değişkenlerine göre standart F değeri; $F_s= 3,37$ ’dir.) ile değerlendirilmiştir. F değeri, standart F değerinin (F_s) üzerinde bulunan faktörlerin sonuçlar üzerindeki etkisi istatistiksel olarak anlamlıdır ve dikkate alınmalıdır.

Tablo 4’te verilmiş olan varyans analizi sonuçlarına göre, soğutma süresi ve enjeksiyon sıcaklığı YYPE (F değerleri sırasıyla: 6,10; 3,72) ve PP (F değerleri sırasıyla: 5,51; 4,24) parçalardaki kalıntı gerilmeler üzerinde en etkili faktörler bulunmuşlardır. Bunları YYPE’de ütüleme basıncı ($F=3,05$), PP’de ise kalıp sıcaklığı ($F=2,87$) takip etmiştir. Ütüleme basıncı ve kalıp sıcaklığı şartlarının F değerleri F_s ’den küçük olmasına rağmen, F_s ’ye yakın değerlerde oldukları için etkileri dikkate alınmıştır.

Tablo 4. YYPE ve PP kalıntı gerilme Varyans Analizi Sonuçları (Results of ANOVA of residual stresses for HDPE and PP)

Faktör	SD	F _s	Yüzey				Ara düzlem				Çekirdek			
			KT	KO	F	P	KT	KO	F	P	KT	KO	F	P
YYPE														
(A)	2	3,37	3,55	1,77	0,48	0,62	0,03	0,01	0,77	0,48	0,01	0,00	0,32	0,73
(B)	2	3,37	6,30	3,15	0,85	0,44	0,16	0,08	3,72	0,05	0,10	0,05	1,79	0,20
(C)	2	3,37	3,40	1,70	0,46	0,63	0,01	0,00	0,23	0,79	0,06	0,03	1,04	0,38
(D)	2	3,37	9,51	4,75	1,29	0,30	0,08	0,04	1,99	0,17	0,17	0,08	3,05	0,08
(E)	2	3,37	3,89	1,94	0,53	0,60	0,02	0,01	0,55	0,58	0,10	0,05	1,82	0,19
(F)	2	3,37	6,77	3,38	0,92	0,42	0,27	0,13	6,10	0,01	0,08	0,04	1,37	0,28
Hata	14		51,6	3,96			0,31	0,02			0,40	0,02		
Toplam	26		85,1				0,91				0,95			
PP														
(A)	2	3,37	1,11	0,55	0,76	0,48	0,06	0,03	0,91	0,42	0,16	0,08	1,44	0,27
(B)	2	3,37	3,34	1,67	2,27	0,14	0,30	0,15	4,24	0,03	0,01	0,00	0,13	0,87
(C)	2	3,37	2,14	1,07	1,46	0,26	0,20	0,10	2,87	0,09	0,01	0,00	0,11	0,9
(D)	2	3,37	1,78	0,89	1,21	0,32	0,05	0,02	0,73	0,5	0,02	0,01	0,24	0,78
(E)	2	3,37	2,18	1,09	1,48	0,26	0,04	0,02	0,61	0,56	0,04	0,02	0,43	0,66
(F)	2	3,37	8,13	4,06	5,51	0,01	0,19	0,09	2,8	0,09	0,04	0,02	0,37	0,69
Hata	14		10,3	0,73			0,49	0,03			0,79	0,05		
Toplam	26		29,0				1,36				1,10			

KT: Kareler Toplamı, KO: Kareler Ortalaması SD: Serbestlik Derecesi, F_s: standart F değeri (α=0,05; pay serbestlik derecesi=2, payda serbestlik derecesi = 26) A: Enjeksiyon Basıncı, B:Enjeksiyon Sıcaklığı, C: Kalıp Sıcaklığı, D: Ütuleme Basıncı, E:Ütuleme Süresi, F:Soğutma Süresi

Tablo 4'te soğutma süresi ve enjeksiyon sıcaklığı YYPE parçaların ara düzlemdeki kalıntı gerilmeler üzerinde etkiliyken, ütüleme basıncının çekirdekteki kalıntı gerilmeler üzerinde etkin olduğu belirlenmiştir. PP parçalarda, soğutma süresi yüzeydeki ve ara düzlemdeki kalıntı gerilmeler üzerinde etkili olurken, enjeksiyon sıcaklığı ve kalıp sıcaklığının sadece ara düzlemdeki kalıntı gerilmelere etki ettiği tespit edilmiştir.

Çekme Dayanımı

Çekme testleri sonucunda elde edilen, çekme dayanımı değeri için SN oranları, Taguchi'nin "büyük iyidir (larger is better)" prensibine göre hesaplanmıştır. Sonuçlar, SN oranları üzerinden varyans analizi (ANOVA) ile değerlendirilmiştir

(Tablo 5). F-testi (α=0,05) değerlendirmesiyle faktörlerin önemi tanımlanmıştır. Varyans analizi sonuçlarında ütüleme süresinin (F=19,26) YYPE parçaların çekme dayanımları üzerinde etkisinin istatistiksel açıdan anlamlı olduğu bulunmuştur. Enjeksiyon sıcaklığının çekme dayanımına etkisi (F=2,66) F testi değerlendirmesinde dışarıda kalsa da yakın değerlerde çıktığı için dikkate alınmıştır. Diğer kalıplama şartları YYPE'nin çekme dayanımı üzerinde etkili bulunmamıştır. PP parçaların çekme dayanımının varyans analizi sonuçları (Tablo 5) incelendiğinde; F testi (α=0,05) değerlendirme sonuçlarına göre, enjeksiyon sıcaklığı (F=108,1) ve ütüleme basıncı (F=37,74) parametrelerinin kalıplanmış PP parçaların çekme dayanımı üzerinde etkili olduğu belirlenmiştir.

Tablo 5. YYPE ve PP için çekme dayanımı varyans analizi (ANOVA) sonuçları (Results of ANOVA of yield strength for HDPE and PP)

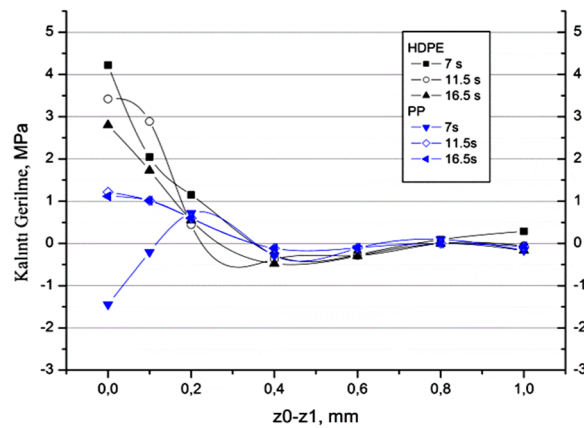
Faktör	S	D	F _s	YYPE Çekme Dayanımı				PP Çekme Dayanımı			
				KT	KO	F	P	KT	KO	F	P
(A) Enj. Bas.	2	3,37	0,039	0,01	0,654	0,534	0,019	0,009	1,478	0,261	
(B) Enj. Sıcak.	2	3,37	0,160	0,08	2,668	0,104	1,391	0,695	108,1	0,000	
(C) Kalıp Sıcak.	2	3,37	0,016	0,008	0,270	0,766	0,002	0,001	0,199	0,821	
(D) Ütüleme Bas.	2	3,37	0,024	0,01	0,412	0,669	0,485	0,242	37,74	0,000	
(E) Ütüleme S.	2	3,37	1,143	0,57	19,261	0,0001	0,015	0,007	1,179	0,336	
(F) Soğut. S.	2	3,37	0,062	0,03	1,037	0,380	0,001	0,000	0,092	0,912	
Hata	14		0,420	0,03			0,09	0,006			
Toplam	26		1,866				2,005				

KT: Kareler Toplamı, KO: Kareler Ortalaması SD: Serbestlik Derecesi, F_s: standart F değeri (α=0,05; pay serbestlik derecesi=2, payda serbestlik derecesi = 26) A: Enjeksiyon Basıncı, B:Enjeksiyon Sıcaklığı, C: Kalıp Sıcaklığı, D: Ütüleme Basıncı, E:Ütüleme Süresi, F:Soğutma Süresi

Burada, YYPE ve PP parçaların kalıntı gerilmeleri üzerinde etkili bulunan; soğutma süresi, enjeksiyon sıcaklığı, ütüleme basıncı, ütüleme süresi ve kalıp sıcaklığı şartlarının etkileri detaylı olarak incelenmiştir. Ayrıca YYPE ve PP parçaların çekme dayanımlarında etkili olan enjeksiyon sıcaklığı, ütüleme basıncı ve ütüleme süresi şartları incelenirken kalıntı gerilmeleriyle olan ilişkisi de incelenmiştir.

3.1 Soğutma Süresinin Etkisi (Effects of Cooling Time)

PP ve YYPE parçalarda farklı soğutma sürelerinde (7 s, 11,5 s ve 16,5 s) oluşan kalıntı gerilme grafikleri Şekil 2’de verilmiştir. Soğutma süresi enjeksiyonla kalıplanmış PP ve YYPE parçalardaki kalıntı gerilmeler üzerinde en etkili faktör bulunmuştur. PP parça yüzeyinde 7 s’lik soğutma süresinde basma kalıntı gerilmesi, 11,5 s ve 16,5 s soğutma sürelerinde ise çekme kalıntı gerilmesi oluşmuştur. YYPE parçaların yüzeyinde ise soğutma süresinin üç seviyesinde de çekme kalıntı gerilmesi oluşmuştur (Şekil 2). Yüzey bölgesinde en düşük kalıntı gerilmenin 16,5 s soğutma süresinde olduğu görülmektedir. Kalınlık boyunca soğutma süresiyle kalıntı gerilme dağılımları incelendiğinde, toplam kalıntı gerilmenin, 16,5s soğutma süresinde en düşük, 7s’de de en yüksek gerçekleştiği bulunmuştur. Soğutma süresinin her iki malzemenin çekme dayanımı üzerinde etkili olmadığı varyans analizi sonuçlarıyla açıklanmıştır (Tablo 5). Deneylerden edinilen sonuçlara göre, daha düşük kalıntı gerilmeli parçalar kalıplamak için, YYPE malzemede uzun soğutma süresi, PP malzemede de yüzeyde basma kalıntı gerilmesinin olduğu düşük seviye soğutma süresi optimum değerdir. Yüzeyde basma kalıntı gerilmesi parçaların yüzey çatlaklarına karşı korunmasında ve yorulma dayanımının artmasında olumlu rol oynamaktadır [13, 14].

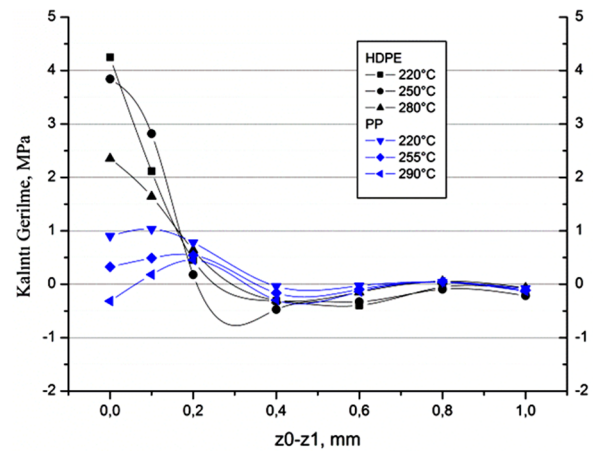


Şekil 2. YYPE ve PP için soğutma süresinin etkisi (Effect of cooling time for HDPE and PP)

3.2 Enjeksiyon Sıcaklığının Etkisi (Effects of Melt Temperature)

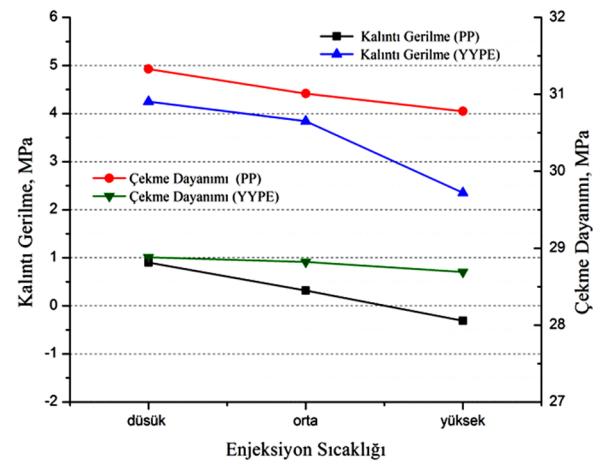
Enjeksiyon sıcaklığı, PP ve YYPE parçalardaki kalıntı gerilmeler üzerinde ikinci etkili kalıplama şartı olmuştur. Farklı enjeksiyon sıcaklıklarında parçalarda

oluşan kalıntı gerilme grafikleri Şekil 3’te görülmektedir. Enjeksiyon sıcaklığı 220°C’den 280°C’ye arttırıldığında YYPE parçaların yüzeyindeki kalıntı gerilmeler 4,25 MPa’dan 2,35 MPa’ya düşmüştür. PP parçalarda da enjeksiyon sıcaklığı arttırıldığında yüzeydeki çekme gerilmeleri azalmış ve enjeksiyon sıcaklığının en yüksek seviyesinde basma gerilmesine dönmüştür. Yarı-kristal yapıdaki YYPE ve PP malzemeler için sıcaklık ve soğumanın dolayısıyla sürenin kristalleşme için önemli olduğu bilinmektedir. Bu çalışmadan da elde edilen sonuçlar, yüksek enjeksiyon sıcaklığında, kalıntı gerilmenin daha düşük değerlerde oluştuğunu göstermiştir. Buradan, malzemenin optimum veya optimuma yakın molekül düzenlenmesinin sağlanarak kalıplama esnasında oluşan gerilmelerin rahatladığı sonucu çıkarılmıştır.



Şekil 3. YYPE ve PP için enjeksiyon sıcaklığının etkisi (The effect of melt temperatures for HDPE and PP)

Şekil 4’te enjeksiyon sıcaklığının YYPE ve PP parçaların yüzey bölgesindeki kalıntı gerilme değerleriyle, aynı malzemelerin çekme dayanımı değerlerinin karşılaştırılması yapılmıştır. Bu şekil incelendiğinde, artan enjeksiyon sıcaklığıyla, çekme dayanımlarının azaldığı görülmektedir.



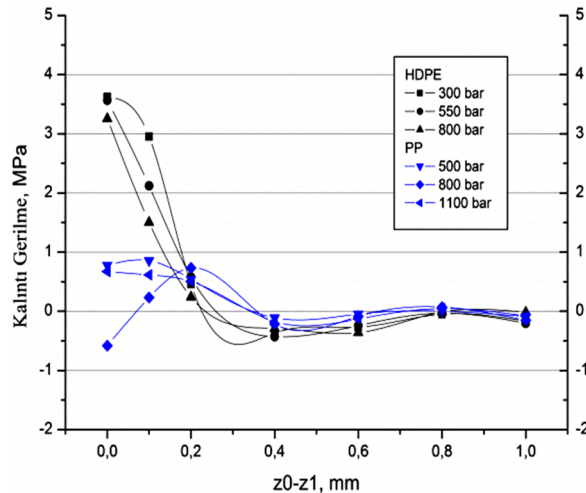
Şekil 4. Kalıntı gerilme ve çekme dayanımının enjeksiyon sıcaklığıyla değişimi (Melt temperature vs. residual stress, and tensile strength)

YYPE malzemede yüksek enjeksiyon sıcaklığı yüzeydeki kalıntı gerilmeleri büyük ölçüde azaltırken, çekme dayanımını da biraz düşürmüştür. PP malzemede ise, yüksek enjeksiyon sıcaklığı, arzu edilen yüzeyde basma kalıntı gerilmesi oluşturmaya rağmen, çekme dayanımı yaklaşık 1 MPa'lık düşüş göstermiştir.

Wang ve Young (2005) simülasyon çalışmalarında iki ayrı modelden (elastik ve viskoelastik) elde edilen sonuçlarla enjeksiyon sıcaklığının artırılmasıyla yüzeydeki çekme kalıntı gerilmelerini azalttığını ifade etmektedirler [15]. Sen ve Bhattacharya (2000) enjeksiyon sıcaklığının kalıntı gerilmelere etki etmediğini belirtmektedir [6]. PS parçalar üzerine olan çalışmamızda [7], enjeksiyon sıcaklığı kalıntı gerilme üzerinde etkin bulunmazken, bu çalışmada her iki malzeme üzerinde de en etkili faktör bulunmuştur. Bu, YYPE ve PP malzemelerin yarı kristalin içyapısı nedeniyle yüksek sıcaklıkta daha düzenli moleküler yapı oluşmasının, dolayısıyla gerilim rahatlamasının bir sonucudur.

3.3 Ütülme Basıncının Etkisi (Effects of Packing Pressure)

YYPE'yle kalıplanmış parçalarda ütülme basıncı (300, 550, 800 bar) kalıntı gerilmeler üzerinde üçüncü düzeyde etkili faktör bulunmuştur. Şekil 5'te farklı ütülme basınçlarında, YYPE parçalarda ölçülen kalıntı gerilme grafikleri verilmiştir. Grafiklerden, ütülme basıncı artırıldıkça kalınlık boyunca toplam çekme kalıntı gerilmesinin azaldığı anlaşılmaktadır. Ayrıca, ütülme basıncı YYPE parçaların çekme dayanımı üzerinde etkili bulunmamıştır (Şekil 6).

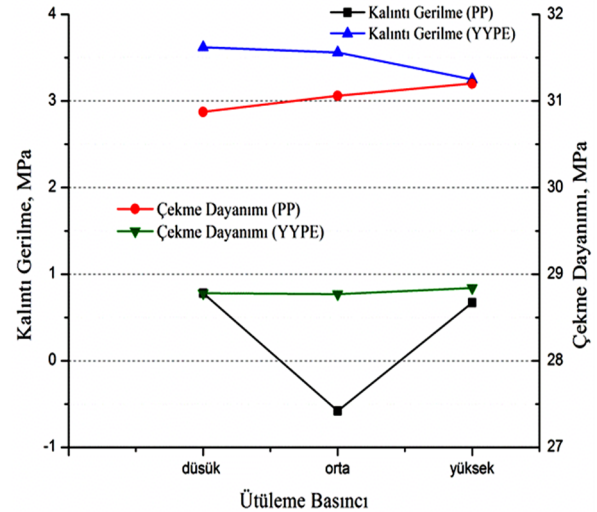


Şekil 5. YYPE ve PP için ütülme basıncının etkisi (Effects of packing pressure for HDPE and PP)

PP parçalar üzerinde ütülme basıncının (500, 800, 1100 bar) etkisi önemsiz bulunmuştur. Fakat PP parçaların çekme dayanımları üzerin en etkili ikinci kalıplama şartı ütülme basıncı olmuştur (Tablo 5).

Ütülme basıncıyla, kalıntı gerilme ve çekme dayanımı karşılaştırma grafikleri Şekil 6'da verilmiştir. Şekilde PP parçaların ütülme basıncının artırılmasıyla çekme dayanımını arttırdığı ve bununla birlikte yüzeydeki kalıntı gerilmelerin sırasıyla çekme-basma-çekme olarak değiştiği anlaşılmaktadır.

Zoetelief ve ark. (1996) yüzeydeki çekme kalıntı gerilmelerinin yüksek ütülme basıncın etkisiyle oluştuğunu ifade etmektedirler [16]. Huang ve Tai (2001) yüksek ütülme basıncında kalıplanan parçalarda çarpılmanın arttığını belirtmektedirler [1]. Sen ve Bhattacharya (2000) da ütülme basıncının ütülme süresine oranla kalıntı gerilmeler üzerinde daha fazla etkili olduğunu belirtmektedirler [6]. Bu çalışmada da ütülme basıncı YYPE parçaların kalıntı gerilmeleri üzerinde etkili bulunmuşken çekme dayanımları üzerinde etkisiz bulunmuştur. PP parçalar için bu durum tam tersidir; ütülme basıncı kalıntı gerilmelere etki etmezken, çekme dayanımı üzerinde etkili olmuştur.

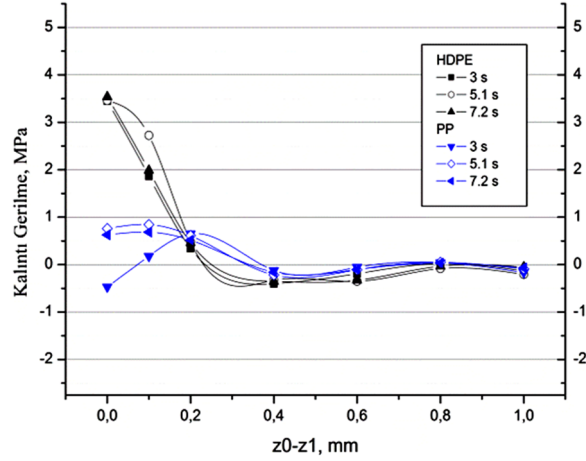


Şekil 6. Kalıntı gerilme ve çekme dayanımının ütülme basıncıyla değişimi (Packing pressure vs. residual stress and tensile strength)

3.4 Ütülme Süresinin Etkisi (Effects of Packing Time)

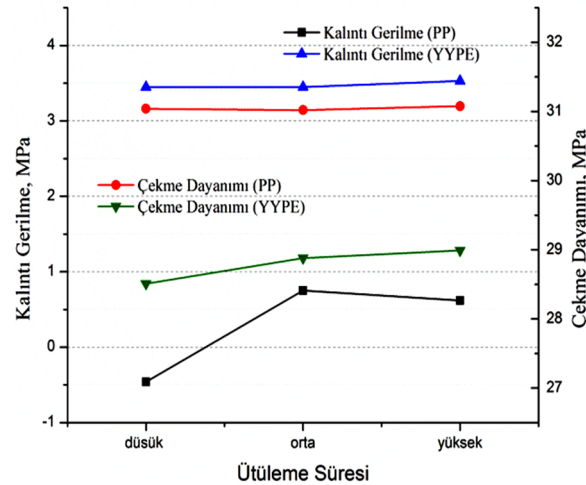
Ütülme süresi enjeksiyonla kalıplanmış YYPE parçalardaki kalıntı gerilmeler üzerinde etkili olmazken (Şekil 7), çekme dayanımı üzerinde en etkili faktör bulunmuştur (Tablo 5). Ütülme süresinin artırılmasıyla YYPE parçaların çekme dayanımının arttığı tespit edilmiştir (Şekil 8).

PP parçalardaki kalıntı gerilmeler üzerinde, ütülme süresinin etkisi incelendiğinde (Şekil 7), 3 s ütülme süresinde yüzeyde basma gerilmesinin oluştuğu, 5,1 s ve 7,2 s ütülme sürelerinde bunun çekme gerilmesine döndüğü görülmektedir. Ütülme süresinin PP parçaların çekme dayanımı üzerinde etkisiz olduğu varyans analizi sonucunda anlaşılmıştır (Tablo 5).



Şekil 7. YYPE ve PP için ütleme süresinin etkisi (Effects of packing time for HDPE and PP)

Kalıntı gerilme ve çekme dayanımı sonuçları birlikte değerlendirildiğinde, PP parçaların kalıplanmasında düşük ütleme süresinin kullanılması daha uygun olduğu görülmektedir. (Şekil 8). YYPE malzeme için ise, grafiklerine göre, parçaların kalıplanmasında yüksek ütleme süresi uygulanması kalıntı gerilmeleri etkilemeden çekme dayanımını artıracığı için daha uygun olmaktadır (Şekil 8).

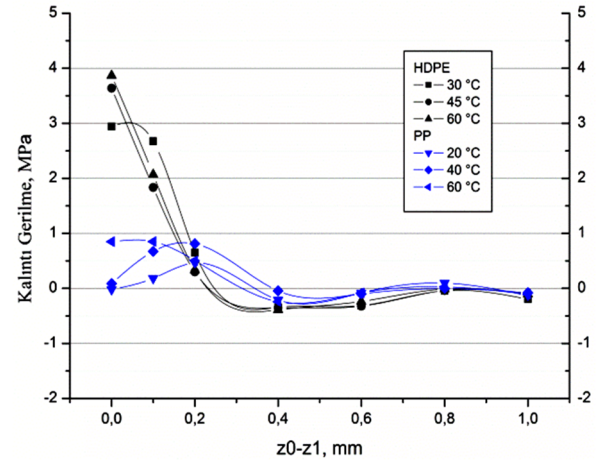


Şekil 8. Kalıntı gerilme ve çekme dayanımının ütleme süresiyle değişimi (Packing time vs. residual stress and tensile strength)

3.5 Kalıp Sıcaklığının Etkisi (Effects of Mold Temperature)

Enjeksiyonla kalıplanmış PP parçalardaki kalıntı gerilmeler üzerinde etkili olan üçüncü kalıplama şartı kalıp sıcaklığı (20, 40 ve 60°C) olmuştur. Varyans analizi sonuçlarından, ara yüzeydeki kalıntı gerilmelerin kalıp sıcaklığının değişiminden etkilendiği tespit edilmiştir. Şekil 9'daki PP grafikleri incelendiğinde, düşük seviye olan 20°C kalıp sıcaklığında, kalınlık boyunca toplam çekme kalıntı gerilmesinin diğer seviyelerde gerçekleşen toplam çekme kalıntı gerilmelerine kıyasla daha az olduğu anlaşılmaktadır. Yüksek kalıp sıcaklığında yüzeyde

oluşan çekme gerilmesi daha yüksek iken, kalınlık boyunca gerçekleşen gerilme dağılımı orta seviye kalıp sıcaklığında oluşan kalıntı gerilme dağılımından daha düşük olmuştur.



Şekil 9. YYPE ve PP için kalıp sıcaklığının etkisi (Effects of mold temperature for HDPE and PP)

YYPE parçalar üzerinde kalıp sıcaklığının etkisi istatistiksel olarak önemsiz bulunmuş olsa da, Şekil 9'daki grafiklerde, yüzeydeki çekme kalıntı gerilmelerinin düşük kalıp sıcaklığında daha düşük, ara bölgedeki kalıntı gerilmelerin, orta seviye (45°C) kalıp sıcaklığında daha düşük değerlerde olduğu tespit edilmiştir.

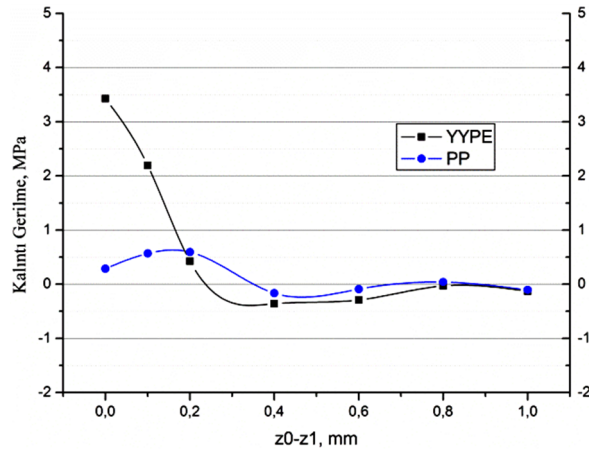
Sen ve Bhattacharya kalıp sıcaklığının artırılmasının nişasta/sentetik polyester (yarı-kristal yapıda) karışımı parçaların yüzeyindeki basma ve içteki çekme kalıntı gerilmelerini azalttığını belirtmektedir. Bunun sebebi olarak, yüksek kalıp sıcaklığında parçanın kalıpta soğuma oranının düşmesi ve dışarıda serbest halde soğumasıyla, gerilme rahatlamasının gerçekleşmesi olduğunu ifade etmektedirler [6]. Katmer ve Karataş (2012) ve Weng ve ark. (2009) da kalıntı gerilmeler üzerinde kalıp sıcaklığının etkili olduğunu, kalıp sıcaklığının artırılmasıyla kalıntı gerilmelerin, azaldığını belirtmektedirler [7, 17]. Deney parçalarının kalın olması (10 mm), polimere katılan nişasta dolgu [6] ve malzemelerin yapısal farklılıkları [7, 17] aradaki farkın sebebi olarak görülmüştür. Wang ve Young (2005) simülasyon çalışmalarında; elastik modelde parçaların yüzeyinde, kalıp sıcaklığının yüksek seviyesinde çekme, düşük seviyesinde basma ve orta seviyede sıfıra yakın kalıntı gerilme oluştuğunu, viskoelastik modelde ise kalıp sıcaklığı arttıkça yüzeydeki çekme gerilmesinin azaldığını belirtmişlerdir [15].

3.5 Kalıntı Gerilme Dağılımı (The Residual Stress Distribution)

27 deneyden elde edilen ortalama kalıntı gerilme grafikleri Şekil 10'da verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi YYPE parçada kalıntı gerilme değerleri 3,5 MPa çekme ve -0,36 MPa basma aralığında değişmektedir

ve gerilmeler iki bölgeye ayrılmaktadır: yüzeyde çekme kalıntı gerilmesi ve çekirdekte basma kalıntı gerilmesidir. PP numunelerde ise kalıntı gerilme dağılımı 0,6 MPa çekme ile -0,16 MPa basma aralığındadır ve yüzeyden itibaren sırasıyla çekme-basma-çekme-basma gerilmeleri olarak dağılmıştır.

Kamal ve ark. (2002) YYPE parçalardaki kalıntı gerilme dağılımları üzerine yaptıkları araştırmada, YYPE parçalardaki kalıntı gerilme dağılımının, yüzeyden çekirdeğe doğru sırasıyla çekme-basma-çekme kalıntı gerilmesi olarak dağıldığını belirtmektedirler [5]. YYPE ve PP parçalardaki kalıntı gerilme değerleri, daha önceki çalışmamızdaki polistiren (PS) parçaların kalıntı gerilme değerlerine (4,6 MPa – (-2 MPa)) oranla, daha düşük çıkmıştır (Katmer ve Karataş, 2012 [7]). PS, YYPE ve PP malzemeler birbirleriyle kıyaslandığında, PP ve YYPE parçalar kalıptan alındıktan sonra PS parçalara oranla daha fazla çarpıldıkları gözlenmiştir. Ancak, en fazla PP parçalar çarpılmıştır. Bu da YYPE ve PP'deki kalıntı gerilmelerin çarpılma ile rahatladığını göstermektedir. Dolayısıyla kalıntı gerilme değerleri de PS'ye göre düşük çıkmıştır.



Şekil 10. YYPE ve PP için kalıntı gerilme grafikleri (The mean of plots of residual stress for HDPE and PP)

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Sonuçlar, YYPE parçalar üzerinde etkili olan kalıplama şartlarının kalıntı gerilme açısından sırasıyla; soğutma süresi, enjeksiyon sıcaklığı ve kalıp sıcaklığı, çekme dayanımı açısından sırasıyla; ütüleme süresi ve enjeksiyon sıcaklığı olduğunu göstermiştir. Enjeksiyon sıcaklığı her iki değer üzerinde de etkili olma yönünden önemli bulunmuştur. Yüksek enjeksiyon sıcaklığında, parçalardaki kalıntı gerilmeler azalırken, parçaların çekme dayanımları da azalmıştır. Soğutma süresi ve kalıp sıcaklığı parçaların yüzeyindeki kalıntı gerilmelere etki ederken, çekme dayanımına etki etmemiştir. Ütüleme süresi artırılırken parçaların çekme dayanımı artış göstermiş, kalıntı gerilmelerde önemli bir değişim olmamıştır. YYPE parçalar için

kalıntı gerilme ve çekme dayanımı arasında kesin bir ilişki kurulamamıştır.

PP parçalardaki kalıntı gerilmeler üzerinde etkili olan faktörler sırasıyla; soğutma süresi, enjeksiyon sıcaklığı ve kalıp sıcaklığı, çekme dayanımı üzerinde ise en etkili faktörler sırasıyla; enjeksiyon sıcaklığı ve ütüleme basıncı bulunmuştur. Sadece enjeksiyon sıcaklığı şartı iki özelliğe de etki etmiştir. Soğutma süresi ve kalıp sıcaklığı PP parçalardaki kalıntı gerilmeleri etkilerken, çekme dayanımına etkisiz bulunmuşlardır. Ütüleme basıncının artırılmasıyla çekme dayanımı artarken, sadece orta seviyesinde parça yüzeyinde basma kalıntı gerilmesi tespit edilmiştir. Parçaların yüzeyinde basma kalıntı gerilmesinin olduğu seviyeler diğer kalıplama şartları için de dikkate alınmalıdır.

SEMBOLLER (NOMENCLATURE)

L :	bükülmüş numunenin boyu
ρ :	numunedeki eğiklik yarıçapı
Φ :	katman kaldırılmış yüzeyin tepe noktasının, düzleme uzaklığı
E :	Elastikiyet modülü
ν :	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 desteklenmiştir (Proje Numarası: 07/2009-07).

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Huang, M.C., Tai, C.C., "The Effective Factors in the Warpage Problem of an Injection-Molded Part with a Thin Shell Feature", **Journal of Material Processing Technology**, Cilt 110, No 1, 1-9, 2001.
- Young, W.B., "Residual stress induced by solidification of thermoviscoelastic melts in the postfilling stage", **Journal of Materials Processing Technology**, Cilt 145, No 3, 317-324, 2004.
- 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.
- Ozcelik, B., Erzurumlu, T., "Comparison of the Warpage Optimization in the Plastic Injection Molding Using ANOVA, Neural Network Model and Genetic Algorithm", **Journal Material**

- Processing Technology**, Cilt 171, No 3, 437-445, 2006.
5. 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.
 6. Sen, A., Bhattacharya M., "Residual Stresses and Density Gradient in Injection Molded Starch/Synthetic Polymer Blends", **Polymer**, Cilt 41, No 26, 9177-9190, 2001.
 7. Katmer, Ş., Karataş, Ç., "The Effects of Molding Conditions on the Residual Stresses in Injection Molded Polystyrene Flat Parts", **Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University**, Cilt 27, No 3, 501-507, 2012.
 8. Isayev, A.I., "Orientation, Residual Stresses, and Volumetric Effects in Injection Molding", **"Injection and Compression Molding Fundamentals"**, Cilt 15, Editör: Isayev, A.I., Marcel Dekker Inc., New York, A.B.D, 227-329, 1987.
 9. Zhou, Y., Mallick, P.K., "Effects of Melt Temperature and Hold Pressure on the Tensile and Fatigue Properties of an Injection Moulded Talc-Filled Polypropylene", **Polymer Engineering and Science**, Cilt 45, No 6, 755-763, 2005.
 10. Vianna, J.C., "Structural interpretation of the strain-rate, temperature and morphology dependence of the yield stress of injection moulded semicrystalline polymers", **Polymer**, Cilt 46, No 25, 11773-11785, 2005.
 11. Sahin, S., Yayla, P., "Effects of testing parameters on the mechanical properties of polypropylene random copolymer", **Polymer Testing**, Cilt 24, No 5, 613-619, 2005.
 12. Goodship, V., **"Arburg Practical Guide to Injection Moulding"**, Smithers Rapra Technology, Shrewsbury, İngiltere, 2004.
 13. Dülek, E., Orman, Ş., Karataş, Ç., Sarıtaş, S., "Bilyali dövme parametrelerinin Ç 1020 çeliğinin yorulma dayanımına etkisi ve oluşan kalıcı gerilmenin katman kaldırma yöntemi ile araştırılması", **Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University**, Cilt 20, No 3, 289-295, 2005.
 14. Kafkas, F., Karataş, Ç., Sarıtaş, S., "Effect of heat treatment conditions and densities on residual stresses at Hybrid (FLN2-4405) P/M steels", **Material Science Forum**, Cilt 534-536, 669-672, 2007.
 15. Wang, T.H., Young, W.B., "Study on residual stresses of thin-walled injection molding", **European Polymer Journal**, Cilt 41, No 10, 2511-2517, 2005.
 16. 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.
 17. Weng, C., Lee, W.B., To, S., "Birefringence techniques for the characterization of residual stresses in injection-moulded micro-lens arrays", **Polymer Testing**, Cilt 28, No 7, 709-714, 2009.

