

Şekil hafızalı poliüretanın enjeksiyonla kalıplanmasında parça kalitesi

Part quality in injection moulding of shape memory polyurethane

Şükran KATMER^{1*} , Çetin KARATAŞ² 

¹Uçak Gövde Motor Bakım Bölümü, Uygulamalı Bilimler Yüksekokulu, Kapadokya Üniversitesi, Nevşehir, Türkiye.

sukatmer@gmail.com

²İmalat Mühendisliği Bölümü, Teknoloji Fakültesi, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye.

cetink@gazi.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 05.02.2020

Düzeltilme Tarihi/Revision: 20.10.2020

doi: 10.5505/pajes.2021.25483

Kabul Tarihi/Accepted: 11.03.2021

Araştırma Makalesi/Research Article

Öz

Akıllı malzemenin bir türü olan şekil hafızalı polimerler (ŞHP) son yıllarda endüstriyel uygulamalarda yaygınlaşmaktadır. Şekil hafızalı polimerlerin bir türü olan termoplastik şekil hafızalı poliüretan (ŞHPU) kolay kalıplanabilme ve tekrar kullanılabilme özellikleri ile ilgi çekmektedir. Mevcut termoplastiklerde olduğu gibi ŞHPU'dan üretilen parçaların da kalıcı şekillerinin verilmesinde enjeksiyon kalıplamanın yaygın kullanılması beklenmektedir. Bu çalışmada, enjeksiyon kalıplamayla kalıcı şekilleri verilmiş ŞHPU numunelerde parça kalitesi; eksik baskı, hava sıkışması ve parça ağırlığı üzerinden araştırılmıştır. Enjeksiyon basıncı, enjeksiyon sıcaklığı, kalıp sıcaklığı, ütüleme basıncı ve süresi, soğutma süresi parametreleri ile kalıpta eksik baskı, hava sıkışması ve numune ağırlığı arasındaki ilişkiler deneysel olarak incelenmiştir. Deneysel tasarımı, Taguchi L27 ortogonal dizilim ile hazırlanmış, deneysel veriler varyans analiziyle değerlendirilmiştir. Eksik baskı oluşumuna enjeksiyon sıcaklığı ve basıncının etkileri istatistiksel yönden anlamlı bulunurken, hava sıkışması ise enjeksiyon basıncı ve kalıp sıcaklığından etkilenmiştir. Numune ağırlığı üzerinde en etkili parametrelerin ise sırasıyla enjeksiyon basıncı ve sıcaklığı, kalıp sıcaklığı ve ütüleme basıncı olduğu bulunmuştur.

Anahtar kelimeler: Şekil hafızalı poliüretan, Enjeksiyon kalıplama, Kalıcı şekil, Parça kalitesi, Eksik baskı, Hava sıkışması, Ağırlık.

Abstract

In recent years, as a type of smart materials, shape memory polymers (SMPs) are being popular in industrial applications. Thermoplastic shape memory polyurethane (SMPU), which is a type of shape memory polymers, is become interesting because of the properties which are easily moulding and reusability. As commonly in commercial thermoplastic materials, it is expecting that using injection moulding process for shaping permanent shapes of the parts moulded by SMPU. In this study, the part quality was investigated by using short shot, air traps, and part weight in the permanent shape of injection moulded SMPU specimens. The relationship among injection pressure, melt temperature, mould temperature, packing pressure, and time, cooling time and short shot, air traps and part weight were inspected experimentally. The design of experiment was prepared by using Taguchi's L27 orthogonal array and experimental data was evaluated by ANOVA. While the effect of injection pressure, and melt temperature on short shot was found to be significant statistically, air traps were affected by injection pressure and mould temperature. It was found that the effective parameters on part weight are injection pressure, melt temperature, mould temperature and packing pressure, respectively.

Keywords: Shape memory polyurethane, Injection moulding, Permanent shape, Part quality, Short shot, Air traps, Weight.

1 Giriş

Son yıllarda geliştirilmekte olan akıllı malzemelerden şekil hafızalı polimerler (ŞHP) havacılık ve uzay, medikal, tekstil, otomatik de-montaj gibi alanlarda yer bulması ile dikkat çekmektedir. Sağladığı kolay işlenebilirlik, benzer özellikler taşıyan diğer malzemelere kıyasla düşük hammadde maliyeti, yüksek şekil değiştirme kabiliyeti, tek başına bir "makine gibi" çalışabilme özellikleri sayesinde gittikçe yaygınlaşmaktadır. ŞHP'ler bir kalıcı ve bir veya birden çok geçici şekle sahip olabilen malzemelerdir. İlk şekillendirme sonunda malzeme kalıcı şekline sahip olurken, programlama denilen süreçte geçici şekilleri kazandırılmaktadır.

Enjeksiyon kalıplama genel plastik parçaların üretilmesinde önemli yer tuttuğu gibi ŞHP parçaların daha fazla ticarileşmesiyle ŞHP parçaların üretilmesinde özellikle kalıcı şekillerinin verilmesinde de önemli bir yer tutması beklenmektedir. Ayrıca literatürde rapor edilen, enjeksiyon kalıplamanın kalıplanan plastik parçaların çekme oranı, çarpılma, kalıntı gerilme, boyutsal kararlılık, çekme dayanımı vb. gibi özellikler üzerinde etkileri olduğu göz önüne alındığında enjeksiyon kalıplamanın ŞHP malzemeler

üzerindeki etkilerinin bilinmesi gerekliliği ortaya çıkmaktadır [1]-[6].

Enjeksiyon kalıplama esnasında oluşabilen bir hata türü olan eksik baskı, kalıplama esnasında kalıp boşluğunun plastikte tam olarak dolmamasıdır ve malzeme akış özellikleri ve kalıplama şartlarının etkisiyle ortaya çıkmaktadır. Eksik baskının oluşmaması için malzeme akış özelliklerinin bilinmesi, kalıp gözü hacmi ve malzeme çekme oranı dikkate alınarak bir atıştaki malzeme miktarı hesaplanmalıdır. Uygun atış hacmine rağmen eksik baskının oluşması durumunda kalıplama parametrelerinin etkileri önem kazanmaktadır. Moayyedian ve diğ. (2017) deneysel ve simülasyon araştırmaları içeren çalışmalarında; polipropilen (PP) parçalarda eksik baskıya sırasıyla enjeksiyon sıcaklığı, dolum süresi ve giriş tipinin önemli etkileri olduğunu belirtmişlerdir [7]. Raz ve Chval (2017) simülasyona dayalı bir araştırmalarında yüksek yoğunluklu polietilen (YYPE) parçalarda enjeksiyon basıncının en düşük ve en yüksek seviyeleri arasında %16 oranında eksik baskı oluştuğunu tespit etmişlerdir. Ek olarak düşük enjeksiyon basıncında eksik baskı nedeniyle hava sıkışmasının daha az olduğunu ifade etmişlerdir [8]. Diğer bir çalışmada, Huang ve Lin (2017) enjeksiyon kalıplama esnasında yüksek kilitleme

*Yazışılan yazar/Corresponding author

kuvvetinin, kalıpta hava sıkışmasına ve dolayısıyla eksik baskıya, düşük kilitleme kuvvetinin ise parçalarda çapaklanmaya neden olduğunu belirtmektedirler [9]. Kitayama ve Natsume (2014) enjeksiyon kalıplama sürecini en küçük çekme oranı ve kalıp kilitleme kuvveti için eksik baskı sınırlaması altında optimize etmişlerdir [10]. Bu çalışmalar, eksik baskı üzerinde kalıplama parametrelerinin özellikle basınç ve sıcaklık faktörlerinin etkin rol oynadığını ve benzer etkinin ŞHP malzemelerde de beklenebileceğini göstermektedir.

Pratik uygulamada parça ağırlığı, parça kalite kontrolünde önemli rol oynamaktadır. Yeni geliştirilen enjeksiyon kalıplama presleri, kalıptan çıkan parça ağırlığındaki değişime göre kalıplama parametrelerini otomatik düzenleyebilmektedir. Bu yönüyle kalıplama parametrelerinin her bir malzemede ağırlığa etkilerinin deneysel olarak araştırılması önem kazanmaktadır. Enjeksiyon kalıplama şartlarının kalıplanan parça ağırlığına etkileri ve deneysel ve simülasyon çalışmalar arasındaki farklar Amran ve diğ. (2016) tarafından PP çekme çubuğu numune üzerinden araştırılmıştır. Çalışmada, kalıp sıcaklığı parça ağırlığı üzerinde en etkin parametre bulunmuş ve bunu enjeksiyon sıcaklığı, enjeksiyon süresi ve soğutma süresinin izlediği belirtilmiştir [11]. Mikro lenslerin yüksek kararlılıkta üretimini inceleyen bir başka çalışmada (Jiang ve diğ. 2013), enjeksiyon ve kalıp sıcaklıklarının artmasıyla mikro lens ağırlığının arttığı ifade edilmektedir. Enjeksiyon süresindeki artışın öncelikle ağırlığı artırdığı, ancak bir zirve değerden sonra ağırlığının düştüğüne dikkat çekilmektedir. Ütuleme basıncının artışıyla da ağırlığın arttığı ve bunun yanı sıra ütuleme süresinin enjeksiyon süresine benzer etki gösterdiği vurgulanmaktadır [12].

Kalıplanan parçalarda eksik baskı ve hava sıkışması oluşması ile parça ağırlığının hedeflenen tolerans aralığında olmaması kalıplanan parçalarda kalite problemlerine neden olmaktadır. Önceki çalışmalar, kalıplama şartlarının kalıpta eksik baskı, hava sıkışması ve parça ağırlığı üzerinde önemli etkileri olduğunu göstermektedir. Bu çalışmada, özellikle sanayide ticari uygulamalar için yeni bir malzeme olan ŞHPU'nun enjeksiyon kalıplamayla kalıcı şeklinin verilmesinde, eksik baskı ve hava sıkışması hataları numune ağırlıkları dikkate alınarak değerlendirilmiştir. ŞHPU numunenin kalıcı şeklindeki eksik baskı, hava sıkışması ve ağırlık değişimine kalıplama parametrelerinin etkileri deneysel olarak incelenmiştir.

2 Deneysel metot

Bu çalışmada ŞHP olarak, sıcaklık duyarlı şekil hafızalı termoplastik poliüretan (ŞHPU) (Diaplex MM4520, Japonya) kullanılmıştır. ŞHPU malzeme, camsı geçiş sıcaklığı (T_g) üzerinde özelliklerinde önemli değişiklikler sergilemektedir. T_g üstü sıcaklıkta malzeme kauçuğumsu özellikler sergilediği için bu bölge kauçuk bölge, T_g altı sıcaklıkta malzeme daha sert ve kırılabilir yapıya dönüştüğü için bu bölge camsı bölge olarak adlandırılmaktadır. Malzeme hammadde özellikleri Tablo 1'de görülmektedir. Tablodaki veriler malzeme üreticisinden temin edilmiştir. Satın alınan malzemenin bazı özellikleri Diferansiyel Taramalı Kalorimetre/Termogravimetrik Analiz (DSC/TGA) ve Ergime Akış İndeksi (EAI) yöntemleriyle yeniden analiz edilmiştir. T_g 'si 42.8 °C ve EAI 200 °C'de 5 kg yük altında 48 g/10 dk olarak ölçülmüştür. Enjeksiyon kalıplama parametrelerinin seviyeleri malzeme üreticisinin önerileri, DSC/TGA ve EAI değerleri dikkate alınarak belirlenmiştir.

Tablo 2'de deneysel çalışmada uygulanan enjeksiyon kalıplama parametreleri ve bunların seviyeleri görülmektedir. Her bir

parametrenin seviyeleri malzeme üreticisinin önerileri doğrultusunda seçilmiştir. Ütuleme basıncı, enjeksiyon basıncının bir fonksiyonu olarak tanımlanmış ve değerleri enjeksiyon basıncının %40, %50 ve %60 oranı olarak uygulanmıştır. Çekme test çubuğu şeklinde numuneler Taguchi L27 ortogonal dizilim uygulanarak ve her bir satır 8 kez tekrarlanarak enjeksiyonla (Arburg Allrounder 220-300, Germany) kalıplanmıştır. Numune şekli, ölçüleri ve parça giriş yeri Şekil 1'de görülmektedir.

Tablo 1. ŞHPU malzeme özellikleri.

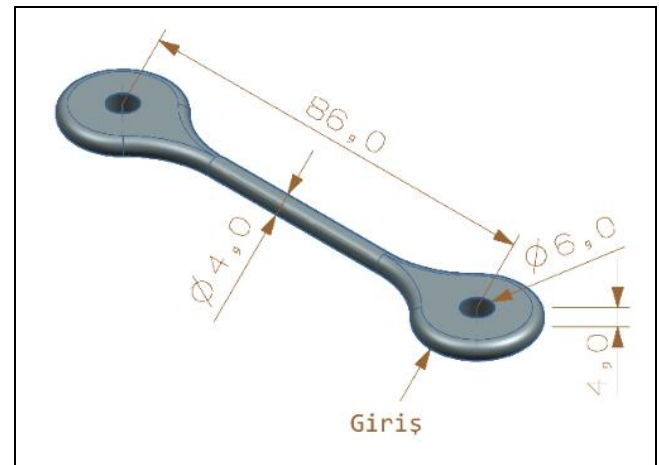
Table 1. Material properties of SMPU.

Özellikler	Camsı bölge ($T < T_g$)	Kauçuk bölge ($T > T_g$)
Sertlik (H_D)	76	30
Çekme Dayanımı (MPa)	55	10
Uzama (%)	30-50	>600
Eğilme Modülü (MPa)	2150	-
Eğilme Dayanımı (MPa)	80	-
Yoğunluk (g/cm^3)	1.25	
Kalıp Sıcaklığı (°C)	T_g 'den 5-10 °C düşük	
Enjeksiyon Sıcaklığı (Nozul Sıcaklığı, °C)	195-205	
Camsı Geçiş Sıcaklığı (T_g , °C)	45	
Ergime Akış İndeksi (EAI) (200 °C, 5000 g) (g/10 dk)	48	

Tablo 2. Enjeksiyon parametreleri ve seviyeleri.

Table 2. Injection moulding parameters and the levels.

Faktörler	Seviyeler		
	-	0	+
(A) Enjeksiyon Basıncı (MPa)	50	60	70
(B) Enjeksiyon Sıcaklığı (°C)	195	200	205
(C) Kalıp Sıcaklığı (°C)	30	35	40
(D) Ütuleme Basıncı (MPa)	%40*A	%50*A	%60*A
(E) Ütuleme Süresi (s)	6	9	12
(F) Soğutma Süresi (s)	15	22.5	30



Şekil 1. Numune şekli ve ölçüleri.

Figure 1. Shape and dimensions of the specimen.

Kalıplama esnasında kalıp sıcaklığı bir kalıp şartlandırıcısı (Tool-Temp B-0375 TT-157E, Switzerland)) üzerinden kontrol edilmiştir. Deneylede sabit bir enjeksiyon hızı uygulanmış, onun yerine enjeksiyon basıncı değişken alınmıştır. Enjeksiyon basıncı, makine üzerinden değer girilerek tanımlanmış ve ütüleme basıncı da enjeksiyon basıncının bir fonksiyonu olarak tek kademeli olarak uygulanmıştır.

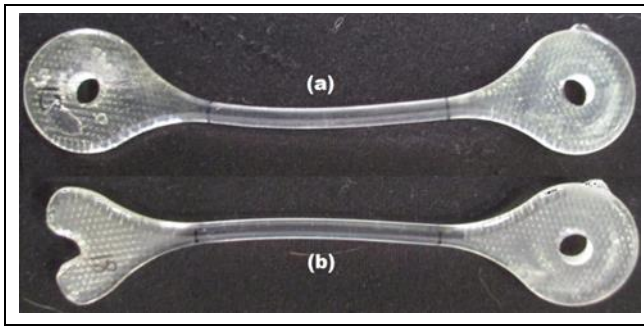
Taguchi Analizi; faktörler ve seviyelerinin etkilerini ifade etmek için etki grafikleri, faktörleri etki derecelerine göre sıralamak için delta istatistiği ve faktörlerin etkileri arasındaki olası farkı saptamak için varyans analizi kullanılmaktadır [13].

Taguchi Analizi, SN oranı (Signal/Noise, Sinyal/Gürültü) denilen bir kıyas faktörü kullanır. "SN oranı = istenen sonuç/istenmeyen sonuç" şekilde tanımlanmaktadır. 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 iyidir*, *küçük değer iyidir* ve *büyük değer iyidir* [13]. Bu çalışmada statik SN oranları kullanılmış ve Taguchi Analizleri için Minitab paket programından yararlanılmıştır.

3 Deneysel bulgular ve tartışma

Kalıplama sonunda, tam dolan numuneler "2", eksik baskı olan numuneler "1" adı altında gruplanmıştır. Taguchi Analizinde eksik baskı için SN oranı, yapılan gruplandırmada numunelerin "2" ile gruplandırılması tam dolun anlamına geldiği için "*büyük değer iyidir (BDİ)*" prensibine göre hesaplanmış ve sonuçlara varyans analizi ($\alpha=0.05$) uygulanmıştır.

Hava sıkışması da, numunelerdeki yoğunluğuna göre 1 ile 5 arasında değerlerle ifade edilmiştir. Tüm numuneler incelenerek, numunelerdeki hava sıkışması oranına göre; yok "1", az miktarda "2", orta düzeyde "3", fazla miktarda "4", çok fazla miktarda "5" olarak gruplandırılmıştır. Hava sıkışması için SN oranları, "1" hava sıkışması yok anlamına geldiği için "*küçük değer iyidir (KDİ)*" prensibiyle hesaplanmıştır. Şekil 2'de tam dolu ve hava sıkışması hatası olan bir numune (a) ve eksik baskı hatalı bir diğer numune (b) örnekleri verilmiştir.



Şekil 2(a): Tam dolu ve hava sıkışması olan numune örneği.
(b): Eksik baskı numune örneği.

Figure 2(a): Specimen with air traps and without short shot.
(b): Specimen with short shot.

Numune ağırlıkları hassas olarak tartılmış ve ağırlık için SN oranları "*büyük değer iyidir (BDİ)*" prensibine göre hesaplanmıştır. Tüm numunelerin ortalama ağırlığı 4.26 g olarak hesaplanmıştır. Eksik baskı, hava sıkışması ve ağırlık sonuçlarının uygun prensibe göre hesaplanan SN oranları Tablo 3'te görülmektedir.

Tablo 3. Taguchi L27 ortogonal dizilim ve deneysel ölçüm sonuçları.

Table 3. Taguchi's L27 orthogonal array and the results of experimental measurements.

Desen ABCDEF	Eksik Baskı (SN; BDİ)	Hava Sıkışması (SN; KDİ)	Ağırlık (SN; BDİ)	
L1	-----	2.75	-10.70	11.99
L2	----00	0.58	-13.49	11.30
L3	----++	3.01	-10.21	12.23
L4	-000--	2.04	-10.26	12.46
L5	-00000	2.04	-12.13	12.51
L6	-000++	4.47	-8.37	12.63
L7	-+++-	6.02	-8.36	12.65
L8	-+++00	6.02	-8.13	12.71
L9	-+++++	6.02	-10.89	12.59
L10	0-0+-	3.33	-12.52	12.43
L11	0-0+0+	2.43	-9.87	12.48
L12	0-0+-	6.02	-5.44	12.55
L13	00+-0	6.02	-8.13	12.74
L14	00+-0+	6.02	-7.53	12.70
L15	00+-+	6.02	-10.07	12.70
L16	0+-0-0	6.02	-10.24	12.55
L17	0+-00+	6.02	-10.67	12.69
L18	0+-0+-	6.02	-9.81	12.68
L19	++-0+-	6.02	-8.65	12.75
L20	++-00-	0.00	-6.02	12.79
L21	++-0+0	6.02	-5.53	12.77
L22	+0-+++	6.02	-9.70	12.83
L23	+0-+0-	6.02	-6.02	12.70
L24	+0-++0	6.02	-10.00	12.76
L25	++0-+-	6.02	-7.53	12.73
L26	++0-0-	6.02	-8.95	12.69
L27	++0-+0	6.02	-6.02	12.75

BDİ: Büyük değer iyidir, KDİ: Küçük değer iyidir.

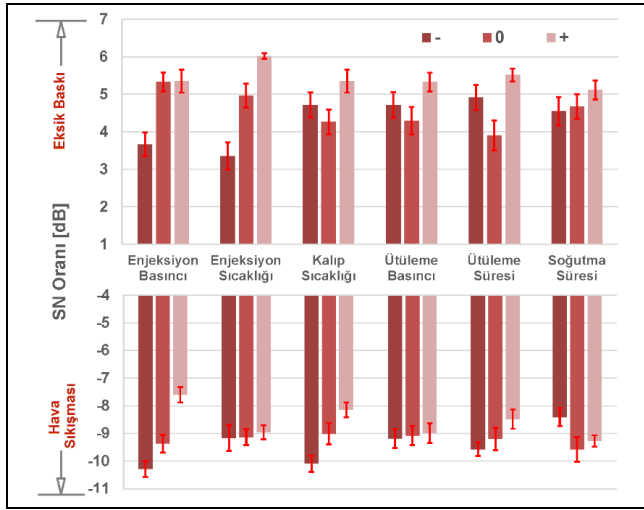
Eksik baskı, hava sıkışması ve ağırlık SN oranlarına varyans analizi ($\alpha=0.05$) uygulanmıştır. Varyans analizi sonuçlarına göre eksik baskı oluşmasına en etkin parametrenin enjeksiyon sıcaklığı ($p<0.05$) olduğu, bunu enjeksiyon basıncı ($p<0.05$) ve ütüleme süresinin ($0.05<p<0.1$) takip ettiği bulunmuştur (Tablo 4). Hava sıkışması hatasının oluşmasında ise enjeksiyon basıncı ($p<0.05$) istatistiksel olarak anlamlı bir etkiye sahip olduğu bulunmuştur. Tablo 4'te enjeksiyon kalıplama parametrelerinin eksik baskı ve hava sıkışması üzerindeki etkileri incelendiğinde enjeksiyon basıncının ve enjeksiyon sıcaklığının her iki hata üzerinde etkili olduğu anlaşılmaktadır. Varyans analizi sonuçlarından eksik baskı sonuçlarında % 25.6; hava sıkışmasında % 46.6 hata oranı olduğu görülmektedir. Enjeksiyon basıncının etkisi sırasıyla % 17.1 ve % 28.2 oranlarında olmuştur. Tip I veya Tip II hataya düşmemek için enjeksiyon basıncının etkisinin dikkatli değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu aşamada etki grafiklerindeki (Şekil 3 ve Şekil 4) hata çubukları da dikkate alınarak sonuçlar yorumlanmıştır. Şekillerdeki hata çubukları her bir bağımlı değişken (eksik baskı, hava sıkışması, ağırlık) için 8'er tekrar sonuçları üzerinden standart hata formülasyonu ile hesaplanmıştır. Kalıplama esnasında eksik baskının oluşmaması malzemenin akış özellikleriyle ilgilidir ve bu özellik ergime akış indeksiyle tayin edilmektedir. Bu çalışmada kullanılan şekil hafızalı termoplastik poliüretan malzemenin 200 °C'de 5 kg yük altında 10 dk'da 48 g aktığı ölçülmüştür. Bu değer kalıplama esnasında malzemenin rahat akabilmesi için nispeten yüksek basınca ihtiyaç duyduğunu göstermektedir. Bu bilgi Şekil 3'te verilmiş olan enjeksiyon kalıplama-eksik baskı etki grafikleriyle örtüşmektedir.

Tablo 4. Eksik baskı, hava sıkışması ve ağırlık verileri varyans analizi sonuçları.

Table 4. Results of ANOVA for short shot, air traps, and weight.

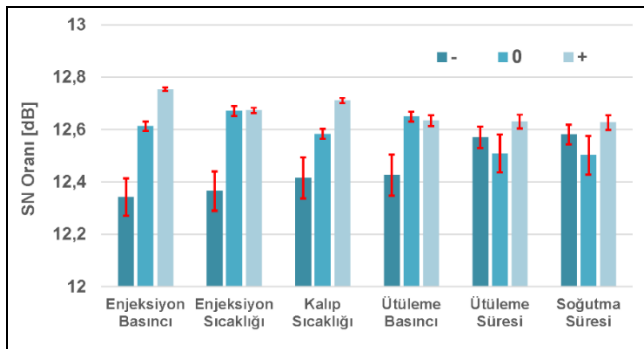
Faktörler	Eksik Baskı (SN; BDİ)				Hava Sıkışması (SN; KDİ)				Ağırlık (SN; BDİ)		
	SD	F	P	%C	F	P	%C	F	P	%C	
Enjeksiyon Basıncı	2	5.88	0.014	21.91	4.24	0.036	28.26	12.66	0.00	31.9	
Enjeksiyon Sıcaklığı	2	7.78	0.005	28.99	0.03	0.972	0.19	8.07	0.01	20.33	
Kalıp Sıcaklığı	2	1.72	0.215	6.41	2.17	0.151	14.49	5.78	0.02	14.55	
Ütuleme Basıncı	2	1.21	0.327	4.51	0.02	0.98	0.14	3.8	0.05	9.58	
Ütuleme Süresi	2	2.42	0.125	9.02	0.69	0.516	4.63	1.17	0.34	2.95	
Soğutma Süresi	2	0.83	0.457	3.08	0.84	0.451	5.63	1.22	0.33	3.06	
Hata	14			26.08			46.66			17.63	
Toplam	26			100			100			100	

SD: Serbestlik Derecesi, F: F testi değeri, P: Olasılık (Probability), C: Katkı payı (Contribution).



Şekil 3. Enjeksiyon kalıplama eksik baskı (+SN) ve hava sıkışması (-SN) etki grafikleri.

Figure 3. Injection moulding main effect graphs (+SN) for short shot, (-SN) for air traps.



Şekil 4. Enjeksiyon kalıplama - ağırlık etki grafikleri.

Figure 4. Injection moulding main effect graphs for weight.

Şekil 3'teki grafikler tüm numuneler üzerinde gözlemlenen eksik baskının SN oranı üzerinden hesaplanan enjeksiyon kalıplama etki grafikleridir. Grafiğin düşey eksen SN oranını yatay eksen de enjeksiyon parametreleri ve bunların seviyelerini ifade etmektedir. Her bir enjeksiyon parametresi

için soldan sağa her nokta; düşük, orta ve yüksek seviyeleri yansıtmaktadır. Grafik, düşük enjeksiyon basıncında eksik baskı oluşurken, orta ve yüksek enjeksiyon basınçlarında tam dolun gerçekleştiğini ve hata çubukları ise orta ve yüksek enjeksiyon basınçları arasında anlamlı farkın olmadığını göstermektedir. Benzer şekilde enjeksiyon sıcaklığı arttıkça, kalıpta eksik baskı gerçekleşme oranının azaldığı gözlenmiştir. Üç farklı enjeksiyon sıcaklığı seviyesinin etkilerinin birbirinden farklı ve anlamlı olduğu grafikten okunmaktadır. Varyans analizi sonucunda eksik baskı üzerinde etkisi $\alpha=0.1$ düzeyinde anlamlı bulunan üçüncü faktör ütleme süresi olmuştur. Ütleme süresinin eksik baskı üzerinde kalıp sıcaklığı veya ütleme basıncından daha etkili çıkması en uzun ütleme süresinde dahi girişin henüz donmamış olduğunu ve belirlenen ütleme süresi boyunca etkili ütleme yapılabildiğine işaret etmektedir. Ütleme safhasında hem ütleme basıncı hem de ütleme süresi birlikte değerlendirilmelidir. Uzun ütleme süresi ve yüksek ütleme basıncının parçalardaki eksik baskının oluşmasını engellediği sonucu Şekil 3'teki grafikten çıkartılabilir.

Önceki çalışmalar incelendiğinde, eksik baskı üzerinde en etkili kalıplama parametrelerinin sıcaklıklar, özellikle enjeksiyon sıcaklığı, basınçlar, özellikle enjeksiyon basıncı ve kalıp kilitleme kuvveti olduğu anlaşılmaktadır. Bu çalışmada etkisi araştırılan ve eksik baskı üzerinde önemli etkileri olduğu sonucuna ulaşılan enjeksiyon sıcaklığı ve enjeksiyon basıncı parametrelerinin etkileri literatüre katkı sağlamış araştırmaların sonuçlarıyla örtüşmektedir (Moayyedian ve diğ. (2017), Raz ve Chval (2017), Huang ve Lin (2017)) [7]-[9]. Kitayama ve Natsume'nin (2014) çalışmalarının sonucu da kalıp kilitleme kuvvetinin kalıpta eksik baskı üzerinde etkili olduğunu göstermektedir [10].

Şekil 3'te enjeksiyon kalıplama - hava sıkışması etki grafikleri (-SN) ve varyans analizi sonuçlarına göre enjeksiyon basıncı hava sıkışması üzerinde etkili bir kalıplama parametresidir. Grafiğe göre enjeksiyon basıncı arttıkça kalıpta hava sıkışması azalmaktadır. Etkisi $\alpha=0.1$ düzeyinde anlamlı bulunan bir diğer parametre ise kalıp sıcaklığı olmuştur. Kalıp sıcaklığının da enjeksiyon basıncına benzer bir etki gösterdiği ve kalıp sıcaklığındaki artış ile kalıpta hava sıkışmasının azaldığı grafikten anlaşılmaktadır. Hata çubuklarının kesişmemesi, her iki parametrenin de seviyeleri arasında anlamlı fark bulunduğuna işaret etmektedir.

Kalıplama esnasında kalıpta hava sıkışmasının eksik baskıya neden olduğu güncel literatüre göre aşikârdır. Raz ve Chval (2017) eksik baskı oluşan parçalarda hava sıkışmasının daha düşük oranda olduğunu belirtirken, Huang ve Lin (2017) yüksek kalıp kilitleme kuvvetinin kalıpta hava sıkışmasına dolayısıyla eksik baskıya neden olduğunu belirtmektedir [8],[9].

Şekil 4'te enjeksiyon kalıplamanın ağırlık üzerindeki etkilerini SN oranı üzerinden ifade eden etki grafikleri verilmiştir. Varyans analizi sonucunda sırasıyla enjeksiyon basıncı, enjeksiyon sıcaklığı, kalıp sıcaklığı ve ütüleme basıncı parça ağırlıkları üzerinde etkili bulunmuştur. Etki grafikleri, enjeksiyon basıncı ve kalıp sıcaklığı arttıkça parça ağırlığının düzensiz olarak arttığını göstermiştir. Enjeksiyon sıcaklığı ve ütüleme basıncında ise düşük ve orta seviyeler arasında ağırlık artarken, orta ve yüksek seviyeler arasında ağırlıkta önemli bir değişim gözlenmemiştir.

Amran ve diğ. (2016), PP parçaların enjeksiyonla kalıplanmasında parça ağırlığı üzerinde en etkin kalıplama parametresinin kalıp sıcaklığı olduğunu ve bunu enjeksiyon sıcaklığı, enjeksiyon süresi ve soğutma süresinin izlediğini ifade etmektedirler [11]. Jiang ve diğ. (2013) bir çalışmada, enjeksiyon ve kalıp sıcaklıklarının parça ağırlığı üzerindeki etkileri öne çıkmaktadır. Ayrıca enjeksiyon süresinin de ağırlık üzerindeki etkisi incelendiğinde optimum bir enjeksiyon süresinin varlığı tespit edilmiştir [12]. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar literatürde zikredilen sonuçlar ile örtüşmektedir. Bazı parametrelerin etkileri arasındaki farklar kalıplanan malzemelerin akış özelliklerinden ve farklı numune ve kalıp tasarımlarından kaynaklandığı öngörülmektedir. Bu çalışmaya konu ŞHPU malzeme sıcaklık ve ısıya daha duyarlı bir malzeme olduğu için kalıplama esnasında sıcaklık ve basınçlardaki değişimlere daha hassas olduğu anlaşılmaktadır.

Şekil 5'te eksik baskı, hava sıkışması ve ağırlık üzerinde etkin bulunan parametrelerin üç boyutlu grafikleri karşılaştırma amaçlı sunulmuştur. Üç sonuç üzerinde de etkin bulunan parametre enjeksiyon basıncı olmuştur. Bu durum her üç sonucun da malzemenin akış özelliklerinden etkilenmesi ve Tablo 1'de sunulmuş olan EAİ değeriyle örtüşmektedir. Malzeme standart olarak kullanılan 2160 g yük altında istenen akış davranışını sergilemediği için daha yüksek yük uygulanmıştır. Bu da malzemenin akış için yüksek basınca ihtiyaç duyduğunu göstermektedir.

4 Sonuçlar

Şekil hafızalı termoplastik poliüretanın enjeksiyonla kalıplanmasında, kalıplama sürecinin kalıp dolumu üzerindeki etkileri, kalıpta eksik baskı ve hava sıkışması ile numunelerde ağırlık değişimleri üzerinden deneysel olarak incelenmiştir. Bu araştırma, enjeksiyon kalıplama parametrelerinden enjeksiyon sıcaklığı ve basıncı ile ütüleme süresinin eksik baskı üzerinde istatistiksel olarak anlamlı etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Enjeksiyon sıcaklığı ve basıncı artarken eksik baskı oluşumu azalmıştır. Hava sıkışması ve parçalarda baloncuk oluşumu üzerinde en etkili faktörler enjeksiyon basıncı ve kalıp sıcaklığı olarak bulunmuştur. Enjeksiyon basıncı ve kalıp sıcaklığı arttıkça parçalarda hava sıkışması artmıştır. Numune ağırlığı üzerinde sırasıyla enjeksiyon basıncı, enjeksiyon sıcaklığı, kalıp sıcaklığı ve ütüleme basıncı anlamlı etkilere sahiptir. Enjeksiyon basıncı ve kalıp sıcaklığı arttıkça parça ağırlığı artarken, enjeksiyon sıcaklığı ve ütüleme basıncının orta seviyesinde en yüksek ağırlık elde edilmiştir. Bu iki parametrenin orta ve yüksek seviyeleri arasında anlamlı bir fark tespit edilmemiştir.

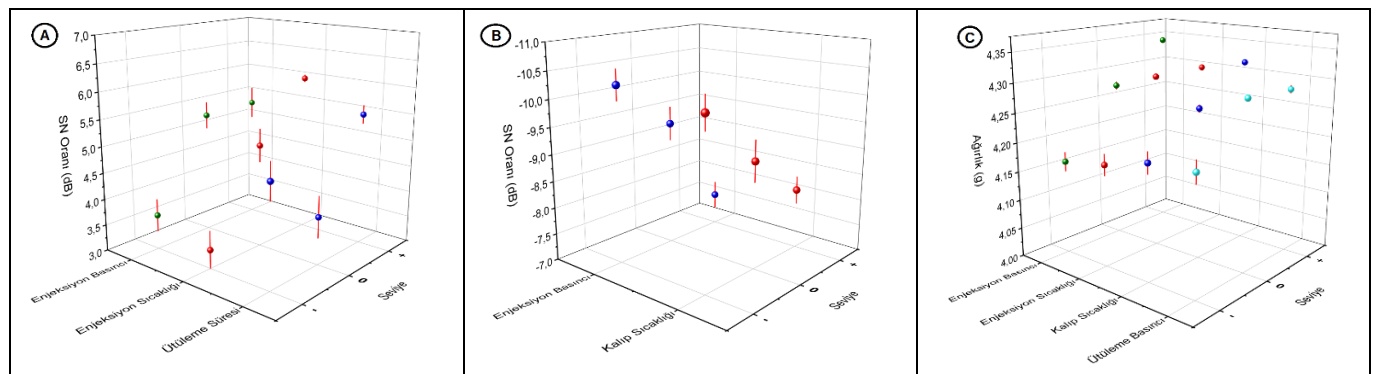
Elde edilen deneysel sonuçlar, ŞHPU'nun enjeksiyonla kalıplanması esnasındaki parça dolumu özellikleri üzerinde yüksek enjeksiyon ve ütüleme basınçları ile yüksek enjeksiyon ve kalıp sıcaklıklarının dolum açısından daha iyi sonuçlar verdiğini göstermektedir.

Sonuçlar, ŞHPU malzemenin sıcaklık ve ısı duyarlı bir malzeme olmasına bağlı olarak kalıplama esnasındaki sıcaklık ve basınç değişimlerinden daha çabuk etkilendiğini göstermiştir. Bu sonuç da, kalıplama esnasında kalıplama parametrelerinin yüksek hassasiyetle takip ve kontrol edilmesi gerekliliğini göstermektedir.

5 Conclusions

During the injection moulding process of the shape memory thermoplastic polyurethane, effects of the moulding process on mould filling were investigated by short shot, air traps and the part weight, of the moulded specimens, experimentally. The investigation showed that the melt temperature, the injection pressure and packing time have significant influence on the short shot, statistically. Short shot has been decreasing while rising the melt temperature and injection pressure.

It was found that the most effective factors are the injection pressure and the mould temperature for generation air traps and air bubbles.



Şekil 5. Etkin parametreler. (a): Eksik baskı. (b): Hava sıkışması. (c): Ağırlık.
Figure 5. Effective parameters. (a): For short shot. (b): For air traps. (c): For weight.

While increasing the injection pressure and the mould temperature, air traps increased in the specimens. Injection pressure, melt temperature, mould temperature and packing pressure have important affect on the part weight respectively. As the injection pressure and mould temperature increased, the part weight increased. While the highest weight was reached at the medium level of melt temperature and packing pressure. No significant difference was found between the middle and high levels of these two parameters.

The experimental results showed that the better results were obtained at the high level of injection pressure, packing pressure, melt temperature, and mould temperature for the part filling of injection moulding of SMPU.

The results made clear that the SMPU can be effected easily by changes of temperature, and pressure due to it is a material which is temperature and heat sensitive. That result indicates the necessity of monitoring and controlling moulding parameters with high precision during the moulding.

6 Yazar katkı beyanı

Gerçekleştirilen çalışmada Şükran KATMER ve Çetin KARATAŞ fikrinin oluşması, literatür araştırması, deney tasarımı, edilen sonuçların değerlendirilmesi ve sonuçların incelenmesi, yazım denetimi ve içerik açısından makalenin kontrol edilmesi başlıklarında katkı sunmuştur. Ayrıca, Şükran KATMER kullanılan malzemeleri temin etmiş ve deneyleri yapmıştır.

7 Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur.

Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır.

8 Kaynaklar

- [1] Isayev AI, Shyu GD, Li CT. "Residual stresses and birefringence in injection molding of amorphous polymers: Simulation and comparison with experiment". *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*, 44(3), 622-639, 2006.
- [2] Kamal MR, Lai-Fook RA, Hernandez-Aguilar JR. "Residual thermal stresses in injection moldings of thermoplastics: A theoretical and experimental study". *Polymer Engineering & Science*, 42(5), 1098-1114, 2002.
- [3] Ozcelik B, Erzurumlu T. "Comparison of the warpage optimization in the plastic injection molding using ANOVA, neural network model and genetic algorithm". *Journal of Materials Processing Technology*, 171(3), 437-445, 2006.

- [4] Altan M. "Reducing shrinkage in injection moldings via the Taguchi, ANOVA and neural network methods". *Materials & Design*, 31(1), 599-604, 2010.
- [5] Katmer Ş, Karataş Ç. "Effects of injection molding conditions on residual stress in HDPE and PP Parts". *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 30(3), 319-327, 2015.
- [6] Katmer S, Karatas C. "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*, 27(3), 501-507, 2012.
- [7] Moayyedean M, Abhary K, Marian R. "The analysis of short shot possibility in injection molding process". *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 91(9), 3977-3989, 2017.
- [8] Raz K, Chval Z. "Influences of pressures and cycle times on properties of final plastic product from HDPE". *International Conference on Mechanical, System and Control Engineering (ICMSC)*, St. Petersburg, Russia, 19-21 May 2017.
- [9] Huang MS, Lin CY. "A novel clamping force searching method based on sensing tie-bar elongation for injection molding". *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 109, 223-230, 2017.
- [10] Kitayama S, Natsume S. "Multi-objective optimization of volume shrinkage and clamping force for plastic injection molding via sequential approximate optimization". *Simulation Modelling Practice and Theory*, 48, 35-44, 2014.
- [11] Amran MAM, Idayu N, Faizal KM, Sanusi M, Izamshah R, Shahir M. "Part weight verification between simulation and experiment of plastic part in injection moulding process". *International Engineering Research and Innovation Symposium (IRIS)*, Melaka, Malaysia, 24-25 November 2016.
- [12] Jiang B, Shen L, Weng C. "A weight analysis for the replication accuracy improvement of injection-molded microlens arrays". *Optoelectronics and Advanced Materials-Rapid Communications*, 7(3-4), 173-178, 2013.
- [13] Taguchi G, Chowdhury S, Wu Y. *Taguchi's Quality Engineering Handbook*. New York, USA, Wiley, 2005.