

BİR DVD-ROM ÖN KAPAĞININ PLASTİK ENJEKSİYONLA BASILMASI SONUCUNDA OLUŞAN ÇEKMEYE ETKİ EDEN EN UYGUN İŞLEM PARAMETRELERİNİN TAGUCHİ YÖNTEMİYLE BELİRLENMESİ

Hasan ÖKTEM¹, Fehmi ERZİNCANLI²

¹hoktem@kocaeli.edu.tr Kocaeli Üniversitesi, Gebze Meslek Yüksekokulu, Endüstriyel Kalıpcılık, Hereke Kampüsü, 41800 Kocaeli

²fehmiertzincanli@duzce.edu.tr Düzce Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 81620 Düzce

ÖZET

Plastik enjeksiyon kalıpcılığı et kalınlığı ince plastik ürünlerin üretilmesinde oldukça önemli bir yöntemdir. Plastik ürünlerin üretilmesi sırasında karşılaşılan en önemli problemlerden biri de boyutsal çekmedir. Boyutsal çekmeye etki eden enjeksiyon işlem parametrelerinin belirlenmesi zaman alıcı ve zordur. Bu çalışma, Taguchi yöntemine dayalı olarak bir DVD-ROM ön kapağının plastik enjeksiyonla basılması sonucunda oluşan boyutsal çekmeye etki eden en uygun işlem parametrelerinin belirlenmesine odaklanmıştır. Bu amacı gerçekleştirmek için bir dizi Moldflow plastik akış analizi, Taguchi L₂₇ ortogonal deneysel tasarıma göre planlanan enjeksiyon işlem parametreleriyle (kalıp sıcaklığı, eriyik sıcaklığı, enjeksiyon basıncı, enjeksiyon zamanı ve soğutma zamanı) gerçekleştirilmiştir. Daha sonra, çekmeyi etkileyen enjeksiyon işlem parametrelerinin en uygun aralıklarını saptamak için Sinyal-Gürültü (S/N) oranı kullanılmıştır. Her plastik enjeksiyon işlem parametresinin çekme üzerindeki etkisi, Varyans analiziyle (ANOVA) istatistiksel olarak tespit edilmiştir. Çalışma sonunda, en düşük çekme miktarını veren en uygun işlem parametreleri Taguchi yöntemiyle bulunmuştur. Taguchi yönteminin güvenilirliği ve verimliliğini kontrol etmek için son bir doğrulama testi, Moldflow programı ve plastik enjeksiyon tezgahında gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlardan, çekme gibi plastik enjeksiyon işlemi hatalarının değerlendirilmesinde Taguchi yönteminin çok güçlü ve efektif bir araç olduğu görülmüştür.

Anahtar Sözcükler: Plastik Enjeksiyon, Çekme, Moldflow, İşlem Parametreleri, Taguchi Yöntemi

ABSTRACT

Plastic injection molding is a very important method to produce thin-shell plastic products. Dimensional Shrinkage is one of most problems encountered in producing plastic products. The determination of plastic injection molding parameters affecting shrinkage are time consuming and difficult. This study focuses on the determination of plastic injection molding parameters affecting shrinkage during plastic injection molding of a DVD-ROM front cover based on Taguchi method. In doing this, a series of Moldflow analyses have been performed as per L₂₇ orthogonal array design with each analysis by means of injection process parameters (mold temperature, melt temperature, injection pressure, injection time, and cooling time). Afterwards, Signal-to-noise (S/N) ratio is utilized to determine the optimum combinations of injection process parameters for the shrinkage. The effect of each of plastic injection process parameters on shrinkage was statistically controlled by ANOVA analysis. In result of this study, optimum combinations of the process parameters providing to minimum shrinkage were found by Taguchi method. One confirmation test was executed to verify the robustness and the effectiveness of Taguchi method on Moldflow program and plastic injection machine. From the findings, it can be stated that

Taguchi method is a powerful and an effective tool for evaluating the defects of the in the plastic injection molding such as shrinkage.

Keywords: Plastic Injection, Shrinkage, Moldflow, Process Parameters, Taguchi Method

1. GİRİŞ

Plastik enjeksiyon kalıpcılığı günümüz endüstrisinde ince et kalınlığına sahip plastik ürünlerin üretilmesinde kritik bir rol oynar. Plastik enjeksiyon kalıpcılığı; ince, hafif, esnek ve küçük olan medikal cihazlar, bilgisayar parçaları, günlük araç-gereçler gibi plastik ürünlerin üretilmesinde geniş bir kullanım alanı bulmuştur [1]. Bir plastik enjeksiyon işlemi, dört ana safhadan oluşur: doldurma, ütüleme (sıkıştırma), soğutma ve çıkarma. Yüksek basınç altında, eritilen polimer malzeme akışkan hale gelir ve soğuk bir metal kalıp için dolmaya zorlanır. Dolma işlemi tamamlandığında, soğutmada dolayı çekmeyi azaltmak için kalıp boşluğu sabit bir ütüleme basıncında tutulur. Erimiş plastik kalıp duvarlarına dokunduğu anda soğutma işlemi başlar. Plastik haline gelen ürünün kalıp boşluğundan çıkarılması en son safhadır [2-3].

Parça tasarımı, malzeme ve enjeksiyon işlem şartları bir plastik ürünün kalitesini etkileyen en önemli unsurlardır. Bu unsurlar, bir plastik üründe meydana gelebilecek problemlerin incelenmesinde oldukça etkilidir. Özellikle, çekme gibi bir plastik ürünün hatasının değerlendirilmesinde enjeksiyon işlem parametrelerinin önemli bir etkisi olduğu araştırmacılar tarafından belirtilmiştir. Araştırmacılar, ABS (Akriilonitril Butadien Stiren) polimer malzemenin plastik enjeksiyonda basılması sırasında, kalıp sıcaklığı, eriyik sıcaklığı, enjeksiyon basıncı, enjeksiyon zamanı, enjeksiyon hızı ve soğutma zamanı gibi farklı işlem parametrelerinin çekme üzerindeki etkisini incelemişlerdir [4-8]. Diğer taraftan, bazı araştırmacılar enjeksiyonla basılan plastik parçaların çekme miktarına etki eden en uygun işlem parametrelerinin aralıklarının Taguchi yöntemi ve ANOVA ile belirlenmesi üzerine odaklanmışlardır. Araştırmacılar çalışmalarında; farklı polimer malzemelerde enjeksiyon sonucu oluşan çekme miktarını Taguchi yöntemine dayalı S/N oranıyla hesaplayarak en uygun işlem parametrelerini tespit etmişlerdir. Her parametrenin çekme üzerindeki önemlilik derecesini sayısal olarak hesaplamışlardır [9-12].

Bu çalışmanın amacı, bir DVD-ROM ön kapağının plastik enjeksiyonda basılması sonucunda oluşan boyutsal çekmeye etki eden en uygun enjeksiyon işlem parametrelerinin Taguchi yöntemiyle belirlenmesidir. Bu amaç için ortogonal (L_{27}) deneysel tasarıma göre planlanmış 27 adet Moldflow plastik akış analizi yapılmıştır. Daha sonra, elde edilen sonuçlar S/N oranı ve ANOVA ile değerlendirilerek en düşük çekme miktarını veren en uygun enjeksiyon işlem parametrelerinin aralıkları saptanmıştır. Sonuç olarak, Taguchi yönteminin güvenilirliğini ve efektifliğini kontrol etmek için hem Moldflow programında hem de gerçek ortamda bir son doğrulama testi yapılmıştır.

2. TAGUCHI YÖNTEMİ

Taguchi yöntemi, üretim alanı ve mühendislik analizinde yaygın olarak kullanılan işlem parametrelerinin en uygun aralıklarını belirlemek için Dr. Genichi Taguchi tarafından geliştirilmiş deneysel bir tekniktir. Taguchi yöntemi, zaman ve ekonominin çok önemli olduğu günümüz endüstrisinde geniş bir yer tutmaktadır. Bu yöntem, yüksek kaliteye sahip sistemlerin tasarlanması ve geliştirilmesi için kullanılan çok güçlü bir araçtır. Bu sebeplerden dolayı, Taguchi yöntemi kullanılarak endüstriler maliyetten hiç ödün vermeksizin ürün geliştirme zamanını önemli ölçüde azaltabilirler [13]. Taguchi yöntemi; sistem tasarımı, parametre tasarımı ve tolerans tasarımı olmak üzere üç aşamaya ayrılmıştır: Sistem tasarımı, bir ürünü üretmek için gerekli olan mühendislik ve bilimsel bilginin kullanılmasından oluşur. Parametre tasarımı, en uygun işlem parametreleri altında bir ürünün parametre değerlerini belirlemek ve performans karakteristiklerini geliştirmek için işlem parametrelerinin en uygun aralıklarını bulur. Tolerans tasarımı ise parametre tasarımı tarafından önerilen en uygun aralıklar civarındaki toleransların analiz edilmesini ve saptanmasını sağlar.

Bahsedilen bu tasarımlar arasında parametre tasarımı, maliyeti artırmaksızın yüksek kaliteye ulaşılmasında anahtar bir rol oynadığı için oldukça önemli ve en yaygın kullanılan aşamadır [14-15].

Diğer taraftan; klasik deneysel tasarım teknikleri çok karmaşık, zaman alıcı ve kullanmak için zordur. Buna ilave olarak, klasik deneysel tasarım tekniklerinde işlem parametrelerinin sayısı arttığı zaman yapılacak deney sayısı da artmak zorundadır. Taguchi yöntemi bu problemleri çözebilmek için, ortogonal deneysel tasarım, sinyal/gürültü (S/N) oranı ve Varyans analizi (ANOVA) gibi üç önemli aracını birleştirerek sonuca ulaşır. Ortogonal deneysel tasarım, çok az sayıda deneyle tüm parametre uzayını tarayan özel bir tasarım oluşturmak için kullanılır. Ortogonal deneysel tasarıma göre planlanmış deneylerden elde edilen sonuçlar, S/N oranı içine taşınarak analiz edilir. S/N oranı, istenen değerlerden çıkarılan performans karakteristiklerinin ölçülmesi için kullanılır. S/N oranı, "(S/N)_{SB}, daha küçük-daha iyisi", "(S/N)_{LB}, daha büyük-daha iyisi" ve "(S/N)_{NB}, nominal-en iyisi" gibi üç temel performans karakteristiğine göre saptanır. ANOVA ise performans karakteristikleri üzerinde etkili olan işlem parametrelerinin önemlilik derecesini istatistiksel olarak saptamak için uygulanır. Bu üç önemli aracın dışında, Taguchi yöntemi elde edilen en iyi sonuçların güvenilirliğini kontrol etmek amacıyla son bir doğrulama testi gerçekleştirir [15-17]. Bahsedilen bu üç temel performans karakteristiği aşağıdaki denklemlerle (1-3) ifade edilebilir. Burada; y_i ; deneylerden ölçülen sonucu, \bar{y} ; deneylerden ölçülen sonuçların ortalamasını, n ; deney sayısını ve s^2_y ; y 'nin varyansını göstermektedir.

$$S/N_{SB} = \eta = -10 \log \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right] \quad (1)$$

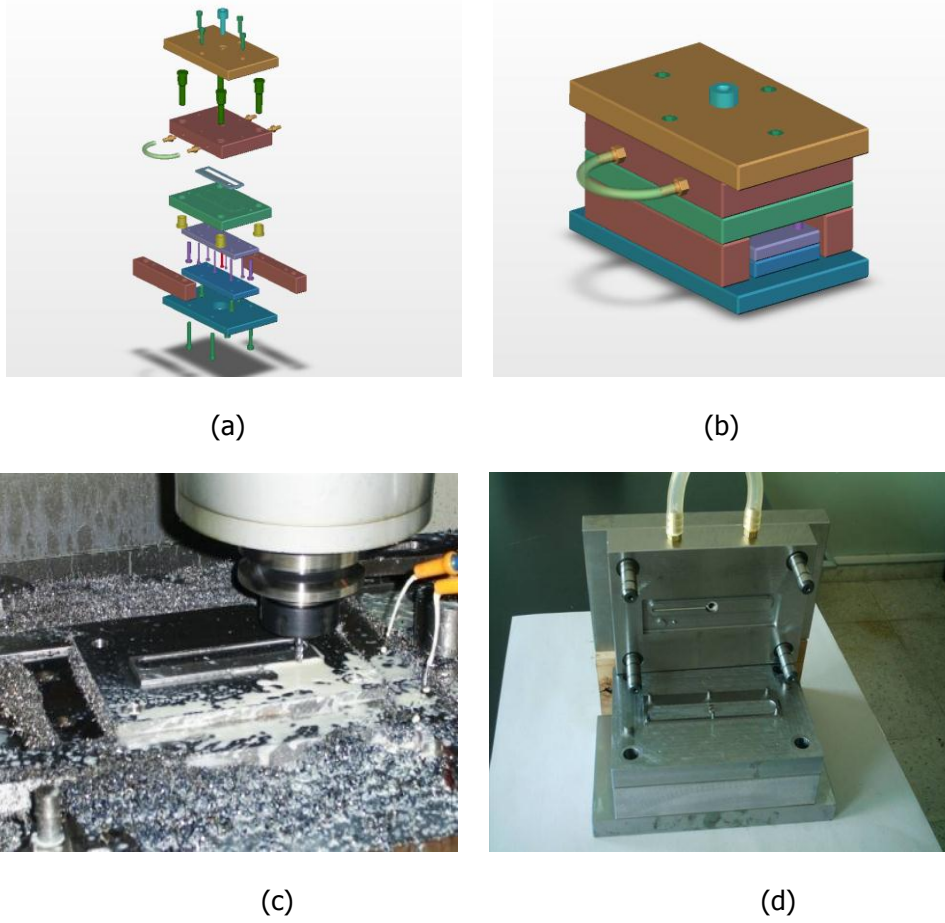
$$S/N_{LB} = \eta = -10 \log \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right] \quad (2)$$

$$S/N_{NB} = \eta = 10 \log \left(\frac{\bar{y}}{s^2_y} \right) \quad (3)$$

3. DENEY ÇALIŞMA

3.1 Tasarım ve İmalat

Bu çalışmada, bir DVD-ROM ön kapağı modeli ve DVD-ROM ön kapağının plastik ürününü enjeksiyon tezgahında basmak için gerekli olan metal kalıp, Pro/ENGINEER WildFire 5.0 CAD/CAM programında tasarlanmıştır. Tasarlanan metal kalıp ve parçaları, çeşitli talaşlı işlem operasyonları kullanılarak imal edilmiştir. Kalıbın düzlemsel ve prizmatik parçaları CNC frezeleme işlemleriyle, dairesel ve silindirik parçaları tornalama işlemleriyle, bu parçaların parlatılması taşlama işlemleriyle ve erkek-dişi kalıp plakalarının kavitelelerindeki ince işlemler dalma erozyon işlemleriyle gerçekleştirilmiştir. İmal edilen kalıp; üst bağlama plakası, alt bağlama plakası, erkek ve dişi plakalar, itici ve geri dönücü pimler, taşıyıcılar, yolluk burcu, yolluk çekici ve civatalardan oluşmuştur. Şekil 1 (a-d), tasarlanan kalıbın CAD modelini, kalıp plakalarının imalatını ve kalıbın bitmiş açık halini göstermektedir.



Şekil 1. Kalıp parçalarının tasarım ve imalatı

3.2 Malzeme

İmal edilen plastik kalıbın plakalarında, çekirdeğine kadar sertleştirilebilme, iyi desenleme ve yüksek parlaklık gibi özelliklerinden dolayı DIN normuna göre 1.2379 (IMPAKS) malzeme tercih edilmiştir. Bu malzemenin sertlik değeri, Wolpert Instron marka bir cihazla 31 RC olarak ölçülmüştür. Belec Vario marka bir cihazla malzemenin kimyasal analizi yapılmış ve elde edilen sonuçlar, Tablo 1’de verilmiştir.

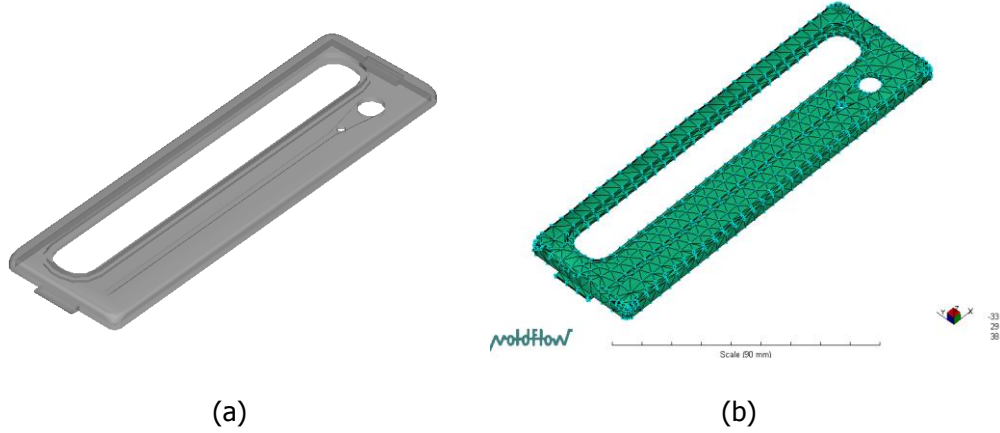
Tablo 1. Malzemenin (IMPAKS) kimyasal bileşimi, (%)

Karbon (C)	Silisyum (Si)	Mangan (Mn)	Nikel (Ni)	Krom (Cr)	Titanyum (Ti)	Molibden (Mo)
0.396	0.292	1.418	1.109	1.855	0.043	0.214

3.3 DVD-ROM Ön Kapağının Moldflow Analizi

DVD-ROM ön kapağı modeli, 153 mm (uzunluk), 45.17 mm (genişlik) ve 7 mm (yükseklik) ölçülerine sahiptir. DVD-ROM ön kapağı modeli Pro/Engineer programında tasarlandıktan sonra *.Stl formatına dönüştürülerek sonlu elemanlar yöntemine göre Moldflow programında analiz

edilmiştir. DVD-ROM ön kapağının sonlu elemanlar modeli, mevcut geometrinin daha küçük elemanlara bölünmesiyle oluşturulmuştur. DVD-ROM ön kapağının sonlu elemanlar yöntemine göre Moldflow programında analizi için "Yüzey-Fusion mesh" tekniği kullanılmıştır. Bu tekniği göre; 2736 bağlantı (düğüm) elemanı, 69 giriş elemanı ve 5318 üçgensel eleman 2.353 en-boy oranıyla elde edilmiştir. Şekil 2 (a-b), DVD-ROM ön kapağının CAD modelini ve sonlu elemanlar yöntemine göre Moldflow programında analiz için oluşturulmuş modelini göstermektedir.



Şekil 2. DVD-ROM ön kapağının CAD ve sonlu elemanlar modelleri

3.4 DVD-ROM Ön Kapağının Plastik Enjeksiyonla Basılması

Bu çalışmada kullanılan DVD-ROM ön kapağı, bir DVD'nin açma-kapama, kılavuzluk yapma ve bilgisayar kasası üzerindeki dış görünüşü gibi işlevlerini yerine getiren plastik üründür. Tasarlanan ve imal edilen kalıp parçaları, DVD-ROM ön kapağının plastik enjeksiyon işlemiyle basılması için kullanılmıştır. DVD-ROM ön kapağının plastik enjeksiyon işlemi için ABS polimer malzeme seçilmiştir. Bu polimer malzemeye ait genel özellikler Tablo 2'de verilmiştir. ABS polimer malzeme, granül halinde 50 °C' de 4 saat kurutulduktan sonra NETSTAL (600 H-110 60 ton 1.66 [25 mm]) marka bir plastik enjeksiyon tezgahında basılmıştır. Şekil 3 (a-b), plastik enjeksiyon işlemi ve basılan plastik ürünleri göstermektedir.

Tablo 2. ABS polimer malzemenin genel özellikleri

Ticari ismi	LG Chemical (HI-121)
Eriyik yoğunluğu (g/cm ³)	0.91459
Malzeme yapısı	Amorf
Isıl iletkenlik (W/m-°C)	0.1960
Spesifik Isı (J/Kg-°C)	2449
Elastiklik modülü (MPa)	2240
Kayma modülü (MPa)	805
Poisson oranı	0.392



(a)

(b)

Şekil 3. Plastik enjeksiyon işlemi ve basılan ürünler

4. SAYISAL ANALİZ ve DEĞERLENDİRME

Taguchi yöntemi, sayısal sonuçların analiz edilmesi ve değerlendirilmesi amacıyla ortogonal deneysel tasarım, S/N oranı ve ANOVA gibi üç önemli aracı birleştirerek çözüme ulaşır. Bu çalışmada, Taguchi yönteminin bahsedilen üç aracı sırasıyla kullanılarak sayısal sonuçlar elde edilmiştir. Çalışmada, Moldflow plastik akış analizleri L_{27} (3^{13}) ortogonal tasarıma göre planlanarak yapılmıştır. L_{27} ortogonal tasarım, üç seviyede 13 sütun ve Moldflow plastik akış analizlerine karşılık gelen 27 satırdan (26 serbestlik derecesi) oluşmuştur. Moldflow plastik akış analizlerinden, beş enjeksiyon işlem parametresine (kalıp sıcaklığı- T_{mo} , eriyik sıcaklığı- T_{me} , enjeksiyon basıncı- P_{inj} , enjeksiyon zamanı- I_t ve soğutma zamanı- C_t) karşılık boyutsal çekme (shrinkage) değerleri elde edilmiştir. Tablo 3, ortogonal deneysel tasarım tekniğine göre planlanmış enjeksiyon işlem parametrelerinin aralıklarını göstermektedir. Moldflow plastik akış analizleri için Moldflow Plastic Insight 5.0 (MPI 5.0) ticari yazılım programı kullanılmıştır [18].

Tablo 3. Taguchi L_{27} (3^{13}) ortogonal deneysel tasarım

Enjeksiyon işlem parametreleri ve aralıkları				
T_{mo} (°C)	T_{me} (°C)	P_{inj} (MPa)	I_t (s)	C_t (s)
40	230	80	1	10
60	240	100	2	15
80	250	120	3	20

S/N oranı, Taguchi yönteminin performans karakteristiklerini istatistiksel ölçen bir araç olup, amaç fonksiyonu olarak tanımlanan istenen cevabın logaritmik bir fonksiyonudur. S/N oranı, performans karakteristiğinin değişkenliğini ve ortalamasının her ikisini de göz önünde bulundurur [16-17]. Bu çalışmada, performans karakteristiği olarak enjeksiyon sonrasında plastik üründe oluşan çekme kabul edilmiştir. Çekmenin küçük olması, plastik ürün kalitesinin daha iyi olmasını sağlayacağından kalite karakteristiği olarak " $(S/N)_{SB}$, daha küçük-daha iyisi" seçilmiştir. Beş enjeksiyon işlem parametresiyle elde edilen çekme değerlerinin her birinin S/N oranları, denklem (1)'de hesaplanarak Tablo 4'te gösterilmiştir.

Tablo 4. Çekme değerleri ve S/N oranları

Moldflow analizleri	Çekme değerleri (%)	S/N Oranları (dB)
1	9.084	-19.1655
2	9.072	-19.1541
3	9.023	-19.1070
4	9.209	-19.2842
5	9.133	-19.2123
6	8.643	-18.7333
7	9.105	-19.1856
8	8.989	-19.0742
9	8.965	-19.0510
10	8.404	-18.4897
11	8.306	-18.3878
12	8.387	-18.4721
13	9.505	-19.5590
14	9.501	-19.5554
15	9.473	-19.5298
16	9.481	-19.5371
17	9.491	-19.5462
18	9.483	-19.5389
19	8.685	-18.7754
20	8.683	-18.7734
21	8.686	-18.7764
22	8.769	-18.8590
23	8.652	-18.7423
24	8.645	-18.7353
25	9.921	-19.9311
26	9.979	-19.9817
27	9.659	-19.6986

Çekme değerlerini veren enjeksiyon işlem parametrelerinin en uygun aralıklarını belirlemek için farklı seviyelerdeki her enjeksiyon işlem parametresinin ortalama cevaplarını hesaplamak gereklidir. Bundan dolayı, çekme değerleri ve S/N oranları için ortalama cevap tablosu oluşturulmuştur. Bu tablodaki değerler, Moldflow plastik akış analizlerinden elde edilen çekme değerleri ile S/N oranlarının ortalaması alınarak hesaplanmış ve elde edilen sonuçlar Tablo 5'te gösterilmiştir.

Tablo 5. Çekme değerleri ve S/N oranları için ortalama cevap tablosu

Enjeksiyon işlem parametreleri	Seviye I		Seviye II		Seviye III	
T_{mo} (°C)	-19.1075	9.02478	-19.1796	9.11456	-19.1415	9.07544
T_{me} (°C)	-18.7891	8.70333	-19.1345	9.05889	-19.5050	9.45256
P_{inj} (MPa)	-19.1539	9.07778	-19.1323	9.07122	-19.1422	9.06578
I_t (s)	-19.5203	9.46856	-19.1308	9.05489	-18.7775	8.69133
C_t (s)	-19.1985	9.12922	-19.1586	9.08956	-19.0714	8.99600

ANOVA (Varyans analizi), beş enjeksiyon işlem parametresinin çekme üzerindeki etkisini sayısal olarak belirlemek için kullanılan bir araçtır. Bu çalışmada, beş enjeksiyon parametresinin çekme üzerindeki etkisi ve her işlem parametresinin etki oranı Tablo 6'da verilmiştir. Beş enjeksiyon parametresinin çekme üzerindeki sayısal etkisi, Tablo 6'da yer alan F-test ile değerlendirilmiştir. % 95'lik ($\alpha=0.05$) güvenilirlik aralığında beş enjeksiyon işlem parametresini kontrol etmek amacıyla, F-değeri (hesaplanmış) kullanılmış ve $F_{0.05,2,16}=3.63$ olarak bulunmuştur. Tablo 6 incelendiğinde; enjeksiyon zamanına (113.53) ve eriyik sıcaklığına (105.44) ait F-test değerlerinin, F-değerinden (hesaplanmış) daha büyük olduğu görülebilir. Bu durum, beş enjeksiyon işlem parametresi arasında enjeksiyon zamanı ve eriyik sıcaklığının en önemli iki parametre olduğunu gösterir. Diğer taraftan; her enjeksiyon işlem parametresinin çekme üzerindeki etkisinin yüzdesel oranı, enjeksiyon zamanı % 48.93, eriyik sıcaklığı % 45.44, soğutma zamanı % 1.5138, kalıp sıcaklığı % 0.655 ve enjeksiyon basıncı % 0.0117 olarak hesaplanmıştır.

Tablo 6. Çekme değerleri için ANOVA tablosu

Varyansın kaynağı	Serbestlik derecesi (v)	Kareler toplamı (SS)	Varyans (V _e)	F-değeri (Test)	F-değeri (Hesaplanmış)	Katkı oranı (%)
T_{mo} (°C)	2	0.03647	0.01824	1.52	3.63	0.655
T_{me} (°C)	2	2.52818	1.26409	105.44	3.63	45.44
P_{inj} (MPa)	2	0.00065	0.00032	0.03	3.63	0.0117
I_t (s)	2	2.72210	1.36105	113.53	3.63	48.93
C_t (s)	2	0.08422	0.04211	3.51	3.63	1.5138
Hata, v_e	16	0.19181	0.01199			3.45
Toplam, v _T	26	5.56344				100

En küçük çekme değerini veren enjeksiyon işlem parametrelerinin en uygun aralıkları, en büyük S/N oranlarıyla tespit edilebilir. Diğer bir anlamda, daha büyük S/N oranına sahip bir parametre daha küçük çekme miktarını verir. Bu çalışmada, en küçük çekmeyi veren enjeksiyon işlem parametrelerinin en uygun aralıkları, Tablo 5'de gösterilen her parametreye ait en büyük S/N oranı seçilerek belirlenmiştir. Buna göre, en küçük çekme değerini veren enjeksiyon işlem parametrelerinin en uygun aralıkları; **T_{mo} (I)**, **T_{me} (I)**, **P_{inj} (II)**, **I_t (III)** ve **C_t (III)** biçiminde bulunmuştur.

Bu parametrelerin en uygun aralıkları kullanılarak en düşük çekme değeri aşağıdaki denklemlerle hesaplanmıştır (4-5):

$$S_{\eta opt} = \left[\left(\bar{T}_{mo(I)} + \bar{T}_{me(I)} + \bar{P}_{inj(II)} + \bar{I}_{t(III)} + \bar{C}_{t(III)} \right) - 4\bar{T}_{\eta} \right] \quad (4)$$

$$S_{\eta opt} = -18.3063 \text{ dB}$$

$$\bar{T}_{\eta} = -19.1428 \text{ dB}$$

$$S_{cal} = 10^{-S_{\eta opt} / 20} \quad (5)$$

$$S_{cal} = 8.228\%$$

Burada; S (%); çekmeyi, $S_{\eta opt}$; enjeksiyon işlem parametrelerinin en uygun aralıklarıyla hesaplanan S/N oranlarını, S_{cal} ; enjeksiyon işlem parametrelerinin en uygun aralıklarındaki çekme değerlerinin hesaplanması için denklem (1)'e dayalı olarak çıkarılan bir ifadeyi ve \bar{T}_{η} ise çekme için tüm enjeksiyon işlem parametrelerinden elde edilen S/N oranlarının ortalamasını gösterir. Çalışma boyunca elde edilen sonuçların sayısal analizi için Minitab 15 istatistiksel yazılım programı kullanılmıştır [19-20].

Enjeksiyon işlem parametrelerinin en uygun aralıkları belirlendikten sonra, Taguchi yönteminin güvenilirliğinin kontrol edilmesine ihtiyaç vardır. Bu amaç için son bir doğrulama testi, enjeksiyon işlem parametrelerinin en uygun aralıklarıyla hem Moldflow programında hem de plastik enjeksiyon tezgahında yapılmıştır. Doğrulama testi kendi içinde üç kez tekrarlanmıştır. Doğrulama testinin sonuçlarını karşılaştırmak için % 95'lik ($\alpha=0.05$) güvenilirlik aralığı (CI) tercih edilmiştir. CI , aşağıdaki denkleme göre hesaplanmıştır (6-7):

$$CI = \sqrt{F_{0.05(1, v_e)} V_e \left(\frac{1}{n_{eff}} + \frac{1}{r} \right)} \quad (6)$$

$$n_{eff} = \frac{N}{1 + v_T} \quad (7)$$

Burada; $F_{0.05(1, v_e)}$; % 95 güvenilirlik aralığındaki F değerini, v_e ; hata için serbestlik derecesini, V_e ; varyans hatasını (ortalama karesel hatayı), n_{eff} ; tekrarların efektif sayısını, r ; doğrulama testlerinin sayısını, N ; toplam deney ya da test sayısını ve v_T ; işlem parametreleri için toplam serbestlik derecesini göstermektedir [20]. Tablo 7'de, S_{con} (%); doğrulama testinin ölçülen çekme değerini ve $S_{\eta con}$; bu çekme değerinin S/N oranını göstermektedir. Tablo 7'deki sonuçlar incelendiğinde, hesaplanan değerler ile doğrulama testinden elde edilen değerler arasındaki farkların % 95'lik güvenilirlik aralığı içinde olduğu denklem (8)'den görülebilir. Bunun anlamı, çekme için oluşturulan sayısal modeller yeterlidir ve çekme problemi için Taguchi yöntemi başarılı bir biçimde uygulanabilir.

$$CI = \pm 0.2125 \text{ (dB)}$$

$$Farklar = 0.1567 \text{ ve } 0.2047$$

$$-0.2125 < Farklar < 0.2125 \quad (8)$$

Tablo 7. Doğrulama testi sonuçlarının karşılaştırılması

Çekme değerleri	Test sonuçları		Hesaplanan değerler		Farklar
	S_{con} (%)	$S_{\eta con}$ (dB)	S_{cal} (%)	$S_{\eta opt}$ (dB)	$ S_{\eta con} - S_{\eta opt} $
Moldflow akış analizi	8.378	-18.463	8.228	-18.3063	0.1567
Enjeksiyon tezgahı	8.425	-18.511			0.2047

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada, bir DVD-ROM ön kapağının plastik enjeksiyon işlemiyle basılması sonucunda oluşan çekmeye etki eden en uygun enjeksiyon işlem parametrelerinin Taguchi yöntemiyle belirlenmesi hedeflenmiştir. Ortogonal (L_{27}) deneysel tasarım tekniği, S/N oranı ve ANOVA en uygun enjeksiyon işlem parametrelerini elde etmek için birleştirilmiştir. Son bir doğrulama testi Taguchi yönteminin geçerliliğini ve performansını kontrol etmek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Bu bulguların ışığında aşağıdaki sonuçlar çıkarılabilir:

- Enjeksiyon zamanı (% 48.93) ve eriyik sıcaklığının (% 45.44), çekmeyi etkileyen en önemli iki parametre olduğu ANOVA sonuçlarından görülmüştür.
- S/N oranı sonuçlarından çekme için en uygun enjeksiyon işlem parametrelerinin; kalıp sıcaklığı 40 °C, eriyik sıcaklığı 230 °C, enjeksiyon basıncı 100 MPa, enjeksiyon zamanı 3 s ve soğutma zamanının 20 s olduğu görülmüştür.
- Hesaplanan değerler ile doğrulama testinden elde edilen değerler arasındaki farkların % 95 güvenilirlik aralığı içinde olduğu görülmüştür. Bunun anlamı, çekme için oluşturulan sayısal modeller yeterlidir ve Taguchi yöntemi çekme problemi için başarılı bir biçimde uygulanabilir.
- Sonuç olarak, bu çalışmada kullanılan Taguchi yönteminin plastik kalıplılık endüstrisinde karşılaşılan çekme problemlerinin azaltılmasında çok güçlü ve önemli bir araç olduğu görülmüştür. Ayrıca, Taguchi yöntemi çekme dışında diğer plastik enjeksiyon problemlerine de kolaylıkla uygulanabilir.

TEŞEKKÜR

Yazar, OCAK Kalıp A.Ş.'ye plastik ürünlerin basılmasında, Gebze Meslek Lisesi Makine Bölümü Hocalarından Haydar Karakaya'ya kalıbın imalatında ve plastik ürünlerin tekrar basılmasında ve ASSAB Çelik ve ISIL İŞLEM SAN. A.Ş.'ye kalıp malzemelerinin temin edilmesinde yapmış olduğu yardımlarından dolayı sonsuz teşekkürlerini sunar.

6. KAYNAKÇA

- [1] BEAUMONT J.P., NAGEL, R. ve SHERMAN, R., **Successful Injection Molding**: Hanser/Gardner Publications Inc., Cincinnati, USA, (2002).
- [2] ATAŞİMŞEK, S., **Plastik ve Metal Kalıplılık Teknikleri**, Birsen Yayınevi, İstanbul, (2002).
- [3] POTSCH, G. ve MICHAELI, W., **Injection Molding: An Introduction**, Hanser Publication, New York, USA, (1995).

- [4] IYER, N. ve RAMANI K., A Study of Localized Shrinkage In Injection Molding with High Thermal Conductivity Molds, **Journal of Injection Moulding Technology**, 6 (2): 73-90, (2002).
- [5] JANSEN, K.M.B., VAN DIJK D.J. ve HUSSELMAN M.H., Effect of Processing Conditions on Shrinkage in Injection Molding, **Polymer Engineering Science**, 38, 5, 838-846, (1998).
- [6] JAFAIRAN, A.R. ve SHAKERI, M., Investigating the Influence of Different Process Parameters on Shrinkage of Injection-molding Parts, **American Journal of Apply Science**, 2, 3, 688-700, (2005).
- [7] DEMİRER, A., SOYDAN, Y. ve KAPTI, A.O., An Experimental Investigation of the Effects of Hot Runner System on Injection Moulding Process in Comparison with Conventional Runner System, **Materials & Design**, 28, 1467-1476, (2007).
- [8] KURT, M., KAYNAK, Y., KAMBER, O.S., MUTLU, B., BAKIR, B. ve KOKLU, U., Influence of Molding Conditions on the Shrinkage and Roundness of Injection Molded Parts, **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 46, 571-578, (2010).
- [9] CHANG T.C. ve FAÏSON, E., Shrinkage Behavior and Optimization of Injection Molded Parts Studied by Taguchi method, **Polymer Engineering Science**, 41, 5, 703-710, (2001).
- [10] ALTAN, M., Reducing Shrinkage in Injection Moldings via Taguchi, ANOVA, and Neural Network, **Materials & Design**, 31, 599-604, (2010).
- [11] BERGINC, B., KAMPUS, Z. VE SUSTARIC, B., The Use of the Taguchi Approach to Determine the Influence of Injection Molding Parameters on the Properties of Green Parts, **Journal of Achieving Materials Manufacturing Engineering**, 15, 1-2, 63-70, (2006).
- [12] LIAO, S.J., CHANG, D., CHEN, H.J., TSOU, L.S., HO, J.R., YAU, H.T., et al., Optimal Process Conditions of Shrinkage and Warpage of Thin Wall Parts. **Polymer Engineering Science**, 44, 917-928, (2004).
- [13] OKTEM, H., ERZURUMLU, T. ve UZMAN, I., Application of Taguchi Optimization Technique in Determining Plastic Injection Molding Process Parameters for a Thin-Shell Part, **Materials & Design**, 28, 1271-1278, (2007).
- [14] TAGUCHI, G., **Introduction to Quality Engineering**, Asian Productivity Organization, Tokyo, (1990).
- [15] ROSS, P.J., **Taguchi Techniques for Quality Engineering**, Mc Graw-Hill, New York, USA, (1996)
- [16] PHADKE, M.S., **Quality Engineering Using Robust Design**, Printice Hall, Englewood Cliffs, NJ, (1989).
- [17] YUIN, W. ve ALAN, W., **Taguchi Methods for robust design**, First ed. ASME Press, New York, (2000).
- [18] Moldflow Plastic Insight 5.0 (MPI 5.0), Moldflow Corp., Framingham, MA 01701, USA, (2004).
- [19] **Minitab Statistical Software**, Release 15, Making Data Analysis Easier, State College, Minitab Corp., Pennsylvania, USA, (2007).
- [20] KOPAC, J., BAHOR, M. ve SOKOVIC, M., Optimal Machining Parameters for Achieving the Desired Surface Roughness in Fine Turning of Cold Pre-Formed Steel Workpiece, **International Journal of Machine Tool Manufacturing**, 42, 707-716, (2002).