

# Plastik Ürünlerin Mekanik Özelliklerini Etkileyen En Uygun Enjeksiyon İşlem Parametrelerinin Taguchi Yöntemiyle Belirlenmesi

**Hasan Öktem**  
Yrd. Doç. Dr.

KOCAELİ Üniversitesi  
Hereke Meslek Yüksekokulu  
Makine ve Metal Teknol. Bölümü  
KOCAELİ

**Durmuş Kır**  
Öğr. Gör. Dr.

**Ece Simooğlu Sarı**  
Öğr. Gör.

**Mustafa Çöl**  
Doç. Dr.

KOCAELİ Üniversitesi  
Metalurji ve Malzeme Mühendisliği  
KOCAELİ

*Plastik enjeksiyon kalıpcılığı, plastik ürünlerin hassas ve seri bir biçimde basılmasını sağlayan en önemli üretim yöntemlerinden biridir. Mekanik özellikler, plastik ürünlerin kalitesine önemli ölçüde etki eder. Plastik ürünlerin mekanik özelliklerinin enjeksiyon işlem parametreleriyle kontrol edilmesi önemli bir araştırma konusudur. Bu çalışmada, bir DVD-ROM ön kapağının plastik enjeksiyonla basılması sırasında ürün kalitesine etki eden mekanik özelliklerin en uygun enjeksiyon işlem parametreleriyle Taguchi yöntemine dayalı olarak belirlenmesi hedeflenmiştir. Bu amaç için, beş enjeksiyon işlem parametresi (eriyik sıcaklığı, enjeksiyon basıncı, ütüleme basıncı, ütüleme süresi ve soğutma süresi)  $L_{27}$  ortogonal deneysel tasarıma göre dizilerek 27 plastik enjeksiyon deneyi hem Polietilen (PE) hem de Polipropilen (PP) polimer malzeme için gerçekleştirilmiştir. Daha sonra, DVD-ROM ön kapağından çıkarılan plastik numuneler üzerinde üç noktalı eğme testi yapılarak eğilme mukavemeti ve eğilme modülü değerleri elde edilmiştir. Bu değerler kullanılarak Sinyal/Gürültü (S/N) oranları hesaplanmıştır. Her bir enjeksiyon işlem parametresinin eğilme mukavemeti ve eğilme modülü üzerindeki etkisi, Varyans analiziyle (ANOVA) istatikselsel olarak tespit edilmiştir. Çalışma sonunda, en büyük eğilme mukavemeti ve en büyük eğilme modülü değerlerini veren en uygun enjeksiyon işlem parametreleri Taguchi yöntemiyle bulunmuştur. Taguchi yönteminin güvenilirliği ve verimliliğini kontrol etmek için son bir doğrulama deneyi, en uygun işlem parametreleriyle plastik enjeksiyon tezgahında gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlardan, plastik ürünlerin kalitesini etkileyen mekanik özelliklerin değerlendirilmesinde Taguchi yönteminin çok kolay, güçlü ve efektif bir araç olduğu anlaşılmıştır.*

*Anahtar Kelimeler: Plastik Enjeksiyon Kalıpcılığı, Mekanik Özellikler, S/N Oranı, ANOVA, Taguchi Yöntemi*

## GİRİŞ

Plastik enjeksiyon kalıpcılığı günümüz endüstrisinde ince cidarlı plastik ürünlerin üretilmesinde kritik bir rol oynar. Plastik enjeksiyon kalıpcılığı; özellikle 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 içersine dolmaya zorlanır. Dolma işlemi tamamlandığında, soğutmadan 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 çıkarılarak işlem tamamlanır [2-3].

Parça tasarımı, malzeme ve enjeksiyon işlem parametreleri bir plastik ürünün kalitesini etkileyen en önemli faktörlerdir. Bu faktörler, bir plastik üründe meydana gelebilecek problemlerin incelenmesinde oldukça etkilidir. Özellikle, mekanik özellikler bir plastik ürünün kalitesinin değerlendirilmesinde önemli rol oynar. Plastik ürünlerin mekanik özelliklerinin (eğilme mukavemeti, eğilme modülü, akma ve çekme mukavemeti gibi) plastik enjeksiyon işlem parametreleriyle kontrol edilebileceği ifade edilmiştir [4-5]. Bazı araştırmacılar, PP ve PE gibi polimer malzemelerin plastik enjeksiyonla basılması

sırasında, kalıp sıcaklığı, eriyik sıcaklığı, enjeksiyon basıncı, enjeksiyon zamanı, enjeksiyon hızı ve soğutma zamanı gibi farklı işlem parametreleri kullanarak plastik ürünlerin mekanik özelliklerini kalite açısından incelemişlerdir [6-8]. Diğer taraftan, bazı araştırmacılar enjeksiyonla basılan plastik ürünlerin kalitelerine etki eden ölçüsel ve mekanik özelliklerin en uygun enjeksiyon işlem parametreleriyle belirlenmesi için Taguchi yöntemini kullanmışlardır. Araştırmacılar çalışmalarında; farklı polimer malzemelerle plastik ürünlerin basılması sırasında eğilme mukavemeti, eğilme modülü, çekme mukavemeti, boyutsal çekme ve çarpılma değerlerini Taguchi yöntemine dayalı S/N oranıyla hesaplayarak en uygun işlem parametrelerini bulmuşlardır. Daha sonra, her enjeksiyon işlem parametresinin sonuçlar üzerindeki sayısal etkisini hesaplamışlardır. Taguchi yönteminin doğruluğunu ve güvenilirliğini kontrol etmek amacıyla da son bir doğrulama deneyi yapmışlardır [9-14].

Bu çalışmanın amacı, bir DVD-ROM ön kapığının plastik enjeksiyonda basılması sonucunda elde edilen ürünün kalitesine etki eden en uygun enjeksiyon işlem parametrelerinin Taguchi yöntemiyle belirlenmesidir. Bu amaç doğrultusunda, ortogonal ( $L_{27}$ ) deneysel tasarıma göre planlanmış toplam 27 adet deney yapılmış ve deneylerden elde edilen plastik numuneler üzerinde üç noktalı eğme testi gerçekleştirilmiştir. Ölçüm sonuçları, S/N oranı ve ANOVA ile değerlendirilerek en büyük eğilme mukavemeti ve eğilme modülünü veren en uygun enjeksiyon işlem parametrelerinin aralıkları saptanmıştır. Son olarak, Taguchi yönteminin efektifliğini ve güvenilirliğini kontrol etmek için gerçek ortamda bir son doğrulama deneyi yapılmıştır.

## TAGUCHI YÖNTEMİ: GÜÇLÜ TASARIM VE ANALİZ

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 [15].

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 [16-17].

Diğer taraftan; klasik deneysel tasarım teknikleri çok karmaşık, zaman alıcı ve kullanmak için zordur. Buna ilave olarak, klasik deneysel tasarım tekniklerinde işlem parametrelerinin sayısı arttıkça zaman yapılacak deney sayısı da artmak zorundadır. Taguchi yöntemi ise bu problemleri çözebilmek için, ortogonal deneysel tasarım, sinyal/gürültü oranı (S/N) 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)<sub>SB</sub>, daha küçük-daha iyisi”, “(S/N)<sub>LB</sub>, daha büyük-daha iyisi” ve “(S/N)<sub>NB</sub>, nominal-en iyisi” gibi üç temel performans karakteristiğine göre saptanır. ANOVA analizi 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 [17-18]. Bahsedilen bu üç temel performans karakteristiği aşağıdaki denklemlerle (1, 2, 3) ifade edilebilir. Burada;  $y_i$ ; deneylerden ölçülen sonucu,  $\bar{y}$ ; deneylerden ölçülen sonuçların ortalamasını,  $n$ ; deney sayısını ve  $s^2_{y_i}$ ;  $y_i$ 'nin varyansını göstermektedir.

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

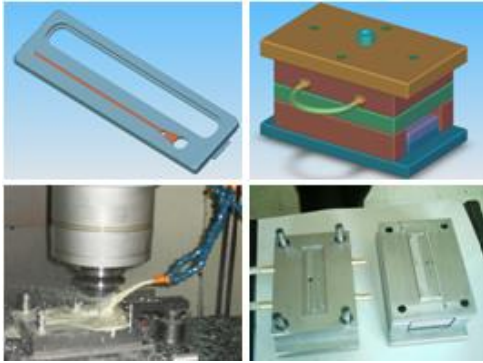
$$S/N_{SB}=\eta = -10 \log \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right] \quad (2)$$

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

## DENEYSEL ÇALIŞMA

### Kalıp Tasarımı ve İmalatı

Bu çalışmada, bir DVD-ROM ön kapağı modeli ve bu modelin plastik ürününü enjeksiyon tezgahında basmak için gerekli olan ürün ve plastik kalıbın tasarımı Pro/Engineer WildFire 5.0 CAD/CAM programında yapılmıştır. Plastik kalıbın parçaları, çeşitli talaşlı işlem operasyonları sonucunda 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 boşluklarındaki 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, DVD-ROM ön kapağının tasarımını, plastik kalıp tasarımını ve kalıbın imalat işlemlerini göstermektedir.



Şekil 1. Plastik ürünün tasarım ve imalatı

### Malzeme

Plastik kalıplarda yaygın olarak kullanılması, çekirdeğine kadar sertleştirilebilmesi, iyi desenlenebilmesi ve yüksek parlaklık verebilmesi gibi özelliklerinden dolayı, bu çalışmada 1.2738 (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.

### Plastik Enjeksiyon İşlemi

Bu çalışmada kullanılan DVD-ROM ön kapağı, bir bilgisayarın kasası üzerinde bulunan DVD’nin açma-kapama görevini yerine getiren bir plastik üründür. DVD-ROM ön kapağının, plastik ürünün basılmasında PE ve PP polimer malzemeler kullanılmıştır. Bu polimer malzemelere ait genel özellikler, Tablo 2’de verilmiştir. Polimer

malzemeler, TMC 60 WO (60 tonluk, 16.7 kW güç, 81 gr. hammadde alma ve 100 bar kapama basıncı) marka yatay bir plastik enjeksiyon tezgahında basılmıştır. Plastik ürünlerin (numunelerin) enjeksiyon işlemleri ve deneyler, Şekil 2’de gösterilmiştir.

Tablo 1. Malzemenin kimyasal bileşimi

Element	(%, wt)
Karbon (C)	0.396
Silisyum(Si)	0.292
Mangan (Mn)	1.418
Nikel (Ni)	1.109
Krom (Cr)	1.855
Titanyum (Ti)	0.043
Molibden (Mo)	0.214
Demir (Fe)	Kalan

Tablo 2. PE ve PP genel özellikleri

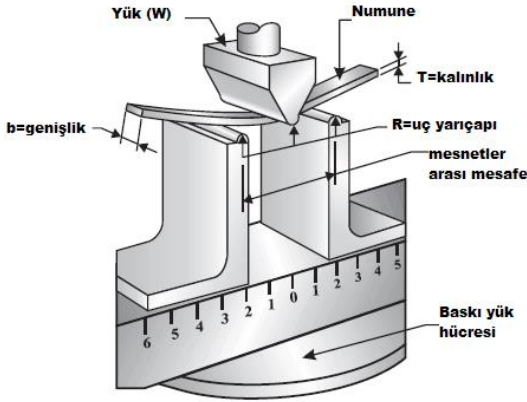
Özellikler	Polietilen	Polipropilen
Eriyik yoğunluğu (g/cm <sup>3</sup> )	0.960	0.90-0.91
Eriyik akış hızı (°C/kg)	7	1.3
Isıl iletkenlik (W/m-°C)	11-12.4	2.8
Spesifik Isı (J/Kg-°C)	0.55	0.46
Erime noktası (°C)	137	160-170
Malzeme yapısı	Yarı kristal	Yarı kristal



Şekil 2. Plastik numunelerin enjeksiyon işlemleri

## Üç Noktalı Eğme Testi

Üç noktalı eğme testi, eğilmeye maruz kalan bir malzemenin mekanik özelliklerinin (gerilme-uzama davranışının) tespit edilmesinde kullanılır. Üç noktalı eğme testi, ASTM D-790 uluslararası standardına göre uygulanmaktadır (Şekil 3). Üç noktalı eğme testinden elde edilen eğilme mukavemeti, eğilme modülü ve eğilme miktarı (çökme-sehim) aşağıdaki denklemlerdeki (4-6) gibi hesaplanabilir [20]:



Şekil 3. Üç noktalı eğme testi prosedürü

$$\sigma = \frac{3xWxL}{2xbxT^2} \quad (4)$$

$$\varepsilon = \frac{6x\delta xT}{L^2} \quad (5)$$

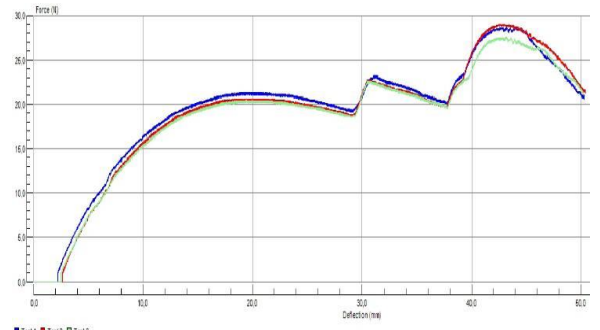
$$\delta = \frac{0.25xWxL^3}{ExTx b^3} \quad (6)$$

Burada;  $\sigma$ ; eğilme mukavemetini,  $\varepsilon$ ; birim uzamayı,  $\delta$ ; eğilme miktarını (çökmeyi),  $W$ ; uygulanan yükü,  $L$ ; mesnetler arası uzaklığı,  $b$ ; numune genişliğini,  $T$ ; numunenin et kalınlığını ve  $E$ ; eğilme modülünü (elastiklik modülünü) göstermektedir [20]. Bu çalışmada, PE ve PP polimer malzemelerin akma gerilmesi, eğilme mukavemeti ve eğilme modülü gibi mekanik özellikleri Testometric marka bir cihazda WinTest Anaysis programıyla tespit edilmiştir. Üç noktalı eğme testinde, deney hızı;  $v=6.29$  mm/dak, mesnetler arası mesafe;  $L=100$  mm, yük uygulama uç yarıçapı;  $R=2$  mm ve numune kalınlığı;  $T=3$  mm'dir. Uygulanan üç noktalı eğme testi, Şekil 4'te gösterilmiştir.

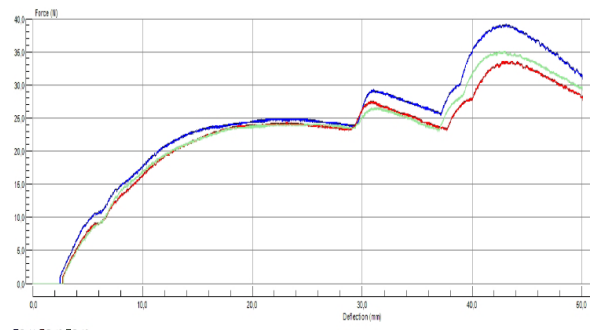


Şekil 4. Üç noktalı eğme testi

Üç noktalı eğme testinin uygulandığı PE ve PP numunelere ait yük-eğilme eğrileri, Şekil 5 ve Şekil 6'da gösterilmiştir. Bu grafiklere dayalı olarak, eğilme mukavemeti ve eğilme modülü değerleri saptanmıştır.

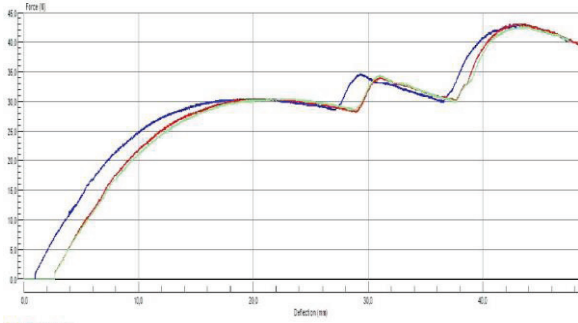


(a)

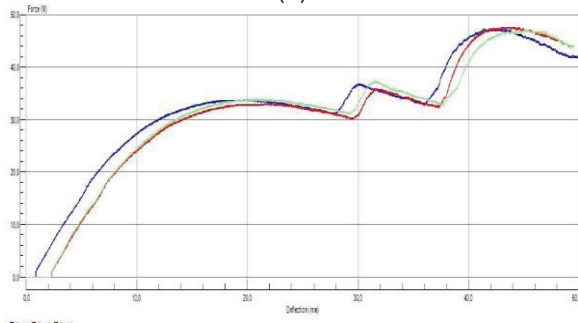


(b)

Şekil 5. PE numuneleri için yük-eğilme eğrileri



(a)



(b)

Şekil 6. PP numuneleri için yük-eğilme eğrileri

## TAGUCHI YÖNTEMİNİN UYGULANMASI

Bu çalışmada, en büyük eğilme mukavemetini ve en büyük eğilme modülünü veren en uygun enjeksiyon işlem parametreleri Taguchi yöntemiyle belirlenmiş ve buna bağlı olarak plastik ürün kalitesinin geliştirilmesi için sekiz adım uygulanmıştır. Güncel bu çalışmada, Taguchi yöntemini uygulamak için **Minitab 15** istatistiksel analiz programı kullanılmıştır [19]. Taguchi optimizasyon yöntemini uygulamak için gerekli olan adımlar, Şekil 7'de sırasıyla gösterilmiştir.

## DENEYSEL SONUÇLARIN ANALİZİ ve TARTIŞMA

Taguchi yöntemi, sayısal sonuçları analiz etmek ve değerlendirmek için ortogonal deneysel tasarım, S/N oranı ve ANOVA gibi önemli üç aracı birleştirerek çözüme ulaşır [17-18]. Bu çalışmada, Taguchi yönteminin bahsedilen üç aracı sırasıyla kullanılarak sayısal sonuçlar elde edilmiştir. PE ve PP malzemeler için L<sub>27</sub> (3<sup>13</sup>) ortogonal deneysel tasarıma dayalı toplam 54 deney yapılmıştır. L<sub>27</sub> ortogonal tasarım, üç seviyede 13 sütun ve plastik enjeksiyon deneylerine karşılık gelen 27 satırdan (26 serbestlik derecesi) oluşmuştur. Deneylerde, beş enjeksiyon işlem parametresine karşılık (erişik sıcaklığı-T<sub>erişik</sub>, enjeksiyon basıncı-P<sub>enj</sub>, ütüleme basıncı-P<sub>ü</sub>, ütüleme zamanı-Ü<sub>t</sub>, ve soğutma zamanı-St) eğilme mukavemeti ve eğilme modülü gibi mekanik özellikler elde edilmiştir. Tablo 3 ve

Tablo 4, ortogonal deneysel tasarım tekniğine göre planlanmış enjeksiyon işlem parametreleri ve aralıklarını göstermektedir.



Şekil 7. Taguchi yönteminin akış diyagramı

Tablo 3. PE için Enjeksiyon İşlem Parametreleri

L <sub>27</sub> (3 <sup>13</sup> ) ortogonal deneysel tasarım				
T <sub>erişik</sub> (°C)	P <sub>enj</sub> (MPa)	P <sub>ü</sub> (MPa)	Ü <sub>t</sub> (s)	S <sub>t</sub> (s)
185	80	40	3	6
195	90	50	5	9
205	100	60	7	12

Tablo 4. PP için Enjeksiyon İşlem Parametreleri

L <sub>27</sub> (3 <sup>13</sup> ) ortogonal deneysel tasarım				
T <sub>erişik</sub> (°C)	P <sub>enj</sub> (MPa)	P <sub>ü</sub> (MPa)	Ü <sub>t</sub> (s)	S <sub>t</sub> (s)
170	80	50	3	6
185	90	60	5	9
200	100	70	7	12

S/N oranı, Taguchi yönteminin performans karakteristiklerini istatistiksel ölçen bir araç olup, amaç fonksiyonu olarak tanımlanan istenen cevabın logaritmik bir fonksiyonudur [16-17]. Bu çalışmada performans karakteristiği olarak, enjeksiyon sonrasında plastik ürüne uygulanan üç noktalı eğme testinden elde edilen eğilme mukavemeti ve eğilme

modülü seçilmiştir. Eğilme mukavemeti ve eğilme modülünün büyük olması, plastik ürünün daha sağlam olmasını sağlayacağından kalite karakteristiği olarak “(S/N)<sub>LB</sub>, daha büyük-daha iyisi” seçilmiştir. Beş enjeksiyon işlem parametresiyle PE ve PP numuneler için üç noktalı eğme testinden elde edilen eğilme mukavemeti ve eğilme modülü değerlerinin her birinin S/N oranları, denklem (2)’de hesaplanarak Tablo 5’te gösterilmiştir.

Tablo 5. PE ve PP malzemeler için S/N oranları

Deney no	Polietilen (S/N Oranları-dB)		Polipropilen (S/N Oranları-dB)	
	Eğilme mukavemeti	Eğilme modülü	Eğilme mukavemeti	Eğilme modülü
1	24.4784	59.2010	29.5959	62.5817
2	24.4093	58.5239	29.8731	62.0795
3	24.3677	58.6249	29.9757	62.2689
4	25.6690	58.8041	29.9903	62.2605
5	25.1640	58.4130	29.6792	62.0499
6	25.0748	58.4374	29.6640	62.1433
7	24.8410	58.2841	29.7244	62.3076
8	25.0235	58.5337	29.7244	62.4405
9	24.9717	58.4003	31.5386	63.6289
10	25.0362	58.7080	30.8814	63.2495
11	25.5848	58.5331	30.9792	63.1371
12	25.1132	58.6802	31.0953	63.2861
13	27.7825	60.0095	31.0762	63.1691
14	26.9459	59.3322	30.9988	63.1486
15	26.6542	59.0942	30.6011	62.8561
16	26.2362	59.9648	30.7757	62.9005
17	25.6331	59.6168	30.6282	62.8177
18	26.5337	60.1042	30.8550	62.9026
19	26.1800	59.7833	31.2917	62.8932
20	26.2586	59.7940	31.1338	62.7685
21	26.2475	59.5828	30.8286	62.9144
22	26.1120	59.7382	30.6821	62.9677
23	26.2698	59.7076	30.7690	63.1499
24	26.5337	59.5105	30.9010	62.8673
25	28.4674	58.4607	30.8945	62.8833
26	27.5060	58.6638	30.5672	62.9370
27	27.3595	58.1076	30.8814	63.0143

En büyük eğilme mukavemeti ve en büyük eğilme modülü değerlerini veren en uygun enjeksiyon işlem parametrelerini belirlemek için farklı seviyelerdeki her enjeksiyon işlem parametresinin ortalama cevaplarını hesaplamak gereklidir. Bundan dolayı, eğilme mukavemeti ile eğilme modülü ve bunların S/N oranları için ortalama cevap tablosu oluşturulmuştur. Bu tablodaki değerler, S/N oranlarının ortalaması alınarak hesaplanmış ve sonuçlar Tablo 6 ve Tablo 7’de verilmiştir.

Tablo 6. PE için S/N oranları ortalama cevap tablosu

Enjeksiyon işlem parametreleri	Eğilme mukavemeti			Eğilme modülü		
	I	II	III	I	II	III
T <sub>eriyik</sub> (°C)	24.89	26.17	26.77	58.58	59.34	59.26
P <sub>enj</sub> (°C)	25.30	26.25	26.29	59.05	59.23	58.90
P <sub>ü</sub> (MPa)	25.62	26.11	26.10	59.44	58.53	59.20
Ü <sub>t</sub> (s)	26.44	25.89	25.50	58.89	59.39	58.90
S <sub>t</sub> (s)	26.09	25.87	25.87	59.22	59.01	58.95

Tablo 7. PP için S/N oranları ortalama cevap tablosu

Enjeksiyon işlem parametreleri	Eğilme mukavemeti			Eğilme modülü		
	I	II	III	I	II	III
T <sub>eriyik</sub> (°C)	29.97	30.88	30.88	62.42	63.05	62.93
P <sub>enj</sub> (°C)	30.63	30.48	30.62	62.80	62.73	62.87
P <sub>ü</sub> (MPa)	30.45	30.51	30.77	62.73	62.77	62.90
Ü <sub>t</sub> (s)	30.50	30.54	30.70	62.77	62.63	63.00
S <sub>t</sub> (s)	30.55	30.48	30.70	62.80	62.73	62.88

Bu çalışmada Varyans Analizi (ANOVA), beş enjeksiyon işlem parametresinin eğilme mukavemeti ve eğilme modülü üzerindeki sayısal etkisini, tespit etmek için kullanılmıştır. PE ve PP malzemeler için beş enjeksiyon işlem parametresinin eğilme mukavemeti ve eğilme modülü üzerindeki sayısal etkisi, F-test ile değerlendirilmiştir. % 95’lik ( $\alpha=0.05$ ) güvenilirlik aralığında beş enjeksiyon işlem parametresini (PE ve PP malzemelerin) kontrol etmek amacıyla, F-değeri (hesaplanmış) kullanılmış ve  $F_{0.05,2,16}=3.63$  olarak bulunmuştur. Tablo 8, PE ve PP malzemeler için enjeksiyon işlem parametrelerinin eğilme mukavemeti ile eğilme modülü üzerindeki sayısal etkilerini göstermektedir. PE malzeme için eğilme mukavemeti üzerindeki en etkili işlem parametresi eriyik sıcaklığı iken, eğilme modülü üzerindeki en etkili işlem parametresi ütüleme basıncıdır. Diğer taraftan, PP malzeme için eğilme mukavemeti ve eğilme modülü üzerindeki en etkili parametre sadece eriyik sıcaklığıdır.

Bu çalışmada, PE ve PP malzemeler için en büyük eğilme mukavemeti ve en büyük eğilme modülünü veren en uygun enjeksiyon işlem parametreleri, Tablo 6 ve Tablo 7’deki her parametreye ait en büyük S/N oranının seçilmesiyle belirlenmiştir. Buna göre, en büyük eğilme mukavemeti ve en büyük eğilme modülünü veren en uygun enjeksiyon işlem parametreleri aşağıdaki denklemlerle (7-10) hesaplanmıştır:

Tablo 8. Enjeksiyon parametrelerinin sayısal etkileri

Parametreler	Parametrelerin sayısal etkileri, %			
	Polietilen		Polipropilen	
	Eğilme mukavemeti	Eğilme modülü	Eğilme mukavemeti	Eğilme modülü
$T_{eriyik}$ (°C)	<b>51.65</b>	30.56	<b>55.78</b>	<b>48.88</b>
$P_{inj}$ (MPa)	18.15	4.20	1.491	1.870
$P_{ü}$ (MPa)	4.865	<b>38.75</b>	6.580	3.612
$\dot{U}_t$ (s)	16.16	14.57	2.602	15.66
$S_t$ (s)	1.30	3.467	2.834	2.450

PE malzeme için en uygun enjeksiyon işlem parametreleriyle hesaplanan eğilme mukavemeti ( $\sigma_{\eta opt}$ ) ve eğilme modülünün ( $E_{\eta opt}$ ) en büyük değerleri:

$$\sigma_{\eta opt} = \left[ \left( \bar{T}_{eriyik}(\mathbf{III}) + \bar{P}_{inj}(\mathbf{III}) + \bar{P}_{ü}(\mathbf{III}) + \bar{U}_t(\mathbf{I}) + \bar{S}_t(\mathbf{I}) - 4\bar{T}_1 \right) \right] (7)$$

$$E_{\eta opt} = \left[ \left( \bar{T}_{eriyik}(\mathbf{III}) + \bar{P}_{inj}(\mathbf{III}) + \bar{P}_{ü}(\mathbf{I}) + \bar{U}_t(\mathbf{II}) + \bar{S}_t(\mathbf{I}) - 4\bar{T}_1 \right) \right] (8)$$

PP malzeme için en uygun enjeksiyon işlem parametreleriyle hesaplanan eğilme mukavemeti ( $\sigma_{\eta opt}$ ) ve eğilme modülünün ( $E_{\eta opt}$ ) en büyük değerleri:

$$\sigma_{\eta opt} = \left[ \left( \bar{T}_{eriyik}(\mathbf{III}) + \bar{P}_{inj}(\mathbf{I}) + \bar{P}_{ü}(\mathbf{III}) + \bar{U}_t(\mathbf{III}) + \bar{S}_t(\mathbf{III}) - 4\bar{T}_1 \right) \right] (9)$$

$$E_{\eta opt} = \left[ \left( \bar{T}_{eriyik}(\mathbf{I}) + \bar{P}_{inj}(\mathbf{III}) + \bar{P}_{ü}(\mathbf{III}) + \bar{U}_t(\mathbf{III}) + \bar{S}_t(\mathbf{III}) - 4\bar{T}_1 \right) \right] (10)$$

Denklemler (7-10)'da PE ile PP malzemeler için hesaplanan eğilme mukavemeti ve eğilme modülünün en büyük değerleri, Tablo 9 ve Tablo 10'da verilmiştir. Ayrıca, en büyük eğilme mukavemeti ve eğilme modülünü veren en uygun enjeksiyon işlem parametreleri kullanılarak son bir doğrulama deneyi hem PE hem de PP malzemeler için plastik enjeksiyon tezgahında gerçekleştirilmiştir. Elde edilen plastik numuneler üzerinde üç noktalı eğme testi yapılarak eğilme mukavemeti ve eğilme modülünün deneysel değerleri ölçülmüştür. Üç noktalı eğme testleri, PE ve PP malzemeler için üç numune üzerinde gerçekleştirilmiş ve ortalama değerler alınmıştır. Tablo 9 ve Tablo 10, PE ve PP malzemeler için doğrulama testinden elde edilen değerleri, tahmin edilen (hesaplanan) değerleri ve geliştirme (kazanç) oranlarını göstermektedir.

Tablo 9. Deneysel ile tahmini sonuçlarının karşılaştırılması (PE)

Mekanik özellikler	Polietilen			
	Başlangıç değerler (dB)	Hesaplanan değerler (dB)	Doğrulama deneyleri (dB)	Geliştirme oranları (%)
Eğilme mukavemeti	26.5060	27.9241	30.4534	<b>12.96</b>
Eğilme modülü	59.2627	60.3760	63.2891	<b>6.36</b>

Tablo 10. Deneysel ile tahmini sonuçlarının karşılaştırılması (PP)

Mekanik özellikler	Polipropilen			
	Başlangıç değerler (dB)	Hesaplanan değerler (dB)	Doğrulama deneyleri (dB)	Geliştirme oranları (%)
Eğilme mukavemeti	30.5863	31.3722	36.8955	<b>17.10</b>
Eğilme modülü	62.7098	63.5013	68.5112	<b>8.47</b>

Tablo 9 ve Tablo 10 incelendiğinde, her iki plastik malzemede eğilme mukavemeti ve eğilme modülü için başlangıç değerler ile doğrulama deneyinden elde edilen değerler arasında belli oranlarda geliştirmeler sağlanmıştır. Her iki malzemede eğilme mukavemeti için sağlanan geliştirme oranlarının, eğilme modülü için sağlanan oranlardan daha büyük olduğu görülmektedir. Ayrıca, PE için sağlanan geliştirme oranları, PP için sağlananlardan daha küçüktür.

## SONUÇLAR

Bu çalışmada, bir DVD-ROM ön kapağının plastik enjeksiyonla basılması sırasında ürün kalitesine etki eden mekanik özelliklerin Taguchi yöntemiyle tespit edilmesi amaçlanmıştır. Ortogonal deneysel tasarım, S/N oranı ve ANOVA, en büyük eğilme mukavemeti ve en büyük eğilme modülünü veren en uygun plastik enjeksiyon parametrelerinin belirlenmesi için kullanılmıştır. Bu çalışma sonunda, aşağıda ifade edilen sonuçlara ulaşılmıştır:

- Üç noktalı eğme testinden elde edilen eğilme mukavemeti ve eğilme modülü değerlerinin literatürdeki sonuçlardan farklı olmadığı görülmüştür.
- ANOVA analizlerine göre, % 95'lik ( $\alpha=0.05$ ) güvenilirlik aralığı içinde PE malzemede mekanik özellikler üzerinde en etkili parametreler, eriyik sıcaklığı (% **55.65**) ve ütleme basıncı (% **38.75**) iken; PP malzemede en etkili parametre eriyik sıcaklığıdır (% **55.78** ve % **48.88**).

- S/N oranı analizlerinden, her iki polimer malzeme için mekanik özelliklerin başlangıç değerlerine göre belli oranlarda geliştirildiği görülmüştür.
- Aynı zamanda, doğrulama deneylerinden elde edilen sonuçlar % 95'lik güvenilirlik aralığı içindedir.
- Bu sonuçlara dayalı olarak, uygulanan Taguchi yöntemi sayısal olarak yeterli olup, mekanik özelliklerin belirlenmesinde efektif ve güçlü bir araçtır.
- Plastik ürünlerin kalitesine etki eden mekanik özelliklerin dışında; fiziksel ve termal özelliklerin tespit edilmesinde de benzer Taguchi modelleri oluşturularak çözüme ulaşılabilir.

#### **DETERMINATION OF OPTIMUM INJECTION MOLDING PARAMETERS AFFECTED MECHANICAL PROPERTIES OF PLASTIC PRODUCTS BY USING TAGUCHI METHOD**

Plastic injection molding is one of the most manufacturing methods which provide to inject plastic products as sensitive and quick. Mechanical properties affect highly the quality of products during plastic injection molding process. The determining mechanical properties of plastic products with injection process parameters is one of most popular research topics. In this study, it is purposed to determine the mechanical properties affecting the product quality during plastic injection of a DVD-ROM cover by utilizing optimum injection process parameters based on Taguchi method. For this purpose, 27 plastic injection experiments with five process parameters (polymer temperature, injection pressure, packing pressure, packing time and cooling time) designed according to  $L_{27}$  orthogonal array were performed for both the polymer materials of Polyethylene (PE) and Polypropylene (PP). Then, the values of flexural strength and flexural modulus were obtained by conducting three-point bending test on the plastic samples removed from DVD-ROM cover. Signal/Noise (S/N) ratios were calculated by using these values. The effect of each injection process parameters on flexural strength and flexural modulus was identified by helps of Analysis of Variance (ANOVA) as statistically. At the end of the study, optimum process parameters providing to the values of highest flexural strength and flexural modulus were found by Taguchi method. Finally, a confirmation experiment was carried out to control the reliability and efficiency of Taguchi method in the plastic injection machine. From the obtained results, it was understood that Taguchi method is very easy, power and effective tool in evaluating mechanical properties affecting the quality of plastic products.

**Keywords:** Plastic Injection Molding, Mechanical Properties, S/N Ratio, ANOVA, Taguchi Method.

#### **TEŞEKKÜR**

Yazarlar, plastik enjeksiyon deneylerin yapılmasında GÜNEŞ Plastik A.Ş.'ye, plastik kalıbın imalatında Öğr. Haydar Karakaya'ya, kalıp malzemelerinin temin edilmesinde KORKMAZ Çelik A.Ş.'ye, Üç noktalı eğme testinin yapılmasında, TSE'ye ve Plastik Laboratuvarı çalışanlarına teşekkür eder.

#### **KAYNAKÇA**

1. Beaumont, J.P., Nagel, R., Sherman, R., Successful Injection Molding: Hanser/Gardner Publications Inc., Cincinnati, USA, 2002.
2. Ataşımşek, S., Plastik ve Metal Kalıpcılık Teknikleri, Birsen Yayınevi, 2. Baskı, İstanbul, 2002.
3. Potsch, G. and Michaeli, W., Injection Molding: An Introduction, Hanser Publication, New York, USA, 1995.
4. Akyüz, Ö.F., Plastikler ve Plastik Enjeksiyon Teknolojisine Giriş, Pagev Yayınları, 3. Baskı, İstanbul, 103-115, 2006.
5. Türk Standart Enstitüsü (TSE), Plastikler-Eğilme Özelliklerinin Tayini, TS 985 EN ISO 178, Ankara, 1-15, 2006.
6. Kuo, H.C., Jeng, M.C Effects of Part Geometry and Injection Molding Conditions on the Tensile Properties of ultra-high Molecular Weight Polyethylene Polymer, Mater Des. 31, 884-893, 2010.
7. Ozcelik, B., Optimization of Injection Parameters For Mechanical Properties of Specimens with Weld Line Polypropylene Using Taguchi Method, Int. Comm. Heat Mass Transfer, 38 (8), 1067-1072, 2011.
8. Mehat, N.M., Kamaruddin, S. Optimization of Mechanical Properties of Recycled Plastic Products via Optimal Processing Parameters Using The Taguchi Method. J. Materials Process. Technol. 211, 1989-1994, 2011.
9. Jafairan, A.R., 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.
10. Mehat, N.M., Kamaruddin, S. Investigating the Effects of Injection Molding Parameters on the Mechanical Properties of Recycled Plastic Parts using the Taguchi Method. Materials Manuf Process. 26, 202-209, 2011.
11. Yang, Y.K. Shie, J.R., Liao, H.T., Wen, J.L., Yang, R.T., A study of Taguchi and Design of Experiments Method in Injection Molding Process for Polypropylene Components, Journal



- of Reinforced Plastics and Composites, 27, 819, 2008.
12. Berginc, B., Kampus, Z., 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.
  13. 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.
  14. Oktem, H., Erzurumlu, T., 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.
  15. Taguchi, G., Introduction to Quality Engineering, Asian Productivity Organization, Tokyo, 1990.
  16. Ross, P.J., Taguchi Techniques for Quality Engineering, Mc Graw-Hill, New York, USA, 1996.
  17. Phadke, M.S., Quality Engineering Using Robust Design, Printice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1989.
  18. Yuin, W., Alan, W., Taguchi Methods for Robust Design, First ed. ASME Press, New York, 2000.
  19. Minitab Statistical Software, Release 15, Making Data Analysis Easier, State College, Minitab Corp., Pennsylvania, USA, 2007.
  20. Campo, E., A, Selection of Polymeric Materials: How to Select Design Properties from Different Standards, William Andrew Inc., Norwich, USA, 2007.