



Research Article / Araştırma Makalesi

**DETERMINATION OF EFFECT ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF
POLYPROPYLENE PRODUCT OF MOLDING MATERIALS USING
TAGUCHI METHOD**

Babür ÖZÇELİK*, Alper ÖZBAY

Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Gebze-KOCAELİ

Received/Geliş: 24.02.2011 Revised/Düzelme: 04.05.2011 Accepted/Kabul: 23.05.2011

ABSTRACT

The mechanical properties of the plastic products can be also affected through mold materials in addition to polymer materials properties. In this study, the effect of injection parameters such as melt temperature, packing pressure, cooling time and injection pressure with mold materials on the mechanical properties of Polypropylene (PP) moldings was searched. Mold materials having two different thermal conductivities, aluminum 2000 series and AISI 1020 were selected to use in experimental studies. Taguchi's $L_9(3^4)$ orthogonal array design was employed for the experimental plan. Mechanical properties of PP specimens such as elasticity module, tensile strength at yield, flexural strength and izod impact strength (notched) were measured by using some test methods. Signal to noise ratio for mechanical properties of PP using the Taguchi method was calculated and effect of the parameters on mechanical properties was determined using the analysis of variance (ANOVA). It was observed that there were effects of different mold materials and injection parameters on the mechanical properties of plastic products according to S/N and ANOVA results.

Keywords: Plastic injection molding, mold materials, mechanical properties, Taguchi method.

**PLASTİK ENJEKSİYON KALIP MALZEMELERİNİN POLİPROPİLEN ÜRÜNÜN MEKANİK
ÖZELLİKLERİNE ETKİSİNİN TAGUCHİ YÖNTEMİYLE BELİRLENMESİ**

ÖZET

Plastik ürünlerin mekanik özellikleri, polimer malzemelerin özelliklerinin yanı sıra kalıp malzemeleri tarafından da etkilenebilir. Bu çalışmada; farklı kalıp malzemeleri kullanılarak, eriyik sıcaklığı, tutma basıncı, soğutma zamanı ve enjeksiyon basıncı gibi enjeksiyon parametrelerinin polipropilen (PP) malzemenin mekanik özelliklerine etkisi araştırıldı. İki farklı ısı iletkenliğine sahip 2000 serisi alüminyum ve Ç 1020 kalıp malzemeleri deneysel çalışmada kullanmak için seçildi. Deneysel plan için Taguchi'nin $L_9(3^4)$ ortogonal tasarımı uygulandı. PP numunelerin elastiklik modülü, akma dayanımı, eğilme dayanımı ve izod darbe dayanımı test metotları kullanılarak ölçüldü. Taguchi metodu kullanarak PP malzemenin mekanik özellikleri için S/N oranı hesaplandı ve mekanik özellikler üstüne parametrelerin etkisi varyans analizi (ANOVA) kullanılarak belirlendi. S/N oranları ve ANOVA sonuçlarına göre, plastik ürünlerin mekanik özellikleri üstüne farklı kalıp malzemelerinin ve enjeksiyon parametrelerinin etkileri olduğu görülmüştür.

Anahtar Sözcükler: Plastik enjeksiyon kalıp malzemeleri, mekanik özellikler, Taguchi metodu.

* Corresponding Author/Sorumlu Yazar: e-mail/e-ileti: ozcelik@gyte.edu.tr, tel: (262) 605 27 79

1. GİRİŞ

Enjeksiyon kalıpcılığı konusunda yapılan çalışmalar aşağıdaki gibi özetlenebilir;

- Çevrim süresini kısaltarak birim zamanda üretim miktarını artırmak,
- Plastik ürünün mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi için enjeksiyon parametrelerinin optimizasyonu,
- Enjeksiyon esnasında üründe oluşan kusurların (çökme, çarpılma, kaynak izi vb.) azaltılması,
- Enjeksiyon makinesinin otomatik kontrolü,
- Enjeksiyon şartlarının bilgisayar ortamında analizi yoluyla optimizasyonu şeklinde sıralanır.

Çevrim süresi; dolum süresi, tutma süresi, soğutma süresi (soğutma süresi ile anlatılmak istenen enjeksiyon işlemi sırasında soğutma için harcanan süredir.) ve çıkartma süresinden oluşur. Bu sürelerin içinden en fazla zamanı soğutma süresi alır ve toplam çevrim süresinin yüzde yetmişini oluşturur [1, 2]. Soğutma süresini kısaltmak için genellikle soğutma kanal geometrisi üzerinde araştırmalar yoğunlaşmıştır [1, 3-7]. Ayrıca soğuma işlemi geçen ısı ile ilgili olduğundan değişik kalıp malzemeleri kullanarak soğutma süresi değiştirilebilir. Soğuma süresi ne kadar kısa olursa birim zamanda daha fazla parça basılacağından kalıbın verimliliği artabilir.

Plastik parçanın mekanik özelliklerini esasen kullanılan polimerin özellikleri belirlemesine rağmen, enjeksiyon parametrelerinin de ürünün mukavemeti üzerinde etkisi vardır [8, 9, 10]. Bundan dolayı; soğuma süresi, enjeksiyon hızı, kalıp sıcaklığı, silindir sıcaklığı vb. enjeksiyon parametreleri ürünün çekme dayanımı, eğilme dayanımı gibi mekanik özelliklerini etkiler.

Plastik enjeksiyon kalıpları, ağırlıklı olarak kalıp çeliğinden yapılır. Az sayıda ve prototip ürün imalatı için alüminyum, bakır, epoksi vb. malzemeler kullanılabilir. Özellikle epoksi kalıp malzemelerinin en büyük dezavantajı, kalıp ömrünün 1000–2000 baskı arası olmasıdır [6, 7, 11, 12]. Farklı kalıp malzemelerinin ABS malzemelerin mekanik özelliklerine etkisi araştırılmıştır [13]. Günümüzde üretim seri üretimden çıkıp kişiye özgü üretime kaydığı düşünülürse bin adetlik üretim miktarı az sayılmaz. Buna karşılık standart kalıp malzemesi çelik yerine diğer malzemelerin kullanmak ve bu malzemelerden elde edilen kalıbın mukavemet özelliklerini artırmak için çeşitli kaplama işlemleri yapılması ile standart malzemeden yapılmış kalıplara eşit dayanımlı kalıplar elde edilebilmektedir [8].

Plastik üründe görülen en büyük kusurlardan biri de çarpımadır (warpage). Çarpılma esasen uniform olmayan ısı transferinden meydana gelir. Isı transferi ne kadar uniform olursa çarpılma oluşumu o derece az olur. Isı transferinin uniform olması, soğuma kanalları ve kalıp malzemesi ile ilgilidir. Yüzeğe uygun soğutma kanallarında oluşan çarpılma düz hat kanallarda oluşanlardan azdır [2]. Çarpılmayı engellemenin bir başka yolu ise oluşacak deformasyonu sonlu elemanlar yöntemi sayesinde önceden hesaplamak ve parçaya ön deformasyon vermektir [12]. Yine bir başka kusur olan eksik (tamamı dolmamış) parça üretiminin bir sebebi etkin olmayan ısı transferidir [2, 3]. Görüleceği üzere plastik üründe oluşabilecek kusurlar ve ürünün sahip olduğu mekanik özellikleri ve çevrim süresini en çok ısı transferi etkilemektedir. Kalıp–iş parçası arasında gerçekleşen ısı transferi temelde iki unsura bağlıdır.

- Kalıp malzemesi.
- Soğutma kanalı geometrisi.

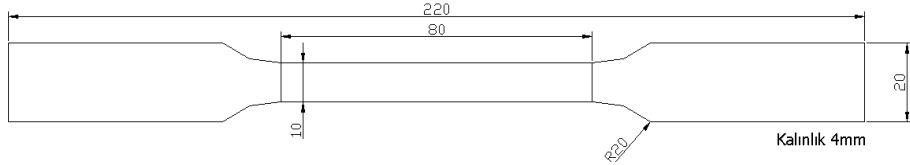
Bu çalışmada; iki farklı kalıp malzemesi kullanılarak, Taguchi'nin $L_9(3^4)$ ortogonal tasarımına göre standart test numuneleri elde edildi. Bu numunelerin mekanik özellikleri üstüne, hem kalıp malzemelerinin hem de enjeksiyon parametrelerinin etkisinin ne olduğunu belirlenmeye çalışıldı.

2. ÇALIŞMA PLANI VE ANALİZ

2.1. Deney Sistemi

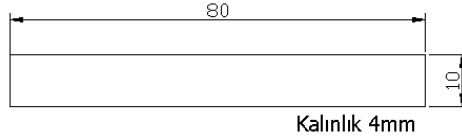
Deneilerde, Ç1020 çelik ve 2000 serisi alüminyum malzemeleri kalıp malzemesi olarak seçilmiştir. Kalıp malzemelerinin farklı seçilmesi ile esas amaçlanan, enjeksiyon işlemi sırasında oluşan ısılarda farklı hızlarda ortamdan uzaklaştırılmasıdır. Böylece numunelerin mekanik özellikleri üzerinde ısı iletiminin etkisi belirlenmiş ve her kalıp malzemesi için mekanik mukavemet açısından en ideal enjeksiyon parametre değerleri elde edilmiştir. Enjeksiyon işlemi ile elde edilen numunelere, çekme deneyi, 3 nokta eğme deneyi ve izod darbe deneyi testleri gerçekleştirilmiştir.

Kalıplarla standartlara uygun (ASTM D638) çekme deneyi numunesi üretilmiştir. Diğer deneyler için gerekli numuneler çekme numunesinden standartlara uygun ölçülerde kesilerek elde edilmiştir. Çekme numunesinin boyutları Şekil 1’de verilmektedir.

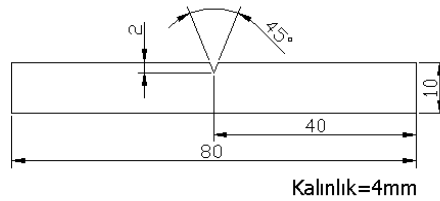


Şekil 1. Çekme numunesinin şekil ve boyutları (ASTM D638)

3 nokta eğme deneyi numunesi (TS 985 EN ISO 178) Şekil 2. ve izod darbe deneyi numunesi (ISO 180) ise Şekil 3.’te gösterilmektedir. Eğilme deneyi ve darbe deneyinin çekme deneyi numunesinden kesilip elde etmekteki ana amaç plastik akışların bütün deneylerde aynı olmasını sağlamaktır.



Şekil 2. TS 985 EN ISO 178’e göre 3 nokta eğilme deneyi numunesi



Şekil 3. ISO 180’e göre izod darbe deneyi numunesi

Çalışmada, kristal yapıya sahip olan PP malzemenin seçilmesinin ana nedeni ise sanayide yaygın olarak kullanılmasıdır.

Enjeksiyon işlemi PAGEV teknik lisesinde, İtalya’da üretilmiş MIR (Dis N: dt0001-1514) marka makine ile gerçekleştirilmiştir. Makinenin maksimum kapama basıncı 637 KN,

enjeksiyon basıncı 1480 bardır. Enjeksiyon makinesinin bulunduğu ortamda klima, nem alıcı vb. gibi teçhizat olmadığı için işlemler ortam şartlarında gerçekleştirilmiştir. Çekme deneyi, Kocaeli Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümündeki INSTRON 4411 çekme makinesi ile gerçekleştirilmiştir. Çekme deneyleri klima kontrollü bir ortamda gerçekleştirilmiştir. Ortam sıcaklığı 21 +/- 3⁰C'dır. Çekme deneyi, numuneler en az iki gün bekleddikten sonra gerçekleştirilmiştir. Üç nokta eğme deneyi GYTE Malzeme Mühendisliği laboratuvarlarında, oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Basma hızı olarak 2 mm/dk uygulanmıştır. Test cihazı olarak INSTRON 5560 kullanılmıştır. Izod darbe deneyi GALSAN firmasında gerçekleştirilmiştir. Darbe deneyi cihazının ismi CEAST ve modeli 6545'tir.

Deney esnasında dördüncü ve yedinci adımlarda eriyik sıcaklıkları artmıştır. Enjeksiyon sistemi bu ani sıcaklık artışını hemen sağlayamadığından, yaklaşık 15 – 20 dakika sıcaklığın istenilen dereceye ulaşması beklenmiştir. Bundan dolayı enjeksiyon nozulunda kalan malzemenin özelliğini kaybetme ihtimaline karşın üretilen ilk dört numune kullanılmamıştır. Dördüncü baskıdan sonra alınan numuneler değerlendirilmiştir.

Deneyisel çalışmada enjeksiyon parametresi olarak; eriyik sıcaklığı, tutma basıncı, soğuma süresi, enjeksiyon basıncı değişken olarak seçilmiştir.

2.2. Taguchi Deney Planı

Dr. Taguchi kendi adıyla anılan deney tasarımı tekniği ile deney sayısını oldukça azaltan bir teknik geliştirmiştir. Taguchi yöntemi sayesinde belli güven aralığında optimum sonuca ulaşmak için gerekli deney sayısı oldukça azalır [14]. Taguchi tekniği; kaliteyi arttıran, maliyeti düşüren, araştırma-geliştirme faaliyetlerini hızlandırmaya yarayan bir tekniktir [15]. Taguchi yöntemi sayesinde sistemi etkileyen parametrelerin etkisi verimli bir şekilde elde edilir [16].

Taguchi deney tasarımında elde edilen deney sonuçları sinyal gürültü (S/N) oranlarına döndürerek değerlendirir. Deney sonuçları S/N oranına çevrilirken hedefe göre, *Büyük değer iyi, Küçük değer iyi, Nominal değer iyi* şeklinde hesaplanır. Hangi hedef kullanılırsa kullanılsın sonuçta elde edilen en büyük S/N oranı en iyi sonuçtur. Bunun yanı sıra yapılan ANOVA analizi ile hangi faktörün deney sonucunu % kaç etkilediği belirlenir. Ayrıca ANOVA analizi ile sonuçların güven seviyesi belirlenir [14].

Çalışmada, seçilen dört parametrenin değişik kombinasyonları ile Taguchi deneysel tasarım yöntemine göre dokuz farklı enjeksiyon deney seti (L₉) oluşturulmuştur. Diğer enjeksiyon parametreleri sabit tutulmuştur. PP için enjeksiyon parametreleri ve deney planı Çizelge 1 ve 2'de verilmiştir [17].

Çekme deneyinde çekme hızı olarak 10 mm/dk (ASTM D638) seçilmiştir. Üç nokta eğilme deneyinde hareketli çenenin ilerleme hızı olarak 2 mm/dk (TE 985 EN ISO 178) olarak belirlenmiştir. Izod darbe deneyinde çekiç 10 J (ISO 180) olarak seçilmiştir. Bu deneyler sonucunda numunelerin; elastisite modülü, akma gerilmesi, maksimum eğilme dayanımı ve izod darbe dayanımı değerleri her iki kalıp malzemesi için de belirlenmiştir. Her ortam için çekme deneyi ve izod darbe deneyi üç kez, üç nokta eğme deneyi ise iki kez tekrarlanmıştır. Deney verilerinin aritmetik ortalaması değerlendirilmeye alınmıştır.

Çizelge 1. PP için enjeksiyon parametreleri ve değerleri

Enjeksiyon parametreleri	Parametre aralıkları		
Eriyik Sıcaklığı (°C)	200	240	280
Tutma Basıncı (MPa)	13	16	18
Soğuma Süresi (s)	16	19	22
Enjeksiyon Basıncı (MPa)	16	19	22

Çizelge 2. Taguchi L₉ deney tasarımına göre PP için deney planı.

Deney No	Eriyik Sıcaklığı (°C)	Tutma Basıncı (MPa)	Soğuma Süresi (s)	Enjeksiyon Basıncı (MPa)
1	200	13	16	16
2	200	16	19	19
3	200	18	22	22
4	240	13	19	22
5	240	16	22	16
6	240	18	16	19
7	280	13	22	19
8	280	16	16	22
9	280	18	19	16

2.3. Deney Sonuçları

Enjeksiyon işlemi esnasında polipropilen için soğuma suyu sıcaklığı 25 +/- 3 °C sabit olarak alınmıştır. Çizelgeler 3 ve 4'te polipropilen malzemesinin 2 farklı kalıp malzemesinde ve 9 ortam şartı için elde edilen deney sonuçları verilmiştir [17].

2.4. Numunelerin S/N Oranı

“Taguchi Deney Tasarımı metodunda kalite karakteristiklerinin ölçülmesinde ve değerlendirilmesinde kullanılan ölçüt, ölçülmek istenen sinyalin (S), gürültü faktörüne (N) oranıdır. Sinyal değeri sistemin verdiği ve ölçülmek istenen gerçek değeri, gürültü faktörü ise ölçülen değer içerisindeki istenmeyen faktörlerin payını temsil eder” [14]. Bu çalışmada hedef olarak en yüksek değere ulaşmak seçilmiştir (*büyük değer iyi*). Bu yaklaşıma göre S/N oranını hesaplamak için kullanılan formül,

$$S/N = -10 \log_{10} \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \text{şeklindedir.} \quad (1)$$

Formüldeki;

- y= ölçüm değeri,
- n= deney sayısını ifade etmektedir.

İzod darbe deneyi, enjeksiyondan alınan parçaların çekmelerini tamamlamaları için parçalar 2 gün bekletildikten sonra yapılmıştır. Çizelge 3. ve 4'te her ortam için ilgili ölçüm değerinin sinyal gürültü oranı değerleri verilmiştir.

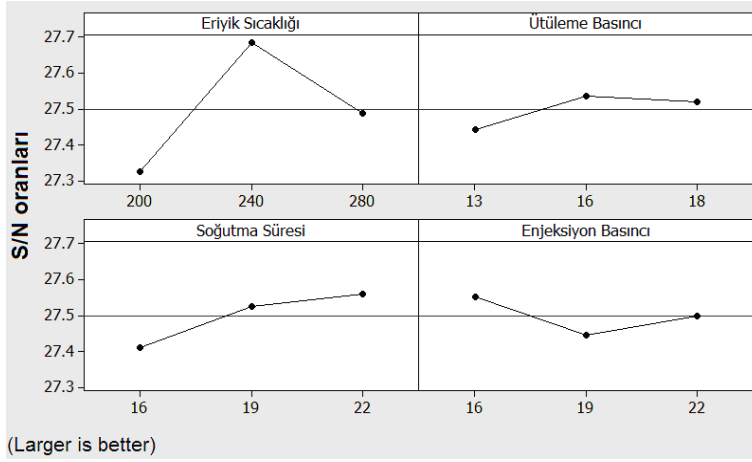
Çizelge 3. Elastik modülü ve akma dayanımı için S/N oranları

Deney No	Elastisite Modülü (MPa)		S/N Oranı		Akma Dayanımı (Mpa)		S/N Oranı	
	Al	Ç 1020	Al	Ç 1020	Al	Ç 1020	Al	Ç 1020
1	1683	1946	64.52	65.78	22.99	23.08	27.23	27.26
2	1636	1848	64.28	65.33	23.26	23.43	27.33	27.40
3	1829	1803	65.24	65.12	23.46	23.85	27.41	27.55
4	1722	1795	64.72	65.08	24.14	23.50	27.65	27.42
5	1860	1830	65.39	65.25	24.65	24.14	27.84	27.65
6	1536	2010	63.73	66.06	23.89	23.97	27.56	27.59
7	1636	1736	64.28	64.79	23.55	23.56	27.44	27.44
8	1550	1735	63.81	64.79	23.54	23.52	27.44	27.43
9	1533	1879	63.71	65.48	23.96	23.64	27.59	27.47

Çizelge 4. Eğilme ve izod darbe dayanımı için S/N oranları

Deney No	Maksimum Eğilme Dayanımı (MPa)		S/N Oranı		Izod Darbe Dayanımı (kJ/m ²)		S/N Oranı	
	Al	Ç 1020	Al	Ç 1020	Al	Ç 1020	Al	Ç 1020
1	28.41	27.50	29.07	28.79	5.97	5.69	15.52	15.10
2	27.15	27.09	28.68	28.66	5.31	5.13	14.50	14.20
3	27.58	27.39	28.81	28.75	7.25	5.28	17.21	14.45
4	28.31	26.68	29.04	28.52	5.56	5.47	14.90	14.76
5	27.73	26.50	28.86	28.46	5.88	5.03	15.39	14.03
6	25.71	26.81	28.20	28.57	5.66	4.94	15.06	13.87
7	28.00	26.97	28.94	28.62	6.72	5.44	16.55	14.71
8	28.61	26.67	29.13	28.52	6.38	5.34	16.10	14.55
9	26.71	26.42	28.53	28.44	7.53	5.25	17.54	14.40

Bir sonraki aşamada ise her faktörün her seviyedeki etkisinin ayrıştırılması gerekir. Bunun için Çizelge 3 ve 4'te hesaplanan sinyal/gürültü oranlarının ortalaması her faktörün her bir seviyesi için ayrı ayrı alınır. Mesela eriyik sıcaklığının 200 °C olduğu birinci seviye ve çelik kalıpta elastik modülü için 1, 2, 3 deneylerin S/N değerinin ortalaması “(65.78 + 65.33 + 65.12)/3=65.41” şeklinde alınır (Çizelge 6). Bunlara ek olarak yapılan 9 deneyin ortalama gürültü oranı hesaplanır. En büyük sinyal gürültü oranı en iyi deney sonucunu verir. Bu değerler grafik olarak da gösterilebilir. Örnek bir grafik Şekil 4'te verilmiştir.



Şekil 4. Alüminyum kalıp ve akma dayanımı için S/N Oranı

2.5. Numunelerin Varyans Analizi (ANOVA)

Varyans analizinde, incelenen faktörlerin, seçilen çıktı değerini (elastisite modülü, akma dayanımı vb.) ne ölçüde etkiledikleri ve farklı seviyelerin nasıl bir değişkenliğe yol açtıkları belirlenir. Bunun yanı sıra elde edilen sonuçların istatistiksel olarak güvenilirliği de test edilir [14]. Bu amaçla öncelikle sinyal/gürültü oranının toplam değişkenliğini belirten SST değeri (toplam karelerin toplamı) hesaplanır.

$$SST = \sum_{i=1}^n (\eta_i - \eta_m)^2 \quad (2)$$

Burada;

- η_i = Ölçülen değer üzerinden hesaplanan sinyal gürültü oranı,
- η_m = Ölçülen değer üzerinden hesaplanan sinyal gürültü oranlarının ortalaması,
- n = Toplam deney sayısını, ifade etmektedir.

SST değeri, dört faktörün ayrı ayrı karelerinin toplam değerleri (SSA, SSB, SSC ve SSD) ile hata payının karelerinin toplamı olan SSE değerinin toplamından oluşmaktadır. Her faktörün kareleri,

$$SSA(SSB, SSC, \dots) = \sum_{i=1}^{k_a} [n_{a_i} x (\eta_{a_i} - \eta_m)^2] \quad (3)$$

şeklinde hesaplanır. Burada;

- k_a = a faktörünün seviye sayısı,
- n_{a_i} = a faktörünün i seviyesindeki deney sayısı,
- η_m = ortalama S/N oranıdır.

Her faktörün karelerinin toplamının ayrı ayrı hesaplanması sonucu ortaya çıkan değerler Çizelge 5'den Çizelge 12'ye kadar gösterilmiştir. Yapılan hesaplamalarda hesaplanan hata çok küçük çıktığı için F değerinin, $F_{0.05}$ çizelgesindeki kritik değeri ile karşılaştırılmasına gerek görülmemiştir. Çünkü hata çok küçük olduğundan dolayı hesaplanan F değeri sonsuza gitmektedir.

Çizelge 5'e göre alüminyum kalıpta elastiklik modülünü en fazla etkileyen faktör soğutma süresidir (%47.86). İkinci önemli faktör ise eriyik sıcaklığıdır (%32.95). Fakat elastisite modülünü çelik kalıpta (Çizelge 6) bütün faktörler yaklaşık aynı önemde etkilemektedir.

Benzer bir durum akma dayanımı için de geçerlidir (Çizelge 7 ve 8). Alüminyum kalıpta akma mukavemetinde belirleyici olan değişken eriyik sıcaklığı iken (%73.92) çelik kalıpta enjeksiyon basıncı hariç bütün parametrelerdir. Bunun nedeni alüminyum kalıbın ısı iletim katsayısının yüksek olmasından dolayı ısının ortamdaki hızla uzaklaştırılması olduğu düşünülmektedir. Kalıp açılınca numunenin sahip olduğu ısının daha düşük olmasından dolayı ani soğuma daha az oluşmakta ve böylece kristal yapı daha fazla büyüyerek akma dayanımını yükseltmektedir [18].

Çizelge 5. Alüminyum kalıpta elastisite modülü için ANOVA çizelgesi

Ortalama S/N	64.41						
	Serbestlik Derecesi	Ortalama S/N Değerleri			Karelerin Toplamı	Ortalama Karelerin Toplamı	Faktör Etkisi (%)
		Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3			
Eriyik Sıcaklığı	2	64.68	64.61	63.93	1.03	0.52	32.95
Tutma Basıncı	2	64.51	64.49	64.23	0.15	0.07	4.74
Soğutma Süresi	2	64.02	64.23	64.97	1.50	0.75	47.86
Enjeksiyon Basıncı	2	64.54	64.09	64.59	0.45	0.23	14.46
Hata	1				0.00	0.00	0.00
Toplam	9				3.13		100.00

Çizelge 6. Çelik kalıpta elastisite modülü için ANOVA çizelgesi

Ortalama S/N	65.30						
	Serbestlik Derecesi	Ortalama S/N Değerleri			Karelerin Toplamı	Ortalama Karelerin Toplamı	Faktör Etkisi (%)
		Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3			
Eriyik Sıcaklığı	2	65.41	65.46	65.02	0.36	0.18	24.58
Tutma Basıncı	2	65.22	65.12	65.55	0.31	0.15	21.16
Soğutma Süresi	2	65.54	65.30	65.05	0.36	0.18	24.93
Enjeksiyon Basıncı	2	65.50	65.39	65.00	0.43	0.21	29.33
Hata	83				0.00	0.00	0.00
Toplam					1.45		100.00

Çizelge 7. Alüminyum kalıpta akma dayanımı için ANOVA çizelgesi

Ortalama S/N	27.50						
	Serbestlik Derecesi	Ortalama S/N Değerleri			Karelerin Toplamı	Ortalama Karelerin Toplamı	Faktör Etkisi (%)
		Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3			
Eriyik Sıcaklığı	2	27.32	27.68	27.49	0.20	0.10	73.92
Tutma Basıncı	2	27.44	27.53	27.52	0.01	0.01	5.56
Soğutma Süresi	2	27.41	27.52	27.56	0.04	0.02	14.13
Enjeksiyon Basıncı	2	27.55	27.45	27.50	0.02	0.01	6.39
Hata	1				0.00	0.00	0.00
Toplam	9				0.26		100.00

Çizelge 8. Çelik kalıpta akma dayanımı için ANOVA çizelgesi

Ortalama S/N	27.47						
	Serbestlik Derecesi	Ortalama S/N Değerleri			Karelerin Toplamı	Ortalama Karelerin Toplamı	Faktör Etkisi (%)
		Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3			
Eriyik Sıcaklığı	2	27.40	27.56	27.45	0.04	0.02	34.24
Tutma Basıncı	2	27.38	27.49	27.54	0.04	0.02	39.03
Soğutma Süresi	2	27.43	27.43	27.55	0.03	0.01	26.48
Enjeksiyon Basıncı	2	27.46	27.48	27.47	0.00	0.00	0.25
Hata	1				0.00	0.00	0.00
Toplam	9				0.11		100.00

Eğilme dayanımını etkileyen en önemli faktör alüminyum kalıpta tutma basıncı (%57.48) ve enjeksiyon basıncı (%31.96) iken çelik kalıpta eriyik sıcaklığı (%74.28) ve tutma basıncıdır (%11.63) (Çizelge 9 ve 10).

Çizelge 9. Alüminyum kalıpta maksimum eğilme dayanımı için ANOVA çizelgesi

Ortalama S/N	28.81						
	Serbestlik Derecesi	Ortalama S/N Değerleri			Karelerin Toplamı	Ortalama Karelerin Toplamı	Faktör Etkisi (%)
		Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3			
Eriyik Sıcaklığı	2	28.85	28.70	28.87	0.05	0.03	7.39
Tutma Basıncı	2	29.02	28.89	28.52	0.41	0.20	57.48
Soğutma Süresi	2	28.80	28.75	28.87	0.02	0.01	3.17
Enjeksiyon Basıncı	2	28.82	28.61	28.99	0.23	0.11	31.96
Hata	1				0.00	0.00	0.00
Toplam	9				0.70		100.00

Çizelge 10. Çelik kalıpta maksimum eğilme dayanımı için ANOVA çizelgesi

Ortalama S/N	28.59						
	Serbestlik Derecesi	Ortalama S/N Değerleri			Karelerin Toplamı	Ortalama Karelerin Toplamı	Faktör Etkisi (%)
		Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3			
Eriyik Sıcaklığı	2	28.73	28.52	28.52	0.09	0.04	74.28
Tutma Basıncı	2	28.64	28.55	28.58	0.01	0.01	11.63
Soğutma Süresi	2	28.62	28.54	28.61	0.01	0.01	10.70
Enjeksiyon Basıncı	2	28.56	28.61	28.60	0.00	0.00	3.39
Hata	1				0.00	0.00	0.00
Toplam	9				0.12		100.00

İzod darbe dayanımını etkileyen faktörlerde kalıp malzemesine göre farklılık görülmektedir. Çizelge 11 ve 12'de görüldüğü gibi, alüminyum kalıpta izod darbe dayanımını en fazla eriyik sıcaklığı etkilerken (%44.38), çelik kalıpta tutma basıncı etkilemektedir (%61.13).

Çizelge 11. Alüminyum kalıpta maksimum izod darbe dayanımı için ANOVA çizelgesi

Ortalama S/N	15.82						
	Serbestlik Derecesi	Ortalama S/N Değerleri			Karelerin Toplamı	Ortalama Karelerin Toplamı	Faktör Etkisi (%)
		Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3			
Eriyik Sıcaklığı	2	15.74	15.12	16.73	3.93	1.97	44.38
Tutma Basıncı	2	15.66	15.33	16.60	2.63	1.32	29.73
Soğutma Süresi	2	15.56	15.65	16.38	1.20	0.60	13.55
Enjeksiyon Basıncı	2	15.67	15.37	16.07	1.09	0.55	12.34
Hata	1				0.00	0.00	0.00
Toplam	9				8.86		100.00

Çizelge 12. Çelik kalıpta maksimum izod darbe dayanımı için ANOVA çizelgesi

Ortalama S/N	14.46						
	Serbestlik Derecesi	Ortalama S/N Değerleri			Karelerin Toplamı	Ortalama Karelerin Toplamı	Faktör Etkisi (%)
		Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3			
Eriyik Sıcaklığı	2	14.59	14.22	14.56	0.26	0.13	21.54
Tutma Basıncı	2	14.86	14.26	14.24	0.73	0.36	61.13
Soğutma Süresi	2	14.51	14.46	14.40	0.02	0.01	1.86
Enjeksiyon Basıncı	2	14.51	14.26	14.59	0.18	0.09	15.47
Hata	1				0.00	0.00	0.00
Toplam	9				1.19		100.00

3. TARTIŞMA

Bu çalışmada, 191 W/mK ısı iletkenliğine sahip alüminyum malzeme ve 50 W/mK ısı iletkenliğine sahip çelik malzeme kullanıldı. İki malzeme arasındaki iletkenlik farkı yaklaşık olarak dört kattır. Çalışmada, bu farkın PP malzemenin mekanik özelliklerine etkisinin ne oranda etkili olduğu irdelendi. Çizelge 3 ve 4 incelendiğinde, alüminyum malzemedan elde edilen PP ürünün elastisite modülü çelik malzemedan elde edilene göre en fazla % 23,5 azalma göstermiştir. Eriyik haldeki PP malzeme düzensiz yani amorf yapıya sahiptir. Erime durumundan hızla soğuduğu zaman yapının düzenli yani kristal yapıya dönüşme oranı düşük olacaktır. Alüminyum malzemedan elde edilen ürünün elastisite modülünün düşük olmasının nedeni budur. İzod darbe dayanımında tam tersine, çelik malzemedan elde edilen PP üründe en fazla % 27 azalma görülmüştür. Çelik malzemedan elde edilen PP ürünün darbe dayanımının düşmesi yavaş soğuma nedeniyle kristalleşme oranının yüksek olması sonucu yapının daha kırılğan olması olarak açıklanabilir. Akma ve maksimum eğilme dayanımında ise inişli çıkışlı bir seyir görülmüştür. Buradaki değişiklikler üzerine kalıp malzemelerine ilave olarak enjeksiyon proses şartlarının da etkisi olduğu düşünülebilir.

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada; Taguchi yöntemi kullanarak farklı kalıp malzemelerinin ve belirlenen enjeksiyon parametrelerinin, PP polimerinin mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini araştırmak amaçlanmıştır. Çalışmada, çelik ve alüminyum malzemedan üretilen iki kalıp malzemesi ve PP plastik malzemesi kullanılmıştır. Enjeksiyon parametreleri olarak; eriyik sıcaklığı, tutma basıncı,

soğuma süresi ve enjeksiyon basıncı seçilmiştir. Çalışmada mekanik özellikler olarak; elastisite modülü, akma dayanımı, eğilme dayanımı ve izod darbe dayanımı incelenmiştir. Deneylerden elde edilen sonuçları yorumlamak üzere S/N oranları hesaplanmıştır. S/N değerleri kullanılarak ANOVA analizi yapılmıştır.

S/N oranları ve ANOVA analizi sonuçlarından, farklı kalıp malzemelerinden üretilen plastik ürünlerin mekanik özellikleri üstüne farklı enjeksiyon parametrelerinin etkileri olduğu görülmüştür.

Alüminyum malzemeden yapılan kalıpta elastiklik modülünü en fazla soğutma süresi, akma dayanımını ve izod darbe dayanımını eriyik sıcaklığı, eğilme dayanımını tutma basıncı etkilemiştir. Çelik malzemeden yapılan kalıpta ise elastiklik modülünü tüm parametreler birbirine yakın oranda etkilemiştir. Diğer mekanik özelliklerde ise, akma dayanımını enjeksiyon basıncı, eğilme dayanımını eriyik sıcaklığı ve izod darbe dayanımını ise tutma basıncı etkilemiştir.

Alüminyum malzemeden elde edilen PP ürünün elastisite modülü daha düşük, izod darbe dayanımı ise daha yüksek elde edilmiştir. Akma ve maksimum eğilme dayanımında ise inişli çıkışlı olarak birbirine yakın değerler elde edilmiştir.

Plastik enjeksiyon yöntemiyle elde edilecek ürünlerden beklenen mekanik özelliklere göre enjeksiyon parametrelerinin sınırları belirlenmelidir.

Acknowledgments / Teşekkür

Bu çalışma, GYTE BAP-2007-A17 projesi kapsamında desteklenmiştir.

REFERENCES / KAYNAKLAR

- [1] Xu, X., Sachs, E., Allep, S., 2001, "The Design of Conformal Cooling Channels in Injection Molding Tooling", *Polymer Engineering and Science*, 41(7): 1265–1279 (2001).
- [2] Dimla, D.E., Camilotto, M., Miani, F., "Design and optimisation of conformal cooling channels in injection moulding tools", *Journal of Materials Processing Technology*, 164–165: 1294–1300 (2005).
- [3] Sun, Y.F., Lee, K.S., Nee, A.Y.C., 2004, "Design and FEM analysis of the milled groove insert method for cooling of plastic injection moulds", *International Journal of Adv Manuf Technol*, 24: 715–726 (2004).
- [4] Li, C.L., Li, C.G., Mok, A.C.K., "Automatic layout design of plastic injection mould cooling system", *Computer Aided Design*, 37: 645–662 (2005).
- [5] Qiao, H., "Transient mold cooling analysis using BEM with the time-dependent fundamental solution", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 32/3-4: 315–322 (2005).
- [6] Ferreira, J.C., Mateus, A., 2003, "Studies of rapid soft tooling with conformal cooling channels for plastic injection moulding", *Journal of Materials Processing Technology*, 142 (2003) 508–516.
- [7] Au, K.M., Yu, K.M., 2006, "A scaffolding architecture for conformal cooling design in rapid plastic injection moulding", *International Journal of Adv Manuf Technol*, 34 (5-6): 496-515 (2007).
- [8] Avelar-Batista, J.C., Spain, E., Letch, M., Housden, J., Beechey, R., "Improvements on the wear resistance of high thermal conductivity Cu alloys using an electroless Ni-P coating prior to PVD deposition", *Surface & Coatings Technology*, 201: 4052–4057 (2006).
- [9] Tomori, T., Melkote, S., Kotnis, M., "Injection mold performance of machined ceramic filled epoksi tooling boards", *Journal of Materials Processing Technology*, 145: 126–133 (2004).

- [10] Nagaoka, T., Ishiaku, U.S., Tomari, T., Hamada, H., Takashima, S., "Effect of molding parameters on the properties of PP/PP sandwich injection moldings", *Polymer Testing*, 24: 1062–1070 (2005).
- [11] Rahmati, S., Dickens, P., "Rapid tooling analysis of Stereolithography injection mould tooling", Tehran international congress on manufacturing engineering (TICME2005) No:12, Tehran, (12/2005), 47/5, 740-747, 2007.
- [12] Kovacs, J.G., "Construction of Pre-Deformed Shapes for Rapid Tooling in Injection Molding", *Macromol. Symp.*, 239: 259–265, 2006.
- [13] Ozcelik, B., Ozbay A., Demirbas E. "Influence of injection parameters and mold materials on mechanical properties of ABS in plastic injection molding", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 37/ 9: 1359-1365, 2010.
- [14] Savaşkan, M., Taptık, Y., Ürgen, M., "Deney tasarımı yöntemi ile matkap uçlarında performans Optimizasyonu", *İTÜ dergisi*, 3 (6): 117-128 (2004).
- [15] Oktem, H., Erzurumlu, T., Uzman, İ., 2006, "Application of Taguchi optimization technique in determining plastic injection molding process parameters for a thin-shell part", *Metarials and Design*, 28: 1271-1278 (2007).
- [16] Erzurumlu, T., Ozcelik, B., 2005, "Minimization of warpage and sink index in injection molding termoplastic part using taguchi optimization method", *Metarials and Design*, 27: 853-861 (2006).
- [17] Özbay, A., "Alternatif kalıp malzemelerinin değişik polimerlerden elde edilmiş nihai ürünün mekanik özelliklerine etkisinin araştırılması", Yüksek Lisans Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Gebze-Kocaeli, 2008.
- [18] Altan, M., "Plastik enjeksiyonda geri dönüşümlü malzeme katkısı ile işlem parametrelerinin kalıntı gerilmeler üzerindeki etkisinin incelenmesi", Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2007.