



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://www.politeknik.gazi.edu.tr/index.php/PLT/index>

Multi-response optimization of ultrasonic pulse velocity and the modulus of elasticity of concrete containing polymeric wastes

Polimerik atıklar içeren betonun ultrason hızının ve dinamik elastisite modülünün çok yanıtli eniyilenmesi

Yazar(lar) (Author(s)): Barış ŞİMŞEK, Tayfun UYGUNOĞLU

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Şimşek B. and Uygunoğlu T., “Polimerik atıklar içeren betonun ultrason hızının ve dinamik elastisite modülünün çok yanıtli eniyilenmesi”, *Politeknik Dergisi*, 20(4): 1009-1017, (2017).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.gov.tr/politeknik>

DOI: 10.2339/politeknik.369924

Polimerik Atıklar İçeren Betonun Ultrason Hızının ve Dinamik Elastisite Modülünün Çok Yanıtlı Eniyilenmesi

Araştırma Makalesi / Research Article

Barış ŞİMŞEK^{1*}, Tayfun UYGUNOĞLU²

¹Çankırı Karatekin Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Kimya Mühendisliği Bölümü, Çankırı, Türkiye

²Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Afyon, Türkiye

(Geliş/Received : 01.10.2016 ; Kabul/Accepted : 14.02.2017)

ÖZ

Bu çalışmada polimerik atıklar içeren betonun ultrason hızı ve elastisite modülü özellikleri üzerindeki etken etkileri çok değişkenli regresyon çözümlemesi ile çözümlendi. Her biri üç seviyeye sahip yedi polimer; yüksek yoğunluklu polietilen, düşük yoğunluklu polietilen, polipropilen, termoplastik elastomer, dimetil tereftalat, polietilen tereftalat, polietilen naftalat ve deneylerin tasarımında (L_{27}) ortogonal dizini seçildi. Ultrason hızı üzerinde azaltıcı etkiye sahip polimerler sırası ile 0.000, 0.009, 0.007, 0.008 ve 0.001 p-değerleri ile yüksek yoğunluklu polietilen, düşük yoğunluklu polietilen, termoplastik elastomer, polietilen tereftalat ve polietilen naftalat olarak belirlendi. Dinamik elastisite modülü üzerinde azaltıcı etkiye sahip polimerler ise, sırasıyla, 0.001, 0.002 ve 0.001 p-değerleri ile yüksek yoğunluklu polietilen, polipropilen ve polietilen naftalat olarak belirlendi. Polimerik atıklar içeren betonun optimal karışım oranları doğrusal regresyon modelleri tabanlı çok yanıtlı doğrusal programlama yöntemiyle belirlendi. Optimal karışım oranları ile gerçekleştirilen doğrulama deneyi, çok yanıtlı doğrusal programlama yönteminin beton bileşimi eniyileme problemlerini çözmede etkili biçimde kullanılabileceğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Beton, regresyon analizi, çok yanıtlı doğrusal programlama, taguchi tasarımı, polimerik atıklar.

Multi-Response Optimization of Ultrasonic Pulse Velocity and the Modulus of Elasticity of Concrete Containing Polymeric Wastes

ABSTRACT

In this study, the effect of the factors on ultrasonic velocity and elasticity modulus properties of concrete containing polymeric wastes was solved by multivariable regression analysis. Seven polymers, namely, low density polyethylene, high density polyethylene, polypropylene, thermoplastic elastomer, dimethyl terephthalate, polyethylene terephthalate, polyethylene naphthalate, each at three levels were selected, and an orthogonal array (L_{27}) was used to carry out the experimental runs. Polymers with reducing effect on ultrasound pulse velocity were identified as high density polyethylene, low density polyethylene, thermoplastic elastomer, and polyethylene terephthalate and polyethylene naphthalate with p-values of 0.000, 0.009, 0.007, 0.008 and 0.001, respectively. Polymers having a reducing effect on the dynamic elasticity modulus were identified as high density polyethylene, polypropylene and polyethylene naphthalate with p-values of 0.001, 0.002 and 0.001, respectively. Optimal mixing ratios of concrete containing polymeric waste were determined by multi-response linear programming method based on linear regression models. Verification experiment with optimum mixture ratios shows that the multi-response linear programming method can be used effectively in solving the concrete compound optimization problems.

Keywords: Concrete, regression analysis, multi-response linear programming, taguchi design, polymeric wastes.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Veri madenciliğinde, regresyon analizi çıktı değişkenlerini bağımsız girdi değişkenleri ile fonksiyonel olarak ilişkilendirmek için kullanılır [1]. Basit matematiksel fonksiyonlar ile başarılı bir şekilde çıktı parametrelerini modelleyebilen doğrusal regresyon analizinin endüstride oldukça geniş bir kullanım alanı vardır. Örneğin, müşteri taleplerini [2], baca gazı CO_2

emiyonunu [3], iyonik sıvıların termodinamik özelliklerini [4], çeşitli biyodizellerin kullanıldığı sıkıştırılmalı ateşlemeli motorun gürültü ve ses özelliklerini [5], Alzheimer hastalığının ilerleme sürecini [6], binalarda elektrik tüketimini [7], nano-silika içeren yüksek dayanımlı betonun basınç dayanımını [8] tahmin etmede oldukça başarılıdır. Literatürdeki çalışmalar dikkate alındığında, doğrusal regresyonun, yeterince yüksek ilişkililik katsayısına sahip olması bakımından, birçok sistem veya ürün özelliklerini tahmin etmede yeterli olduğu sonucuna varılabilir [9].

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : barissimsek@karatekin.gazi.edu.tr

Son yıllarda betona düşük yoğunluk, ısı veya ses yalıtımı gibi ek özellikler kazandıran polimerlerin betonda kullanımını artmaktadır [10]. Polimerler betona ses veya ısı yalıtım özeliği kazandırabilmekte, ancak mekanik dayanımı düşürmektedir [11]. Her bir kıstas için ayrı ayrı optimal karışım oranlarının belirlenmesi, belirlenen karışım oranlarının endüstriyel kullanımını zorlaştırmaktadır. Birbiri ile çatışan amaçların çok yanıtli eniyilemesi, betonu oluşturan hammaddelerin etkin kullanımını sağlamaktadır [11]. Literatürde tek yanıtli ve farklı beton tipleri için optimal karışım oranlarının belirlendiği çok yanıtli eniyileme çalışmaları mevcuttur. Bu çalışmalardan bazıları; normal ağırlıklı betonun işlenebilirlik ve mekanik özellikleri için cevap yüzey yöntemi tabanlı karesel programlama [11], normal ağırlıklı betonun basınç dayanımı özeliği için cevap yüzey yöntemi tabanlı D-optimal tasarım [12], metakaolin ve uçucu kül karışımı içeren betonların basınç dayanımı, su emmesi, kılcal geçirimsizlik katsayısı ve klorür geçirgenliği özellikleri için cevap yüzey yöntem bilgisi [13], kompozit hibrid betonarme kirişlerin ağırlık ve maliyet optimizasyonunda elektrik sarfiyatı tahmini için regresyon çözümlemesi, sinir ağları ve en küçük kareler destek mekanizmasının karşılaştırılması [14], geçirgen betonun mekanik ve bağlayıcı hamurunun akışkanlık özellikleri için cevap yüzey yöntem bilgisi [15] olarak sıralanabilir.

Elastisite modülü, sertleşmiş betonun elastik bölgedeki gerilme-şekil değiştirme davranışını tanımlayan önemli bir özellik olup statik yükü altında yüklenme-boşaltma, dinamik deneysel (ultrason hızı ve rezonans frekansı) ölçümlerden ve analitik yöntem ve bağıntılarla elde edilebilmektedir. Statik elastisite modülü betonun gerilme-şekil değiştirme eğrisinin eğiminden elde edilmektedir [16]. Dinamik elastisite modülü çok küçük gerilmelerin söz konusu olduğu ultrason hızı, Poisson oranı ve birim hacim kütlesi (veya yoğunluğu) kullanılarak elastisite kuramından tahmin edilebilmektedir [16].

Ancak çok küçük gerilme düzeylerinde elde edilen dinamik elastisite modülleri genellikle statik elastisite modülünden daha yüksek değerler almaktadır [17].

Bu çalışmada regresyon analizi uygulanarak 0/4 mm taneli polimerik atıklar ve uçucu kül içeren normal ağırlıklı betonun, içyapı ve mekanik özelliklerine bağlı olarak değişen, ultrason hızı ve dinamik elastisite modülü üzerinde polimerlerin etki düzeylerinin belirlenmesi amaçlandı. Ayrıca, regresyon analizi ile oluşturulan doğrusal meta-modeller ile ultrason hızını minimize eden ve dinamik elastisite modülünü maksimize eden optimal karışım oranlarının belirlenmesi amaçlandı. Çalışmanın ana katkısı, polimer atıklar içeren betonun ultrason hızı ve dinamik elastisite modülü üzerinde etkili olan polimerlerin varyans analizi ile belirlenmesidir. Çalışmanın bir diğer katkısı ise, çok yanıtli doğrusal programlama yöntemi ile polimer betonun ultrason hızının ve ultrason hızı ve sertleşmiş betonun Poisson oranı, birim hacim kütlesi ölçümlerinden hesaplanan dinamik elastisite modülünün literatürde ilk defa

optimize edilmesidir. Literatürde ilk defa, eniyileme performansı açısından ayrı ayrı uygulanan TOPSIS (İdeal Çözümlere Yakınlık Yoluyla Tercihlerin Sıralanması Tekniği) tabanlı Taguchi yöntemi [18] ile Taguchi tabanlı doğrusal programlama karşılaştırıldı [19].

2. MALZEME VE METOT (MATERIALS AND METHODS)

2.1. Malzeme (Materials)

İnce agregalar olarak tane büyüklüğü 0/4 mm olan kırma kum, kaba agregalar olarak 4/11 mm Kırmataş I ve 11/22 mm Kırmataş II kullanıldı. İnce ve iri agregaların tane yoğunlukları sırası ile 2.65 ve 2.70 kg/dm³, kütlece su emme oranları ise % 1.7 ve % 1.1'dir. Çalışmada TS EN 197-1 [20] ile uyumlu, tane yoğunluğu 3.01 kg/dm³ ve özgül yüzeyi 351.0 m²/kg olan CEM I 42.5 R Portland çimentosu (Bolu Çimento) ve TS EN 197-1 [20] ile uyumlu, tane yoğunluğu 2.51 kg/dm³ ve özgül yüzeyi 351.5 m²/kg olan F sınıfı uçucu kül (Zonguldak/Çatalağzı) kullanıldı. Kimyasal katkı olarak BASF® firmasından temin edilen polikarboksilik eter bazlı süper akışkanlaştırıcı MasterGlenium 150 kullanıldı. Çalışmada kullanılan çimento ve uçucu külün özellikleri Çizelge 1'de görülmektedir.

Çizelge 1. Çimento ve uçucu külün kimyasal bileşimi (Chemical compositions of cement and fly ash)

Kimyasal bileşen /özelik	İçerik (kütlece %)	
	CEM I 42.5 R	Uçucu kül
CaO	66.12	4.81
SiO ₂	21.72	56.16
Al ₂ O ₃	5.94	23.30
Fe ₂ O ₃	2.59	6.31
SO ₃	1.61	0.75
MgO	1.19	2.09
K ₂ O	0.64	2.49
Na ₂ O	0.13	0.31
Cl ⁻	0.0076	0.0019
Kızdırma kaybı	3.69	2.22

İnce agreganın bir bölümü yerine kullanılan polimerler geri kazanım tesislerinden tedarik edilen, düşük yoğunluklu polietilen (LDPE), yüksek yoğunluklu polietilen (PE), Polipropilen (PP), polietilen tereftalat (PET) ile polyester üretici firmalardan tedarik edilen termoplastik polyester elastomer (TPE), polietilen naftalat (PEN) ve dimetil tereftalat (DMT)'dir. Bu malzemelerin fiziksel özellikleri Çizelge 2'de verildi.

Bu amaçla ilk olarak ultrason hızı ve dinamik elastisite

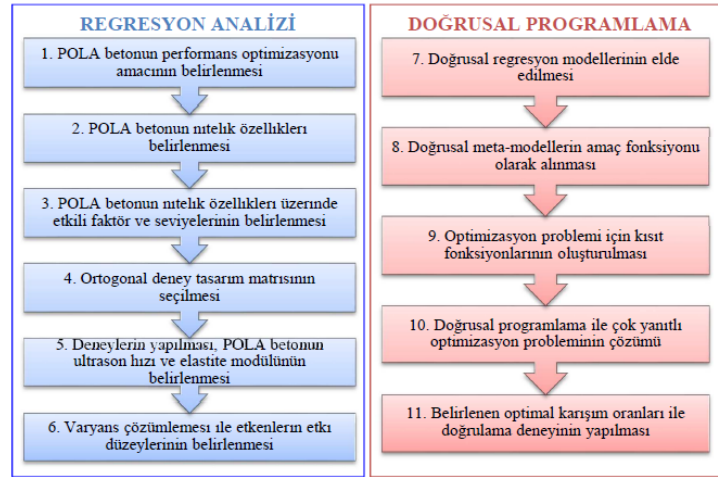
Çizelge 2. Polimerlerin fiziksel özellikleri (Physical properties of polymers)

Fiziksel Özellikler	Değerler						
	LDPE	HDPE	PP	TPE	PEN	DMT	PET
Erime akış hızı, g/10dk	2.0-3.5	4.5-6.0	8.0	12-20	-	-	-
Yoğunluk, kg/dm ³	0.918	0.963	0.905	1.20	1.35	1.2	1.38
Erime noktası, °C	110	95	230-260	205-215	155	142	235
Kopma Gerilmesi, MPa	14.0	17.0	-	30.0	20.0	-	80.
Kopma Uzama Oranı, %	600	1250	6	850	60	-	-
Eğilme dayanımı, GPa	-	1.0	-	0.5	5 ± 0.5	-	2-4
Granül aralığı, mm	≤4 mm	≤4 mm	≤4 mm	≤4 mm	≤4 mm	≤4 mm	≤4 mm

2.2. Metot (Method)

Bu çalışmada, Polimerik atıklar içeren betonun (POLA) betonun optimal karışım oranlarının belirlenmesi ve etken analizi için 11 adımdan oluşan bir yöntem bilgisi izlendi (Şekil 1).

modülü POLA betonun nitelik özellikleri (karakteristikleri) olarak belirlendi. Bu nitelik karakteristiklerini etkileyen etkenler her biri üç seviyeli; olarak belirlendi. Faktörlerde su-çimento oranı yerine su miktarı (W) kullanıldı.



Şekil 1. POLA betonun optimal karışım oranlarının belirlenmesi için önerilen akış diyagramı (Proposed flow diagram for optimal mixture design of POLA concrete)

Çizelge 3. Etkenler ve seviyeleri (Factors and their levels)

Faktörler	Seviyeler			Serbestlik derecesi ^o
	Birinci Seviye	İkinci Seviye	Üçüncü Seviye	
Düşük yoğunluklu polietilen (LDPE), % ^a	1	5	10	2
Yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE), %	1	5	10	2
Polipropilen (PP), %	1	5	10	2
Termoplastik polyester elastomerleri (TPE), %	1	5	10	2
Dimetil teraftalat (DMT), %	1	5	10	2
Polietilen teraftalat (PET), %	1	5	10	2
Polietilen naftalat (PEN), %	1	5	10	2
CEM I Çimento miktarı (C), kg	350	400	450	2
Uçucu kül miktarı (F), kg	80	100	120	2
Su çimento oranı (S/C)	0.38	0.42	0.46	2
Süper akışkanlaştırıcı içeriği (PCE), % [*]	0.80	1.05	1.30	2
İnce agreganın (FA) toplam agregaya kütlece karışım oranı	0.40	0.50	0.60	2
I no.lu (4/16 mm) iri agreganın (CA) toplam agregaya kütlece karışım oranı	0.15	0.20	0.25	2
	Toplam			26

^a100 kg bağlayıcı (çimento ve su) için tanımlandı.

^oÜç seviye için serbestlik derecesi 3-1=2 şeklinde tanımlandı.

^{*}İnce agrega yerine tanımlandı.

Ortogonal dizinler, kontrol edilebilen faktörlerin serbestlik derecelerinin toplamına göre seçildi. Her faktörün serbestlik derecesi, faktör seviye sayısının bir eksiği olarak tanımlandı. Tüm faktörleri üç seviyeli olan ve deneme sayısı 26' den büyük, en küçük ortogonal dizin L_{27} 'dir. Seçilen L_{27} ortogonal dizinin tüm sütunlarına faktörler sırası ile atandı ve deneyler gerçekleştirildi. Varyans çözümlemesi ile kullanılan polimerlerin, POLA betonun ultrason hızı ve dinamik elastisite modülü üzerindeki etkisi tahmin edildi. POLA betonun nitelik özellikleri ile faktörler arasındaki ilişkiyi matematiksel olarak modelleyebilmek için Regresyon analizi kullanıldı.

Regresyon analizinde temel amaç, y ile bağımsız değişken seti arasındaki gerçek fonksiyonel ilişki için uygun bir tahmin bulmaktır. Genellikle bağımsız değişkenlerin bir bölgesi içindeki düşük dereceli bir polinom fonksiyon kullanılır. Eğer cevap, bağımsız değişkenlerin lineer bir fonksiyonuyla iyi bir şekilde modellenilebiliyorsa tahmin fonksiyonu birinci derecedir [21].

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \varepsilon \quad (1)$$

Denklemden, β_0 sabit terim, β_1 , β_2 ve β_k modelin doğrusal katsayılarını temsil etmektedir. Elde edilen doğrusal meta-modeller amaç fonksiyonu olarak belirlendi. Daha sonra, faktörlerin deneylerde kullanıldığı alt ve üst limitler kısıt fonksiyonu olarak belirlendi. Son olarak doğrulama deneyleri kullanılarak, doğrusal programlama tabanlı çok yanıtlı optimizasyon yöntemi ile TOPSIS tabanlı Taguchi yaklaşımı karşılaştırıldı.

2.3. Deneyel Çalışma (Experimental Work)

POLA betonun dinamik elastisite modülü ultrason geçiş hızından hesaplandı [17, 22, 23]. Ultrason hızları, bir kenarı 150 mm olan 28 günlük POLA küp numunelerde ölçüldü (Şekil 2).

Ultrason hızları Denklem (2) kullanılarak hesaplandı.



Şekil2. POLA betonda ultrason geçiş süresinin ölçümü (Measurement of the ultrasonic pulse velocity in POLA Concrete)

$$V = \frac{L}{t} \quad (2)$$

Denklemden, V , ultrason hızını (km/s); L , mesafeyi (mm); t , ultrason geçiş süresini (μ s) göstermektedir [17, 23]. POLA betonların dinamik elastisite modülleri, doğrusal elastik ortamda düzlem dalga biçimine sahip ultrason hızı ile dinamik elastisite modülü arasında aşağıdaki (3) nolu bağıntı kullanılarak hesaplandı [17, 23].

$$E_d = ((1+\nu) \cdot (1-2 \cdot \nu) / (1-\nu)) \cdot V^2 \cdot \Delta \quad (3)$$

Bağıntıda, E_d , dinamik elastisite modülünü (MPa), V , ultrason hızını (km/s), Δ , yoğunluğu veya birim kütleyi (kg/m^3) ve ν ise poisson oranını (0.20) simgelemektedir.

3. BULGULAR (FINDINGS)

3.1. Deney Tasarım Matrisi ve Deney Sonuçları

(Experimental Design Matrix and Experimental Results)

Bu aşamada geniş bir arama uzayı seçildi. Tüm polimerik malzemelerin ve beton bileşenlerinin eşanlı değerlendirmesi istendiğinden deney tasarım matrisi olarak L_{27} (3^{13} kısmî faktöriyel) ortogonal tertibi seçildi. İlgili deney tasarım matrisine göre deneyler gerçekleştirildi ve sonuçlar Çizelge 4'te verildi. Her deney koşumuna ait 6 adet numune üretildi, ultrason hızının ölçülmesinde ve belirlenmesinde 3 numunenin ortalaması alındı. TS EN 12390-7'ye göre belirlenen numunelerin yüzeyi kuru doymuş ağırlıkları, su içinde asılı ağırlıkları ve etüv kurusu ($105^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$ sıcaklıkta) ağırlıkları kullanılarak hesaplanan kuru birim hacim kütleleri 2.03 ile 2.37 kg/dm^3 arasında değişmektedir [24]. Taze haldeki POLA betonların çökme değerleri 50 mm ile 230 mm arasında değişmektedir. Çizelge 4'ün 2-14 kolonlarında etkenler, 15 ve 16 kolonlarında ise deneyler sonucu elde edilen POLA beton özellikleri (tepkiler) gösterilmektedir.

Çizelge 4. L₂₇ ortogonal tasarım matrisi ve deney sonuçları (L₂₇orthogonal design matrix and experimental results)

Deney No.	Etkenler (kg/m ³)										Yanıtlar						
	LDPE	HDPE	PP	IPE	DMT	PET	PEN	C	F	W	PCE	FA	CA	Yoğunluk, Δ (kg/m ³)	Çökmeye Değeri (cm) [27]	E _a (MPa)	V (km/s)
M0*	-	-	-	-	-	-	-	350	80	170.0	3.5	880.0	900.0	2383.5	16	46904	4.37
MI1	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	350	80	142.9	3.1	734.7	1070.5	2400.8	2	50348	4.59
MI2	3.1	3.1	3.1	3.1	15.8	15.8	15.8	400	100	181.3	4.6	833.2	687.7	2266.6	44	35641	3.93
MI3	3.6	3.6	3.6	3.6	33.6	33.6	33.6	450	120	224.2	6.5	587.6	604.7	2108.2	80	36814	3.98
MI4	18.9	3.8	18.9	18.9	3.8	3.8	3.8	400	100	180.5	5.7	809.7	676.3	2244.1	22	44124	4.56
MI5	11.2	2.2	11.2	11.2	11.2	11.2	11.2	450	120	226.1	4.0	409.8	907.7	2187.0	80	52596	4.87
MI6	17.3	3.5	17.3	17.3	34.7	34.7	34.7	350	80	142.2	4.0	395.8	935.5	2067.0	5	53015	4.81
MI7	28.0	2.8	28.0	28.0	2.8	2.8	2.8	450	120	225.2	5.2	489.5	756.2	2141.3	80	49226	4.72
MI8	41.6	4.2	41.6	41.6	20.8	20.8	20.8	350	80	141.4	5.0	594.8	748.2	2110.8	8	31693	3.86
MI9	25.2	2.5	25.2	25.2	25.2	25.2	25.2	400	100	182.2	3.5	260.1	1019.1	2118.6	15	36165	4.07
MI10	3.3	16.3	16.3	32.5	3.3	16.3	32.5	350	100	177.1	3.1	543.2	878.5	2172.4	19	32081	3.88
MI11	3.8	19.1	19.1	38.1	19.1	38.1	3.8	400	120	166.7	4.7	636.4	686.1	2155.0	16	44829	4.48
MI12	2.4	12.1	12.1	24.1	2.4	12.1	2.4	450	80	197.7	6.3	402.6	976.6	2202.5	20	44859	4.43
MI13	12.7	12.7	25.4	2.5	2.5	12.7	25.4	400	120	165.9	5.8	424.1	1028.8	2238.5	17	39807	4.12
MI14	15.1	15.1	30.2	3.0	15.1	30.2	3.0	450	80	199.5	3.9	503.6	814.4	2163.1	19	43538	4.41
MI15	19.5	19.5	39.0	3.9	39.0	3.9	19.5	350	100	176.3	4.1	651.7	702.7	2129.1	22	34924	3.94
MI16	36.2	18.1	3.6	18.1	3.6	18.1	36.2	450	80	188.6	5.1	604.1	651.3	2113.0	70	43102	4.45
MI17	26.0	13.0	2.6	13.0	13.0	26.0	2.6	350	100	175.6	5.1	434.4	1053.4	2214.7	70	46769	4.41
MI18	31.8	15.9	3.2	15.9	31.8	3.2	15.9	400	120	167.6	3.6	530.5	857.9	2197.3	80	48676	4.59
MI19	3.9	39.3	39.3	19.6	3.9	39.3	19.6	350	120	164.8	3.2	603.9	707.3	2114.1	14	19085	3.45
MI20	2.5	24.9	24.9	12.5	12.5	2.5	24.9	400	80	195.3	4.5	383.1	1009.4	2177.0	70	36729	4.04
MI21	3.1	30.5	30.5	15.3	30.5	15.3	3.1	450	100	181.4	6.4	469.5	824.8	2160.4	19	50789	4.62
MI22	15.6	31.1	3.1	31.1	3.1	31.1	15.6	400	80	194.5	5.6	478.7	840.9	2130.4	20	42897	4.40
MI23	18.3	36.7	3.7	36.7	18.3	3.7	36.7	450	100	183.3	3.9	563.8	663.6	2118.7	14	24417	3.37
MI24	13.1	26.2	2.6	26.2	26.2	13.1	2.6	350	120	164.0	4.2	400.8	1060.6	2209.6	14	46141	4.53
MI25	24.4	24.4	12.2	2.4	2.4	24.4	12.2	450	100	182.3	5.1	375.7	990.1	2205.6	17	48778	4.67
MI26	32.7	32.7	16.4	3.3	16.4	3.3	32.7	350	120	163.3	5.2	503.0	883.6	2162.6	17	34439	3.93
MI27	37.4	37.4	18.7	3.7	37.4	18.7	3.7	400	80	196.1	3.5	574.8	673.1	2084.5	16	25834	3.56

*M0: Referans beton (Polimerik katkı malzemesi kullanılmadı)

3.2. Doğrusal Regresyon Modellerinin Eldesi (Obtaining Linear Regression Models)

POLA betonun ultrason hızı ve dinamik elastisite modülü bağıntıları regresyon analizi ile Minitab kullanılarak elde

arasındaki yüksek korelasyon (R^2 değerleri ultrason hızı için 0.9845, dinamik elastisite modülü için 0.9890) modellerin yanıtları tahmin etmede etkili olduğunu göstermektedir. Sonuçlar şunu da göstermiştir ki seçilen doğrusal modeller yanıtları tahmin etmede etkilidir [25].

Çizelge 5. Elde edilen regresyon modelleri (Regression models obtained)

Nitelik karakteristiği (özeligi)	Doğrusal meta-modeller (amaç fonksiyonları)	Çoklu belirleyicilik katsayıları	
		R^2	Ayarlı R^2
1	$V \text{ (km/s)} = 34.9 - 0.0409 \text{ HDPE} - 0.0315 \text{ LDPE} - 0.0372 \text{ PP} - 0.0315 \text{ TPE} - 0.0376 \text{ DMT} - 0.0361 \text{ PET} - 0.0520 \text{ PEN} - 0.00782 \text{ C} - 0.00864 \text{ F} - 0.0335 \text{ W} + 0.0318 \text{ PCE} - 0.0126 \text{ FA} - 0.0115 \text{ CA}$	0.806	0.621
2	$E_d \text{ (MPa)} = 621094 - 813 \text{ HDPE} - 617 \text{ LDPE} - 762 \text{ PP} - 626 \text{ TPE} - 657 \text{ DMT} - 712 \text{ PET} - 1004 \text{ PEN} - 135 \text{ C} - 166 \text{ F} - 669 \text{ W} + 1065 \text{ PCE} - 239 \text{ FA} - 215 \text{ CA}$	0.824	0.665

edildi. Elde edilen doğrusal regresyon meta-modelleri Çizelge 5'te görülmektedir.

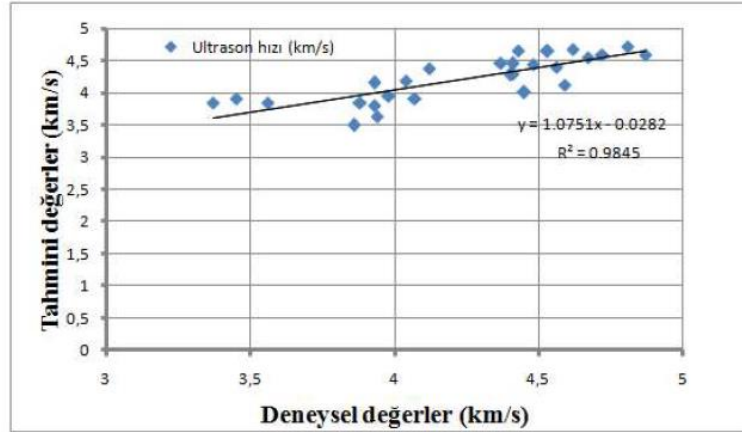
3.3. Doğrusal Regresyon Modellerinin Doğrulanması (Validation of the Linear Regression Models)

Meta-modellerin doğrulanması için gerçekleştirilen yirmi yedi deney için; (Çizelge 4) tahmin edilen değerler - deneysel değerler çizgeleri oluşturuldu (Şekil 3 ve 4). Deneysel değer ile modellerden tahmin edilen değerler

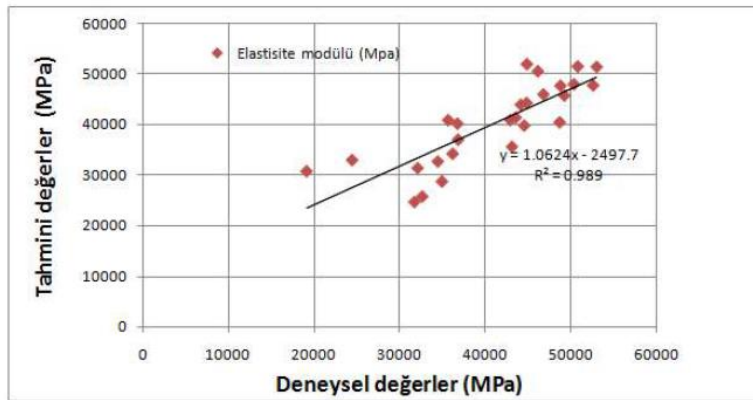
4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS and DISCUSSION)

4.1. Regresyon Analizi (Regression Analysis)

Çizelge 6'da, kullanışlı olan modellerin etkenleri ve tüm yanıtları için % 5 anlamlılık düzeyinde p-değerleri görülmektedir.



Şekil 3. Ultrason hızı için tahmini değerlere karşı deneysel değerler (Experimental values vs. predicted values for ultrasonic pulse velocity)



Şekil 4. Dinamik elastisite modülü için deneysel değerlere karşı tahmini değerlere karşı deneysel değerler (Experimental values vs. predicted values for the dynamic modulus of elasticity)

Negatif işaret etkenin antagonistik (azaltıcı) etkisi, pozitif işaret ise etkenin yanıt üzerinde sinerjistik (arttırıcı, destekleyici) etkisi olduğunu simgelemektedir [19].

Etkenler →	Ultrason hızı		Dinamik elastisite modülü	
	T	p	T	p
Tahmin edici ↓				
Sabit	3.92	0.002*	3.40	0.005*
HDPE	-4.65	0.000*	-4.50	0.001*
LDPE	-3.04	0.009*	-2.91	0.012
PP	-3.83	0.002*	-3.81	0.002*
TPE	-3.20	0.007*	-3.10	0.009*
DMT	-3.40	0.005*	-2.89	0.013
PET	-3.13	0.008*	-3.01	0.010
PEN	-4.46	0.001*	-4.19	0.001*
C	-2.11	0.055	-1.78	0.098
F	-2.05	0.062	-1.92	0.077
W	-3.75	0.002*	-3.65	0.003*
PCE	0.57	0.580	0.93	0.370
FA	-3.65	0.003*	-3.39	0.005*
CA	-3.34	0.005*	-3.04	0.010

*anamlılık düzeyi $p < 0.010$; (+) Sinerjistik etki; (-) Antagonistik etki

Çizelge 6'dan görüldüğü üzere ultrason geçiş hızı için çalışmada kullanılan tüm polimerler antagonistik (anamlı ($p < 0.010$) düzeyde azaltıcı), dinamik elastisite modülü için ise kullanılan polimerlerden yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE), polipropilen (PP), termoplastik polyester elastomer (TPE) ve polietilen naftalat (PEN) antagonistik (anamlı ($p < 0.010$) düzeyde azaltıcı) etkiye sahiptir. Ultrason geçiş hızındaki azalmalar beton içerisindeki boşluklardan veya dayanımı azaltıcı etkisi olan katkı maddelerinden kaynaklanmaktadır [16, 26]. Akçaözöglü ve ark. [27] atık PET'i ince agrega yerine % 60 oranında beton içerisinde kullanmış ve ultrason hızında düşme belirlemişlerdir. Bu çalışma şunu göstermiştir ki literatür ile örtüştüğü üzere, kullanılan tüm dayanım azaltıcı polimerik katkı betonun ultrason geçiş hızını azaltmıştır. Bununla beraber, V değeri 3.0-3.5 km/s arasındaysa beton

dayanımı düşük; 3.5-4.0 km/s arası iyi düzeyde olduğunu ve 4.0 km/s üzerindeyse yüksek dayanımlı beton sınıfında olabileceği bildirilmektedir [16].

4.2.Eniyileme (Optimization)

Çizelge 5'te elde edilen tüm ölçütlerin (amaç fonksiyonları) ağırlıkları eşit alınarak aşağıdaki kısıt fonksiyonları ile çok yantlı eniyileme çalışması gerçekleştirildi. Ultrason hızı için 4.0 km/s hedef değeri, dinamik elastisite modülü için 50000 MPa hedef değeri esas alınıp optimal karışım oranları "MATLAB® optmtool" aracı kullanılarak belirlendi.

$$2 \text{ kg} \leq \text{HDPE} \leq 42 \text{ kg} \quad (3)$$

$$2 \text{ kg} \leq \text{LDPE} \leq 42 \text{ kg} \quad (4)$$

$$2 \text{ kg} \leq \text{PP} \leq 42 \text{ kg} \quad (5)$$

$$2 \text{ kg} \leq \text{TPE} \leq 42 \text{ kg} \quad (6)$$

$$2 \text{ kg} \leq \text{DMT} \leq 42 \text{ kg} \quad (7)$$

$$2 \text{ kg} \leq \text{PEN} \leq 42 \text{ kg} \quad (8)$$

$$2 \text{ kg} \leq \text{PET} \leq 42 \text{ kg} \quad (9)$$

$$350 \text{ kg} \leq \text{C} \leq 450 \text{ kg} \quad (10)$$

$$80 \text{ kg} \leq \text{F} \leq 120 \text{ kg} \quad (11)$$

$$141 \text{ kg} \leq \text{W} \leq 230 \text{ kg} \quad (12)$$

$$3 \text{ kg} \leq \text{PCE} \leq 6.5 \text{ kg} \quad (13)$$

$$260 \text{ kg} \leq \text{FA} \leq 840 \text{ kg} \quad (14)$$

$$600 \text{ kg} \leq \text{CA} \leq 1070 \text{ kg} \quad (15)$$

Optimal karışım oranları; yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) için 32.785 kg, düşük yoğunluklu polietilen (LDPE) için 24.728 kg, polipropilen (PP) için 42 kg, termoplastik polyester elastomerleri (TPE) için 27.389 kg, dimetil teraftalat (DMT) için 42 kg, polietilen teraftalat (PET) için 34.059 kg, polietilen naftalat (PEN) için 33.636 kg, çimento miktarı için 367.021 kg, uçucu kül için 81.827 kg, su miktarı 196.093 kg, süper akışkanlaştırıcı miktarı 4.033 kg, ince agrega miktarı 421.274 kg ve I nolu iri agrega miktarı 626.114 kg olarak belirlendi.

4.3.Eniyileme için doğrulama deneyi (Validation experiment for optimization)

Doğrusal programlama kullanarak tahmin edilen optimal karışım oranları ile üç adet tekrar deneyi gerçekleştirildi.

Çizelge 7. Sonuçların onayı için t- test sonuçları (t-test results for validation of results)

Tekrar deneyi Numara	Yanıtlar	Tahmini değerler ¹	Onay deneyi ²	Fark (d)	Ortalama. \bar{d}	Standart sapma	t-Test İstatistiği [‡]	$T_{2;0.025} (t_{n-1, \alpha=0.025})$
1	V km/s	4	4.21	-0.21	-264.59	296.62	-2.1833 ³	-4.032
2	V km/s	4	4.14	-0.14				
3	V km/s	4	4.19	-0.19				
4	Ed MPa	50000	50644	-644				
5	Ed MPa	50000	50489	-489				
6	Ed MPa	50000	50454	-454				

Toplam n=6

¹Optimal karışım oranları bu hedef değerler için belirlendi.

²Taguchi tabanlı doğrusal programlama yöntemi ile belirlendi.

³Sıfır varsayımı $H_0 =$ Deneysel değerler ile modelden tahmin edilen değerler arasında anlamlı bir fark yoktur. Çünkü $0.9938 < 2.571$. sıfır varsayımı ret edilemez

[‡] $t = \bar{d} \sqrt{n} / s_d$

MATLAB® optimtool aracı ile tahmin edilen sonuçlar ile deneysel sonuçlar birbirine oldukça yakındır (Çizelge 7). Veri çifti üzerinde yapılan t-sınaması tahmin edilen sonuçlar ile deneysel değerler arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark olmadığını gösterdi.

4.4. Eniyileme yöntemlerinin karşılaştırılması (Comparison of optimization methods)

Eniyileme yöntemlerinin kıyaslanmasında regresyon modelleri tabanlı doğrusal programlama yöntemi, TOPSIS tabanlı Taguchi yaklaşımı kullanıldı. Bu amaçla ilk olarak dinamik elastisite modülü ve ultrason geçiş hızı için sırası ile “en büyük en iyidir” ve “en küçük en iyidir” sinyal gürültü oranları belirlendi. Daha sonra sırası ile karar matrisi, ağırlıklı karar matrisi, ideal ve negatif ideal çözüm, ayırım ölçüleri ve son olarak İdeal Çözüme Göreli Uzaklığı belirlendi. Yöntemin ayrıntıları Şimşek ve ark. [18], Şimşek ve Uygunoğlu [28] ve İç ve Yıldırım [29]’de bulunabilir. Optimal karışım oranları; düşük yoğunluklu polietilen (LDPE) için 3.36 kg, yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) için 33.6 kg, polipropilen (PP) için 33.6 kg, termoplastik polyester elastomerleri (TPE) için 3.36 kg, dimetil teraftalat (DMT) için 16.8 kg, polietilen teraftalat (PET) için 16.8 kg, polietilen naftalat (PEN) için 33.6 kg, çimento miktarı için 350 kg, uçucu kül için 80 kg, su miktarı 226 kg, süper akışkanlaştırıcı miktarı 3.98 kg, ince agrega miktarı 517 kg ve I nolu iri agrega miktarı 303 kg olarak belirlendi.

yoğunluklu polietilen (HDPE), polipropilen (PP), termoplastik polyester elastomer (TPE) ve polietilen naftalat (PEN) dinamik elastisite modülü üzerinde azaltıcı etkiye ($T < 0$ ve $p < 0.01$) sahiptir. Su miktarı ve ince agregasında ultrason hızı ve dinamik elastisite modülü üzerinde azaltıcı yönde etkiye sahip olduğu ($T < 0$, $p < 0.01$) belirlendi.

Yapılan regresyon analizi ile belirleyicilik (determination) katsayısı 0.80’in üzerinde meta-modeller elde edildi. Bu modeller amaç fonksiyonu alınarak kısıt fonksiyonları eşliğinde çok yanıtı doğrusal programlama uygulaması yapıldı. Yapılan doğrulama deneyleri sonuçları, polimerik atıklar içeren beton optimal karışım oranlarının belirlenmesinde çok yanıtı doğrusal programlama tekniğinin etkin olarak kullanılabilceğini göstermektedir. Son olarak Regresyon modelleri tabanlı doğrusal programlama yöntemi, TOPSIS tabanlı Taguchi yöntemi ile F-Testi kullanılarak kıyaslandı. Bu iki yöntemin keskinliği arasında anlamlı bir fark bulunamadı.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışma, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK-MAG-214M392) tarafından desteklendi. Yazarlar, desteklerinden dolayı TÜBİTAK’a teşekkür eder.

Çizelge 8. İki eniyileme metodunun karşılaştırılması (Comparison of the two optimization methods)

Numara	Tepkiler		TOPSIS tabanlı Taguchi ¹	Regresyon modelleri tabanlı DP	Standart sapma TOPSIS.sd1	Standart sapma DP. sd2	F.Test İstatistiği ‡	F _{5,5;0.95} (t _{n-1,m-1,1-α})
1	V	km/s	4.14	4.21	26270	27674	0.90*	5.05
2	V	km/s	4.06	4.14				
3	V	km/s	4.06	4.19				
4	E _d	MPa	48591	50644				
5	E _d	MPa	47911	50489				
6	E _d	MPa	47381	50454				
Toplam			6	6				

¹TOPSIS tabanlı Taguchi yöntemi ile belirlendi

*Sıfır varsayımı $H_0 =$ iki yöntem ile elde edilen değerler arasında anlamlı bir fark yoktur. Çünkü $0.90 > 5.05$. sıfır varsayımı kabul edilir. ‡ $F = s_{d1} / s_{d2}$

İki metodun keskinliği arasında anlamlı bir fark bulunamamıştır.

5. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada; polimerik atıklar içeren normal ağırlıklı uçucu kül içeren hazır betonun ultrason hızı ve dinamik elastisite modülü üzerinde etkili olan polimerler deneysel tasarım yöntemi ile belirlendi. Her biri üç seviyeye sahip yedisi polimer olmak üzere toplam on üç etken belirlendi. Deneylerin gerçekleştirilmesinde $L_{27}(3^{13})$ kısmi faktöriyel ortogonal dizini kullanıldı.

Çalışmada kullanılan tüm polimerlerin ultrason hızını azaltıcı yönde ($T < 0$ ve $p < 0.01$) etkisi olduğu, bir başka deyişle betonun ultrason hızını azaltma eğiliminde olduğu görüldü. Kullanılan polimerlerden yüksek

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Yang L., Liu S., Tsoka S. and Papageorgiou G., “Mathematical programming for piece wise linear regression analysis”, *Expert Systems With Applications*, 44: 156-167, (2016).
- [2] Kone E.R.S. and Karwan M. H., “Combining a new data classification Technique and regression analysis to predict the cost-to-serve new customers”, *Computer and Industrial Engineering*, 61 (1): 184-197, (2011).
- [3] Pan J., Kung P., Bretholt A. And Lu J., “Prediction of energy’s environmental impact using a three variable time

- series model”, *Expert Systems With Applications*, 41 (4): 1031-1040, (2014).
- [4] Chen L., Zhao Y., Zhang J. and Zhong Zou J., “Automatic detection of alertness/drowsiness from physiological signals using wavelet-based nonlinear features and machine learning”, *Expert Systems With Applications*, 42 (21): 7344-7355, (2015).
- [5] Uludamar E., Tosun E. and Aydın K., “Experimental and regression analysis of noise and vibration of a compression ignition engine fuelled with various biodiesels”, *Fuel*, 177: 326-333, (2016).
- [6] Xie Q., Wang S., Zhu J. and Zhang X., “Modeling and predicting AD progression by regression analysis of sequential clinical data”, *Neurocomputing*, 195: 50-55, 2016.
- [7] Kaytez F., Taplamacıoğlu M. C., Cam E. and Hardalac F., “Forecasting electricity consumption: a comparison of regression analysis, neural networks and least squares support vector machines”, *Electrical Power and Energy Systems*, 67: 431-438, (2015).
- [8] Chithra S., Senthil Kumar S.R.R., Chinnaraju K. and Alfin Ashmta F., “A comparative study on the compressive strength prediction models for High Performance Concrete containing nano silica and copper slag using regression analysis and Artificial Neural Networks”, *Construction and Building Materials*, 114: 528-535, (2016).
- [9] Viana F.A.C., Simpson T.W., Balabanov V. and Toropov V., “Metamodeling in multi disciplinary design optimization: how far have we all come”, *American Institute of Aeronautics and Astronautics*, 52 (4): 670–690, (2014).
- [10] Toufigh V., Hosseinali M. and Shirshorshidi S. M., “Experimental study and constitutive modeling of polymer concrete’s behavior in compression”, *Construction and Building Materials*, 112: 183-190, (2016).
- [11] Şimşek B., İç Y.T., Şimşek E.H. and Güvenç A.B., “Development of a graphical user interface for determining the optimal Mixture parameters of normal weight concretes: A response surface methodology based quadratic programming approach”, *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 136: 1-9, (2014).
- [12] Cihan M.T., Güner A. and Yüzer N., “Response surfaces for compressive strength of concrete”, *Construction and Building Materials*, 40: 763–774, (2013).
- [13] Güneyisi E., Gesoğlu M., Algin, Z. and Mermerdaş K., “Optimization of concrete Mixture with hybrid blends of metakaolin and fly ash using response surface method”, *Composites: Part B*, 60: 707–715, (2014).
- [14] De Munck M., De Sutter S., Verbruggen S., Tysmans T. and Coelho R.F., “Multi-objective weight and cost optimization of hybrid composite-concrete beams forecasting electricity consumption: a comparison of regression analysis, neural networks and least square support vector machines”, *Composite Structures*, 134: 369-377, (2015).
- [15] Jimma B. E. and Rangaraju P.R., “Chemical admixtures dose optimization in pervious Concrete paste selection – A statistical approach”, *Construction and Building Materials*, 101: 1047-1058, (2015).
- [16] Erdoğan T.Y., “Beton”, *ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayın ve İletişim Şti.*, Ankara, , (2003).
- [17] Postacıoğlu B., “Beton: agregalar, beton”, Cilt 2, *İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Matbaa Teknisyenleri Basımevi*, İstanbul, (1989).
- [18] Şimşek B., İç Y.T. and Şimşek E.H., “A TOPSIS-based Taguchi optimization to determine optimal mixture proportions of the high strength self-compacting concrete”, *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 125: 18–32, (2013).
- [19] Wang S. and Huang G.H. “A multi-level Taguchi-factorial two-stage stochastic programming Taguchi approach for characterization of parameter uncertainties and their interactions: An application to water resources management”, *European Journal of Operational Research*, 240 (2): 572–581, (2015).
- [20] TS EN 197-1, “Çimento - Bölüm 1: Genel çimentolar - Bileşim, özellikler ve uygunluk kriterleri”, (2012).
- [21] Koç B., Ertekin K.F., “Yanıt Yüzey Yöntemi ve Gıda İşleme Uygulamaları”, *Gıda Dergisi*, 35 (1): 1-8, (2012).
- [22] Özkan İ. and Yayla Z., “Evaluation of correlation between physical properties and ultrasonic pulse velocity of fired clay samples”, *Ultrasonics*, 66: 4-10, (2016).
- [23] Neville A. M., “Properties of Concrete”, 5th ed., *Pearson Education Limited*, UK, (2011).
- [24] TS EN 12390-7, “Beton - Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 7: Sertleşmiş beton yoğunluğunun tayini”, (2010).
- [25] Şimşek B., İç Y.T. and Şimşek E.H., “A RSM-Based Multi-Response Optimization Application for Determining Optimal Mix Proportions of Standard Ready-Mixed Concrete”, *Arab J Sci Eng*, 41 (4): 1435-1450, (2016).
- [26] Uyanık O., Gülay F.G. ve Tezcan S., “Beton Dayanımının Tahribatsız Ultrasonik Yöntemle Tayini”, *Hazır Beton Dergisi*, (2012).
- [27] Akçaözöğlü S., Akçaözöğlü K. and Atış C.D., “Thermal conductivity, compressive strength and ultrasonic wave velocity of cementitious composite containing waste PET lightweight aggregate (WPLA)”, *Composites Part B: Engineering*, 45 (1): 721–726, (2013).
- [28] Şimşek B. and Uygunoğlu T., “Multi-response optimization of polymer blended concrete: A TOPSIS based Taguchi application”, *Construction and Building Materials*, 117: 251–262, (2016).
- [29] İç Y.T. and Yıldırım S., “Improvement of a product design using multi criteria decision making methods with Taguchi Method”, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 27 (2): 447-458, (2012).