

## Tufal Katkılı Harçların Basınç Dayanımının Taguchi Metodu ile Analizi

Erdinç ARICI\*, Oğuzhan KELEŞTEMUR

Fırat Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Elazığ, Türkiye  
earici1@firat.edu.tr

(Geliş/Received: 23.03.2018; Kabul/Accepted: 03.09.2018)

### Özet

Bu çalışmada, Taguchi metodu kullanılarak tufal katkılı harçların basınç dayanımının analizi yapılmıştır. Taguchi metodu, hem deney tasarım aşamasında hem de verilerin istatistiksel analizinde kullanılmıştır. Deneysel tasarım aşamasında dört parametrelili  $L_{16}$  ( $4^2 \times 2^2$ ) ortogonal dizi seçilmiş ve seriler bu diziye göre hazırlanmıştır. Bu dört parametre; ince tufal (0 – 0.25 mm), iri tufal (0.25 - 1 mm), Su/Çimento (S/Ç) oranı ve çimento dozajı olarak alındı. Taguchi metodu ile deney sonuçlarının analizi yapıldı ve optimum değer elde edildi. Ayrıca, deney parametrelerinin basınç dayanımına etki oranları varyans analizi ile belirlendi. Analiz sonuçlarına göre, harç numunelerinin basınç dayanımı üzerinde ince tufal, Su/Çimento oranı ve çimento dozajı önemli rol oynamaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** Tufal, Harç, Basınç dayanımı, Taguchi metodu, ANOVA

### Analysis of Compressive Strength of Mortars with Mill Scale by Taguchi Method

#### Abstract

In this study, the compressive strength of the mortars with mill scale was analyzed by using Taguchi method. The Taguchi method was used both in the experimental design phase and in the statistical analysis of the data. In the experimental design phase,  $L_{16}$  ( $2^4 \times 2^2$ ) orthogonal array with four parameter was selected and the series were prepared according to this array. This four parameters; fine mill scale (0 - 0.25 mm), coarse mill scale (0.25 - 1 mm), water/cement (W/C) ratio and cement dosage. Analysis of the experimental results was made with the Taguchi method and the optimum value was obtained. Also, the effect ratios of the experimental parameters on the compressive strength were determined by means of variance analysis. According to the analysis results, fine mill scale, water/cement ratio and cement dosage play the significant role on the compressive strength of the mortar samples.

**Keywords:** Mill scale, Mortar, Compressive strength, Taguchi method, ANOVA

#### 1. Giriş

Su, çimento ve agreganın karışımından meydana gelen beton inşaat sektöründe farklı kullanım alanlarına sahiptir. Fakat betonun gevrek ve geçirgen yapıya sahip olması kullanım yerine bağlı olarak bazı olumsuzluklara sebep olmaktadır. Bu olumsuzlukları ortadan kaldırmak veya azaltmak amacıyla farklı malzemeler veya katkıları beton karışımına ilave edilerek dayanım ve dayanıklılık özelliklerinin iyileştirmesi yoluna gidilir. Özellikle atıl vaziyette olan malzemelerin yeniden kullanılarak ekonomiğe kazandırılmasının yanında çevreye olan olumsuz etkileri de ortadan kaldırılmaktadır.

Dökümhanelerde, haddehanelerde sıcak slab ve kütük yüzeyinin soğutulması sırasında yüksek

sıcaklık (1100-1300°C) ve oksitleyici ortam nedeniyle kütük, slab ve ingot yüzeyinde oluşan oksit tabakasına hadde tufali denilmekte ve yüzeyden yüksek basınçlı ve debili su ile temizlenmektedir. Atıl olarak kabul edilen çelik tufali belli bir sahada biriktirilerek hurda olarak satılmakta veya işlem maliyeti sebebiyle bedelsiz olarak üretim sahasından uzaklaştırılmaktadır. Çelik fabrikalarının döküm, haddeleme bölümlerinde oluşan tufaller yüksek demir içeriği nedeniyle önemi artan atıklar arasındadır. Türkiye'deki haddehanelerde miktarı tam olarak bilinmemekle birlikte çelik üretiminin %3'ü oranında tufal oluştuğu varsayılmaktadır [1].

Küresel demir çelik üretimi esnasında ton çelik başına 400 kg'ı aşan çeşitli katı atıklar ortaya çıkmaktadır. Metalürjik katı atıkların rastgele

çevreye bırakılması veya işletme sahalarında bekletilmeleri ile bu atıllardaki toksik etkili ağır metaller ve bileşikler yağmur ve kar sularıyla birlikte toprağa ve suya geçmekte, bitki örtüsünü, insan ve hayvan sağlığını olumsuz yönde etkilemektedir. Ayrıca, demir ve çelik tesislerinde oluşan bu katı atılların bertaraf edilmesi sürecinde üreticilere ağır ekonomik sorunlar da yüklenmektedir [2]. Çelik tufalinin ekonomiye kazandırılması amacıyla farklı alanlarda kullanımı için çalışmalar yapılmış ve olumlu sonuçlar alınmıştır [3,4,5].

Beton ve harçlarla ilgili çalışmalarda en büyük sorun numune sayısının fazlalığıdır. Bu durum hem zaman hem de malzeme açısından araştırmacılar için önemli bir problem oluşturmaktadır. Bu problemin giderilebilmesi amacıyla son zamanlarda istatistiksel yöntemlerden faydalanılmaya başlanılmıştır. İstatistiksel analiz yöntemlerinden olan Taguchi metodu hem analiz hem de optimizasyonda kullanıldığı için araştırmacılar tarafından rağbet görmektedir [6,7].

Taguchi metodu, üründe ve proseste, değişkenliği oluşturan ve kontrol edilemeyen faktörlere karşı, kontrol edilebilen faktörlerin düzeylerinin en uygun kombinasyonunu seçerek, ürün ve prosesteki değişkenliği en aza indirmeye çalışan bir deneysel tasarım metodudur [8].

Taguchi yöntemi, 1950'lerde Genichi Taguchi tarafından optimizasyon süreci tekniği olarak geliştirilen istatistiksel bir yöntemdir. Taguchi'nin parametre tasarımına yaklaşımı, performans ve maliyet açısından en uygun tasarım parametrelerini belirlemek için sistematik ve verimli bir yöntem sunar [9].

Sonlu elemanlar analizi ile birleştirilen bu gelişmiş optimizasyon algoritması, deneysel testlerin sayısını azaltabilir ve geleneksel optimizasyon algoritması ile karşılaştırıldığında çok fazla zaman tasarrufu sağlayabilir. Taguchi ortogonal dizini kullanılarak çeşitli faktörlerin durumunu kapsamlı bir şekilde yansıtabilen önemli kritik deney kombinasyonları gerçekleştirilmiştir [10].

Anahat ve süreç geliştirmede Taguchi yönteminin kullanımı yaygındır. Bunun nedeni, deney tasarım düzeninin iyileştirilmesi ve farklı parametreler arasındaki etkileşimin araştırılmasını sağlayan Taguchi'nin yönteminin kullanılması sonucu deney konfigürasyonu da

iyileşmektedir. Taguchi, her soruşturma için parametrelerin ve seviyelerini belirgin bir şekilde harmanlayan ortogonal kümelenme düzenlemesi sağlar. Bu özelliği, daha az deney ile araştırmanın sonucuna ulaşılabilme imkânı sağlamaktadır [11].

Taguchi yönteminin esas amacı; hedef değer etrafındaki değişkenliğin azaltılmasıdır. Diğer önemli bir nokta ise deney tasarımının dengeli olmasıdır, yani faktörlerin birbirinden bağımsız olarak değerlendirilmesini sağlaması ve bunun içinde tasarımda faktörlerin farklı seviyeleri için her deney şartı altında eşit sayıda örnekleme yapılmasıdır. Taguchi'nin standart tasarımları bu sistem üzerine kurulmuştur [12].

Taguchi, standart ortogonal dizin kullanılarak her bir bağımsız faktörü veya bunların proses karakteristikleri üzerindeki etkilerini değerlendirilir. Daha sonra deney değeri ve istenen değer arasındaki sapmaları hesaplamak için bir kayıp fonksiyonu tanımlanır. Bu kayıp fonksiyon bir sinyal-gürültü (S / N) oranına aktarılır. Genellikle, karakteristik tipine bağlı olarak mevcut üç S / N oranı vardır; daha düşük - daha iyi (LB), daha yüksek - daha iyi (HB) ve nominal - daha iyi (NB). Her bir karakteristik için S / N oranları aşağıdaki gibi hesaplanabilir [13].

En düşük en iyi olduğu durumda:

$$(S/N) = -10 \log\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2\right) \quad (3)$$

En yüksek (büyük) en iyi olduğu durumda:

$$(S/N) = -10 \log\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2}\right) \quad (4)$$

Nominal en iyi olduğunda

$$(S/N) = 10 \log\left(\frac{\bar{y}^2}{s^2}\right) \quad (5)$$

Bu çalışmanın amacı; harç numunelerinde kullanılan agrega ile atıl vaziyetteki çelik tufali belirli oranlarda yer değiştirerek elde edilecek numunelerin basınç dayanımlarını belirlemek ve elde edilecek olumlu sonuçlara bağlı olarak atıl vaziyetteki çelik tufalini farklı bir geri dönüşüm yöntemiyle ekonomiye kazandırmaktır. Bu çalışmada, deney serilerin belirlenmesinde ve verilerin analizinde Taguchi metodundan faydalanılmış, böylece zamandan ve malzemedan tasarruf sağlanmıştır. Ayrıca istatistiksel analizi yapılarak optimum değerler belirlenmiştir. Beton

ve harç numuneleri üzerinde yapılan deneysel çalışmalarda bugüne kadar çok fazla kullanılmayan bu yöntemin uygulanması ile literatüre olumlu yönde katkı sağlanması da amaçlanmıştır.

## 2. Materyal ve Metot

Deney serilerinin hazırlanmasında maksimum agregaga çapı 4 mm olan dere agregası kullanılmıştır. Kullanılan agreganın elek analiz değerleri Tablo 1. de verilmiştir.

**Tablo 1.** Agregaga elek analizi değerleri

Elek Çapı (mm)	Elekten Geçen (%)
4	100
2	71
1	50
0,5	35
0,25	25

Bağlayıcı malzeme olarak TS EN 197-1 standardına uygun CEM I 42,5 N tipi çimento kullanılmıştır [14]. Çimentoya ait kimyasal ve fiziksel özellikler Tablo 2. de verilmiştir

**Tablo 2.** Kullanılan çimentonun özellikleri

Çimento CEM I 42,5 N			
Kimyasal Özellikler		Fiziksel Özellikler	
S(SiO <sub>2</sub> )	21.12	Yoğunluk(g/cm <sup>3</sup> )	3.13
A(Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	5.62	Özgül yüzey(cm <sup>2</sup> /g)	3370
F(Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	3.24	Priz başlama süresi(dk)	168
C(CaO)	62.94	Priz bitiş süresi(dk)	258
MgO	2.73	<b>Basınç Dayanımı</b>	
SO <sub>3</sub>	2.30	2. gün(Mpa)	25.8
Na <sub>2</sub> O	--	7. gün(Mpa)	41.8
K <sub>2</sub> O	--	28. gün(Mpa)	50.7
Cl	0.009		
Kızdırma kaybı	1.78		

Çelik tufali ilavesinin harç numunelerinin basınç dayanımına etkisinin belirlenebilmesi için, tufal agregaga ile belirli oranlarda yer

değiştirilmiştir. Şekil 1. de görüleceği üzere ortalama çapı 5-20 mm arası, kalınlığı ise yaklaşık 1mm civarı olan çelik tufalinin EDX değerleri Tablo 3 de verilmiştir.

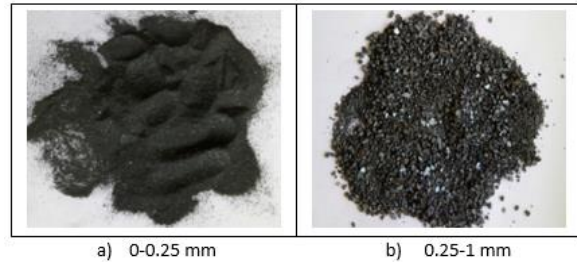


**Şekil 1.** Tufalin doğal yapısı

**Tablo 3.** Çelik tufali EDX sonuçları

EI	AN	Net	Unn. C (wt. %)	Norm. C (wt. %)	Atom C (wt. %)
Fe	26	4533	74.04	79.26	51.78
O	8	2082	18.22	19.51	44.48
C	6	44	1.15	1.23	3.74

Bilindiği gibi beton içindeki yassı ve uzun agregalar dayanımı olumsuz yönde etkilemektedir. Elde edildiği haliyle genelde yassı halde bulunan tufal deneylerde agregaga yerine kullanılacağı için öğütülerek kullanılmıştır. Öğütülen tufal Şekil 2. de görüldüğü gibi 0-0.25 mm ve 0.25-1 mm olmak üzere iki ayrı guruba ayrılmış ve her iki grup tufal agregaga ile belirli oranlarda (% 5, 10 ve 15) hacimsel olarak yer değiştirilmiştir.



**Şekil 2.** Öğütülerek elenmiş tufal

Deney serilerinin belirlenmesinde dört parametrelili L<sub>16</sub> ortogonal dizini seçilmiş ve seriler buna göre hazırlanmıştır. Basınç dayanımının belirlenmesi amacıyla 50x50x50 mm harç numuneleri TS EN 196-1 de belirtilen harç karışım esaslarına uygun olarak hazırlanmıştır ve

basınç dayanımları belirlenmiştir [15].  $L_{16}$  ortogonal dizini, bu dizinlere ait karışım oranları ve basınç 4 ve Tablo 5 de verilmiştir.

**Tablo 4.**  $L_{16}$  ortogonal dizine göre serilerin karışım oranları ( $\text{kg/m}^3$ )

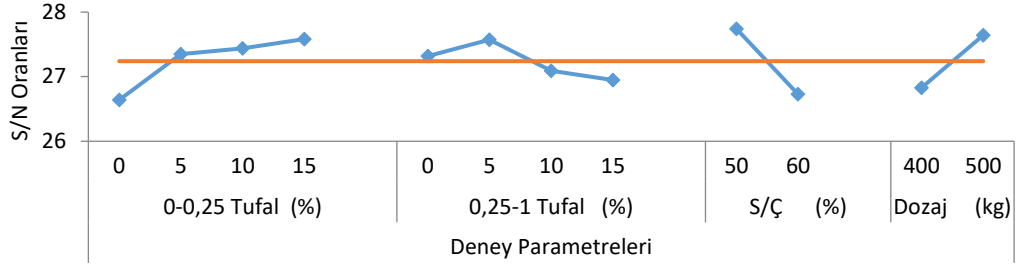
Seri No	Çimento	Su	Agrega				Tufal	
			0-0,25	0,25-1	1-2	2-4	İnce (0-0,25)	İri (0,25-1)
S1	500	250	560	560	476	644	0	0
S2	500	250	560	535	476	644	0	45
S3	624	380	448	382	364	504	0	68
S4	624	380	448	363	364	504	0	102
S5	624	310	455	476	420	560	38	0
S6	624	310	455	455	420	560	38	38
S7	499	300	508	459	448	616	43	81
S8	499	300	508	436	448	616	43	122
S9	499	300	484	504	448	616	86	0
S10	499	300	484	481	448	616	86	41
S11	624	310	433	433	420	560	77	77
S12	624	310	433	412	420	560	77	115
S13	624	380	388	420	364	504	108	0
S14	624	380	388	401	364	504	108	34
S15	500	250	484	510	476	644	136	90
S16	500	250	484	484	476	644	136	136

**Tablo 5.**  $L_{16}$  ortogonal dizini ve deney sonuçları

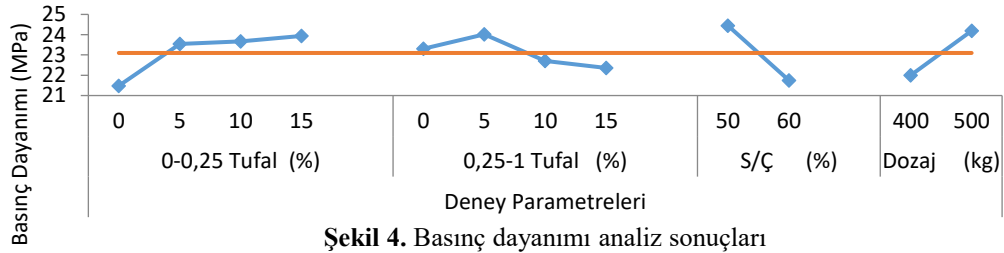
Seri No	0-0,25 Tufal (%)	0,25-1 Tufal (%)	S/Ç (%)	Dozaj (kg)	Basınç Dayanımı (MPa)
S1	0	0	0,5	400	21.70
S2	0	5	0,5	400	22.29
S3	0	10	0,6	500	21.11
S4	0	15	0,6	500	20.83
S5	5	0	0,5	500	26.24
S6	5	5	0,5	500	27.49
S7	5	10	0,6	400	20.51
S8	5	15	0,6	400	19.92
S9	10	0	0,6	400	21.59
S10	10	5	0,6	400	22.09
S11	10	10	0,5	500	25.18
S12	10	15	0,5	500	24.82
S13	15	0	0,6	500	23.71
S14	15	5	0,6	500	24.17
S15	15	10	0,5	400	24.02
S16	15	15	0,5	400	23.87

### 3. Sonuçlar ve Tartışma

Serilerin basınç dayanım deney verilerinin analizleri S/N oranının en büyük en iyi olma durumuna göre yapılmıştır. S/N ve basınç dayanımı analiz sonuçları Şekil 3 ve Şekil 4 de verilmiştir. Analiz sonuçlarından da görüleceği üzere Çelik tufali ve çimento dozajındaki artış basınç dayanımını olumlu etkilerken S/Ç oranındaki artış olumsuz yönde etkilemiştir. 0 – 0.25 mm lik tufalin karışıma giren % oranındaki artış basınç dayanımı da artmıştır. 0.25 – 1 mm. lik tufal karışıma %5 oranında ilave edildiğinde basınç dayanımını artırmış, fakat %5 den sonraki ilavelerde basınç dayanımı olumsuz etkilemiş ve dayanımı düşürmüştür. Basınç dayanımı S/Ç oranındaki artıştan olumsuz yönde etkilenirken çimento dozajından olumlu yönde etkilenmiştir.



Şekil 3. Basınç dayanımı S/N oranları



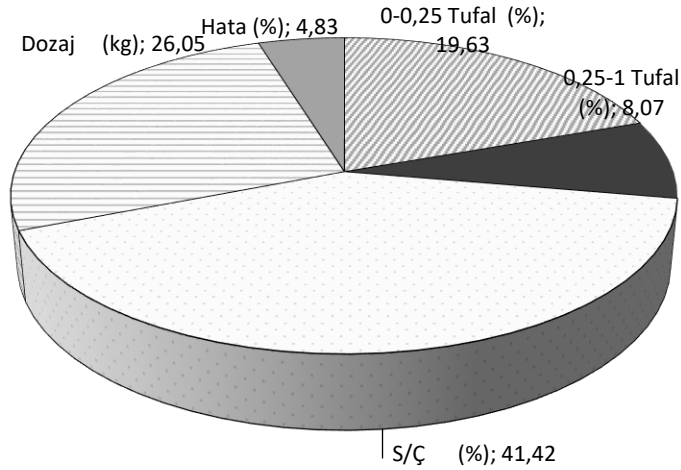
Şekil 4. Basınç dayanımı analiz sonuçları

Varyans analizinden yararlanarak deney parametrelerinin basınç dayanım sonuçlarına

etkileri belirlenmiştir. Varyans analiz sonuçları Tablo 6 ve Şekil 5 de gösterilmiştir

Tablo 6. Varyans analiz sonuçları

	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Varyans	F Değeri	% Dağılımı
0-0,25 Tufal (%)	3	2.032	0.677	21.34	19.63
0,25-1 Tufal (%)	3	0.891	0.297	9.36	8.07
S/Ç (%)	1	4.119	4.119	129.76	41.42
Dozaj (kg)	1	2.603	2.603	82.01	26.05
Hata	7	0.222	0.032	0	4.83
<b>TOPLAM</b>		9.867			100



Şekil 5. Parametre Yüzdeleri

Analiz sonuçlarına göre basınç dayanımı için optimum değerler; 0-0.25 mm lik tufalde %15, 0.25-1 mm lik tufalde %5, S/Ç oranı 0.50 ve 500 kg. dozaj değerleri olacaktır. Analiz sonuçlarının güvenilirliğinin belirlenebilmesi için optimum değerlere göre doğrulama deneyi yapılarak optimizasyon sonucu ile kıyaslanmıştır. Tablo 7 de doğrulama deneyi ve analiz sonuçları kıyaslandığında %93 benzerlik çıkmıştır. Bu değer bize sonuçların güvenilirliğini göstermektedir.

**Tablo 7. Optimum Değer Sonuçları**

Optimum değer parametreleri				Basınç dayanımı (MPa)	
0-0,25 Tufal (%)	0,25-1 Tufal (%)	S/Ç (%)	Dozaj (kg)	Analiz sonucu	Doğrulama deney sonucu
15	5	0.50	500	27.65	25.83

#### 4. Sonuç ve Öneriler

Bu çalışmada, farklı değerlerde S/Ç oranına ve dozaja sahip Tufal ilaveli çimento harçlarının basınç dayanımlarının analizi Taguchi metodu ile yapılmıştır. Taguchi ve varyans analizleri sonucunda basınç dayanımına parametrelerin etkileri belirlenmiştir. Yapılan analizler ve doğrulama deneyi neticesinde aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

1. Karışıma tufalin ilavesi basınç dayanımını olumlu yönde etkilemiştir. İnce tufal (0-0.25 mm) bütün oranlarda olumlu etkilerken, iri tufalin (0.25-1 mm) %5 ilavesinden sonraki oranlarda ters yönde etkisi olmuştur. Tufalde optimum değere ince için %15, iri için %5 oranlarında ulaşılmıştır.

2. S/Ç oranındaki artış beklenildiği gibi basınç dayanımını olumsuz yönde etkilemiştir. Fakat ince tufalin ilavesi S/Ç oranının sebep olduğu dayanım azalmasını telafi etmiştir. S/Ç oranının optimum değeri 0.5 olarak belirlenmiştir.

3. Çimento dozajındaki artış basınç dayanımını olumlu yönde etkilemiştir. Çimento dozajının optimum değeri 500 kg. dozajda elde edilmiştir.

4. Deneysel parametrelerin basınç dayanımına etkilerini belirlenmek amacıyla

varyans analizi yapılmıştır. Analiz neticesinde, basınç dayanımına S/Ç oranı %41.42, Çimento dozajı %26.05, ince tufal %19.63 ve iri tufal %8.07 oranında etkili olmuştur. Deneylerdeki hata payı %4.83 olarak çıkmıştır. Hata payının %4.83 olarak çıkması deneysel verilerdeki tutarlılığı da göstermektedir.

5. Yapılan analizler sonucunda optimum değere ulaşılan seri için doğrulama deneyi yapılmıştır. Doğrulama deneyi ile analiz sonucu kıyaslandığında yaklaşık olarak %93 benzerliğin olduğu görülmüştür. Bu değer inşaat alanındaki deneysel çalışmalarda Taguchi metodunun rahatlıkla kullanılabilirliğini ve yapılan analizlerin güvenilirliğini de göstermektedir.

Deneysel çalışma ve teoriksel analizler neticesinde; özellikle 0-0.25 mm lik ince tufalin harç karışımında kullanımının basınç dayanımını artırdığı, hatta S/Ç oranındaki artışın sebep olduğu dayanım düşüşünü telafi ettiği görülmüştür. Bu etkisinden dolayı özellikle yüksek S/Ç oranının gerekli olduğu karışımlarda kullanılmasının çok faydalı olacağı kanaatine varılmıştır. Tufalin fiziksel yapısından dolayı iri tufalin düşük oranlarda kullanılmasının uygun olacağı sonucuna ulaşılmıştır.

#### 5. Kaynaklar

1. Gündoğdu N. (2013). Demir-çelik tesislerinde açığa çıkan tufalden demirin geri kazanımı, Yüksek Lisans Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü..
2. Kayılı M.T., Çelebi G., Gültaş A. (2016). Yapı sektöründe atık kullanımına ilişkin bir inceleme: demir- çelik üretim atıkları. Uluslararası Malzeme Bilimi ve Teknolojisi Konferansı (IMSTEC'16), Türkiye.
3. Ming J., Shi J., Sun W. (2018). Effect of mill scale on the long-term corrosion resistance of a low-alloy reinforcing steel in concrete subjected to chloride solution. *Construction and Building Materials*. 163, 508-517.
4. Furlani E., Maschino S. (2016). Steel scale waste as component in mortars production: An experimental study. *Case Studies in Construction Materials*. 4, 93-101.
5. Mahendran K. (2013). Use of fly ash and steel mill scale in cement concrete as alternate building

- materials. *International Journal of Earth Science and Engineering*, 6, 109-111.
6. Jafari K., Tabatabaeian M., Joshaghani A., Ozbakkaloglu T. (2018). Optimizing the mixture design of polymer concrete: An experimental investigation. *Construction and Building Materials*. 167, 185-196.
  7. Devi V. S. (2018). Durability properties of multiple blended concrete. *Construction and Building Materials*. 179, 649-660.
  8. Alişer B., Yıldız S., Keleştemur O., Arıcı E. (2015). Cam lif ve mermer tozu takviyeli çimento harçlarının sülfat direncinin taguchi metodu ile analizi. II Uluslararası Sürdürülebilir Yapılar Sempozyumu, Türkiye.
  9. Nuruddin M.F., Bayuaji R. (2009). Optimum mix proportioning of mirha foamed concrete using taguchi's approach. *Üniversiti Teknologi Malaysia UTM Langkawi, Malaysia*.
  10. Xu F., Zhang S., Wu K., Dong Z. (2018). Multi response optimization design of tailor-welded blank (TWB) thin-walled structures using taguchi-based gray relational anlysis. *Thin-Walled Structures*. 131, 286-296.
  11. Vishwas M., Basavaraj C. K., Vinyas M. (2018). Experimental investigation using taguchi method to optimize process parameters of fused deposition Modeling for ABS and nylon materials. *Materials Today: Proceedings*. 5, 7106-7114.
  12. Taylan D. (2009). Taguchi deney tasarımı uygulaması. Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
  13. Keleştemur O., Yıldız S., Gökçer B., Arıcı E. (2014). Statistical analysis for freze-thaw resistance of cement mortars containing marble dust and glass fiber. *Materials and Design*. 60, 548-555.
  14. TSE. (2012). TS EN 197-1, Çimento- Bölüm 1: Genel çimentolar bileşim, özellikler ve uygunluk kriterleri. Türk Standartları Enstitüsü, Türkiye.
  15. TSE (2002). TS EN 196-1: Çimento Deney Metotları. Türk Standartları Enstitüsü: Türkiye.