



Taguchi Yöntemi Kullanılarak Hafif Genleşmiş Kil Üretiminin Optimizasyonu

Özkan Küçük^{1*}, Yunus Uran²

^{1*} Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Müh. Bölümü, Bilecik, Türkiye, (ORCID: 0000-0002-4337-4454), ozkan.kucuk@bilecik.edu.tr

² Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Bilecik, Türkiye, (ORCID: 0000-0002-4712-0849), M.Y.URAN@hotmail.com

(İlk Geliş Tarihi 21 Kasım 2021 ve Kabul Tarihi 25 Ocak 2022)

(DOI: 10.31590/ejosat.1026535)

ATIF/REFERENCE: Küçük, Ö., Uran, Y. (2022). Taguchi Yöntemi Kullanılarak Genleşmiş Kil Üretiminin Optimizasyonu. Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, (33), 1-9.

Öz

Genleşmiş kil agrega üretiminde, hangi parametrelerin etkili olduğunu bilmek ve bu parametrelerin genleşme üzerinde ne kadar etkili olduğunu belirlemek önemlidir. Bu çalışmada, hafif genleşmiş kil bilyelerinin üretiminin optimum şartlarının Taguchi yöntemi ile belirlenmesi incelenmiş olup, performans değeri olarak genleşme oranı ve pişme kaybı dikkate alınmıştır. Ayrıca bulunan optimum şartlarda su emme oranı ve tane yoğunluğu da analiz edilmiştir. Çalışmada, parametre olarak organik madde yüzdesi (0, 1, 2, 3 ve 4), ön ısıtma sıcaklığı (150, 200, 300, 400 ve 500°C), ön ısıtma süresi (1, 3, 5, 7 ve 9 dakika), sinterleme sıcaklığı (1050, 1100, 1150, 1175 ve 1200°C) ve sinterleme süresi (5, 7, 9, 11 ve 13 dakika) seçilmiş ve deneylerin tümünde tane boyutu 250 µm altı olarak sabit alınmıştır. Buna göre optimum şartlar, organik madde yüzdesi %3, ön ısıtma sıcaklığı 150°C, ön ısıtma süresi 1 dakika, sinterleme sıcaklığı 1200°C ve sinterleme süresi 13 dakika olarak bulunmuştur. Bu şartlarda, tahmin edilen genleşme oranı %4,34 olup, yapılan deneylerde %4,32'lik bir değer, pişirme kaybı için ise tahmin edilen değer %30,30 olup, yapılan deneylerde %31,63'lük bir değer elde edilmiştir. Ayrıca parametrelerin çıktılar üzerindeki yüzde etkileri de hesaplanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Hafif Genleşmiş Kil, Taguchi Metodu, Optimizasyon, Kil Bilyesi.

Optimizing of Lightweight Expanded Clay Production By Using the Taguchi Method

Abstract

In the production of lightweight expanded clay, it is important to know which parameters are effective and to determine the effect of these parameters on the expansion. In this study, the optimum conditions for the production of slightly expanded clay balls by the Taguchi method were investigated, and the expansion ratio and firing loss were taken into account as performance values. In addition, the water absorption rate and grain density were analyzed under optimum conditions. In the study, organic matter percentage (0, 1, 2, 3 and 4), preheating temperature (150, 200, 300, 400 and 500°C), preheating time (1, 3, 5, 7 and 9 minutes), The sintering temperature (1050, 1100, 1150, 1175 and 1200°C) and sintering time (5, 7, 9, 11 and 13 minutes) were chosen and the grain size was fixed as below 250 µm in all of the experiments. Accordingly, the optimum conditions were found to be organic matter percentage 3%, preheating temperature 150°C, preheating time 1 minute, sintering temperature 1200°C and sintering time 13 minutes. Under these conditions, the estimated expansion rate is 4.34%, a value of 4.32% in the experiments, the estimated value for the cooking loss is 30.30%, and a value of 31.63% was obtained in the experiments. In addition, the percentage effects of the parameters on the outputs were calculated.

Keywords: Lightly Expanded Clay, Taguchi Method, Optimization, Clay Ball.

* Sorumlu Yazar: ozkan.kucuk@bilecik.edu.tr

1. Giriş

Hafif malzemelerin içerisinde basınç mukavemeti en yüksek olanı, geliştirilmiş kilden üretilen hafif yapı malzemesidir. Bazı kil, killi şist ve şeyllerin sinterleşme süreci hızlı olur ve 1100-1300°C derecelere kadar ısıtıldığında genişleşip hacim artışına uğrarlar. Bu özellikleri taşıyan killi şist, kil ve şeyllere genel olarak genişleyen killer denilmektedir. Genleştirilmiş kil elde etmek için hammadde olarak; kumlu kil (Lem, mil), erken sinterleşen kil, killi şist ve şiferton yaygın olarak kullanılmaktadır. Genleştirilmiş kil, dünya piyasasında günümüzde Leca, Liapor ve Keramzit tanımlamaları ile de anılmaktadırlar. Türkiyede ise Lecat olarak isimlendirilmiştir. Şekil 1'de geliştirilmiş kil agregasından örnek gösterilmiştir (Güneş, 2019).

Hafif genişletilmiş kil agregası (LECA), kireç içermeyen veya çok az içerikli özel plastik kilden üretilir. Kil kurutulur, ısıtılır ve döner fırınlarda 1100–1300 °C'de yakılır. LECA, fırın dairesel hareketi nedeniyle neredeyse patates şeklinde veya yuvarlak şekilli, tek tip gözenek yapısına sahip gözenekli seramik üründür. LECA'daki çok sayıda küçük, hava dolu boşluk, hafiflik, termal ve ses yalıtımı özelliklerini verir (Rashad, 2018). Genleştirilmiş hafif kil agregasının üretilmesi 1917 yılında Kansas City'de başlamış olup, ilk standartlara girişi Amerika Birleşik Devletlerinde, sonra da Avrupada olmuştur. Kil bilyeleri yapılar da ısı ve ses yalıtımı, toprak basıncını azaltma, drenaj, dolgu malzemesi olarak, topraksız tarımda, seracılıkta ve peyzaj uygulamalarında tercih edilen bir malzemedir. Genleşmiş kil tanelerinin büyük oranda hava boşluğu içerdiğinden, toprağın havalanmasını ve su geçirgenliğini yüksek olmasını sağlar. Buharlaştırma ile su kayıplarını azaltır. Hastalık taşımaz, barındırmaz. pH değerleri 6.5<pH<8.5 aralığında olduğundan dolayı, bitkiler için uygun bir gelişme ortamı sağlar (LECAT, 2021).

Genleşen killer, ısı ile işlem gördüklerinde, gaz çıkışı ile birlikte hacimleri 5 - 6 kat artar. İçerdikleri gazların çıkışıyla birlikte, yüzeylerinde sinter kabuk oluşmakta, çıkan gazlar bünyede tutulmakta ve gözenekli, hafif, sert ve cürufumsu bir yapıya dönüşmektedirler (Özguven, 2009).

Mineralojik bileşimin en önemli değeri, ısıl işlemin ana aşamalarında faz dönüşümleri de dahil olmak üzere, genişmiş kilin yapı oluşumunun karmaşık fiziko kimyasal sürecini önceden belirlemesi gerçeğinde yatmaktadır. Kimyasal bileşim esas olarak kil hammaddelerinin mineralojik bileşimine bağlıdır. Bu nedenle, her bir bileşenin içeriğinin sınırlarını ve bunların genişleyen ve genişlemeyen kil hammaddelerinin yanı sıra değişen derecelerde genişlemeye sahip hammaddelerin oranlarını belirlemek önemlidir. (Onatskiy, 1987)

Günümüzde, hafif malzemelerin farklı ticari ve endüstri alanlarında tercih edilmesi her geçen gün yaygınlaşmaktadır. İnşaat sektöründe hafif ve gözenekli malzemeler, genellikle hafif yapı elemanlarının imalatında kullanılmaktadır. Ancak, kimyasal bileşimleri ve yapısal form özelliklerinden dolayı, inşaat endüstrisinde farklı alanlarda ve amaçlarda kullanılmaktadır. Mesela, avrupada bir konutun ısıtma maliyeti bize göre 3 kat daha azdır. Bunun nedeni yapılar da hafif yapı malzemesi kullanılmasıdır. Hafif malzemelerin yalıtım özellikleri çok iyi olduğundan enerji tasarrufu sağlamaktadır. (Güneş, 2019)

Dünyada, genişleyen kilden hafif malzeme üreten fabrikaların sayısında ve üretiminde düşüşler görülmesine rağmen, depreme dayanıklı binaların inşası ve enerji tasarrufu amacıyla gelecekte ülkemizin bu konuda bazı çalışmalar yapmalıdır. Türkiye'de genişleyen kil rezervleri oldukça çok bulunmaktadır. Bu nedenle, ülkemizin kil rezervleri potansiyeli araştırılmalı, genişleme özellikleri analiz edilmeli, yapısal özellikleri ve endüstriyel olarak kullanılabilirlikleri araştırılmalıdır (Güneş, 2019). Günümüzde Bilecik ilimizin Söğüt ilçesinde geliştirilmiş kil üretimi yapan bir işletme faaliyette bulunmaktadır.

Genleşmiş kil agregaların üretimi, teknik özelliklerinin karşılaştırılması ve yapı malzemesi olarak kullanımı üzerine literatürde birçok çalışma yapılmıştır.

Genişletilmiş kil agregası üretimi için etkin parametrelerin incelenmesi üzerine yapılmış bir çalışmada, farklı parametrelerin üretimi nasıl etkilediğini belirlemek için üç ayrı alandan örnekler kullanılarak genişleme testleri yapılmıştır. Genleşme testlerinde parametre olarak kil tane boyutu, pelet boyutu, fırın sıcaklığı ve pişirme süresi seçilmiştir. Üretim üzerindeki etkileri ayrı ayrı kanıtlanmıştır. Kil boyutunun küçültülmesinin genişleme üzerinde olumlu, pelet boyutunun küçültülmesinin ise olumsuz yönde etkilediği tespit edilmiştir. Ayrıca fırın içindeki sıcaklık ve kilin fırında kalma süresinin de elde edilen agregası kalitesi için kritik değerler olduğu belirtilmiş ve optimum üretim için şartlar detaylı olarak anlatılmıştır (Ozguven & Gunduz, 2012). Arıöz ve arkadaşları (Arıöz, 2007) yapmış olduğu bir çalışmada, tuğla ve kiremit yapımında kullanılan kilin kömür ile farklı oranlarda karıştırılıp 1000-1200°C arasında ki sıcaklıklarda ısıl işleme tabi tutulması sonucu hafif, geliştirilmiş kil agregaları üretmişler, sonrasında agregaların kitlesel yoğunluk ve su emme özelliklerini belirlemişlerdir. Isıl işlem sıcaklığının ve kömür katkısı miktarının üretilen agregaların özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Yapılan diğer bir çalışmada (L. Gündüz, Kalkan, Ş. O. & Özguven, A. , 2020) genişleyen kil olarak değerlendirilebilecek en önemli sahalardan biri olan Ankara-Kalecik kil sahasının detaylı arazi ve laboratuvar çalışmaları ile endüstriye kazandırılması amaçlanmış ve katkısız geliştirme deneyleri sonucunda genişleme oranı 6,3 ve agregası birim hacim ağırlığı 291 kg/m³ olan çok kaliteli bir genişleşmiş kil agregası üretiminin mümkün olduğu iddia edilmiştir.

Genleştirilmiş kil agregası ile farklı çimento dozajlarında taşıyıcı hafif beton üretim olanakları ve betonun mekanik ve fiziksel özelliklerine etkisinin araştırıldığı bir çalışmada, doğal kumun ve geliştirilmiş kil agregasının kullanıldığı beton karışımları tasarlanmıştır. Genleştirilmiş kil agregası ile 1,7 kg/m³ gibi düşük bir yoğunluğa sahip, basınç dayanımı 41,27 MPa olan taşıyıcı hafif beton elde etmenin mümkün olduğu belirlenmiştir. Üretilen hafif beton karışımlarında 450 kg/m³ çimento dozlu betonların en yüksek basınç dayanımı değerlerine sahip olduğu bulunmuştur (Subaşı, 2009). Yapılan bir çalışmada, genişleşmiş kil agregaları ile tasarlanmış geleneksel ve hafif yapı betonları arasındaki dayanım ve elastik özellikleri karşılaştırılmıştır (Dilli, Atahan, & Şengül, 2015). Genleşmiş kil agregası ve silis dumanının hafif betonun özellikleri üzerindeki etkisinin araştırıldığı bir çalışmada, araştırmacılar (Ahmad, Chen, & Farasat Ali Shah, 2019) ısı yalıtımı, ısıl kütle ve yapı malzemesi olarak kullanılacak, kendiliğinden akışlı ve enerji verimli hafif agregalı köpük betonun (LAFC) formülasyonu üzerinde yoğunlaşmışlardır.

Bir yapı malzemesi olarak hafif genişleşmiş kil agregası hakkında yapılan bir çalışmada, geleneksel çimento esaslı

malzemelerde ve ayrıca inorganik polimerlerde (jeopolimerler) yapı malzemelerinin bir parçası olarak kullanılmasına odaklanan daha önce yapılmış çalışmalar hakkında bilgi verilmiştir. Ayrıca, LECA beton ve harcının bazı özelliklerini değiştirmek için eklenen çeşitli malzemeler hakkında bilgi verilmiş ve raporlanmıştır(Rashad, 2018). Piero vd. kendiliğinden şişmeyen killerden hafif beton için genişmiş kil agregası üretimi ile ilgili bir çalışma yapmışlardır(Pioro & Pioro, 2004). Genleşmiş kil agregalı kendiliğinden yerleşen hafif beton üretiminin incelendiği bir çalışmada, hafif agregalı betonun (SCLC) kendi kendine yerleşebilirliği analiz edilmiş ve formülasyonu için izin verilen sınırlar önerilmiştir. SCLC'nin normal titreşimli hafif betona göre daha iyi performans gösterdiği bulunmuştur.(Bogas, Gomes, & Pereira, 2012)

Genleşmiş kilin kullanıldığı diğer bir incelemede, genleşmiş kil granüllerinin birleştirilmiş gözenekli örneklerinin akustik ve akustik olmayan özelliklerinin sistematik bir çalışması sunulmuş ve parçacık boyutunun konsolide genleşmiş killerin akustik performansı üzerindeki etkisi deneysel ve teorik olarak araştırılmıştır(Vašina, Hughes, Horoshenkov, & Lapčík, 2006).

Nkansah vd. PAH'ların (fenantren, floranten ve piren) sudan uzaklaştırılması için bir sorbent olarak hafif genişletilmiş kil agregasının (LECA) kullanımını araştırmışlardır. Araştırmacılar LECA'nın, sulu PAH'ların uzaklaştırılması için alternatif bir yöntem olarak kullanılabilirliğini belirtmişlerdir(Nkansah, Christy, Barth, & Francis, 2012).

Genleştirilmiş killer yapay bir madde olup, doğada genleşmiş halde bulunmazlar. Doğada bulunan her kil genleşmez. Genleşen kil üretmek için kullanılan ham maddeler erken sinterleşen kil, kumlu kil, killi şist, şeyl ve şifertondur(Devocioğlu, 2012). Ayrıca, genleşen kil yapımı sırasında, genleşmeyi arttırmak ve hızlandırmak için, motorin, kok kömürü, alçı, pirit, limonit, kireç gibi maddeler katılmaktadır(L. Gündüz, Şapçı, N., Bekar, M., 2006).

Yapmış olduğumuz mevcut çalışmamızda katkı maddesi olarak organik bir madde kullanılarak üretilen genleşmiş kil bilyelerinin, genleşme oranı ve pişme kaybı için optimum şartları belirlenerek, bu şartlardaki tane yoğunluğu ve su emme oranı da tespit edilmiştir. Tüm bu optimizasyon işlemlerinde Taguchi yöntemi kullanılmıştır. Yapılan literatür incelemesinde, genleşmiş kil üretiminin optimizasyonunda Taguchi yönteminin kullanıldığı bir çalışmaya rastlanmamıştır. Dolayısıyla bu çalışma bu açıdan bir ilk olduğu ve bundan sonra yapılacak optimizasyon çalışmalarına ışık tutacağı kanaatindeyiz.

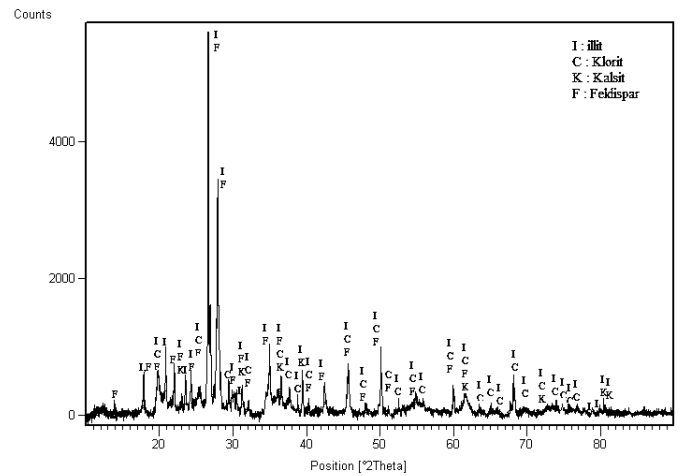
2. Materyal ve Metot

2.1. Materyallerin Hazırlanışı

Bu çalışmada kullanılan kil örnekleri, Söğüt Toprak Madencilik A.Ş. şirketine ait kil ocağından temin edilmiştir. Kullanılan kilin kimyasal analizleri XRF cihazı ile yapılmış olup Tablo 1 de ve XRD grafiği ise şekil 1 de verilmiştir.

Tablo 1. Çalışmada Kullanılan Kil'in Kimyasal Analizi (Table 1. Chemical Analysis of Clay Used in the Study)

Bileşik	Yüzde (%)
Ateşte kayıp: LOI	6,387
NiO	0,043
CuO	0,026
BaO	0,402
Fe ₂ O ₃	5,601
ZrO ₂	0,048
CaO	2,407
ZnO	0,024
SrO	0,015
TiO ₂	1,292
Al ₂ O ₃	16,885
SiO ₂	59,966
MnO	0,128
MgO	1,501
K ₂ O	1,438
Na ₂ O	3,362
P ₂ O ₅	0,343
SO ₃	0,211



Şekil 1. Çalışmada Kullanılan Kil'in XRD Grafiği (Figure 1. XRD Graph of Clay Used in the Study)

Kil numunesi önce etüvde kurutulmuş ve 250 mikron altında olacak şekilde halkalı öğütücüde öğütülmüştür. Ayrıca organik madde olarak kullanılan katkı maddesi de aynı şekilde halkalı öğütücüde 250 mikron altına düşürülmüştür. Kil ve organik madde belli oranlarda %23 rutubet içerecek şekilde karıştırılmış ve 5 ayrı karışım hazırlanmış olup, Tablo 2 de verilmektedir.

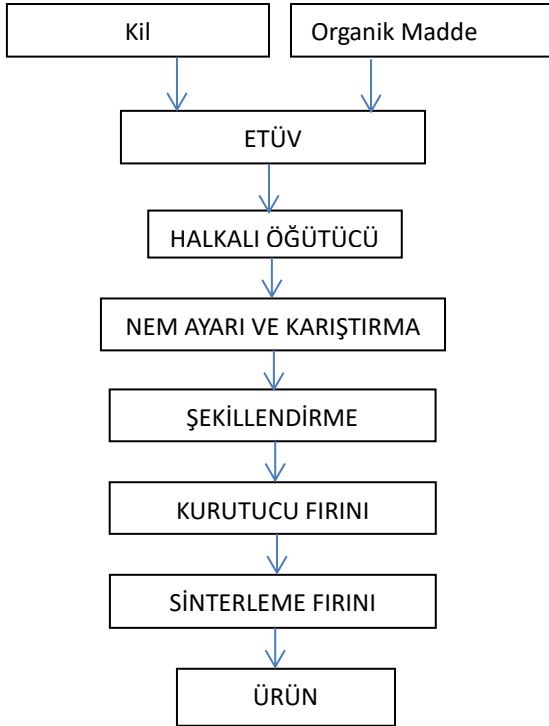
Tablo 2. Kil ve Organik Madde Karışım Oranları (Table 2. Clay and Organic Matter Mixing Ratios)

1.KARIŞIM	%100 Kil + %0 Organik Madde
2.KARIŞIM	%99 Kil + %1 Organik Madde
3.KARIŞIM	%98 Kil + %2 Organik Madde
4.KARIŞIM	%97 Kil + %3 Organik Madde
5.KARIŞIM	%96 Kil + %4 Organik Madde

Daha sonra bu karışımlar kullanılarak 8mm lik peletler oluşturulmuştur. Bu oluşturulan peletler farklı sıcaklık ve sürelerde önce kurutma işlemine tabi tutulmuş, ardından sinterleme işlemi yapılarak hafif genleşmiş kil üretimi tamamlanmıştır.

Genleşmiş kil bilyesi üretim aşamalarını gösteren akım şeması şekil 2 de ve tüm deneylerin sonucunda üretilen killer ise şekil 3 de verilmektedir.

Elde edilen genleşmiş kil numunelerinde tane yoğunluğu, pişme kaybı, genleşme oranı ve su emme oranı analizleri yapılmıştır. Daha sonra elde edilen değerler kullanılarak, optimum parametre seviyeleri Taguchi Metodu ile tespit edilmiştir.



Şekil 2. Genleştirilmiş Kil Bilyesi Üretimi Akım Şeması (Figure 2. Expanded Clay Ball Production Flow Chart)

Numunelerin tane yoğunlukları Arşimet prensibine göre, piknometre kullanılarak ölçülmüş ve aşağıdaki formülden hesaplanmıştır.

$$\rho = \frac{C-A}{[B+(C-A)]-D} \quad (1)$$

Burada; A: piknometrenin boş ağırlığı, B: su dolu piknometrenin ağırlığı, C: Piknometre + numune ağırlığı, D: piknometre + su + numune ağırlığı'dır.

Herbir sıcaklıktaki numuneler için %genleşme miktarı ise aşağıdaki formülden hesaplanmıştır.

$$\% \text{ Genleşme} = \left(\frac{R1/z}{R2/z} \right)^3 \quad (2)$$

Burada R1: Peletlerin fırına girmeden önceki çapı, R2: Peletlerin şişme sonrası çapı'dır.

Pişme Kaybı,

e-ISSN: 2148-2683

$$\% \text{Pişme Kaybı} = \frac{m-m_1}{m} \times 100 \quad (3)$$

formülü ile hesaplanmıştır. Burada; m, fırına konmadan önce ham peletlerin kütlesi ve m₁ fırından çıkartılan genleşmiş kil ölçüldükten sonrakikütlesi'dir.

Su emme oranının (W) hesaplanmasında, önce kuru genleşmiş kil numuneleri tartılmış (M₁), daha sonra genleşmiş kil numunesi 24 saat suya daldırılıp bekletilmiş ve tekrar tartılmıştır(M₂). Su emme oranı (W), 24 saatlik daldırmadan sonra, su emme yüzdesi olarak aşağıdaki formülden hesaplanmıştır.

$$W = \frac{100 \times (M_2 - M_1)}{M_1} \quad (4)$$

2.2. Taguchi Metodu

Endüstriyel süreçlerin optimizasyonunda, iyi planlanmış ve analiz edilmiş ön üretim deneyleri, ürünlerin kalitesini iyileştirmede ve maliyeti en aza indirmede, analizi sağlıklı yapabilmek için önemli katkı sağladığından dolayı istatistiksel deney tasarımları kullanılmaktadır. Zaman alıcı ve maliyetli olan klasik deney tasarımında; bir faktörün etkisi incelenirken, incelenen faktör dışındaki tüm faktörler sabit tutulup, sadece araştırılan faktör değiştirilmektedir. Oysa, istatistiksel deney tasarımında, birçok faktörün aynı anda sistematik olarak değişimi sözkonusudur. Faktörlerin etkileri iyi bir şekilde incelendiğinde, sürecin kontrolü için uygun adımlar atılabilir(Şirvancı, 1997). İstatistiksel deney tasarım yöntemlerinden biri olan Taguchi Yöntemi, en az deney yaparak maliyetleri en düşük seviyede tutma prensibine dayanan bir yöntemdir(Taguchi, 1987). Bu yöntemin diğer istatistiksel deney tasarım yöntemlerinden farkı; bir deneyi etkileyen parametreleri, kontrol edilebilen ve kontrol edilemeyen olmak üzere iki grupta incelemeye imkân sağlamasıdır. Genellikle ürün veya sürecin her birinin performans karakteristiği nominal değer veya hedef değere sahip olmalıdır. Amaç, bu hedef değer etrafındaki değişkenliği azaltmaktır. Deneysel verilerden belirlenecek optimum çalışma şartları, farklı ortamlarda veya farklı zamanlarda, her zaman aynı veya birbirine yakın performans değerini verebilmelidir. Bunun için kullanılacak optimizasyon kriteri, Taguchi'ye göre performans istatistiğidir. Parametrelerin optimum şartlarının bulunmasında aşağıdaki performans istatistiği formülleri kullanılmaktadır(Küçük, 2005).

Daha büyük daha iyi;

$$SN_L = -10 \text{Log} \left(\frac{1}{n} \sum_{n=1}^n \frac{1}{y^2} \right) \quad (5)$$

Daha küçük daha iyi;

$$SN_S = -10 \text{Log} \left(\frac{1}{n} \sum_{n=1}^n y^2 \right) \quad (6)$$

Burada n: deney tekrar sayısı, y: parametrenin deneysel olarak bulunan değeridir(burada y: genleşme oranı veya pişme kaybı vs. dir). Eğer bir araştırmada, hedef maksimum değere ulaşmaksa, SN_L değerini maksimum yapan parametre seviyeleri optimumdur. Eğer amaç minimum değeri yakalamaksa SN_S'yi maksimum yapan parametre seviyeleri optimumdur (Montgomery, 1991). Taguchi yönteminde tespit edilen optimum çalışma şartlarını veren performans değeri,

$$Y_{it} = \mu + X_i + e_i \quad (7)$$

eşitliği yardımı ile tahmin edilir. Burada Y_{it} : i. deneyin tahmin edilen performans değeri, X_i : i. deneyde kullanılan parametre seviyelerinin toplam etkinlik boyutu, μ : ortalama ve e_i : deneysel hatadır.

Eşitlik 73, ilave modelin uygun olup olmadığını belirlemek için deneysel verileri kullanarak hesaplanan bir tahmindir. Bu yüzden tahmini hata için güven sınırları belirlenmelidir (Phadke, 1989). Tahmini hata, gözlenen Y_{it} ile tahmin edilen Y_{it} arasındaki farktır. Tahmini hata için güven aralığı (Se) aşağıdaki eşitlikler yardımı ile bulunur.

$$S_e = \pm 2 \sqrt{\left(\frac{1}{n_0}\right) \sigma_e^2 + \left(\frac{1}{n_r}\right) \sigma_e^2} \quad (8)$$

$$\sigma_e^2 = \frac{\text{Hata kareleri toplamı}}{\text{Hata için serbestlik derecesi}} \quad (9)$$

$$\frac{1}{n_0} = \frac{1}{n} + \left[\frac{1}{n_{A_i}} - \frac{1}{n}\right] + \left[\frac{1}{n_{B_i}} - \frac{1}{n}\right] + \left[\frac{1}{n_{C_i}} - \frac{1}{n}\right] + \dots \quad (10)$$

Burada; Se güven aralığı, n yapılan toplam deney sayısı, n_r teyit deneyinin tekrar sayısı ve n_{A_i} , n_{B_i} , n_{C_i} , ... A, B, C parametrelerinin i. seviyelerinin sayısıdır. Eğer tahmini hata, bu sınırlar dışında ise, bu modelin uygun olmadığı farz edilir (Phadke, 1989).

Doğrulama deneyi, kontrol parametreleri arasındaki etkileşimlerin varlığını tespit etmek için güçlü bir araçtır. Optimum koşullar altında tahmin edilen yanıt, gözlemlenen yanıtla eşleşmiyorsa, etkileşimlerin önemli olduğu anlamına gelir. Öngörülen yanıt, gözlemlenen yanıtla eşleşirse, etkileşimlerin muhtemelen önemli olmadığı ve toplamsal modelin iyi bir yaklaşım olduğu anlamına gelir (Phadke, Kackar, Speeney, & Grieco, 1983).

2.3. Parametrelerin genleşme oranı ve pişme kaybı üzerine etkileri

Bu çalışmada kullanılan parametre sayısı 5 ve her bir parametre için seviye sayısı da 5 olarak alınmış ve L_{25} (5^5) Taguchi faktöriyel fraksiyonel deney tasarımı planı yapılmış olup, parametreler ve seviyeleri Tablo 3 de, deney planı ve araştırma sonuçları tablo 4 de verilmiştir.

Tablo 3. Tasarımın parametre ve seviyeleri (Table 3. Parameters and levels of design)

	Parametreler	Seviyeler				
		1	2	3	4	5
A	Organik Madde (%)	0	1	2	3	4
B	Ön Isıtma Sıcaklığı (°C)	150	200	300	400	500
C	Ön Isıtma Süresi (Dakika)	1	3	5	7	9
D	Sinterleme Sıcaklığı (°C)	1050	1100	1150	1200	1175
E	Sinterleme Süresi (Dakika)	5	7	9	11	13

Tablo 4. Tasarımın deney planı ve sonuçları (Table 4. Experiment plan and results of the design)

Deney No	A	B	C	D	E	Pişme Kaybı (%)	Genleşme Oranı (%)	Tane Yoğunluğu	Su emme oranı
1	1	1	1	1	1	27	0.670	1.532	13.00
2	1	2	2	2	2	27	0.670	1.481	8.390
3	1	3	3	3	3	23	0.670	1.469	7.640
4	1	4	4	4	4	25	1.000	1.576	6.660
5	1	5	5	5	5	27	0.670	1.369	7.190
6	2	1	2	3	4	28	1.424	0.880	6.130
7	2	2	3	4	5	29	1.424	0.713	3.730
8	2	3	4	5	1	29	0.670	1.770	11.00
9	2	4	5	1	2	26	1.000	1.890	12.14
10	2	5	1	2	3	29	1.000	1.693	11.94
11	3	1	3	5	2	30	1.953	0.810	9.830
12	3	2	4	1	3	29	1.953	0.650	13.35
13	3	3	5	2	4	29	0.670	1.620	9.590
14	3	4	1	3	5	30	2.600	0.670	7.350
15	3	5	2	4	1	27	0.670	1.559	5.440
16	4	1	4	2	5	29	2.600	0.700	10.32
17	4	2	5	3	1	30	4.291	0.640	9.400
18	4	3	1	4	2	30	3.375	0.590	3.430
19	4	4	2	5	3	27	1.0000	1.268	15.23
20	4	5	3	1	4	28	1.0000	1.549	13.18
21	5	1	5	4	3	28	4.2910	0.530	2.240
22	5	2	1	5	4	23	2.5996	0.750	8.230
23	5	3	2	1	5	30	1.1289	0.870	12.68
24	5	4	3	2	1	27	0.6699	1.435	12.63
25	5	5	4	3	2	27	0.6699	1.496	6.430

3. Araştırma Sonuçları ve Tartışma

3.1. Üretilen Genleşmiş Killer ve Özellikleri

Çalışmalar sonucunda üretilen genleşmiş kil numuneleri şekil 3 de ve XRF ile yapılan kimyasal analiz sonuçları Tablo 5 de verilmiştir. Burada eser miktarda bulunan elementler analiz edilmemiştir. Ayrıca her bir deneyde elde edilen genleşmiş kilin tane yoğunluğu 530 kg/m^3 ila 1890 kg/m^3 aralığında değişmekte olup, optimum şartlardaki tane yoğunluğu 702 kg/m^3 olarak bulunmuştur.

Tablo 5. Çalışmada Üretilen Genleşmiş Kil'in Kimyasal Analizi (Table 5. Chemical Analysis of Expanded Clay Produced in the Study)

Bileşik	Yüzde (%)
Ateşte kayıp: LOI	0,09
Fe ₂ O ₃	7,19
CaO	3,09
TiO ₂	1,00
Al ₂ O ₃	17,46
SiO ₂	63,60
MgO	2,02
K ₂ O	2,92
Na ₂ O	0,86



Şekil 3. Deneyler sonucunda üretilmiş genleşmiş kil bilyeleri (Figure 3. Expanded clay balls produced as a result of experiments)

3.1. İstatistiksel Hesaplamalar

İstatistiksel hesaplamaların ve analizlerin yapılmasında MINITAB 17 paket programından yararlanılmıştır. Hafif genleşmiş kil üretiminde genleşme oranı ve pişme kaybını maksimum yapan parametre seviyelerinin bulunmasında (5) numaralı eşitlik kullanılmıştır. Genleşme oranı ve pişme kaybını maksimum yapan parametre seviyelerini tespit etmek için Tablo 4 deki değerler kullanılarak (5) nolu eşitlikten SN_L değerleri bulunmuştur. Bu SN_L değerleri yardımıyla parametre seviyeleri için marjinal ortalama performans istatistiği değerleri (SN_{ort}) hesaplanmış ve sonuçlar Şekil 4 ve 5 de grafik olarak verilmiştir. SN_{ort} değerini maksimum yapan parametre seviyelerine ait performans değerini tahmininde (7) nolu eşitlik kullanılmıştır.

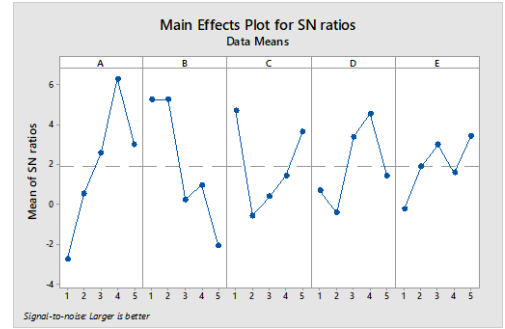
Şekil 4 incelendiğinde SN_{ort} değerini maksimum yapan parametre seviyeleri, A₄, B₁, C₁, D₄ ve E₅ olduğu görülmektedir. Dolayısıyla genleşme oranını maksimum yapan parametre değerleri A₄, B₁, C₁, D₄ ve E₅ olacaktır. Buna göre optimum

şartlar; organik madde miktarı için %3, ön ısıtma sıcaklığı için 150°C , ön ısıtma süresi için 1 dakika, sinterleme sıcaklığı için 1200°C ve sinterleme süresi için 13 dakika olarak bulunmuştur. Optimum şartlar altında tahmin edilen genleşme oranı 4,34 ve deneysel olarak bulunan değerde 4,32'dir.

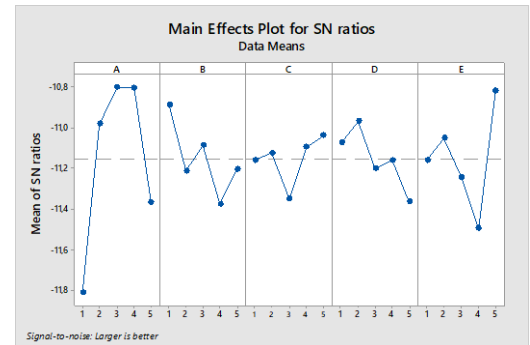
Şekil 5 incelendiğinde SN_{ort} değerini maksimum yapan parametre seviyeleri, A₄, B₁, C₅, D₂ ve E₅ olduğu görülmektedir. Dolayısıyla pişme kaybını maksimum yapan parametre değerleri A₄, B₁, C₅, D₂ ve E₅ olacaktır. Buna göre optimum şartlar; organik madde miktarı için %3, ön ısıtma sıcaklığı için 150°C , ön ısıtma süresi için 9 dakika, sinterleme sıcaklığı için 1100°C ve sinterleme süresi için 13 dakika olarak bulunmuştur. Optimum şartlar altında tahmin edilen pişme kaybı %31,6 ve deneysel olarak bulunan değerde %30,3 olarak tespit edilmiştir. Ayrıca pişme kaybını, genleşme oranının optimum olduğu şartlar (A₄, B₁, C₁, D₄ ve E₅) için değerlendirdiğimizde tahmin edilen pişme kaybı %30,7 ve deneysel olarak bulunan değerde %27,8 olarak bulunmuştur.

Çalışmada kullanılan parametrelerin optimum seviyeleri ve bu seviyelere ait sayısal değerler ve alternatif çalışma şartları Tablo 6'de verilmiştir.

Tablo 6'de verildiği gibi genleşme oranını maksimum yapan parametre değerleri, pişme kaybı için de alternatif bir şart olarak da düşünülebilir. Burada pişme kaybı için 2.durum ile alternatif olan 3.durum hemen hemen aynı güven aralığı içinde kaldığından genleşme oranı için bulunan A₄, B₁, C₁, D₄ ve E₅ optimum şartları pişme kaybı içinde kabul edilerek, her iki performans değeri için optimum şart A₄, B₁, C₁, D₄ ve E₅ olarak alınabilir. Bu optimum şartlarda üretilen genleşmiş kil bilyelerinin tane yoğunluğu ve su emme yüzdeleri de araştırılmış olup, tane yoğunluğu 702 kg/m^3 su emme yüzdesi 6,45 olarak bulunmuştur.



Şekil 4. Genleşme Oranı için parametre seviyelerine göre SN_{ort} değerleri (Figure 4. SN_{ort} values according to parameter levels for Expansion Rate)



Şekil 5. Pişme kaybı için parametre seviyelerine göre SN_{ort} değerleri (Figure 5. SN_{ort} values according to parameter levels for Cooking loss)

Tablo 6. Deneylerde optimum çalışma şartları, gözlemlenen ve tahmin edilen genleşme oranı ve pişme kaybı (Table 6. Optimum working conditions, observed and predicted expansion rate and cooking loss in the experiments)

Parametreler	Genleşme Oranı İçin		Pişme Kaybı İçin			
	1.Durum*		2.Durum**		3. Durum***	
	Değer	Seviye	Değer	Seviye		
A: Organik Madde (%)	3	4	2	3	3	4
B: Ön Isıtma Sıcaklığı (°C)	150	1	150	1	150	1
C: Ön Isıtma Süresi (Dakika)	1	1	9	5	1	1
D: Sinterleme Sıcaklığı (°C)	1200	4	1100	2	1200	4
E: Sinterleme Süresi (Dakika)	13	5	13	5	13	5
Gözlemlenen değer (%)	4,32		%30,30		%27,80	
Tahmin edilen değer (%)	4,34		%31,63		%30,70	
Güven aralığı (%), Se	3,22-5,46		28,45-34,81		27,52-33,88	

*Genleşme oranı için SN_L değerlerine göre optimum şartlar

** Pişme Kaybı için SN_L değerlerine göre seçilen optimum şartlar

*** Pişme Kaybı için Alternatif bir çalışma şartı

Tablo 7. Optimizasyon deneyi için varyans analizi (Genleşme Oranı için) – (Table 7. Analysis of variance for optimization experiment (for Expansion Ratio))

Parametreler	Serbestlik Derecesi SD _i	Kareler Toplamı SS _i	Kareler Ortalaması MS _i	F _{Deneyisel}	Etkinlik (%)
A Organik Madde (%)	4	17,8160	4,45399	20,20	32,41
B Ön Isıtma Sıcaklığı (°C)	4	15,2114	3,80286	17,25	27,68
C Ön Isıtma Süresi (Dakika)	4	11,7257	2,93141	13,30	21,34
D Sinterleme Sıcaklığı (°C)	4	8,7973	2,19933	9,98	16,01
E Sinterleme Süresi (Dakika)	4	1,4143	0,35356	1,60	2,57
Hata	29	6,3938	0,22048	-	-
Toplam	49	61,3585	-	62,33	-

$$F_{\text{Tablo}(4.29)_{0,95}}=2,70, F_{\text{Tablo}(4.29)_{0,99}}=4,05$$

Tablo 8. Optimizasyon deneyi için varyans analizi (Pişme Kaybı için) – (Table 8. Analysis of variance for optimization experiment (for Cooking Loss))

Parametreler	Serbestlik Derecesi SD _i	Kareler Toplamı SS _i	Kareler Ortalaması MS _i	F _{Deneyisel}	Etkinlik (%)
A Organik Madde (%)	4	72,992	18,2479	10,25	59,56
B Ön Isıtma Sıcaklığı (°C)	4	13,233	3,3083	1,86	10,81
C Ön Isıtma Süresi (Dakika)	4	4,878	1,2194	0,68	3,95
D Sinterleme Sıcaklığı (°C)	4	7,809	1,9523	1,10	6,39
E Sinterleme Süresi (Dakika)	4	23,618	5,9044	3,32	19,29
Hata	29	51,639	1,7807		
Toplam	49	174,168			

$$F_{\text{Tablo}(4.29)_{0,95}}=2,70, F_{\text{Tablo}(4.29)_{0,99}}=4,05$$

Parametrelerin etkin olup olmadıkları, deneysel olarak bulunan $F_{\text{Deneyisel}}$ değeri ile F_{Tablo} değerlerinin karşılaştırılmasıyla tespit edilmiştir. Eğer $F_{\text{Deneyisel}} > F_{\text{Tablo}}$ ise, ilgili parametre performans değeri üzerinde etkindir. Eğer $F_{\text{Deneyisel}} < F_{\text{Tablo}}$ ise parametre performans değeri üzerinde etkin değildir. Tasarım deneyleri için yapılan varyans analizleri genleşme oranı için Tablo 7’de, pişme kaybı için ise Tablo 8’de verilmektedir.

Tablo 7 incelendiğinde sinterleme süresi dışındaki tüm parametrelerin $F_{\text{Deneyisel}}$ değerlerinin F_{Tablo} değerlerinden büyük olduğu görülmektedir. Bu da optimizasyondaki seçilen sinterleme süresi dışındaki tüm parametrelerin, performans değeri üzerinde oldukça etkili olduğu anlamına gelmektedir. Her bir parametrenin etkinliği $F/\Sigma F$ denkleminden yaklaşık olarak belirlenmiştir. (Levent, Kaya, Kocakerim, Yiğit, &

Küçük, 2007). Burada en etkin parametrenin organik madde miktarının olduğu açıkça görülmektedir.

4. Sonuç

Mevcut çalışmadan çıkan başlıca sonuçlar şunlardır:

Hafif Genleşmiş kil üretiminde genleşme oranı üzerinde etkili olan parametreler etkinlik düzeyine göre sırasıyla organik madde, ön ısıtma sıcaklığı, ön ısıtma süresi, sinterleme sıcaklığıdır. Sinterleme süresinin etkin olmadığı söylenebilir.

Hafif Genleşmiş kil üretiminde pişme kaybı üzerinde etkili olan parametreler ise etkinlik düzeyine göre sırasıyla organik madde, sinterleme süresi, ön ısıtma sıcaklığı, sinterleme sıcaklığı ve ön ısıtma süresidir. Ön ısıtma süresi %99 güven seviyesinde etkin olmayıp, %95 güven seviyesinde ise çok az etkilidir.

Seçilen parametre değerleri dahilinde optimum koşullar, organik madde miktarı için %3, ön ısıtma sıcaklığı için 150°C, ön ısıtma süresi için 1 dakika, sinterleme sıcaklığı için 1200°C ve sinterleme süresi için 13 dakikadır. Bu koşullar altında genleşme oranı 4,32, pişme kaybı %27,80, tane yoğunluğu 702 kg/m³, su emme yüzdesi 6,45 olarak bulunmuştur (Tablo 6).

Öngörülen ve gözlenen değerler birbirine çok yakındır ve toplamsal modelin üretim sürecinin çeşitli parametrelere bağımlılığını açıklamak için yeterli olduğu sonucuna varılabilir.

Laboratuvar ortamında Taguchi yöntemi ile belirlenen optimum koşullar gerçek üretim ortamlarında da tekrarlanabilir olduğundan; bu çalışmanın bulguları endüstriyel ölçekte işleme için çok faydalı olabilir.

5. Teşekkür

Bu çalışmanın yapılmasında malzeme temini sağladığı ve laboratuvar imkânlarını sunduğu için Söğüt Toprak Madencilik şirketine teşekkür ederiz.

Kaynakça

- Ahmad, M. R., Chen, B., & Farasat Ali Shah, S. (2019). Investigate the influence of expanded clay aggregate and silica fume on the properties of lightweight concrete. *Construction and Building Materials*, 220, 253-266. doi:https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.05.171
- Ariöz, Karasu, B., Kılınç, K., Kaya, G., Arslan, G., Tuncan, M., Tuncan, A. & Kıvrak, S. (2007). Production of Expanded Clay Aggregate by The Use of Coal. Paper presented at the The IV. Ceramic, Glass, Enamel, Glaze and Pigment Seminar with International Participation (SERES 2007), 1054-1062, Eskisehir, Turkey.
- Bogas, J. A., Gomes, A., & Pereira, M. F. C. (2012). Self-compacting lightweight concrete produced with expanded clay aggregate. *Construction and Building Materials*, 35, 1013-1022. doi:https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.111
- Devocioğlu, A. G. (2012). Kitre Katkılı Genleştirilmiş Kil Agregalı Betonların Isıl Ve Mekanik Özelliklerinin Analizi. (Doktora Tezi), Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, Türkiye.
- Dilli, M. E., Atahan, H. N., & Şengül, C. (2015). A comparison of strength and elastic properties between conventional and

lightweight structural concretes designed with expanded clay aggregates. *Construction and Building Materials*, 101, 260-267.

doi:https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.080

- Gündüz, L., Kalkan, Ş. O. & Özgüven, A. . (2020). Genleşmiş Kil Agregaların Teknik Özelliklerinin Karşılaştırılması Üzerine Bir Çalışma Ankara Kalecik Bölgesi Örneği. *Hazır Beton*, 157, 65-72.
- Gündüz, L., Şapçı, N., Bekar, M. (2006). Utilization of expanded clay as lightweight aggregate. *Journal of Clay Science and Technology*, 1(2), 43-49.
- Güneş, O. (2019). Genleştirilmiş Kil Agregası İle Taşıyıcı Hafif Beton Üretimi. (Yüksek Lisans Tezi), Dumlupınar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Kütahya.
- Küçük, Ö., Kocakerim, M.M., Çopur, M. & Yartaşı, A. (2005). Optimization Of Dissolution Of Ulexite In (NH₄)₂SO₄ Solutions. *Canadian Metallurgical Quarterly*, 44(1), 53-58. doi:https://doi.org/10.1179/cmq.2005.44.1.53
- LECAT. (2021). Söğüt Toprak Madencilik A.Ş. Retrieved from https://lecat.com.tr/lecat-nedir
- Levent, M., Kaya, Ö., Kocakerim, M., Yiğit, V., & Küçük, Ö. (2007). Optimization of desulphurization of Artvin–Yusufeli lignite with acidic hydrogen peroxide solutions. *Fuel*, 86(7), 983-992. doi:https://doi.org/10.1016/j.fuel.2006.10.010
- Montgomery, D. C. (1991). *Design and Analysis of Experiments*, . ABD: John Wiley & Sons Inc.
- Nkansah, M. A., Christy, A. A., Barth, T., & Francis, G. W. (2012). The use of lightweight expanded clay aggregate (LECA) as sorbent for PAHs removal from water. *Journal of Hazardous Materials*, 217-218, 360-365. doi:https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2012.03.038
- Onatskiy, S. P. (1987). *Expanded Clay Production: 3rd ed., rev. and add*, M., Stroyizdat Publ., 1987, p. 333 (in Russian).
- Ozguven, A., & Gunduz, L. (2012). Examination of effective parameters for the production of expanded clay aggregate. *Cement and Concrete Composites*, 34(6), 781-787. doi:https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.02.007
- Özgüven, A. (2009). Genleşen Kil Agregası Üretimi Ve Endüstriyel Olarak Değerlendirilmesi. (Doktora), Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Maden Mühendisliği. (237301)
- Phadke, M. S. (1989). *Quality engineering using robust design*, . Prentice Hall, New Jersey, 61-292.
- Phadke, M. S., Kackar, R. N., Speeney, D. V., & Grieco, M. J. (1983). Off-line quality control in integrated circuit fabrication using experimental design. *The Bell System Technical Journal*, 62(5), 1273-1309. doi:10.1002/j.1538-7305.1983.tb02298.x
- Pioro, L. S., & Pioro, I. L. (2004). Production of expanded-clay aggregate for lightweight concrete from non-selfbloating clays. *Cement and Concrete Composites*, 26(6), 639-643. doi:https://doi.org/10.1016/S0958-9465(03)00103-3
- Rashad, A. M. (2018). Lightweight expanded clay aggregate as a building material – An overview. *Construction and Building Materials*, 170, 757-775. doi:https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.009
- Subaşı, S. (2009). Production of structural lightweight concrete with expanded clay aggregate. *J. Fac. Eng. Arch. Gazi Univ*, 24(3), 559-567.
- Şirvancı, M. (1997). *Kalite için deney tasarımı “Taguchi Yaklaşımı”*. İstanbul: Literatür Yayıncılık.

- Taguchi, G. (1987). *System of Experimental Design, Quality Resources: (Vol. 1)*. New York.
- Vašina, M., Hughes, D. C., Horoshenkov, K. V., & Lapčík, L. (2006). The acoustical properties of consolidated expanded clay granulates. *Applied Acoustics*, 67(8), 787-796. doi:<https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2005.08.003>