



Çeşitli Parametrelerin Betonun Mekanik Özelliklerine Etkisinin Taguchi Yöntemi Kullanılarak Araştırılması

Investigation of the Effect of Various Parameters on the Mechanical Properties of Concrete Using the Taguchi Method

Kemal Uray¹, Hicran Açıklı¹, Mustafa Koçer², Esra Uray³

¹Necmettin Erbakan Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Konya, TÜRKİYE

²Konya Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Konya, TÜRKİYE

³KTO Karatay Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Konya, TÜRKİYE

Başvuru/Received: 24/08/2023

Kabul / Accepted: 30/12/2023

Çevrimiçi Basım / Published Online: 31/01/2024

Son Versiyon/Final Version: 31/01/2024

Öz

Bu çalışma kapsamında, beton karışımlarının optimizasyonu için çeşitli parametrelerin etkisi incelenmiş ve bu amaçla istatistiksel temelli Taguchi yöntemi kullanılmıştır. Araştırma, sürdürülebilir, ekonomik ve üretim süresi açısından verimli bir beton tasarımının oluşturulmasını hedeflemiştir. Silis dumanı (SD), yüksek fırın cürufu (YFC), su/bağlayıcı oranı (S/B), çimento dozajı ve kalsiyum nitrit (CN) gibi parametrelerin farklı seviyelerinin yer aldığı toplam 17 farklı karışım hazırlanmıştır. Bu karışımlar üzerinden basınç dayanımı ve eğilme dayanımı özelliklerini belirlemek amacıyla her seriden 3 tekrarlı örnekler üretilmiştir. Üretilen numuneler, 7, 28 ve 56 günlük standart kür sürelerinin ardından eğilme ve basınç dayanımı testlerine tabi tutulmuştur. Elde edilen deney sonuçları, Taguchi yöntemi çerçevesinde istatistiksel analizlere tabi tutulmuş ve parametrelerin optimum seviyeleri belirlenmiştir. Bu belirlenen optimum parametre seviyelerinde karışımlar üretilerek doğrulama deneyleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneylerin sonuçları, çimento tüketimini minimize eden, atık ve kimyasal malzemeleri kullanarak betonun sürdürülebilirlik performansını artıran ve aynı zamanda ekonomik açıdan hızlı bir değerlendirilmenin mümkün olduğunu göstermiştir.

Anahtar Kelimeler

“Beton Tasarımı, Basınç Dayanımı, Eğilme Dayanımı, Mineral Katkı, Taguchi Yöntemi”

Abstract

In this study, the optimization of various parameters used in concrete mixtures has been investigated using the statistical-based Taguchi method. The research aims to design sustainable, cost-effective, and time-efficient concrete. Parameters such as Silica Fume (SF), Ground Granulated Blast Furnace Slag (GGBFS), water/binder ratio (W/B), cement dosage, and Calcium Nitrite (CN) were varied across 17 different mixtures. To assess properties like compressive and flexural strength, samples were prepared with 3 replicates for each series. Following curing periods of 7, 28, and 56 days, bending and compressive strength tests were conducted on the produced specimens. The obtained results were subjected to statistical analysis within the framework of the Taguchi method to determine the optimal parameter levels. Verification experiments were carried out by producing mixtures at these identified optimal parameter levels. The experimental outcomes revealed the possibility of achieving concrete mixes that minimize cement consumption, enhance sustainability performance through the utilization of waste and chemical materials, and allow for a rapid economic assessment.

Keywords

“Concrete Design, Compressive Strength, Flexural strength, Mineral Additive, Taguchi Method”

1. Giriş

Beton inşaat sektöründe kullanılan en temel yapı malzemesidir. Son yıllarda teknolojinin, laboratuvar imkânlarının gelişmesi ve bilimsel araştırmaların sayısındaki artışa bağlı olarak geleneksel betonun yerine çeşitli mineral ve kimyasal katkıları kullanarak ihtiyaçlara göre istenilen özellikte beton üretimi yapılabilmektedir. Durabilite, yüksek dayanım, çevresel ve ekonomik sürdürülebilirlik amacıyla üretilen bu yeni nesil betonlarda birçok mineral katkı kullanılmaktadır. Yaygın olarak kullanılan bu yapay mineral katkılar arasında en önemlileri; yüksek fırın cürufu (YFC), silis dumanı (SD) ve uçucu kül (UK) olarak gösterilebilir. Bu malzemeler, çeşitli endüstriyel üretimler sonucunda açığa çıkan atık ürünlerdir. Küresel ısınmayla her zamankinden daha çok mücadele ettiğimiz günümüz dünyasında çimento üretiminden kaynaklı atmosfere salınan sera gazlarını azaltmak, çevresel sürdürülebilirlik açısından çok önemlidir.

Beton; içerisinde birçok parametreyi barındıran, karmaşık kimyasal reaksiyonların olduğu bir yapı malzemesidir. Beton tasarımı, içerisinde birçok girdi parametresini barındırdığından, bu parametrelerin etkisini değerlendirmek çok sayıda deney gerektiren oldukça zahmetli bir iştir. Buna göre istatistiksel deneysel tasarıma imkân veren ve kalite iyileştirilmesine yönelik olarak Genichi Taguchi (1986) tarafından geliştirilen istatistiksel tabanlı yöntem, deney tasarımlarında büyük kolaylıklar sağlamaktadır. Bu kapsamda; Taguchi metodu kullanarak içerisinde silis dumanı ve uçucu kül bulunan yüksek dayanımlı betonlarda çeşitli parametreleri göz önünde bulundurularak parametre optimizasyonu yapılmıştır. Warda vd. tarafından yapılan çalışmada; uçucu külün betonun işlenebilirlik özelliklerine olumlu katkı sağladığı ancak basınç dayanımı ve çekme dayanımı için uçucu kül ikamesinin dayanımı olumsuz etkilediği bulunmuştur. Silis dumanı ikamesi ise betonun mekanik özelliklerini olumlu yönde etkilemiştir (Warda vd., 2020). Barit, yüksek fırın cürufu, kolemanit ve bazaltik pomza mineral katkılarının parametre olarak kullanıldığı çalışmada; Taguchi yöntemi kullanarak parametre optimizasyonu yapılmıştır. Buna göre; barit erken yaş basınç dayanımında en etkili parametre olurken, barit ikamesi dayanımı olumsuz etkilemiştir. İlerleyen yaşlarda ise yüksek fırın cürufu puzolonik özelliğinden dolayı en etkili parametre olmuştur. Yüksek fırın cürufu ve kolemanit mikroyapı gelişimine sağladığı katkıdan dolayı kapiler su emme oranında en etkili parametre olmuştur (Sevinç vd., 2017). Taguchi yönteminin kullanıldığı diğer bir çalışmada, silis dumanı ve uçucu külün erken yaş eğilme dayanımına etkisi istatistik tabanlı deney tasarımı kullanarak araştırılmıştır. Silis dumanı ikamesi, erken yaş eğilme dayanımında en etkili parametre olurken, yer değişim oranının artışı dayanımı olumsuz etkilemiştir. Uçucu külün %5 seviyesinde yer değişim oranı ise optimum seviye olarak belirlenmiştir (Hınıslioğlu ve Bayrak, 2004). Uysal ve arkadaşlarının yapmış oldukları çalışmada çevreci ve durabilite açısından iyi performans gösteren bir betonda uçucu kül kullanımının etkileri Taguchi yöntemi kullanılarak araştırılmıştır. Betonda klorid iyon geçirimsizliği ve su emme, uçucu kül yer değişim oranı artışı ile azalmıştır. Uçucu kül yer değişimi ultrases geçiş hızı ve donma çözünme direncinde önemli bir değişikliğe sebep olmamıştır (Uysal vd., 2019). Karthik ve Mohan tarafından yapılan araştırmada; uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve silis dumanı kullanılarak Taguchi yaklaşımıyla geopolimer betonun optimum dizayn karakteristikleri araştırılmıştır. Buna göre; basınç dayanımını maksimum yapan optimum karışım içeriği % 45 uçucu kül, %45 yüksek fırın cürufu, % 10 silis dumanı, %1.5 süper akışkanlaştırıcı dozajı ve $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ oranı 1.5 olarak bulunmuştur (Karthik ve Mohan, 2021). De side vd. tarafından beton tasarımında optimum mühendislik özelliklerini elde etmek için çimento yerine kullanılacak optimum silis dumanı içeriğini Taguchi yaklaşımı kullanılarak araştırılmıştır. Betonda silis dumanı ikamesi betonun pH değerini artırırken, optimum seviyelerde kullanılan silis, su emme yüzdesini önemli ölçüde azaltmıştır (De Side vd., 2020). Bilim ve Atiş, farklı kür tipleri için ögütülmüş yüksek fırın cürufu içeren harçların aşınma direnci ve mukavemet özelliklerini araştırmıştır. Kür şartları (%65 bağıl nem ve suya batık) yüksek fırın cürufu içeren numuneleri kontrol numunesinden daha fazla etkilemiştir. Islak kür edilen numuneler kuru kürlenen numunelerden daha yüksek dayanım ve aşınma direnci göstermiştir (Bilim & Atiş, 2011). Boran vd., tarafından mineral katkılardan olan yüksek fırın cürufu ikame edilmiş harçların durabilite ve dayanım açısından performansı araştırılmıştır. Buna göre tüm seriler içinde elektriksel direnç, donma çözünme direnci ve basınç dayanımı açısından en iyi performans %30 yüksek fırın cürufu içeren karışımlardan elde edilmiştir (Boran vd., 2020). Ramezianpour ve Malhotra tarafından yapılan çalışmada, yüksek fırın cürufu, silis dumanı ve uçucu kül içeren betonların farklı kür koşullarında boşluk yapısı, basınç dayanımı ve klorid iyonu penetrasyon özelliklerini araştırılmıştır. Islak kür süresinin azalması betonda dayanım ve dayanıklılık özelliklerini olumsuz etkilemiştir. Betonda yüksek fırın cürufu ve uçucu kül bulunması kür şartları için betonu daha hassas hale getirmiştir. Betonda silis dumanı, yüksek fırın cürufu ve yüksek oranda uçucu kül kullanımı betonun geçirimsizliğini azaltıp klorid penetrasyon direncini yüksek oranda artırmıştır (Ramezianpour ve Malhotra, 1995). Atiş vd., ıslak (%100 bağıl nem) ve kuru (%65 bağıl nem) kür koşullarının silis dumanı içeren betonun basınç dayanımına etkisini araştırmıştır. Araştırma sonuçlarına göre silis dumanı içeren numuneler, basınç dayanımı açısından %65 bağıl nem koşullarından referans betona göre daha çok etkilenmiştir. %65 bağıl nemde kürlenen silis dumanlı numunelerden, %100 bağıl nemde kürlenen numunelere göre %13 daha az basınç dayanımı elde edilmiştir. (Atiş vd., 2005). Mohamed ve Najm tarafından yapılan çalışmada, kendiliğinden yerleşen betonun, taze ve sertleşmiş beton özelliklerine, farklı oranlarda silis dumanı, yüksek fırın cürufu ve uçucu kül ikamesinin etkisi araştırılmıştır. Silis dumanının tüm yer değiştirme oranlarında (%5-10-15-20) basınç dayanımında artışlar gözlenmiştir. Ancak en yüksek artış değeri silis dumanının %15 olduğu seviyede gerçekleşmiştir (Mohamed ve Najm, 2017). Türk vd., kendiliğinden yerleşen betonlarda silis dumanı ve uçucu kül ikamesinin betonun basınç dayanımı, su emme oranı ve karbonatlaşma derinliğine olan etkisini araştırmıştır. Oluşturulan numuneler içerisinde en yüksek basınç dayanımı 130 günlük kür süresinde silis dumanının %15 oranında ikame değerinde elde edilmiştir. Silis dumanı ve uçucu kül içeren betonların geçirimsizlik değerleri referans betona göre önemli ölçüde azalmıştır (Türk vd., 2013). Kate vd. tarafından yapılan çalışmada, sürdürülebilir yüksek dayanımlı betonların, yüksek oranda uçucu kül kullanarak, çelik fiberli ve fibersiz olarak Taguchi yöntemiyle betonun mekanik özelliklerini belirleyip içerik optimizasyonu yapılmıştır. Çimento yerine %30 uçucu kül kullanımı basınç dayanımı, eğilmede çekme ve yarmada çekme dayanımı için en optimum seviye olarak bulunmuştur (Kate vd., 2021). Ghanei vd., betonarmede korozyon davranışı açısından beton hava içeriğinin ve silis dumanının optimum miktarını Taguchi yöntemi kullanarak belirlemiştir. Silis dumanının %10 oranında kullanımı korozyon potansiyelinin azaltılmasında çok etkili bir seviye olarak tespit edilmiştir. Ayrıca sürüklenmiş hava

miktardaki %3.6'ya kadar olan artış korozyon potansiyeli için olumlu etki göstermiştir (Ghanei vd., 2018). Sabarish ve Paul tarafından yapılan çalışmada, Taguchi L9 ortogonal dizi ile beton üretiminde kullandıkları uçucu kül ve diğer parametrelerin optimizasyonu yapılmıştır. Çalışmada basınç dayanımı için uçucu külün optimum seviyesi %20 olarak bulunmuştur (Sabarish ve Paul, 2020). Diğer bir çalışmada, alkali ile aktifleştirilen hibrit granüle yüksek fırın cürufu (GBFS)-çimentolu betonun karakterizasyonu Taguchi metodu kullanılarak araştırılmıştır. Her parametrenin optimum seviyesi S/N oranları kullanılarak varyans analizi ile bulunmuştur. Basınç dayanımı için optimum GBFS/çimento oranı 0.8, Na₂O %10, molar alkali modülü 1.0 ve su/bağlayıcı oranı 0.45 olarak belirlenmiştir (Amer vd., 2021). Granüle yüksek fırın cürufu ve uçucu kül katkılı geopolimer betonların, basınç dayanımı ve çekme dayanımları Taguchi yaklaşımı ile regresyon analizi kullanılarak tahmin edilmiştir. Basınç dayanımında en etkili parametreler yüksek fırın cürufu ve kür sıcaklığı olarak belirlenmiştir. Uçucu kül ve yüksek fırın cürufu kullanılarak üretilen geopolimer betonlarda tüm yaşlar için kür sıcaklığının önemli bir parametre olduğu vurgulanmıştır (Lee & Shin, 2019). Bhogayata vd. tarafından yapılan çalışmada, Taguchi metodu kullanılarak aktif alkali kompozit betonun, taze beton ve dayanım özellikleri açısından karışım tasarımı optimizasyonu yapılmıştır. Uçucu kül miktarının en fazla olduğu bağlayıcı içeriğinde işlenebilirlik en yüksek değeri almıştır. Geopolimer betonun basınç dayanımında en etkili parametreler sırası ile molar içerik ve bağlayıcı içeriği olarak belirlenmiştir (Bhogayata vd.,2021) Mazloom vd. tarafından yapılan çalışmada, yüksek dayanımlı betonların mekanik özelliklerine silis dumanı ikamesinin etkisi araştırılmıştır. Silis dumanı yer değiştirme oranı arttıkça 90 güne kadar olan kür sürelerinde basınç dayanımı açısından referans betondan daha yüksek performanslar elde edilmiştir. Ancak 90 günden sonraki kür sürelerinde silis dumanı ikameli betonların basınç dayanımları referans betonla benzer değerler almıştır. (Mazloom vd., 2004) . Sarıdemir tarafından yapılan çalışmada, yüksek dayanımlı betonun elastisite modülü ve basınç dayanımına silis dumanı ve öğütülmüş pomza kullanımının etkisi araştırılmıştır Buna göre tek başına silis dumanının % 15 oranında ikame edilmesi elastisite modülü ve basınç dayanımı için en yüksek sonuçları verirken, silis dumanı pomza ile birlikte kullanıldığında pomza ikame oranı için en uygun değer %5 olarak bulunmuştur (Sarıdemir, 2013).

Bu çalışma kapsamında, Taguchi yöntemi adı altında istatistik tabanlı bir yaklaşım kullanılarak, çeşitli faktörlerin betonun mekanik özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Çalışmada, silis dumanı (SD) ve yüksek fırın cürufu (YFC) gibi iki farklı mineral katkı malzemesi ile su/bağlayıcı oranı, çimento dozajı ve kalsiyum nitrit gibi faktörler çalışmada değerlendirilen parametreler arasında yer almıştır. Buna göre seçilen parametre seviyelerine uygun, L16 ortogonal dizi kullanılarak basınç ve eğilme dayanımı hedef performans deneyleri, farklı kür sürelerinde yapılmıştır. Parametrelerin basınç dayanımı ve eğilme dayanımına etkileri ve optimum parametre seviyeleri farklı kür süreleri için bulunmuştur. Diğer yandan optimum parametre seviyelerinde doğrulama deneyleri yapılarak yöntem tarafından optimum seviyelerde bulunması gereken hedef değerlerin sonuçları ile doğrulama deneyi sonucunda bulunan değerlerin kıyaslaması yapılmış ve rölatif hatalar tespit edilmiştir.

2. Taguchi Metodu

Yöntem, Japon bilim adamı Genichi Taguchi (1986) tarafından geliştirilmiş istatistik tabanlı bir yöntemdir. Yöntem sayesinde geleneksel deney tasarımının sebep olduğu deney yükü azaltılırken, kabul edilebilir bir doğrulukta güvenilir sonuçlar elde edilebilmektedir. Çoğu araştırmacının makine sanayi, gıda, tarım, üretim planlaması ve mühendislik gibi birçok alanda kullandığı Taguchi metodu, birçok parametre ve parametre seviyesinin bulunduğu karmaşık karışım tasarımlarında optimum değeri ve parametrelerin hedef değer üzerine etkisini veren bir yöntemdir (Taguchi vd., 2004; Peace, 1995). Az sayıda deney yapılarak birçok parametrenin etkisi ve parametrelerin etkileşimi belirlenebilmektedir (Roy, 2010). Metot sayesinde zamandan, araştırma maliyetinden ve enerjiden kazançlar sağlanmaktadır. Sonucu etkileyen parametrelerin farklı değerleri ile tüm kombinasyonlarının dikkate alındığı tam faktöriyel deney tasarımı, özellikle çok değişkenli deneysel çalışmalarda iş yükünü artıran bir yöntemdir. Bu sebeple farklı a tane seviyeden oluşan k tane parametre için a^k sayıda deney yapmak gerekmektedir. Deneysel iş yükünü azaltmak için araştırmacılar bazı kesirli faktöriyel yöntemleri kullanmıştır (Chong vd., 2021). Bu yöntemlerden birisi de Taguchi yöntemidir. Latin kareler serisini temel alıp bazı ortogonal diziler kullanılarak deney sayısını azaltmayı hedeflemektedir. Yapılacak çalışma için göz önünde bulundurulacak parametre ve seviyeler belirlendikten sonra, duruma uygun ortogonal dizi seçimi yapıp, deney tasarım tabloları elde edilmektedir. Ortogonal dizilerin kullanımındaki temel ilkede karmaşıklıklar söz konusu olsa da, yöntemin kullanımına dair temel bir anlayışa sahip araştırmacıların parametre ve seviyelerine bağlı olarak önceden hazırlanmış ortogonal dizi tablolarını kullanmaları yeterli olmaktadır (Ross, 1988). Buna göre parametre ve seviyelere göre Taguchi tarafından önerilen çeşitli ortogonal diziler Tablo 1'de verilmiştir (Cimbala, 2014; Uray vd., 2022). Tam faktöriyel ve Taguchi yöntemi kullanılarak yapılan deney tasarımlarında kombinasyon sayıları Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 1. Çeşitli Parametre ve Seviyeler İçin Kullanılan Ortogonal Dizi Seçim Tablosu

Ld	L4	L4	L8	L8	L9	L9	L9	L18	L16	L16	L16	L16	L25	L25	L25
d	4	4	8	8	9	9	9	18	16	16	16	16	25	25	25
k	2	2	4	5	2	3	4	5	2	3	4	5	2	3	4
a	2	3	2	2	3	3	3	3	4	4	4	4	5	5	5

Tablo 2. Literatürde Yaygın Olarak Kullanılan Taguchi Ortogonal Diziler

Ortogonal Dizi	Parametre/Seviye	Tam Faktöriyel Kombinasyon Sayısı	Taguchi Kombinasyon Sayısı
L4	3/2	8	4
L16	5/4	1024	16
L9	4/3	81	9
L25	5/4	625	25
L8	2/7	128	8

Metodun uygulanmasında performans kriteri olarak Sinyal/Gürültü (S/N) oranları kullanılmaktadır. Burada sinyal faktörü olarak tanımlanan S, sistemin kalite değerini ifade ederken, N değeri ise sistemin sonucuna olumsuz etki eden ve deney tasarımına katılmayan faktörleri ifade eden gürültüye karşılık gelmektedir (Serencam & Uçurum, 2019). Deneylerde istenilen hedef durum için performans karakteristiklerinin bir ifadesi olan S/N oranı değerleri; en küçük-en iyi, hedef değer-en iyi veya en büyük-en iyi durumlarına göre belirlenmekte olup sırasıyla Denklem 1, Denklem 2 ve Denklem 3 ile verilmiştir (Box, 1988; Warda vd., 2020). Örneğin uygulanan deneyler basınç dayanımı için ise S/N oranı en büyük-en iyi olarak seçilmekte, beton kütle kaybı ya da geçirimsizlik katsayısı için ise S/N oranı en küçük-en iyi olarak seçilmektedir. Deneyler bir hedefe yönelik uygulanıyorsa bu sefer hedefe en yakın S/N oranı için hedef değer-en iyi durumu seçilmektedir (Hinislioğlu & Bayrak, 2004). Taguchi yönteminde parametre etkilerini daha net belirlemek için deney tekrarı mümkün olduğunca fazla olmalıdır. Ancak; literatürde yaygın olarak kullanılan tekrar sayısı 3 olarak göze çarpmaktadır. Yapılan performans deneylerinde bu 3 deney tekrarının ortalaması alınarak, Taguchi analizleri yapılmaktadır.

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

$$S/N = 10 \log_{10} \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - Y_o)^2 \right) \quad (2)$$

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

Denklemlerde, S/N oranı istatistiksel performansı, n deney tekrarı sayısını, Y_i , i. deneyin performans değerini ve Y_o istenilen hedef değeri göstermektedir. Denklem 3 ile deney sonuçları kullanılarak S/N oranları belirlenir. Bu değerler kullanılarak her bir parametre ve seviye için ortalama S/N değeri (η_{ij}) Denklem 4 ile hesaplanmaktadır (Uray, 2014; Uray, 2022)

$$\eta_{ij} = \frac{(S/N)_{ij}}{a} \quad (i = 1, \dots, k; j = 1, \dots, a) \quad (4)$$

Taguchi metodunda, deney tasarımında dikkate alınan her bir parametre için maksimum veya minimum değere sahip ortalama S/N değeri (η_{pi}) kullanılarak optimum hedef değeri tahmin edilebilmektedir (Eşme, 2009; Savaşkan vd., 2010; Kivak, 2014; Uray vd., 2022). Bu çalışmada, en büyük-en iyi hedef değeri kullanıldığı için η_{pi} değeri ($i=1, \dots, k$), her parametrenin ortalama S/N grafiğindeki maksimum değerine karşılık gelmektedir. Tüm S/N değerlerinin ortalaması (η) kullanılarak tahmin edilen hedef değeri (η_{tahmin}) Denklem 5 ile belirlenmektedir.

$$\eta_{tahmin} = \eta + \sum_{i=1}^k (\eta_{pi} - \eta) \quad (i = 1, \dots, k) \quad (5)$$

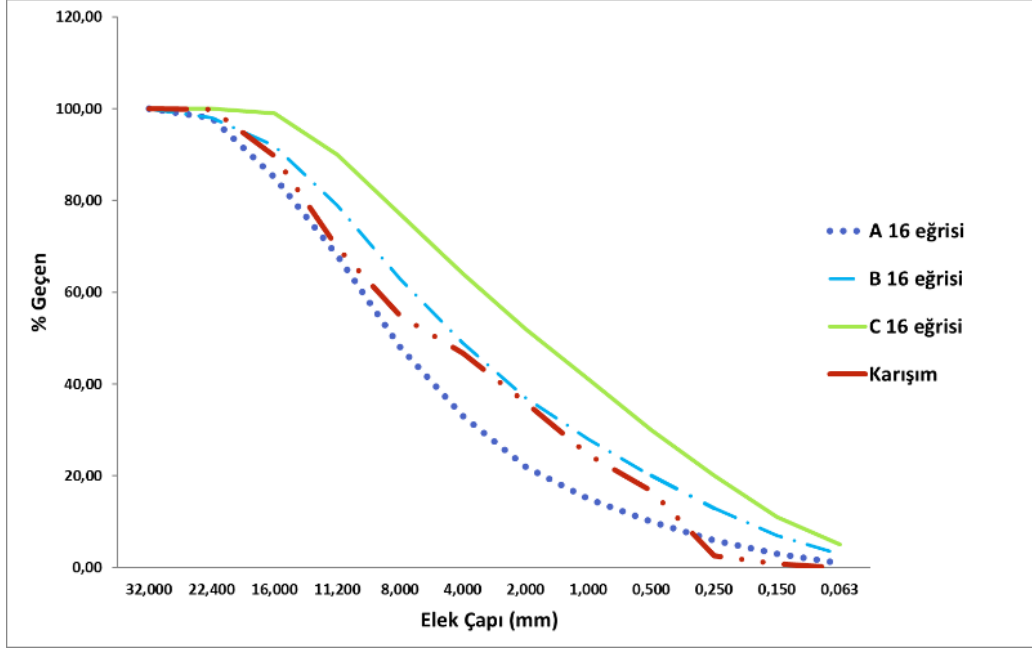
Taguchi metodu ile tahmin edilen optimum parametre değerlerine göre performans deneyi tekrarlanır ve elde edilen deney sonucu ve tahmin edilen deney sonuç değerlerini kullanarak rölatif hata hesaplanır (Denklem 6).

$$\varepsilon = \frac{\eta_{tahmin} - \eta_{deney}}{\eta_{deney}} \quad (6)$$

3. Materyal ve Yöntem

3.1. Deneyleerde Kullanılan Malzemeler

Çalışmada; silis dumanı, öğütülmüş yüksek fırın cürufu, çimento ve kalsiyum nitrit parametre olarak belirlenmiştir. Seçilen malzeme parametrelerinin seviyeleri literatüre uygun olarak tespit edilmiştir. Çalışmada yer alan malzemelerin fiziksel ve kimyasal özellikleri Tablo 3' te, karışımlarda kullanılan agreganın granülometri eğrisi Şekil 1' de verilmiştir. Çalışmada kullanılan çimento, Konya Çimento A.Ş'den, öğütülmüş yüksek fırın cürufu Konya Korkmaz Beton şirketinden, silis dumanı Dost Kimya şirketinden, süper akışkanlaştırıcı kimyasal katkı Sika yapı kimyasallarından ve kalsiyum nitrit Lyksor Kimya şirketinden temin edilmiştir. Karışımlarda kullanılan su Konya İli şebeke suyudur.



Şekil 1. Betonda kullanılan agreganın tasarım eğrisi (elek analizi)

Tablo 3. Çalışmada kullanılan malzemelerin fiziksel ve kimyasal özellikleri

Kimyasal İçerik, %	CEM I 42. R	YFC	SD
SiO ₂	19.31	37.86	96.1
Al ₂ O ₃	5.17	12.04	0.29
Fe ₂ O ₃	2.51	2.44	0.58
CaO	62.93	30.19	0.27
MgO	2.08	8.72	0.25
Na ₂ O	0.26	0.03	0.02
K ₂ O	0.58	0.82	0.48
SO ₃	3.36	0.75	
S	-	0.39	0.2
Cl	0.01	0.0044	
Kızdırma Kaybı	1.98	1.05	1.81
Serbest Kireç	1.9		
Özgül Yüzey cm ² /gr	3415	4520	233600
Özgül ağırlık gr/cm ³	3.15	2.89	2.20
Fiziksel Özellik	CN	Süper Akışkanlaştırıcı	
Renk	Açık sarı, sıvı	Kahverengi, homojen sıvı	
pH	6.53	7-11	
Bağıl Yoğunluk (kg/dm ³)	1.51	1.15-1.19	
Katı Madde, %	65.18		
Alkali Miktarı, %		Max. 7	

3.2. Deney Tasarımı (DOE)

Bu çalışmada, farklı parametrelerin betonun mekanik özelliklerine olan etkisi istatistiksel bir yöntem olan Taguchi yöntemi kullanılarak araştırılmıştır. Bu kapsamda, karışımların başlangıç dozajı olarak kullanılmak üzere 300 kg/m³ CEM I 42.5R çimentosu seçilmiştir.

Karışımlarda çimento yerine ağırlıkça farklı oranlarda yüksek fırın cürufu ve silis dumanı ikame edilmiştir. Buna göre karışımlarda S/B (su/bağlayıcı) oranı, çimento dozajı ve korozyon inhibitörü oranı diğer parametreler olarak belirlenmiştir. Karışımlarda süper akışkanlaştırıcı, çimento dozajının %0.8-1.0 aralığında kullanılmıştır. Karışımlarda kullanılan agrega her seri için aynı olmakla birlikte; 0-5 mm agrega (kum) için 968.60 kg/m³, 5-15 mm agrega (Çakıl I) için 387.14 kg/m³ ve 15-22.4 mm agrega (Çakıl II) için 581.43 kg/m³ olarak tespit edilmiştir. Çalışmada kullanılacak olan parametre ve seviyeleri literatüre uygun olarak belirlenmiş (Guo vd., 2020; Kate vd., 2021; Mohamed & Najm, 2017; Saraya, 2014; Teimortashlu vd., 2018; Uysal, 2012) ve Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 4. Çalışmada kullanılan parametreler ve seviyeleri

Parametreler						
	Silis Dumanı, % İkame	Y. Fırın Cürufu, % İkame	Çimento Dozajı* ¹ (kg/m ³)	Su/Bağlayıcı Oranı	Korozyon İnhibitörü* ² CN, %	
Seviyeler	1	0	40	180 (%60)	0.40	1
	2	5	30	195 (%65)	0.45	1
	3	10	20	210 (%70)	0.50	0
	4	15	10	225 (%75)	0.55	0

*¹ : Kontrol betonu için çimento dozajı 300 kg/m³ olarak belirlenmiştir. Çimento dozaj seviyeleri mineral katkı oranlarına göre belirlenmiştir.

*² : Bağlayıcı dozajının (300 kg) %1'i oranında CN korozyon inhibitörü kullanılmıştır.

Tam faktöriyel tasarım için 5 parametrenin 4 seviyesinin etkisini belirlemek amacıyla üretilecek karışım sayısı toplamda 4⁵=1024 olmaktadır. Ancak Taguchi metodu sayesinde kullanılacak parametre ve seviyelerine göre uygun ortogonal dizi tabloları seçilerek üretilecek karışım sayısı azaltılabilmektedir. Buna göre çalışmada kullanılacak ortogonal dizi, parametre ve seviyeye uygun olarak Tablo 1'e göre L₁₆ ortogonal dizi belirlenmiş olup Tablo 4' te verilen parametre ve seviyelerine göre düzenlenerek elde edilen Taguchi deney tasarım tablosu Tablo 5'te verilmiştir.

Tablo 5. Taguchi deney tasarım tablosu

Karışım No	İkame Silis Dumanı Oranı (%)	İkame Y. Fırın Cürufu Oranı (%)	Çimento Dozajı (kg/m ³)	S/B Oranı	Korozyon İnhibitörü (%)
REF0.4 300	0	0	300	0.40	0
M1	0	40	180	0.40	1
M2	0	30	195	0.45	1
M3	0	20	210	0.50	0
M4	0	10	225	0.55	0
M5	5	40	195	0.50	0
M6	5	30	180	0.55	0
M7	5	20	225	0.40	1
M8	5	10	210	0.45	1
M9	10	40	210	0.55	1
M10	10	30	225	0.50	1
M11	10	20	180	0.45	0
M12	10	10	195	0.40	0
M13	15	40	225	0.45	0
M14	15	30	210	0.40	0
M15	15	20	195	0.55	1
M16	15	10	180	0.50	1

3.3. Karışım Metodolojisi ve Numunelerin Hazırlanması

Yapılan çalışmada karışımlar elde edilirken belirli bir metodolojiye tüm serilerde uyulmuştur. Buna göre; karıştırıcıya ilk olarak 15-22.4 mm malzemenin tamamı atılmış ve karışım suyunun 1/5'i ilave edilerek 30 saniye karıştırılmıştır. Daha sonra 7-15 mm malzeme karıştırıcıya atılmış yaklaşık 30 saniye daha karıştırılmaya devam edilmiştir. Son olarak agregalardan, kumun tamamı ilave edilip

suyun 1/5'i daha katılıp, yaklaşık 1 dakika da bu şekilde karıştırılmıştır. Tüm agrega karıştırıcıya girdikten sonra bağlayıcılardan, ilk önce çimento karışıma ilave edilmiştir. Çimentonun karışıma girmesiyle birlikte karışım suyunun tamamı karıştırıcıya ilave edilip 2 dakika karıştırma işlemine devam edilmiştir. Bu sürenin sonunda diğer bağlayıcılardan sırasıyla yüksek fırın cürufu ve silis dumani arka arkaya karışıma ilave edilmiş 2 dakika bu şekilde karıştırılıp, süper akışkanlaştırıcı ilavesi yapılmıştır. Akışkanlaştırıcının homojen dağılması için 3 dakika karıştırma işlemine devam edilmiştir. Son olarak da kalsiyum nitrit ilavesi ile 1 dakika sonrasında karıştırma işlemi sonlandırılmıştır. Karışımlar oluşturulduktan sonra kalıplara alınarak sıkışmanın sağlanabilmesi için laboratuvar tipi vibratör kullanılmıştır. Segregasyonu engellemek için uygulama süresine dikkat edilmiştir. Sıkıştırma ve yüzey düzeltme işlemi tamamlanan numuneler gölge ortamda 24-40 saat arasında bekletildikten sonra kalıptan çıkarılarak kür havuzuna konulmuştur. Kür havuzunda 20+/-2 derecede kırılacağı günün 1 gün öncesine kadar bekletilmiş, sonrasında ilgili performans deneyleri yapılmıştır. Tablo 5' te verilen Taguchi deney tasarım tablosuna göre üretilen karışımlardan, uygulanacak hedef performans deneyine göre numuneler oluşturulmuştur. Bu kapsamda oluşabilecek olumsuz durum ve koşullardan kaynaklı hatalardan sakınmak amacıyla deney tekrarı 3 olarak belirlenmiş ve ortalamalar alınmıştır. Her seriden 54 dm³ olacak şekilde basınç dayanımı için 100x100x100 mm küp numuneler, eğilmede çekme dayanımı için 100x100x400 mm prizmatik numuneler üretilmiştir.

3.4. Yapılan Deneyler

Üretimi yapılan numuneler 7, 28 ve 56 gün süreyle kür havuzunda bekletilmiştir. Daha sonra numunelere basınç dayanımı ve eğilmede çekme dayanım testleri yapılmıştır. Buna göre basınç dayanım testi TS 12390-3 standardına ve eğilmede çekme dayanım testi TS 12390-5 standardına göre uygulanmıştır. Yapılan deneylere ait görseller Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2. Basınç ve eğilmede çekme deneylerinin uygulanması

4. Deneysel Sonuçlar ve İstatistik Analizler

Bu çalışmada; istatistiksel deney tasarımı yapmak amacıyla Taguchi yöntemi kullanılmıştır. Basınç, eğilmede çekme dayanımlarını maksimize etmek amacıyla 5 farklı parametrenin 4 seviyesi kullanılmıştır. Buna göre deneylerden ve istatistiksel analizlerden elde edilen sonuçlar bu bölümde verilmiştir

4.1. Basınç Dayanımı Deney Sonuçları

16 farklı karışım içeriğinde üretilen küp numunelerin 7, 28 ve 56 günlük kür sonunda elde basınç dayanım deney sonuçları Tablo 6'da verilmiştir. Deney sonuçları kullanılarak Denklem 3' te verilen S/N oranı formülüne göre S/N oranları belirlenmiştir. Hesaplanan S/N oranları kullanılarak Denklem 4 ile belirlenen ortalama S/N değerleri 7, 28 ve 56 günlük kür süreleri için sırasıyla Tablo 7, 8 ve 9' da ve ortalama S/N grafikleri Şekil 3, 4 ve 5' te verilmiştir. Tablolarda parametrenin ortalama değerden uzaklığı değişim ile ifade edilirken, sıralama ile parametrenin değişim değerinin büyükten küçüğe değerlendirilmesi verilmiştir. Bu değişim sıralaması parametrenin o hedef için etkinliğinin de bir göstergesidir. Açıklamak gerekirse; her bir parametre için S/N grafiklerinin maksimum ve minimum değerleri arasındaki uzaklık ne kadar fazla ise parametre o hedef değer için etkilidir denilebilir.

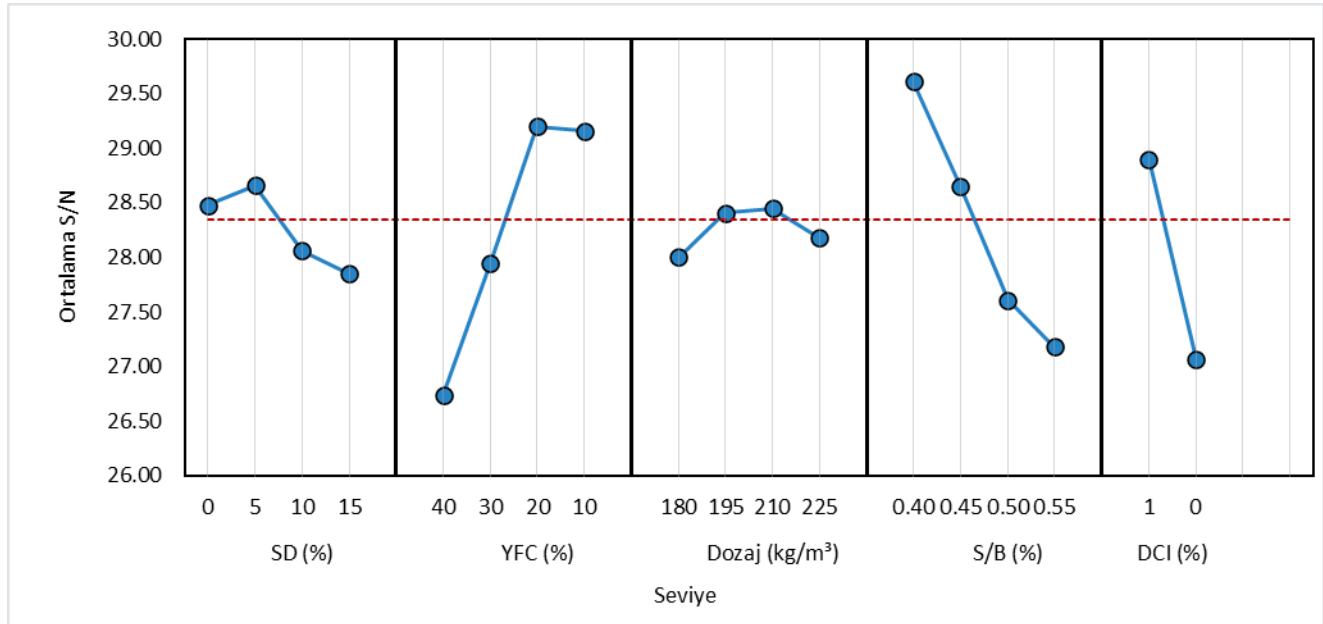
Tablo 6. Tasarlanan karışımların basınç dayanımı sonuçları

Numune Adı	Basınç Dayanımı (MPa)		
	7 günlük ortalama	28 günlük ortalama	56 günlük ortalama
REF0.4 300	36.28	54.77	55.14

M1	27.18	50.12	52.53
M2	28.79	45.76	46.54
M3	24.40	38.51	39.91
M4	26.00	34.47	40.13
M5	21.68	40.34	42.42
M6	19.51	40.03	42.17
M7	36.94	54.80	59.22
M8	34.50	53.10	61.64
M9	20.24	34.81	44.41
M10	24.13	37.94	44.06
M11	28.87	35.85	45.74
M12	29.00	30.21	44.72
M13	18.69	31.90	34.74
M14	28.71	39.78	41.63
M15	26.60	39.58	50.12
M16	26.06	39.19	42.13
Doğrulama	31.16	51.30	56.10

Tablo 7. 7 günlük basınç dayanımı ortalama S/N tablosu

Seviye	SD (%)	YFC (%)	Dozaj (kg/m ³)	S/B (%)	CN (%)
1	28.48	26.74	28.00	29.61	28.90
2	28.66	27.95	28.41	28.65	27.06
3	28.06	29.20	28.45	27.61	-
4	27.85	29.16	28.18	27.18	-
Değişim	0.81	2.46	0.45	2.43	1.84
Sıralama	4	1	5	2	3

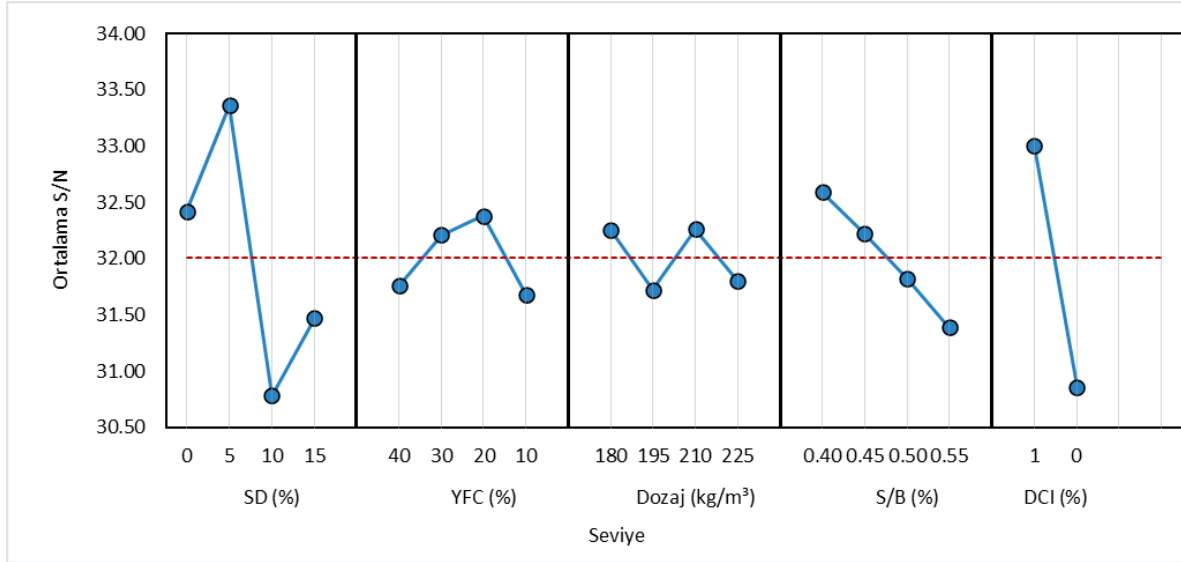


Şekil 3. 7 günlük basınç dayanımı ortalama S/N grafiği

Buna göre 7 günlük basınç dayanımı Şekil 3'te verilen ortalama S/N grafiğine ve Tablo 7'de verilen ortalama S/N değerlerine göre değerlendirildiğinde; S/B oranı arttıkça basınç dayanımı olumsuz etkilenmektedir. Ortalama S/N grafiğine göre su/bağlayıcı için en uygun oran 0.40 olmaktadır. Kalsiyum nitritin karışımlarda bulunması basınç dayanımını artırmıştır. En etkili parametreler sırasıyla YFC, S/B oranı, CN, SD ve dozaj olmuştur. YFC'nin artan oranlarda kullanımı erken yaş basınç dayanımını olumsuz etkilemektedir. Silis dumanı için %5 seviyesi erken yaş basınç dayanımında en uygun ikame oranı olmuştur. Buna göre olumlu yönde kullanım oranı olarak SD için %5, YFC için %10-20 oranları olumlu yönde değerlendirilebilir. Bu durumda çimento kullanımı %30 azaltılarak, YFC %20, SD %5 ve CN %1 oranında kullanılabilir. 7 günlük basınç dayanımı için optimum seviyelerde yöntemin tahmin ettiği basınç dayanımı 37.66 MPa olurken doğrulama deneyinde elde edilen sonuç 31.16 MPa olmuştur. Buna göre rölatif hata oranı %21 olarak belirlenmiştir.

Tablo 8. 28 günlük basınç dayanımı ortalama S/N tablosu

Seviye	SD (%)	YFC (%)	Dozaj (kg/m ³)	S/B (%)	CN (%)
1	32.42	31.76	32.25	32.59	33.00
2	33.36	32.21	31.72	32.22	30.86
3	30.78	32.38	32.26	31.82	-
4	31.47	31.68	31.80	31.39	-
Değişim	2.58	0.70	0.54	1.20	2.14
Sıralama	1	4	5	3	2

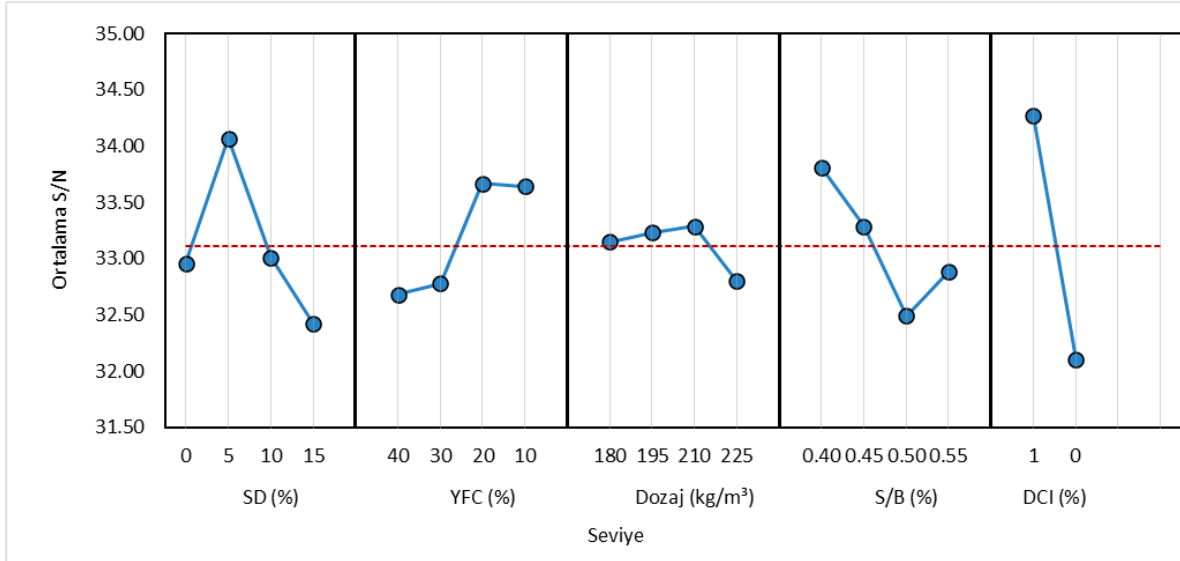
**Şekil 4.** 28 günlük basınç dayanımı ortalama S/N grafiği

28 günlük basınç dayanımı Şekil 4'te verilen ortalama S/N grafiğine ve Tablo 8'de verilen ortalama S/N değerlerine göre değerlendirildiğinde; S/B oranı arttıkça dayanım olumsuz etkilenmektedir. Su/bağlayıcı için en uygun oran 0.40 olmaktadır. CN kullanımı basınç dayanımını olumlu yönde etkilemiştir. Ortalama S/N grafiğine göre 28 günlük basınç dayanımında YFC'nin %20 ve %30 oranlarda ikame kullanımı uygun oranlar olarak değerlendirilebilir. 28 günlük basınç dayanımında SD için en uygun yer değiştirme oranı %5 olmuştur. Bu durumda S/N grafiğine göre çimento %30 oranında azaltılarak, YFC %20 SD %5 ve CN %1 oranında kullanılabilir. 28 günlük basınç dayanımı için optimum seviyelerde yöntemin tahmin ettiği basınç dayanımı 60.10 MPa olurken doğrulama deneyinde elde edilen sonuç 51.30 MPa olmuştur. Buna göre rölatif hata oranı %17.15 olarak belirlenmiştir.

Tablo 9. 56 günlük basınç dayanımı ortalama S/N tablosu

Seviye	SD(%)	YFC(%)	Dozaj(kg/m ³)	S/B (%)	CN(%)
1	32.96	32.68	33.15	33.81	34.27
2	34.07	32.78	33.23	33.29	32.1
3	33.01	33.67	33.29	32.49	-
4	32.42	33.64	32.80	32.88	-
Değişim	1.65	0.99	0.49	1.32	2.17
Sıralama	2	4	5	3	1

56 günlük basınç dayanımı Şekil 5'te verilen ortalama S/N grafiğine ve Tablo 9'da verilen ortalama S/N değerlerine göre değerlendirildiğinde; S/B oranı arttıkça dayanım olumsuz etkilenmektedir. Su/bağlayıcı için en uygun oran 0.40 olmaktadır. CN kullanımı basınç dayanımını olumlu yönde etkilemiştir. 56 günlük basınç dayanımında YFC'nin %20 oranında yer değişimi en uygun oran olmuştur. 56 günlük basınç dayanımında SD için en uygun yer değiştirme oranı %5 olmuştur. Bu durumda optimum seviyelerde çimento %30 oranında azaltılarak, YFC %20, SD %5 ve CN %1 oranında kullanılabilir. 56 günlük basınç dayanımı için optimum seviyelerde yöntemin tahmin ettiği basınç dayanımı 67.01 MPa olurken doğrulama deneyinde elde edilen sonuç 56.10 MPa olmuştur. Buna göre rölatif hata oranı %19.44 olarak belirlenmiştir.



Şekil 5. 56 günlük basınç dayanımı ortalama S/N grafiği

Basınç dayanımında yüksek fırın cürufu yavaş puzolonik aktivite gösteren bir mineral katkı olduğundan özellikle %20'den fazla ikame oranı erken yaş basınç dayanımı üzerinde olumsuz etki göstermiştir (Ramezianpour & Malhotra, 1995; Saraya, 2014; Ulugöl, 2015). Silis dumanı ve yüksek fırın cürufunun ikili kullanımları ve kalsiyum nitritin kullanımı sayesinde birbirlerinin eksik yönleri tamamlanarak 28 günlük kür süresinde dahi referans betona yakın basınç dayanım değerleri elde edilmiştir (Teimortashlu vd., 2018; Warda vd., 2020).

4.2. Eğilme Dayanımı Deneysel Sonuçları

17 farklı karışım içeriğinde üretilen prizmatik numunelerin 7, 28 ve 56 günlük kür sonunda elde edilen eğilme dayanım deneysel sonuçları Tablo 10'da verilmiştir. Denklem 3' te verilen S/N oranlarına göre, deneysel sonuçları kullanılarak belirlenen ortalama S/N değerleri 7, 28 ve 56 günlük kür süreleri için sırasıyla Tablo 11, 12 ve 13' te ve ortalama S/N grafikleri Şekil 6, 7 ve 8' de verilmiştir.

Tablo 10. Tasarlanan karışımların eğilme dayanımı sonuçları

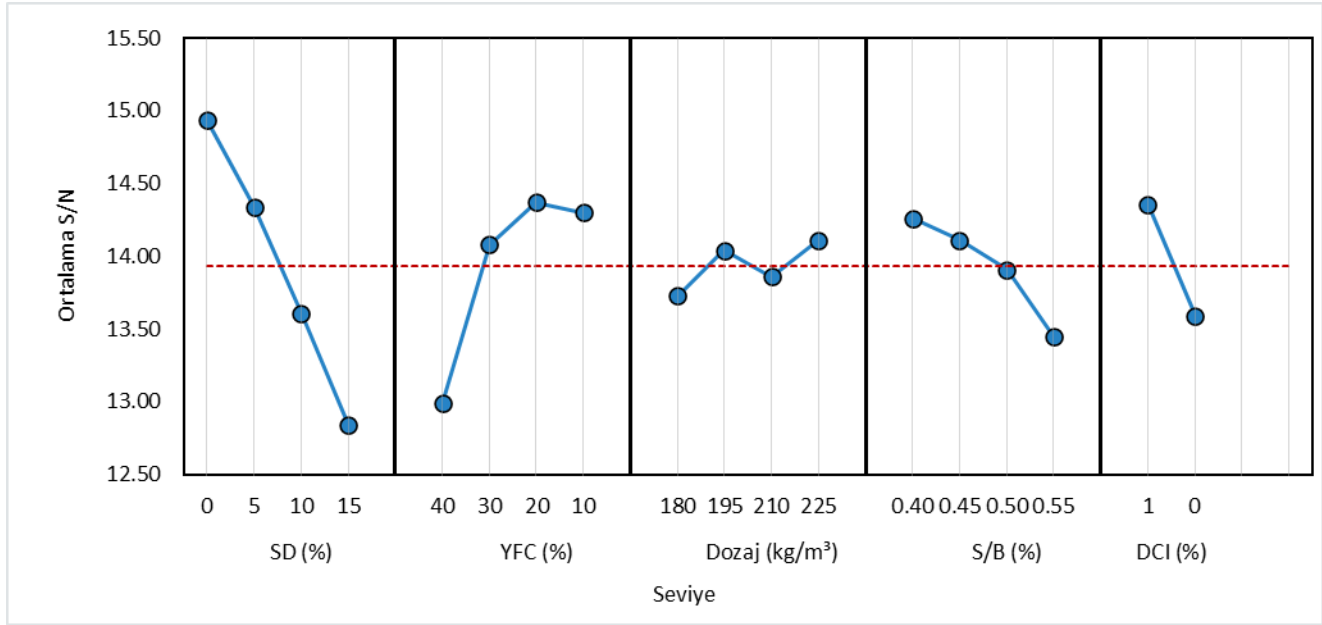
Numune Adı	Eğilme Dayanımı (MPa)		
	7 günlük ortalama	28 günlük ortalama	56 günlük ortalama
REF0.4 300	6.06	6.86	7.04
M1	5.35	5.96	6.09
M2	5.88	5.76	5.88
M3	5.57	5.54	5.70
M4	5.55	5.81	6.05
M5	4.66	5.94	5.60
M6	4.70	5.67	5.54
M7	5.82	6.71	6.94
M8	5.80	6.33	6.45
M9	4.04	5.18	6.05
M10	5.22	5.32	6.42
M11	4.96	5.62	6.98
M12	5.04	5.51	6.80
M13	3.93	5.63	6.11
M14	4.53	5.87	6.26
M15	4.65	5.73	6.23
M16	4.47	5.77	6.03
Doğrulama	5.82	6.10	6.58

Tablo 11. 7 günlük eğilme dayanımı ortalama S/N tablosu

Seviye	SD (%)	YFC (%)	Dozaj (kg/m³)	S/B (%)	CN(%)
1	14.94	12.99	13.73	14.26	14.36
2	14.34	14.08	14.04	14.11	13.59
3	13.61	14.37	13.86	13.91	-

4	12.84	14.30	14.11	13.45	-
Değişim	2.1	1.38	0.38	0.81	0.77
Sıralama	1	2	5	3	4

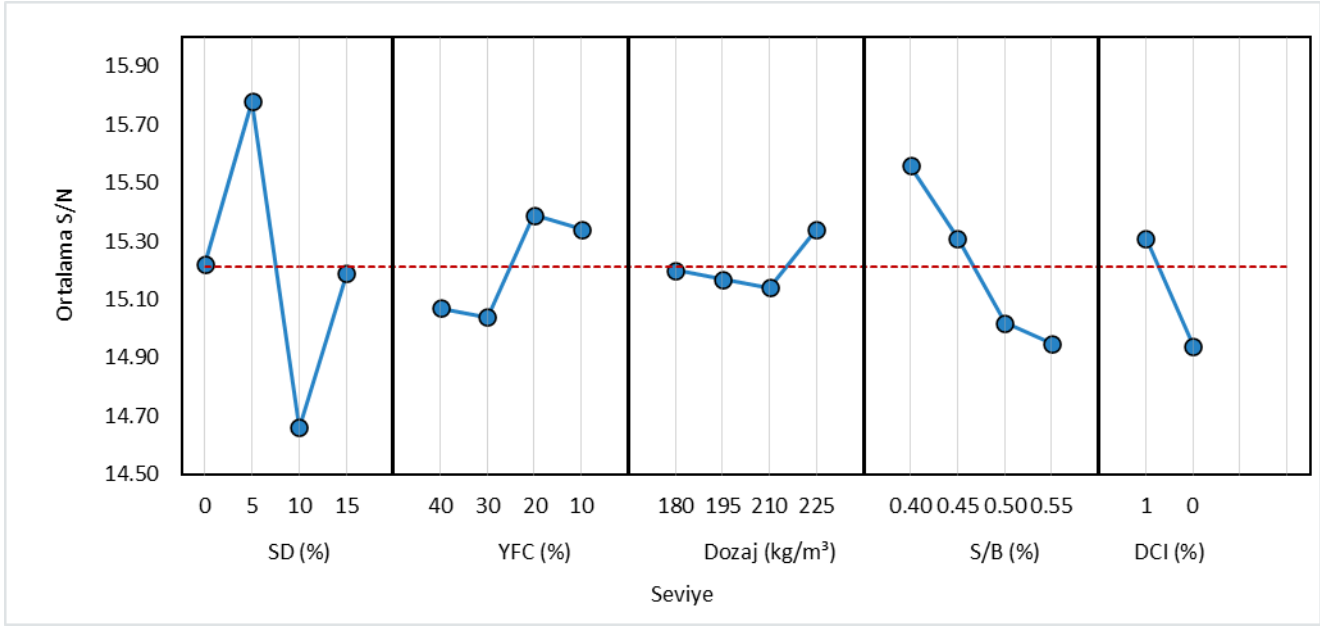
Buna göre 7 günlük eğilme dayanımı Şekil 6'da verilen ortalama S/N grafiğine ve Tablo 11'de verilen ortalama S/N değerlerine göre değerlendirildiğinde; S/B oranı arttıkça eğilme dayanımı olumsuz etkilenmektedir. Şekil 6'da verilen ortalama S/N grafiğine göre su/bağlayıcı oranı için en uygun oran 0.40 olmaktadır. Kalsiyum nitritin karışımlarda bulunması erken yaş eğilme dayanımını artırmıştır. En etkili parametreler sırasıyla SD, YFC, S/B oranı, CN ve dozaj olmuştur. Silis dumanının artan oranlarda kullanımı erken yaş eğilme dayanımını olumsuz etkilemektedir. Optimum seviyelerde çimento %25 azaltılarak, YFC %20, SD %0 ve CN %1 oranında kullanılabilirliği ortaya çıkmıştır. 7 günlük eğilme dayanımı için optimum seviyelerde yöntemin tahmin ettiği eğilme dayanımı 6.52 MPa olurken doğrulama deneyinde elde edilen sonuç 5.82 MPa olmuştur. Buna göre rölatif hata oranı %12 olarak belirlenmiştir.



Şekil 6. 7 günlük eğilme dayanımı ortalama S/N grafiği

Tablo 12. 28 günlük eğilme dayanımı ortalama S/N tablosu

Seviye	SD(%)	YFC(%)	Dozaj(kg/m3)	S/B (%)	CN(%)
1	15.22	15.07	15.20	15.56	15.31
2	15.78	15.04	15.17	15.31	14.94
3	14.66	15.39	15.14	15.02	-
4	15.19	15.34	15.34	14.95	-
Değişim	0.59	0.35	0.20	0.61	0.12
Sıralama	1	3	4	2	5



Şekil 7. 28 günlük eğilme dayanımı ortalama S/N grafiği

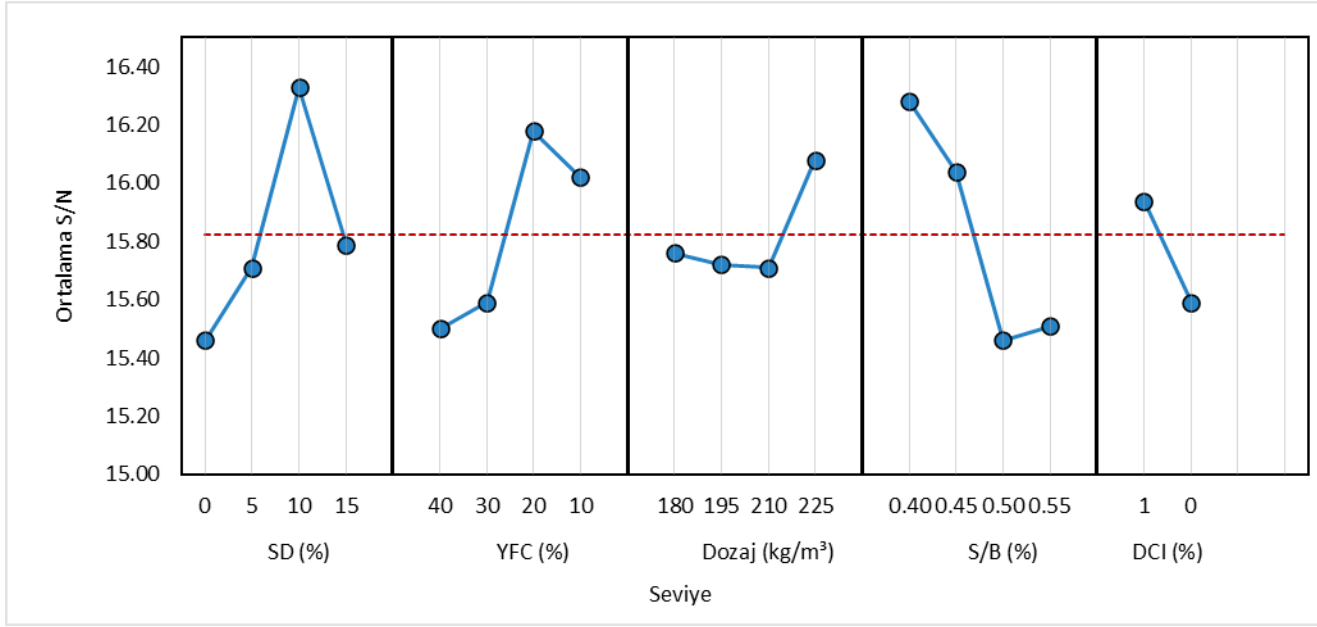
28 günlük eğilme dayanımı Şekil 7’de verilen ortalama S/N grafiğine ve Tablo 12’de verilen ortalama S/N değerlerine göre değerlendirildiğinde; S/B oranı artışı eğilme dayanımı üzerinde olumsuz etki göstermiştir. S/B oranının en uygun değeri 0.40 olmuştur. CN kullanımı eğilme dayanımını olumlu yönde etkilemiştir. 28 günlük eğilme dayanımında YFC’ nin %20 oranında ikame kullanımı en uygun oran olmuştur. 28 günlük eğilme dayanımında SD için en uygun yer değiştirme oranı ise %5 olmuştur. Bu durumda çimento %25 oranında azaltılarak, YFC %20, SD %5 ve CN %1 oranında kullanılabilir. 28 günlük eğilme dayanımı için optimum seviyelerde yöntemin tahmin ettiği eğilme dayanımı 6.76 MPa olurken doğrulama deneyinde elde edilen sonuç 6.10 MPa olmuştur. Buna göre rölatif hata oranı %11 olarak belirlenmiştir.

Tablo 13. 56 Günlük Eğilme Dayanımı Ortalama S/N Tablosu

Seviye	SD(%)	YFC(%)	Dozaj(kg/m3)	S/B (%)	CN(%)
1	15.46	15.50	15.76	16.28	15.94
2	15.71	15.59	15.72	16.04	15.59
3	16.33	16.18	15.71	15.46	-
4	15.79	16.02	16.08	15.51	-
Değişim	0.87	0.68	0.37	0.82	0.35
Sıralama	1	3	4	2	5

56 günlük eğilme dayanımı Şekil 8’de verilen ortalama S/N grafiğine ve Tablo 13’te verilen ortalama S/N değerlerine göre değerlendirildiğinde; S/B oranı artışı eğilme dayanımı üzerinde olumsuz etki göstermiştir. S/B oranının en uygun değeri 0,40 olmuştur. CN kullanımı eğilme dayanımını olumlu yönde etkilemiştir. 56 günlük eğilme dayanımında YFC’ nin %20 oranında ikame kullanımı en uygun oran olmuştur. 56 günlük eğilme dayanımında SD için en uygun yer değiştirme oranı ise %10 olmuştur. Bu durumda çimento %25 oranında azaltılarak, YFC %20, SD %10 ve CN %1 oranında kullanılabilir. 56 günlük eğilme dayanımı için optimum seviyelerde yöntemin tahmin ettiği eğilme dayanımı 7.44 MPa olurken doğrulama deneyinde elde edilen sonuç 6.58 MPa olmuştur. Buna göre rölatif hata oranı %13 olarak belirlenmiştir.

Kalsiyum nitrit daha önceki çalışmalarda korozyon inhibitörü olarak kullanılmıştır. Ancak bu çalışmada kalsiyum nitrit kullanımı tüm yaşlardaki dayanımlar için olumlu bir etki göstermiştir (Al-Amoudi vd., 2003; Lopez-Calvo vd., 2012; Reou & Ann, 2008) .



Şekil 8. 56 Günlük Eğilme Dayanımı Ortalama S/N Grafığı

5. Sonuçlar ve Tartışma

Bu çalışmada, belirlenen parametre ve seviyeleri doğrultusunda Taguchi L16 ortogonal deney tablosu kullanılmıştır. Taguchi metodu, yüksek fırın cürufu ve silis dumanı gibi çimento yerine ikame edilen mineral katkıların optimal seviyelerini belirlemek, aynı zamanda kalsiyum nitrit kimyasal katkısının dayanıklılık üzerindeki etkisini değerlendirmek amacıyla deney sayısını ve deneysel girişimleri minimize etmek için kullanılmıştır. Çalışmada elde edilen önemli sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

- Kür süresindeki artışa bağlı olarak serilerin eğilme ve basınç dayanımları artmıştır. Ayrıca puzolanlı serilerin çoğunda nihai dayanım artışı referans betondan daha fazla olduğu görülmüştür.
- 7 günlük eğilme ve basınç dayanımları puzolanlı serilerin tümünde referans betondan daha düşük çıkmıştır. Bu da puzolonik reaksiyonların yavaş ilerlemesiyle ilişkilendirilmiştir.
- Basınç dayanımı için; optimum parametre kombinasyonu %5 silis dumanı, %20 yüksek fırın cürufu, %70 çimento dozajı, 0.40 su/bağlayıcı oranı ve %1 kalsiyum nitrit kullanımı olarak tüm yaşlar için elde edilmiştir. Ayrıca, Taguchi metodu kullanılarak belirlenen optimum parametre seviyelerinde doğrulama deneyleri yapılmıştır. Doğrulama deneylerinden elde edilen sonuçlara göre 7, 28 ve 56 gün kür sürelerinde %30 oranında çimento azaltılarak referans betonun dayanım değerine yakın daha çevreci ve ekonomik beton karışım oranı elde edilmiştir.
- S/N grafikleri incelendiğinde silis dumanının %5'ten daha yüksek ikame oranları 56 günlük eğilme dayanımı hariç dayanımları olumsuz etkilediği görülmüştür.
- Eğilmede çekme dayanımı için; 7, 28 ve 56 günlük kür süresinde optimum parametre kombinasyonu silis dumanı için sırasıyla; %0, %5 ve %10, yüksek fırın cürufu için tüm yaşlarda %20, çimento dozajı için tüm yaşlarda %75, su/bağlayıcı oranı için tüm yaşlarda 0.40 ve kalsiyum nitrit için tüm yaşlarda %1 olarak belirlenmiştir. Buna göre çimento miktarı %25 azaltılarak yeterli eğilme dayanımının elde edildiği sonuçlar bulunmuştur.
- Basınç dayanımı S/N grafiklerine göre yüksek fırın cürufu yavaş puzolonik aktivite gösteren bir mineral katkı olduğundan özellikle %20'den fazla ikame oranı erken yaş basınç dayanımı üzerinde olumsuz etki göstermiştir
- Silis dumanının puzolonik aktivesi ve yüksek fırın cürufunun silis içeriği yüksek malzemelerle kullanıldığında polimerizasyona katkısı daha önceki çalışmalarla elde edilmiş sonuçlardır. Buna göre silis dumanı ve yüksek fırın cürufu mineral katkılarının ikili kullanımları sayesinde birbirlerinin eksik yönlerini tamamlayarak **28 günlük kür süresinde bile** referans betona yakın basınç dayanım değerleri elde edilmiştir.
- Çalışmada dikkate alınan parametrelere göre özellikle S/B oranının düşük ve toplam bağlayıcı dozajının yüksek olduğu karışımlarda (M13, M14 vb.) basınç dayanımının düşük olması işlenebilirlik ve bağlayıcı malzeme taneciklerinin ıslanabilirliği ile ilgili olduğu düşünülmektedir. Silis dumanı ve yüksek fırın cürufunun çimentodan daha ince tanecikli olması ve yoğun su talebinin bu duruma sebep olduğu söylenebilir.
- Kalsiyum nitrit daha önceki çalışmalarda korozyon inhibitörü olarak kullanılmıştır. Ancak bu çalışmada S/N grafiklerine göre kalsiyum nitrit kullanımı tüm yaşlardaki dayanımlar için olumlu bir etki gösterdiği belirlenmiştir.

Taguchi istatistiksel deney tasarımının kullanıldığı bu çalışmada, normal şartlarda 1024 adet tasarım yapılması gerekirken 16 adet tasarım yapılarak parametrik etki ve optimum parametre seviyeleri belirlenmiştir. Zamandan ve iş gücünden tasarruf edilerek makul bir hata oranı ile parametre optimizasyonu yapılmıştır. Genel anlamda bu çalışmada mineral kullanılarak yüksek performanslı, çevreci, ekonomik bir betonun istatistik tabanlı bir yöntem olan Taguchi metoduyla hızlı ve kolay bir şekilde tasarlanabileceği gösterilmiştir. Mineral katkı kullanılarak, aynı zamanda S/B oranının, dozajla birlikte parametre olarak kullanımı, işlenebilirlik bir çıkış parametresi

olarak değerlendirilmediğinden mineral katkıların yüksek seviye sonuçlarını etkilemiş olabilir. Bu sebeple örneğin S/B oranı ve toplam bağlayıcı miktarının değişmediği ve işlenebilirliğin belirli bir aralıkta sabit tutulduğu rafine parametre ve seviyelerin kullanılarak irdeleme yapılması gerekebilir.

Referanslar

- Al-Amoudi, O. S. B., Maslehuddin, M., Lashari, A. N., & Almusallam, A. A. (2003). Effectiveness of corrosion inhibitors in contaminated concrete. *Cement and Concrete Composites*, 25(4–5), 439–449. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(02\)00084-7](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(02)00084-7)
- Amer, I., Kohail, M., El-Feky, M. S., Rashad, A., & Khalaf, M. A. (2021). Characterization of alkali-activated hybrid slag/cement concrete. *Ain Shams Engineering Journal*, 12(1), 135–144. <https://doi.org/10.1016/J.ASEJ.2020.08.003>
- Atış, C. D., Özcan, F., Kiliç, A., Karahan, O., Bilim, C., & Severcan, M. H. (2005). Influence of dry and wet curing conditions on compressive strength of silica fume concrete. *Building and Environment*, 40(12), 1678–1683. <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2004.12.005>
- Bilim, C., & Atış, C. D. (2011). Öğütülmüş Granüle Yüksek Fırın Cürufu İçeren Harçların Aşınma ve Mukavemet Özellikleri. *Politeknik Dergisi*, 14(2), 101–107. <https://dergipark.org.tr/pub/politeknik/issue/33057/367904>
- Boran, H., Günaydın, O., & Güçlüer, K. (2020). Investigation of Engineering Properties of Blast Furnace Slag Additive Mortars. *MANAS Journal of Engineering*, 8(2), 138–143. <https://doi.org/10.51354/MJEN.795891>
- Box, G. (1988). Signal-to-noise ratios, performance criteria, and transformations. *Technometrics*, 30(1), 1-17.
- Chong, B. W., Othman, R., Jaya, R. P., Hasan, M. R. M., Sandu, A. V., Nabialek, M., Jeż, B., Pietrusiewicz, P., Kwiatkowski, D., Postawa, P., & Abdullah, M. M. A. B. (2021). Design of Experiment on Concrete Mechanical Properties Prediction: A Critical Review. *Materials 2021, Vol. 14, Page 1866, 14(8)*, 1866. <https://doi.org/10.3390/MA14081866>
- Cimbala, J. M. (2014). Taguchi Orthogonal Arrays. *Lecture Notes Pennsylvania State University, September*, 4–6. https://www.me.psu.edu/cimbala/me345/Lectures/Taguchi_orthogonal_arrays.pdf
- Dave, S. V., Bhogayata, A., & Arora, N. K. (2021). Mix design optimization for fresh, strength and durability properties of ambient cured alkali activated composite by Taguchi method. *Construction and Building Materials*, 284, 122822. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2021.122822>
- De Side, G. N., Kencanawati, N. N., & Hariyadi. (2020). An application of Taguchi experiment design methods on optimization of mortar mixture composition with Silica Fume as a partial substitute for cement. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 413(1), 012012. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/413/1/012012>
- Eşme, U. (2009). Application of Taguchi Method for The Optimization of Resistance Spot Welding Process. *Arabian Journal for Science & Engineering (Springer Science & Business Media BV)*, 34.
- Ghanei, A., Eskandari-Naddaf, H., & Davoodi, A. (2018). Corrosion behavior and optimization of air-entrained reinforced concrete, incorporating microsilica. *Structural Concrete*, 19(5), 1472–1480. <https://doi.org/10.1002/SUCO.201800058>
- Guo, Z., Jiang, T., Zhang, J., Kong, X., Chen, C., & Lehman, D. E. (2020). Mechanical and durability properties of sustainable self-compacting concrete with recycled concrete aggregate and fly ash, slag and silica fume. *Construction and Building Materials*, 231, 117115. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2019.117115>
- Hinislioğlu, S., & Bayrak, O. Ü. (2004). Optimization of early flexural strength of pavement concrete with silica fume and fly ash by the Taguchi method. *Civil Engineering and Environmental Systems*, 21(2), 79–90. <https://doi.org/10.1080/10286600410001684562>
- Kate, G. K., Nayak, C. B., & Thakare, S. B. (2021). Optimization of sustainable high-strength–high-volume fly ash concrete with and without steel fiber using Taguchi method and multi-regression analysis. *Innovative Infrastructure Solutions*, 6(2), 1–18. <https://doi.org/10.1007/S41062-021-00472-6/TABLES/24>
- Kivak, T. (2014). Optimization of surface roughness and flank wear using the Taguchi method in milling of Hadfield steel with PVD and CVD coated inserts. *Measurement*, 50(1), 19–28. <https://doi.org/10.1016/J.MEASUREMENT.2013.12.017>
- Lee, S., & Shin, S. (2019). Prediction on Compressive and Split Tensile Strengths of GGBFS/FA Based GPC. *Materials 2019, Vol. 12, Page 4198, 12(24)*, 4198. <https://doi.org/10.3390/MA12244198>

- Lopez-Calvo, H. Z., Montes-Garcia, P., Bremner, T. W., Thomas, M. D. A., & Jiménez-Quero, V. G. (2012). Compressive strength of HPC containing CNF and fly ash after long-term exposure to a marine environment. *Cement and Concrete Composites*, 34(1), 110–118. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONCOMP.2011.08.007>
- Mazloom, M., Ramezani-pour, A. A., & Brooks, J. J. (2004). Effect of silica fume on mechanical properties of high-strength concrete. *Cement and Concrete Composites*, 26(4), 347–357. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(03\)00017-9](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(03)00017-9)
- Mohamed, O. A., & Najm, O. F. (2017). Compressive strength and stability of sustainable self-consolidating concrete containing fly ash, silica fume, and GGBS. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 11(4), 406–411. <https://doi.org/10.1007/S11709-016-0350-1/METRICS>
- Peace, G. S. (1995). *Taguchi Methods; A Hands-On Approach to Quality Engineering*. Addison-Wesley Publishing Company, ISBN: 9780201563115, 0201563118.
- Ramezani-pour, A. A., & Malhotra, V. M. (1995). Effect of curing on the compressive strength, resistance to chloride-ion penetration and porosity of concretes incorporating slag, fly ash or silica fume. *Cement and Concrete Composites*, 17(2), 125–133. [https://doi.org/10.1016/0958-9465\(95\)00005-W](https://doi.org/10.1016/0958-9465(95)00005-W)
- Reou, J. S., & Ann, K. Y. (2008). The electrochemical assessment of corrosion inhibition effect of calcium nitrite in blended concretes. *Materials Chemistry and Physics*, 109(2–3), 526–533. <https://doi.org/10.1016/J.MATCHEMPHYS.2007.12.030>
- Ross, P. J. (1988). *Taguchi techniques for quality engineering: loss function, orthogonal experiments, parameter and tolerance design*.
- Saraya, M. E. S. I. (2014). Study physico-chemical properties of blended cements containing fixed amount of silica fume, blast furnace slag, basalt and limestone, a comparative study. *Construction and Building Materials*, 72, 104–112. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2014.08.071>
- Savaşkan, M., Taptık, Y., & Ürgen, M. (2010). Deneysel tasarımı yöntemi ile matkap uçlarında performans optimizasyonu. *İTÜDERGİSİ/d*, 3(6). http://itudergi.itu.edu.tr/index.php/itudergisi_d/article/view/742
- Serencam, H., & Uçurum, M. (2019). Taguchi Deneysel Tasarımı Kullanılarak Uçucu Kül İle Ni (II) Gideriminde Bazı Adsorpsiyon Parametrelerinin Etkinliğinin İrdelenmesi. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 8(1), 336–344. <https://doi.org/10.28948/NGUMUH.517135>
- Sevinç, A. H., Durgun, M. Y., & Eken, M. (2017). A Taguchi approach for investigating the engineering properties of concretes incorporating barite, colemanite, basaltic pumice and ground blast furnace slag. *Construction and Building Materials*, 135, 343–351. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2016.12.209>
- Taguchi, G., & Phadke, M. S. (1986). Quality Engineering Through Design Optimization. *Proceedings of the National Electronics Conference*, 40(pt 1), 32–39. https://doi.org/10.1007/978-1-4684-1472-1_5
- Taguchi, G., Chowdhury, S., & Wu, Y. (2004). *Taguchi's Quality Engineering Handbook*. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, ISBN 0-471-41334-8.
- Teimortashlu, E., Dehestani, M., & Jalal, M. (2018). Application of Taguchi method for compressive strength optimization of tertiary blended self-compacting mortar. *Construction and Building Materials*, 190, 1182–1191. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2018.09.165>
- Türk, K., Karatas, M., & Gonen, T. (2013). Effect of Fly Ash and Silica Fume on compressive strength, sorptivity and carbonation of SCC. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 17(1), 202–209. <https://doi.org/10.1007/S12205-013-1680-3/METRICS>
- Uluğöl, H. (2015). *Granüle yüksek fırın cürufunun çimentonun mekanik ve durabilite özelliklerine etkisi* [Doktora tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Yapı Bilim Dalı, Sakarya, Türkiye]. <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/tezSorguSonucYeni.jsp>
- Uray, E. (2014). *Gabion Tipi Dayanma Duvarlarında Tasarım Kriterlerinin Araştırılması* [Selçuk Üniversitesi]. <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/tezSorguSonucYeni.jsp>
- Uray, E., Carbas, S., Geem, Z. W., & Kim, S. (2022). Parameters Optimization of Taguchi Method Integrated Hybrid Harmony Search Algorithm for Engineering Design Problems. *Mathematics* 2022, Vol. 10, Page 327, 10(3), 327.

<https://doi.org/10.3390/MATH10030327>

Uysal, M. (2012). Taguchi and Anova approach for optimisation of design parameters on the compressive strength of HSC. *Magazine of Concrete Research*, 64(8), 727–735. <https://doi.org/10.1680/MACR.11.00156>

Warda, M. A., Khalil, H. S., Ahmad, S. S. E., & Mahdi, I. M. (2020). Optimum Sustainable Mix Proportions of High Strength Concrete by Using Taguchi Method. *Frattura ed Integrità Strutturale*, 14(54), 211–225. <https://doi.org/10.3221/IGF-ESIS.54.16>