

PAPER DETAILS

TITLE: Insaat Mühendisligi Deneysel ve Analitik Tasarımlarında Taguchi Yönteminin Kullanılabilirliğinin Arastırılması

AUTHORS: Kemal URAY, Mustafa KOÇER, Esra URAY, Hicran AÇIKEL

PAGES: 429-445

ORIGINAL PDF URL: <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/2906402>

İnşaat Mühendisliği DeneySEL ve Analitik Tasarımlarında Taguchi Yönteminin Kullanılabilirliğinin Araştırılması

Investigation of Usability of Taguchi Method in Civil Engineering Experimental and Analytical Designs

Kemal Uray¹*, Mustafa Koçer², Esra Uray³, Hicran Açikel¹

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

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

³K.T.O Karatay Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Konya, TÜRKİYE

Başvuru/Received: 20/01/2023

Kabul / Accepted: 05/03/2023

Çevrimiçi Basım / Published Online: 15/06/2023

Son Versiyon/Final Version: 15/06/2023

Öz

Yapıların tasarımı, inşası, işletilmesi ve bakımı gibi konularda çalışmalar yapan bir mühendislik dalı olan inşaat mühendisliğinde deneySEL çalışmalar, yapı malzemelerinin ve taşıyıcı sistemlerinin yük-deformasyon davranışının gözlemlenmesi ve yapılan imalatların kontrol edilmesi gibi birçok problemde vazgeçilmez çözümler üretmektedir. İnşaat mühendisliği alanında özellikle beton üretiminde ve zemin iyileştirme çalışmalarında yoğun olarak kullanılan çimentonun üretiminde önemli ölçüde CO₂ gazı salmaktadır. Bu malzemenin optimum miktarının belirlenerek daha az kullanılması, sürdürülebilir ve çevre dostu olması açısından çözülmesi gereken önemli bir problem olarak karşımıza çıkmaktadır. Uçucu kül, silis dumanı ve öğütölmüş yüksek fırın cürufu gibi atık malzemelerin ikamesiyle çimento miktarı azaltılabilmekle birlikte bu atık malzemelerin optimum değerleri önemli olmaktadır. Öte yandan istatistiksel tabanlı deneySEL tasarım yöntemleri, deneySEL çalışmaların optimum değerinin tasarımdan etkilenen parametreler dikkate alınarak araştırılmasını gerektirdiği için yaygın olarak kullanılmaktadır. İstatistik tabanlı deney tasarım yöntemlerin kullanılması ile basınç dayanımı, geçirgenlik gibi hedef değeri etkileyen faktörlerin yorumlanması ve bu faktörlerin optimum değerlerinin elde edilmesi mümkün olmaktadır. Genichi Taguchi tarafından geliştirilen yöntem sayesinde zamandan, iş gücünden, maliyetten ve enerjiden tasarruf sağlanarak güvenilir sonuçlar elde edilmekle birlikte sonuç üzerinde etkili parametrelerin etkisi ve optimum değerleri güvenilir bir şekilde elde edilebilmektedir. Bu çalışmada inşaat mühendisliğinin deneySEL çalışmalarının yoğun olarak bulunduğu yapı malzemesi ve geoteknik alanında Taguchi yönteminin kullanım alanlarına dair geniş kapsamlı literatür incelemesi verilmiş ve özellikle son yıllarda yöntemin yaygın bir şekilde istatistik deney tasarım yöntemi olarak kullanıldığı görülmüştür.

Anahtar Kelimeler

"Beton tasarımı, Geoteknik tasarım, Analitik Tasarım, Deney Tasarımı, Optimizasyon, Taguchi Yöntemi"

Abstract

Experimental studies in civil engineering, an engineering branch that studies the design, construction, operation, and maintenance of buildings, produce indispensable solutions to many problems such as observing the load-deformation behavior of building materials and bearing systems and controlling the productions. It releases a significant amount of CO₂ gas in the production of cement, which is used extensively in the field of civil engineering, especially in concrete production and soil improvement works. Determining the optimum amount of this material and using it less is an important problem to be solved in terms of being sustainable and environmentally friendly. Although the amount of cement can be reduced by substituting waste materials such as fly ash, silica fume, and ground blast furnace slag, the optimum values of these waste materials are important. On the other hand, statistical-based experimental design methods have been commonly utilized because it requires the investigation of the optimum value of experimental studies by considering parameters affected by design. By using statistical-based experimental design methods, it is possible to interpret the factors affecting the target value such as compressive strength and permeability, and to obtain the optimum values of these factors. Thanks to the method developed by Genichi Taguchi, reliable results are obtained by saving time, labor, cost, and energy, and the effect and optimum values of the parameters that affect the result can be obtained reliably. In this study, a comprehensive literature review has been submitted on the areas of use of the Taguchi method in the field of building materials and geotechnical, where experimental studies of civil engineering are intense, and it has been seen that the method has been widely used as a statistical experimental design method, especially in recent years.

Key Words

"Concrete Design, Geotechnical Design, Analytical Design, Design of Experiment, Optimization, Taguchi Method"

1. Giriş

Deney, çok eski zamanlarda temelleri atılan fizik, kimya ve matematik gibi temel bilimlerine dayanan ve mühendislik problemlerin çözümünde vazgeçilmez bir unsur olarak tanımlanmaktadır. Ayrıca, deney ortaya atılan hipotezlerin kabul ya da reddedilmesinde ve doğruluklarının kontrolünde temel rol oynamaktadır. Deney tasarımı, problemin çözümünde çoklu değişkenlerin etkisini incelemek açısından etkili bir araç olup (Bowden vd., 2019), mühendislik, hizmet ve imalat sanayinde deney performansını iyileştirmede kullanılmaktadır (Zahraee vd., 2013). İnşaat mühendisliğinde deneysel çalışmaların yoğun olarak yapıldığı yapı malzemesi ve geoteknik alanında istatistik tabanlı deney tasarım yöntemlerini ön plana çıkarmaktadır. İstatistik tabanlı deney tasarım yöntemleri, bilimsel deneylerin tasarlanması ve yürütülmesinde istatistiksel metotların kullanıldığı bir dizi yöntemdir. Bu yöntemler, deneylerin verimliliğini ve güvenilirliğini arttırmak için kullanılır ve deney sonuçlarının daha doğru bir şekilde yorumlanmasını sağlar. Full faktöriyel tasarım, kesirli faktöriyel tasarım ve Taguchi metodu istatistik tabanlı deney tasarım yöntemleridir (Aksu, 2019). Full faktöriyel tasarım, tüm faktörlerin tüm seviyelerinin tam kombinasyonunu test etmek için kullanılan bir deney tasarımı olarak tanımlanmaktadır. Kesikli faktöriyel tasarım, tam faktöriyel tasarımların yarısı veya daha azı kadar deney sayısı ile uygulanması sebebiyle daha az zaman ve maliyet gerektirmesine rağmen bazı faktörler arası etkileşimler incelenememekte ve daha az bilgi sağladığından, deney sonuçlarının yorumlanması ve istatistiksel analizi daha karmaşık hale gelebilmektedir. İstatistiksel deney tasarım yöntemleri arasında avantaj sağlayan Taguchi metodu, üretimde kaliteyi artırarak yüksek kaliteli ve düşük maliyetli ürünlerin elde edilmesi amacıyla Dr. Genichi Taguchi tarafından geliştirilmiş bir optimizasyon metodudur. Metot, farklı faktör ve seviyesinin tekrarlamadığı ve farklı faktör ve seviyelerinin dikkate alındığı tasarım matrisleri ile sayısı azaltmış deney sonuçlarının yorumlanması imkânı vermektedir. Ayrıca Taguchi metodu faktörler arasında etkileşimi grafiksel olarak gösteren ve optimum parametreleri hedef değer ile tahmin eden güçlü ve güvenilir bir yöntemdir.

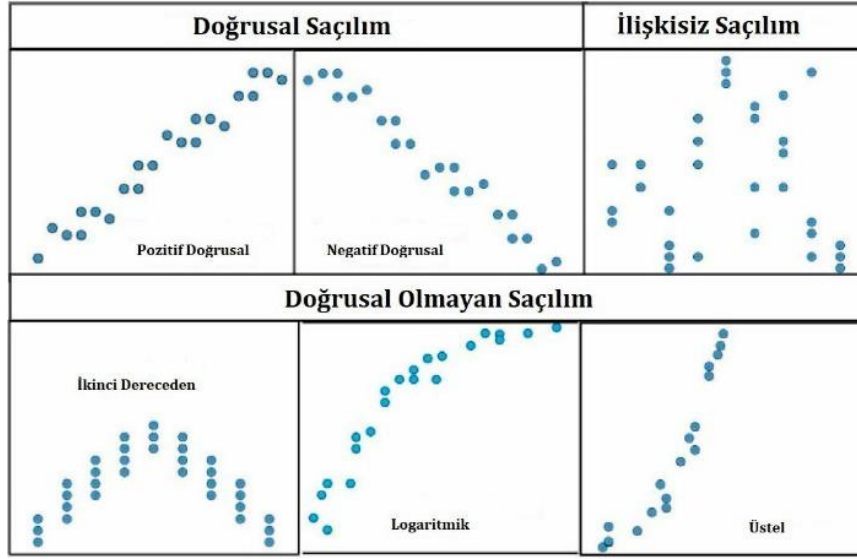
Genel olarak, birden çok parametrenin olduğu deneysel çalışmalarda, her seferinde bir parametrenin sabit tutulduğu ya da değiştirildiği yaklaşım benimsenerek parametre etkisi tespit edilmeye çalışılır. Deneyler diğer parametreler sabit alınırken tek bir parametrenin değiştirilmesiyle yapılır. Bu durum, her değişken için tekrarlanarak parametre etkisi belirlenene, basit ve doğru sonuçlar elde edilene kadar devam ettirilir. Bir deneydeki tüm faktör seviyelerinin tam kombinasyonunu test etmek için kullanılan bir istatistiksel deney tasarımı olan tam faktöriyel yöntemler; çok fazla zaman, kaynak ve işgücünü gerektirdiğinden dolayı büyük miktarlarda numune sayısı ve yoğun deneysel çalışmayı ortaya çıkarmaktadır (Dejaegher & Vander Heyden, 2011). Genelde bu tür çalışmalarda tek bir yanıt veren değişkene odaklanılırken, diğer parametrelerin birbirleriyle olan potansiyel ilişkisi göz ardı edilir (Wu vd., 2010). Birçok parametrenin etkin olduğu tasarımlarda tüm önemli parametrelerin etkisini dikkate almak için çok sayıda numune üretilmesi gerekecektir. Genel olarak, r parametre sayısı ve n parametre seviyesi için tüm kombinasyonların sayısı n^r ile ifade edilir. Örneğin 5 parametrenin ve bu parametrelerin 6 seviyesinin göz önünde bulundurulduğu deneysel bir çalışmada tüm parametrelerin seçilen farklı seviyelerine göre etkisinin görülmesi için 7.776 (6^5) veri gerekli olmaktadır. Laboratuvar koşullarında bu çalışmanın yapılması, pratik olmayan, zaman alıcı ve yüksek maliyetli bir iştir. Bu nedenle deney tasarım yöntemi çalışmalarda veri toplama ve analiz sürecini optimize etmek için seçilmektedir. Deney tasarımı, her bir değişkenin çalışılan bağımlı değişkenler üzerindeki etkisini açıklayarak doğru istatistiksel tahmin gerçekleştirmek için gereken örnek sayısını azaltarak optimize etmeyi mümkün kılmaktadır. Ancak deney tasarımı esnekliği sebebiyle, özellikle alan hakkında yeterli bilgiye sahip olmayan ve uygulama metodolojisinden yoksun araştırmacılar için sorun teşkil edebilmektedir (Tanco vd., 2008). Deney tasarımının beton malzemeleri çalışmalarında ve birçok parametrenin etkili olduğu analitik problemlerde kullanımı son yıllarda giderek artış göstermiştir. Deney tasarımının yapıldığı çalışmalar beton mukavemet tahmininden beton karışım tasarımına kadar geniş geniş bir yelpazeye yayılmaktadır. Bu bağlamda, deney sonuçlarına göre oluşturulan dağılım grafiği ile basit doğrusal regresyon analizi yaygın olarak kullanılan bir diğer yöntemdir.

Beton özelliklerinin iyileştirilmesinde çimentonun yerine ikame edilerek kullanılan ve genellikle kendi başlarına bağlayıcılık özelliği olmayan yapay mineral katkıları (puzolanlar) sanayinin atık ürünleri olarak açığa çıkmaktadır. Bu malzemelerin beton yapımında kullanılması çimento üretiminden kaynaklı çevre kirliliğinin azaltılması açısından küresel ısınmanın etkilerini önemli ölçüde hissettiğimiz günümüz dünyasında çok önemlidir. Mineral katkıları betonda, çimentonun hidrasyon ürünleri ile tepkimeye girerek bağlayıcılık özelliği kazanmaktadır. Ancak betonun hedef deney performansına ve elde edilmek istenilen beton özelliğine göre içeriğindeki malzeme bileşenlerinin optimizasyonuna ihtiyaç duyulmaktadır. Çünkü silis dumanının fazla kullanılması su gereksinimini artıracığından taze betonun işlenebilirliğini azaltan bir durumdur. Diğer yandan beton karışımında mineral katkı içeriğinin çok fazla olması dayanımda olumsuzluklara neden olabilmektedir. Yine su/bağlayıcı oranının yüksek olması durabilite açısından birçok olumsuzluğa sebep olmaktadır. Bu sebeple sürdürülebilir beton üretiminde betondan istenilen mekanik, reolojik ve dayanıklılık özellikleri açısından hedeflerin hızlı, kolay ve ekonomik olarak yakalanması yönüyle istatistiksel deney tasarımı, parametrelerin tek başına ve birbirleriyle olan etkisini yansıtmada çok önemli olmaktadır. Ayrıca deney tasarım yöntemleri sayesinde, az sayıda deney yapılarak hedef deneyin ara değerler için tahmini de yapılabilmektedir. Diğer yandan parametrelerin ara değerleri için varyans ve regresyon analizleri yapılarak matematik modeller çıkarılabilmektedir. Çok sayıda değişkenin bulunduğu, bilgisayar destekli ve yazılımların kullanıldığı birçok mühendislik probleminde parametre optimizasyonunun yapılması çok önemlidir. Bu sayede etkili parametreler üzerinde daha fazla yoğunlaşılacak ve tasarımlarda daha çok bu parametrelerin dikkate alınması sağlanacaktır. Diğer yandan tasarımlarda en etkili parametrelerin göz önüne alındığı yüksek doğruluk oranlı matematik modeller elde edilebilmektedir. Elde edilen bu modeller sayesinde hedef tasarım için hızlı ve güvenli bir şekilde sonuç elde etmek mümkün olmaktadır. Zaman, enerji ve ekonominin oldukça önemli hale geldiği günümüz dünyasında bahsedilen hederlerin karşılanması ve karmaşık mühendislik problemlerinde parametrik etkinin incelenerek optimum tasarımların elde edilmesinde istatistik tabanlı Taguchi Metodu'nun kullanımı ön plana çıkarmaktadır. Bu çalışmanın amacı inşaat mühendisliği deneysel ve analitik çalışmalarında istatistiksel tabanlı bir yöntem

olan Taguchi metodunun kullanılabilirliğinin araştırılmasına dair bir inceleme sunmaktır. Aynı zamanda bu çalışma; özellikle iş yükünün, zaman kaybının ve maliyetin yüksek olduğu deneysel çalışmalarda kolaylık sağlanması fikrinden dolayı önemli olduğu düşünüldüğünde araştırmacılara farklı bir bakış açısı oluşturacaktır. Bu çalışmada; özellikle yapı malzemesi alanında kullanılan birçok parametrenin, yöntem kullanılarak optimizasyonunun nasıl yapıldığına dair kapsamlı literatür incelemesi sunulmuştur. Bunun da ilerleyen zamanlarda yöntemi kullanmak isteyen araştırmacılar için yol gösterici olacağı düşünülmektedir.

2. Regresyon Analizi Konsepti

Regresyon analizi, bir bağımlı değişken ile birden çok bağımsız değişken arasındaki ilişkiyi belirlemek için yaygın olarak kullanılan temel istatistiksel bir yöntemdir. Basit doğrusal regresyon birbiriyle doğrusal ilişkisi olan değişkenler hakkında bize bilgi vermektedir. Basit ve temel bilgisayar yazılımları sayesinde araştırmacılar değişkenlerin birbirleriyle olan ilişkilerini kolay bir şekilde inceleyebilirler. Bu ilişki genellikle grafiksel gösterimler aracılığıyla sağlanmaktadır. Grafiksel gösterimlerde değişkenler arasında doğrusal bir ilişki varsa çizgi boyunca saçılım gözlenirken, doğrusal olmayan bir ilişki söz konusu ise saçılım genellikle bir eğri üzerinde oluşmaktadır. Ancak saçılımlar herhangi bir örüntü oluşturmuyorsa değişkenlerin birbirinden bağımsız olduğu anlaşılmaktadır. Genel olarak oluşan saçılımlar Şekil 1’de verilmiştir.



Şekil 1. Saçılım Grafikleri Genel Görünümü (Chong vd., 2021).

Değişkenler arasındaki doğrusal ilişkiyi test etmek için en temel regresyon şekli kullanılırken doğrusal olmayan ilişkilerde değişkenler arasında çoklu regresyon yapılarak geçiş sağlanabilmektedir. Bu sayede bir bağımsız değişken ele alınarak regresyon kolaylaştırıp çok yönlü hale getirilmektedir. Bundan dolayı regresyon analizleri mühendislik alanında çalışan araştırmacılar için popüler olmaktadır. Tablo 1’de regresyon tipleri için tek bir değişkene indirgenmiş dönüşümler gösterilmektedir.

Tablo 1. Farklı Durumlar İçin Regresyon İfadesi (Chong vd., 2021)

Regresyon tipi	Eşitlik	Bağımlı değişken	Bağımsız değişken
Doğrusal	$y = mx + c$	y	x
İkinci dereceden polinom	$y = Ax^2 + Bx + C$	y	x, x^2
Üstel	$y = Ae^x$	$\ln(y)$	x
Logaritmik	$y = Ax^b$	$\ln(y)$	$\ln(x)$

Regresyon analizinin farklı çeşitleri beton tasarımlarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Regresyon analizi deneysel çalışmalarda değişkenler arasındaki ilişkiyi basit ve anlaşılır bir şekilde tahmin etmek amacıyla tercih edilmektedir. Birden fazla bağımlı ya da bağımsız değişken içermeyen ve bir korelasyon ifadesi gerektiren çalışmalarda büyük oranda regresyon analizleri kullanılmaktadır. Buna göre regresyon analizlerinin yapıldığı bazı çalışmalar ve tahmin oranları Tablo 2’de verilmiştir. Regresyon değerinin 1’e yakınsaması, bağımlı ve bağımsız değişkenlerin arasında yüksek korelasyon olduğunun bir göstergesidir.

Tablo 2. Literatürde Yapılmış Bazı Regresyon Analizi Tahmin Değerleri

Araştırmacı-Yıl	Bağımlı Değişken	Metodoloji	R ²
Yeh (1998)	Beton Basınç Dayanımı	Doğrusal Regresyon	0.463- 0.588
Ramana vd. (2013)	Beton Basınç Dayanımı	Doğrusal Regresyon	0.98-1.00
Chithra vd. (2016)	Beton Basınç Dayanımı	Doğrusal Regresyon	0.63-0.67
Kocáb vd. (2019)	Beton Basınç Dayanımı	Doğrusal Regresyon	0.878-0.963
Olonade vd. (2017)	Beton Basınç Dayanımı	Doğrusal Regresyon	0.87-0.98
Zain ve Abd (2009)	Beton Basınç Dayanımı	Logaritmik Regresyon	1.00
Jin vd. (2018)	Beton Basınç Dayanımı (3gün)	Logaritmik Regresyon	0.843
	Beton Basınç Dayanımı (7gün)		0.873
	Beton Basınç Dayanımı (28gün)		0.895
	Beton Basınç Dayanımı (90gün)		0.873

3. Taguchi Metodu

Japon bilim insanı Genichi Taguchi (Taguchi vd.,1989 ; Taguchi ve Phadke 1986) tarafından geliştirilmiş Taguchi yöntemi ve deneme-yanılma yöntemine bağlı geleneksel deney tasarımı yerine araştırma maliyetini azaltan, zaman ve enerjiden kazanç sağlayan kaliteyi arttırmaya odaklı alternatif bir yöntem olarak karşımıza çıkmaktadır. Geleneksel deney tasarımı tam faktöriyel bir yöntemdir. Bundan dolayı her biri n tane parametre seviyesine bağlı r tane parametrenin hedef değer üzerinde etkisinin araştırılacağı bir deneysel çalışmada her seferinde bir parametre için değişiklik yapılarak toplamda n^r sayıda kombinasyon için deneyin tekrarlanması gerekmektedir. Bu durum özellikle klasik regresyon veya multi doğrusal regresyon (MLR) yöntemini kullanan birçok deney için geçerlidir. Yapılacak deney sayısını azaltması amacıyla araştırmacılar tarafından bazı kesirli faktöriyel yöntemler bulunmuştur (Chong vd., 2021). Taguchi yöntemi, Latin kareler serisine dayalı olan ortogonal dizi kullanılarak deney sayısı azaltılabilmektedir. Araştırmada dikkate alınacak parametre ve parametre seviyesi durumuna göre uygun ortogonal dizi seçilimi yapıldıktan sonra deney tasarım tabloları elde edilmektedir. Ortogonal dizinin altında yatan temel ilke, bazı karmaşıklıklar içerse de 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 düzenlenmiş olarak Tablo 3'te (Cimbala, 2014; Uray vd., 2022) ve tam faktöriyel ve Taguchi deney sayıları ile birlikte gösterimi Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 3. Parametre ve Seviyeler İçin 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
r	2	2	4	5	2	3	4	5	2	3	4	5	2	3	4
n	2	3	2	2	3	3	3	3	4	4	4	4	5	5	5

Tablo 4. Çalışmalarda En Çok Kullanılan Taguchi Ortogonal Diziler

Ortogonal Dizi	Parametre/Seviye (r/n)	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

Tablo 5. L4 Ortogonal Dizi Tablosu

Sıra No (L4)	Parametreler		
	A	B	C
1	1	1	1
2	1	2	2
3	2	1	2
4	2	2	1

A1 ifadesinin, A parametresinin 1. seviyesini ve C2 ifadesinin C parametresinin 2. Seviye değeri olarak gösterildiği Taguchi L4 ortogonal dizi Tablo 5'te verilmiştir. Literatürde yapılmış olan çalışmaların parametre sayısı, parametre seviye sayısı, kullanılan ortogonal dizi ve hedef performans değerine göre düzenlenmiş çizelgesi Tablo 6' da verilmiştir.

Tablo 6. Literatürde Taguchi Metodu Kullanılarak Yapılmış Çalışmalar

Araştırmacı-Yıl	Parametre /Seviye	Ortogonal Dizi	Hedef performans değeri
Uysal (2012)	4/3	L16	Basınç Dayanımı
Kate vd. (2021)	4/3	L16	Basınç Dayanımı, Eğilme Dayanımı, Çekme Dayanımı
Warda vd. (2020)	6/3	L27	Basınç Dayanımı, Eğilme Dayanımı, Çekme Dayanımı
Sevinç vd. (2017)	5/4	L16	Basınç Dayanımı, Su Emme Değeri, Çekme Dayanımı, Aşınma Direnci
Hınıslioğlu & Bayrak (2004)	4/4	L16	Eğilme Dayanımı
Uysal vd. (2019)	3/3	L9	Donma-Çözünme Direnci, Kılcal Su Emme Değeri, Klorid İyonu Geçirimsizlik Direnci, Eğilme Dayanımı
Sabarish & Paul (2020)	4/3	L9	Basınç Dayanımı
Sahoo vd. (2016)	3/4	L9	Basınç Dayanımı, Beton Kütle Kaybı
Tang vd. (2022)	4/3	L9	Basınç Dayanımı, Eğilme Dayanımı, Çekme Dayanımı
Karthik & Mohan (2021)	4/4	L16	Basınç Dayanımı
Anand vd. (2021)	7/3	L36	Basınç Dayanımı
Amer vd. (2021)	4/3	L9	Basınç Dayanımı, Slump Testi
Tanyıldızı (2021)	3/3	L9	Beton Basınç Dayanımı, Ultrasonik Darbe Hızı
Ramasamy vd. (2020)	3/3	L9	Basınç Dayanımı, Kayma Dayanımı, Çekme Dayanımı
De Side vd. (2020)	3/3	L9	Basınç Dayanımı
Tabatabaeian vd. (2018)	3/3	L9	Basınç Dayanımı, Eğilme Dayanımı, Çekme Dayanımı, Elektriksel Direnç, Ultrases Geçiş Hızı
Lee & Shin (2019)	6/3	L18	Basınç Dayanımı, Slump Testi, Çekme Dayanımı
Dave vd. (2021)	4/3	L9	Basınç Dayanımı, Slump Testi, Su Emme Deneyi, Hızlandırılmış Korozyon Deneyi
Alighardashi vd. (2019)	3/3	L9	Basınç Dayanımı, Su Emme Deneyi, Boşluk Oranı Tayini, Sertleşmiş Beton Birim Ağırlığı
Gao vd. (2021)	4/4	L16	Basınç Dayanımı, Eğilme Dayanımı, Çekme Dayanımı, Slump Testi, Su Emme Deneyi
Olivia & Nikraz (2012)	4/3	L9	Basınç Dayanımı, Eğilme Dayanımı, Hızlandırılmış Korozyon Deneyi
Sharifi vd. (2020)	6/3	L18	Basınç Dayanımı, Çekme Dayanımı, Slump Testi

Birçok araştırmacı tarafından sanayi, gıda, tarım, üretim ve mühendislik gibi birçok alanda Taguchi yöntemi kullanılmaktadır. Aynı zamanda bir optimizasyon yöntemi olduğu için farklı parametre ve seviyelerinin bulunduğu beton malzemesinin üretiminde bileşenlerin optimum değerlerini istatistiksel olarak belirlemektedir. Taguchi yöntemi birçok parametre ve parametre seviyesinin bulunduğu karmaşık karışım tasarımlarında optimum değeri ve parametrelerin hedef değer üzerine etkisini veren bir yöntemdir. Az sayıda deney yapılarak birçok parametrenin etkisi ve parametrelerin etkileşimi belirlenebildiği (Roy, 2010) bu yöntemin 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 1-3'te verilmiştir. 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. Yöntemin güvenilirliği, önerdiği parametre seviyeleri doğrultusunda doğrulama deneyleri yapılarak test edilmektedir.

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

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

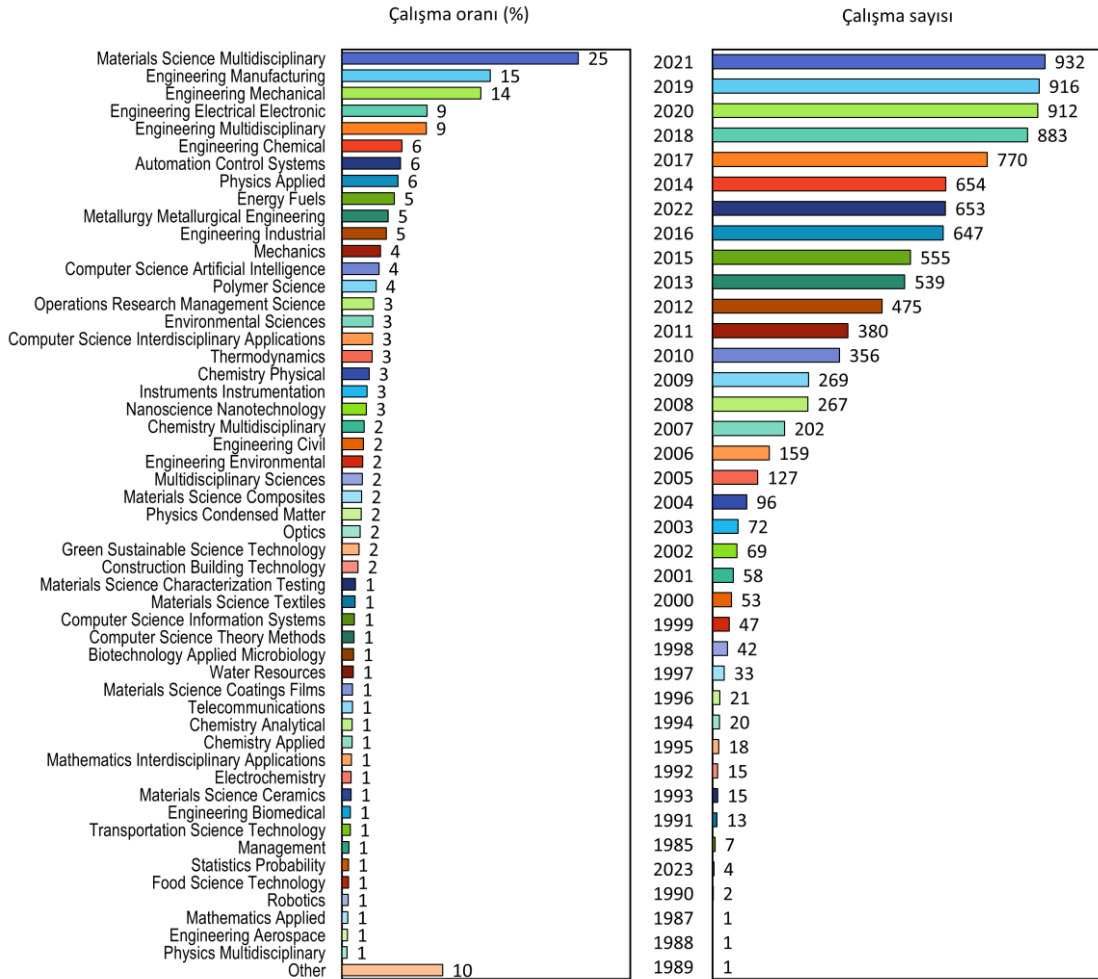
$$S/N = -10\log_{10} \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{Y_i^2} \right) \quad (3)$$

Denklemlerde, S/N oranı istatistiksel performansı, n deney tekrarı sayısını, Y_i , i. deneyin performans değerini, Y_{ort} ve σ ise deney performans değerlerinin aritmetik ve standart sapma değerini göstermektedir.

4. İnşaat Mühendisliğinde Taguchi Yöntemi Uygulamaları

Taguchi metodu, mühendisliğin birçok alanında uygulanan istatistiksel deneysel tasarıma imkân sağlayan bir metottur. Özellikle son yıllarda inşaat mühendisliği deneysel ve analitik çalışmalarında da yaygın olarak kullanılmaya başlamıştır. Taguchi yöntemi kullanılarak, çeşitli parametrelerin yüksek dayanımlı betonların basınç dayanımına olan etkisi L16-L9 ortogonal diziler kullanılarak araştırılmıştır (Kate vd., 2021; Ramasamy vd., 2020; Sharifi vd., 2020; Uysal, 2012; Warda vd., 2020). Farklı mineral katkıların kullanıldığı karışımların mühendislik özellikleri L16 ortogonal dizi kullanılarak araştırılmıştır (Sevinç vd., 2017). Geçirimli betonlarda silis dumanı ve uçucu kül katkılarının eğilme dayanımına etkisi L16 ortogonal dizi kullanılarak deneysel olarak araştırılmıştır (Alighardashi vd., 2019; Hınıslioğlu & Bayrak, 2004). Başka bir çalışmada betonda uçucu kül kullanımının betonun durabilite özelliklerine etkisi L9 ortogonal dizi kullanılarak araştırılmıştır (Uysal vd., 2019). Yöresel fiber malzemenin ve uçucu kül kullanımının betonun basınç dayanımına etkisi L9 ortogonal dizi kullanılarak deneysel olarak araştırılmıştır (Sabarish & Paul, 2020). Diğer bir çalışmada, agresif ortam koşullarında karbonatlaşmış ve normal uçucu kül kullanılarak üretilmiş betonun durabilite özelliklerini L9 ortogonal dizi kullanarak deneysel olarak araştırmışlardır (Dave vd., 2021; Sahoo vd., 2016). Taguchi yönteminin istatistiksel deney tasarımında diğer yöntemlerle birlikte kullanımı ve tahmin değerleri araştırılmıştır (Chong vd., 2021). Hafif agrega ile üretilmiş fiber donatı içeren geçirimli betonların mühendislik özellikleri Taguchi yaklaşımı kullanılarak araştırılmıştır (Tang vd., 2022). Çeşitli mineral katkılar ve parametreler kullanılarak Taguchi yöntemiyle geopolimer betonun optimum dizayn karakteristikleri belirlenmeye çalışılmıştır (Jafari vd., 2018; Karthik vd., 2021; Lee & Shin, 2019; Olivia & Nikraz, 2012; Raj vd., 2021). Başka bir çalışmada; alkali ile aktifleştirilmiş öğütülmüş yüksek fırın cürufu içeren betonun basınç dayanımı ve diğer karakterizasyonları Taguchi yöntemi kullanılarak deneysel olarak araştırılmıştır (Amer vd., 2021). Polimer emdirilmiş betonun basınç dayanımı çeşitli parametreler için Taguchi yaklaşımı kullanılarak deneysel olarak araştırılmıştır (Tanyildizi, 2021). Diğer bir çalışmada ise Taguchi yöntemi kullanılarak mineral katkı optimizasyonu yapılmıştır (De Side vd., 2020). Başka bir çalışmada; atık malzemelerin kullanımının beton özelliklerine etkisi Taguchi yaklaşımı kullanılarak deneysel olarak araştırılmıştır (Gao vd., 2021).

“Taguchi Method” anahtar kelimesi ile Web of Science web sitesinde gerçekleştirilen arama sonucunda farklı alanlarda toplamda 10,284 makale, bildiri, literatür özeti, kitap bölümü gibi akademik çalışma bulunmuştur (WOS-1, 2023). Bu çalışmaların %76’sini makaleler ve %23’ünü bildiriler oluşturmaktadır. Çalışmaların çalışma alanlarına göre yüzdeleri ve yıllara göre sayısını gösteren grafikler Şekil 2’ de verilmiştir.



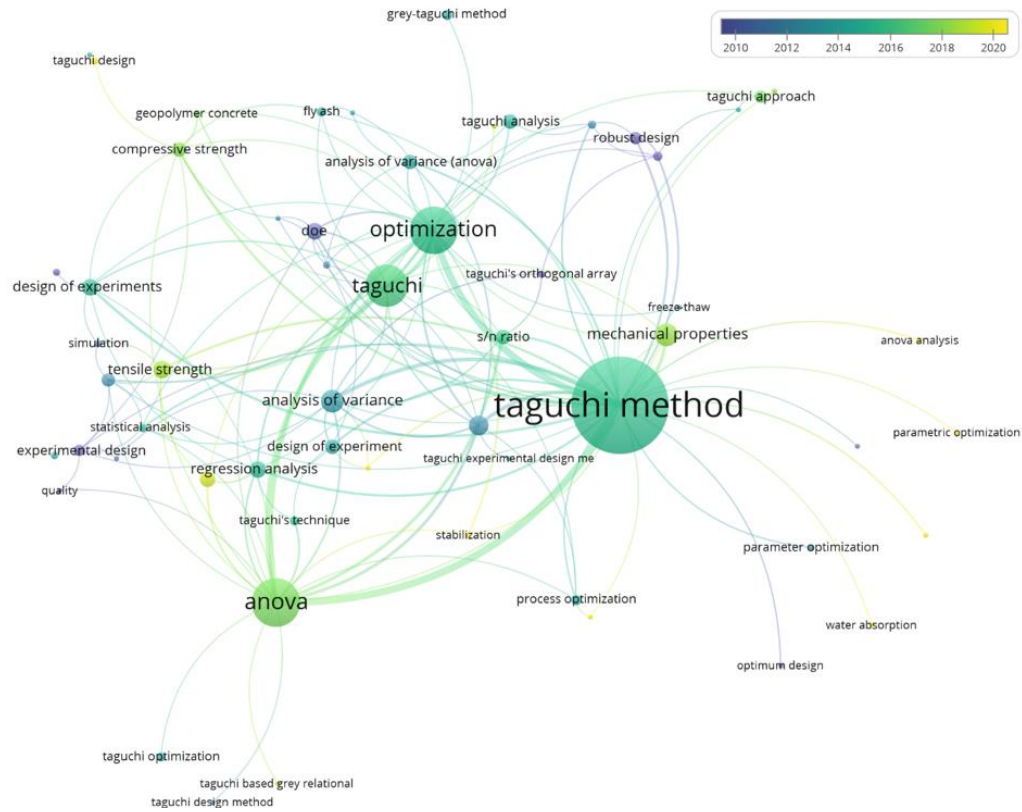
Şekil 2. Web of Science Çalışma Alanlarına ve Yıllara Göre Taguchi Metodu Literatür Tarama Sonuçları (WOS-1, 2023)

Şekil 2’ de verilen grafikler incelendiğinde 1986 ve 1989 yıllarında literatüre önerilen Taguchi (Taguchi vd., 1989; Taguchi & Phadke, 1986) metodunun günümüze kadar birçok farklı alanda ve yıllara göre artan popülerlikte kalite geliştirme ve istatistiksel deney tasarımı dayanan çalışmalarda yaygın bir kullanıma sahip olduğu görülmektedir.

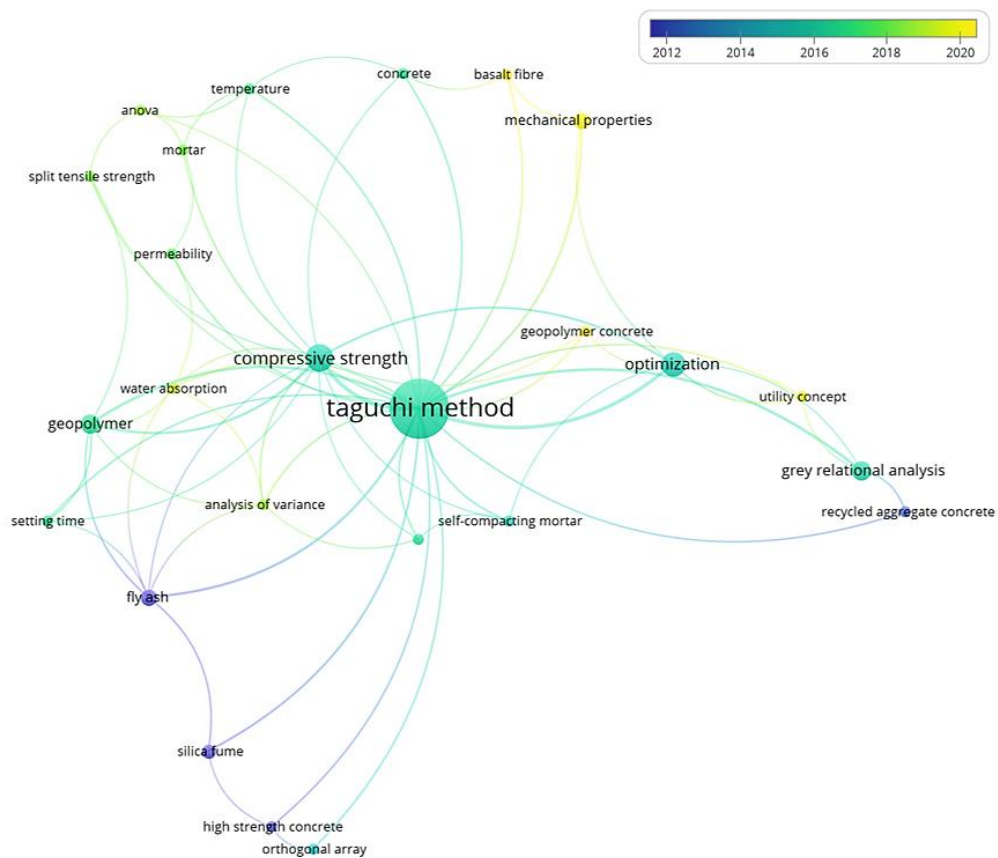
Kapsamlı literatür tarama sonuçlarının analiz edilmesinde ve görselleştirilmesinde açık kaynak kodlu bir ağ analizi ve veri görselleştirme yazılımı olan VOS VIEWER kullanılmıştır. VOS Viewer, bilimsel araştırmaların özetlenmesine, araştırma konularının belirlenmesine, ağ yapısının anlaşılmasına, araştırmalar arasındaki ilişkilerin görselleştirilmesine ve analiz edilmesine yardımcı olur. Elde tüm literatür çalışmaları yapı malzemesi ile ilişkili olan alanlara göre (Multidisciplinary-Civil Engineering) filtrelendiği elde edilen 2,704 (WOS-2, 2023) çalışmanın ortogonal dizi, Taguchi metodu, deney tasarımı, parametre optimizasyonu, uçucu kül, varyans analizi, parametre optimizasyonu, basınç dayanımı gibi anahtar kelimelerinin en az 3 kesişimi ile elde edilen ilişki ağ görseli Şekil 3’ te verilmiştir. Şekil 2’ de elde edilen 10,824 çalışmanın basınç dayanımı atfı yapan çalışma (concrete science citation topic meso) olarak filtrelenmesi ile elde edilen 233 (WOS-3, 2023) çalışmanın ilişki ağ görseli Şekil 4’ te verilmiştir. Şekil 3 ve Şekil 4’ te verilen Taguchi metodunun ilişki ağ grafikleri incelendiği zaman yöntemin son on yılda yaygın olarak yapı malzemesi alanında kullanıldığı görülmektedir.

Geoteknik alanında Taguchi metodu gibi istatistik tabanlı çalışmalar için zemin, geoteknik ve Taguchi metodu anahtar kelimeleri için Web of Science veritabanında gerçekleştirilen literatür taramasında elde edilen 142 akademik çalışmanın Vos Viewer ilişki ağ grafiği Şekil 5’ te verilmiştir (WOS-4, 2023). Geoteknik alanında zemin iyileştirme çalışmalarında, jet grout kolonları (Erkan, 2013) ve derin karıştırma kolonlarının (Yenginar, 2020) performansını etkileyen faktörlerin araştırılması gibi deneysel çalışmalarda kullanıldığı görülmüştür. Çimento, kireç, uçucu kül, silis dumanı gibi malzemelerin su ve zemin belli oranlarda ile karıştırılması ile elde edilen karışımla teşkil edilen zemin iyileştirme çalışmalarında Taguchi yöntemi ile karışım bileşenlerinin optimum değerlerinin belirlendiği ve/veya karışım bileşenlerinin serbest basınç dayanımı, geçirimsizlik gibi hedef değere etkisinin parametrik olarak incelendiği görülmüştür (Tan vd., 2014; Yenginar vd., 2021; Zaimoğlu, 2015). Ayrıca dayanma duvarı tasarımı ve şev stabilitesi gibi geoteknik problemlerin çözümünde güvenilir bir şekilde kullanılan Taguchi metoduna dayalı matematik modeller geliştirilmiştir (Tan, 2006;

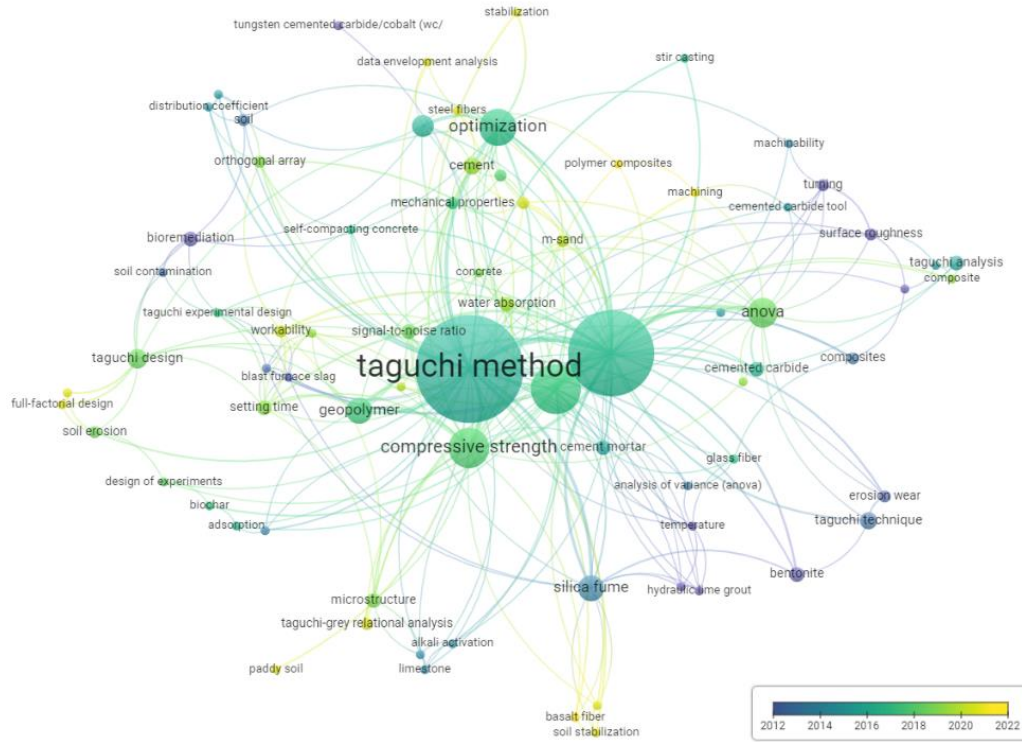
Uray vd., 2021). Taguchi metodunun kullanımının yapı malzemesi alanında daha yaygın olduğu, ancak geoteknik alanında yapılan çalışmaların sınırlı olduğu görülmüştür.



Şekil 3. İnşaat mühendisliğinde Taguchi metodunun inceleme alanlarının ilişkilendirilmesi (WOS-2, 2023)



Şekil 4. Yapı Malzemesi Alanında Taguchi Metodunun İnceleme Alanlarının İlişkilendirilmesi (WOS-3, 2023)



Şekil 5. Geoteknik Alanında Taguchi Metodunun İnceleme Alanlarının İlişkilendirilmesi (WOS-4, 2023)

Yöntemin yapı malzemesi alanında daha çok parametre optimizasyonunda kullanılmıştır. Silis dumanı, uçucu kül gibi yapay puzolan katkıları ile gerçekleştirilen beton karışım tasarımının optimum bileşenlerinin basınç dayanımı, çekme dayanımı gibi deney performans değerleri için araştırıldığı çalışmaların oldukça yaygın olduğu literatür çalışmalarından görülmektedir. Tablo 7’ de Taguchi metodu kullanılarak yapılan çalışmalara ait detaylar verilmiştir.

Tablo 7. Literatürde Taguchi Metodu Kullanılarak Yapılmış Çalışmaların Detaylı Açıklamaları.

Araştırmacı-Yıl	Çalışma Konusu	Parametreler	Özet Sonuçlar
Uysal (2012)	Çeşitli yüksek betonların dayanımına olan etkisi	parametrelerin dayanımlı basınç	Çimento Tipi Çimento dozajı Süp. Akış. Tipi SD ve UK kullanımı Kür süresi
Kate (2021)	Yüksek betonların özelliklerine etkisi	dayanımlı mühendislik çeşitli parametrelerin etkisi	Uçucu kül (UK) (Çimento ağırlığınca %30, 45, 60, 70) Çimento dozajı Süp. Akış. Çelik fiber
Warda (2020)	Yüksek betonların özelliklerine etkisi	dayanımlı mekanik çeşitli parametrelerin etkisi	Silis dumanı % (0, 5, 10) Ç. Fiber %(0, 1, 2.5) S.Ak. % (0.3, 0.5, 0.7) Agrega çapı (mm) (20, 14, 10) S/Ç oranı (0.27, 0.31, 0.35) UK % (0, 10, 20)

Tablo 8. Literatürde Taguchi Metodu Kullanılarak Yapılmış Çalışmaların Detaylı Açıklamaları (Devamı).

Araştırmacı-Yıl	Çalışma Konusu	Parametreler	Özet Sonuçlar
Sevinç (2017)	vd. Barit, kolemanit, bazaltikpomza ve yüksek fırın cürufu içeren betonların mühendislik özelliklerini Taguchi yaklaşımı kullanarak araştırılması	Pomza % (0, 2.5, 5, 10) Barit % (0, 2.5, 5, 10) YFC % (0, 2.5, 5, 10) Kolamanit % (0, 0.25, 0.5, 0.75)	28 günlük basınç dayanımında ise puzolonik etkisinden dolayı yüksek fırın cürufu yaklaşık %47'lik etki ile en etkili parametre olmuştur. 28 günlük silindir yarma deney sonuçlarında da yüksek fırın cürufu en etkili parametre olmuştur.
Hınıslıoğlu & Bayrak (2004)	Geçirimli betonlarda silis dumanı ve uçucu kül ikamesinin erken eğilme dayanımına etkisi	S/Ç oranı (0.30, 0.35, 0.40, 0.45) Gradasyon tipi UK içeriği % (0, 5, 10, 15) SD % (0, 10, 20, 30)	Araştırma sonuçlarına göre; UK ve SD çok ince olduklarından maksimum eğilme dayanımına 0,30 S/Ç oranında değil 0,35 S/Ç oranında ulaşılmıştır. Çalışmada %5'ten fazla uçucu kül ikamesinin erken yaş eğilme dayanımını (7 g) olumsuz etkilediği belirtilmiştir. Araştırmacılar SD'nın çok ince olması ve su gereksinimini artırmasından dolayı çimento matrisinde mikro büzülme çatlaklarının oluşumuna sebep olabileceğini düşünmektedir.
Uysal (2019)	vd. Betonda uçucu kül kullanımının betonun durabilite özelliklerine etkisinin Taguchi yaklaşımı ve varyans analizi kullanarak araştırılması	Çimento dozajı (260, 320, 400 kg/m ³) UK (% 0, 10, 17) Kür süresi (1, 6, 12 ay)	Araştırma sonuçlarına göre klorid iyonu geçirimsizlik deney sonuçları değerlendirildiğinde en etkili parametrenin sırasıyla %67, %33 ve %0,5 ile çimento dozajı, uçucu kül ve kür süresi olduğu belirlenmiştir. Ayrıca kılcal su emme deney sonuçları değerlendirildiğinde, en etkili parametreler sırasıyla %81, %16 ve %2 ile çimento dozajı, uçucu kül ve kür süresi olduğu belirlenmiştir.
Sabarish & Paul (2020)	Taguchi L9 ortagonal dizi kullanarak beton üretiminde kullanılan parametrelerin optimizasyonunun yapılması	S/B oranı (0.4, 0.45, 0.50) UK (%20, 25, 30) Sisal fiber (%1, 1.5, 2) M kum (%30, 35, 40)	Araştırmada kullanılan parametrelere göre; elde edilen en yüksek basınç dayanımı s/b oranının 0,45 uçucu kül oranının %20 özel nehir kumu (M-kum) oranının %35 ve sisal fiber oranının %2 olduğu seride elde edilmiştir.
Sahoo (2016)	vd. Karbonatlaşmış uçucu kül ve normal uçucu kül ikamesinin agresif ortam koşullarında (asit, sülfat ve klorür) betonun durabilite özelliklerine etkisinin araştırılması	Beton tipi (Kontrol, %25 UK katkılı, %25 karbonatlaşmış UK katkılı) Normal kür süresi (28, 56, 90 ve 180 g) Kimyasal agresif ortam (Tuzlu, Sülfatlı, Asitli)	Yapılan araştırma sonuçlarına göre yazarlar karbonatlaşmış uçucu külün özellikle asit ve sülfat saldırısına maruz kalabilecek betonlarda çimento ikame maddesi olarak kullanımının basınç dayanımında olumlu etkilerinin olduğunu göstermişlerdir
Tang (2022)	vd. Hafif agrega kullanılarak fiber donatılı geçirimli betonların optimum karışım içeriklerini ve mühendislik özellikleri Taguchi yaklaşımına göre belirlenmesi	İri agrega çapı (4.75–9.5, 9.5–12.5, 12.5–19.0) Karışım matrisi tipi (mineral katkı içeriği durumları, fiber donatı içeriği ve Süper akışkanlaştırıcı katkı durumları) İnce agrega (%0, 5, 10) Agrega/bağlayıcı oranı (yüksek, orta, düşük)	Elde edilen araştırma sonuçlarına göre hafif agregalı geçirimli betonun basınç dayanımında en etkili parametre ince agrega içeriği olmuştur. Aynı şekilde eğilme dayanımı ve çekme dayanımında da ince agrega içeriği etkili bir parametredir. Ayrıca çalışmada; silis dumanı, ultra ince silis tozu ve fiber donatının uygun miktarda kullanımının hafif agraga kullanılarak üretilmiş geçirimli betonların mühendislik özelliklerini iyileştirmede önemli olduğu belirtilmiştir.

Tablo 9. Literatürde Taguchi Metodu Kullanılarak Yapılmış Çalışmaların Detaylı Açıklamaları (Devamı).

Araştırmacı-Yıl	Çalışma Konusu	Parametreler	Özet Sonuçlar
Karthik & Mohan (2021)	Uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve silis dumanı kullanılarak Taguchi yaklaşımıyla geopolimer betonun optimum dizayn karakteristikleri araştırılması	Bağlayıcı içeriği Süper akışkanlaştırıcı dozajı (% 0.5, 1, 1.5, 2) Na ₂ SiO ₃ /NaOH oranı (1.5, 2, 2.5, 3) Molar içerik (6, 8, 10, 12)	Araştırmada sonuç olarak maksimum basınç dayanımı için optimum içerik; %45 uçucu kül, %45 yüksek fırın cürufu, %10 silis dumanı, %1,5 süper akışkanlaştırıcı, Na ₂ SiO ₃ /NaOH oranının 1,5 olduğu ve molaritenin 12 olduğu durumda gerçekleşmiştir.
Raj (2021)	vd. Geopolimer (GPC) beton üretiminde çeşitli parametrelerin basınç dayanımı açısından etkisinin, Taguchi metodu kullanılarak araştırılması	Normal P. Çim. İçeriği (% 0, 10, 20) NaOH molaritesi (10, 12, 14) Kür sıcaklığı (derece) (60, 80, 100) Kür süresi (saat) (12, 24, 36) Dinlenme periyodu (saat) (24, 48) Uçucu kül için alkali aktivatör solüsyon oranı (0.3, 0.35, 0.40) Alkali solüsyon oranı (2, 2.5, 3)	Çalışmadan elde edilen sonuçlara göre GPC basınç dayanımında %77,44 oranla en etkili parametre çimento dozajı olmuştur. Diğer yandan optimum dizayn (en büyük basınç dayanımı) için %20 çimento dozajı, 14M NaOH, 60 °C kür sıcaklığı, 36 saat kür süresi, 48 saat dinlenme süresi, alkali solüsyon oranının %2,5 ve uçucu kül içeriğinin 0,30 olduğu durumda elde edilmiştir.
Amer (2021)	vd. Alkali ile aktifleştirilen hibrit granüle yüksek fırın cürufu (GBFS)-çimentolu betonun karakterizasyonunun Taguchi metodu kullanılarak araştırılması	YFC: NPC (100:0, 80:20, 70:30) Na ₂ O (% 8, 9, 10) Solüsyon modülü (0.80, 1, 1.20) S/Bağlayıcı oranı (0.4, 0.45, 0.50) 450 kg/m ³ sabit bağlayıcı içeriği	Çalışma sonuçlarına göre yüksek oranda GBFS içeren hibrit bağlayıcı işlenebilirlik açısından olumsuz bir davranış sergilemiştir. Diğer yandan alkali ile aktifleştirilen GBFS'nin tek başına bağlayıcı olarak kullanılması işlenebilirliği ve basınç dayanımını olumlu etkilemiştir. Ayrıca NPC oranının artması mikro ölçekli çekme çatlaklarının artışına sebep olmuştur.
Tanyıldızı (2021)	Polimer emdirilmiş betonun polipropilen fiber içeriğinin Taguchi ve Anova metodu kullanılarak mekanik özellikler açısından araştırılması	Çimento dozajı (300, 350, 400 kg/m ³) Polipropilen fiber oranı (%0, %1, %2) Kür süresi (3, 7, 28)	Çalışmadan elde edilen Taguchi ve anova analizine göre ultrasonik darbe hızı deneyinin en iyi sonuçları (dinamik elastisite modülü ve beton basınç dayanımı) 28 günlük kür, %1 polipropilen fiber ve 400 kg/m ³ çimento dozajında bulunmuştur.
Ramasamy vd.(2020)	Yüksek dayanımlı betonun optimum dizayn parametrelerinin Taguchi yaklaşımı ile belirlenmesi	Bağlayıcı/agrega oranı (0.32, 0.36, 0.45) Süper akışkanlaştırıcı (kg/m ³) (6, 6.9, 7.1, 7.7) 3) S/bağlayıcı oranı (0.3, 0.27, 0.28, 0.22)	Çalışma sonuçlarına göre en fazla basınç dayanımı s/b oranının 0,27 olduğu, süper akışkanlaştırıcı miktarının 6 kg/m ³ olduğu, bağlayıcı/agrega oranının 0,45 olduğu ve fiber oranının %1 olduğu durumda gerçekleşmiştir. Ayrıca çalışmada fiber oranının %1,5 kullanılması referans betona göre basınç dayanımını azaltmıştır.

Tablo 10. Literatürde Taguchi Metodu Kullanılarak Yapılmış Çalışmaların Detaylı Açıklamaları (Devamı).

Araştırmacı-Yıl	Çalışma Konusu	Parametreler	Özet Sonuçlar
De Side vd. (2020)	Betonun optimum mühendislik özelliklerini elde etmek için çimento yerine ikame optimum silis dumanı içeriğinin Taguchi yaklaşımı kullanılarak belirlenmesi	SD (90, 120, 150 gr) Çimento (300, 480, 660 gr) Kum (1200, 1400, 1600 gr)	Çalışma sonuçlarına göre harç numunelerin basınç dayanımında en etkili parametre çimento miktarı olurken, kum ve silis dumanının etkisi birbirine yakın olarak belirlenmiştir. Ayrıca silis dumanı içeren karışımların geçirimsizlikleri referans harç numunesine göre yaklaşık %40 daha az bulunmuştur.
Jafari vd. (2018)	Polimer betonun mekanik özelliklerinin tahribatlı ve tahribatsız testler kullanılarak araştırılması	Epoksi reçinesi oranı (%10, 12, 14) Kaba agregası çapı (4.75-9.5, 9.5-19 mm) Deney ortam sıcaklığı (-15 °C, 25 °C, 65 °C)	Araştırmada yapılan tahribatsız test sonuçlarına göre iri agregası çapının ve polimer oranının artışı betonun boşluk yapısını azaltmıştır. Taguchi metoduna göre optimum içerik olarak polimer içeriğinin %14, agregası tane büyüklüğünü 9,5-19 mm ve test sıcaklığının -15 °C olduğu durum belirlenmiştir. Ayrıca çalışmada polimer betonun mekanik özelliklerini tahmin etmek için çeşitli matematik modeller önerilmiştir.
Lee & Shin (2019)	Granüle yüksek fırın cürufu ve uçucu kül katkılı geopolimer betonların basınç dayanımı ve çekme dayanımlarını Taguchi yaklaşımı ile birlikte regresyon analizleri yaparak tahmin edilmesi	Kür sıcaklığı YFC/bağlayıcı (0.20, 0.30, 0.50) Agregası/bağlayıcı Alkali solüsyon/bağlayıcı Na ₂ SiO ₃ /NaOH oranı NaOH konsantrasyonu	Çalışma sonuçlarına göre; H ₂ O/Na ₂ O molar oranı 12'den fazla olan karışımlarda slump değeri 15 cm'in üzerinde çıkarken bu oran 12'nin altına düştüğünde slump değerinde keskin düşüşler olmuştur. İşlenebilirlik açısından H ₂ O/Na ₂ O molar oranı etkin bir parametredir. YFC/bağlayıcı oranı artışı tüm seviyelerde rölatif olarak daha fazla dayanım özelliği göstermiştir. Basınç dayanımında en etkili parametre yaklaşık %50'lik oranla kür sıcaklığı olurken, ikinci baskın parametre yaklaşık %40'lık etkiyle YFC/bağlayıcı oranı olmuştur.
Dave vd. (2021)	Taguchi metodu kullanarak farklı ortam koşullarında kürlenmiş aktif alkali kompozit betonun, taze beton ve dayanım özellikleri için karışım tasarımı optimizasyonunun yapılması	Bağlayıcı içeriği (SD: %10, YFC: %30, 35, 40) Süperakışkanlaştırıcı dozajı (%1, 1.5, 2) Na ₂ SiO ₃ /NaOH oranı (2, 2.5, 3) Molar içerik (10,12,14)	Araştırma sonuçları taze betonda işlenebilirlik açısından değerlendirildiğinde; yüksek fırın cürufu yüksek kalsiyum içeriğinden dolayı işlenebilirliği olumsuz etkilemektedir. Slump değerleri açısından en etkili parametre bağlayıcı içeriğiyken ikinci en etkili parametre süper akışkanlaştırıcı dozajı olmuştur. Yüksek oranda YFC kullanımı büzülme çatlağı oluşturulduğundan basınç dayanımı açısından olumsuz özellik taşımaktadır.
Alighardashi vd (2019)	Geçirimli betonların nano silika ve ince agregası kullanarak istenilen mühendislik özelliklerine göre optimum karışım dizaynının Taguchi metodu kullanılarak belirlenmesi	S/ç oranı (0.26, 0.35, 0.45) Agregası/çimento oranı (3, 4, 5) Nano silika oranı (çimento ağırlığının (%0, 0.3, 0.6) Çimento dozajı tüm karışımlarda 300 kg/m ³ olarak alınmıştır.	Taguchi optimum tasarım sonuçlarına göre s/ç oranının 0,26 olduğu, agregası/çimento oranının 5 olduğu, nano silika içeriğinin %6 olduğu ve %20 ince agregası içeriğinin olduğu karışım optimum karışım olmuştur. Buna göre basınç dayanımında en etkili parametreler nano silika olurken ikinci en etkili parametre ince agregası olmuştur. Boşluk içeriği, geçirimsizlik ve yoğunlukta en etkili parametre ince agregası bulunmuştur.
Gao vd. (2021)	Çeşitli parametrelerin çevre dostu bazalt elyaf takviyeli betonun özelliklerine etkisinin araştırılması	Atık cam (%0, 30, 60, 100) UK (%0, 20, 40, 60) Kıyılmış basalt fiber (%0, 0.1, 0.2, 0.3)	Çalışma sonuçları genel anlamda değerlendirildiğinde bazalt lifinin %0,2 olduğu durum beton özellikleri açısından optimum durum olmuştur.

Tablo 11. Literatürde Taguchi Metodu Kullanılarak Yapılmış Çalışmaların Detaylı Açıklamaları (Devamı).

Araştırmacı-Yıl	Çalışma Konusu	Parametreler	Özet Sonuçlar
Olivia Nikraz (2012)	Uçucu kül içeren geopolimer beton karışımların optimizasyonu ve optimum karışımlardan üretilen betonun mekanik özellikleri ve dayanıklılığının Taguchi yaklaşımı kullanılarak araştırılması	Agrega içeriği (1800, 1848, 1896 kg/m ³) Alkali sol. /UK oranı (0.3, 0.35, 0.40) Sodyum silikat/sodium hidroksit oranı (1.5, 2, 2.5) Kür metodu (24 saat 60 C, 12 saat 70 C ve 24 saat 75 C)	Çalışmaya göre geopolimer beton 28 günde 55 MPa basınç dayanımına ulaşmıştır. Geopolimer betonlar kontrol karışımından daha yüksek eğilme dayanımı göstermiş, aynı zamanda daha az kuruma büzülmesi olmuştur. Ancak elastisite modülü değerlerinde kontrol numunesinden yaklaşık %15-30 arasında daha az değerler elde edilmiştir.
Sharfi (2020)	vd., Taguchi optimizasyon yöntemi kullanılarak kendiliğinden yerleşen yüksek dayanımlı betonların ele alınan parametrelere göre optimum karışım içeriklerinin belirlenmesi	Çimento miktarı (400, 425 kg/m ³) S/Ç oranı (0.35, 0.37, 0.39) Agrega oranı (0.6, 0.65, 0.70) Süp. Akş. Miktarı (1, 1.25, 1.5 kg/m ³) UK (80, 100, 120 kg) Karıştırma süresi (100, 110, 120 saniye)	Çalışma sonuçlarına göre sırasıyla; s/ç oranı, çimento miktarı ve karıştırma süresi beton karışım tasarımında en önemli parametreler olmuştur.

5. Sonuçlar

İnşaat mühendisliğinde yapı malzemeleri, yapı mekanığı ve geoteknik gibi alanlarda deneysel çalışmalar oldukça yoğun olarak kullanılmaktadır. Bu çalışma kapsamında yapılan inşaat mühendisliği literatür araştırmasında istatistiksel tabanlı deney tasarım yöntemi olan Taguchi Metodu' nun daha çok yapı malzemesi çalışmalarında ön plana çıktığı ve yöntemin araştırmacılar tarafından yaygın olarak kullanıldığı görülmüştür. İstatistiksel deney tasarımı yöntemi olan Taguchi Metodunun uzun yıllardır farklı mühendislik disiplinlerinde kullanımı son derece yaygın olduğu, ancak inşaat mühendisliği laboratuvar çalışmalarında yöntemin kullanılabilirliğinin son zamanlarda yaygınlaşmaya başladığı görülen bir diğer sonuçtur. Yöntem sayesinde birden fazla parametrenin etkisi az sayıda deney yapılarak güvenilir doğruluk aralığında tahmin edilebilmektedir. Zamanın ve iş gücünün çok önemli olduğu ayrıca kısıtlı kaynaklara sahip olduğumuz günümüz dünyasında hızlı ve güvenilir sonuçlar elde edebilmek çok önemlidir. Beton üretiminde, özellikle atık ve geri dönüştürülmüş ürünlerin kullanılabilirliği sürdürülebilirlik açısından altı çizilmesi gereken bir husustur. Bu malzemelere örnek olarak silis dumanı, granüle yüksek fırın cürufu, uçucu kül, atık betonlardan elde edilmiş agrega vb. malzemeler gösterilebilir. Ancak bu ve benzeri malzemelerin hepsini kullanarak parametre optimizasyonu yapmak; deney sayısının çokluğundan dolayı, hayli zahmetli bir çalışma gerektirecektir. Bu sebeple istatistiksel deney tasarımı, yapılan çalışmaların süresi ve iş yükü üzerinde olumlu anlamda katkı sağlayacaktır.

Taguchi yöntemi ile deney tasarımı yapılırken bağımlı değişkene bağımsız değişkenlerin etkisi belirlenmeye çalışılmaktadır. Bu bağlamda deneysel çalışmalarda yöntem tarafından tarif edilen gürültü kaynaklarının mümkün olduğunca minimize edilmesi araştırmacılarca sağlanmaya çalışılmalıdır. Örneğin çalışılan ortogonal dizi için tüm serilerde ortam koşullarının mümkün olduğunca aynı olması sağlanmalıdır. Beton numuneler üzerinde çalışılıyorsa tüm serilere eşit vibrasyon, karıştırma süresi, karışıma giren malzeme sırası gibi faktörlerde tekdüzellik sağlanmalıdır. Seriler arasında bu sürekliliğin sağlanmaması durumunun sonuçlar üzerinde çok etkili olacağı unutulmamalıdır. Çünkü bu tasarımlarda az deney ile çok sayıda parametre etkisi incelendiğinden deneysel hassasiyet bir kat daha önem kazanmaktadır. İstatistiksel deney tasarımında parametre optimizasyonun yüksek doğruluklu elde edilebilmesi için ilgili deney sonuçlarının seriyi yüksek oranda temsili için deney tekrarı bir diğer önemli husus olarak göze çarpmaktadır. Bu sebeple ilgili deney için yüksek temsil sağlanması amacıyla deney tekrarının en az üç olarak uygulanması doğru olacaktır. İlgili deney için; deney tekrarları arasında yüksek bir varyasyon katsayısı söz konusu ise; katsayıyı artıran deneysel veri ortalamadan çıkarılmalı diğer verilerle analizlere devam edilmelidir. Ancak hala yüksek varyasyon katsayısı durumu söz konusu ise deney tekrarı yapılmalıdır. Bu yüzden sonuçlar üzerinde yüksek varyasyon mutlak anlamda önemlidir. Taguchi yöntemi istatistiksel bir yöntem olup incelenen çalışmalarda yöntemi kullanan araştırmacılar parametre optimizasyonu yaparken, çoklu regresyon yöntemi uygulayarak çalışma özelinde denklemler çıkarmışlardır. Çıkarılan bu denklemlerin R2 değerleri 0,5-1,00 arasında değişmektedir. R2 değerinin düşük olduğu çalışmalar incelendiğinde; bu çalışmalarda veri setinin çok büyük olduğu daha çok literatürdeki birçok çalışmanın ortak değerlendirildiği çalışmalar olduğu görülmüştür. Ayrıca birçok parametre ve farklı bağlayıcıların bulunduğu çalışmalarda bağlayıcı matrisinin karmaşıklığından dolayı dayanımı yüksek doğruluk oranıyla tahmin eden genel bir matematik model çıkarmak zor olmaktadır.

Sonuç olarak inşaat mühendisliğinde Taguchi Metodu' nun kullanıldığı literatür çalışmalarının kapsamlı olarak araştırıldığı bu çalışmada yöntemin deneysel çalışmalarda deneme-yanılma yöntemi yerine güvenilir bir şekilde kullanılabileceği görülmüştür. Yöntemi kullanarak karmaşık problemlerin deneysel olarak çözümünde parametre etkisinin yorumlanmasına ve parametrelerin optimum çözümlerinin elde edilmesinde alternatif güçlü ve güvenilir bir yol olduğu sonucuna varılmıştır.

Referanslar

- Adisa Olonade, K., Fitriani, H., & Toluwalase Kola, O. (2017). Regression models for compressive strength of concrete under different curing conditions. *MATEC Web of Conferences*, 101, 05013. <https://doi.org/10.1051/MATECCONF/201710105013>
- Aksu, B., 2019, Kalite Geliştirmede Shainin ve Taguchi Uygulamaları, Detay Yayıncılık.
- Alighardashi, A., Mehrani, M. J., Fakhravar, N., & Ramezaniannpour, A. M. (2019). Material design and characterization of pervious concrete reactive barrier containing nano-silica and fine pumice aggregate. *Asian Journal of Civil Engineering*, 20(1), 49–56. <https://doi.org/10.1007/S42107-018-0087-3/TABLES/8>
- 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>
- Bowden, G. D., Pichler, B. J., & Maurer, A. (2019). A Design of Experiments (DoE) Approach Accelerates the Optimization of Copper-Mediated 18F-Fluorination Reactions of Arylstannanes. *Scientific Reports* 2019 9:1, 9(1), 1–10. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-47846-6>
- Chithra, S., Kumar, S. R. R. S., Chinnaraju, K., & Alfin Ashmita, F. (2016). A comparative study on the compressive strength prediction models for High Performance Concrete containing nano silica and copper slag using regression analysis and Artificial Neural Networks. *Construction and Building Materials*, 114, 528–535. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2016.03.214>
- Chong, B. W., Othman, R., Jaya, R. P., Hasan, M. R. M., Sandu, A. V., Nabiałek, 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*.
- 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>
- Dejaegher, B., & Vander Heyden, Y. (2011). Experimental designs and their recent advances in set-up, data interpretation, and analytical applications. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*, 56(2), 141–158. <https://doi.org/10.1016/J.JPBA.2011.04.023>
- Erkan, İ. H. (2013). Jet grout kolonların performansını etkileyen faktörlerin deneysel olarak araştırılması. Doktora Tezi. *Konya Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı*.
- F. M. Zain, M., M. Abd, S., F. M. Zain, M., & M. Abd, S. (2009). Multiple Regression Model for Compressive Strength Prediction of High Performance Concrete. *JApSc*, 9(1), 155–160. <https://doi.org/10.3923/JAS.2009.155.160>
- Gao, L., Adesina, A., & Das, S. (2021). Properties of eco-friendly basalt fibre reinforced concrete designed by Taguchi method. *Construction and Building Materials*, 302, 124161. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2021.124161>
- 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>
- 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. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2018.01.191>

- Jin, R., Chen, Q., & Soboyejo, A. B. O. (2018). Non-linear and mixed regression models in predicting sustainable concrete strength. *Construction and Building Materials*, 170, 142–152. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2018.03.063>
- Karthik, S., Saravana, K., Mohan, R., & Ledesma, F. (2021). A Taguchi Approach for Optimizing Design Mixture of Geopolymer Concrete Incorporating Fly Ash, Ground Granulated Blast Furnace Slag and Silica Fume. *Crystals* 2021, Vol. 11, Page 1279, 11(11), 1279. <https://doi.org/10.3390/CRYST11111279>
- 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>
- Kocáb, D., Misák, P., & Cikrle, P. (2019). Characteristic Curve and Its Use in Determining the Compressive Strength of Concrete by the Rebound Hammer Test. *Materials* 2019, Vol. 12, Page 2705, 12(17), 2705. <https://doi.org/10.3390/MA12172705>
- 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>
- Olivia, M., & Nikraz, H. (2012). Properties of fly ash geopolymer concrete designed by Taguchi method. *Materials & Design* (1980-2015), 36, 191–198. <https://doi.org/10.1016/J.MATDES.2011.10.036>
- Raj, S. R., Arulraj, P. G., Anand, N., Balamurali, K., & Gokul, G. (2021). Influence of Various Design Parameters on Compressive Strength of Geopolymer Concrete: A Parametric study by Taguchi Method. *International Journal of Engineering*, 34(10), 2351–2359. <https://doi.org/10.5829/IJE.2021.34.10A.16>
- Ramana, N. V., Harathi, R., Narasimha Babu, S., & Vinay Babu, S. (2013). Regression Models to Evaluate Compressive Strength of Polyethylene Terephthalate (PET) Fibre Reinforced Recycle Aggregate Concrete. *International Journal of Engineering Research*, 8(5), 11–16. www.ijerd.com
- Ramasamy, N. G., Lakshmi pathy, M., & Kannan Rajkumar, P. R. (2020). Optimization and Experimental investigation of High-Performance concrete. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 912(6), 062051. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/912/6/062051>
- Ross, P. J. (1988). *Taguchi techniques for quality engineering: loss function, orthogonal experiments, parameter and tolerance design*.
- Roy, R. K. (2010). *A Primer on the Taguchi Method*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.21506.84163>
- Sabarish, K. V., & Paul, P. (2020). Optimizing the concrete materials by L9 orthogonal array. *Materials Today: Proceedings*, 22, 460–464. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2019.07.720>
- Sahoo, S., Das, B. B., & Mustakim, S. (2016). Acid, Alkali, and Chloride Resistance of Concrete Composed of Low-Carbonated Fly Ash. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29(3), 04016242. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001759](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001759)
- Serencam, H., & Uçurum, M. (2019). Taguchi Deney 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>
- Sharifi, E., Sadjadi, S. J., Aliha, M. R. M., & Moniri, A. (2020). Optimization of high-strength self-consolidating concrete mix design using an improved Taguchi optimization method. *Construction and Building Materials*, 236, 117547. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2019.117547>
- Taguchi, G., Elsayed, E. A., & Hsiang, T. C. (1989). *Quality engineering in production systems*. McGraw-Hill College.
- Taguchi, G., & Phadke, M. S. (1986). Quantity 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
- Tan, O. (2006). Investigation of soil parameters affecting the stability of homogeneous slopes using the Taguchi method. *Eurasian Soil Science*, 39(11), 1248–1254. <https://doi.org/10.1134/S1064229306110135>

- Tan, O., Gungormus, G., & Zaimoglu, A. S. (2014). Effect of Bentonite, Fly Ash and Silica Fume cement injections on uniaxial compressive strength of granular bases. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 18(6), 1650–1654. <https://doi.org/10.1007/S12205-014-0227-6/METRICS>
- Tanco, M., Viles, E., Ilzarbe, L., & Alvarez, M. J. (2008). Is design of experiments really used? A survey of Basque industries. <http://dx.doi.org/10.1080/09544820701749124>, 19(5), 447–460. <https://doi.org/10.1080/09544820701749124>
- Tang, C. W., Cheng, C. K., & Ean, L. W. (2022). Mix Design and Engineering Properties of Fiber-Reinforced Pervious Concrete Using Lightweight Aggregates. *Applied Sciences* 2022, Vol. 12, Page 524, 12(1), 524. <https://doi.org/10.3390/APP12010524>
- Tanyildizi, H. (2021). Investigation of mechanical properties of polymer impregnated concrete containing polypropylene fiber by taguchi and anova methods. *Revista de la construcción*, 20(1), 52–61. <https://doi.org/10.7764/RDLC.20.1.52>
- Thawing Durability of a Fine-Grained Soil. *International Journal of Civil and Environmental Engineering*, 9(8), 1116–1120. <https://doi.org/10.5281/ZENODO.1110309>
- 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>
- Uray, E., Tan, O., Carbas, S., & Erkan, I. H. (2021). Metaheuristics-based Pre-Design Guide for Cantilever Retaining Walls. *Teknik Dergi*, 32(4). <https://doi.org/10.18400/tekderg.561956>
- 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>
- Uysal, M., Akyuncu, V., Tanyildizi, H., Sumer, M., & Yildirim, H. (2019). Optimization of durability properties of concrete containing fly ash using Taguchi's approach and Anova analysis. *Revista de la Construcción*, 17(3), 364–382. <https://doi.org/10.7764/RDLC.17.3.364>
- 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>
- WOS-1. (2023). *Web of Science*. <https://www.webofscience.com/wos/woscc/summary/24c4417b-991a-4b1a-a632-f9fe2b81c565-571adfc7/relevance/1>
- WOS-2. (2023). *Web of Science*. <https://www.webofscience.com/wos/woscc/summary/5873ee75-bca9-49b0-8ace-aa049a92b8c2-5729300f/relevance/1>
- WOS-3. (2023). *Web of Science*. <https://www.webofscience.com/wos/woscc/summary/42b3a50d-ee06-4c9d-8f26-8ea425b5fe75-572b595e/relevance/1>
- WOS-4. (2023). *Web of Science*. [https://www.webofscience.com/wos/woscc/summary/a120a56e-59fe-4a35-ba37-86c9deb3e337-74dfdf5b/relevance/1\(overlay:export/ext\)](https://www.webofscience.com/wos/woscc/summary/a120a56e-59fe-4a35-ba37-86c9deb3e337-74dfdf5b/relevance/1(overlay:export/ext))
- Wu, S. S., Li, B. Z., Yang, J. G., & Shukla, S. K. (2010). Predictive modeling of high-performance concrete with regression analysis. *IEEM2010 - IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management*, 1009–1013. <https://doi.org/10.1109/IEEM.2010.5674229>
- Yeh, I. C. (1998). Modeling of strength of high-performance concrete using artificial neural networks. *Cement and Concrete Research*, 28(12), 1797–1808. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(98\)00165-3](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(98)00165-3)
- Yenginar, Y. (2020). Derin karıştırma kolonlarının performansını etkileyen faktörlerin model deneylerle araştırılması. Doktora Tezi. *Konya Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı*.
- Yenginar, Y., Mobark, A. A. a. m., & Olgun, M. (2021). Investigating the construction parameters of deep mixing columns in silty soils. *International Advanced Researches and Engineering Journal*, 5(3), 464–474. <https://doi.org/10.35860/IAREJ.978978>
- Zahraee, S. M., Memari, A. ;, Rezaei, G. ;, Afshar, J. ;, & Rohani, J. B. M. (2013). Teaching the Design of Experiment and Response Surface Methodology Using Paper Helicopter Experiment. Paper presented at 4th International Graduate conference on Engineering.

Science and Humanity. <https://www.researchgate.net/publication/259589822>

Zaimoğlu, A. Ş. (2015). The Effect of Randomly Distributed Polypropylene Fibers Borogypsum Fly Ash and Cement on Freezing-