

# İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

Alanında Uluslararası Çalışmalar

Mart 2025

EDİTÖRLER

PROF. DR. EROL İSKENDER

 SERÜVEN  
YAYINEVİ

**Genel Yayın Yönetmeni / Editor in Chief • Eda Altunel**

**Kapak & İç Tasarım / Cover & Interior Design • Serüven Yayınevi**

**Birinci Basım / First Edition • © Mart 2025**

**ISBN • 978-625-5552-95-2**

**© copyright**

Bu kitabın yayın hakkı Serüven Yayınevi'ne aittir.

Kaynak gösterilmeden alıntı yapılamaz, izin almadan hiçbir yolla çoğaltılamaz. The right to publish this book belongs to Serüven Publishing. Citation can not be shown without the source, reproduced in any way without permission.

**Serüven Yayınevi / Serüven Publishing**

**Türkiye Adres / Turkey Address:** Kızılay Mah. Fevzi Çakmak 1. Sokak

Ümit Apt No: 22/A Çankaya/ANKARA

**Telefon / Phone:** 05437675765

**web:** www.seruvenyayinevi.com

**e-mail:** seruvenyayinevi@gmail.com

**Baskı & Cilt / Printing & Volume**

Sertifika / Certificate No: 42488

# İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

ALANINDA ULUSLARARASI ÇALIŞMALAR

**EDİTÖRLER**

**PROF. DR. EROL İSKENDER**



## İÇİNDEKİLER

### Bölüm 1

#### **RAO-1 ALGORİTMASI İLE SİSMİK İZOLASYONLU ÇELİK UZAY KAFES ÇATI SİSTEMİN AĞIRLIK OPTİMİZASYONU**

*Muhammet YURDAKUL —1*

### Bölüm 2

#### **FARKLI BOYUTLARDA ÜRETİLEN ÇİMENTO ESASLI HARÇLARIN YÜKSEK SICAKLIK PERFORMANSININ DEĞERLENDİRİLMESİ**

*Enes EKİNCİ —21*

### Bölüm 3

#### **ATIK CAM TOZU KULLANILARAK ÜRETİLEN GEOPOLİMER KOMPOZİTLERİN PERFORMANSLARI**

*Nurullah ÖKSÜZER —33*





**RAO-1 ALGORİTMASI İLE SİSMİK İZOLASYONLU  
ÇELİK UZAY KAFES ÇATI SİSTEMİN AĞIRLIK  
OPTİMİZASYONU**

*Muhammet YURDAKUL<sup>1</sup>*

---

<sup>1</sup> Dr. Öğr. Üyesi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, OF Teknoloji Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, 0000-0002-3904-3206

## 1. Giriş

Mühendislikte, özellikle sismik kuvvetlerin etkisi nedeniyle, yapıların hafif ve uygun maliyetli olacak şekilde tasarlanması arzu edilen bir ilkedir. Bu ilke doğrultusunda çelik uzay kafes çatı sistemi (ÇUKÇS), yüksek mukavemeti ve hafifliği ile öne çıkmaktadır. Bu yapılar; hafiflik, kolay inşa edilebilirlik ve düşük deprem kuvveti gibi avantajları sayesinde geniş açıklıklı çatılar (stadyumlar, havaalanları, yüzme havuzları, spor salonları, uçak hangarları, konferans salonları, ticaret merkezleri vb.) için en uygun seçeneklerden biridir. Bu özellikleri, ÇUKÇS'yi geleneksel sistemlere kıyasla daha az malzeme kullanılarak geniş açıklıklı yapılar için inşa edilebilen önemli bir yapısal sistem haline getirmektedir. Ancak, ÇUKÇS'de uygun elemanları belirlenmesi, yapı ağırlığı ve maliyet açısından büyük önem taşımaktadır. Bu nedenle, ÇUKÇS'nin minimum ağırlığını belirlemek amacıyla çeşitli optimizasyon teknikleri geliştirilmiştir.

Yi vd.[1], sistemin ağırlığını en aza indirmek ve yapının mukavemetini en üst düzeye çıkarmak amacıyla bir kafes sistemi üzerinde çalışmışlardır. Çalışmalarında, çeşitli performans kriterlerini çok amaçlı optimizasyona dahil etmek için bir teknik geliştirmişlerdir. Kave ve Mahjoubi [2] tarafından önerilen Lion Pride Optimizasyon Algoritması (LPOA), en iyi tasarımları oluşturmak için kullanılmıştır. Bu algoritmanın etkinliği, literatürde belgelenen çeşitli metasezgisel yaklaşımlarla karşılaştırılmıştır. Yapılan karşılaştırmalar, LPOA'nın gerçek dünyadaki pratik mekansal kafes yapılandırılmalarını çözmek için uygulanabilirliğini ortaya koymuştur. Grzywinski vd. [3], destekli kubbe yapıların ideal kütlelerini belirlemek için Jaya yöntemini kullanmışlardır. Çalışmaları, bu algoritmanın frekans kısıtlamaları olan yapılar için optimum tasarımı belirlemede yararlı bir araç olduğunu göstermiştir. Georgioudakis ve Plevris [4], sınırlı yapısal optimizasyon problemlerini ele almak amacıyla kafes yapılarıdaki çeşitli diferansiyel evrim varyasyonlarının etkinliğini incelemişlerdir. Her bir diferansiyel evrim varyasyonunun performansını hem iki boyutlu hem de üç boyutlu yapılar üzerinde değerlendirmek için beş farklı yapı kullanmışlardır. Poitras vd. [5], Peloton Dinamikleri Optimizasyonu (PDO) tabanlı değişken bir optimizasyon yaklaşımını farklı kafes tasarımlarını belirlemek için kullanmışlardır. Çalışmalarında elde ettikleri bulgular, daha az kullanıcıya özgü parametre içermesine rağmen PDO algoritmasının birçok rakip optimizasyon stratejisinden daha iyi performans gösterdiğini ortaya koymuştur. Khatir vd. [6], karmaşık yapılarda hasar teşhisi için son optimizasyon stratejilerini kullanan gelişmiş bir Frekans Tepki Fonksiyonu göstergesini incelemişlerdir. Çalışmaları sonucunda, Yapay Goril Askerleri Optimizatörünün yakınsama yöntemleri açısından en yüksek verimliliğe sahip olduğunu göstermişlerdir. Dang ve ark. [7], iki boyutlu ve üç boyutlu kafes sistemleri için tek adımlı bir opti-



mizasyon yöntemi tasarlamışlardır. Elde ettikleri sonuçlar, bu yöntemin alternatif son teknoloji algoritmalara kıyasla daha etkili olduğunu göstermiştir. TLBO algoritması kullanılarak ayak köprüsü kablolarının germe kuvvetlerini belirleyen bir çalışma da Atmaca tarafından yürütülmüştür [8]. Habibi ve Bidmeshki [9], çelik uzay kafes yapılarının analizine yönelik optimizasyona dayalı bir yaklaşım geliştirmişlerdir. Doğrusal olmayan çözümler elde etmek için yer değiştirme kısıtlamalarına sahip bir objektif fonksiyon kullanmışlardır. Bu yöntem, karmaşık doğrusal olmayan davranışları yakalayarak burkulma öncesi ve sonrası denge yolunu doğru bir şekilde takip etmektedir. Artar ve Daloğlu [10], Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik (2007) ve AISC-ASD standartlarını izleyerek sismik yükler altındaki kafes yapılarını tasarlamak için Jaya algoritmasını kullanmışlardır. Kullandıkları algoritma, sismik yüklemenin dahil edilmesiyle minimum tasarım ağırlığını önemli ölçüde artırmasına rağmen, önceki yöntemlere kıyasla daha hafif tasarımlar üretmiş ve bu sayede verimlilik ile pratiklik sağlamıştır.

İnşaat mühendisliği alanında, Rao algoritmalarını kullanan az sayıda çalışma bulunmaktadır. Bununla birlikte, sismik olarak izole edilmiş çelik uzay kafes çatı tasarımında Rao algoritmalarının kullanımına dair çalışmaların eksikliği literatürde göze çarpmaktadır. Sismik izolasyon sistemleri yer almayan kafes sistemlerde Rao algoritmalarını kullanan çalışmalar literatürde bulunmaktadır. Dede vd. [11], kafes kubbe yapılarında Rao algoritmalarını kullanmışlardır. Çalışmalarında, kubbe tipi yapıların optimizasyonunu, tasarım değişkenleri olarak ilk beş doğal frekans ve kafes çubuğu elemanlarının kesit alanlarını dikkate alarak gerçekleştirmişlerdir. Optimizasyon sürecinde birkaç dinamik kısıtlama göz önünde bulundurulmuş ve MATLAB'ın GUI ara yüzünü kullanılmıştır. Ayrıca, optimizasyon sürecinde MATLAB GUI kullanan başka araştırmacılar da bulunmaktadır [12–20]. Grzywinski [21], kafes sistemin optimizasyon sürecinde Rao-2 ve Rao-1 algoritmalarını kullanmıştır. Yazar, boyut ve şekil optimizasyonu için hem ayrık hem de sürekli tasarım değişkenleri kullanmıştır. Önerilen yaklaşımın etkinliğini ve güvenilirliğini göstermek amacıyla çalışmanın optimum bulgularını literatürdeki sonuçlarla karşılaştırmıştır. Temur [22], hibrit öğretim ve öğrenmeye dayalı bir optimizasyon yöntemi kullanarak betonarme yapıların ideal planını belirlemek için bir araştırma yürütmüştür. Problemin tasarımını kolaylaştırmak adına Rao-2 ve Rao-1 algoritmalarını kullanmıştır. Kalemci [23], Rao-3 algoritmasını kullanarak bir betonarme istinat duvarı tasarımı üzerinde çalışma yapmıştır. İstinat duvarında kullanılan çelik ve betonun birleşik ağırlığını hedef fonksiyon olarak belirlemiştir. Pham ve Tran [24], Rao-1 ve Rao-2 algoritmalarını modifiye ederek FBSmRao algoritmasını önermiş ve kafes sistem elemanlarının boyut optimizas-

yonunda bu algoritmayı kullanmışlardır. Yakak vd. [25], Rao-1 ve Rao-2 algoritmaları aracılığıyla güneş panelli ve güneş panelsiz kafes çatı tasarımları üzerine bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarında, Rao-1 algoritmasının üstün sağlamlık ve stabilite sergilediğini göstermişlerdir.

Son on yılda, sismik izolasyon sistemleri ve üst yapılarda optimizasyon kullanarak en verimli tasarımı elde etmek amacıyla çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Rizzian vd. [26], binaların taşıyıcı elemanlarını ve elastomerik izolatör mesnet parametrelerini optimize eden bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarının temel amacı, üst yapının malzeme maliyetlerini azaltmak, üst kat ivmesini iyileştirmek ve üst kat yer değiştirmesini minimize etmektir. Xu vd. [27], silindirik olarak birbirine bağlı bir deprem izolasyon sisteminin parametrelerini optimize eden bir çalışma yapmışlardır. Bu sismik izolasyon sistemini optimize etmek için genetik algoritma (GA) kullanmışlardır. Fan vd. [28], kurşun kauçuk çekirdekli sismik izolasyon sistemini kullanan yüksek katlı bir mega bina için bir optimizasyon tekniği sunmuşlardır. Bu yöntemi kullanarak yapının optimum eleman boyutlarını belirlemişlerdir.

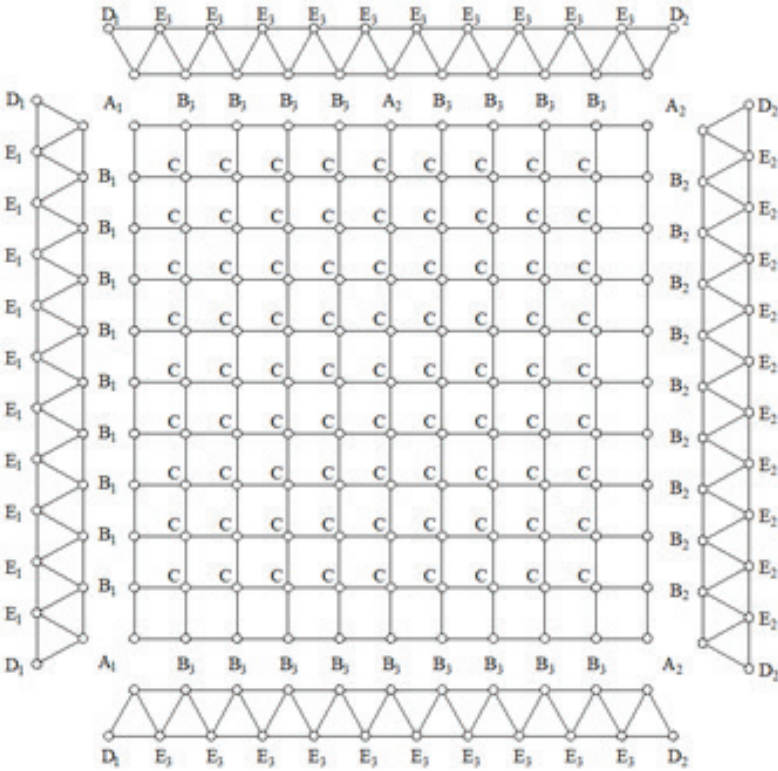
Oncu-Davas vd. [29], uzak fay zemin hareketlerine maruz kalan bir binada doğrusal olmayan bir izolasyon sisteminin yapısal tepkisini geliştirmek amacıyla TLBO algoritmasını kullanmışlardır. Dayanıklı ve düşük standart sapmalara sahip TLBO yaklaşımının, ideal doğrusal olmayan izolasyon sistemi parametrelerini belirlemek için kullanılabilir olduğunu göstermişlerdir. Dang vd. [30], sismik izolasyonlu bir binanın tasarımı için iki aşamalı bir optimizasyon yöntemi üzerinde çalışmışlardır. Çalışmanın ilk aşamasında, doğrusal olmayan davranışa sahip üç boyutlu bir modeldeki sismik izolatörün parametrelerini genetik algoritma ile optimize etmişlerdir. İkinci aşamada ise izolasyon mesnetlerinin konfigürasyonunu ve maliyetini iyileştirmişlerdir. Xu ve arkadaşları [31], yüksek katlı binalarda göçme ihtimalini göz önünde bulundurarak sürtünmeli sarkaç tipi izolatör mesnetlerin özelliklerini belirlemek için bir optimizasyon tasarım yöntemi sunmuşlardır. Yaptıkları karşılaştırmalı analiz sonuçları, önerilen yöntemin çökme olasılığını ve sismik tepkiyi azaltmada etkili olduğunu göstermiştir.

Bu çalışma, literatürdeki kritik boşlukları ele alarak önceki araştırmalara kıyasla çeşitli ilerlemeler ortaya koymaktadır. TESS mesnet sistemi ile depremden izole edilmiş çelik uzay kafes çatı sisteminin (ÇUKÇS) toplam ağırlığını optimize ederek yapısal optimizasyona yeni bakış açıları sunmaktadır. İzole edilmiş ve izole edilmemiş ÇUKÇS tasarımlarının karşılaştırılması, sismik izolasyon etkilerinin anlaşılmasını geliştirmektedir. Ayrıca, bu çalışma daha verimli süreçler sağlamak amacıyla SAP2000'in OAPI işlevlerini MATLAB ile entegre ederek, yapısal optimi-

zasyonda nadiren kullanılan Rao-1 algoritmasını kullanmaktadır. Tüm bunlarla birlikte bu çalışma, çeşitli yük kombinasyonlarını göz önünde bulundurarak kapsamlı bir yaklaşım sunmakta ve gelecekteki uzay kafes çatı tasarımları için önemli bir referans kaynağı olmaktadır.

## 2. Seçilen Çelik Uzay Kafes Çatı Sistemi

Sayısal örnek olarak seçilen ÇUKÇS 20×20 plana sahiptir. x ve y doğrultusunda 10 eşit aralıklı segmentler, 2 metre uzunluğunda ve 1,5 metre yüksekliğindedir (Şekil 1). Aynı yük uygulanan düğüm noktaları aynı harf ile gösterilmiştir. ÇUKÇS'nin çelik sınıfı S235'dir. Tüm kafes elemanları boru kesitleri olarak kabul edilir. ÇUKÇS'nin boru kesitleri Tablo 1'de verilmiştir.



Şekil 1 ÇUKÇS planı ve düğüm noktaları isimlendirilmeleri

**Tablo 1** *Ağırlık optimizasyonunda kullanılan kesit özellikleri*

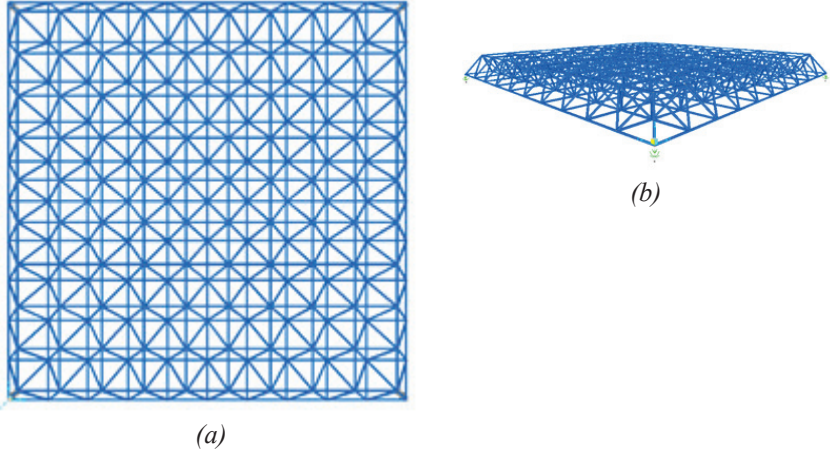
Kesit tipi	Kesitlerin detayları D×t (mm)	Kesit alanları(m <sup>2</sup> )	Dönüş çapları (m)
	76.1×3.2	7.329×10 <sup>-4</sup>	0.0258
	82.5×3.2	7.972×10 <sup>-4</sup>	0.0281
	88.9×3.2	8.616×10 <sup>-4</sup>	0.0303
	101.6×3.6	1.108×10 <sup>-3</sup>	0.0347
	108×3.6	1.181×10-3	0.0369
	114.3×3.6	1.252×10-3	0.0392
	127×3.6	1.546×10-3	0.0435
	133×4	1.621×10-3	0.0456
	139.7×4	1.705×10-3	0.0480
	152.4×4	1.865×10-3	0.0525
	159×4	1.948×10-3	0.0548
TUBO-D	168.3×4	2.065×10-3	0.0581
	193.7×4.5	2.675×10-3	0.0669
	219.1×5	3.363×10-3	0.0757
	244.5×5.4	4.056×10-3	0.0846
	273×5.6	4.704×10-3	0.0946
	298.5×5.9	5.423×10-3	0.1035
	323.9×5.9	5.894×10-3	0.1125
	355.6×6.3	6.913×10-3	0.1235
	368×6.3	7.159×10-3	0.1279
	406.4×6.3	7.919×10-3	0.1415
	419×7.1	9.188×10-3	0.1456
	457.2×7.1	0.010	0.1591

*D:boru çapı; t:kalınlık*

### 3. Sonlu Eleman Modeli ve Uygulanan Yükler

ÇUKÇS'nin sonlu eleman modeli SAP2000 [32] programı kullanılarak modellenmiştir. ÇUKÇS'nin 3 boyutlu sonlu eleman modeli 800 kafes eleman, 221 düğüm noktasından oluşmaktadır. Kısıtlama diyagramı tüm E ve D düğüm noktalarına tanımlanmıştır. Kısıtlama genellikle düzlemde çok yüksek rijitliğe sahip ve düzleme ait düğüm noktalarının rijit bir şekilde hareket ettiği sismik izolasyonlu çelik kafesleri modellemek için kullanılır. Çalışmada ÇUKÇS'un yapısal analizinde hem statik hem de dinamik yükler kullanılmıştır. Statik yükler olarak, kafes elemanlarının öz ağırlığı, kaplama malzemesi, kar yükü ve rüzgar yükü dikkate alınmıştır. Kaplama yükünün 0.055 kN/m<sup>2</sup> olduğu varsayılmıştır. Rüzgar ve kar yükleri Türk Standartları Enstitüsü'ne (TSI 498) göre hesaplanmıştır [33]. Tüm statik yükler, etkili alanlarıyla hesaplanıp ve Şekil 1'de gösterilen düğüm noktalarına uygulanmıştır. Düğüm noktalarına uygulanan

yükler Tablo 2’de verilmiştir. Çeşitli kombinasyonlar kullanılarak uygulanan yük birleşimleri Tablo 3’de verilmiştir.



**Şekil 2.** Sismik izolasyonlu ÇUKÇS sonlu eleman modeli , (a) üstten görünüşü, (b) 3 boyutlu görünüşü

**Tablo 2** Düğüm noktalarına uygulanan yükler

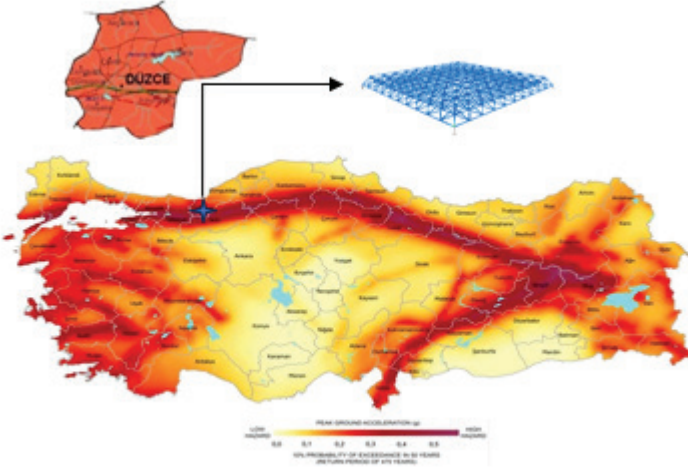
	Yön	Düğüm noktası										
		A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	B <sub>3</sub>	C	D <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>	E <sub>1</sub>	E <sub>2</sub>	E <sub>3</sub>
CL (kN)	X	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Z	-0.19	-0.19	-0.21	-0.21	-0.21	-0.22	-0.07	-0.07	-0.10	-0.10	-0.10
WL (kN)	X	0.36	0.24	0.54	0.36	—	—	—	—	0.54	0.36	—
	Z	0.20	0.20	0.40	0.40	—	—	—	—	—	—	—
SL (kN)	X	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Z	-2.73	-2.73	-3.92	-3.92	-3.95	-6.0	-1.80	-1.80	-2.70	-2.70	-2.70

—: yük yok; CL: kaplama yükü; WL: rüzgar yükü; SL:kar yükü

**Tablo 3** Yük kombinasyonları

Durum	Deprem	Kaplama	Öz ağırlık	Kar	Rüzgar	Yük kombinasyonu
1	—	+	+	+	—	C+D+S
2	+	+	+	+	—	E+C+D+S
3	—	+	+	+	+	C+D+S+W
4	—	+	+	+	-	C+D+S-W

—:yük yok



Şekil 3 Düzce ilinin TDRH'e göre tektonik yapısı [35]

Parametreler		Fonksiyon Grafiği
Kısa periyot harita spektral ivme katsayısı, $S_s$	1.573	
1.0 saniye periyot için harita spektral ivme katsayısı, $S_1$	0.433	
Sabit yer değiştirme bölgesine geçiş periyodu	6.0 sn	
Zemin sınıfı	ZC	
Kısa periyot zemin katsayısı, $F_s$	1.200	
1.0 sn periyot için zemin katsayısı, $F_1$	1.500	
Kısa periyot tasarım spektral ivme katsayısı, $S_{DS}$	1.888	
1.0 saniye periyot için tasarım spektral ivme katsayısı, $S_{D1}$	0.650	

Şekil 4 Yatay Elastik Deprem Tasarım Spektrumu

## 4.2. TESS mesnedinin tasarım parametreleri

Sismik izolatörlerin kullanımı, yapılar için çeşitli avantajlar sunar. En önemli faydalarından biri, yapının hâkim frekansını düşürerek üst yapıyı göreceli olarak daha rijit hâle getirmesidir. Yer değiştirmenin büyük bir kısmı sismik izolatörlerde meydana geldiğinden, üst yapıyı esnek yaparak yapının deprem kuvvetlerine direnme yeteneğini artırır. Buna ek olarak, sismik izolatörler sismik olaylar sırasında yapıya aktarılan ivmeleri azaltmaya yardımcı olur, esnekliğe katkıda bulunur ve olası hasarı en aza indirir.

Sismik izolatörler genellikle iteratif bir yaklaşım kullanılarak boyutlandırılır. İterasyon süreci, başlangıçta analiz edilen ve test edilen ilk tasarım parametrelerinin seçilmesiyle başlar. Sonuçlar incelendikten sonra, performansı iyileştirmek amacıyla bu değerlerde ayarlamalar yapılabilir. Bu yinelemeli sürecin temel amacı, optimizasyon için tasarımı kademeli olarak iyileştirmektir. Öncelikle belirli bir sismik izolatör tasarımı için parametreler belirlenir. Daha sonra, izolatörün kapasitesi ve davranışı değerlendirilerek yapısal bütünlüğünün istenen kriterleri karşıladığı doğrulanır. Değerlendirme sonucuna bağlı olarak, başlangıç parametreleri performansı artırmak veya belirli gereksinimleri karşılamak üzere değiştirilebilir. Bu süreç, tasarım istenen performans kriterlerini karşılayana kadar tekrarlanır ve her yineleme, tasarımın daha da optimize edilmesini ve gerekli standartları sağlamasını amaçlar.

Bu bölümde, TESS mesnet tipi izolatörün tasarımı gerçekleştirilmiştir. Tasarım, TBDY 2018 yönetmeliğine uygun olarak yapılmıştır. TESS'in istenilen sismik izolasyon etkilerini sağlayabilmesi için hem sarkaç tarafından desteklenen ağırlık hem de geometrik özellikler kullanılmıştır. TESS mesnedinin referans tasarım değerleri ve uygulanan düşey yük Tablo 5'te verilmiştir.

Tablo 5'te verilen  $\mu_e$  ve  $R_e$  sırasıyla kayan yüzeyler arasındaki sürtünme katsayısını ve etkin eğrilik yarıçapını ifade etmektedir.  $P$ , izolatöre uygulanan ölü yük, kaplama yükü ve kar yükünün birleşimi olan düşey yükü temsil eder.  $D_e$  ve  $D_y$  sırasıyla izolatörün yer değiştirme değerine ve başlangıç akma yer değiştirmesini ifade eder.

Tablo 6'da sismik izolatörün boyutlandırılması için yapılan yinelemeler sonucunda belirlenen tasarım parametreleri verilmektedir. SAP2000'de link eleman olarak modellenen toplam 4 adet TESS, ÇUK-ÇS'nin dört köşesine yerleştirildi (Şekil 5). Tablo 5 ve 6'daki izolatör tasarım parametreleri ve Tablo 7'de verilen hem doğrusal hem de doğrusal olmayan analiz durumları için etkili rijitlik ve sönümleme değerleri programa girildi ve uygun link elemanlarına atandı.

**Tablo 5** Referans izolatör ve ona uygulanan düşey yük için başlangıç tasarım değerleri

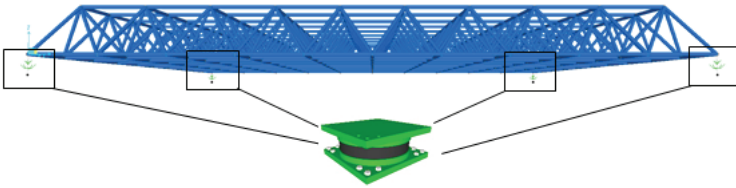
$\mu_e$	$R_e$ [m]	P [kN]	$D_e$ [m]	$D_y$ [m]
0.096	4.5	1007	0.33	0.00254

**Tablo 6** TESS mesnet sisteminin tasarım parametreleri

$K_{eff}$ (Etketif rijitlik)	517 kN/m
$\beta_{eff}$ (Etketif sönüm oranı)	0.36→0.30
$\eta$ (Sönüm ölçekleme faktörü)	1.374
T (TESS mesnedin periyodu)	2.8 sn.
$S_a$ (Spektral ivme)	0.169g
$S_d$ (Spektral yer değiştirme)	0.33m= $D_e$ ✓

**Tablo 7** TESS mesnedin doğrusal ve doğrusal olmayan analizleri için efektif rijitlik ve efektif sönüm değerleri

Doğrusal analiz durumu (U2-U3)	Etketif rijitlik( $K_{eff}$ ) [kN/m]	129
	Etketif sönüm ( $\beta_{eff}$ )	0.30
Doğrusal analiz durumu (U1)	Etketif rijitlik ( $K_e$ ) [kN/m]	3000000
	Etketif sönüm ( $\beta_e$ )	0.30
Doğrusal olmayan analiz durumu (U2-U3)	Etketif rijitlik ( $K_{effnl}$ ) [kN/m]	9515
	Etketif sönüm ( $\beta_e$ )	0.30
Doğrusal olmayan analiz durumu (U1)	Etketif rijitlik ( $K_e$ ) [kN/m]	3000000
	Etketif sönüm ( $\beta_e$ )	0.30

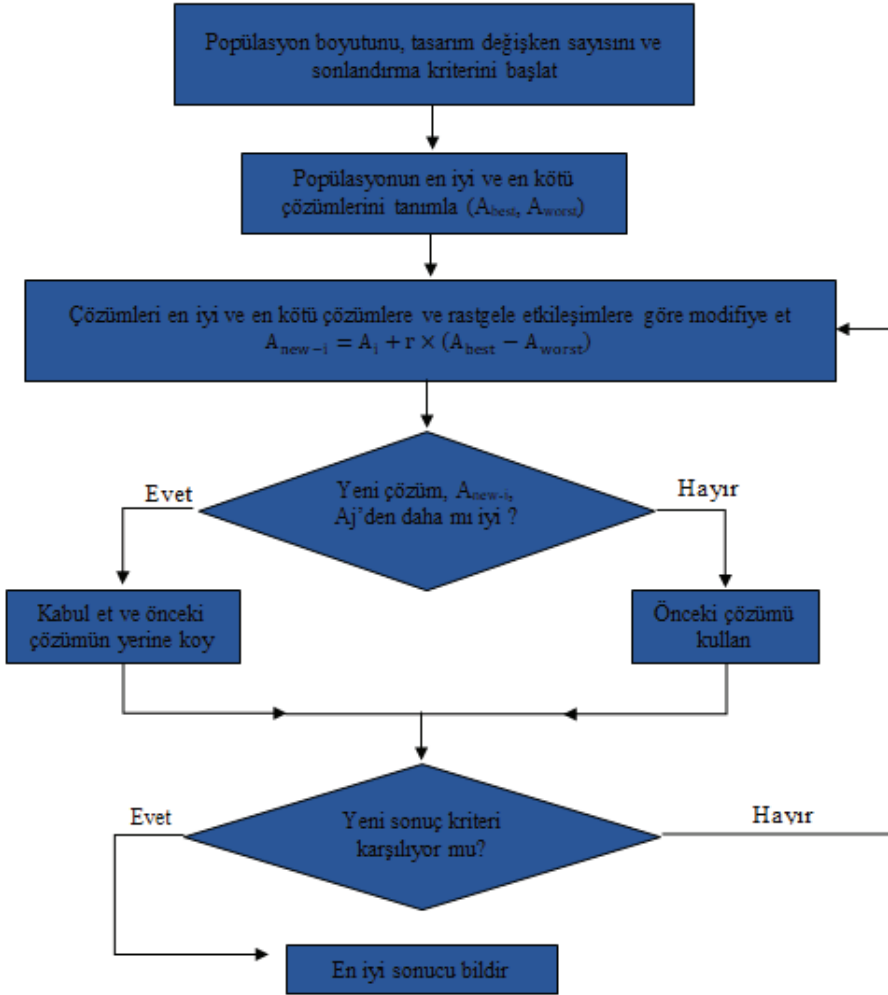


**şekil 5** ÇUKÇS'ın sonlu eleman modeli ve TESS mesnet sisteminin yerleřim yeri



## 5. Rao-1 algoritması

Bu araştırmada, elemanların optimum boyutunu belirlemek için Rao-1 [36] algoritması kullanılmıştır. Optimizasyon sürecinin tamamlanması için bu yöntemde herhangi bir özel parametre gerekmemektedir. Popülasyondaki hem en iyi hem de en kötü aday çözümleri kullanır. Yinelemeli süreç, küresel optimuma doğru yakınsamayı sağlamak amacıyla yürütülür. Her adımda, aday çözümler güncellenir ve problemin amaç fonksiyonu dikkate alınarak rastgele birbirleriyle karşılaştırılır. Rao-1 algoritmasının temel akış şeması Şekil 7'de gösterilmektedir.



Şekil 7 Rao-1 algoritmasının akış şeması

## 6. Sayısal Uygulama

Optimizasyon sürecinin etkinliğini göstermek amacıyla Bölüm 2’de sunulan ÇUKÇS seçilmiştir. Hem sismik olarak izole edilmiş hem de sismik izolasyonsuz ÇUKÇS’nin sonlu eleman modeli, SAP2000 programında oluşturulmuştur. Tablo 3’te verilen çeşitli statik ve dinamik yük kombinasyonları altında, ÇUKÇS’nin statik ve doğrusal olmayan analizleri gerçekleştirilmiştir.

Sismik izolasyonsuz ve sismik izolasyonlu ÇUKÇS’nin minimum ağırlığını elde etmek için Rao-1 algoritması kullanılmıştır. Optimizasyon sürecinde, her döngüde 50 farklı çözüm üretilmiş ve her çözümde 30 bireyden oluşan bir popülasyon yer almıştır. Ayrıca, optimizasyon süreci toplamda 5 koşum (çalıştırma) üzerinden yürütülmüştür. 800 elemanlı kafes sistem, 6 gruba ayrılmıştır (Şekil 8). Bu gruplar şu şekilde tanımlanmaktadır:

G1: 144 elemandan oluşur (üst başlık çubuklarının iç tarafındaki elemanlar).

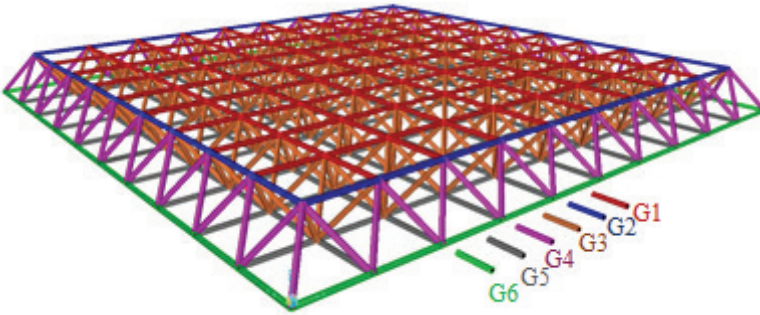
G2: 36 elemandan oluşur (üst başlık çubuklarının kenar hattındaki elemanlar).

G3: 324 elemandan oluşur (çapraz çubukların iç tarafındaki elemanlar).

G4: 76 elemandan oluşur (çapraz çubukların kenar hattındaki elemanlar).

G5: 180 elemandan oluşur (alt başlık çubuklarının iç tarafındaki elemanlar).

G6: 40 elemandan oluşur (alt başlık çubuklarının kenar hattındaki elemanlar).



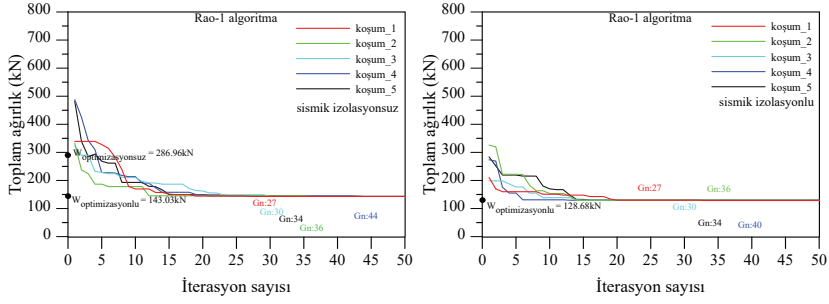
Şekil 8 6 Gruptan oluşan ÇUKÇS

ÇUKÇS en uygun toplam ağırlığı beş bağımsız koşul ile belirlenmiştir. Şekil 9'da Rao-1 algoritması kullanılarak elde edilen sismik izolasyonsuz ve sismik izolasyonlu ÇUKÇS için en uygun sonuçların yakınsama grafikleri gösterilmektedir.

Şekil 9'dan görüldüğü üzere sismik izolasyonsuz ÇUKÇS'nin optimize edilmemiş toplam ağırlığı 286.96 kN iken optimizasyon yapılarak elde edilen toplam ağırlık 143.03 kN'dur. Optimizasyon süreci toplam ağırlığı %50 azaltmıştır. Sismik izolasyon optimizasyon sürecinde beş koşulun beşinde tutarlı bir şekilde en uygun sonuçlar elde edilmiştir. Optimizasyon sürecinde en iyi sonuca koşul\_1'in 27. iterasyonunda ulaşmıştır. Sismik izolasyonsuz ÇUKÇS'nin optimizasyon süreci sonunda elde edilen toplam ağırlığı 128.68 kN'dur. Sismik izolasyonsuz ÇUKÇS'nin optimizasyon süreci sonunda elde edilen toplam ağırlık ile karşılaştırılınca %10'luk bir azalış meydana gelmiştir. Optimizasyon sürecinde beş koşulun üçünde en uygun sonuçlar elde edilmiştir. Optimizasyon sürecinde en iyi sonuca yine koşul\_1'in 27. iterasyonunda ulaşmıştır. Bu grafikler, sismik izolasyonun etkisini ve Rao-1 algoritmasının optimizasyon gücünü doğrulayan bir örnek olarak değerlendirilebilir.

Sismik izolasyonsuz ve sismik izolasyonlu ÇUKÇS'nin optimize edilmiş ve optimize edilmemiş tasarım sonuçları Tablo 8'de gösterilmiştir. Ayrıca, tabloda sismik izolasyonsuz optimize edilmiş yapı ile sismik izolasyonlu optimize edilmiş yapının grupları arasındaki ağırlık farkları da verilmiştir. G1 grubunda sismik izolasyon kullanımı, ağırlığı %8,1 artırırken G2 ve G6 gruplarında sırasıyla %20,5 ve %72,6 oranında bir azalma sağlamıştır. G3, G4 ve G5 gruplarında ise ağırlık değişmemiştir.

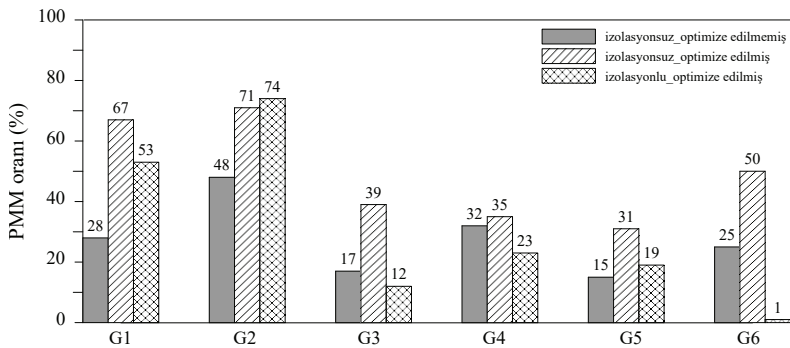
Çelik elemanlar sadece eksenel yük (P) taşımaz, aynı zamanda eğilme momentlerine (M) de maruz kalabilir. Yapısal tasarımda, bu etkilerin **birleşik davranışı** dikkate alınarak güvenli olup olmadığı kontrol edilir. **SAP2000, çelik yapı elemanların birleşik gerilme kontrolünü yapabilmektedir.** Programdaki çelik tasarım ara yüzü, elemanın maruz kaldığı eksenel basınç veya çekme kuvvetinin, elemanın taşıyabileceği maksimum kapasiteye oranını (PRatio) ve elemanın ana ekseninde maruz kaldığı momentin, elemanın bu eksenindeki moment kapasitesine oranını (MMajRatio) hesaplayabilmektedir. Bu iki oranın toplamı (PRatio+MMajRatio) PMM olarak ifade edilir. Uygun tasarım için bu PMM oranı 1'den daha küçük olmalıdır ( $PMM=PRatio+MMajRatio \leq 1$ ).



**Şekil 9** Sismik izolasyonsuz ve sismik izolasyonlu ÇUKÇS için en uygun sonuçların yakınsama grafikleri

**Tablo 8** Sismik izolasyonsuz ve sismik izolasyonlu ÇUKÇS'de kullanılan TUBO-D kesitleri

Grup	Gruptaki eleman sayısı	Sismik izolasyonsuz			Sismik izolasyonlu			Fark %
		Kesit	Optimize edilmemiş	Optimize edilmemiş	Optimize edilmiş	Optimize edilmiş		
			W (kN)	En uygun kesit	W (kN)	En uygun kesit	W (kN)	
G1	144	168.3×4	45.78	82.5×3.2	17.67	88.9×3.2	19.10	+8,1
G2	36	298.5×5.9	30.06	219.1×5	18.64	193.7×4.5	14.82	-20,5
G3	324	152.4×4	95.88	76.1×3.2	37.69	76.1×3.2	37.69	0
G4	76	219.1×5	40.56	193.7×4.5	32.26	193.7×4.5	32.26	0
G5	180	159×4	53.96	76.1×3.2	20.31	76.1×3.2	20.31	0
G6	40	219.1×5	20.72	193.7×4.5	16.47	76.1×3.2	4.51	-72,6
Toplam ağırlık (kN)			286.96		143.03		128.69	-10,0



**Şekil 10** Sismik izolasyonsuz ve sismik izolasyonlu ÇUKÇS elemanlarının ortalama PPM oranları

Sismik izolasyonsuz ve sismik izolasyonlu ÇUKÇS elemanlarının ortalama PMM oranları Şekil 9'da verilmiştir. Sismik izolasyonsuz ÇUKÇS'de ağırlık optimizasyonu sonucunda G1, G2, G3, G5 ve G6 gruplarında PMM oranları yaklaşık iki katına çıkmıştır. G4 grubunda ise bir miktar artış gözlenmiştir. Sismik izolasyonlu ÇUKÇS'de ağırlık optimizasyonundan sonra, sismik izolasyonsuz ve optimize edilmemiş duruma kıyasla G1, G3, G4 ve G5 gruplarında PMM oranları sırasıyla %21, %69, %34 ve %39 azalmıştır. G6 grubunda ise PMM oranında büyük bir düşüş meydana gelmiştir. G2 grubunda ise bir miktar artış gözlenmiştir.

Sismik izolasyonsuz optimize edilmemiş ÇUKÇS'in elemanları, genellikle daha düşük PPM oranlarına sahiptir. Bu durum, kesitlerin tam kapasiteyle çalışmadığını, dolayısıyla gereğinden büyük boyutlandırılmış olabileceğini göstermektedir. Yapısal verimlilik açısından bu durum istenmeyen bir durum olabilir çünkü malzeme israfına yol açabilir. Sismik izolasyonsuz optimize edilmiş ÇUKÇS'in elemanları, genellikle daha yüksek PPM oranlarına sahiptir. Elemanların kesitleri daha etkin kullandığını göstermektedir. Ayrıca PPM oranının artması, yük taşıma kapasitesinin daha verimli hale geldiğini göstermektedir. Sismik izolasyonlu sistemde optimize edilmiş elemanların bazı gruplarında yüksek PPM oranına ulaşıyor. Sismik izolasyon kullanımı, yapıya gelen yükleri azalttığı için elemanlar daha optimize çalışabiliyor. Bu, hem malzeme tasarrufu sağlamak hem de yapı güvenliğini artırmak açısından avantajlı olabileceğini gösteriyor.

## 7. Sonuçlar ve Öneriler

Bu çalışmada, sismik izolasyonsuz ve sismik izolasyonlu çelik uzay kafes çatı sisteminin (ÇUKÇS) optimum kafes çubuk elemanı boyutları ve toplam ağırlığı, yeni geliştirilen Rao-1 algoritması kullanılarak belirlenmiştir. Rao-1 metasezgisel algoritması ile birlikte MATLAB kodları ve SAP2000'in OAPI özelliği kullanılmıştır. Optimizasyon süreci, hem sismik izolasyonsuz hem de sismik izolasyonlu ÇUKÇS'nin optimum kafes çubuk elemanlarını bularak toplam ağırlığı en aza indirmeyi amaçlamaktadır. Dikkate alınan tasarım değişkeni, çubuk elemanların kesitidir. Statik ve dinamik analizler; ölü yük, kar yükü, kaplama yükü, rüzgar yükü ve sismik yükleri içeren farklı kombinasyonlar göz önünde bulundurularak SAP2000 programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Çalışmanın bulguları ışığında aşağıdaki sonuçlar çıkarılabilir:

1. Kullanılan algoritma ile hem sismik izolasyonsuz hem de sismik izolasyonlu ÇUKÇS için en uygun sonuçlar elde edilmiştir. Dolayısıyla seçilen sistemin her iki durumu için Rao-1 algoritması kararlılık göstermektedir.

2. Sismik izolasyon kullanımını, bazı gruplarda ağırlık artışına neden olurken bazı gruplarda önemli ölçüde ağırlık azalması sağlamıştır. Özellikle G2 ve G6 gruplarında belirgin bir ağırlık azalması gözlemlenirken, G3, G4 ve G5 gruplarında ağırlık değişmemiştir.

3. Ağırlık optimizasyonu yapılmamış sistemler, malzeme kullanımında verimsiz olabilmektedirler. Ağırlık optimizasyonu yapıldığında, elemanlar yükleri daha etkin taşır ve PPM oranı yükselmektedir. Sismik izolasyon kullanımını, yükleri azalttığı için daha optimize bir sistem oluşturur ve elemanların kapasitesini daha iyi kullanmasını sağlamaktadır.

Sonuç olarak, iki eğrilikli sürtünmeli sarkaç (TESS) mesnet sistemi, çelik uzay kafes çatı sisteminin (ÇUKÇS) ağırlık optimizasyonunda etkili bir yöntem olduğu ortaya çıkmıştır. ÇUKÇS optimizasyonunda elde edilen toplam ağırlık, kullanılan optimizasyon yönteminden ve yapının sismik olarak izole edilip edilmediğinden etkilenmektedir. Bu nedenle, bu parametrelerin kapsamlı bir analizi, ÇUKÇS'nin tasarımını ve toplam ağırlığını belirlemede çok önemlidir. Bu çalışmada sunulan bulgular, ÇUKÇS'nin ağırlık optimizasyonunda sismik izolasyonun etkili bir şekilde uygulanmasını ilerletmek ve çeşitlendirmek için sağlam bir temel sağlamaktadır. Bu bulgulara dayanarak, TESS mesnet sisteminin etkinliğinin sadece Rao-1 algoritmalarıyla değil, alternatif optimizasyon algoritmalarıyla da değerlendirilmesi önerilmektedir. Ayrıca, sismik izolasyon sistemlerinin etkinliğini kapsamlı bir şekilde değerlendirmek için farklı ÇUKÇS modelleri üzerinde daha fazla araştırma yapılmalıdır. Ayrıca, uygun izolasyon sistemlerini optimize etmek için yenilikçi stratejiler geliştirmek amacıyla farklı zemin türlerinin ve malzemelerinin dikkate alınması da önemlidir. Bu çabalar, sismik bölgelerde ÇUKÇS'nin güvenliğini ve ekonomik fizibilitesini artırmaya önemli ölçüde katkıda bulunacaktır.

## Referanslar

1. Yi, Y. K., Tariq, A., Park, J., & Barakat, D. (2021). Multi-objective optimization (MOO) of a skylight roof system for structure integrity, daylight, and material cost. *Journal of Building Engineering*, 34, 102056.
2. Kaveh, A., & Mahjoubi, S. (2018, February). Optimum design of double-layer barrel vaults by lion pride optimization algorithm and a comparative study. In *Structures* (Vol. 13, pp. 213-229). Elsevier.
3. Grzywiński, M., Dede, T., & Özdemir, Y. I. (2019). Optimization of the braced dome structures by using Jaya algorithm with frequency constraints. *Steel and Composite Structures, An International Journal*, 30(1), 47-55.
4. Georgioudakis, M., & Plevris, V. (2020). A comparative study of differential evolution variants in constrained structural optimization. *Frontiers in Built Environment*, 6, 102.
5. Poitras, G. J., Cormier, G., & Nabolle, A. S. (2021). Peloton dynamics optimization: algorithm for discrete structural optimization. *Journal of Structural Engineering*, 147(10), 04021164.
6. Khatir, S., Tiachacht, S., Thanh, C. L., Tran-Ngoc, H., Mirjalili, S., & Wahab, M. A. (2022). A robust FRF damage indicator combined with optimization techniques for damage assessment in complex truss structures. *Case Studies in Construction Materials*, 17, e01197.
7. Dang, K. D., Nguyen-Van, S., Thai, S., Lee, S., Luong, V. H., & Lieu, Q. X. (2022). A single step optimization method for topology, size and shape of trusses using hybrid differential evolution and symbiotic organisms search. *Computers & Structures*, 270, 106846.
8. Atmaca, B. (2021). Determination of proper post-tensioning cable force of cable-stayed footbridge with TLBO algorithm. *Steel and Composite Structures, An International Journal*, 40(6), 805-816.
9. Habibi, A., & Bidmeshki, S. (2019). An optimized approach for tracing pre-and post-buckling equilibrium paths of space trusses. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 19(04), 1950040.
10. Artar, M., & Daloğlu, A. T. (2019). Optimum design of steel space truss towers under seismic effect using Jaya algorithm. *Structural Engineering and Mechanics, An Int'l Journal*, 71(1), 1-12.
11. Dede, T., Atmaca, B., Grzywinski, M., & Rao, R. V. (2022, August). Optimal design of dome structures with recently developed algorithm: Rao series. In *Structures* (Vol. 42, pp. 65-79). Elsevier.
12. Atmaca, B. (2021, October). Size and post-tensioning cable force optimization of cable-stayed footbridge. In *Structures* (Vol. 33, pp. 2036-2049). Elsevier.

13. Atmaca, B., Ergun, M., & Ateş, Ş. (2018). The Most Appropriate Earthquake Record Groups for Dynamic Analysis of A Building. *Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences*, 36(4), 1047-1079.
14. Dede, T., Grzywiński, M., Rao, R. V., & Atmaca, B. (2020). The size optimization of steel braced barrel vault structure by using Rao-1 algorithm. *Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences*, 38(3), 1415-1425.
15. Dede, T., Atmaca, B., Grzywinski, M., & Rao, R. V. (2022, August). Optimal design of dome structures with recently developed algorithm: Rao series. In *Structures* (Vol. 42, pp. 65-79). Elsevier.
16. Aslay, S. E., & Dede, T. (2022, June). 3D cost optimization of 3 story RC constructional building using Jaya algorithm. In *Structures* (Vol. 40, pp. 803-811). Elsevier.
17. Artar, M., & Carbas, S. (2022). Optimum sizing design of steel frame structures through maximum energy dissipation of friction dampers under seismic excitations. In *Structures* (Vol. 44, pp. 1928-1944). Elsevier.
18. Cucuzza R, Rosso MM, Aloisio, Melchiorre AJ, Lo Giudice M, Marano GC, Size and Shape Optimization of a Guyed Mast Structure under Wind, Ice and Seismic Loading. *Applied Sciences*, 2022, 12(10), 1-32.
19. Minh, H. L., Sang-To, T., Wahab, M. A., & Cuong-Le, T. (2022). Structural damage identification in thin-shell structures using a new technique combining finite element model updating and improved Cuckoo search algorithm. *Advances in Engineering Software*, 173, 103206.
20. Minh, H. L., Sang-To, T., Wahab, M. A., & Cuong-Le, T. (2022). A new metaheuristic optimization based on K-means clustering algorithm and its application to structural damage identification. *Knowledge-Based Systems*, 251, 109189.
21. Grzywiński, M. (2022). Optimization of spatial truss towers based on Rao algorithms. *Structural Engineering and Mechanics, An Int'l Journal*, 81(3), 367-378.
22. Temur, R. (2021). Optimum design of cantilever retaining walls under seismic loads using a hybrid TLBO algorithm. *Geomechanics and Engineering*, 24(3), 237-251.
23. Kalemci, E. N. (2020). Rao-3 algorithm for the weight optimization of reinforced concrete cantilever retaining wall. *Geomechanics and Engineering*, 20(6), 527-536.
24. Pham, H. A., & Tran, T. D. (2022). Optimal truss sizing by modified Rao algorithm combined with feasible boundary search method. *Expert Systems with Applications*, 191, 116337.
25. Yakak, B., Atmaca, B., Kinali, N. S., Dede, T., Grzywinski, M., & Rao, R. V. (2024). Optimization of roofs with solar panels using Rao algorithms. *Applied Soft Computing*, 165, 112123.



26. Rizzian, L., Léger, N., & Marchi, M. (2017). Multiobjective sizing optimization of seismic-isolated reinforced concrete structures. *Procedia Engineering*, 199, 372-377.
27. Xu, Z. D., Guo, Y. F., Wang, S. A., & Huang, X. H. (2013). Optimization analysis on parameters of multi-dimensional earthquake isolation and mitigation device based on genetic algorithm. *Nonlinear Dynamics*, 72, 757-765.
28. Fan, B., Zhang, X. A., Abdulhadi, M., & Wang, Z. H. (2022). Two-stage equal reliability optimization for mega-sub controlled structure system with lead rubber bearings. *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, 41(4), 1507-1522.
29. Öncü-davas, S., Temür, R., & Alhan, C. (2022). Teaching-learning based optimization of nonlinear isolation systems under far fault earthquakes. *Teknik Dergi*, 33(1), 11487-11505.
30. Dang, Y., Zhao, G., Tian, H., & Li, G. (2021). Two-Stage Optimization Method for the Bearing Layout of Isolated Structure. *Advances in Civil Engineering*, 2021(1), 4895176.
31. Xu, Y., Guo, T., Xiong, J., Chen, B., Zhi, Q., & Yang, J. (2022, September). Optimization design of triple friction pendulums for Base-isolated High-rise buildings based on bearing displacement and collapse fragility. In *Structures* (Vol. 43, pp. 1091-1099). Elsevier.
32. SAP2000, Computers and Structures Inc., (2016).
33. TS 498, Design Loads for Buildings, Turkish Standards Institute, 1997.
34. TBEC2018, Turkish building earthquake code, Türkiye, 2018.
35. TSHM, Turkish seismic hazard map. Republic of Türkiye prime Ministry disaster and emergency management authority presidential of earthquake department, Türkiye, Ankara, 2018.
36. Rao, RV, Rao algorithms: Three metaphor-less simple algorithms for solving optimization problems. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 2020, 107-130.
37. AISC-ASD, Manual of Steel Construction: Allowable Stress Design, Chicago, IL, USA., 1989





**FARKLI BOYUTLARDA ÜRETİLEN ÇİMENTO  
ESASLI HARÇLARIN YÜKSEK SICAKLIK  
PERFORMANSININ DEĞERLENDİRİLMESİ**

*Enes EKİNCİ'*

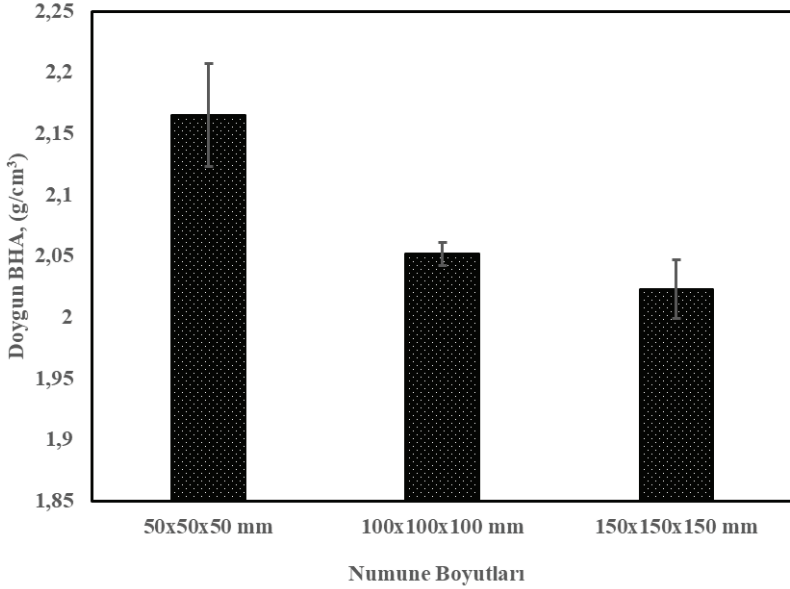
## 1. GİRİŞ

Meydana gelen yangın felaketleri çimento esaslı elemanların yüksek sıcaklık etkilerine doğrudan maruz kalmasına neden olmaktadır. Bu nedenle yüksek sıcaklık etkilerinin çimento esaslı harç ve beton üzerindeki etkilerinin belirlenmesi hayati bir öneme sahiptir (Wang, 2008). Birçok araştırmacı yüksek sıcaklıkların çimento esaslı bağlayıcılar üzerindeki en önemli etkisinin basınç dayanımı kayıpları olduğunu vurgulamıştır (Xiao ve König, 2004; Seleem vd., 2011; Dahish ve Almutairi, 2023). Çimento esaslı harç ve betonlar her ne kadar A1 sınıfı yanmaz malzeme grubuna dâhil olsa da, yüksek sıcaklık etkisi altında birtakım fiziksel, mekanik ve kimyasal kayıplara uğramaktadır. Bu bölümde çimento esaslı harçların yüksek sıcaklık performanslarına farklı numune boyutlarının etkileri incelenmiştir. İlk olarak, çimento esaslı harçlar üç farklı numune boyutlarında (50 x 50 x 50 mm, 100 x 100 x 100 mm ve 150 x 150 x 150 mm) hazırlanmıştır. Tüm harç karışımlarında “çimento: ince agrega: su” oranı “1:3:0.5” olacak şekilde sabit tutulmuştur. Harç örnekleri üretim aşamasından 24 saat sonra kalıplardan çıkarılmış ve 28 gün boyunca suda bekletilmiştir. Üretilen örneklerin su emme, basınç dayanımı ve yüksek sıcaklıklara dayanıklılık gibi fiziksel, mekanik ve dayanıklılık özellikleri üzerinde farklı numune boyutlarının etkileri belirlenmiştir. Yüksek sıcaklıklara karşı dayanıklılık özellikleri 600 °C değerlerinde ölçülmüştür. Deneysel bulgular, numune boyutlarının çimento esaslı harçların performansları üzerinde oldukça önemli etkileri olduğunu ortaya çıkarmıştır.

## 2. ÇİMENTO ESASLI HARÇLARIN FİZİKSEL ÖZELLİKLERİ

### 2.1. Doygun BHA Değerleri

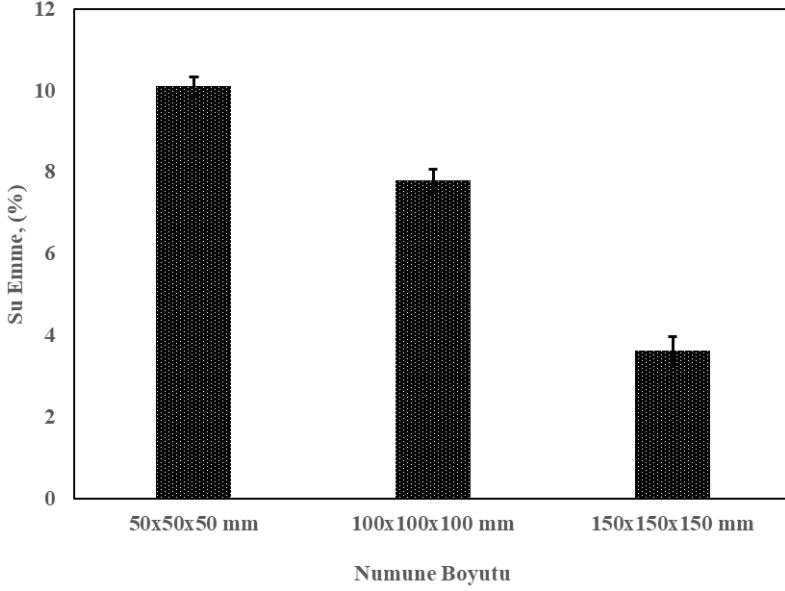
Çimento esaslı harçların 28 günlük doymuş birim hacim ağırlık değerleri elde edilmiş ve Şekil 1’de sunulmuştur. Şekil 1’den görüleceği üzere, numune boyutu arttıkça numunelerin birim hacim ağırlık değerlerinin azaldığı belirlenmiştir. Bu durum, küçük boyutlu numunelerin yerleştirme ve sıkıştırma işlemlerinde segregasyon ve boşluk oluşma ihtimalinin daha az olduğunu ve böylelikle daha kompakt bir yapının elde edilebileceğini gözler önüne sermektedir. Ayrıca, numune boyutları ve standart sapma değerleri arasındaki ilişkiye bakıldığında, küçük boyutlu numunelerde ölçüm dağılımlarının daha geniş bir aralıkta gerçekleştiği gözlenmiştir. Bu durumun ise nispeten düşük hacimli numunelerde yapılacak hata oranlarının ölçüm üzerinde yansımalarının daha büyük olacağı şeklinde yorumlanmıştır.



Şekil 1. Çimento esaslı harçların 28 günlük doygun birim hacim ağırlıkları

## 2.2. Su Emme Değerleri

Şekil 2 farklı numune boyutlarına sahip çimento esaslı harçların su emme özelliklerini göstermektedir. Şekil 2'den görüleceği üzere, en yüksek su emme değerleri 50x50x50 mm boyutlara sahip örneklerden %10,1 olarak elde edilirken, en düşük su emme değerine sahip örnek ise % 3,62'lik değer ile 150x150x150 mm boyutlu örnek grubu olarak karşımıza çıkmıştır. Şekil 2, numune boyutlarının artmasıyla örneklerin su emme değerlerinin önemli ölçüde azaldığını gözler önüne sermiştir. Örneğin, kenar boyutlarının 50 mm'den 150 mm'ye çıkması su emme değerlerini yaklaşık %64 oranında azaltmıştır. Bu durumun küçük boyutlara sahip numunelerde bulunan yüzey/hacim oranının büyük boyutlu numunelere göre oldukça yüksek olmasından kaynaklandığı düşünülmüştür. Şöyle ki, 50 mm kenar uzunluğuna sahip örneklerde dış yüzey alanı / toplam hacim 1,2 olarak belirlenirken, 150 mm kenar uzunluğuna sahip örneklerde ise bu oran sadece 0,4 olarak elde edilmektedir. Bu iki oran arasındaki dramatik farklılığın, harç örneklerinde suyun iç kısımlarına doğru difüzyonunun büyük ölçüde kısıtlanmasına ve derinlemesine oluşacak bir su hareketliliğinin engellenmesine neden olacağı düşünülmüştür.

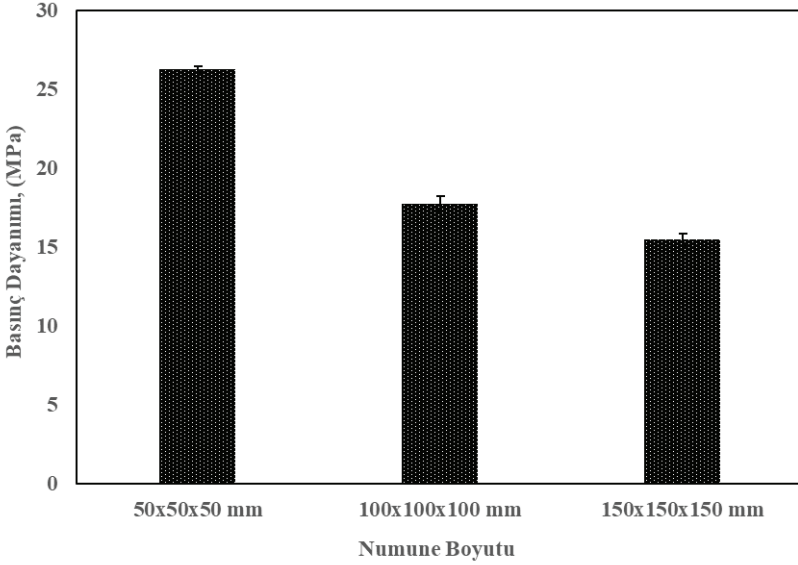


Şekil 2. Çimento esaslı harç örneklerin su emme değerleri

### 3. ÇİMENTO ESASLI HARÇLARIN MEKANİK ÖZELLİKLERİ

#### 3.1. 28 Günlük Basınç Dayanımı Değerleri

Şekil 3'de farklı boyutlarda üretilen çimento esaslı harç numunelerinin 28 günlük basınç dayanımı değerlerini sunulmuştur. Elde edilen sonuçlar, numune boyutlarının artmasıyla birlikte basınç dayanımı değerlerinde önemli düşüşler yaşandığını ortaya koymuştur. Boyutları 50x50x50 mm olan örneklerin basınç dayanımı değerleri 26,25 MPa olarak elde edilirken, 100x100x100 mm ve 150x150x150 mm boyutlarına sahip örneklerin basınç dayanımı değerleri ise sırasıyla yaklaşık %33 ve % 41 oranında düşüşler göstererek 17,75 MPa ve 15,5 MPa olarak belirlenmiştir. Bu dramatik düşüşlerin büyük hacimli numunelerde kusur ve boşluk gözlenme ihtimalinin yüksek olması ve heterojen yapının artması gibi etkenlerden kaynaklandığı düşünülmüştür. Benzer şekilde, Judd vd., (2023) tarafından dört farklı boyutlara sahip çimento esaslı harç numunelerinin basınç dayanımı değerleri incelenmiş ve elde edilen sonuçlar büyük boyutlara sahip numunelerin basınç dayanımı değerlerinin %42'ye varan düşüşler gösterdiğini ortaya çıkarmıştır. Diğer bir yandan, Hamad, (2017) farklı boyutlarda küp ve silindir kalıpları kullanarak yüksek performanslı hafif beton üretimi gerçekleştirmiştir. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar numune boyutlarının düşmesiyle basınç dayanımı değerlerinin arttığını ortaya çıkarmıştır.



Şekil 3. 28 günlük basınç dayanımı değerleri

### 3.2. Kırılma Desenleri

Bu bölümde yüksek sıcaklık etkisine maruz kalmamış harç örneklerin kırılma desenleri sunulmuştur. Şekil 5, kırılma desenlerinin numune boyutlarından önemli ölçüde etkilendiğini göstermektedir. Şekil 5'te görüleceği üzere, küçük boyutlu numunelerde çatlak yayılması daha az gözlenmiş ve belirgin çatlak hattı oluşumu gözlenerek kırılma gerçekleşmiştir. Büyük boyutlara sahip örneklerde ise çatlak oluşumları daha belirgin bir şekilde ortaya çıkmış ve kompleks bir kırılma deseni oluşmuştur. Bu temel farklılıkların numune boyutlarına bağlı olarak kusur ve hata oluşumlarından kaynaklandığı düşünülmüştür. Şöyle ki, kusur veya hata bulunma olasılığı yüksek olan büyük boyutlu örneklerde kırılma deseni daha karmaşık bir yapı oluşturacak şekilde meydana gelmiştir. Ancak, küçük boyutlu örneklerde ise yükleme doğrultusunda ilerleyen çatlaklar daha ani ve kabuk atma şeklinde gerçekleşmiştir. Boyut etkisinden bağımsız olarak, küp numunelerde kırılmaların köşe noktalarındaki gerilme yoğunlaşmasından kaynaklandığı belirlenmiştir. Elde edilen bu çıkarımlara paralel olarak, Li vd., (2018) farklı boyut ve şekillerde üretilen betonları incelemiştir. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar, kırılma sonrasında ortaya çıkan çatlak desenlerinin değişken numune boyutlarından büyük ölçüde etkilendiğini ortaya çıkarmıştır.



**Şekil 4.** Basınç testine maruz bırakılmamış çimento esaslı harç numuneleri



**Şekil 5.** Basınç testine maruz bırakılmış çimento esaslı harç numuneleri

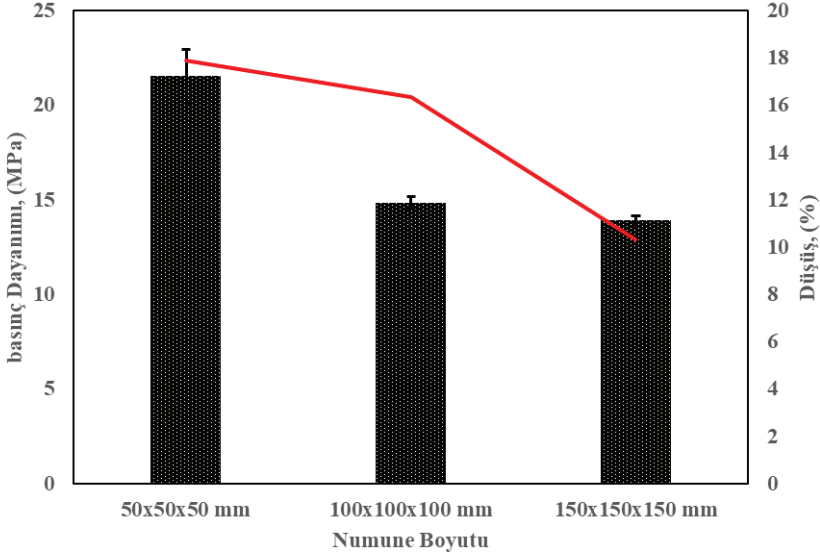


## 4. ÇİMENTO ESASLI HARÇLARIN YÜKSEK SICAKLIK PERFORMANSI

### 4.1. Yüksek Sıcaklık Etkisi Sonucu Basınç Dayanımı Değerleri

Bu bölümde 1 saat boyunca yüksek sıcaklık (600 °C) etkisine maruz bırakılan çimento esaslı harçların basınç dayanımı değerleri farklı numune boyutları etkisi altında değerlendirilmiş ve bulgular Şekil 6'da verilmiştir. Elde edilen sonuçlar, yüksek sıcaklık etkisi altında harç örneklerinin basınç dayanımı değerlerinin numune boyutlarından bağımsız olarak düşüş gösterdiğini ortaya çıkarmıştır. Elde edilen bulgulara paralel olarak, farklı agregaların kullanıldığı Portland çimentosu esaslı beton örneklerinin yüksek sıcaklık performanslarının incelendiği geçmiş bir çalışmada, kullanılan agrega tipinden bağımsız olarak, 200 °C'nin üzerindeki yüksek sıcaklık maruziyetlerinde önemli ölçüde dayanım kayıplarının yaşandığı belirlenmiştir (Arioz, 2007). Yapılan bir diğer çalışmada ise, Ergün vd., (2013) farklı çimento dozajları kullanılarak (250 kg/m<sup>3</sup> ve 350 kg/m<sup>3</sup>) üretilen betonların yüksek sıcaklık performansları araştırılmıştır. Çalışmadan elde edilen sonuçlar, özellikle 400 °C'nin üzerinde yüksek sıcaklığa maruz kalan örneklerin mekanik özelliklerinin önemli ölçüde düşüş gösterdiğini ve bu düşüşlerin çimento dozajından etkilenmediğini ortaya koymuştur.

Diğer bir yandan, deney sonuçları numune boyutu arttıkça meydana gelen dayanım kayıplarının azaldığını göstermiştir. Şöyle ki, 50x50x50 mm kenar boyutlarına sahip olan harç örneklerinin yüksek sıcaklığa maruz kaldıktan sonra % 18 oranında dayanım kaybı yaşadığı, 150x150x150 mm boyutlarına sahip örneklerde ise bu kayıpların yaklaşık % 10 seviyesinde olduğu belirlenmiştir. Küçük boyutlu numunelerde gözlenen nispeten düşük dayanım kayıplarının yüksek yüzey/hacim oranından kaynaklandığı düşünülmüştür. Şöyle ki, yüzey/hacim oranı oldukça yüksek olan 50x50x50 mm boyutlu numunelerde ısının daha hızlı iletilebildiği ve bu nedenle tüm numunenin homojen bir şekilde etkilendiği şekilde yorum yapılmıştır. Bunun aksine, büyük boyutlu numuneler için, iç kısımların dış yüzeylere göre daha düşük sıcaklık etkilerine maruz kaldığı ve bu nedenle iç kısımda mikro yapının yüksek sıcaklıktan korunduğu düşünülmüştür. Bu durumun ise daha düşük dayanım kayıplarına yol açtığı belirlenmiştir.

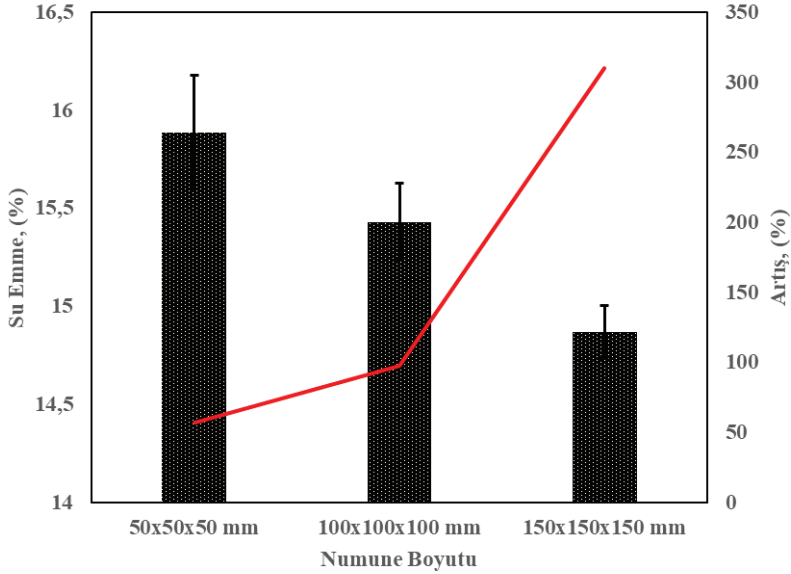


Şekil 6. Yüksek sıcaklık etkisine maruz kalan harç örneklerinin basınç dayanımı değerleri

#### 4.2. Yüksek Sıcaklık Sonrası Su Emme Değerleri

Yüksek sıcaklık etkisi sonrasında çimento esaslı harçların su emme oranları Şekil 7’de verilmiştir. Boyut etkilerinden bağımsız olarak, tüm örneklerin su emme değerleri yüksek sıcaklık etkisiyle artış göstermiştir. Yüksek sıcaklık etkisine maruz kalmamış harç örneklerinin su emme sonuçlarına benzer şekilde, yüksek sıcaklığa maruz kalan örneklerde de numune boyutunun artması su emme değerlerini düşürmüştür. Ancak, farklı numune boyutlarının su emme değerleri üzerindeki etkileri yüksek sıcaklık etkisinden sonra daha minimal düzeyde kalmıştır. Örneğin, yüksek sıcaklık etkisine maruz kalmayan örneklerin su emme değerleri numune boyutunun artmasıyla yaklaşık % 65 oranında azalırken, yüksek sıcaklık etkisine maruz kalan örneklerde ise bu azalma yaklaşık %7 seviyesinde olmuştur. Diğer bir yandan, yüksek sıcaklık etkisine maruz kalan örneklerde numune boyutlarının artmasının su emme değerlerini daha yüksek oranlarda arttırdığı gözlenmiştir. Örneğin, 50x50x50 mm boyutlu örneklerin su emme değerleri yaklaşık %57 oranında artış gösterirken, 150x150x150 mm boyutlu örneklerin su emme değerleri ise % 310 oranında artmıştır. Deneysel bulgular yüksek sıcaklık etkisinde büyük numunelerin iç ve dış sıcaklık farklarının daha fazla olmasından ve bu durumun dış yüzeylerde önemli ölçüde su emmeye neden olacak çatlak oluşumlarından kaynaklandığı düşünülmüştür. Basınç dayanımı

kayıpları ile birlikte düşünüldüğünde elde edilen bu sonuçlar, yüksek sıcaklığın büyük boyutlu numunelerde homojen olarak yayılmadığını, iç kısımların dayanım kayıplarına sebep olmayacak şekilde etkilendiğini ve yüzeylerde ise su emmeyi arttıran çatlak oluşumları olduğu şeklinde yorumlanabilir. Yapılan bu çıkarım, Şekil 6'da verilen görsel ile desteklenmiştir. Şekil 8'de yüksek sıcaklığa maruz kalan harç örnekleri verilmiş ve yüksek sıcaklık etkisi sonrasında özellikle büyük boyutlu numunelerin (150x150x150 mm) yüzeylerinde belirgin çatlakların olduğu gözlenmiştir.



Şekil 7. Yüksek sıcaklık etkisinde su emme oranları



**Şekil 8.** *Yüksek sıcaklığa maruz kalan örnekler*

## 5. SONUÇLAR

Farklı boyutlarda üretilen çimento esaslı harç örneklerinin fiziksel, mekanik ve yüksek sıcaklık performansının incelendiği bu çalışmadan elde edilen bulgular aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Yüksek sıcaklık etkisine maruz kalmamış örnekler arasında en yüksek su emme değerleri 50x50x50 mm boyutlara sahip örneklerden elde edilirken, en düşük su emme değerlerine sahip grup ise 150x150x150 mm boyutlu örnekler olmuştur. Bu durumun, küçük boyutlu örneklerde yüzey/hacim oranının yüksek olmasından kaynaklandığı belirlenmiştir.

- Numune boyutlarının artmasıyla birlikte basınç dayanımı değerlerinde önemli düşüşler meydana geldiği belirlenmiştir. Bu durum büyük hacimli numunelerde kusur ve boşluk bulunma ihtimalinin oldukça yüksek olmasına atfedilmiştir.

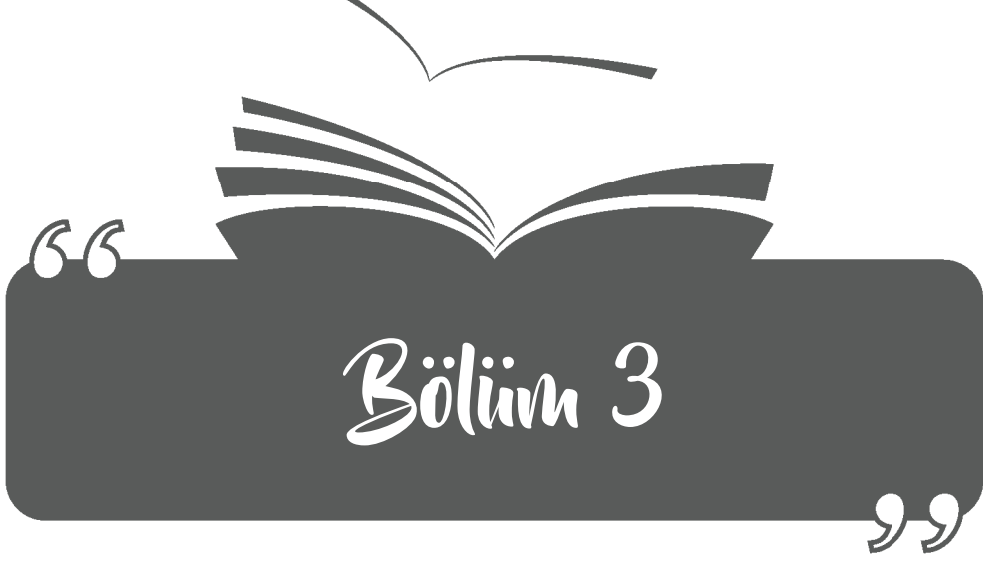
- Küçük boyutlu numunelerde belirgin bir çatlak hattı ve kabuk atma şeklinde hasarlar gözlenirken, büyük boyutlu örneklerde ise yük altında daha karmaşık kırılma desenleri oluşmuştur.

- Yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakılan örneklerin tümünde önemli basınç dayanımı kayıpları gözlenmiştir. Ancak, numune boyutunun artmasıyla birlikte dayanım kayıplarının daha düşük düzeyde olduğu belirlenmiştir.

- Yüksek sıcaklık etkisine maruz kalmış harç örneklerinin tümünde su emme değerleri önemli miktarlarda artış göstermiştir.

## KAYNAKÇA

- Arioz, O. (2007). Effects of elevated temperatures on properties of concrete. *Fire Safety Journal*, 42(8), 516-522. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2007.01.003>
- Dahish, H. A., & Almutairi, A. D. (2023). Effect of elevated temperatures on the compressive strength of nano-silica and nano-clay modified concretes using response surface methodology. *Case Studies in Construction Materials*, 18, e02032. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02032>
- Ergün, A., Kürklü, G., Serhat, B. M., & Mansour, M. Y. (2013). The effect of cement dosage on mechanical properties of concrete exposed to high temperatures. *Fire Safety Journal*, 55, 160-167. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2012.10.016>
- Hamad, A. J. (2017). Size and shape effect of specimen on the compressive strength of HPLWFC reinforced with glass fibres. *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, 29(4), 373-380. <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2015.09.003>
- Judd, J., Fonseca, F., Day, B., Reynolds, M., & Moffett, T. (2023). Effect of size and water content on the compressive strength of mortar. *Construction and Building Materials*, 368, 130505. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130505>
- Li, M., Hao, H., Shi, Y., & Hao, Y. (2018). Specimen shape and size effects on the concrete compressive strength under static and dynamic tests. *Construction and Building Materials*, 161, 84-93. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.069>
- Seleem, H. E. H., Rashad, A. M., & Elsokary, T. (2011). Effect of elevated temperature on physico-mechanical properties of blended cement concrete. *Construction and Building Materials*, 25(2), 1009-1017. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.06.078>
- Wang, H. Y. (2008). The effects of elevated temperature on cement paste containing GGBFS. *Cement and Concrete Composites*, 30(10), 992-999. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2007.12.003>
- Xiao, J., & König, G. (2004). Study on concrete at high temperature in China—an overview. *Fire Safety Journal*, 39(1), 89-103. [https://doi.org/10.1016/S0379-7112\(03\)00093-6](https://doi.org/10.1016/S0379-7112(03)00093-6).



**ATIK CAM TOZU KULLANILARAK  
ÜRETİLEN GEOPOLİMER KOMPOZİTLERİN  
PERFORMANSLARI**

*Nurullah ÖKSÜZER<sup>1</sup>*

---

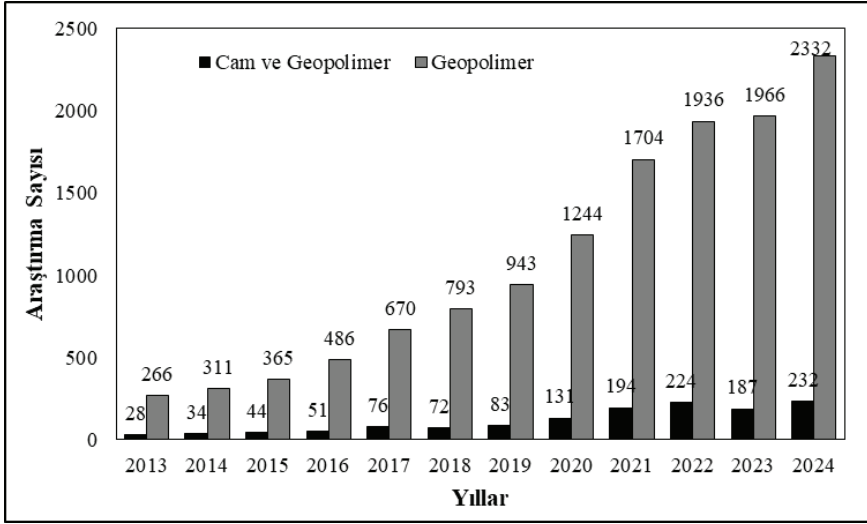
<sup>1</sup> Dr. Öğr. Üyesi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, oksuzer@ktu.edu.tr

## 1. Giriş

Geopolimer malzemeler, günümüzde çeşitli alanlarda ve endüstrilerde çok çeşitli zorlu uygulamalar için oldukça çekici ve cazip seçenekler olarak ortaya çıkmıştır. Bu yenilikçi malzemeler, işlevselliklerine katkıda bulunan mükemmel mekanik özellikler sergilemenin yanı sıra, etkileyici dayanıklılık özellikleri ve yüksek sıcaklıklara ve yangına karşı kayda değer direnç göstermektedir (Luhar, Nicolaidis, & Luhar, 2021). Ayrıca, jeopolimerler, çeşitli endüstriyel süreçlerden ortaya çıkan atık malzemelerle aktif olarak kimyasal reaksiyonlara girme konusundaki yetenekleri nedeniyle sürdürülebilir malzemeler olarak sınıflandırılabilir (Ren et al., 2021). Son zamanlarda, yeni ve daha etkili yapı malzemelerinin oluşturulmasında atık malzemelerin geri dönüşümü önemli ölçüde dikkat çekmiş ve araştırmacılar ve endüstri üreticileri arasında büyük ilgi uyandırmıştır (Alhawat, Ashour, Yildirim, Aldemir, & Sahmaran, 2022; Farooq et al., 2021; Qaidi, Tayeh, Ahmed, & Emad, 2022; Wu, Liang, Yang, & Ma, 2023).

Çeşitli atık ürünlerin geri dönüşümünden elde edilen yeni inşaat malzemelerinin üretimini ve formülasyonunu büyük ölçüde kolaylaştıran jeopolimer teknolojisine özel olarak odaklanılmıştır (Mohajerani et al., 2019). Bu yenilikçi amaç için uygun olan en etkileyici atık malzeme türleri arasında, özellikle ham atık, parça atık ve ince öğütülmüş cam tozu dahil olmak üzere camla ilgili olanlar bulunmaktadır. Cam tozunun geopolimer hazırlama formülasyonuna dahil edilmesi, elde edilen taze geopolimer karışımının özellikleri üzerinde doğrudan ve önemli bir etkiye sahiptir (Jiang et al., 2020; Si, Guo, Dai, & Wang, 2020). Bu önemli katkı maddesi, düşük kalsiyumlu ve alkalilerle aktive edilmiş bağlayıcıların genel mekanik performansının yanı sıra gözeneklilik gelişimini etkilemede de kritik bir rol oynamaktadır (Luhar et al., 2019; Torres-Carrasco & Puertas, 2015; Vafaei & Allahverdi, 2017).





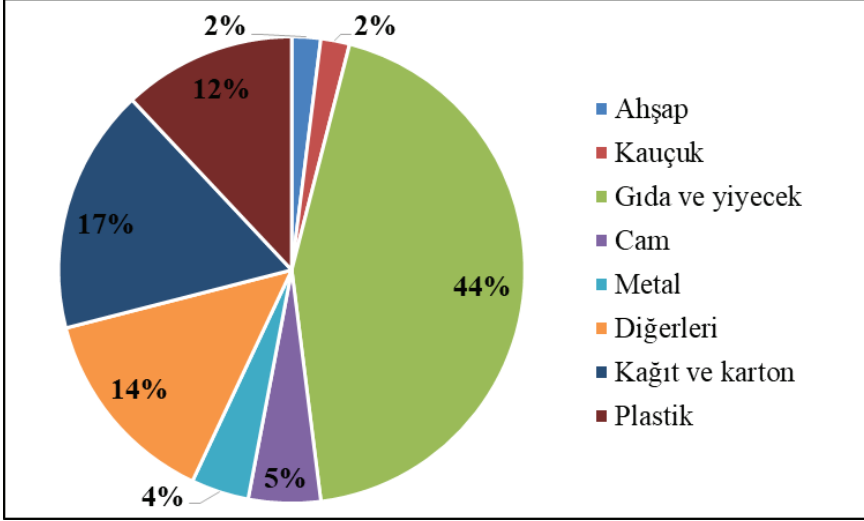
**Şekil 1.** 2013'ten 2024'e kadar başlığında "cam" ve "geopolimer" geçen ve sadece konusunda "geopolimer" geçen araştırma sayısı (Web of science)

Bu kapsamlı çalışmanın temel amacı, geopolimer malzemelerin üretimi için özellikle cam tozu formundaki endüstriyel cam atıkların potansiyel uygulamalarına odaklanan bilimsel yayınları kapsamlı bir şekilde özetlemek ve değerlendirmektir. Bu inceleme yazısındaki amaç, mevcut bilimsel literatürde yer bulması genellikle zor olan bu konuya ilişkin aydınlatıcı bilgiler sunmaktır (Deng et al., 2022; Wang et al., 2023; Yoo, Lee, You, Banthia, & Zi, 2022). Çeşitli araştırma çalışmaları, geleneksel inşaat malzemelerinin geri dönüştürülebilir cam tozundan elde edilen geopolimer malzemelerle yenilikçi bir şekilde ikame edilmesinin aktif olarak önerildiğini ve araştırıldığını göstermektedir. Geopolimer bağlayıcı malzemeler, günümüz inşaat uygulamalarında gerekli olan ilgili ekolojik kriterleri karşılamaktadır. Geri dönüştürülmüş malzemelerin benimsenmesi ve bina yapısal bileşenleri için atıkların etkin bir şekilde geri dönüştürülmesi, çevresel etkilerin azaltılması ve inşaatta sürdürülebilirliğin artırılması açısından önemli potansiyel avantajlar anlamına gelmektedir.

## 2. Cam tozu atıklarının oluşumu ve özellikleri

Özellikle ince cam tozu şeklindeki cam atıkları, doğası gereği bozunmayan yapısı nedeniyle önemli çevresel zorluklara yol açarak, dünya genelindeki çöp sahalarında yaygın ve sıkıntılı bir sorun teşkil etmektedir (Rivera, Cuarán-Cuarán, Vanegas-Bonilla, & Mejía de Gutiérrez, 2018). İstatistikler, her yıl üretilen atık cam miktarının sürekli arttığını göstermektedir. Şekil 2'de görülebileceği gibi, atık cam 2016 yılında dünya çar-

pında üretilen toplam atığın %5'ini oluşturmaktadır ve yıllar içinde artış göstermektedir (Kazmi, Serati, Williams, Qasim, & Cheng, 2021).



Şekil 2. Küresel atık bileşimi (The World Bank, 2024)

Bu faktörler dikkate alındığında, şu anda Macaristan'da tüketici sonrası camın geri dönüşüm oranının kütle olarak sadece %32, Romanya'da ise sadece %47 olduğu tahmin edilmektedir (Patel, 2016), ABD'de bu oran yaklaşık %33 iken İsviçre ve Almanya'da %90'dır (Mitch Jacoby, 2019). Bu rakamlar, olumsuz çevresel etkilerini etkili bir şekilde azaltmak için daha etkili geri dönüşüm uygulamalarına ve cam atık yönetiminde verimliliğin artırılmasına duyulan acil ihtiyacın altını çizmektedir.

Cam atığı, istenen mekanik özelliklerin elde edilmesi için gerekli olan alüminosilikat jellerin oluşumunu etkileyerek jeopolimerin mikro yapısını değiştirir (Torres-Carrasco & Puertas, 2015). Ayrıca, cam atığındaki amorf silika içeriği alkali aktivasyon sürecine yardımcı olarak malzemenin özelliklerini daha da geliştirir (Zhu, Chen, Zhao, Struble, & Yang, 2019). Çimentolu malzemelerde kullanılan atık cam tozunun kimyasal bileşimi, tamamlayıcı çimentolu malzeme olarak kullanım potansiyelini anlamak için kritik öneme sahiptir. Atık cam tozu tipik olarak yüksek oranda silika ( $\text{SiO}_2$ ) içerir, bu silika genellikle %70'in üzerindedir ve bu da puzolanik aktivitesi için gereklidir (Arslan, Öksüzer, & Gökçe, 2022; Sheng et al., 2024; Tang, Wei, Wang, Zhan, & Xing, 2024).

### 3. Geopolimerler için kaynak malzeme olarak cam tozu atıkları

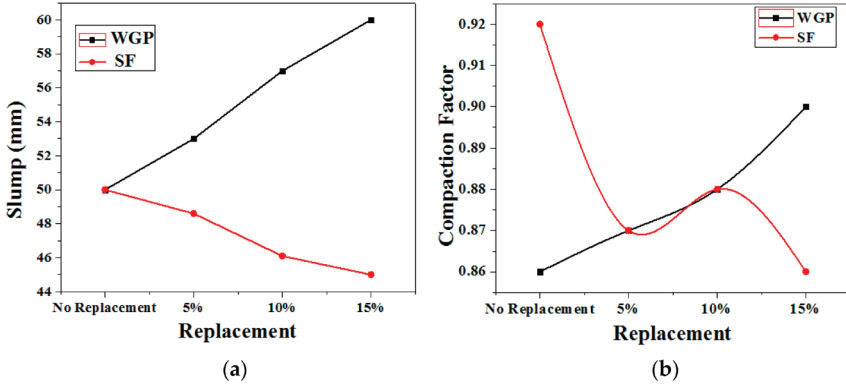
Cam tozu atıklarının geopolimerler için bir kaynak malzeme olarak kullanılması, geopolimer kompozitlerin mekanik özelliklerini geliştirme ve aynı zamanda atık yönetimi sorunlarını ele alma potansiyeli nedeniyle son yıllarda büyük ilgi görmüştür. Alüminosilikat malzemelerin alkali aktivatörlerle reaksiyona girmesiyle oluşan inorganik polimerik malzemeler olan geopolimerler, silika ve alümina bakımından zengin olan cam tozu ilavesinden faydalanabilir. Bu katkı, ortaya çıkan malzemelerin mukavemetini ve dayanıklılığını arttırmakla kalmaz, aynı zamanda atık malzemeleri geri dönüştürerek sürdürülebilir uygulamalarla da uyum sağlar.

Son yıllarda, bilim insanları ve endüstriyel iş ortakları cam tozu atıklarından üretilen geopolimerlerin özelliklerinin karakterize edilmesine ilgi göstermişlerdir (Arslan et al., 2022; Ma et al., 2023; Sheng et al., 2024; Tang et al., 2024; Wang et al., 2023). Geopolimerlerin mekanik özellikleri, özellikle de basınç dayanımı ve eğilme dayanımı ile ilgili kapsamlı bir çok araştırma yapılmıştır. Fakat geopolimerlerin kapsamlı karakterizasyonu için uluslararası standart bir metodoloji geliştirilmemiştir (Matsimbe, Dinka, Olukanni, & Musonda, 2022). Yapılan testler sonucunda elde edilen sonuçlar nihai ürünün kalitesini kanıtlamamaktadır. Çünkü inşaat endüstrisi pratik uygulama sonuçlarını uygulama eğilimindedir. Geopolimerik malzemenin basınç dayanımı ve eğilme dayanımı, deneysel süreç boyunca üretilen ürünün kalitesinin en önemli göstergeleridir. Genel olarak gerçekleştirilen geopolimerik matris karakterizasyonu, malzemelerin morfolojisinin ve yapısının değerlendirilmesini içermektedir (Kotsay & Grabowski, 2023; Varma & Singh, 2023; Xiao, Ma, et al., 2020; Zheng, Wang, Liu, GangaRao, & Liang, 2022). Taramalı elektron mikroskopu ve enerji dağılımlı spektroskopi analizleri geopolimer matrisini değerlendirmek için kullanılan en yaygın tekniklerdir (Matsimbe et al., 2022; Xiao, Ma, et al., 2020; Zheng et al., 2022).

#### 3.1 Cam atığı tozu kullanılarak üretilen geopolimerlerin taze hal özellikleri

Cam tozu, geopolimer formülasyonlarında tamamlayıcı bir malzeme olarak, elde edilen beton karışımlarının reolojik davranışını ve genel işlenebilirliğini etkilemektedir. Cam tozunun geopolimer karışımlarına dahil edilmesinin birincil etkilerinden biri, betonun taze özelliklerinin değiştirilmesidir. Çalışmalarda cam tozu ilave edilmesiyle geopolymer betonun viskozitesini azaltarak ve akış özelliklerini iyileştirerek işlenebilirliğini artırabileceğini göstermiştir. Örneğin, cam tozu kullanımının su emme oranında bir azalmaya ve karışımın pürüzsüzlüğünde bir artışa

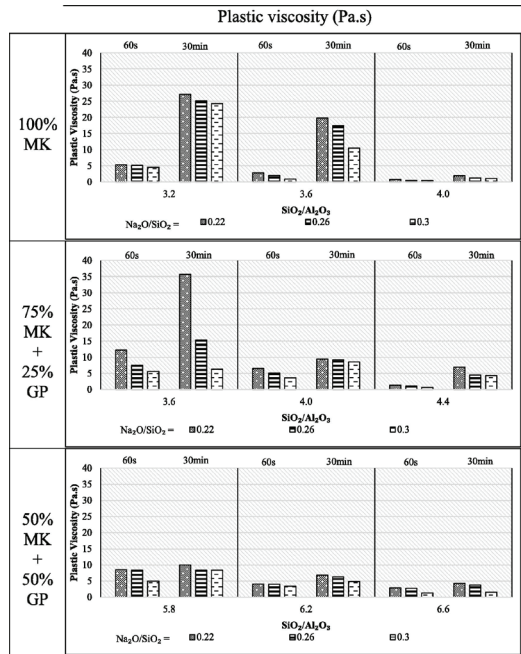
yol açtığı ve bunların işlenebilirliğin artmasına katkıda bulunduğu bildirilmiştir (Kumar et al., 2022) (Şekil 3) Ayrıca, cam tozunun partikül boyutu da önemli bir rol oynamaktadır; daha ince cam partikülleri taze geopolimer karışımının çökmesini ve akışkanlığını artırma eğilimindedir, bu da işlenmesini ve yerleştirilmesini kolaylaştırır (Elmikass, Makhlof, Mostafa, & Hamdy, 2022; Shirzad, Behsoodi, & Tasal, 2023).



Şekil 3. Her iki numune için (a) Slump testi ve (b) sıkıştırma faktörü testi (WGP: atık cam tozu, SF: silis dumanı)(Kumar et al., 2022)

Janowska-Renkas and Kaliciak (Janowska-Renkas & Kaliciak, 2020a) geri dönüştürülmüş atık camdan elde edilen cam tozunun, özellikle uçucu kül ile birleştirildiğinde, geopolimer formülasyonlarına dahil edilmesinin olumlu etkilerini vurgulamaktadır. Araştırmaları, cam tozunun inceliğinin, elde edilen geopolimerlerin basınç dayanımını ve işlenebilirliğini önemli ölçüde etkilediğini göstermektedir. Benzer şekilde, Xiao ve diğerleri (Xiao, Polaczyk, et al., 2020a) atık cam tozunun geri dönüştürülmüş atık cam agrega tabanlarında stabilize edici bir ajan olarak kullanımını araştırmış ve cam tozunun dahil edilmesinin geopolimer karışımlarının mekanik özelliklerini ve işlenebilirliğini artırdığını göstermiştir. Hao ve diğerleri (Hao et al., 2013) güneş paneli atık camının metakaolinit bazlı geopolimerlere dahil edilmesini inceleyerek bu anlayışa daha fazla katkıda bulunmuştur. Bulgularında cam tozu yüzdesinin (%40'a kadar) değişmesinin, işlenebilirliği etkileyen kritik faktörler olan gözenekliliği ve yığın yoğunluğunu etkilediğini ortaya koymaktadır. Çalışmalarında kullandıkları mekanik karıştırma yöntemi, cam tozunun homojen bir şekilde dağılmasını sağlamaktadır ki bu da geopolimer macunlarda optimum işlenebilirlik elde etmek için gereklidir.

Geopolimer karışımlarının reolojik özellikleri cam tozu ilavesinden de etkilenmektedir. Örneğin, Abed ve arkadaşları (Abed, Abbas, & Canakci, 2023) farklı cam tozu ikame oranlarının cüraf bazlı geopolimer şerbetin reolojik ve mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Elde ettikleri sonuçlar, cam tozu içeriğinin artırılmasının, yüksek işlenebilirlik gerektiren uygulamalar için çok önemli olan şerbetin akışkanlığını artırdığını göstermektedir. Bu durum, cam partiküllerinin küresel şeklinin, karışımdaki sürtünmenin azalması nedeniyle işlenebilirliğin artmasına katkıda bulunduğunu belirten Shahedan ve diğerlerinin (Shahedan et al., 2021) bulgularıyla da desteklenmektedir. Ayrıca Rashidian-Dezfouli ve Rangaraju (H. Rashidian-Dezfouli & Rangaraju, 2017) ile Dadsetan ve diğerleri (Dadsetan, Siad, Lachemi, & Sahmaran, 2021) tarafından yapılan çalışmalar, cam tozunun geopolimer sistemlerinde tamamlayıcı bir çimentolu malzeme olarak önemini vurgulamaktadır. Cam tozunun dahil edilmesinin sadece işlenebilirliği artırmakla kalmayıp aynı zamanda viskoziteyi de azalttığını (Şekil 4) ve geopolimer kompozitlerin mekanik performansını artırdığını bildirmişlerdir. Cam tozu ve uçucu kül ve metakaolin gibi diğer malzemelerin sinerjik etkileri, geopolimerin genel özelliklerini optimize etmek için kritik öneme sahiptir.



Şekil 4. Geopolimer hamurların 60 saniye ve 30 dakikadaki plastik viskozitesi (MK: Metakaolin, GP: Cam tozu) (Dadsetan et al., 2021)

### 3.2 Cam tozu atığı içeren sertleştirilmiş geopolimerlerin mekanik özellikleri

Cam tozunun geopolimer matrislere dahil edilmesinin basınç dayanımı, çekme dayanımı ve dayanıklılık gibi mekanik özellikleri iyileştirdiği görülmüştür. Örneğin, Althoey ve arkadaşları cam atıklarıyla modifiye edilmiş ultra yüksek performanslı fiber takviyeli geopolimer betonun geleneksel karışımlara kıyasla daha fazla mukavemet ve dayanıklılık sergilediğini göstererek cam tozunun geopolimer bağlayıcıdaki faydalı rolünü vurgulamıştır (Althoey et al., 2023). Benzer şekilde, çalışmalar cam tozu kullanımının betonda büzülme ve genişmede azalmaya yol açabileceğini ve böylece boyutsal kararlılığı artırabileceğini belirtmektedir (Li, 2024). İnce öğütülmüş cam tozunun puzolanik aktivitesi, geopolimer sistemlerde mukavemet gelişimi için çok önemli olan ek kalsiyum silikat hidratların oluşumuna katkıda bulunur (Xiao, Polaczyk, et al., 2020). Lei (Lei et al., 2023) bazalt ve atık cam tozu karışımından sentezlenen hafif geopolimerlerin mekanik özelliklerini araştırarak sürdürülebilir yapı malzemelerinde endüstriyel yan ürünlerin kullanılma potansiyelini vurgulamıştır. Bulgular, mikrodalga kürlenmenin bu geopolimerlerin basınç dayanımını ve dayanıklılığını önemli ölçüde artırdığını ve böylece geopolimer formülasyonlarında cam tozu atıklarının optimizasyonuna ilişkin değerli bilgiler sağladığını göstermektedir. Ayrıca, Xiao ve diğerleri (Xiao, Ma, et al., 2020) ortam sıcaklığında kürlenmiş atık cam geopolimerlerin, atık cam geri dönüşümü ve geopolimer endüstrisi arasındaki potansiyel sinerji ile 34,5 MPa basınç dayanımına ulaşabileceğini bildirmiştir.

Cam tozu atığı geopolimerlerin mekanik performansı, kullanılan cam tozunun inceliğinden de etkilenmektedir. Janowska-Renkas ve Kaliciak, cam tozunun partikül boyutunun değiştirilmesinin, sodyum hidroksit ile aktive edilen geopolimerlerin basınç dayanımını önemli ölçüde etkilediğini bulmuştur (Janowska-Renkas & Kaliciak, 2020). Daha ince cam tozları, alkali aktivatör ile daha kolay reaksiyona girme eğilimindedir, bu da daha yoğun bir mikro yapıya ve gelişmiş mekanik özelliklere yol açar. Bu gözlem, cam tozunun partikül boyutunun cam bazlı geopolimerlerin basınç dayanımını belirlemede kritik bir rol oynadığını belirten Xiao ve arkadaşlarının bulgularıyla uyumludur (Xiao, Polaczyk, et al., 2020).

Basınç dayanımına ek olarak, cam tozu atığı geopolimerlerin eğilme dayanımı, yapısal uygulamalarda uygulanabilirliklerini etkileyen önemli bir mekanik özelliktir. Dhanabal ve Sushmitha tarafından yapılan araştırma, çimentonun cam tozuyla değiştirilmesinin sadece basınç dayanımını artırmakla kalmayıp aynı zamanda betonun dayanıklılığını artırmak için faydalı olan daha düşük gözeneklilikle sonuçlandığını göstermiştir (Dhanabal & Sushmitha, 2022; Sushmitha & Dhanabal, 2021).

Kamali & Ghahremaninezhad (Kamali & Ghahremaninezhad, 2015) cam tozunun çimentolu malzemelerin mekanik özellikleri üzerindeki etkisine dair önemli bilgiler sunarak cam tozunun mikroyapısal yoğunlaştırma ve puzolanik reaktiviteyi artırmadaki rolünü vurgulamıştır. Çalışmada çimento yerine iki farklı cam tozu ve uçucu kül (GP1, GP2 ve FA) kullanılmıştır. GP1 ve GP2'nin, puzolanik özelliğinden dolayı betonda ikincil hidratasyon ürünü (C-S-H) oluşumuna katkıda bulunduğu ve bunun da basınç dayanımının artmasına neden olduğu görülmüştür. Cam tozu ilavesi, gelişmiş eğilme davranışı ile ilişkilendirilmiştir. Bu sonuç malzemeleri çekme ve eğilme gerilmelerinin yaygın olduğu uygulamalar için uygun hale getirmektedir.

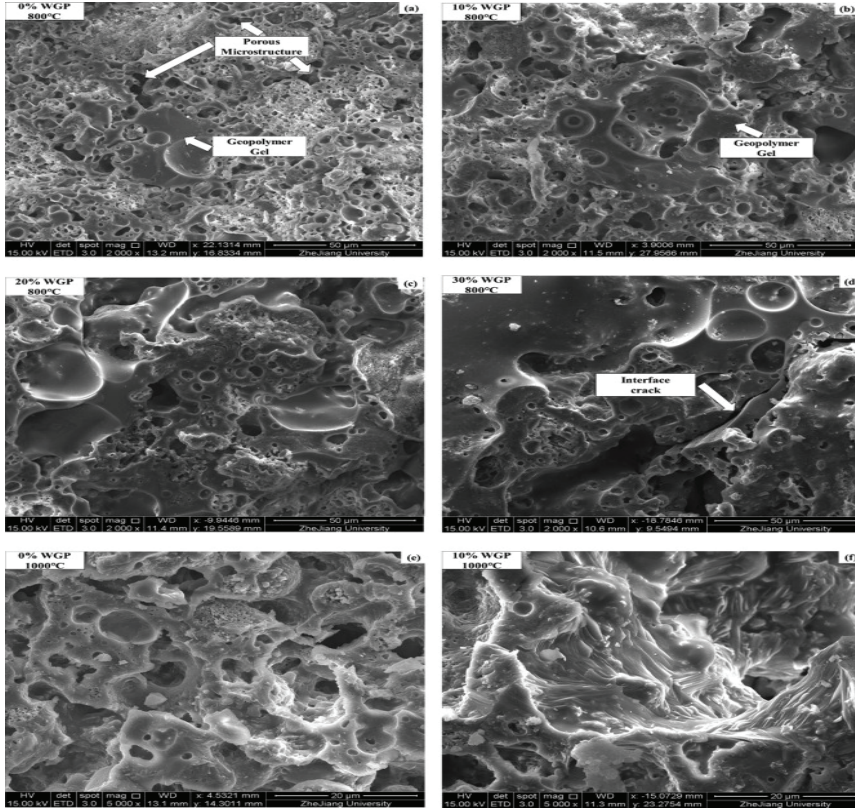
Ayrıca, cam tozu içeren geopolimerlerin termal aktivasyonunun mekanik özelliklerini geliştirdiği gösterilmiştir. Kürleme işlemi sırasında ısı uygulanması polimerizasyon reaksiyonlarını hızlandırarak daha sağlam bir geopolimer matris elde edilmesini sağlar. Bu durum özellikle atık camdan elde edilen geopolimerler için geçerlidir, çünkü ısı işlem silika ve alüminanın camdan çözünmesini kolaylaştırarak geopolimerin bağlayıcı özelliklerini daha da artırabilir (Janowska-Renkas & Kaliciak, 2020). Cam tozu ile uçucu kül ve cüruf gibi diğer tamamlayıcı çimentolu malzemelerin sinerjik etkileri de araştırılmış ve kombinasyonun tek başına cam tozu kullanımına kıyasla daha üstün mekanik performansla yol açabileceği ortaya konmuştur (Kumar Reddy, 2024; Hassan Rashidian-Dezfouli & Rangaraju, 2017). Sonuç olarak, cam tozu atığı geopolimerlerin mekanik özellikleri, inşaat malzemelerinin performansını ve sürdürülebilirliğini arttırmak için potansiyel bir yol sunmaktadır. Cam tozunun diğer malzemelerle birlikte sinerjik etkileri, partikül boyutunun etkisi ve termal aktivasyonun faydaları, bu yenilikçi malzemelerde gözlemlenen üstün mekanik özelliklere katkıda bulunmaktadır. Araştırmalar geopolimer uygulamalarında cam tozu atıklarının tam potansiyelini keşfetmeye devam ettikçe, inşaat endüstrisi geleneksel betona bu sürdürülebilir alternatifleri giderek daha fazla benimseyebilecektir.

### **3.3 Cam tozu atığı içeren sertleştirilmiş geopolimerlerin kalıcılık özellikleri**

Cam tozu atığı geopolimerlerin dayanıklılığı, araştırılan bir diğer kritik husustur. Örneğin sülfat saldırısına karşı direnç, agresif ortamlarda kullanılan malzemeler için son derece önemli bir özelliktir. Li'nin çalışması, %20 atık cam tozu içeren beton karışımlarının gelişmiş sülfat korozyon direnci sergilediğini vurgulayarak, cam tozunun geopolimer betonun uzun ömürlülüğüne olumlu katkıda bulunabileceğini öne sürmüştür (Li, 2024). Ayrıca, cam tozu kullanımı, nem girişi ve ardından

malzemenin bozulmasıyla ilgili sorunları azaltabilecek gelişmiş su emme özellikleriyle ilişkilendirilmiştir (Dhanabal & Sushmitha, 2022).

Jiang ve arkadaşları (Jiang et al., 2020) ağırlıkça %10, %20 ve %30 atık cam tozu kullanarak yaptıkları çalışmada bağlayıcılık performansını ve yüksek sıcaklık özelliklerini araştırmışlar ve %20 oranının her iki testte de en iyi performansı gösterdiğini rapor etmişlerdir. 800°C ve 1000°C sıcaklıklarda cam tozu önemli bir etkiye sahipken, 1200°C gibi yüksek sıcaklıklarda matris üzerinde hiçbir etkisi olmamıştır.



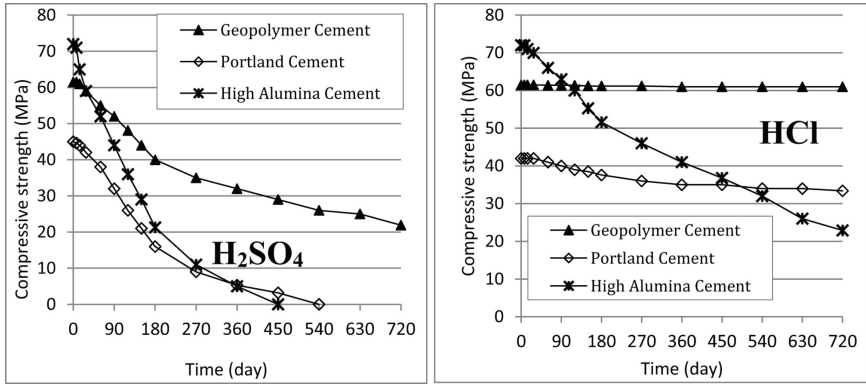
Şekil 5. 800°C'ye maruz bırakıldıktan sonra farklı cam tozu içeriğine sahip geopolimer hamur numunelerinin SEM görüntüleri (Jiang et al., 2020)

SEM görüntülerinden de görülebileceği gibi (Şekil 5), 800°C'de mikro gözenekli yapılar oluşmuş ve bu da mekanik performansta düşüşe neden olmuştur. Cam tozu miktarının %20'ye kadar artmasıyla gözeneklilik azalmış ve mekanik performanslar artmıştır. Daha iyi homojenlik ve mikroyapılar, ısıl işlemde sonra mukavemetlerin daha yüksek oranda



korunmasına katkıda bulunmuştur. Daha önce de belirtildiği gibi, cam tozu içeriği %30'a ulaştığında geopolimer arayüzey çatlakları gözlenmiş ve bu da mekanik performansların düşmesine neden olmuştur. Derinpınar ve arkadaşları (Derinpınar, Karakoç, & Özcan, 2022) cam tozunun yüksek sıcaklık etkisi altındaki geopolimer betonlar üzerindeki etkisini araştırmıştır. 5 farklı grubun (%0, %5, %10, %15 ve %20) incelendiği çalışmada, Cam tozunun yüksek sıcaklık performanslarına katkı sağladığı desteklenmiştir. %20 oranının en iyi performansı gösterdiği çalışmada soğutma türü de incelenmiş ve hava ile soğutmanın su ile soğutmaya göre daha az olumsuz etkiye sahip olduğu belirtilmiştir.

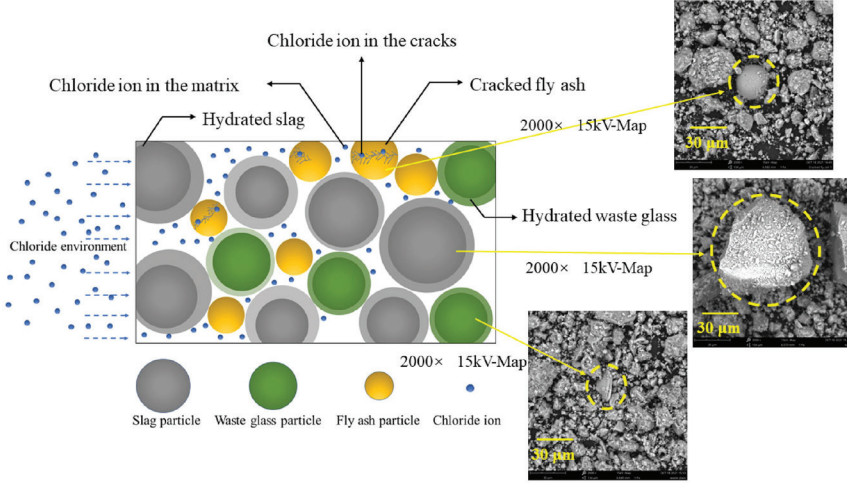
Geopolimer kompozitlerin kimyasal direncinin önemli bir yönü de asit saldırısı altındaki performanslarıdır. Vafaei ve arkadaşları (Vafaei, Allahverdi, Dong, & Bassim, 2018) atık cam tozu ve kalsiyum alüminat çimentosu ile formüle edilen geopolimer çimento harcının hafif asit konsantrasyonlarına karşı kayda değer bir direnç sergilediğini göstermiştir. Karışımlar 24 ay boyunca pH = 3 HCl ve H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> çözeltilerine maruz bırakılmıştır (Şekil 6). Çimentolu karışımlara kıyasla geopolimer karışımlar arasındaki en düşük kütle kaybı farkı %13 ve %41, en yüksek ise %21 ve %71 olmuştur. Elde edilen bulgular, cam tozu ilavesinin geopolimer matrisin asidik ortamlara karşı genel dayanıklılığını artırdığını ve bunun da agresif kimyasal ortamlardaki uygulamalar için çok önemli olduğunu göstermiştir.



Şekil 6. Asit saldırısı durumundaki numunelerin basınç dayanımlarının zamanla değişimi a) H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> b) HCl (Vafaei et al., 2018)

Klorür emilimi, matrislerin yoğunluğu ve boşluk yapısı hakkında genel bilgi sağlamaktadır. Ayrıca, fiziksel klorür emilimi esas olarak matristeki C-S-H jellerine bağlanmaktadır (Şekil 7). Liu ve arkadaşları (Liu,

Yu, Brouwers, & Fan, 2023) alkali ile aktive edilmiş harçların mikroyapısını %10, %20 ve %30 WGP oranı kullanarak incelemiştir. Cam atığı ilavesi ile gözenek hacimlerinin azaldığı ve klor emme potansiyelinin arttığı belirtilmiştir. En yüksek absorpsiyon kapasitesi %30 WGP oranında tespit edilmiştir. Absorpsiyon kapasitesindeki artışın nedeni jel yoğunluğu ve hidrotalsit bağlanmasına bağlanmıştır (Liu et al., 2023; Shi, 2004).



Şekil 7. Alkali active edilmiş harçlarında klorür taşınımı (Liu et al., 2023)

#### 4. Sonuçlar

Cam tozu atıklarının geopolimer üretiminde kullanımı, sürdürülebilir yapı malzemeleri geliştirme çabalarında önemli bir potansiyel sunmaktadır. Araştırmalar, cam tozunun geopolimerlerin mekanik özelliklerini, işlenebilirliğini ve dayanıklılığını iyileştirdiğini göstermektedir. Özellikle cam tozunun puzolanik aktivitesi, malzemelerin mikro yapısını yoğunlaştırarak basınç dayanımı ve eğilme dayanımı gibi mekanik performans göstergelerini artırmaktadır. Bununla birlikte, cam tozunun optimum kullanım oranının belirlenmesi, performans üzerinde kritik bir rol oynamaktadır. Literatürde genellikle %20'lik cam tozu oranının en iyi sonuçları verdiği belirtilse de, farklı cam kaynaklarının kimyasal ve fiziksel özelliklerindeki değişimler bu oranların yeniden değerlendirilmesini gerektirmektedir. Ayrıca, cam tozunun partikül boyutunun ve dağılımının malzeme özellikleri üzerindeki etkisi, daha ileri çalışmalarla detaylandırılmalıdır.

Dayanıklılık açısından bakıldığında, cam tozu ilavesi, geopolimerlerin sülfat saldırısına, yüksek sıcaklıklara ve asidik koşullara karşı direncini artırarak uzun ömürlü ve dayanıklı malzemelerin geliştirilmesine katkı sağlamaktadır. Yapılan çalışmalar, cam tozu oranının gözenekliliği azaltarak kimyasal direnç ve termal dayanım gibi özelliklere olumlu etkiler sağladığını vurgulamaktadır. Ancak, yüksek oranlarda cam tozu kullanımının, özellikle %30'un üzerindeki oranlarda, gözeneklilik artışı ve arayüzey çatlakları nedeniyle mekanik performansta düşümlere neden olduğu da gözlemlenmiştir. Bu durum, cam tozunun optimum kullanım sınırlarının belirlenmesinin önemini bir kez daha ortaya koymaktadır.

Pratik uygulamalar açısından, cam tozu içeren geopolimerlerin inşaat sektöründe yaygınlaşabilmesi için bazı zorluklar bulunmaktadır. Geopolimerlerin üretimi ve performans kriterleri için uluslararası standartların eksikliği, bu malzemelerin daha geniş bir ölçekte uygulanmasını sınırlamaktadır. Ayrıca, inşaat sektöründe genellikle pratik sonuçlara odaklanıldığı göz önünde bulundurulduğunda, geopolimer malzemelerin laboratuvar sonuçları ile saha uygulamaları arasındaki tutarlılık daha fazla araştırılmalıdır. Bunun yanında, cam tozu üretimi ve taşınması sırasında oluşan enerji tüketimi ve karbon salınımının da değerlendirilmesi önemlidir. Daha düşük maliyetli ve enerji verimli üretim süreçlerinin geliştirilmesi, bu malzemelerin çevresel ve ekonomik sürdürülebilirliğini artırabilir.

Sonuç olarak, cam tozu atıklarının geopolimer üretiminde kullanımı, hem çevresel hem de ekonomik açıdan büyük bir potansiyel sunmakla birlikte, daha geniş bir uygulama alanı bulabilmesi için bazı teknik ve pratik sorunların çözülmesi gerekmektedir. Geopolimer üretim süreçlerinin optimize edilmesi, mikroyapı-özellik ilişkilerinin daha iyi anlaşılması ve uluslararası standartların geliştirilmesi, bu yenilikçi malzemelerin inşaat sektöründe yaygınlaşmasını sağlayacak önemli adımlardır.

## 5. Kaynakça

- Abed, M. H., Abbas, I. S., & Canakci, H. (2023). Effect of glass powder on the rheological and mechanical properties of slag-based mechanochemical activation geopolymer grout. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 27(12), 3628–3652. doi:10.1080/19648189.2022.2145374
- Alhawati, M., Ashour, A., Yildirim, G., Aldemir, A., & Sahmaran, M. (2022). Properties of geopolymers sourced from construction and demolition waste: A review. *Journal of Building Engineering*, 50, 104104. doi:10.1016/j.jobbe.2022.104104
- Al-Kheetan, M. J., Byzyka, J., & Ghaffar, S. H. (2021). Sustainable Valorisation of Silane-Treated Waste Glass Powder in Concrete Pavement. *Sustainability*. doi:10.3390/su13094949
- Althoey, F., Zaid, O., Alsulamy, S., Martínez-García, R., Prado Gil, J. de, & Arbili, M. M. (2023). Determining Engineering Properties of Ultra-High-Performance Fiber-Reinforced Geopolymer Concrete Modified With Different Waste Materials. *Plos One*. doi:10.1371/journal.pone.0285692
- Arslan, S., Öksüzer, N., & Gökçe, H. S. (2022). Improvement of mechanical and transport properties of reactive powder concrete using graphene nanoplatelet and waste glass aggregate. *Construction and Building Materials*, 318, 126199. doi:10.1016/j.conbuildmat.2021.126199
- Chen, L., Wang, Z., Wang, Y., & Feng, J. (2016). Preparation and Properties of Alkali Activated Metakaolin-Based Geopolymer. *Materials*. doi:10.3390/ma9090767
- Christiansen, M. U. (2013). *An Investigation of Waste Glass-Based Geopolymers Supplemented with Alumina* (Doctoral Thesis). Michigan Technological University .
- Dadsetan, S., Siad, H., Lachemi, M., & Sahmaran, M. (2021). Extensive evaluation on the effect of glass powder on the rheology, strength, and microstructure of metakaolin-based geopolymer binders. *Construction and Building Materials*, 268, 121168. doi:10.1016/j.conbuildmat.2020.121168
- Deng, Y., Yan, C., Zhang, J., Yin, L., Liu, S., & Yan, Y. (2022). Preparation and mechanical characterization of engineered cementitious composites with high-volume fly ash and waste glass powder. *Journal of Cleaner Production*, 333, 130222. doi:10.1016/j.jclepro.2021.130222
- Derinpinar, A. N., Karakoç, M. B., & Özcan, A. (2022). Performance of glass powder substituted slag based geopolymer concretes under high temperature. *Construction and Building Materials*, 331, 127318. doi:10.1016/j.conbuildmat.2022.127318
- Dhanabal, P., & Sushmitha, K. S. (2022). Effect of Iron Ore Tailing and Glass Powder on Concrete Properties. *Ric*. doi:10.7764/ric.00017.21
- Elmikass, A. G., Makhoulouf, M. H., Mostafa, T. S., & Hamdy, G. A. (2022). Experimental Study of the Effect of Partial Replacement of Cement with Glass Powder on Concrete Properties. *Key Engineering Materials*, 921, 231–238. doi:10.4028/p-m8qo9w

- Epure, C., Munteanu, C., Istrate, B., Harja, M., & Buium, F. (2023). Applications of Recycled and Crushed Glass (RCG) as a Substitute for Natural Materials in Various Fields—A Review. *Materials*, *16*(17), 5957. doi:10.3390/ma16175957
- Farooq, F., Jin, X., Faisal Javed, M., Akbar, A., Izhar Shah, M., Aslam, F., & Alyousef, R. (2021). Geopolymer concrete as sustainable material: A state of the art review. *Construction and Building Materials*, *306*, 124762. doi:10.1016/j.conbuildmat.2021.124762
- Hao, H., Lin, K., Wang, D., Chao, S., Shiu, H., Cheng, T., & Hwang, C. (2013). Utilization of solar panel waste glass for metakaolinite-based geopolymer synthesis. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, *32*(3), 797–803. doi:10.1002/ep.11693
- Janowska-Renkas, E., & Kaliciak, A. (2020). Properties of geopolymers from conventional fly ash activated at increased temperature with sodium hydroxide containing glass powder obtained from the recycling of waste glass. *MATEC Web of Conferences*, *322*, 01018. doi:10.1051/mateconf/202032201018
- Jiang, X., Xiao, R., Ma, Y., Zhang, M., Bai, Y., & Huang, B. (2020). Influence of waste glass powder on the physico-mechanical properties and microstructures of fly ash-based geopolymer paste after exposure to high temperatures. *Construction and Building Materials*, *262*, 120579. doi:10.1016/j.conbuildmat.2020.120579
- Kamali, M., & Ghahremaninezhad, A. (2015). Effect of glass powders on the mechanical and durability properties of cementitious materials. *Construction and Building Materials*, *98*, 407–416. doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.06.010
- Kazmi, D., Serati, M., Williams, D. J., Qasim, S., & Cheng, Y. P. (2021). The potential use of crushed waste glass as a sustainable alternative to natural and manufactured sand in geotechnical applications. *Journal of Cleaner Production*, *284*, 124762. doi:10.1016/j.jclepro.2020.124762
- Kotsay, G., & Grabowski, P. (2023). Properties of Geopolymers Based on Metakaolin and Soda-Lime Waste Glass. *Materials*, *16*(15), 5392. doi:10.3390/ma16155392
- Kumar, K., Dixit, S., Arora, R., Vatin, N. I., Singh, J., Soloveva, O. V., ... Buddhi, D. (2022). Comparative Analysis of Waste Materials for Their Potential Utilization in Green Concrete Applications. *Materials*, *15*(12), 4180. doi:10.3390/ma15124180
- Kumar Reddy, B. C. (2024). Effect of Granite Slurry Powder on Characterization of Geopolymer Concrete. *Journal of Physics Conference Series*. doi:10.1088/1742-6596/2779/1/012036
- Lei, S., Gao, H., Dai, H., Bernardo, E., Zhang, H., Yang, Q., ... Wang, L. (2023). Characteristics of lightweight geopolymers from microwave curing of basalt and waste glass powder mixtures. *Construction and Building Materials*, *409*, 133758. doi:10.1016/j.conbuildmat.2023.133758

- Li, C. (2024). Study on Compressive Strength and Sulfate Corrosion Resistance of Limestone Powder and Waste Glass Powder Mixed Concrete. *Materials Research Express*. doi:10.1088/2053-1591/ad1ef6
- Liu, T., Yu, Q., Brouwers, H. J. H., & Fan, X. (2023). Utilization of waste glass in alkali activated slag/fly ash blends: reaction process, microstructure, and chloride diffusion behavior. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, 12(5), 516–526. doi:10.1080/21650373.2022.2082577
- Luhar, S., Cheng, T.-W., Nicolaidis, D., Luhar, I., Panias, D., & Sakkas, K. (2019). Valorisation of glass wastes for the development of geopolymer composites – Durability, thermal and microstructural properties: A review. *Construction and Building Materials*, 222, 673–687. doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.06.169
- Luhar, S., Nicolaidis, D., & Luhar, I. (2021). Fire Resistance Behaviour of Geopolymer Concrete: An Overview. *Buildings*, 11(3), 82. doi:10.3390/buildings11030082
- Ma, Q., Mao, Z., Lei, M., Zhang, J., Luo, Z., Li, S., ... Li, Y. (2023). Experimental investigation of concrete prepared with waste rubber and waste glass. *Ceramics International*, 49(11), 16951–16970. doi:10.1016/j.ceramint.2023.02.058
- Matos, A. M., & Sousa-Coutinho, J. (2012). Durability of mortar using waste glass powder as cement replacement. *Construction and Building Materials*, 36, 205–215. doi:10.1016/j.conbuildmat.2012.04.027
- Matsimbe, J., Dinka, M., Olukanni, D., & Musonda, I. (2022). Geopolymer: A Systematic Review of Methodologies. *Materials*, 15(19), 6852. doi:10.3390/ma15196852
- Mitch Jacoby. (2019). The state of glass recycling in the US. *C&EN Global Enterprise*, 97(6), 28–32. doi:10.1021/cen-09706-cover
- Mohajerani, A., Suter, D., Jeffrey-Bailey, T., Song, T., Arulrajah, A., Horpibulsuk, S., & Law, D. (2019). Recycling waste materials in geopolymer concrete. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 21(3), 493–515. doi:10.1007/s10098-018-01660-2
- Patel, K. (2016). European Commission proposes 75% glass recycling target by 2030. *Industrial Minerals*, 12.
- Perera, S. T. Anupiya. M., Zhu, J., Saberian, M., Liu, M., Cameron, D., Maqsood, T., & Li, J. (2021). Application of Glass in Subsurface Pavement Layers: A Comprehensive Review. *Sustainability*, 13(21), 11825. doi:10.3390/su132111825
- Qaidi, S. M. A., Tayeh, B. A., Ahmed, H. U., & Emad, W. (2022). RETRACTED: A review of the sustainable utilisation of red mud and fly ash for the production of geopolymer composites. *Construction and Building Materials*, 350, 128892. doi:10.1016/j.conbuildmat.2022.128892
- Rashidian-Dezfouli, H., & Rangaraju, P. R. (2017). Comparison of strength and durability characteristics of a geopolymer produced from fly ash, ground

- glass fiber and glass powder. *Materiales de Construcción*, 67(328), 136. doi:10.3989/mc.2017.05416
- Ren, B., Zhao, Y., Bai, H., Kang, S., Zhang, T., & Song, S. (2021). Eco-friendly geopolymer prepared from solid wastes: A critical review. *Chemosphere*, 267, 128900. doi:10.1016/j.chemosphere.2020.128900
- Rivera, J. F., Cuarán-Cuarán, Z. I., Vanegas-Bonilla, N., & Mejía de Gutiérrez, R. (2018). Novel use of waste glass powder: Production of geopolymeric tiles. *Advanced Powder Technology*, 29(12), 3448–3454. doi:10.1016/j.apt.2018.09.023
- Sadowski, Ł. (2018a). Towards the Utilization of Waste Glass Powder in Sustainable Cement Based Overlays. *Matec Web of Conferences*. doi:10.1051/mateconf/201816303001
- Shahedan, N. F., Abdullah, M. M. A. B., Mahmed, N., Kusbiantoro, A., Tammas-Williams, S., Li, L.-Y., ... Nabiałek, M. (2021). Properties of a New Insulation Material Glass Bubble in Geopolymer Concrete. *Materials*, 14(4), 809. doi:10.3390/ma14040809
- Sheng, Z., Zhu, B., Cai, J., Han, J., Zhang, Y., & Pan, J. (2024). Influence of waste glass powder on printability and mechanical properties of 3D printing geopolymer concrete. *Developments in the Built Environment*, 20, 100541. doi:10.1016/j.dibe.2024.100541
- Shi, C. (2004). Effect of mixing proportions of concrete on its electrical conductivity and the rapid chloride permeability test (ASTM C1202 or ASSHTO T277) results. *Cement and Concrete Research*, 34(3), 537–545. doi:10.1016/j.cemconres.2003.09.007
- Shirzad, W., Behsoodi, M. M., & Tasal, M. Y. (2023). Utilization and effects of various particle sizes of waste glass powder as partial replacement of cement in concrete. *International Advanced Researches and Engineering Journal*, 7(3), 191–199. doi:10.35860/iarej.1270868
- Si, R., Guo, S., Dai, Q., & Wang, J. (2020). Atomic-structure, microstructure and mechanical properties of glass powder modified metakaolin-based geopolymer. *Construction and Building Materials*, 254, 119303. doi:10.1016/j.conbuildmat.2020.119303
- Sushmitha, K. S., & Dhanabal, P. (2021). Study on Properties of Concrete With Iron Ore Tailing and Glass Waste. *Journal of Modern Materials*. doi:10.21467/jmm.8.1.30-39
- Tang, W., Wei, Z., Wang, Y., Zhan, B., & Xing, F. (2024). The phase changes of the mortars containing waste glass powder during carbonation. *Construction and Building Materials*, 437, 137029. doi:10.1016/j.conbuildmat.2024.137029
- The World Bank. (2024). Trends in Solid Waste Management. Retrieved 18 September 2024, from [https://datatopics.worldbank.org/what-a-waste/trends\\_in\\_solid\\_waste\\_management.html](https://datatopics.worldbank.org/what-a-waste/trends_in_solid_waste_management.html)
- Torres-Carrasco, M., & Puertas, F. (2015). Waste glass in the geopolymer preparation. Mechanical and microstructural characterisation. *Journal of Cleaner Production*, 90, 397–408. doi:10.1016/j.jclepro.2014.11.074

- Vafaei, M., & Allahverdi, A. (2017). High strength geopolymers binder based on waste-glass powder. *Advanced Powder Technology*, 28(1), 215–222. doi:10.1016/j.apt.2016.09.034
- Vafaei, M., Allahverdi, A., Dong, P., & Bassim, N. (2018). Acid attack on geopolymers cement mortar based on waste-glass powder and calcium aluminate cement at mild concentration. *Construction and Building Materials*, 193, 363–372. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.10.203
- Varma, D. N., & Singh, S. P. (2023). A Review on Waste Glass-based Geopolymer Composites as a Sustainable Binder. *Silicon*, 15(18), 7685–7703. doi:10.1007/s12633-023-02629-7
- Wang, H., Chen, Z., Meng, Z., Liu, L., Wang, X., Qian, D., & Xing, Y. (2023). A novel and clean utilization of multiple solid wastes to produce foam glass-ceramic. *Construction and Building Materials*, 370, 130711. doi:10.1016/j.conbuildmat.2023.130711
- Wu, H., Liang, C., Yang, D., & Ma, Z. (2023). Development of sustainable geopolymers materials made with ground geopolymer waste powder as renewable binder up to 100%. *Construction and Building Materials*, 400, 132746. doi:10.1016/j.conbuildmat.2023.132746
- Xiao, R., Ma, Y., Jiang, X., Zhang, M., Zhang, Y., Wang, Y., ... He, Q. (2020). Strength, microstructure, efflorescence behavior and environmental impacts of waste glass geopolymers cured at ambient temperature. *Journal of Cleaner Production*, 252, 119610. doi:10.1016/j.jclepro.2019.119610
- Xiao, R., Polaczyk, P., Zhang, M., Jiang, X., Zhang, Y., Huang, B., & Hu, W. (2020). Evaluation of Glass Powder-Based Geopolymer Stabilized Road Bases Containing Recycled Waste Glass Aggregate. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2674(1), 22–32. doi:10.1177/0361198119898695
- Yoo, D.-Y., Lee, Y., You, I., Banthia, N., & Zi, G. (2022). Utilization of liquid crystal display (LCD) glass waste in concrete: A review. *Cement and Concrete Composites*, 130, 104542. doi:10.1016/j.cemconcomp.2022.104542
- Zheng, C., Wang, J., Liu, H., GangaRao, H., & Liang, R. (2022). Characteristics and microstructures of the GFRP waste powder/GGBS-based geopolymer paste and concrete. *REVIEWS ON ADVANCED MATERIALS SCIENCE*, 61(1), 117–137. doi:10.1515/rams-2022-0005
- Zhu, W., Chen, X., Zhao, A., Struble, L. J., & Yang, E.-H. (2019). Synthesis of high strength binders from alkali activation of glass materials from municipal solid waste incineration bottom ash. *Journal of Cleaner Production*, 212, 261–269. doi:10.1016/j.jclepro.2018.11.295