



**SEPIYOLİTLERİN VE GRANİT ATIK ÇAMURUNUN KENDİLİĞİNDEN
YERLEŞEN HARÇLARIN MÜHENDİSLİK ÖZELLİKLERİNE ETKİSİNİN
ARAŞTIRILMASI**

Aynur İRMAK ER

**DOKTORA TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

TEMMUZ 2025

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
 - Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
 - Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
 - Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
 - Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,
- bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Aynur İRMAK ER

04/07/2025

SEPIYOLİTLERİN VE GRANİT ATIK ÇAMURUNUN KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN HARÇLARIN MÜHENDİSLİK ÖZELLİKLERİNE ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

(Doktora Tezi)

Aynur İRMAK ER

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Temmuz 2025

ÖZET

Bu çalışmada, Portland çimentosunun (PÇ) yerine Kırşehir yöresinde bulunan Granitaş işletmesine ait granit atık çamuru (GAÇ) ve Eskişehir Akmin Mineral ve Madencilik'ten temin edilen sepiyolit (SP) farklı oranlarda ikame edilerek üretilen kendiliğinden yerleşen harçların (KYH) mühendislik özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Üretilen 17 farklı harç karışımında GAÇ ve SP'nin taze haldeki işlenebilirliği mini çökme-yayılma ve mini V-hunisi deneyleri ile ve sertleşmiş haldeki mekanik dayanımları 3, 7 ve 28 günlük eğilme ve basınç dayanımı, cıvalı porozimetre, klorür geçirgenliği, su emme, toplam porozite, yoğunlukları ve kısıtlanmış rötre deneyleri yapılarak değerlendirilmiştir. Ayrıca GAÇ ve SP içeren KYH karışımlarının mikro yapısal özellikleri Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ile incelenerek, bu malzemelerin harç performansı üzerindeki etkileri mikroskobik düzeyde de değerlendirilmiştir. Sonuçlar, %15'e kadar GAÇ ikamesinin harçlarda mineral katkı olarak kullanılabilirliğini ve daha düşük oranlardaki SP ilavesinin de benzer şekilde faydalı olabileceğini göstermiştir. GAÇ kullanımı su ihtiyacını azaltırken daha yoğun ve dayanıklı bir yapı oluşturmuştur. SP ise su ihtiyacını artırarak %5'in üzerindeki oranlarda dayanım değerlerini düşürmüştür.

Bilim Kodu : 91136
Anahtar Kelimeler : Kendiliğinden yerleşen harç; Granit atık çamuru; Sepiyolit; Taze harç özellikleri; Mekanik özellikleri.
Sayfa Adedi : 105
Danışman : Prof. Dr. Salih YAZICIOĞLU

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF SEPIOLITES AND GRANITE WASTE
SLUDGE ON THE ENGINEERING PROPERTIES OF SELF-COMPACTING
MORTARS

(Ph. D. Thesis)

Aynur İRMAK ER

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

July 2025

ABSTRACT

In this study, the effect of granite waste sludge (GWS) from Granitaş operation in Kırşehir and sepiolite (SP) from Eskişehir Akmin Mineral and Mining Company on the engineering properties of self-compacting mortars (SCM) produced by replacing Portland cement (PC) with granite waste sludge (GWS) at different ratios was investigated. In 17 different mortar mixtures produced, the workability of GCS and SP in fresh state was evaluated by mini-slump-scatter and mini V funnel tests and their mechanical strength in hardened state was evaluated by 3, 7 and 28 days flexural and compressive strength, mercury porosimetry, chloride permeability, water absorption, total porosity, densities and restricted shrinkage tests. In addition, the microstructural properties of GCS and SP-containing PBM mixtures were examined by Scanning Electron Microscopy (SEM) to evaluate the effects of these materials on mortar performance at the microscopic level. The results showed that up to 15% GCS substitution can be used as a mineral admixture in mortars, and that SP addition at lower proportions can be similarly beneficial. The use of GCF reduced the water requirement and created a denser and more durable structure. SP, on the other hand, increased the water requirement and decreased the strength values at ratios above 5%.

Science Code : 91136
Key Words : Self-compacting mortar; Granite waste sludge; Sepiolite; Fresh mortar properties; Mechanical properties.
Page Number : 105
Supervisor : Prof. Dr. Salih YAZICIOĞLU

TEŞEKKÜR

Gazi Üniversitesi'nde doktora eğitimine başladığım andan itibaren değerli fikirlerini, bilgilerini, yardımlarını ve kıymetli zamanının hiçbir zaman esirgemeyen, danışman hocam Sayın Prof. Dr. Salih YAZICIOĞLU'na yürekten teşekkür ederim.

Doktora tez çalışmalarım süresince ilk andan itibaren değerli fikirlerini, yardımlarını, bilgilerini, tezimin izlenmesi ve değerlendirilmesi süresince desteklerini esirgemeyen Sayın Prof. Dr. İlhami DEMİR ve Doç. Dr. Osman ŞİMŞEK'e teşekkür ederim.

Doktora tez jürimde bulunan değerli fikirlerini, yardımlarını, bilgilerini, tezimin izlenmesi ve değerlendirilmesi süresince desteklerini esirgemeyen Sayın Prof. Dr. Hüseyin Yılmaz ARUNTAŞ'a ve Dr. Öğr. Üyesi Mustafa DAYI'ya teşekkür ederim.

Kırşehir Granitaş fabrikasından granit atık çamuru temininde her zaman yardımcı olan Sayın Yasin AYDIN'a teşekkür ederim.

Akmin Mineral ve Madencilik'ten sepiyolit temininde yardımcı olan Sayın Bilal AKDOĞAN'a teşekkür ederim.

Doktora çalışmalarım sırasında beni yalnız bırakmayan maddi ve manevi desteklerini her zaman yanımda hissettiğim değerli eşim Abdulkadir ER'e teşekkür ederim.

Son olarak doktora çalışmam sırasında moral ve motivasyonumun her zaman yüksek olması için elinden geleni yapan değerli dostum Zehra KOZAN'a teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	xi
RESİMLERİN LİSTESİ	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiii
1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	5
2.1. Harç	5
2.1.1. Harç çeşitleri	6
2.1.2. Harç bileşenleri	7
2.1.3. Harçların genel özellikleri ve kullanım alanları.....	7
2.2. Beton	10
2.2.1. Betonun bileşenleri	10
2.2.2. Betonun özellikleri	14
2.3. Mineral Katkılar	21
2.3.1. Sepiyolit	21
2.3.2. Granit atık çamuru.....	27
2.4. Kendiliğinden Yerleşen Betonun/Harcın Özellikleri	31
2.4.1. Kendiliğinden yerleşen beton/ harcın kullanım alanları	32
2.4.2. Kendiliğinden yerleşen beton/ harcın avantaj ve dezavantajları.....	33
2.5. Konu İle İlgili Yapılmış Önceki Araştırmalar	34
3. DENEYSEL ÇALIŞMA.....	45

	Sayfa
3.1. Kullanılan Malzemeler.....	45
3.1.1. Mineral katkıları.....	45
3.1.2. Portland çimentosu.....	46
3.1.3. Agregası.....	47
3.1.4. Akışkanlaştırıcı ve karışım suyu.....	48
3.2. Yöntem.....	49
3.2.1. Karışımların hazırlanması ve oranları.....	49
3.2.2. Mini çökme-yayıma deneyi.....	51
3.2.3. Mini V hunisi deneyi.....	52
3.2.4. Basınç ve eğilme dayanımı deneyleri.....	52
3.2.5. Kapiler su emme deneyi.....	53
3.2.6. Yoğunluk ve su emme tayini.....	54
3.2.7. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) analizi.....	55
3.2.8. Cıvalı porozimetre analizi.....	56
3.2.9. Klor geçirgenliği deneyi.....	58
3.2.10. Kısıtlanmış rötre deneyi.....	60
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA.....	63
4.1. Mini Çökme-Yayıma Deneyi Sonuçları.....	63
4.2. Mini V Hunisi Deneyi Sonuçları.....	64
4.3. Basınç ve Eğilme Dayanımı Deneyleri Sonuçları.....	65
4.4. Kapiler Su Emme Deneyi Sonuçları.....	71
4.5. Yoğunluk ve Su Emme Deneyi Sonuçları.....	72
4.6. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ve EDS Analizi Sonuçları.....	74
4.7. Cıvalı Porozimetre Analizi Sonuçları.....	81
4.8. Klorür Geçirgenliği Deney Sonuçları.....	85
4.9. Kısıtlanmış Rötre Deneyi Sonuçları.....	87

	Sayfa
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	89
5.1. Sonuçlar.....	89
5.2. Öneriler	91
KAYNAKLAR	93
ÖZGEÇMİŞ.....	105



ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.1. GAÇ ve SP'nin kimyasal bileşimi ve fiziksel özellikleri	46
Çizelge 3.2. Çimentonun kimyasal ve fiziksel özellikleri	46
Çizelge 3.3. Akışkanlaştırıcı malzemenin bazı özellikleri.....	49
Çizelge 3.4. Çalışmada kullanılan karışım oranları	50
Çizelge 3.5. Klor Geçirimsizlik Deneyi sonuçlarına göre betonun değerlendirilmesi	59
Çizelge 4.1. Karışımların mini çökme-yayıma verileri	61
Çizelge 4.2. Karışımların mini V hunisi deney sonuçları.....	62
Çizelge 4.3. Tek tip mineral katkı içeren KYH'ların basınç dayanım sonuçları.....	64
Çizelge 4.4. İki tip mineral katkı içeren KYH'ların basınç dayanım sonuçları.....	64
Çizelge 4.5. Tek tip mineral katkı içeren KYH'ların eğilme dayanım sonuçları	68
Çizelge 4.6. İki tip mineral katkı içeren KYH'ların eğilme dayanım sonuçları	69
Çizelge 4.7. Numunelerin doygun kuru yüzey ve görünür yoğunluk değerleri	74
Çizelge 4.8. GAÇ15, SP5, GAÇ15SP5 ve KNT numunelerinin dayanımını etkileyen kimyasal içerikler ve oranları.....	77
Çizelge 4.9. GAÇ15, GAÇ15SP5, SP5 ve KNT karışımlarının 3 ve 28 günlük cıvalı porozimetre analiz verileri.....	83

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 3.1. İnce agrega elek analizi	47
Şekil 3.2. KYH mini çökme-yayılma deneyi.....	51
Şekil 4.1. Karışımların bağıl çökme-yayılma değerleri	64
Şekil 4.2. Numunelerin bağıl huni hız değerleri	65
Şekil 4.3. Tek tip mineral katkı içeren KYH'ların basınç dayanımları	67
Şekil 4.4. İki tip mineral katkı içeren KYH'ların basınç dayanımları	67
Şekil 4.5. Tek tip mineral katkı içeren KYH'ların eğilme dayanımları.....	70
Şekil 4.6. İki tip mineral katkı içeren KYH'ların eğilme dayanımları	70
Şekil 4.7. Tek tip mineral katkı içeren numunelerin kapiler su emme katsayıları.....	72
Şekil 4.8. İki tip mineral katkı içeren numunelerin kapiler su emme katsayıları	72
Şekil 4.9. Tek tip mineral katkı içeren numunelerin toplam su emme ve porozite değerleri	73
Şekil 4.10. İki tip mineral katkı içeren numunelerin toplam su emme ve porozite Değerleri	74
Şekil 4.11. GAÇ15, GAÇ15SP5, SP5 ve KNT karışımlarının gözenek boyut dağılımı.	82
Şekil 4.12. GAÇ15, GAÇ15SP5, SP5 ve KNT karışımlarının toplam giriş yapan cıva hacim değerleri	82
Şekil 4.13. GAÇ15, GAÇ15SP5, SP5 ve KNT karışımlarının 3 ve 28 günlük porozite ve basınç değerleri	85
Şekil 4.14. Klor geçirgenliği deney verileri.....	86
Şekil 4.15. Kısıtlanmış rötre deney sonuçları	87

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 3. 1. Kullanılan GAÇ, SP ve agrega malzemeleri	45
Resim 3.2. KYH tasarımında kullanılan ince agrega	47
Resim 3.3. Kullanılan süper akışkanlaştırıcı	48
Resim 3.4. Çalışmada kullanılan harç mikseri	50
Resim 3. 5. Mini çökme-yayıma deneyi	52
Resim 3.6. Mini V hunisi testi	52
Resim 3.7. Basınç ve eğilme dayanımını belirlemede kullanılan cihazlar	53
Resim 3.8. Kapiler su emme deneyi	54
Resim 3.9. Numunelerin Arşimet terazisiyle ölçümü	55
Resim 3.10. Çimentolu sistemlerin boşluk yapısı ve sınıflandırılması.....	56
Resim 3.11. Cıvalı porozimetre ölçüm cihazı.....	57
Resim 3.12. Klorür geçirgenliği deneyi için hazırlanan numuneler	58
Resim 3.13. Kısıtlanmış rötre deneyi için kalıp resimleri	59
Resim 3.14. Halka içerisine yerleştirilen numuneler ve kullanılan mikroskop	61
Resim 3.15. Halka içerisine yerleştirilen numune ve kullanılan mikroskop	61
Resim 4.1. a)GAÇ15 ve b)SP5 3 günlük SEM görüntüleri	78
Resim 4.2. c)GAÇ15SP5 ve d)KNT 3 günlük SEM görüntüleri.....	78
Resim 4.3. GAÇ15SP5 28 günlük SEM görüntüsü	79
Resim 4.4. GAÇ15 28 günlük SEM görüntüsü.....	79
Resim 4.5. KNT 28 günlük SEM görüntüsü.....	80
Resim 4.6. SP5 28 günlük SEM görüntüsü	80

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler

Açıklamalar

%	Yüzde
mm	Milimetre
cm ³	Santimetreküp
g	Gram
kg	Kilogram
MPa	Megapascal
µm	Mikrometre
sn	Saniye

Kısaltmalar

Açıklamalar

DSİ TAKK	Devlet Su İşleri Teknik Araştırma ve Kalite Kontrol
GA	Granit atığı
GAÇ	Granit atık çamuru
GT	Granit tozu
ITZ	Arayüz geçiş bölgesi
KYB	Kendiliğinden yerleşen beton
KYH	Kendiliğinden yerleşen harç
KYYDB	Kendiliğinden yerleşen yüksek dayanımlı beton
MIP	Cıva porozimetresi
ODTÜ	Orta Doğu Teknik Üniversitesi
PÇ	Portland çimentosu
SP	Sepiyolit
VB	Vibrasyonlu beton

1. GİRİŞ

Araştırmacılar tarafından sürekli olarak farklı beton türleri geliştirme çalışmaları yapılmaktadır. Bu çalışmaların temelinde, betonun özelliklerini iyileştirmek, dayanıklılığını artırmak, çevresel etkisini azaltmak ve farklı uygulama alanlarına uygun hale getirmek yatmaktadır. Japonlar tarafından 1988 yılında geliştirilen kendiliğinden yerleşen beton (KYB), inşaat sektöründe bir dönüm noktası olmuştur [1, 2]. KYB'nin avantajları sayesinde daha kaliteli, daha hızlı ve daha güvenli yapılar inşa etmek mümkün hale gelmiştir. Yapılan araştırmalar, KYB kullanılarak üretilen betonarme yapıların, vibrasyonlu beton (VB) kullanılarak üretilenlere göre daha yüksek dayanım, daha az çatlak oluşumu ve daha iyi korozyon direnci gösterdiğini ortaya koymuştur [3-5]. Özellikle zorlu çevresel koşullara maruz kalan yapılar (örneğin, deniz yapılarında veya kimyasal etkilere maruz kalan endüstriyel yapılar) için KYB kullanımı, dayanıklılık açısından önemli avantajlar sunmaktadır. KYB, özel formülü sayesinde, kalıbın her köşesine kendiliğinden yayılır ve sıkışık alanlarda bile mükemmel bir dolgu sağlar [6]. Çimentonun ikamesi olarak kullanılan alternatif bağlayıcı maddeler sadece betonun dayanımını ve performansını arttırmakla kalmaz, aynı zamanda KYB maliyetini de düşürür. Bu bağlayıcı maddeler sayesinde daha az çimento kullanılarak çevresel etki azaltılır, depolama alanlarından tasarruf edilir ve doğal kaynakların aşırı tüketimi engellenir [7-9]. Bağlayıcı malzemelerin beton üretiminde kullanımı, günümüzde yaygın olarak kabul görmüş ve uygulanır hale gelmiştir. Bu malzemeler, betonun performansını artırırken aynı zamanda maliyetleri düşürmekte ve çevresel etkiyi azaltmaktadır. Son yıllarda, farklı endüstriyel yan ürünlerin tamamlayıcı çimentolama malzemeleriyle birlikte kullanımı, dünya genelindeki araştırmacılar arasında büyük ilgi görmektedir. Bu yaklaşım, atıkların değerlendirilmesi ve sürdürülebilir inşaat malzemeleri üretimi açısından önemli fırsatlar sunmaktadır [9-12].

Kendiliğinden yerleşen harç (KYH), kendiliğinden yerleşen betona benzer mekanik ve dayanıklılık özellikleri sergiler ve KYB' un performans mekanizmalarını incelemek için kullanılabilir [13]. Harç, KYB işlenebilirlik özelliklerinin temelini oluşturduğundan dolayı bu özellikler KYH'lar ile değerlendirilebilir. Aslında, KYH'ların özelliklerini değerlendirmek KYB tasarımının ayrılmaz bir parçasıdır [13, 14]. Kendiliğinden yerleşen beton tasarım yöntemleri genellikle, hamur veya harç üzerinde ön çalışma gerektirmektedir. Domone ve Jin (1999) yaptıkları çalışmada, KYB'da harç deneylerinin üstünlükleri,

KYB'nin geleneksel betona göre daha az iri agrega içermesinden (hacimce % 30) kaynaklanır; bu nedenle harç özellikleri baskındır, harç tasarımın temelini oluşturur ve harçta deney yapmak daha kolaydır [15].

Kendiliğinden yerleşen beton veya harçların en önemli sorunlarından biri maliyettir. Bu durum kimyasal katkı ve çimentonun yüksek miktarda kullanımından kaynaklanmaktadır. Kimyasal katkının kullanımı KYB için kaçınılmaz bir durum olduğundan çimento miktarı puzolanik veya toz haldeki mineral katkıları kullanılarak azaltılabilir. Mineral katkı maddeleri, çimentonun harç karışımlarında ve hafif beton, reaktif beton, silindirle sıkıştırılmış ve kendiliğinden yerleşen beton gibi bazı beton türlerinde, puzolanik ve/veya kendinden kaynaklanan bağlama mekanik etkilerinden özellikleri ve dayanıklılığı arttırmak için kullanılmaktadır [16-18]. Bu mineral katkılara, silis dumanı, uçucu kül, sepiyolit, granit tozu, yüksek fırın cürufu vb. örnek verilebilir. Bu alanda yapılan çalışmalardan örnek verilirse, Şahmaran ve diğerleri, kimyasal katkıları ile uçucu kül, tuğla tozu, kaolin ve kireçtaşı tozunun kendiliğinden yerleşen harç (KYH) üzerindeki etkilerini araştırırken, Kavas vd., sepiyolit takviyeli çimento kompozitlerin yapısal özellikleri ve optimum karışım oranlarını araştırılarak, %10 oranında sepiyolit (doğal kil minerali) liflerinin eklenmesinin harcın mekanik ve fiziksel özelliklerini iyileştirdiğini belirlemiştir [13, 19].

Granit yapı sektöründe ve dekorasyon alanında sıklıkla kullanılan doğal bir taştır. Bu taşın kesilmesi, işlenmesi ve cilalanması süreçlerinde ortaya önemli miktarda granit atık çamuru (GAÇ) oluşumuna neden olmaktadır. GAÇ uygun şekilde bertaraf edilmemesi durumunda ciddi çevresel ve sağlık sorunları ortaya çıkabilir. Bu atıkların açık alanlara dökülmesi, toprak ve su kaynaklarının kirlenmesine, hava kalitesinin bozulmasına ve canlı yaşamına zarar vermesine yol açabilir. Bu nedenle, GAÇ yönetimi ve bertarafı, çevre ve insan sağlığının korunması açısından büyük önem taşımaktadır. Bu atıkların geri dönüştürülmesi veya çevreye zarar vermeyecek şekilde bertaraf edilmesi için uygun yöntemlerin geliştirilmesi ve uygulanması gerekmektedir [20-24]. Granit atığı (GA), seramik tuğlalar, fayanslar, çimento harcı, çatı kiremitleri, beton kaldırım blokları ve tuğlaları gibi çeşitli katma değerli inşaat ürünlerinin üretiminde umut verici bir malzeme olarak incelenmiştir. Bu ürünlerin üretiminde GA kullanımı, hem atık yönetimi sorununa çözüm sunmakta hem de doğal kaynakların korunmasına katkıda bulunmaktadır [25-28]. GA inşaat sektöründe kullanım potansiyeli yüksek bir malzemedir. Kolayca bulunabilmesi, uygun kimyasal ve

fiziksel özelliklere sahip olması ve özellikle ince yapılı bir malzeme olması, GA inşaat alanında değerlendirmek için cazip kılmaktadır [25, 29, 30].

Sadek ve diğerleri (2016) yaptıkları çalışmada, granit tozunu (GT) mineral katkı maddesi olarak kullanarak KYB karışımları oluşturdular. Çalışmalarında, karışımına %30, %40 ve %50 oranlarında granit tozu eklenmesinin, kontrol karışımına kıyasla basınç dayanımını sırasıyla %7.8, %23.1 ve %39.3 oranında artırdığını gözlemlediler. GA'nın dayanıklı harç/beton üretiminde kullanımı, son zamanlarda araştırmacıların odak noktası haline gelmiştir[31]. Thomas ve Partheeban (2010) yaptıkları çalışmada, ince agrega yerine %25 oranında GA kullanılmasının, VB'nin basınç dayanımını yaklaşık %9 oranında artırdığını tespit etmişlerdir [32]. Karmegam ve diğerleri (2014) tarafından yapılan bir çalışmada, granit parçacıklarının soğuğa, sıcağa, neme, lekelere, çatlaklara ve çizilmelere karşı dayanıklı olduğu belirtilmiştir [33]. Mukavemet özelliklerinde, birçok araştırmacı tarafından fark edilen bir iyileşme kaydedilmiştir [34-38]. Granit modifiyeli beton karışımlarının mukavemet değerleri, %15'e kadar granit tozu atığı içeren bir kontrol karışımının mukavemet değerlerinden biraz daha düşük veya ona eşit olduğu bulunmuştur [36]. Ghorbani ve diğerleri (2019) yaptıkları çalışmada, kontrol karışımındaki çimentonun %20'sine kadar GA ile değiştirilmesinin VB'nin korozyon direncini artırdığını tespit etmişlerdir [35]. VB üretiminde, çimentonun bir kısmının GA ve/veya mermer atıkları ile değiştirilmesi, korozyon direncini önemli ölçüde artırabilir. Bu malzemelerin kullanımı, beton matrisindeki gözenekleri azaltarak daha dayanıklı bir yapı oluşturur [20, 35].

Jain ve diğerleri (2020) tarafından yapılan çalışmada, seramik tuğlalar ve fayanslar, çimento harcı , çatı kiremitleri ve beton kaldırım blokları ve tuğlaları gibi farklı türde katma değerli inşaat ürünlerinin üretimi için granit atığı incelenmiştir [39]. Chen ve diğerleri (2018) yaptıkları çalışmada, iki farklı endüstriyel atığın birleştirilmesinin betonun performansını önemli ölçüde artırabileceğini ve ayrıca endüstriyel atık birikimini önemli ölçüde azaltabileceğini bildirmiştir [40]. Khotbehsara ve diğerleri (2021) tarafından yapılan çalışmada, pomza ve bir kil minerali olan metakaolinin birlikte dahil edilmesiyle kendiliğinden yerleşen betonun gelişmiş performansını gözlemlediler [41].

Bu çalışma ile granit atık çamuru ve sepiyolitin çimento yerine farklı oranlarda ikame edilerek üretilen kendiliğinden yerleşen harçların mühendislik özellikleri araştırılmıştır. Atıkların açık alanlara dökülmesi, toprak ve su kaynaklarının kirlenmesine, hava kalitesinin

bozulmasına ve canlı yaşamına zarar vermesine yol açabilir. Bu nedenle GAÇ ve SP'nin, KYH'larda çimento yerine ikame yöntemiyle belli oranlarda kullanılması, çevre kirliliğini azaltarak hem maliyet avantajı sağlayabilir hem de dayanımını arttırarak mekanik özelliklerinin iyileşmesini sağlayabileceği düşünülmektedir. Çalışmada, mini çökme-yayıma ve V hunisi deneyleri yapılarak taze harç özellikleri belirlenmiştir. Basınç dayanımı, eğilme dayanımı, kapiler su emme, yoğunluk, su emme tayini, cıvalı porozimetre, klor geçirgenliği ve kısıtlanmış rötre deneyleriyle sertleşmiş harç deneyleri yapılarak, KYH'larda GAÇ ve SP'nin mühendislik özelliklerini nasıl etkilediklerini belirlemek için yapılmıştır. KYH karışımlarının mikro yapısını incelemek için, GAÇ ve SP ile yapılan karışımların Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) analizi yapılmıştır.



2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Harç

Harç; taş, tuğla ve beton duvar birimleri gibi yapı taşlarını bağlamak, aralarındaki düzensiz boşlukları doldurmak ve kapatmak, ağırlıklarını eşit olarak yaymak ve bazen duvarlara dekoratif renkler veya desenler eklemek için sertleşen işlenebilir bir macundur. En geniş anlamıyla harç, çimento harcının yanı sıra tuğlalar arasında kullanılan zift, asfalt ve yumuşak kili de içerir. “Harç” sözcüğü Eski Fransızca mortier, ‘inşaat harcı, sıva; karıştırma kabı’ sözcüğünden gelmektedir [42].

Genellikle sadece çimento harcı olarak bilinen sıradan portland çimento harcı, toz haline getirilmiş sıradan Portland çimentosu, ince agrega ve suyun karıştırılmasıyla oluşturulur. Portland çimentosu on dokuzuncu yüzyılın sonlarında popüler hale gelmiş ve 1930 yılına gelindiğinde inşaat malzemesi olarak kireç harcından daha popüler olmuştur. Portland çimentosunun avantajları, sert ve hızlı bir şekilde sertleşerek daha hızlı bir inşaat temposuna izin vermesidir. Ayrıca, portland çimentosu ile bir yapı inşa etmek için daha az vasıflı işçiye ihtiyaç duyulmaktadır [43].

Bununla birlikte, genel bir kural olarak, portland çimentosu kireç harcı ile inşa edilmiş eski binaların onarımı veya yeniden derzlenmesi için kullanılmamalıdır. Bu binaların doğru şekilde işlev görmesi için kirecin esnekliğine, yumuşaklığına ve nefes alabilirliğine ihtiyaç vardır.

Harç, inşaat sektöründe yapıların bir arada tutulması, yüzeylerin sıvanması ve çeşitli yapısal elemanların oluşturulmasında kullanılan bir karışımdır. Genellikle çimento, kum, su ve bazen de diğer katkı maddelerinden oluşur. Harçların özellikleri, kullanılan malzemelerin türü ve oranlarına, karışımın hazırlanma şekli ve uygulandığı koşullara göre değişiklik gösterir [44].

2.1.1. Harç çeşitleri

Harçlar, kullanılan bağlayıcı maddeye göre farklı özelliklere sahip olabilir. En yaygın olarak kullanılan harç çeşitleri şunlardır:

- Çimento Harcı: modern inşaatın vazgeçilmez bir bileşenidir ve yapı taşlarını bir arada tutma görevini üstlenir. Temel olarak çimento, ince agrega (kum) ve suyun hassas oranlarda karıştırılmasıyla elde edilir. Bu basit gibi görünen karışım, kimyasal reaksiyonlar sayesinde zamanla priz alarak kayımsı sağlam bir yapıya dönüşür ve bileşenleri güçlü bir şekilde birbirine bağlar [45].
- Kireç Harcı: antik çağlardan günümüze kadar uzanan köklü bir geçmişe sahip, geleneksel bir yapı malzemesidir. Temel bileşenleri kireç (genellikle sönmüş kireç), ince agrega (kum) ve sudur. Bu karışım, çimento harcına kıyasla daha uzun bir sürede yavaş yavaş sertleşir. Bu esneklik sayesinde, yapıdaki küçük hareketlere ve gerilimlere karşı daha dirençlidir, çatlama olasılığı çimento harcına göre daha düşüktür. Kireç harcı, tarihi yapıların restorasyonunda ve nefes alabilen duvar örgüleri oluşturmada hala tercih edilen bir malzemedir [46].
- Alçı Harcı: özellikle iç mekan uygulamalarında, duvar ve tavan yüzeylerine pürüzsüz bir zemin hazırlamak (sıva) ve dekoratif öğeler oluşturmak amacıyla kullanılan özel bir harç türüdür. Ana bileşeni alçı taşının işlenmesiyle elde edilen alçı tozudur. Su ile karıştırıldığında çok hızlı bir şekilde kurur ve sertleşir, bu da uygulama sürecini hızlandırır. Ayrıca, alçı harcının yüzeylere mükemmel bir şekilde yapışma özelliği vardır, bu sayede dayanıklı ve uzun ömürlü kaplamalar elde edilir. Alçı harcı, kolay işlenebilirliği ve estetik sonuçlar sunması nedeniyle iç mekan tasarımlarında sıklıkla tercih edilir [46].
- Özel Amaçlı Harçlar: Günümüzde inşaat teknolojilerinin gelişmesiyle birlikte, yapılardan beklenen performans kriterleri de artmıştır. Bu ihtiyaçlara cevap vermek amacıyla yalıtım (ısı, ses, su) gibi spesifik sorunlara çözüm sunan özel amaçlı harçlar geliştirilmiştir. Bu harçların formülasyonlarında, geleneksel bileşenlerin yanı sıra, polimerler, hafif agregalar (genleştirilmiş perlit, vermikülit), lifler veya özel kimyasal katkı maddeleri gibi farklı malzemeler kullanılabilir. Örneğin, ısı yalıtım harçları, düşük ısı iletkenliği sayesinde enerji verimliliğini artırırken, ses yalıtım harçları gürültü kirliliğini azaltmaya yardımcı olur. Su yalıtım harçları ise yapıları nem ve suyun zararlı etkilerinden korur. Bu

özel harçlar, yapıların konforunu, dayanımını ve sürdürülebilirliğini artırmak için tasarlanmış mühendislik ürünü çözümlerdir [44].

2.1.2. Harç bileşenleri

Harç ve sıvalar, yapıların inşasında kullanılan, bağlayıcı ve agrega adı verilen temel malzemelerin belirli oranlarda karıştırılmasıyla elde edilen karışımlardır. Bu karışımlara, istenen özellikler kazandırmak için doğal veya sentetik katkıları da eklenebilir. Ağırlık veya hacim bazında belirli oranlarda bağlayıcı malzeme ile kum ve taş kırığı gibi dolgu malzemelerinin karıştırılmasıyla elde edilen ve belirli miktarda su eklenerek hidrasyon ve işlenebilirlik kazanan bu karışımlar, katılma özelliğine sahip hale gelir. İçerdikleri bağlayıcı malzeme türüne bağlı olarak, bu karışımlar kil, alçı, kireç, çimento ve melez harçlar olmak üzere beş ana gruba ayrılmaktadır. Ayrıca, gerektiğinde harca mineral bazlı pigmentler de eklenebilir [47-50].

Harç, sıva gibi kompozit karışımlar, bazen katkı malzemeleri ile zenginleştirilmiş bağlayıcı ve dolgu karışımları olarak tanımlanabilir. Bu karışımlarda kullanılan bağlayıcı malzemeler, inşaat teknolojisinin ilk dönemlerinde önemli bir zorluk teşkil etmiştir [51].

Suyla karıştırıldığında plastiklik kazanan ve kum, çakıl, taş kırığı, tuğla gibi doğal veya yapay dolgu malzemelerini birleştirerek uzun süre dayanıklılığını koruyan ve kütle haline getiren maddeler, "bağlayıcı" olarak adlandırılmaktadır [49, 50, 52].

Alçı, kireç ve çimento gibi bağlayıcılar yanında bitüm, katran, kil ve koloidal nitelikli bazı maddeler de kimyasal özellikleriyle, bağlanma sistemi birbirinden farklı olan bağlayıcı grupları olarak değerlendirilebilir [49, 53].

2.1.3. Harçların genel özellikleri ve kullanım alanları

Harçların genel özellikleri

- *Bağlayıcılık*: Harcın en temel işlevi, farklı yapı malzemelerini – tıpkı bir yapıştırıcı gibi – kalıcı bir şekilde birbirine kenetlemektir. Bu sayede tuğlalar, doğal taşlar, beton bloklar veya diğer yapı elemanları, tek başına duramayacakken harcın sağladığı kohezyon (içsel

tutunma) ve adezyon (yüzeğe yapışma) kuvvetleri sayesinde kararlı ve sağlam yapılar meydana getirirler. Harç, bu malzemeler arasında mekanik bir kilitleme ve kimyasal bağlar oluşturarak yapısal bütünlüğün temelini atar [49].

- *Sivama Özelliği:* Harcın sadece birleştirici değil, aynı zamanda yüzeyleri düzenleme, düzeltme ve güzelleştirme aracı olarak da kullanılmasını ifade eder. Harç, yapıların iç ve dış yüzeylerine uygulanarak pürüzleri giderir, düzgün ve estetik bir görünüm sağlar. Ancak sıvanın işlevi sadece görsel değildir; aynı zamanda yüzeyleri dış etkenlerden (hava koşulları, nem, darbe vb.) korur ve alttaki yapı malzemelerinin ömrünü uzatır. Farklı doku ve renklerde uygulanabilen sıvalar, yapılara kişisel bir karakter de katabilir [49].
- *Doldurma Özelliği:* Harç, yapı elemanları (örneğin, tuğlalar arasındaki derzler) arasında oluşan boşlukları tamamen doldurarak yapının adeta tek bir kütle gibi davranmasını sağlar. Bu sayede, üzerine gelen yükler daha geniş bir alana yayılır ve tekil elemanlar üzerindeki stresi azaltır. Boşlukların doldurulması, aynı zamanda yapıya rijitlik ve stabilite kazandırır, deprem gibi sismik hareketlere karşı direncini artırır. Harcın bu özelliği, yapının genel dayanımını ve güvenliğini önemli ölçüde etkiler [52].
- *Su Geçirmezlik:* Harç ve sıvaların su geçirmezlik performansı, yapıların suyun ve nemin zararlı etkilerinden koruma açısından kritik bir öneme sahiptir. Bu özellik, kullanılan bağlayıcının türünden (çimentonun hidrasyon ürünleri, kirecin karbonatlaşması vb.), agreganın tane boyutu ve dağılımına, karışımdaki su miktarına (su/bağlayıcı oranı) ve özellikle eklenen su yalıtım katkı maddelerine bağlı olarak değişiklik gösterir. Su geçirmez bir harç veya sıva, yağmur suyunun yapıya sızmasını önleyerek küf oluşumunu, donma-çözülme hasarlarını ve yapısal bozulmaları engeller, böylece yapının ömrünü uzatır ve iç mekan konforunu artırır.
- *Dayanıklılık:* İyi formüle edilmiş ve doğru uygulanmış bir harç, zamanın yıpratıcı etkilerine, mekanik zorlanmalara (basınç, çekme, kesme vb.), aşınmaya (sürtünme, erozyon vb.) ve çeşitli çevresel koşullara (sıcaklık değişimleri, nem, kimyasal etkiler vb.) karşı yüksek bir dayanım ve dayanıklılık gösterir. Bu dayanıklılık, yapının uzun yıllar boyunca işlevselliğini korumasını ve bakım maliyetlerinin düşmesini sağlar. Harcın dayanıklılığı, kullanılan malzemelerin kalitesi, karışım oranları ve uygulama teknikleri gibi birçok faktöre bağlıdır [53].
- *İşlenebilirlik:* Taze haldeki harcın kolayca karıştırılabilmesi, taşınabilmesi, yüzeğe yayılabilmesi ve istenilen şekli alabilmesi anlamına gelir. İyi bir işlenebilirliğe sahip harç, ustaların işini kolaylaştırır, uygulama süresini kısaltır ve daha düzgün yüzeyler elde edilmesini sağlar. İşlenebilirlik, su içeriği, kullanılan katkı maddeleri ve agreganın

özellikleriyle yakından ilişkilidir. Uygulama sırasında harcın kıvamı (akışkanlık, kohezyon), işlenebilirliği doğrudan etkileyen önemli bir faktördür [52].

Harçların kullanım alanları

- *Duvar örme:* Harcın en köklü ve vazgeçilmez kullanım alanıdır. Burada harç, tuğlaları, briketleri, taşları, gazbeton blokları veya diğer yapı elemanlarını sıkıca birbirine kenetleyerek düşey ve yatay düzlemde istikrarlı ve yüksek mukavemetli duvarların inşasını mümkün kılar. Harç, sadece yapı elemanlarını bir arada tutmakla kalmaz, aynı zamanda yüklerin eşit bir şekilde dağılmasına yardımcı olarak duvarın genel dayanımını ve stabilitesini artırır. Farklı yapı türlerinde (konutlar, ticari binalar, endüstriyel yapılar vb.) ve farklı amaçlarla (taşıyıcı duvarlar, bölme duvarları, bahçe duvarları vb.) kullanılan harç, inşaat sektörünün olmazsa olmazıdır [51].
- *Sıvama:* Harcın iç ve dış cephelerdeki ham yüzeylere uygulanarak onları düzeltme, pürüzsüzleştirme ve estetik açıdan iyileştirme işlemidir. İç sıvalar, duvarlara düzgün bir zemin hazırlayarak boya, duvar kağıdı veya diğer kaplama malzemelerinin uygulanmasına olanak tanır. Dış sıvalar ise yapıları hava koşullarının (yağmur, kar, güneş vb.) ve diğer çevresel etkenlerin zararlı etkilerinden korurken, aynı zamanda binanın dış görünümünü güzelleştirir. Farklı doku ve renklerdeki sıvalar, binalara karakteristik bir görünüm kazandırır ve ısı ve ses yalıtımına da katkıda bulunabilir [45].
- *Derz dolgusu:* Seramik karolar, fayanslar, doğal taş döşemeler veya diğer kaplama malzemeleri arasındaki boşlukların (derzlerin) özel harçlarla doldurulması işlemidir. Bu işlem, döşemeye sadece estetik bir görünüm (düzgün ve bütünlük bir yüzey) kazandırmakla kalmaz, aynı zamanda su sızmasını önleyerek alttaki katmanları korur ve hijyenik bir ortam sağlar. Derz dolgusu, farklı renklerde ve özelliklerde (su geçirmez, esnek, antibakteriyel vb.) olabilir ve döşemenin kullanım amacına ve tasarımına uygun olarak seçilir.
- *Betonarme elemanların birleştirilmesi:* Prefabrike veya yerinde dökülmüş betonarme elemanların (kolonlar, kirişler, döşeme panelleri vb.) birbirine güvenli ve dayanıklı bir şekilde bağlanması hayati önem taşır. Bu bağlantılar genellikle özel bağlantı elemanları ve yüksek mukavemetli harçlar kullanılarak sağlanır. Bu harçlar, betonarme elemanlar arasında yüksek aderans (yapışma) sağlayarak yük transferini etkinleştirir ve yapının monolitik davranışını destekler. Bu sayede, betonarme yapının genel dayanımı, stabilitesi ve güvenliği artırılır [45].

- *Onarım işleri:* Yapısal hasarların (çatlaklar, boşluklar, dökülmeler vb.) onarımında ve tarihi yapıların restorasyonunda, uygun özelliklere sahip özel onarım harçları kullanılır. Bu harçlar, hasarlı bölgelere güçlü bir şekilde yapışarak yapısal bütünlüğü yeniden sağlar ve daha fazla bozulmayı önler. Restorasyon çalışmalarında ise, orijinal malzemelere ve tekniklere uygun olarak formüle edilmiş harçlar kullanılarak tarihi dokunun korunması ve yapının özgünlüğünün sürdürülmesi amaçlanır. Onarım harçları, hızlı kürlenme, yüksek dayanım, düşük rötre (büzülme) gibi özel özelliklere sahip olabilir [54].

Harç seçimi, yapının maruz kalacağı yükler, çevresel etkiler ve istenen performans özellikleri göz önünde bulundurularak, proje şartnamesine ve ilgili standartlara uygun olarak yapılmalıdır.

2.2. Beton

Beton, çimento, su, agrega (kum, çakıl gibi dolgu malzemeleri) ve bazen de kimyasal katkı maddelerinin karıştırılmasıyla elde edilen yapay bir taştır. Başlangıçta şekil verilebilen kıvamda olan beton, zamanla sertleşerek dayanıklı bir yapı malzemesi haline gelir.

Taze beton, yüksek işlenebilirlik özelliğine sahip olmalı, priz süresi kontrol edilebilir olmalı ve terleme eğilimi düşük olmalıdır. Sertleşmiş beton, belirlenen yaşlarda (7, 28 ve 90 gün) minimum basınç dayanımını sağlamalı, durabilite ve su geçirmezlik özellikleri yüksek olmalı, hacimsel değişimler (rötre ve genleşme) minimum seviyede olmalıdır [44].

2.2.1. Betonun bileşenleri

Beton; agrega, çimento, su ve gerektiğinde bazı katkı maddelerinin birlikte karılmasıyla elde edilen bir yapı malzemesidir. Beton agregaları minerallerden oluşmuş taneli malzemelerdir. Kum, çakıl ve kırmataş normal ağırlıklı beton yapımında en çok kullanılan agrega cinsleridir.

1) Agrega

Agrega, inşaat mühendisliği ve yapı malzeme bilimleri disiplinlerinde, beton, harç, asfalt betonu gibi kompozit yapı malzemelerinin temel bileşenlerinden biri olarak tanımlanan,

taneli bir dolgu malzemesidir. Jeolojik kökenlerine bağlı olarak doğal veya endüstriyel süreçlerle yapay olarak üretilebilen agregalar, mineralojik ve petrografik özellikleriyle karakterizedir. Bu malzemeler, matris içerisinde dağılarak yapısal bütünlüğü sağlarlar.

Agregaların yapı malzemeleri içerisindeki rolü, yalnızca hacimsel bir dolgu maddesi olmanın ötesindedir. Agregalar, kompozit malzemenin mekanik mukavemet, aşınma direnci, donma-çözülme dayanıklılığı, boyutsal kararlılık ve termal genleşme katsayısı gibi kritik mühendislik özelliklerini doğrudan etkiler. Aynı zamanda, malzemenin işlenebilirlik ve ekonomiklik gibi unsurlarına da önemli katkılar sunarlar.

Kum (ince agreg), çakıl (kaba agreg), kırma taş (mıcır) ve endüstriyel atık ürünler (cüruf, uçucu kül vb.) gibi çeşitli agregalar, tane boyutu dağılımı, tane şekli, yüzey pürüzlülüğü, özgül ağırlık, su emme kapasitesi ve kimyasal bileşim gibi özelliklerine göre sınıflandırılır ve yapısal performans gereksinimlerine göre seçilir. Bu özellikler, agreg-matris arayüzey bağı ve dolayısıyla nihai kompozit malzemenin performansı üzerinde belirleyici bir etkiye sahiptir [55].

Agregaların sınıflandırılması, bilimsel ve pratik uygulamalar açısından farklı kriterlere dayanmaktadır. Başlıca sınıflandırma kriterleri ve agreg türleri aşağıda sunulmuştur:

a) Kökenlerine göre sınıflandırma

- *Doğal Agregalar:* Doğada jeolojik oluşumlar sonucu meydana gelen ve fiziksel işlemlerle (kırma, eleme, yıkama) kullanıma hazır hale getirilen agregalardır.
 - *Nehir Agregaları:* Akarsu yataklarından veya teraslarından elde edilen, genellikle yuvarlak veya yarı yuvarlak tane şekline sahip agregalardır. Yüksek temizlik ve iyi tane dağılımı sergileyebilirler.
 - *Ocak Agregaları:* Doğal kayaç yataklarından çıkarılan ve kırma işlemleriyle istenilen boyutlara getirilen agregalardır (örneğin bazalt, granit, kireçtaşı kırması). Genellikle köşeli ve pürüzlü yüzeylere sahiptirler.
- *Yapay Agregalar (İşlenmiş veya Hafif Agregalar):* Endüstriyel atıkların veya özel hammaddelerin termal veya mekanik işlemlerle dönüştürülmesiyle elde edilen agregalardır.

- *Yüksek Fırın Cürufu Agregaları:* Demir-çelik üretiminde ortaya çıkan erimiş cürufun kontrollü soğutulması ve granülasyonu ile elde edilen, genellikle hafif veya normal ağırlıklı agregalardır.
- *Uçucu Kül Agregaları:* Kömürlü termik santrallerde yakma işlemi sonucunda oluşan ince partiküllü malzemenin aglomerasyonu veya doğrudan kullanımı ile elde edilir.
- *Genleştirilmiş Kil/Şeyl/Arduvaz:* Kil, şeyl veya arduvazın yüksek sıcaklıklarda fırınlanmasıyla elde edilen, gözenekli ve hafif agregalardır. Isı ve ses yalıtımı özellikleriyle öne çıkarlar.
- *Pomza ve Perlit:* Volkanik kökenli, doğal olarak gözenekli ve hafif agregalardır.

b) Tane boyutlarına göre sınıflandırma

Agregalar, elek analizleri sonucunda belirlenen tane boyutlarına göre sınıflandırılır ve bu sınıflandırma, agreganın kompozit malzemedeki işlevini belirler.

- **İnce Agregası:** Genellikle 4 mm' den küçük agregalardır. Kum bu kategorinin en yaygın örneğidir. Beton ve harçta boşluk doldurma, işlenebilirlik ve harç-çimento pastası ile yüzey etkileşimi sağlar.
- **Kaba Agregası:** Genellikle 4 mm elek üzerinde kalan agregalardır. Çakıl veya kırma taş (mıcır) olarak adlandırılır. Betonun iskeletini oluşturarak mukavemet ve hacimsel kararlılık sağlar. Maksimum tane boyutu, beton sınıfı ve uygulama alanına göre değişir.
- **Tüvenan Agregası:** Doğal yataklardan veya ocaklardan doğrudan elde edilen, ince ve kaba agreganın belirli oranlarda karışık olarak bulunduğu agregadır. Genellikle stabilize yol tabanları veya düşük mukavemetli betonlarda kullanılır.

Betonun kalitesi büyük ölçüde agrega bileşenlerinin özelliklerine bağlıdır. İri agregalar, betonun mukavemetini sağlarken, ince agregalar ise betonun yüzey kalitesini ve işlenebilirliğini etkiler. Agregaların sertliği, temizliği, şekli ve büyüklükleri, betonun kalitesini doğrudan etkiler. Ayrıca agrega türü, betonun su emme kapasitesini, dondurulma-çözülme dayanımını ve çekme dayanımını etkileyebilir.

2) Çimento

Çimento, inşaat sektöründe kullanılan ve yapıların bir arada durmasını sağlayan önemli bir bağlayıcı malzemedir. Kalsiyum, silikat, alüminyum ve demir gibi ana bileşenleri içerir ve bu bileşenler yüksek sıcaklıkta öğütülüp karıştırılarak elde edilir. Su ile karıştırıldığında sertleşerek betonun ana maddesi haline gelir. İnşaat sektöründe kullanılan çimento çeşitleri, farklı yapısal ihtiyaçları karşılamak üzere çeşitli özelliklere sahiptir. Türkiye'de çimento standartları, TS EN 197-1 standardına uygun olarak belirlenmiştir. Bu standart, çimentoları CEM I'den CEM V'e kadar beş ana tipte sınıflandırır [56]. Bu çimento sınıfları;

- a) Portland çimentosu (CEM I)
- b) Portland Kompoze çimento (CEM II)
- c) Yüksek fırın cürüflu çimento (CEM III)
- d) Puzolanik çimento (CEM IV)
- e) Kompoze çimento (CEM V)' sudur.

3) Su

Beton suyu, betonun kalitesi ve dayanıklılığı üzerinde doğrudan etkili olan, çimento ile reaksiyona girerek hidrasyon sürecini başlatan ve beton karışımının işlenebilirliğini sağlayan kritik bir bileşendir. Karışım suyu temiz olmalı, içinde aşırı miktarda organik madde, yağ, şeker, alkol veya tuz bulunmamalıdır. Bu tür maddeler içeren sular, karışım suyu olarak kullanıma uygun değildir [57]. Temiz, zararlı maddelerden arındırılmış ve ideal olarak içme suyu kalitesinde olmalıdır. pH değeri genellikle nötr veya hafif alkali (pH 6-8) aralığında olmalı, aşırı asidik veya bazik sular betonun dayanımını olumsuz etkileyebilir. Ayrıca, suda çözülmüş veya asılı halde bulunan katı madde miktarı da düşük olmalıdır, çünkü aşırı katı madde içeriği betonun dayanımını ve dayanıklılığını azaltabilir. Beton suyuna dair en önemli hususlardan biri de su/çimento oranıdır. Bu oran, betonun dayanımını ve geçirimsizliğini doğrudan etkiler; düşük su/çimento oranı yüksek dayanımlı beton elde edilmesini sağlarken, yüksek oran betonun dayanımını azaltır ve geçirimsizliğini artırır. Beton suyunda bulunabilecek zararlı maddeler, betonun donatılarını korozyona uğratabilir ve betonun ömrünü kısaltabilir [58]. Bu nedenle, beton suyu seçimi ve kullanımı konusunda dikkatli olunmalı, suyun temizliği ve uygunluğu test edilmelidir.

4) Katkı maddeleri

Betonun katkı maddeleri, betonun özelliklerini iyileştirmek veya özel amaçlar için kullanılan kimyasal veya mineral malzemelerdir [59]. Bu maddeler, betonun işlenebilirliğini artırmaktan dayanımını iyileştirmeye, priz süresini ayarlamaktan geçirimsizliğini azaltmaya kadar geniş bir yelpazede fayda sağlar. Kimyasal katkı maddeleri, beton karışımına sıvı veya toz halde eklenirken, mineral katkı maddeleri genellikle çimento ile birlikte kullanılır. Katkı maddeleri, betonun daha dayanıklı, uzun ömürlü ve çevresel koşullara daha dirençli olmasını sağlar. Örneğin, su azaltıcı katkıları, aynı işlenebilirlik seviyesinde daha az su kullanarak daha yüksek dayanımlı beton elde edilmesine olanak tanırken, hava sürükleyici katkıları donma-çözülme etkilerine karşı betonun direncini artırır. Priz hızlandırıcılar veya geciktiriciler, betonun sertleşme süresini kontrol ederek inşaat projelerinin farklı aşamalarında esneklik sağlar [60]. Mineral katkı maddeleri ise, betonun geçirimsizliğini artırarak kimyasal saldırılara karşı daha dirençli hale getirir ve atık malzemelerin geri dönüşümüne katkıda bulunur. Kısacası, beton katkı maddeleri, modern inşaat projelerinde betonun performansını optimize etmek ve özel gereksinimleri karşılamak için vazgeçilmez bir araçtır.

2.2.2. Betonun özellikleri

Betonun özelliklerini etkileyen birçok faktör vardır. Çimento, su, kum ve agregaların yüzdesi karışımın özellikleri için çok önemlidir. Bu malzemelerin oranı öncelikle betonun çeşitli özelliklerini kontrol eder.

a) Dayanıklılık

Durabilite (dayanıklılık), betonun hizmet ömrü boyunca, maruz kaldığı zorlu çevresel koşullara, aşındırıcı mekanizmalara ve kimyasal saldırılara karşı direncini koruyarak, başlangıçtaki ve tasarlanan mühendislik özelliklerini muhafaza edebilme yeteneğidir. Betonun durabilite gereksinimleri, yapının inşa edildiği ortama (nem, sıcaklık değişimleri, donma-çözülme döngüleri, sülfat veya klorür iyonları varlığı vb.) ve yapının amaçlanan kullanım ömrüne (konut binaları için genellikle 30 yıl, ancak daha uzun ömürlü yapılar için 50-100 yıl veya üzeri) göre önemli ölçüde farklılık gösterir [61].

Çoğu yapı, betonun doğal yıpranma süreçlerine ve hatta doğal afetlere karşı gösterdiği üstün direnç sayesinde, malzeme bozulmasından ziyade işlevsel eskime (kullanım amacının değişmesi, modernizasyon ihtiyacı vb.) nedeniyle yıkılır. Bu durum, betonun aslında ne kadar uzun ömürlü ve dayanıklı bir malzeme olduğunu gösterir. Dahası, betonarme bir kabuk veya yapı, binanın işlevi değişse bile yeniden kullanılabilir veya iç mekan yenilemeleri sırasında varlığını sürdürebilir, bu da betonun sürdürülebilirlik açısından da önemli bir avantajıdır. Beton, sadece yapısal bir eleman değil, aynı zamanda binanın dış kabuğu olarak da doğanın zorlu koşullarına karşı etkili bir bariyer görevi görür.

b) İşlenebilirlik

İşlenebilirlik, taze (henüz sertleşmemiş) beton karışımının, homojenliğini kaybetmeden, kolayca yerleştirilebilmesi, sıkıştırılabilmesi (boşlukların giderilmesi) ve yüzeyinin düzgün bir şekilde bitirilebilmesi kavramını tanımlayan geniş ve subjektif bir terimdir. Betonun işlenebilirliği, yerleştirme ve bitirme işlemlerinin verimliliği, elde edilen yüzeyin görünümü ve kalitesi, nihai mukavemet ve hatta işçilik maliyetleri üzerinde doğrudan ve önemli bir etkiye sahiptir.

İşlenebilirlik, betonun sıkıştırılabilirliği ve dolayısıyla nihai mukavemetiyle yakından ilişkili temel bir özelliğidir. Ancak, ideal işlenebilirlik, betonun kullanılacağı yapı elemanının türüne ve geometrisine göre değişiklik gösterir. Örneğin, dar ve erişilmesi zor bölgeler veya yoğun donatıya sahip elemanlar, kütle beton dökümlerine kıyasla çok daha yüksek bir işlenebilirlik gerektirir. Bu nedenle, tüm beton döküm işlemleri için tek bir evrensel işlenebilirlik standardı belirlemek mümkün değildir. İşlenebilirlik, beton karışımının reolojik özellikleriyle (akışkanlık, kıvam, kohezyon vb.) yakından ilişkilidir ve karışım tasarımında dikkate alınması gereken kritik bir faktördür [62].

c) Gözeneklilik ve geçirgenlik

Betonun yoğunluğunu, mukavemetini ve durabilitesini önemli ölçüde etkileyen temel içsel özellikleridir. Gözeneklilik, betonun içindeki boşluk hacminin toplam hacme oranı olarak tanımlanır. Bu boşluklar, beton karışımındaki hava kabarcıkları, suyun buharlaşması sonucu oluşan boşluklar veya yetersiz sıkıştırma nedeniyle hapsolmuş hava olabilir. Geçirgenlik ise, bir basınç farkı altında nem veya diğer akışkanların betondan geçme hızı olarak tanımlanır.

Nemin veya diğerk zararlı maddelerin betonun içinden geçebilmesi için, gözeneklerin birbirine bağı ve belirli bir boyutta olması gereklidir. Kesikli gözenekler ve küçük açıklıklara sahip gözenekler, akışkanların hareketini önemli ölçüde yavaşlatır. İyi tasarlanmış, uygun orantılı ve yeterince kürlenmiş bir beton karışımında, gözeneklilik belirli bir seviyede olsa bile, geçirgenlik genellikle düşüktür, çünkü gözenekler arasındaki bağlantılar sınırlıdır. Ancak, daha yüksek gözenekliliğe sahip betonlar, genellikle daha yüksek bir geçirgenliğe sahiptir ve bu da dış etkenlerin betonun içine daha kolay nüfuz etmesine olan açar.

Beton karışımına girebilen su, hava ve diğerk potansiyel zararlı kimyasalların miktarı, betonun geçirgenliğini doğrudan etkiler. Betonun içindeki bu mikro kanallar (gözenekler), zararlı maddelerin betonun içine sızmasına ve donatı çeliğinin korozyonu gibi önemli bozulma mekanizmalarını tetiklemesine neden olabilir. Bu nedenle, düşük geçirgenlik, betonun uzun ömürlü olması ve dayanımını koruması için kritik bir faktördür. Öte yandan, geçirgenlik kavramı, drenaj amaçlı kullanılan gözenekli beton plakalar için de geçerlidir. Bu tür betonlar, kaldırımlardan, yürüyüş yollarından ve park alanlarından suyu etkili bir şekilde uzaklaştırarak geleneksel drenaj sistemlerine olan ihtiyacı azaltır [62].

d) Mekanik dayanım

Betonun mekanik dayanımı, kalitesinin en önemli göstergesidir ve betonun diğerk birçok özelliğini doğrudan etkileyebilir. Betonun dayanımı, inşaatta kullanılıp kullanılmayacağını belirleyen temel kriterdir. Yapısal tasarımda, farklı yapı elemanlarına (örneğin, yüksek katlı binaların alt kat kolonları) belirli dayanım sınıfları atanır, çünkü bu elemanlar taşıyıcı olmayan duvarlara göre çok daha kritik bir role sahiptir. Yetersiz dayanım, maliyetli, tehlikeli ve zorlu onarım işlerine veya en kötü senaryoda feci bir yapısal çöküşe yol açabilir [63].

- *Betonun Basınç Dayanımı:* Beton karışımının kalitesini değerlendirmek için en yaygın kullanılan ölçüdür. Bu özellik, betonun boyutunu etkileyen yüklere ne kadar etkili bir şekilde dayanabileceğini gösteren temel bir indikatördür. Belirli bir karışımın, belirli bir projenin yük taşıma gereksinimlerini karşılamaya yeterli olup olmadığını doğru bir şekilde belirlememizi sağlar. Basınç dayanımı, betonun sınıfını ve kullanım alanlarını belirlemede kritik bir parametredir.

- *Betonun Eğilme Dayanımı:* Çekme gerilimleri altında çatlama veya kırılmaya karşı gösterdiği dirençtir. Betonarme yapılarda beton nadiren saf çekme kuvvetine maruz kalsa da, potansiyel hasarın derecesini tahmin etmek ve çatlak kontrolünü sağlamak için eğilme dayanımının bilinmesi önemlidir. Çekme kuvvetleri, betonun çekme dayanımını aştığında, kırılma ve çatlaklar meydana gelir. Betonun düşük eğilme dayanımı nedeniyle, çekme kuvvetlerini karşılamak için genellikle çelik donatı kullanılır.

e) Sünme

Betonun sünmesi, sürekli yükler altında zamana bağlı yapısal deformasyon olarak tanımlanabilir. Beton üzerindeki uzun vadeli stres, şeklinde değişikliklere neden olabilir. Bu deformasyon genellikle uygulanan kuvvetin yönünde gerçekleşir. Sünme her zaman betonun bozulmasına veya kırılmasına neden olmaz. Betona bir yük uygulandığında, anında elastik deformasyona uğrar ve yük devam ederse, elastik deformasyon zamanla sünme deformasyonuna dönüşür.

Betonun deneyimlediği sünme derecesi, gerilimin uygulandığı zamandaki betonun yaşı ve dayanımı, sürekli yüklemenin büyüklüğü ve betonun gerilim altında kaldığı süre tarafından belirlenir. Beton yüklendiğinde, çimento-su hamurunun viskoz akışı, boşluk kapanması, agregalarda kristal akışı ve kuruma ve yükleme nedeniyle karışımın kimyasal yapısından dışarı akan su gibi iç özellikler meydana gelir. Agregaların sünme ve büzülmede önemli bir etkisi vardır.

Sünme ve büzülme, düşük boşluk içeriğine sahip iyi dereceli, daha iri agregalar kullanılarak azaltılır. Ek olarak, düşük büzülme ve sünme oranları için emici olmayan ve yüksek elastiklik modülüne sahip sert, yoğun agregalar tercih edilir. Sünmeyi azaltmada bir diğer kritik faktör de yüklemeye önce kullanılan kürlenme tekniğinin türüdür. Yüksek basınçlı buharlı kürlenme işlemi kullanıldığında çok az sünme olur. Atmosferik ve yüksek basınçlı buharlı kürlenme, yedi günlük ıslak kürlenme prosedürüne kıyasla çok ihmal edilebilir sünme sağlar.

Sünmeyi etkileyen diğer faktörler arasında kullanılan çimento türü, kullanılan çimento hamuru miktarı, betonun boyutu ve geometrisi, donatı çubuklarının miktarı, nem, hacim-yüzey oranı ve sıcaklık yer alır [64].

f) Büzülme

Betondaki hacim değişiklikleri ya otojenik ya da indüklenmiş olabilir. Betonun en zararlı yönlerinden biri, uzun vadeli mukavemeti ve dayanıklılığı üzerinde etkisi olan hacim değişikliğidir. Betondaki hacim değişikliği özelliği, betonda görünmez çatlaklar oluşturduğu ve beton büzülmesi olarak adlandırıldığı için önemlidir.

Betonun büzülmesi, birim uzunluk başına uzunluktaki değişim olarak tanımlanır ve bu nedenle yüzde olarak verilen bir boyutsal niceliktir. Plastik büzülme, kuruma büzülmesi ve otojen büzülme, hepsi zamana bağlıdır.

Başka bir deyişle, betonun büzülmesi, çoğunlukla betonun gözenekli yapısı içindeki su hareketi ve kimyasal reaksiyonlar nedeniyle zamanla hacimde meydana gelen bir azalma olarak tanımlanır. Su akışının neden olduğu deliklerin boşalması, çimento hamurunu birbirine daha yakın çeken çekme kuvvetlerine neden olarak büzülmeye yol açarken, kimyasal reaksiyonlar orijinal bileşenlerden daha küçük hacimli ürünler üretir [65].

g) Yangına dayanıklılık

Beton yanamaz - tutuşturulamaz ve yangından etkilendiğinde zehirli duman yaymaz. Betonun yüksek seviyede yangına dayanıklı olduğu gösterilmiştir ve çoğu durumda neredeyse yangına dayanıklı olarak sınıflandırılabilir.

Bu olağanüstü performans çoğunlukla betonun bileşen bileşenlerinden (çimento ve agregalar) kaynaklanmaktadır. Bu bileşenler neredeyse etkisiz bir malzeme oluşturur ve yangın güvenliği tasarımı için kritik öneme ve nispeten düşük ısı iletkenliğine sahiptir. Normal betonun düşük ısı iletkenlik oranı nedeniyle beton, yalnızca komşu alanlar arasında değil, aynı zamanda kendini yangın hasarından korumak için de etkili bir yangın kalkanı işlevi görebilir [66].

h) Elastiklik modülü

Elastisite modülü (E_c), betonun uygulanan gerilime karşı gösterdiği deformasyon direncini ve rijitliğini tanımlayan bir orandır. Matematiksel olarak, uygulanan gerilimin karşılık gelen

gerilime oranı olarak ifade edilir. Başka bir deyişle, betonun elastik olarak (kalıcı olmayan şekilde) ne kadar sapabileceğini gösterir. Betonun elastisite modülü, kullanılan agrega türü ve karışım oranları gibi faktörlerden önemli ölçüde etkilenir. Daha sert ve yoğun agregalar, genellikle daha yüksek bir elastisite modülüne yol açar.

Elastisite modülünün doğru bir şekilde belirlenmesi, beton yapıların tasarımında kritik öneme sahiptir. Özellikle ön gerilmeli beton yapıların tasarımı gibi bazı durumlarda, elastik teoriye dayalı bileşenlerin doğrusal analizi, nihai ve hizmet edilebilirlik sınır durumu kriterlerini karşılamak için kullanılır. Elastisite modülü, yapı elemanlarının sehim (eğilme) ve diğer deformasyonlarının hesaplanmasında temel bir parametredir [67].

1) Poisson oranı

Tek eksenli gerilmelere (çekme veya basınç) maruz kalan bir beton numunesindeki yanal (enine) birimin şekil değiştirmesinin, uzunlamasına (eksenel) birimin şekil değiştirmesine oranı olarak tanımlanır. Basınç kuvveti altında, beton numunesinin hacminde meydana gelen azalma, hem uzunlamasına (kısalmaya) hem de yanal (genişleme) deformasyonlara neden olur. Poisson oranı, bu iki deformasyon arasındaki ilişkiyi ifade eder. Bir beton numunesinin hacim kaybı, uygulanan gerilme sonucu içindeki küçük agrega parçacıklarının ezilmesi gibi mikro yapısal değişikliklerden kaynaklanabilir. Poisson oranı, betonun hacimsel davranışını anlamak ve daha karmaşık gerilme durumlarını analiz etmek için kullanılır.

i) Ayırışma (Segregasyon)

Ayırışma, taze beton karışımını oluşturan farklı boyut ve özgül ağırlıktaki bileşenlerin (çimento hamuru, ince agrega - kum, iri agrega - çakıl/kırmataş) karıştırma, taşıma, yerleştirme (kalıba dökme) veya uygunsuz uygulama (aşırı vibrasyon) süreçleri sırasında birbirinden ayrılması olayıdır. Bu istenmeyen durum, betonun homojen yapısının bozulmasına yol açar. Örneğin, aşırı vibrasyon uygulandığında, daha ince ve hafif olan çimento hamuru (çimento ve su karışımı) yüzeye doğru hareket ederken, daha iri ve ağır olan agregalar dibine doğru çöker. Betonun ayrışması, nihai yapının veya temelinin mukavemeti ve dayanıklılığı üzerinde ciddi olumsuz etkilere sahiptir. Çünkü homojen olmayan bir beton kütlelerinde, yük dağılımı düzensizleşir, zayıf bölgeler oluşur ve dayanım düşer. İdeal bir

beton karışımında, tüm agrega taneleri eşit oranda kum ve çimento hamuru ile sarılmış durumda bulunur ve tek bir bütünleşik (homojen) kütle oluşturur.

Ancak, sarsıntılar, darbeler ve aşırı titreşimler nedeniyle, çimento ve kum hamuru, taşıma, yerleştirme ve yayma işlemleri sırasında iri agregadan ayrılabilir. Eğer beton, taşıma esnasında ayrılmaya uğramışsa, kalıba dökülmeden önce dikkatlice yeniden karıştırılmalıdır. Ancak, ilk priz süresini (sertleşmeye başlama zamanı) geçmiş bir betonun kullanılması kesinlikle sakıncalıdır, çünkü bu durum betonun nihai dayanımını olumsuz etkiler.

j) Kanama

Kanama, taze (henüz sertleşmemiş) betonun yüzeyinde serbest suyun (karışım suyundan arta kalan ve katı parçacıklar tarafından tutulmayan fazla suyun) yukarı doğru hareket etmesi ve birikmesi olayıdır. Bu olayın nedenlerini anlamak, inşaat mühendislerinin kanamayı kontrol altına almasına ve oluşumunu en aza indirmesine yardımcı olur. Betonun dört temel bileşeni çimento, kum, iri agrega ve sudur. Bu bileşenler arasında su, en düşük yoğunluğa sahip olan ve tek sıvı fazdadır.

Bu durumu basit bir örnekle açıklayabiliriz: Eğer bir taşı, kum veya çimento yığınının düşürürseniz, malzemenin bir kısmı yerinden oynasa da taş yüzeyde kalacaktır. Ancak, aynı taşı suya attığınızda, taş dibe batar ve su seviyesi yükselir. Kanamada da benzer bir mekanizma işler. Agrega ve çimento taneleri, suya atılan taş gibi davranarak dibe çökerler. Kum ve çimento tarafından tam olarak emilemeyen fazla karışım suyu ise, daha hafif olduğu için yukarı doğru hareket eder ve betonun yüzeyinde "kanama suyu" olarak adlandırılan bir su tabakası oluşturur.

Aşırı kanama, betonun yüzeyinde zayıf ve tozlu bir tabaka (laitans) oluşmasına, plastik rötre çatlaklarının artmasına ve betonun genel dayanımının ve durabilitesinin azalmasına neden olabilir. Bu nedenle, karışım tasarımında uygun su/çimento oranının seçilmesi, ince malzemelerin (çimento ve filler) yeterli miktarda bulunması ve uygun yerleştirme ve kürlenme tekniklerinin uygulanması kanamayı kontrol altına almak için önemlidir.

k) Yorulma

Beton bir elemanın, tek bir statik yükü taşıyabileceği maksimum yükün (mukavemetinin) altında, ancak sürekli olarak tekrarlanan yüklemeler sonucunda zamanla yapısal olarak zayıflaması ve nihayetinde kopması olgusudur. Bu durum, malzemenin doğrudan çekme, basınç, eğilme, burulma veya bu yüklemeler türlerinin birleşik etkisi altında kalmasıyla meydana gelebilir. Yorulma, ani bir kopma şeklinde değil, mikro çatlakların yavaş yavaş büyümesi ve birleşmesi sonucu ortaya çıkar.

Betonarme yapılar, özellikle köprüler, viyadükler, endüstriyel zeminler veya sürekli trafik yüküne maruz kalan yollar gibi dinamik yüklere maruz kaldıklarında yorgunluk riski taşırlar. Her bir tekrarlayan yüklemeye çevrimi, betonun içyapısında küçük hasarlara (mikro çatlaklara) neden olur. Bu hasarlar zamanla birikerek makro çatlaklara dönüşür ve nihayetinde yapısal elemanın taşıma kapasitesinin azalmasına ve göçmesine yol açabilir.

Betonun yorulma dayanımı, maksimum gerilme seviyesi, gerilme aralığı (minimum ve maksimum gerilme arasındaki fark), yüklemeye frekansı ve betonun kalitesi gibi çeşitli faktörlerden etkilenir. Yorulma hasarını önlemek veya minimize etmek için, yapısal tasarımda tekrarlayan yüklerin etkileri dikkate alınmalı, uygun donatı detayları sağlanmalı ve yüksek kaliteli beton kullanılmalıdır. Ayrıca, düzenli bakım ve denetimler de yorulma belirtilerinin erken tespit edilmesine yardımcı olabilir [68].

2.3. Mineral Katkılar

2.3.1. Sepiyolit

Sepiyolit, filossilikat mineralleri ailesinden, 1847'de Glocker tarafından mineralojik literatüre kazandırılmış doğal bir kil türüdür. İsmi, Yunanca 'mürekkep balığı' anlamına gelen kelimedenden türetilmiştir ve mineralin benzersiz yapısına atıfta bulunur [69]. Sepiyolit, genellikle "lületaşı" olarak da bilinen, doğada nadir bulunan ve birçok endüstriyel uygulamada kullanılan özel bir mineraldir. Türkiye gibi belirli bölgelerde yoğunlaşan eşsiz jeolojik koşullar altında oluşur.

Ünlü mineralog Fersman'a göre sepiyolit, doğada iki farklı formda ortaya çıkar. Bunlardan ilki, amorf yapısı ve köpük benzeri görünümüyle bilinen ve 'lületaşı' olarak adlandırılan α -sepiyolittir. İkincisi ise, tabakalı bir yapıya sahip olan ve endüstriyel amaçlarla kullanılan β -sepiyolittir. α -sepiyolit, genellikle camsı ve yumrulu bir yapıdayken, β -sepiyolit yassı ve yuvarlak partiküllerden oluşur. Bu iki mineral türü, oluşum koşulları, kimyasal bileşimleri ve fiziksel özellikleri bakımından birbirlerinden farklılık gösterir [70]. Sonuç olarak, lületaşı olarak bildiğimiz sepiyolit ile endüstride kullanılan sepiyolit, aynı mineralin farklı polimorflarıdır.

Sepiyolitin oluşumu, yeraltındaki karmaşık süreçlerle ilişkilidir. Bilim insanları, sepiyolitin, genellikle serpantinleşmiş ultrabazik kayaların, yeraltı sularının etkisiyle veya tortul ortamdaki manyezit minerallerinin, belirli kimyasal koşullar altında çözünmesi ve yeniden kristalleşmesi sonucu oluştuğu görüşündedir. Bu süreç, 'diyajenez' olarak adlandırılan ve tortul kayaların oluşuktan sonra geçirdiği fiziksel ve kimyasal değişimler sürecidir [71].

Sepiyolit oluşumunu etkileyen başlıca faktörler şunlardır:

- *Serpantinleşmiş Ultrabazik Kayalar:* Sepiyolitin oluşumu için genellikle serpantinleşmiş ultrabazik kayaların varlığı gereklidir. Bu kayalar, yüksek sıcaklık ve basınç altında suyla etkileşime girerek serpantin minerallerine dönüşür.
- *Termal Sular:* Yeraltındaki sıcak sular, serpantinleşmiş kayalarla etkileşime girerek bu kayalardaki mineralleri çözer ve yeni minerallerin oluşumunu sağlar.
- *Tortul Ortam:* Tortul ortamlarda bulunan çakıl, kum gibi malzemeler ile birlikte manyezit mineralleri de sepiyolit oluşumunda önemli bir rol oynar.
- *Diyajenetik Koşullar:* Yeraltı sularının kimyasal özellikleri, sıcaklığı ve basıncı gibi faktörler, diyajenetik süreçleri etkileyerek sepiyolit oluşumunu belirler [72].

Sepiyolit oluşum süreci kısaca şöyle özetlenebilir:

1. *Serpantinleşme:* Ultrabazik kayaların suyla etkileşimi sonucu serpantin minerallerinin oluşması.
2. *Çözünme:* Serpantin ve diğer minerallerin yeraltı sularında çözünmesi.
3. *Yeniden Çökme:* Çözünmüş minerallerin, uygun koşullar altında yeniden kristalleşerek sepiyolit mineralini oluşturması.

Sepiyolit oluşumunu etkileyen faktörlerin karmaşıklığı nedeniyle, farklı bölgelerde farklı özelliklere sahip sepiyolit yatakları oluşmuştur. Dünyadaki toplam sepiyolit rezervinin 350 milyon ton civarında olduğu tahmin edilmektedir [73]. MTA'nın 2013 raporuna göre Türkiye'deki sanayi sepiyolitinin rezervi ise 13,5 milyon ton civarındadır [74]. Bazı Afrika ülkelerindeki oluşumlar (Kenya, Namibya ve Tanzanya) ise düşük reolojik özellik ve yapısal farklılıklar nedeniyle sadece basit emme ve soğurma amaçlarına uygun kullanılabilir [58]. Sadece Eskişehir ilinde nodüler sepiyolit için toplam rezerv yaklaşık 17.000 tondur. Türkiye'de özellikle Eskişehir çevresinde bulunan sepiyolit yatakları, dünyadaki en önemli yataklar arasında yer alır [75, 76].

Sepiyolit'in fiziko-kimyasal özellikleri

Sepiyolit, magnezyum silikat minerali olup, mühendislik, çevre, tarım ve sanayi gibi pek çok alanda önemli bir yere sahiptir. Sepiyolit'in fiziko-kimyasal özellikleri, onu özellikle absorban, katalizör taşıyıcısı ve toprak düzenleyici olarak kullanıma uygun kılar. Aşağıda sepiyolit'in başlıca fiziko-kimyasal özellikleri sıralanmıştır [75, 77, 78].

1. Kimyasal bileşim

Sepiyolit'in kimyasal yapısı ve özellikleri, onun çeşitli kimyasal reaksiyonlara yatkınlığını belirler:

- *Kimyasal Formül:* $Mg_4Si_6O_{15}(OH)_2 \cdot 6H_2O$ şeklindedir. Bu formül, hidratlı bir magnezyum silikat olduğunu gösterir.
- *Mineralojik Yapı:* Fillosilikat mineralleri grubuna aittir. Sürekli iki boyutlu tetrahedral ve magnezyum-oktahedral tabakalardan oluşan lifsi bir kristal yapıya sahiptir.
- *Asit-Baz Özelliği:* Hem asidik hem de bazik merkezlere sahip olması nedeniyle asit-baz çift fonksiyonlu bir katalizördür. Sepiyolit partiküllerinin yüzeyindeki Si-OH gurupları belirli derecede asit özelliği gösterir ve katalizör veya reaksiyon merkezi olarak davranabilir.
- *Kimyasal Stabilité:* Çeşitli kimyasallara karşı dirençlidir.
- *Katyon Değişim Kapasitesi:* Diğer kil minerallerine göre nispeten düşük bir katyon değişim kapasitesine sahiptir.

- *Asitle Muamele:* Asit ile muamele edildiğinde adsorbe katyonların uzaklaşmasına ve yüzey alanının artmasına yol açar; aynı zamanda gözenek dağılımı ve kristallik derecesini de etkiler.

2. Fiziksel özellikler

Sepiyolit fiziksel özellikleri, onun çeşitli endüstriyel uygulamalarda tercih edilmesini sağlar:

- *Yapı:* Lifli (fibroz) veya iğne benzeri kristal yapıya sahiptir. Bu lifli yapı, minerale yumuşak ve kireçli bir görünüm kazandırır.
- *Renk:* Genellikle beyaz, krem, gri, sarı veya pembe renkte olabilir. Renk, oluşumu sırasında ortamda bulunan safsızlıklara bağlı olarak değişiklik gösterebilir.
- *Yoğunluk:* Düşük yoğunluğa sahiptir (0.9-1.279 g/cm³ arasında değişir). Çok gözenekli türlerde yoğunluk 1 g/cm³'ün altına düşebilir. Kurduğunda yoğunluğu daha da düşerek suda yüzmeye özelliği gösterir.
- *Gözeneklilik ve Adsorpsiyon:* Yüksek gözenekliliğe ve mükemmel adsorpsiyon (emici) özelliklerine sahiptir. İç yüzey alanı 500 m²/g'a kadar çıkabilir. Bu özelliği sayesinde su, yağ, gaz ve organik buharları yüksek oranda emebilir.
- *Sertlik:* Mohs sertlik skalasında 2-2.5 civarındadır, yani nispeten yumuşaktır ve tırnak veya bıçakla kolayca çizilebilir.
- *Termal Dayanıklılık:* Yüksek sıcaklıklara karşı oldukça dayanıklıdır. Erime sıcaklığı 1400-1450°C arasındadır.
- *Şişmeme Özelliği:* Gözenekli yapısı sayesinde su tutma potansiyeli yüksek olsa da şişme özelliği göstermez.
- *Viskozite:* Düşük katı konsantrasyonlarında bile kararlı, yüksek viskoziteli süspansiyonlar oluşturabilir. Sıvılara tiksotropik özellik kazandırabilir.
- *Koku:* Kendine özgü toprağımsı bir kokuya sahip olabilir.

3. Kristal yapı ve lifli özellikler

Sepiyolit, fillosilikat mineralleri grubuna aittir, ancak diğer tabakalı silikatlardan önemli farklılıklar gösterir. Temel olarak şu yapısal özelliklere sahiptir:

- *Sürekli Tetrahedral Tabakalar:* Sepiyolitinin yapısı, sürekli iki boyutlu silikon-tetrahedral tabakalardan oluşur. Bu tabakalar, silikon atomlarının dört oksijen atomuyla çevrili olduğu dört yüzlü birimlerdir.
- *Süreksiz Oktahedral Tabakalar:* Diğer fillosilikatlardan farklı olarak, sepiyolitte magnezyum-oktahedral tabakalar süreksizdir. Bu süreksizlik, kristal yapı boyunca tünellerin ve kanalların oluşmasına neden olur. Magnezyum atomları, altı oksijen veya hidroksil grubu ile çevrili sekiz yüzlü birimlerdir.
- *Blok ve Tünel Yapısı:* Sepiyolitinin genel yapısı, c-ekseni (lif eksenini) boyunca ardışık olarak dizilen bloklar ve tünellerden meydana gelir. Bu tüneller, mineralin yüksek gözenekliliğine ve adsorpsiyon kapasitesine katkıda bulunur.
- *Zincir Şeklindeki Yapı:* Kristal yapı, 2:1 fillosilikat yapısına ait zincirlerin birbirine bağlanmasıyla oluşur. Her bir zincir, ters sıralanmış silikon-oksijen bağları aracılığıyla diğerine tutturulur. Bu zincir şeklindeki yapı, x-ekseni boyunca sürekli, y-ekseni boyunca ise kesiklidir.

Sepiyolitinin bu kendine özgü kristal yapısı, ona karakteristik lifli veya iğne benzeri bir morfoloji kazandırır. Bu lifli yapı, sepiyolitinin birçok önemli özelliğini doğrudan etkiler:

- *Yumuşak ve Kireçli Görünüm:* Lifli kristaller, minerale dokunulduğunda yumuşak ve kireçli bir his verir. Halk arasında "lületaşı" olarak bilinmesinin ve kolayca işlenebilmesinin nedenlerinden biri de bu fiziksel özelliğidir.
- *Yüksek Yüzey Alanı ve Gözeneklilik:* Lifli yapının oluşturduğu mikro ve mezo gözenekler, sepiyolitinin iç yüzey alanını olağanüstü derecede artırır. Bu, onun yüksek adsorpsiyon (emici) özelliklerini destekler; yani su, yağ, gaz ve organik buharları yüksek oranda emebilir. Bazı kaynaklara göre, 20 gram sepiyolit, bir futbol sahasına eşdeğer bir iç yüzeye sahip olabilir!
- *Adsorpsiyon Merkezleri:* Lif eksenleri boyunca uzanan Si-OH grupları ve yapısal zincirlerin kenarlarındaki magnezyum iyonlarına koordine olmuş su molekülleri gibi yapılar, sepiyolitte üç tür aktif adsorpsiyon merkezi oluşturur. Bu merkezler, mineralin emici ve katalitik özelliklerini güçlendirir.
- *Düşük Yoğunluk:* Lifli ve gözenekli yapısı, sepiyolitinin oldukça hafif olmasını sağlar. Kurduğunda yoğunluğu düşerek suda yüzebilir.

- *Viskozite ve Süspansiyon Oluşturma:* Düşük katı konsantrasyonlarında bile kararlı, yüksek viskoziteli süspansiyonlar oluşturabilme yeteneği, lifli yapısıyla ilişkilidir. Bu özellik, özellikle sondaj çamurları gibi uygulamalarda avantaj sağlar.

Sepiyolit kristal yapısındaki bu eşsiz blok ve tünel dizilimi ile lifli morfolojisi, onu hem endüstriyel hem de geleneksel kullanım alanlarında çok yönlü ve değerli bir mineral haline getirir.

Sepiyolit, başta inşaat sektörü olmak üzere, geniş bir yelpazede mühendislik uygulamalarına sahiptir:

- *Çevre Mühendisliği:* Atık su arıtımında, ağır metallerin ve organik kirleticilerin giderilmesinde etkili bir adsorban olarak kullanılır. Ayrıca, toprak ıslahında ve kirliliğin önlenmesinde de rol oynar.
- *Petrokimya Endüstrisi:* Sondaj sıvılarında viskozite düzenleyici ve akışkan kontrol ajanı olarak tercih edilir. Rafineri atıklarının arıtılması gibi süreçlerde de kullanılabilir.
- *Tarım:* Toprak düzenleyici olarak su tutma kapasitesini artırır, besin maddelerinin bitkilere daha verimli ulaşmasına yardımcı olur ve pestisitlerin kontrollü salımında kullanılabilir. Hayvan yemlerinde de toksin bağlayıcı olarak görev yapar.
- *İnşaat Sektörü:* Hafif agrega olarak beton ve harç karışımlarında kullanılır, bu da yapıların hem yalıtım özelliklerini artırır hem de ağırlığını azaltır. Ayrıca, seramik ve tuğla üretiminde de tercih edilir.
- *Veterinerlik:* Hayvan sağlığında toksin bağlayıcı, ishal giderici ve yem katkı maddesi olarak kullanılır.

Sepiyolit bu çok yönlü kullanımı, modern mühendislik yaklaşımlarının sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmasında kritik bir bileşen olduğunu göstermektedir. Sepiyolit, mühendislikte çok yönlü bir malzeme olarak öne çıkıyor. Çevre dostu ve sürdürülebilir çözümler sunan bu değerli kil minerali, düşük yoğunluğu, yüksek yüzey alanı ve üstün adsorpsiyon (emici) özellikleri sayesinde birçok sektörde vazgeçilmez bir rol oynuyor.

2.3.2. Granit atık çamuru

Granit atık çamuru, granit kesme işlemi sırasında ortaya çıkan, su ve toz partiküllerinin bir araya gelmesiyle oluşan atık bir maddedir. Granit, sert ve yoğun bir kayaç olduğu için kesilmesi sırasında çok miktarda toz oluşur. Bu toz partikülleri, kesme işlemi sırasında bıçağı soğutmak için kullanılan su ile birleşerek çamur kıvamında bir karışım oluşturur.

- *Kesme işlemi:* Granit bloklarının istenen boyutlara getirilmesi için yapılan kesim işlemi sırasında çok miktarda toz oluşur.
- *Su ile karışım:* Kesim sırasında bıçağın aşırı ısınmasını önlemek için su püskürtülür. Bu su, oluşan tozu alarak çamur kıvamında bir karışım oluşturur.

Granit atık çamurunun doğrudan çevreye bırakılması ciddi sorunlara yol açabilir:

- *Su kaynaklarının kirlenmesi:* Atık çamur, su kaynaklarına karışarak suyun kalitesini düşürür.
- *Toprak kirliliği:* Toprağa karışan atık çamur, toprak yapısını bozar ve bitki yetişmesini zorlaştırır.
- *Hava kirliliği:* Atık çamurda bulunan silika tozu, solunması durumunda sağlık sorunlarına neden olabilir. Özellikle solunum yolu hastalıklarına yol açabilir.
- *Doğal yaşamın etkilenmesi:* Atık çamur, suda yaşayan canlıların yaşam alanlarını tahrip eder ve biyolojik çeşitliliği azaltır [20, 21, 30, 79].

Granit atık çamurunun çevreye verdiği zararları en aza indirmek için çeşitli yöntemler uygulanabilir:

- *Atık su arıtma tesislerinde işleme:* Çamur, özel arıtma tesislerinde işlenerek zararsız hale getirilebilir.
- *Geri dönüşüm:* Atık çamur, bazı inşaat malzemelerinin üretiminde geri dönüştürülerek kullanılabilir.
- *Değerlendirme:* Çamurda bulunan bazı mineraller, farklı endüstrilerde kullanılabilir.

Granit atık çamuru, çevreye ciddi zararlar verebilecek bir atıktır. Bu nedenle, bu atığın oluşumunu azaltmak ve ortaya çıkan atıkların çevreye duyarlı yöntemlerle değerlendirilmesi büyük önem taşımaktadır [25, 27, 28].

Granit atık çamurunun fiziko-kimyasal özellikleri

Granit atık çamuru, granit işleme süreçlerinde ortaya çıkan ve su ile karışmış halde bulunan ince taneli bir materyaldir. Bu çamurun fiziksel ve kimyasal özellikleri, granitin mineral bileşimi, işleme yöntemleri ve kullanılan suyun kalitesine göre değişiklik gösterir. Granit atığı, adından da anlaşılacağı gibi, granit bloklarının kesilmesi, işlenmesi ve cilalanması sırasında ortaya çıkan bir yan üründür. Kimyasal bileşimi, esasen granitin kendi minerallerinden kaynaklanır. Bu atıklar genellikle ince toz veya çamur formunda bulunur. Genel olarak granit atık çamurunun bazı yaygın fiziko-kimyasal özellikleri aşağıda verilmiştir [80-82].

a) Kimyasal bileşimi

Granit atığının kimyasal bileşimi, büyük ölçüde silisyum dioksit (SiO_2) ve alüminyum oksit (Al_2O_3) olmak üzere, feldispat, kuvars ve mika gibi ana minerallerden oluşur. Ancak, kesme işleminde kullanılan bıçakların aşınması ve kullanılan su/çamur karışımındaki katkı maddeleri nedeniyle az miktarda başka elementler de içerebilir.

Ortalama olarak, granit atığının kimyasal bileşimi şu şekilde özetlenebilir:

- *Silisyum Dioksit (SiO_2)*: Granit atığının en büyük bölümünü oluşturur, genellikle %60 ila %75 arasında değişir. Bu, kuvars mineralinden gelir ve atığa sertlik ve dayanıklılık kazandırır.
- *Alüminyum Oksit (Al_2O_3)*: Genellikle %10 ila %15 civarında bulunur. Feldispat minerallerinden kaynaklanır.
- *Potasyum Oksit (K_2O) ve Sodyum Oksit (Na_2O)*: Feldispat türlerine (ortoklaz ve plajiyoklaz) bağlı olarak değişen oranlarda bulunur. K_2O genellikle %3-5, Na_2O ise %2-4 civarında olabilir.

- *Kalsiyum Oksit (CaO)*: Özellikle plajiyoklaz feldispatın varlığına bağlı olarak değişir. Kesme işlemlerinde kullanılan bazı katkı maddelerinden de gelebilir (örneğin, gang testerelerinde kireç kullanımıyla %5'e kadar çıkabilir).
- *Demir Oksit (Fe₂O₃ ve FeO)*: Genellikle %1-3 arasında bulunur. Biyotit ve diğer demir içeren minerallerden kaynaklanır. Ayrıca, kesme bıçaklarının aşınması sonucu atıkta demir partikülleri de bulunabilir, bu da Fe₂O₃ oranını artırabilir (özellikle gang testere atıklarında %15'e kadar çıkabilir).
- *Magnezyum Oksit (MgO)*: Genellikle %1'in altında, eser miktarda bulunur.
- *Titanyum Dioksit (TiO₂)*: Çok düşük oranlarda bulunur, genellikle %0.5'ten azdır.
- *Diğer İz Elementler*: Az miktarda MnO, P₂O₅ gibi diğer elementler de bulunabilir.

b) Fiziksel özellikleri

Granit atık çamurunun fiziksel özellikleri, içerdiği su miktarı ve katı parçacıkların boyutu ile doğrudan ilişkilidir:

- *Agrega Büyüklüğü ve Dağılımı*: Granit atık çamuru, genellikle çok ince taneli (milimetre altı ila mikron boyutunda) parçacıklardan oluşur. Öğütme ve kesme işlemlerinin doğası gereği, bu parçacıklar homojen olmayan bir boyuta sahip olabilir, ancak büyük çoğunluğu toz veya silt boyutundadır.
- *Su İçeriği (Nem Oranı)*: Atık çamurunun en belirgin fiziksel özelliklerinden biridir. Kesme ve cilalama işlemleri su kullanılarak yapıldığından, çamur yüksek oranda su (%85'ten fazla) içerir. Bu durum, çamurun akışkanlık ve pompalanabilirlik gibi reolojik özelliklerini etkiler.
- *Özgül Ağırlık/Yoğunluk*: Katı granit partiküllerinin özgül ağırlığı yaklaşık 2.65 g/cm³ civarında olsa da, yüksek su içeriği nedeniyle çamurun genel yoğunluğu çok daha düşüktür ve suya yakın bir yoğunluk gösterebilir.
- *Plastisite*: Granit atık çamuru genellikle düşük plastisiteye sahiptir. Yani, kil mineralleri açısından fakir olduğu için su ile karıştırıldığında kolayca plastik bir hamur oluşturmaz veya şeklini korumaz. Bu özelliği, beton veya harç karışımlarında işlenebilirliği etkileyebilir.
- *Renk*: Atık çamurunun rengi, kullanılan granitin rengine bağlı olarak beyaz, gri, pembe veya kırmızımsı tonlarda olabilir. Kesme işleminde kullanılan bıçaklardan kaynaklanan demir kirliliği de rengi etkileyebilir.

- *Yüzey Alanı:* İnce taneli yapısı nedeniyle, katı partiküllerin toplam yüzey alanı oldukça yüksektir. Bu, özellikle kimyasal reaksiyonlar ve adsorpsiyon kapasitesi açısından önemlidir.
- *Koku:* Genellikle mineral kökenli olduğu için belirgin bir kötü kokusu yoktur. Ancak, uzun süre depolandığında veya organik maddelerle karışırsa kokusal değişimler olabilir.

Granit atık çamurunun mühendislikte kullanım alanları

Granit atık çamuru, inşaat ve çevre mühendisliği gibi birçok alanda potansiyel kullanım alanlarına sahip, değerli bir kaynak olarak değerlendirilebilir. Granit atık çamurunun mühendislikteki kullanımı, sürdürülebilir inşaat uygulamalarına katkı sağlamaktadır. Bu tür geri dönüşüm uygulamaları, hem çevresel etkileri azaltmak hem de atık yönetimini iyileştirmek açısından büyük önem taşır. Bu atığın, doğru işlemlerle ve uygun koşullarda kullanılması, hem çevresel sorunları azaltır hem de ekonomik fayda sağlar [83-85].

- Beton üretiminde granit atık çamuru, betonun dayanımını artırmak ve maliyetini düşürmek için ince agrega olarak kullanılabilir. İnce Agrega: Granit atık çamuru, beton karışımlarında ince agrega olarak kullanılabilir. Bu sayede çimento miktarı azaltılabilir ve betonun maliyeti düşürülebilir. Betonun gözenekliliğini azaltmak ve dayanımını artırmak için dolgu malzemesi olarak da kullanılabilir. Özel Beton ayrıca hafif beton, ısı yalıtım betonu gibi özel beton karışımlarında da kullanılabilir.
- Asfalt karışımlarına katkı maddesi olarak eklenerek, karışımın dayanımını ve su geçirmezliğini artırabilir. Filler malzeme olarak asfalt karışımlarında ince taneli dolgu maddesi (filler) olarak kullanılabilir. Bu sayede karışımın yoğunluğu artar ve boşluk oranı azalır. Asfalt stabilizasyonu bazı durumlarda artırmak için kullanılabilir.
- Granit atık çamuru, yol yapımında da kullanılabilir. Bu atık, asfalt karışımlarına eklenerek yol yüzeylerinde dayanıklılığı artırabilir. Ayrıca, granit atık çamuru, alt temel malzeme olarak da kullanılabilir. Bu sayede, yolların ömrü uzatılabilir ve inşaat maliyetleri azaltılabilir.
- Peyzaj tasarımında ve zemin düzenlemelerinde granit atık çamuru kullanılabilir. Atık çamuru, toprak düzenleyici olarak işlev görerek toprağın özelliklerini iyileştirebilir. Bu uygulama, özellikle alanın estetik ve fonksiyonel gereksinimlerini karşılamak amacıyla kullanılmaktadır.

- Granit atık çamuru, dolgu malzemesi olarak da kullanılabilir. Özellikle inşaat sektöründe, temel dolguları, yapıların stabilize edilmesi ve yapıların sağlamlaştırılması amacıyla granit atık çamuru kullanılarak yapılabilir.
- Granit atık çamuru, seramik ve porselen üretimi için uygun bir hammaddedir. Granit atığından elde edilen öğütülmüş malzeme, seramik ürünlerin yapısına katılabilir. Bu, atığın geri dönüştürülmesini sağlar ve doğal taş malzemelerin daha yaygın kullanımına imkan tanır.
- Granit atık çamuru, su ve hava temizleme sistemlerinde de kullanılabilir. Atık, suyun arıtılması için filtre malzemesi olarak veya çevresel kirliliği azaltmak amacıyla kullanılabilir. Bu alanda, granit atık çamuru çevre dostu bir çözüm sunmaktadır.
- Granit atık çamuru, ısı ve ses yalıtımı sağlamak amacıyla izolasyon malzemesi olarak kullanılabilir. Özellikle ses yalıtımı ve ısı yalıtımı ihtiyacı olan binalarda, granit atık çamuru kullanılabilir.
- Granit atık çamurunun geri dönüşümü, karbon ayak izini azaltmaya yardımcı olabilir. Granit atığının çeşitli inşaat malzemelerinde kullanılması, doğal taş çıkarma sürecinden kaynaklanan enerji tüketimini ve çevresel etkileri azaltabilir.

2.4. Kendiliğinden Yerleşen Betonun/Harcın Özellikleri

Kendiliğinden yerleşen beton (KYB), geleneksel betonun aksine, yüksek akışkanlığı ve düşük ayrışma direnci sayesinde, yoğun donatılı ve dar kesitli elemanlarda bile kusursuz bir yüzey elde edilmesini sağlar. Bu sayede, hem yapıların dayanımını artırır hem de işçilik maliyetlerini düşürür [86]. Dar ve sık demirli yerlerde betonun sağlam olması, inşaat işlerinde hep önemli bir sorun olmuştur. Japon bilim insanları, 1980'lerde bu sorunu çözmek için özel kimyasallar geliştirerek, titreştirmeye gerek kalmadan kalıba yayılan ve çok daha dayanıklı betonlar üretmeyi başarmışlardır. Kendiliğinden yerleşen beton (KYB) teknolojisi, ilk olarak Japonya'da geliştirilmiş ve beton döküm süreçlerinde çığır açmıştır. Özellikle dar ve yoğun donatılı bölgelerde, vibrasyon gerektirmeden kendiliğinden yerleşebilme özelliği sayesinde, betonun homojenliği ve kalitesi önemli ölçüde artırılmıştır [87]. KYB, akışkanlığı ve yüksek kohezyonu sayesinde, terleme ve ayrışma gibi sorunları minimize ederek daha dayanıklı yapılar elde edilmesini sağlar. Kendiliğinden yerleşen beton, geleneksel betonun aksine, özel olarak tasarlanmış bir formülasyona sahiptir. Bu formülasyonda kullanılan kimyasal ve mineral katkıları, betonun performansını belirleyen en önemli faktörlerdir.

İstenilen özelliklere göre bu katkıların oranları ayarlanarak, farklı projeler için özel KYB karışımları üretilebilir [88].

2.4.1. Kendiliğinden yerleşen beton/ harcın kullanım alanları

KYH özel yapısal gereksinimleri olan inşaat projelerinde tercih edilen, yüksek basınç dayanımına sahip bir harç türüdür. Büyük boyutlu yapılar, donatı yoğunluğu yüksek elemanlar, tamirat ve güçlendirme işleri gibi projelerde sıklıkla kullanılır. Ancak KYH'nin yaygınlaşması, yüksek maliyeti, özel tasarım yöntemleri ve uygulama teknikleri gerektirdiği gibi faktörlerle sınırlıdır. Bu nedenle, normal harç kadar geniş bir kullanım alanına henüz ulaşamamıştır.

Vibrasyonun uygulanamaması veya istenmemesi gibi durumlarda geleneksel betonun yerleştirilmesi ve sıkıştırılması mümkün değildir. Bu gibi durumlarda, kendiliğinden yerleşen beton (KYB) gibi özel beton türleri, yüksek akıcılık özellikleri sayesinde kalıbı tamamen doldurur ve donatı etrafında iyi bir sıkışma sağlar. Özellikle bakım-onarım işlerinde, mevcut yapıya zarar vermemek için vibrasyonun sınırlandırılması gerektiği durumlarda KYB, en uygun çözümdür [87].

KYH'nin ilk yatırım maliyeti geleneksel betona göre yüksek olsa da, projenin tamamı göz önüne alındığında daha ekonomik olabilir. Özellikle tünel inşaatlarında, vibrasyonun neden olduğu kalıp hasarları, inşaat süresindeki gecikmeler ve enerji tüketimi gibi faktörler, uzun vadede daha yüksek maliyetlere yol açabilir. KYH'nin kendiliğinden yerleşen özelliği, bu gibi sorunları ortadan kaldırarak toplam proje maliyetini düşürebilir [87].

Donma-çözülme riski yüksek bölgelerde, kimyasal katkılarla hava içeriği artırılmış beton karışımları kullanılarak yapıların dayanıklılığı güçlendirilmektedir. Ancak vibrasyon uygulaması, bazı durumlarda taze betonun hava kabarcıklarını kaybetmesine yol açabilmektedir. Soğuk iklimlerde, donma-çözülme döngüleri nedeniyle beklenen ömründen önce hasar gören yol kaplamalarına rastlanabilmektedir. Bu tür kaplamalar bozulduğunda, betonun taze olduğu sırada yapılan ölçümlerde hava içeriğinin yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Fakat vibrasyon işlemi sırasında, betonun düzgün bir şekilde yerleşmesi sağlanırken, alt kısımlarındaki hava yapısının bozulduğu ve hava miktarının azaldığı tespit

edilmiştir. Vibrasyon işlemi gerekli olsa da, bu uygulamanın bazı olumsuz etkiler de yaratabileceği anlaşılmaktadır [89].

Yol yapımında kullanılan konvansiyonel betonun sıkıştırma işlemi, betonun dayanımı ve ömrü açısından oldukça önemli bir adımdır. Ancak, bu süreçte yaşanan sıkıştırma yetersizliği veya aşırı sıkıştırma gibi sorunlar, çeşitli olumsuz sonuçlara neden olabilir [87].

2.4.2. Kendiliğinden yerleşen beton/ harcın avantaj ve dezavantajları

Kendiliğinden yerleşen betonların inşaat uygulamalarına sağladığı katkıları aşağıdaki gibi sıralayabiliriz:

- ✓ Vibrasyon ihtiyacını ortadan kaldırması,
- ✓ Vibrasyon ekipmanlarının kullanımından kaynaklanan gürültüye maruz kalmayı önlemesi,
- ✓ Sıkışık ve dar bölgelerde bile homojen bir şekilde yerleşebilmesi,
- ✓ Tek bir noktadan döküm yapıldığında kendiliğinden yayılarak mevcut yapıya homojen bir şekilde entegre olması sayesinde güçlendirme uygulamalarında etkin bir şekilde kullanılabilmesi,
- ✓ İşçilerin yapacağı hataları önleyerek daha düzgün bir yüzey elde edilmesini sağlaması,
- ✓ Geleneksel betonun zayıf olduğu su emilimi ve dayanım gibi özelliklerin iyileştirilerek daha uzun ömürlü ve güvenilir yapılar inşa edilmesi,
- ✓ Betonun üretim aşamasında istenen kıvamda hazırlanması sayesinde şantiyede su ilavesi gibi kontrolsüz işlemlerin önüne geçilmesi ve betonun dayanımının düşürülmesinin engellenmesi,
- ✓ Betonun homojen yapısını koruyarak, ayrışma ve korozyona karşı direncini güçlendirmesi,
- ✓ Daha kısa sürede ve daha az para harcayarak işleri tamamlaması,
- ✓ Düşey eleman ve döşeme üretim süreci klasik beton yöntemine göre %80 oranında kısaltılmış olmasıdır [90].

Kendiliğinden yerleşen betonların inşaat uygulamalarına sağladığı dezavantajları aşağıdaki gibi sıralayabiliriz:

- ✓ KYH'de kullanılan kimyasalların yüksek saflık derecesi ve özel üretim süreçleri, ürünün maliyetini artıran başlıca faktörlerdir.
- ✓ KYH'nin yüksek akışkanlığı, özellikle eğimli yüzeylerde betonun kalıba tam olarak yapışmasını engelleyebilir. Bu durum, betonun kalıptan ayrılmasına, yüzeyde pürüzlülük oluşmasına ve estetik görünümün bozulmasına neden olabilir. Bu nedenle, eğimli elemanların KYH ile üretimi için, betonun kalıba tam olarak yapışmasını sağlayacak özel tasarımlı kalıp sistemlerine ihtiyaç duyulmaktadır.
- ✓ KYH uygulamalarında, eğim açısı %2'yi aşan elemanlar için özel kalıp çözümleri geliştirilmeden mevcut kalıp sistemleri kullanılarak başarılı sonuçlar elde etmek mümkün değildir [91].
- ✓ KYH'nin akışkanlığı, dayanımı ve kürlenme süresi gibi özellikleri, agrega gradasyonu ve nem oranı gibi faktörlerden etkilenir. Bu nedenle, farklı malzemelerin kullanıldığı karışımlarda KYH'nin verimliliği farklılık gösterebilir.
- ✓ Bu malzemenin özel yapısı nedeniyle, geleneksel betona göre üretim, uygulama ve kürlenme süreçlerinde daha sıkı bir kontrol mekanizması oluşturulması gerekmektedir. Bu sayede, beklenen performansın elde edilmesi ve olası sorunların önlenmesi sağlanabilir.
- ✓ Klasik betona göre daha fazla miktarda ince taneli dolgu malzemesi içeren bu beton türünde, kullanılan dolgunun mineralojik yapısı, kimyasal bileşimi ve partikül boy dağılımı gibi faktörler, betonun dayanımı, geçirgenliği, işlenebilirliği gibi özelliklerini önemli ölçüde etkilemektedir [92].
- ✓ Yüksek akışkanlığa sahip KYH'nin, yüksek perdeler gibi elemanlarda kullanılması durumunda, hidrostatik basınç etkisi nedeniyle kalıplarda stabiliteyi sağlamak için ek güçlendirme önlemleri alınması gerekmektedir.

2.5. Konu İle İlgili Yapılmış Önceki Araştırmalar

Demir (2016) çalışmasında, sepiyolit in portland çimentosunda farklı oranlarda (%0, %10, %20, %30) ikame edilmesiyle elde edilen harçların fiziksel ve mekanik özelliklerini incelemiştir. Elde edilen bulgulara göre, %10 sepiyolit ikamesi yapılan harçlar, referans harçlarla kıyaslandığında benzer performans göstermiştir. Sepiyolit in düşük yoğunluğu sayesinde elde edilen harçların birim ağırlığı da azalmıştır. Bu durum, sepiyolit in hafif beton üretiminde kullanılabileceği yönündeki bulguyu desteklemektedir. Çalışma sonuçlarına

göre, sepiyolit katkılı betonlar, ses yalıtımı gereken yapı elemanlarında (duvar, döşeme, teras) ve dolgu betonlarında kullanılabilir olduğunu belirtmiştir [93].

Savaş ve diğerleri (2014), gerçekleştirdiği çalışmada, sepiyolit gazbeton üretimindeki kuvarsitin yerini alması durumunda ortaya çıkan değişiklikler incelenmiştir. Eskişehir Sivrihisar'dan elde edilen sepiyolit, farklı oranlarda kuvarsitin yerine kullanılarak çeşitli gazbeton numuneleri üretilmiştir. Bu numuneler, belirli sıcaklık ve basınç koşullarında kürlendikten sonra, ısı iletkenlik ve basınç dayanımı gibi özellikleri açısından test edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, sepiyolit miktarının artmasıyla birlikte karışımın suyu tutma kapasitesi artmış, kıvamı yoğunlaşmış ve kabarma oranı azalmıştır. Bu durum, gazbetonun gözenek yapısını bozarak basınç dayanımını olumsuz etkilemiştir. Ancak, sepiyolit, düşük ısı iletkenliği sayesinde gazbetonun ısı yalıtım özelliğini artırmıştır. Bu bulgular, sepiyolit gazbeton üretiminde kullanılabilirliğini ancak, optimum bir sepiyolit oranı belirlenmesi gerektiğini göstermektedir [94].

Ersever Angur (2016) yaptığı çalışmada, çimento esaslı yapıştırıcı harçlarda kullanılan nişasta eterinin yerini alabilecek doğal bir alternatif olarak sepiyolit incelenmiştir. Yapılan deneylerde, sepiyolit seramik yapıştırıcılarda doğrudan kullanımı, yapıştırıcının performansını olumsuz etkilemiştir. Bunun üzerine, sepiyolit üzerinde bazı fiziksel ve kimyasal işlemler yapılarak (kuru bazda modifikasyon) yapıştırıcıya uyumluluğu artırılmıştır. Modifiye edilmiş sepiyolit kullanılarak yapılan deneylerde, nişasta eterinin tamamı yerine sepiyolit kullanıldığında, taze harç özellikleri istenen seviyeye ulaştırılsa da, harcın su tutma özelliği yeterli bulunmamıştır. Bu nedenle, nişasta eterinin bir kısmı sepiyolit ile değiştirilerek daha dengeli bir formül elde edilmiştir. Sonuç olarak, sepiyolit çimento esaslı seramik yapıştırıcılarda nişasta eterinin yerini alabileceği ve bu sayede daha doğal ve sürdürülebilir bir yapıştırıcı üretilebileceği öngörülmüştür [95].

Sabah ve Çelik (1999) çalışmalarında, bentonit ve sepiyolit plastik kesme duvarı malzemesi olarak kullanılma potansiyelini incelemişlerdir. Sepiyolit düşük geçirgenlik, hafif şişme ve orta düzeyde dayanım gibi özellikleri, bu malzeme için uygun olabileceğini göstermiştir. Çalışmada, gerekli dayanımın yaklaşık %20 oranında sepiyolit ikamesiyle elde edilebileceği sonucuna varılmıştır. Ancak, kil içeriğinin artmasının malzemenin dayanımını olumsuz etkilediği belirtmişlerdir [75].

Abu-Hasan (2001) çalışmasında, sepiyolit in epoksi reçinelerinde dolgu maddesi olarak kullanılmasının ve bu kompozitlerin özelliklerine olan etkilerinin incelendiğini belirtmiştir. Çalışmada, sepiyolit in parçacık boyutu, parçacık boyutu dağılımı ve susuzlaştırma işleminin epoksi-sepiyolit kompozitlerinin mekanik, morfolojik ve ara yüzey özellikleri üzerindeki etkileri özellikle araştırılmıştır. Farklı oranlarda sepiyolit içeren ve farklı boyutlardaki sepiyolit parçacıklarından oluşan kompozitler hazırlanmıştır. Yapılan çekme, darbe ve eğilme testleri sonucunda, sepiyolit içeriğinin artmasının kompozitin dayanımını artırdığı ancak esnekliğini azalttığı belirlenmiştir. Sepiyolit in susuzlaştırılmasının, epoksi ile sepiyolit arasındaki bağları güçlendirerek mekanik özellikleri iyileştirdiği gözlemlenmiştir. Parçacık boyutu ve dağılımının ise kompozitin özelliklerinde önemli bir etki yaratmadığı sonucuna varılmıştır. Taramalı elektron mikroskobu görüntüleri, susuzlaştırmanın epoksi ve sepiyolit arasında daha iyi bir bağ oluşturduğunu ve boşluk oluşumunu engellediğini göstermiştir [96].

Özdemir (2004) tarafından yapılan çalışmada, çöp depolama alanlarında kullanılan kil tabakalarında sepiyolit in kullanılma potansiyelini değerlendirmiştir. Sepiyolit ve kaolinit karışımlarının fiziksel ve mekanik özellikleri, su geçirgenliği, sıkışabilirliği ve adsorpsiyon kapasitesi gibi parametreler üzerinden incelenmiştir. Çalışma sonuçlarına göre, sepiyolit içeren karışımların, özellikle ağır metal adsorpsiyonu konusunda daha yüksek performans gösterdiği ve çöp depolama alanlarında kullanılan geleneksel kil tabakalarına göre daha uygun bir alternatif olabileceği belirtilmiştir [97].

Divakar ve diğerleri (2012) yaptıkları çalışmada, geleneksel betona kıyasla ince agrega yerine granit kesme atığı kullanarak betonun dayanımındaki değişimleri incelemiştir. Elde ettikleri verilere göre, geleneksel betona kıyasla ince agrega olarak %35'e kadar granit kesme atığı kullanarak beton mukavemetinde bir artış gözlemlenmiştir [98].

Kala (2013) tarafından yapılan çalışmada, katkı maddelerinin varlığında çimentonun kısmi bir ikamesi olarak granit tozu atığının kullanılmasının, yüksek performanslı betonun mekanik özellikleri üzerinde yararlı etkilere sahip olduğunu gözlemlenmiştir, test sonuçları, %25 granit tozu ikamesiyle betonun üstün performansının elde edildiğini ortaya koymuştur [99].

Vijayalakshmi ve diğeri (2013) yaptıkları çalışmada, doğal kum yerine %15'e kadar granit tozu atığının kullanılmasının, mukavemet ve dayanıklılık parametrelerini önemli ölçüde etkilemeden beton üretimi için uygun olduğunu bulmuşlardır [36].

Ribeiro ve Holanda'ya (2014) göre, toprak-çimento tuğla üretiminde toprağın kısmi ikamesi olarak ağırlıkça %30'a kadar granit kesme çamuru kullanılmasının optimum yüzde olarak önerildiği ve fiziksel ve mekanik özelliklerde bir iyileştirme sağlandığı gözlemlenmiştir [100].

Singh ve diğeri (2016), ince agreganın kısmi ikamesi olarak ağırlıkça %25'e kadar granit kesme atığı kullanılmasının, olumsuz maruz kalma koşulları altında 0,30 ve 0,40 değişken su/çimento oranlarına sahip betonun dayanıklılık özelliklerinde bir iyileşmeye yol açtığını bulmuşlardır [24].

Singh ve diğeri (2016) tarafından yapılan çalışmada, doğal nehir kumunun kısmi ikamesi olarak %25-40 oranında granit kesme atığının eklenmesinin betonun mukavemet ve dayanıklılık parametreleri üzerinde olumlu bir etkiye sahip olduğunu ortaya koymuştur [79].

Singh ve diğeri (2016), geleneksel betona kıyasla daha iyi mukavemet ve dayanıklılık özelliklerine sahip beton üreten doğal ince agrega yerine kısmen granit kesme atığı kullanılmasının optimum yüzdesinin yaklaşık %30 olduğunu gözlemlemiştir [30]. Singh ve diğeri (2016), beton üretiminde doğal kum agregasının granit kesme atığı ile optimum ikame yüzdesinin %25 olduğunu bulmuş ve üretilen betonun stabilite mukavemeti ve dayanıklılık açısından etkili olduğu bulunmuştur [101].

Jeyaprabha ve diğeri (2016), hem normal koşullarda hem de yüksek sıcaklık ve su söndürmeye maruz kalma durumunda nehir kumu harcına kıyasla nehir kumu ikamesi olarak %15 granit tozu atığı ile modifiye edilmiş harcın dayanım özelliklerinde bir iyileşme olduğunu belirtmişlerdir [102].

Mármol ve diğeri (2010), renkli/duvar harcı üretiminde çimentonun %10'una kadarının, basınç dayanımından ödün vermeden granit kesme atığıyla değiştirilebileceğini bulmuşlardır [103].

Abukersh ve Fairfield (2011) tarafından yapılan çalışmada, betonda kısmi çimento ikamesi olarak %20-50 oranında geri dönüştürülmüş kırmızı granit tozu kullanma potansiyelini incelemişlerdir. %30'a kadar kırmızı granit tozu kullanan betonların iyi ve kabul edilebilir işlenebilirliğini ve mekanik performansını gözlemlemişlerdir. Sonuçlar, %30 oranında kırmızı granit tozu kullanımının uçucu kül ile karşılaştırıldığında erken yaş beton dayanımını ve elastik modülünü iyileştirdiğini, ancak basınç dayanımını azalttığını göstermiştir [104].

Abd Elmoaty (2013) yaptığı çalışmada, çimento yerine ve ilavesi olarak granit tozu atığı ile modifiye edilmiş beton özelliklerini incelemiştir. Test sonuçları, çimento yerine %5 granit tozu kullanılmasının betonun mekanik ve korozyon direnci özelliklerini artırdığını, yüksek seviyede granit tozu atığının çimento ilavesi olarak kullanılmasıyla betonun mekanik özelliklerinde bir artış olduğunu göstermiştir [105].

Al-Humaiedeh ve Khushefati (2013), çimentonun %10 granit tozu atığı ile değiştirilmesinin betonun basınç dayanımı üzerinde bir etkisi olmadığını, ince agregaya %20'ye kadar granit tozu atığı ikamesi eklenmesinin ise betonun basınç dayanımını iyileştirdiğini gözlemlemiştir [106].

Ramos ve diğerleri (2013) tarafından yapılan çalışmada, granit çamuru atığının kısmi çimento yerine kullanılmasının, işlenebilirlik ve dayanımdan ödün vermeden harcın dayanıklılığını artırdığını ortaya koyduğunu belirlemiştir [107].

Bacarji ve diğerleri (2013) yaptıkları çalışmada, mermer ve granit kalıntılarının çimento yerine sürdürülebilir bir alternatif olarak uygulanabilirliğini araştırmışlardır. Çimentoya karşı %5'lik bir oranın kullanılmasının sürdürülebilir ve gelecek vaat eden bir alternatif olabileceğini göstermişlerdir[108].

Li ve diğerleri (2016) tarafından yapılan çalışmada, uçucu külün yerine ek çimento malzemesi olarak granit tozu kullanılarak kum betonun işlenebilirliğini, mekanik özelliklerini, dayanıklılığını ve büzülme performansını araştırmış ve optimum granit tozu dozajının toplam çimento malzemesinin %20'si olduğunu belirtmişlerdir [109].

Medina ve diğerleri (2017) yaptıkları çalışmada, klinkerin %10 veya %20'sinin granit çamuru ile değiştirildiği yeni karışımli çimentoların tasarlanmasının uygulanabilirliğini,

bunun nihai ürünün kimyasal, reolojik, mekanik ve mikro yapısal özellikleri üzerindeki dahil edilmesinin etkisini analiz ederek değerlendirmişlerdir. Bu ek çimentolu malzemenin yavaş puzolanik kinetiği tarafından oluşturulan yeni harçların gözenek yapısındaki daha sonraki yaş değişimi, bu harçlar ile geleneksel harçlar arasında mekanik performansta dar bir farka dönüştüğünü, ancak bu farka rağmen, yeni çimentolar, Avrupa standardı EN 197-1'de Tip II/A ve IV/A çimentolar için belirlenen gerekliliklere uydukları için inşaatta kullanılmaya uygun olduğunu belirtmişlerdir [110].

Kendiliğinden yerleşen harcın/betonun performansını iyileştirmek ve maliyetini düşürmek amacıyla, çimento ve agrega yerine farklı atık malzemeler, endüstriyel yan ürünler veya doğal kaynaklı malzemeler gibi alternatif bağlayıcı ve dolgu maddelerinin kullanımı üzerine kapsamlı çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalarda, alternatif malzemelerin betonun taze ve sertleşmiş özelliklerine etkileri incelenmiş ve optimum karışım oranları belirlenmeye çalışılmıştır.

Demirel ve diğerleri (2019) yaptıkları çalışmada, beşikten-kapıya (cradle-to-gate) yaşam döngüsü değerlendirme yaklaşımını kullanarak, atık cam ve uçucu kül gibi endüstriyel atıkların kendiliğinden yerleşen harç üretiminde kullanılmasının çevresel performans üzerindeki etkilerini incelenmiştir. Söz konusu araştırma, alternatif bağlayıcı malzemelerin entegrasyonu ile çimento bazlı sistemlerin çevresel ayak izinin nasıl azaltılabileceğine dair önemli bulgular elde edilmiştir [111].

Literatürde, uçucu külün KYH'nin çatlama direncini artırdığına dair birçok çalışma bulunmaktadır. Altoubat ve diğerleri (2017) bu durumu deneysel olarak doğrulamıştır [112].

Hama ve Hilal (2017), ise çimento yerine uçucu kül kullanarak ve ince malzeme olarak farklı türlerde plastik atıklar ekleyerek yaptıkları çalışmalarda, plastik atıkların betonun basınç dayanımını olumsuz etkilediğini ancak KYH üretiminin mümkün olduğunu göstermiştir. Bu sonuçlar, plastik atıkların KYH üretiminde kullanılabileceği ancak betonun dayanım özelliklerinin bu durumdan etkileneceği yönünde önemli bir bulgu sunmaktadır [113].

Matos ve diğerleri (2019) tarafından yapılan çalışmada, yüksek hacimli uçucu kül (UK) kullanımının KYB'lerin reolojik özelliklerini olumlu yönde etkilediği sonucuna varmıştır. Yüksek oranda UK içeren KYB'ler, daha düşük viskoziteye sahip olduğu için daha kolay

yerleşmiş ve süper akışkanlaştırıcıya daha az ihtiyaç duymuştur. Ayrıca, 180 güne kadar süren deneysel çalışmalarda, UK kullanımının betonun basınç dayanımını önemli ölçüde artırdığı gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar, UK'nin KYB üretiminde hem taze hem de sertleşmiş özelliklerin iyileştirilmesinde etkili bir malzeme olduğunu göstermiştir [114].

Uygunoğlu ve diğerleri (2017) yaptıkları çalışmada, yüksek fırın cürufu, uçucu kül, silis dumanı, kireçtaşı tozu ve doğal kum kullanılarak üretilen epoksi esaslı kendiliğinden yerleşen harçların viskozite, yayılma çapı ve katılma gibi reolojik özellikleri belirlenerek karakterize etmişlerdir. Elde edilen deney sonuçlarına göre yüzey alanı yüksek olan mineral katkıların kullanım oranının artmasıyla polimer esaslı harçların işlenebilirliklerini azalttığını belirtmişlerdir[115].

Demir ve diğerleri (2025) yaptıkları çalışmada, portland çimentosu üretimi, atmosfere salınan karbondioksit miktarını artırması nedeniyle önemli bir çevresel endişe kaynağı olduğunu belirtmişlerdir. Bu durum, inşaat sektöründe Portland çimentosuna alternatif olarak puzolanik özelliklere sahip doğal kaynakların ve endüstriyel atıkların kullanımını zorunlu hale getirmiştir. Bu bağlamda, kendiliğinden yerleşen harç üretiminde Portland çimentosu yerine kullanılacak, Nevşehir taşı tozu adı verilen doğal bir puzolanik malzemenin etkinliğini araştırmışlardır. Çalışma, bu doğal malzemenin çevresel sürdürülebilirliğe katkı potansiyelini ve yapısal performansını değerlendirmeyi hedeflemişlerdir [116].

Elengo ve diğerleri (2022) tarafından yapılan bir araştırmada, kendiliğinden yerleşen betonlarda doğal kaba agrega yerine diatomit agregasının kullanılmasıyla betonun mekanik özellikleri incelenmiştir. Çalışmada, diatomit agregasının oranı %5'ten %20'ye kadar artırılarak farklı karışımlar üretilmiştir. Elde edilen sonuçlar, diatomit agregasının kullanımıyla betonun basınç dayanımının doğal agregaya göre ortalama %22 ile %28 arasında arttığını göstermiştir[117].

Jain ve diğerleri (2022) yaptıkları çalışmada, inşaat atıklarından elde edilen granit atığının kendiliğinden yerleşen betonlarda kullanımını üzerine kapsamlı bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada, %40 oranında granit atığı içeren KYB karışımlarının mekanik özellikleri ve mikro yapısı incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, granit atığının kullanımıyla betonun basınç, çekme ve eğilme dayanımında önemli artışlar gözlemlenmiştir.

SEM analizleri, granit atığının beton matrisinde homojen bir dağılım gösterdiğini ve boşlukları doldurarak betonun dayanımını artırdığını ortaya koymuştur. Ancak, EDS, XRD ve FTIR analizleri, granit atığının hidrasyon sürecine önemli bir etki etmediğini göstermiştir. Bu bulgular, granit atığının KYB'nin mekanik özelliklerini esas olarak dolgu maddesi olarak görev yapması sayesinde iyileştirdiğini kanıtlamaktadır. Bu çalışma, inşaat atıklarının değerlendirilmesi ve sürdürülebilir yapı malzemelerinin geliştirilmesi açısından önemli bir katkı sağladığını belirtmişlerdir [118].

Choudhary (2021) çalışmasında, çimento yerine farklı oranlarda silis dumanı, uçucu kül ve atık mermer bulamacı (AMB) kullanılan kendiliğinden yerleşen yüksek dayanımlı beton (KYYDB) karışımları üretmişlerdir. Elde edilen karışımların mekanik özellikleri, dayanıklılığı ve mikro yapısı detaylı olarak incelenmiştir. Sonuçlar, mineral katkıların ve AMB'nin birlikte kullanımıyla betonun basınç dayanımı, çekme dayanımı ve eğilme dayanımı gibi mekanik özelliklerinin önemli ölçüde arttığını göstermiştir. Özellikle %15 uçucu kül, %10 AMB ve %5 silis dumanı içeren karışım, en iyi performansı sergilemiştir. Karbonatlaşma ve korozyon testleri, bu karışımın çevresel etkilere karşı yüksek direnç gösterdiğini doğrulamıştır. Ancak, şiddetli su basıncı ve yüksek klorür içeren ortamlarda kullanılacak betonlar için %35 uçucu kül ve %5 silis dumanı içeren karışımın daha uygun olduğu belirtilmiştir. Bu çalışma, atıkların değerlendirilmesi ve sürdürülebilir yapı malzemelerinin geliştirilmesi açısından önemli bir katkı sağlamaktadır [119].

Sun ve diğerleri (2020) yaptığı çalışmada, sürdürülebilir inşaat uygulamaları kapsamında atık betonların geri dönüştürülerek kendiliğinden yerleşen beton üretiminde kullanılması araştırılmıştır. Farklı oranlarda geri dönüştürülmüş kaba, ince agrega ve toz içeren dokuz farklı KYB karışımı üretilerek bu karışımların işlenebilirlik ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Sonuçlar, geri dönüştürülmüş malzemelerin miktarının artmasıyla KYB'nin akıcılığı, viskozitesi ve dayanımının azaldığını göstermiştir. Bu durum, geri dönüştürülmüş malzemelerin beton karışımındaki diğer malzemelerle tam olarak uyum sağlayamamasından kaynaklanmaktadır. Çalışma, atık betonların beton üretiminde kullanılmasının mümkün olduğunu ancak bazı teknik zorlukların aşılması gerektiğini göstermektedir [120].

Parashar ve diğerleri (2020) yaptıkları çalışmada, atık dökümhane kumunun (ADK) kendiliğinden yerleşen beton (KYB) üretiminde ince agrega olarak kullanılmasının etkileri incelenmiştir. ADK'nın farklı oranlarda kullanıldığı KYB karışımlarının mekanik özellikleri,

dayanıklılığı ve mikro yapısı detaylı olarak analiz edilmiştir. Sonuçlar, %10 ADK ilavesinin KYB'nin basınç dayanımı, çekme dayanımı ve eğilme dayanımı gibi mekanik özelliklerini artırdığını göstermiştir. Ayrıca, ADK'nın KYB'nin ayrışma direncini artırarak betonun ömrünü uzattığı belirlenmiştir. Ancak, %10'dan daha yüksek oranlarda ADK kullanımı, betonun işlenebilirliğini ve dayanımını olumsuz etkilemiştir. Bu durum, ADK'nın beton karışımındaki diğer malzemelerle tam olarak uyum sağlayamamasından kaynaklanmaktadır. Çalışma, atık dökümhane kumunun beton üretiminde kullanılmasının mümkün olduğunu ancak belirli bir oranı aşmamak gerektiğini göstermektedir [121].

Jain ve diğerleri (2020) tarafından yapılan çalışmada, kendiliğinden yerleşen beton (KYB) üretiminde sürdürülebilirlik amacıyla doğal kaynakların kullanımını azaltmak ve atıkların değerlendirilmesini sağlamak için granit atığı (GA) ve uçucu kül kullanımı araştırılmıştır. İnce agregaya yerine farklı oranlarda GA kullanılan KYB karışımlarının taze ve sertleşmiş özellikleri incelenmiştir. Sonuçlar, %40'a kadar GA kullanımının KYB'nin işlenebilirliğini olumsuz etkilediğini göstermiştir. Ancak, çimento yerine uçucu kül kullanımıyla bu olumsuz etkiler kısmen giderilmiştir. GA ve uçucu kül kullanımı, KYB karışımının yoğunluğunu azaltarak enerji tasarrufu sağlamış ve su emilimini azaltarak dayanımını artırmıştır. Bu çalışma, inşaat sektöründe atıkların değerlendirilmesi ve sürdürülebilir yapı malzemelerinin geliştirilmesi açısından önemli bir adım olarak değerlendirilebildiğini göstermişlerdir [39].

Jemina ve diğerleri (2023) yaptığı çalışmada, geri dönüştürülmüş iri agregaya, uçucu kül ve sepiyolit tozu dahil olmak üzere çimento bağlayıcı alternatiflerinden yapılan KYB'nun dayanım özelliklerini araştırmışlardır. Yaptıkları araştırma sonucunda, EFNARC tarafından istenen işlenebilirliğin sepiyolit eklenerek ve KYB'daki uçucu kül içeriği artırılarak elde edilebileceğini göstermektedir. Belirli bir ikame seviyesine kadar (%10 sepiyolit ve %20 geri dönüştürülmüş agregaya), üçlü karışım KYB'nin mekanik parametreleri kontrol KYB'ninkilerden daha üstün olduğunu belirtmişlerdir. Çimento sepiyolit tozu ile değiştirildiğinde, KYB'nin dayanıklılığı arttığını ve karbonatlaşma derinliğinin, sepiyolit tozu ve buna karşılık gelen geri dönüştürülmüş agregaların ikame miktarları arttıkça arttığını gösterilmiştir. KYB'nin sülfat ve klorür direnci de %15'e kadar sepiyolit ve %30'a kadar geri dönüştürülmüş agregaya ilavesi ile önemli ölçüde desteklendiğini belirtmişlerdir [122].

Jain ve diğerleri (2022) tarafından yapılan çalışmada, doğal ince agregaya yerine (%60'a kadar) granit atığı ve uçucu kül karışım KYB'nin basınç dayanımı ve dayanıklılık özellikleri

üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Beton karışımına %40'a kadar GA eklenmesiyle, uçucu kül karışumlu kontrol karışımına göre dayanımın arttığını ortaya koymuştur. Beton karışımına %50'ye kadar GA eklenmesiyle, uçucu kül karışumlu kontrol karışımına göre klorür, karbonatlaşma ve korozyona karşı direnç arttığını belirtmişlerdir. Bu nedenle, yukarıda belirtilen dayanıklılık özelliklerinin iyileştirilmesi için KYB üretiminde ince agrega yerine %50'ye kadar GA'nin olumlu bir şekilde kullanılabileceği sonucunu elde etmişlerdir [123].





3. DENEYSEL ÇALIŞMA

3.1. Kullanılan Malzemeler

Bu tez çalışmasında, çimento, granit atık çamuru (GAÇ), sepiyolit (SP) ve 2mm'den küçük agrega kullanarak kendiliğinden yerleşen harç (KYH) karışımları hazırlanmıştır. KYH'da akışkanlığı meydana getirmek amacıyla kimyasal katkı malzemesi olarak, $1,08 \text{ g/cm}^3$ yoğunluğa sahip modifiye polikarboksilat esaslı polimer bir süper akışkanlaştırıcı (SA) karışıma ilave edilmiştir. Bu çalışmada kullanılan malzemelere Resim 3.1.'de yer verilmiştir.



Resim 3.1. Çalışmada kullanılan GAÇ, agrega ve SP malzemeleri

3.1.1. Mineral katkıları

Bu tez çalışmasında, Eskişehir Akmin Mineral ve Madencilikten SP ve Kırşehir Granitaş fabrikasından GAÇ çimento yerine ikame yöntemiyle mineral katkı olarak kullanılmıştır (Resim 3.1). GAÇ ve SP'nin kimyasal bileşimi ve fiziksel özellikleri Çizelge 3.1.'de verilmiştir.

Çizelge 3.1. GAÇ ve SP'nin kimyasal bileşimi ve fiziksel özellikleri

Özellikler	Granit Atık Çamuru (GAÇ)	Sepiyolit (SP)
SiO ₂ (%)	62,9	18
Al ₂ O ₃ (%)	16,5	0,4
Fe ₂ O ₃ (%)	4,2	0,2
CaO (%)	4,9	25,0
K ₂ O (%)	4,5	<0,1
MgO (%)	1,4	19,6
Kızdırma kaybı (%)	1,0	36,65
Yoğunluk (g/cm ³)	2,70	2,61
Özgül yüzey (cm ² /g)	5411,0	8406,0

3.1.2. Portland çimentosu

Bu çalışmada, Ankara Baştaş çimentosuna ait CEM I 42.5 R tipi Portland çimentosu (PÇ) KYH karışımlarında kullanılmıştır. Çimentonun fiziksel ve kimyasal özellikleri Çizelge 3.2.'te sunulmuştur.

Çizelge 3.2. Çimentonun kimyasal ve fiziksel özellikleri

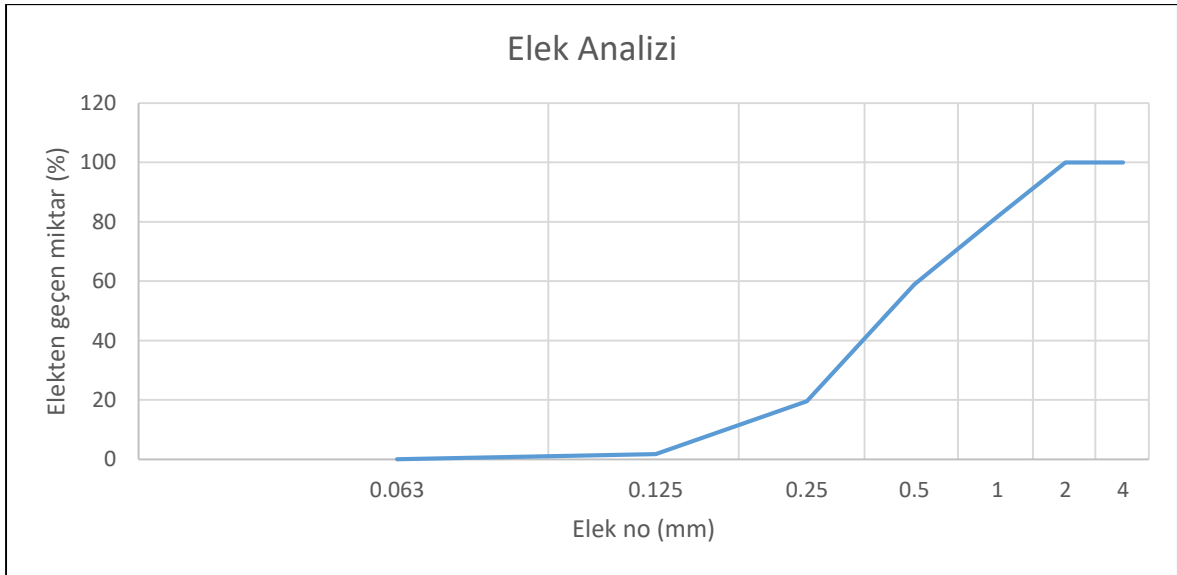
<u>Kimyasal</u> <u>Kompozisyon (%)</u>	<u>CEM I</u> <u>42.5 R</u>	<u>Fiziksel</u> <u>Özellikleri</u>	<u>Analiz</u> <u>Sonucu</u>
SiO ₂	17,0	Blaine (cm ² /g)	3410
Al ₂ O ₃	4,0	Yoğunluk (g/cm ³)	3,10
Fe ₂ O ₃	3,4	İncelik (32 mikron) %	10,8
CaO	64,3	İncelik (40 mikron) %	5,9
K ₂ O	1,0	Priz Başı (dk)	176
MgO	1,8	Priz Sonu (dk)	230
Kızdırma kaybı	3,45		

3.1.3. Agregada

Kendiliğinden yerleşen harç karışımının tasarımında, ince taneli agreganın tane boyutu dağılımı ve miktarı, karışımın işlenebilirlik ve stabilite özelliklerini optimize etmek için dikkatlice ayarlanmalıdır. İnce taneli agregada, kendiliğinden yerleşen harcın işlenebilirliğini artırırken, segregasyon (ayrışma) riskini azaltarak stabiliteyi sağlar. KYH üretiminde, ince agregada olarak 2 mm'lik elekten geçen agregada kullanılmıştır. Resim 3.2.'te Kırşehir yöresinden temin edilen maksimum tane çapı 2 mm olan agregada çalışmada kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan agreganın elek analizi grafiği Şekil 3.1.'te gösterilmektedir.



Resim 3.2. KYH tasarımında kullanılan ince agregada

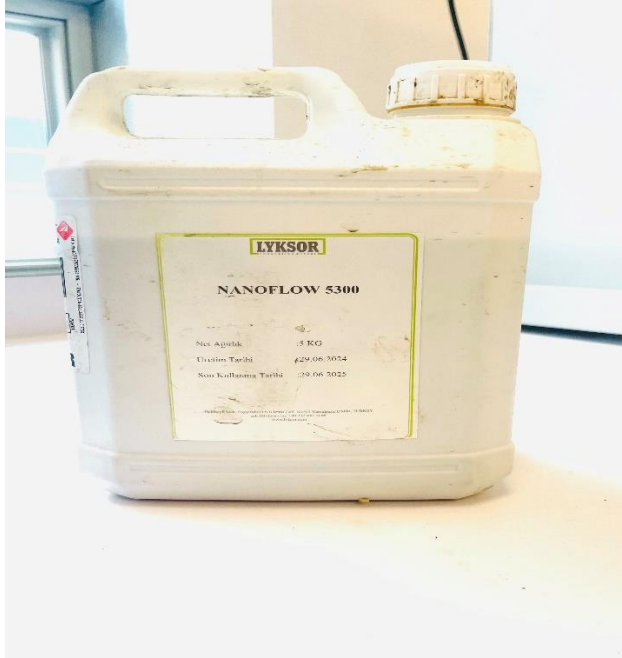


Şekil 3.1. İnce agregada elek analiz grafiği

3.1.4. Akışkanlaştırıcı ve karışım suyu

KYH karışımlarında kullanılan suyun kalitesi, harcın performansı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Bu nedenle, kullanılan suyun TS EN 1008 standardının gerekliliklerini karşılaması zorunludur. KYB numunelerinin üretiminde, Kırşehir şehir şebekesinden temin edilen ve bu standarda uygun olan su kullanılmıştır.

KYH karışımlarının daha akışkan hale getirilmesi ve su içeriğinin azaltılması amacıyla, polikarboksilik eter bazlı yüksek performanslı bir su azaltıcı katkı maddesi kullanılmıştır. Polikarboksilik eter esaslı bu su azaltıcı katkı maddesi, betonun dayanıklılığını, dayanımını ve işlenebilirliğini artırarak, yüksek kaliteli ve uzun ömürlü beton yapıların elde edilmesini sağlar [124]. Bu çalışmada, KYH karışımlarında, Resim 3.3.'te gösterilen $1,08 \text{ g/cm}^3$ yoğunluğunda modifiye polikarboksilat esaslı LYKSOR firmasına ait bir süper akışkanlaştırıcı (SA) kullanılmıştır. Bu akışkanlaştırıcı, düşük su/çimento oranlarında bile betonun işlenebilirliğini ve dayanıklılığını optimize ederken, priz süresini etkilemez. Çizelge 3.3.'te bu akışkanlaştırıcı malzemenin özellikleri verilmiştir.



Resim 3.3. Kullanılan süper akışkanlaştırıcı

Çizelge 3.3. Akışkanlaştırıcı malzemenin bazı özellikleri

Renk ve form	Kahverengi-Sıvı
Kimyasal köken	Polikarboksilat
Yoğunluk(kg/lt)	1,08-1,12
Klor iyonu muhtevası	Klor içermez
Alkali içeriği	En fazla %5
pH	3-7
Uyumluluk	TS EN 934-2
Donma Noktası (⁰ C)	-5

3.2. Yöntem

3.2.1. Karışımların hazırlanması ve oranları

Çalışma ile kendiliğinden yerleşen harç numunelerinde mineral katkı malzemeleri olarak granit atık çamuru ve sepiyolit in etkilerini incelemeyi amaçlamaktadır. Bu kapsamda, hem taze hem de sertleşmiş durumdaki numuneler üzerinde çeşitli testler yapılarak, bu katkı malzemelerinin harcın özellikleri üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Hazırlanan karışımların içerisine PÇ yerine ağırlıkça %5, %10, %15, %20 oranında GAÇ ve SP ayrı ayrı ağırlıkça ikame edilmiştir. İkili karışımlarda hazırlanan mineral katkı malzemesinde ise SP suyu bünyesinde fazla absorbe ettiği için %5, %10 oranında kullanılırken, GAÇ portland çimentosuna ağırlıkça %5, %10, %15, %20 oranında ağırlıkça ikame edilmiştir. İkili karışımlarda kullanılan mineral katkı malzemesi miktarı, çimento miktarının %30'unu aşmamaktadır. Karışım adları, içerdikleri mineral katkı oranını yansıtacak şekilde belirlenmiştir. Örneğin, SP10 karışımında çimentonun %10'u SP ile yer değiştirmiştir. Kontrol numunesi (KNT) ise herhangi bir mineral katkı içermemektedir. Çizelge 3.4.'te deneylerde kullanılan karışımların oranlarını göstermektedir. Bu deneylerde, 660 kg/m³ bağlayıcı miktarına sahip harç karışımları kullanılmış ve bir kontrol numunesi ile birlikte 17 farklı karışım oluşturulmuştur. Resim 3.4.'te gösterilen mikser, 17 farklı harç karışım numunesinin hazırlanmasında kullanılmıştır. Çalışmada, ilk olarak kuru bileşenlerin mikserde 1 dk boyunca homojenleştirilmesiyle başlanmıştır. Daha sonra farklı bir beherde hazırlanan su ve süper akışkanlaştırıcı (SA) karışımı sisteme eklenmiş ve tam bir dispersiyon

elde edilene kadar karıştırma işlemi 4 dk olarak sürdürülmüştür. Bütün karışımlarda aynı karışım süreci uygulanmıştır.



Resim 3.4. Çalışmada kullanılan harç mikseri

Çizelge 3.4. Çalışmada kullanılan karışım oranları

Karışım Kodu	PÇ(g)	GAÇ(g)	SP(g)	Kum(g)	Su (g)	Akışkanlaştırıcı(g)	s/b
Kontrol	660	0	0	1240	243	8,5	0,37
GAÇ5	627	33	0	1240	240	8,5	0,36
GAÇ10	594	66	0	1240	232	8,5	0,35
GAÇ15	561	99	0	1240	226	8,5	0,34
GAÇ20	528	132	0	1240	221	8,5	0,33
SP5	627	0	33	1240	257	8,5	0,39
SP10	594	0	66	1240	269	8,5	0,41
SP15	561	0	99	1240	300	8,5	0,46
SP20	528	0	132	1240	340	8,5	0,52
GAÇ5+SP5	594	33	33	1240	257	8,5	0,39
GAÇ5+SP10	561	33	66	1240	280	8,5	0,42
GAÇ10+SP5	561	66	33	1240	250	8,5	0,38
GAÇ10+SP10	528	66	66	1240	275	8,5	0,42
GAÇ15+SP5	528	99	33	1240	245	8,5	0,37
GAÇ15+SP10	495	99	66	1240	270	8,5	0,41
GAÇ20+SP5	495	132	33	1240	243	8,5	0,37
GAÇ20+SP10	462	132	66	1240	268	8,5	0,41

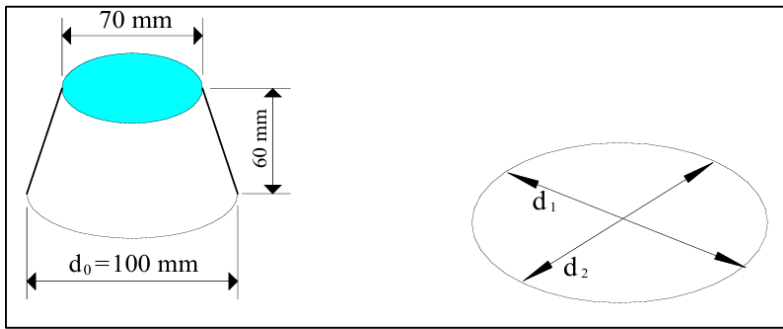
3.2.2. Mini çökme-yayılma deneyi

Karışım kıvamını belirlemek için mini çökme-yayılma deneyi uygulanmış ve TS EN 12350-9 ve EFNARC standartlarına göre mini çökme-yayılma değeri 240-260 mm arasında sabit tutulmuştur [125, 126]. Bu deney, harç karışımının akışkanlığını ve yayılabilirliğini ölçmek için kullanılan yaygın bir yöntemdir. Şekil 3.2.'de gösterildiği gibi, üst kısmı kesik koni şeklinde olan özel bir kalıp kullanılır. Kalıp, düz ve yatay bir yüzeye yerleştirilir. Taze harç karışımı, kalıbın içine doldurulur. Dolum işlemi sırasında harcın sıkıştırılması veya herhangi bir müdahalede bulunulmaz. Kalıp, harç dolumu tamamlandıktan sonra dikey olarak yukarı doğru kaldırılır. Kalıbın kaldırılmasıyla harç serbestçe yayılmaya başlar. Harcın yayıldığı alanın çapı, ortalama bir değer olarak ölçülür (Şekil 3.2.). Ölçülen bu çap, yayılma çapı olarak kaydedilir. Resim 3.5.'de çökme yayılma deneyi yayılma tablası üzerinde gösterilmiştir. Bağlı çökme-yayılma değeri denklem (3.1) ile hesaplanmıştır.

$$\Gamma_m = \left(\frac{d}{d_0}\right)^2 - 1 \quad (3.1)$$

Burada;

$d=(d_1+d_2)/2$ 'dir.



Şekil 3.2. KYH mini çökme-yayılma deneyinde kullanılan kesik koni ve ölçüm şekli



Resim 3.5. Mini çökme-yayıma deneyi

3.2.3. Mini V hunisi deneyi

V hunisi deneyi, harcın akışkanlığını ve tıkanma direncini ölçmek için kullanılan bir yöntemdir. Bu deneyde V hunisi, taze harçla tamamen doldurulur. Huninin altındaki çıkış kapağı aniden açılır. Harç, yerçekimi etkisiyle huniden aşağı doğru akmaya başlar. Kapağın açıldığı andan itibaren, harcın huniden tamamen boşalmasıyla birlikte huninin alt çıkışından ışığın görünmesi anına kadar geçen süre (t) ölçülür. Bu süre, harcın V-hunisi akış süresi olarak kaydedilir. Mini V hunisi (Resim 3.6.) deneyleri TS EN 12350-9 ve EFNARC standartlarına göre yapılmıştır [125, 126]. Bağlı huni hızı denklem (3.2) ile hesaplanır.

$$R_m = 10/t \quad (3.2)$$



Resim 3.6. Mini V hunisi testi

3.2.4. Basınç ve eğilme dayanımı deneyleri

Bölüm 3.2.1'de üretilen karışımların eğilme ve basınç dayanımları, TS EN 196-1 [127] standardı esas alınarak eğilme ve basınç deneyleriyle belirlenmiştir. Taze harç deneylerinin

tamamlanmasının ardından, numuneler herhangi bir sıkıştırma veya vibrasyon işlemine tabi tutulmadan doğrudan 40x40x160 mm ve 50x50x50 mm boyutlarındaki kalıplara dökülmüştür. Kalıplarda 24±5 saat bekletilen numuneler kalıplardan çıkarılmıştır. Hazırlanan 17 karışım 3 seri olarak 3, 7 ve 28 gün 22±3 °C kür havuzunda muhafaza edilmiştir. Her bir kürleme süresi tamamlandığında numuneler kürleme işleminden alınmıştır. Kürden alınan numunelerde eğilme ve basınç dayanımı deneyleri yapılmıştır (Resim 3.7.)



Resim 3.7. Basınç ve eğilme dayanımını belirlemede kullanılan cihazlar

3.2.5. Kapiler su emme deneyi

28 gün boyunca 22±3 °C kür edilen 50 mm'lik küp numunelerin kapiler su emme katsayıları, TS 4045 [128] standardı kullanılarak ölçülmüştür. Numuneler, ağırlıkları değişmeye kadar 105 °C ± 5 sıcaklığındaki hava sirkülasyonlu bir fırında kurutulmuştur. Numuneler etüvden çıkarıldıktan ve soğuduktan sonra yan yüzeyleri yalıtılmıştır (Resim 3.8.). Numuneler su dolu bir düzeneğe 5 mm batırılarak yerleştirilmiştir (Resim 3.8.). Numuneler, suya 5, 10, 20, 30, 60 dakikalık ve 3, 6, 24 saatlik zaman aralıklarında maruz bırakılmıştır. Her bir sürenin sonunda, numunelerin yüzeylerindeki serbest su, nemli bir bezle temizlenip 0.01 gram hassasiyetli bir tartı ile kütlelerindeki artışlar kaydedilmiştir. Numunelerin başlangıç ağırlıkları referans alınarak ağırlık artışları üzerinden kapiler su emme değerleri hesaplanmıştır.

Kapilarite katsayısının hesaplaması için denklem (3.3) kullanılmıştır.

$$K = \frac{Q^2}{A^2 \cdot t} \quad (3.3)$$

K : Kapilarite katsayısı (cm²/s),

A : Su ile temas eden alan (cm²),

T : Geçen zaman (s),

Q : Emilen su miktarı (cm³)'dir.



Resim 3.8. Kapiler su emme deneyi

3.2.6. Yoğunluk ve su emme tayini

Harçların porozite, toplam su emme kapasitesi, doygun kuru yüzey yoğunluk ve görünür değerleri sırasıyla denklemler (3.4-3.7) kullanılarak belirlenmiştir. Doygun hale gelmeleri için 24 saat suya batırılan numunelerin doygun yüzey kuru ağırlıkları (W3) havada tartılmış ve daha sonra Arşimet terazisi ile su içinde ağırlıkları (W2) bulunarak kaydedilmiştir (Resim 3.9.). Numuneler, bu işlemlerin ardından 105°C'de 24 saat etüvde kurutulmaya bırakılmış ve kuruduktan sonra ağırlıkları (W1) ölçülerek kaydedilmiştir.

$$\text{Porozite (\%)} = \left(\frac{W3 - W1}{W3 - W2} \right) \times 100 \quad (3.4)$$

$$\text{Toplam su emme kapasitesi (\%)} = \left(\frac{W3 - W1}{W1} \right) \times 100 \quad (3.5)$$

$$\text{Doygun kuru yüzey yoğunluk} \left(\frac{g}{cm^3} \right) = \left(\frac{W_3}{W_3 - W_2} \right) \quad (3.6)$$

$$\text{Görünür yoğunluk} \left(\frac{g}{cm^3} \right) = \left(\frac{W_1}{W_1 - W_2} \right) \quad (3.7)$$

Bu denklemlerde;

W1: Etüv kurusu ağırlığı (kg),

W3: Doygun kuru yüzey ağırlık (kg),

W2: Su içerisindeki ağırlığı (kg) ifade etmektedir.

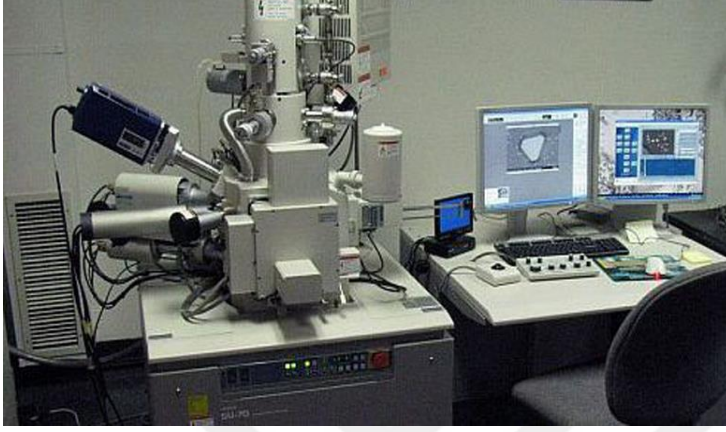


Resim 3.9. Numunelerin Arşimet terazisiyle ölçümü

3.2.7. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) analizi

Resim 3.10'da SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu) ile elde edilen görüntü, yüksek vakumlu bir ortamda, hızlandırılmış elektronların numune üzerine odaklanması ve taranmasıyla elde edilir. Bu işlemde, elektron demeti ile numune atomları arasındaki etkileşimler sonucu oluşan sinyaller, özel algılayıcılar tarafından toplanarak görüntüye dönüştürülür. Numunenin yüzey morfolojisi, ikincil elektronların toplanmasıyla çok net bir şekilde görüntülenir. SEM analizinin amacı, malzemelerin yüzey yapıları ve morfolojileri hakkında ayrıntılı bilgi sağlamaktır.

SEM analizinde kullanılacak parça numuneler, seçilen serilerden 1x1 cm boyutunu aşmayacak şekilde özenle hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler Maden Analizleri ve Teknolojisi Dairesi Başkanlığı'na (MTA) gönderilerek orada numunelere altın kaplama uygulanarak SEM analizi gerçekleştirilmiştir.

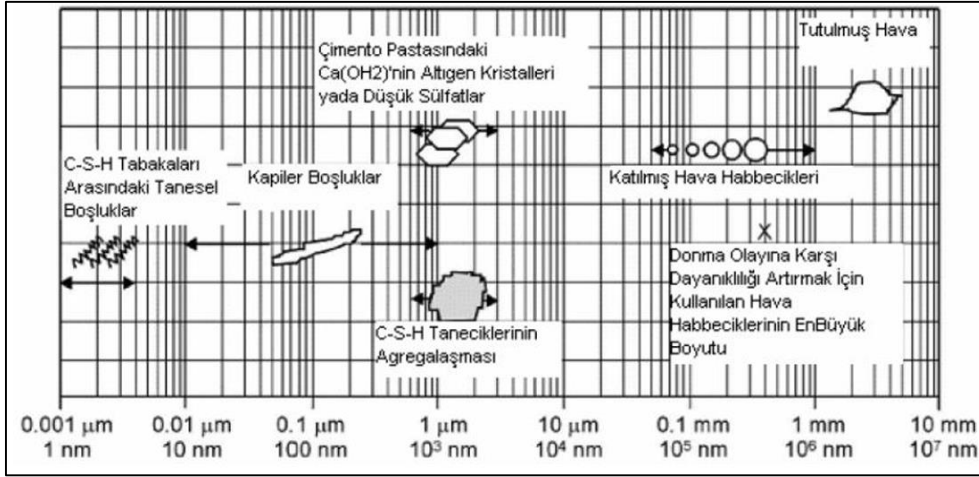


Resim 3.10. Taramalı elektron mikroskobu

3.2.8. Cıvalı porozimetre analizi

Karışım suyunun kaybı, çimento matrisinde düzensiz ve bağlantılı boşlukların oluşumuna sebep olur. Ancak zamanla devam eden hidrasyon reaksiyonları, bu boşlukları doldurarak malzemenin daha yoğun bir yapıya kavuşmasını sağlar ve sonuç olarak geçirgenliği azalır [129].

Bir malzemedeki boşlukların oranı ve bu boşlukların oluşturduğu ağ, malzemenin davranışını derinden etkiler. Çimentolu sistemlerde porozitenin artması, bir nevi kapı açarak zararlı iyonların malzemenin içine daha rahat nüfuz etmesine yol açar. Zararlı iyonların yapıya girmesiyle birlikte malzemenin zamanla göstereceği direnç azalır. Çimentolu sistemlerdeki boşluklar, oluşum mekanizmalarına göre temel olarak üç gruba ayrılır: çimento jelinin yapısındaki boşluklar, kılcal damar benzeri boşluklar ve üretim veya uygulama sırasında oluşan hava boşlukları [1]. Betondaki boşluklar, nanometre gibi çok küçük boyutlardan milimetre gibi daha büyük boyutlara kadar geniş bir yelpazede bulunduğundan, bu aralığı kapsayan daha ayrıntılı bir sınıflandırma yapılmıştır [129]. Resim 3.11. incelendiğinde, çimentolu sistemlerdeki boşlukların nanometreden milimetreye uzanan boyut aralığındaki yapısı ve sınıflandırılması detaylı olarak görülebilir.



Resim 3.11. Çimentolu sistemlerin boşluk yapısı ve sınıflandırılması [126]

Betonun boşluklu yapısı, dayanım ve dayanıklılık özelliklerini doğrudan etkiler. Porozite, betonun ömrünü tayin eden en önemli unsurlardan biridir. Hidratlanmış çimento harcı, nano ve mikro ölçekte birbirine bağlı çok sayıda boşluk içeren kompleks bir yapıya sahiptir. Çimento esaslı kompozitlerdeki gözeneklerin boyut aralığı (nm ile μm) ve bu gözeneklerin düzenlenmesi, malzemenin mekanik özelliklerinin ve dayanıklılık kabiliyetinin önemli bir belirleyicisidir [55, 130, 131]. Geçirgenlik, yapı malzemelerinin dayanıklılığı açısından kritik bir özelliktir ve bu özellik büyük ölçüde malzemenin içindeki gözeneklerin düzenine bağlıdır. Bu gözenek düzenini etkileyen başlıca faktörler arasında S/Ç oranı, toplam gözenek hacmi, farklı boyutlardaki gözeneklerin dağılımı, kılcal boşlukların bağlantıları ve agrega ile çimento arasındaki temas bölgesi sayılabilir [55, 132]. Bir malzemenin geçirgenliği ne kadar düşükse, kimyasal etkileşimlere karşı gösterdiği direnç de o kadar yüksek olur [133]. Çimentolu malzemelerin gözenek yapısını belirlemek amacıyla farklı deney yöntemleri kullanılmaktadır. Çimentolu malzemelerin gözenek yapısını incelemeye en sık başvuru iki teknik cıva porozimetresi (MIP) ve gaz adsorpsiyonu (BET)'dir. Yapılan araştırmalarda, MIP kılcal ve kapiler gözenekler için üstün sonuçlar sunarken, BET mezo, mikro ve jel gözeneklerinin analizinde daha avantajlıdır [130, 134]. Cıvalı porozimetreler, tepkime vermeyen ve yüzeyleri ıslatmayan cıvanın, küçük gözeneklere ancak yeterli basınç altında girebilmesi prensibine dayanır [1].

Bu tez çalışması kapsamında Cıva porozimetre analizleri ODTÜ Merkez Laboratuvarında Resim 3.12.'de gösterilen Quantachrome Corporation, Poremaster 60 cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Cıva penetrasyon basıncı olarak yüksek basınç (20-55000 psi) olacak

şekilde uygulanmıştır. Cıva penetrasyon basıncı 0-50 psi aralığında 200-4 µm eşdeğer çapa; 20-55000 psi için 10,6-0,0038 µm eşdeğer çapa karşılık gelmektedir. Harçların boşluk boyut dağılımları bu aralıklarda tespit edilmiştir.



Resim 3.12. Cıvalı porozimetre cihazı

3.2.9. Klor geçirgenliği deneyi

Klorür Geçirgenlik Testi, beton ve benzeri yapı malzemelerinin potansiyel durabilite sorunlarından biri olan klorür kaynaklı hasara karşı ne kadar dirençli olduğunu hızlı ve etkili bir şekilde anlamak için kritik bir araçtır. Belirli bir süre boyunca beton numunesinden geçen elektrik yükünü ölçer. Numunenin bir ucuna sodyum klorür (NaCl) çözeltisi, diğer ucuna ise sodyum hidroksit (NaOH) çözeltisi yerleştirilir ve numuneye belirli bir voltaj uygulanır. Geçen elektrik yükü (coulomb cinsinden), betonun klorür iyonlarının hareketine karşı gösterdiği direncin bir göstergesi olarak kabul edilir. Düşük coulomb değeri, daha yüksek klorür direnci anlamına gelir.

Betonun klor geçirimliliği deneyi, betonun klor iyonlarının geçişine karşı gösterdiği direnci ölçer. 28 gün boyunca kür edilen Resim 3.13. Ø100x50 mm boyutlarındaki silindirik şeklindeki numuneler, ASTM C1202-12 standartlarına göre DSİ TAKK (Devlet Su İşleri Teknik Araştırma ve Kalite Kontrol Dairesi Başkanlığı) klor geçirgenliği testine tabi tutulmuştur [135]. Numuneler, 3 saat kuru vakum işleminden sonra, vakum makinesi kapatılmadan saf su ile doldurularak 1 saat daha su altında vakumlanmıştır. Vakum işlemi

tamamlandıktan sonra, numuneler vakum cihazından çıkarılarak 18 saat boyunca saf su içinde bekletildi ve klor geçirgenliği testi için test cihazına yerleştirilmiştir. Test cihazında numunelerin yerleştirildiği iki ayrı hazne bulunmaktadır. Düzenekteki haznelardan birine %3 NaCl çözeltisi (30 g NaCl + 970 g saf su), diğerine 0,3 M NaOH çözeltisi (12 g NaOH + 988 g saf su) konularak deney başlatılmıştır. Cihaz, 6 saat boyunca her yarım saatte bir Coulomb cinsinden elektrik akımı ölçümü yaparak toplam 12 veri elde edilmiştir. Çizelge 3.5.'te Klor Geçirgenlik Testi sonuçlarının, genellikle geçen elektrik yükü (coulombs) cinsinden ifade edildiğini ve bu değerlere göre betonun klorür iyonu geçirgenliği nitel olarak sınıflandırılmıştır. Kesin bir "standart aralık" tek bir sayı olarak belirtilemez, bunun yerine kabul edilen kategoriler ve bu kategorilere karşılık gelen coulomb değer aralıkları bulunmuştur.



Resim 3.13. Klorür geçirgenliği deneyi için hazırlanan numuneler

Çizelge 3.5. Klor Geçirgenlik Deneyi sonuçlarına göre betonun değerlendirilmesi

<u>Geçen elektriksel yük miktarı (Coulomb)</u>	<u>Klor İyonu Geçirgenliği Yönünden Değerlendirme</u>	<u>Tipik Beton Özellikleri</u>
>4000	Yüksek	Yüksek su/çimento oranlı (>0.60) konvansiyonel Portland çimentolu beton
2000-4000	Orta	Orta su/çimento oranlı (0.40 - 0.50) konvansiyonel Portland çimentolu beton
1000-2000	Düşük	Düşük su/çimento oranlı (<0.40) konvansiyonel Portland çimentolu beton
100-1000	Çok Düşük	Lateks modifiyeli beton, içsel kürlenmiş beton
<100	İhmal Edilebilir	Polimer emdirilmiş beton, polimer beton

3.2.10. Kısıtlanmış rötre deneyi

Çevresel nemin azalması, betonda rötre ve dolayısıyla hacimsel küçülmeye yol açar. Bu durum, betonarme yapılarda çatlak oluşumu ve deformasyon gibi sorunlara neden olabilir. Rötre olgusu, oluşum mekanizmalarına göre dört ana başlık altında sınıflandırılır: taze betonda görülen erken yaş rötresi (plastik veya kılcak rötre), otojen rötre, karbonatlaşma rötresi ve kuruma rötresi. Yeni dökülmüş betonun erken dönemlerindeki rötrelere, beton yüzeyinden atmosfere gerçekleşen nem transferi (evaporasyon) kaynaklıdır [136].

Çimento temelli onarım sistemlerinin istenen sonucu vermesi, onarım malzemesi ile mevcut betonun birbirine ne kadar iyi bağlandığına bağlıdır. Beton yüzeylerinde kullanılan hızlı prizli onarım malzemelerinde sıkça görülen sorun, planlanan kullanım ömrüne ulaşamaması ve bu durumun ekonomik ve sosyal maliyetlere neden olmasıdır [137].

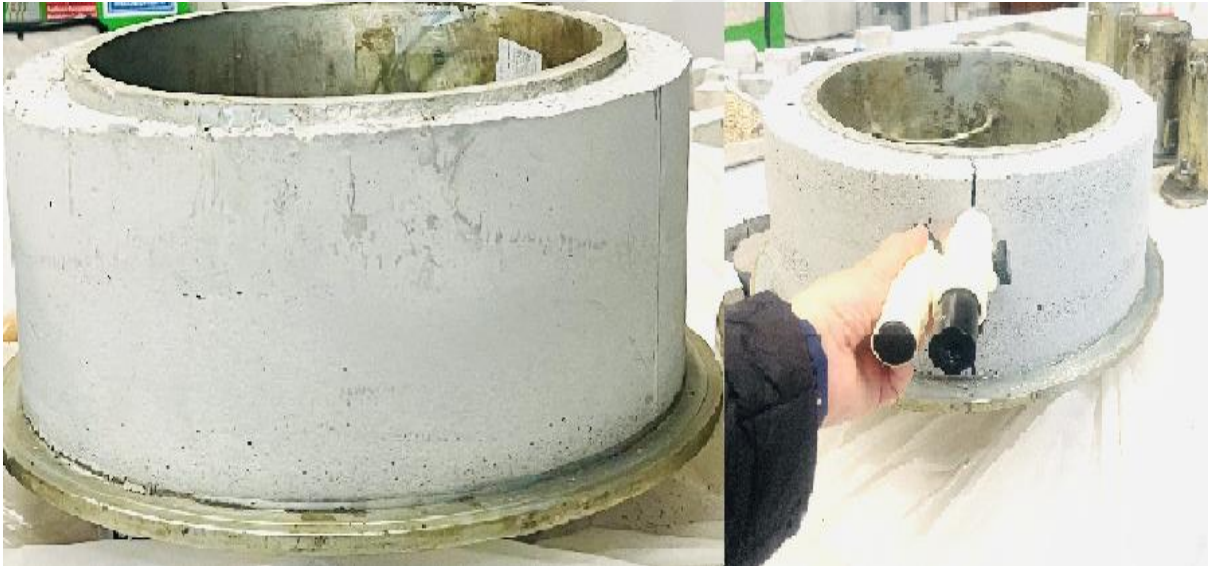
Betonarme yapıların kritik bölgeleri olan döşemelerde, köprülerin üst yapılarında ve beton kaplamalarda görülen erken dönem rötre çatlakları, yapısal bütünlük ve uzun ömürlülük açısından ciddi tehditler oluşturabilir. Mühendisler, betonarme yapılarda erken yaş rötresi kaynaklı çatlakların oluşma ihtimalini önceden tahmin etmek için farklı metotlar kullanmaktadır [138].

Bu tez çalışmasında yapılan deneylerden bir diğeri de, kısıtlanmış rötrede kaynaklanan beton çatlağının araştırılmasıdır. Bu sebeple, çatlak genişliklerinin ölçülmesi ve mineral katkıların kısıtlanmış rötre çatlakları üzerindeki etkilerini belirlemek amacıyla çelik halkalı kalıplar hazırlanmıştır.

Kısıtlanmış rötre, basit bir deneyle incelenebilir. Bu çelik halkalardan bir tanesi Resim 3.13'te gösterildiği gibi ASTM C1581 standardına uygun kurularak yapılmıştır [139]. Çelik kalıbın dış halkası 406 mm iç çapa sahipken, iç halkanın dış çapı 330 mm'dir. İç çelik halka, gerinim ölçümü için monte edilmiş ve 13 mm kalınlığa sahiptir. Beton harcı, çelikten yapılmış bir çemberin içine (Resim 3.14.) yerleştirildikten sonra, harcın sertleşmesi beklenir. Beton, serbestçe büzülmesi engellendiğinde, düşey çatlakların oluştuğu gözlemlenir. Bu çatlakların boyut ve dağılımı, maksimum 10 kat büyütme kapasitesine sahip ışıklı el mikroskobu (Resim 3.15.) ile 30 gün boyunca izlenerek analiz edilmiştir.



Resim 3.14. Kısıtlanmış rötre deneyi için kalıp resimleri



Resim 3.15. Halka içerisine yerleştirilen numune ve kullanılan mikroskop



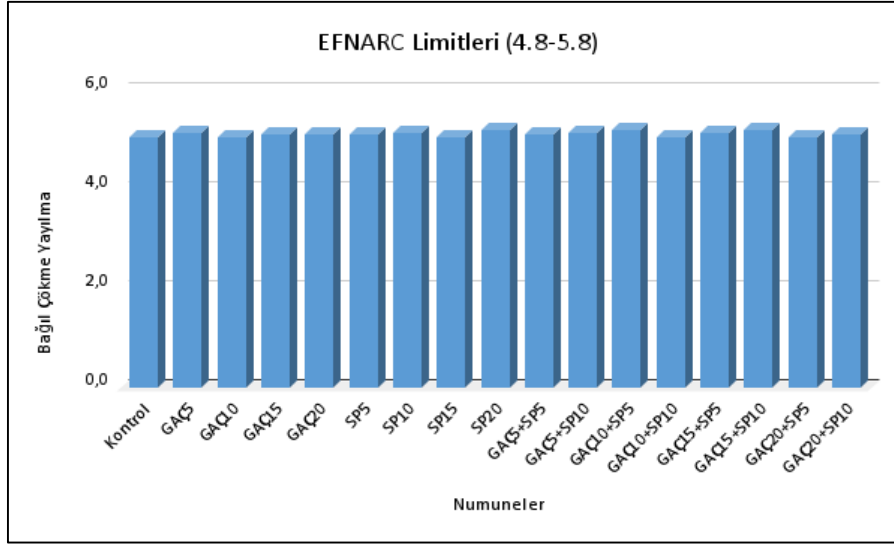
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

4.1. Mini Çökme-Yayılma Deneyi Sonuçları

Karışımların akışkanlık özellikleri, mini çökme-yayılma deneyinde TS EN 12350-9 ve EFNARC standartlarına göre önerilen 240-260 mm aralığındaki değerler (Çizelge 4.1.) sabit tutulmuştur [126, 140]. (3.1) denklemi ile hesaplanan bağıl yayılma değerleri ise Çizelge 4.1. ve Şekil 4.1.'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.1. Karışımların mini çökme-yayılma ve bağıl çökme-yayılma verileri

Karışım Kodu	Mini Çökme ve Yayılma Deneyi (mm)	Bağıl Çökme-Yayılma
Kontrol	246	5,1
GAÇ5	248	5,2
GAÇ10	246	5,1
GAÇ15	247	5,1
GAÇ20	247	5,1
SP5	247	5,1
SP10	248	5,2
SP15	246	5,1
SP20	249	5,2
GAÇ5+SP5	247	5,1
GAÇ5+SP10	248	5,2
GAÇ10+SP5	249	5,2
GAÇ10+SP10	246	5,1
GAÇ15+SP5	248	5,2
GAÇ15+SP10	249	5,2
GAÇ20+SP5	246	5,1
GAÇ20+SP10	247	5,1



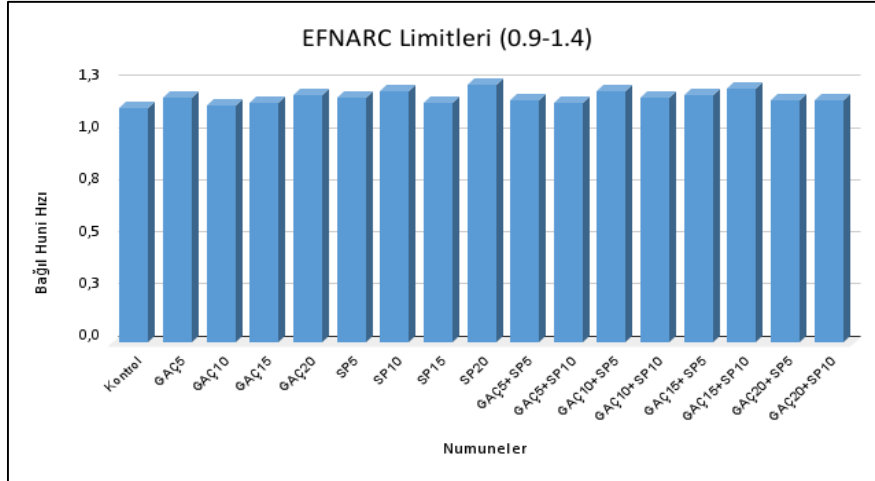
Şekil 4.1. Karışımların bağıl çökme-yayılma değerleri

4.2. Mini V Hunisi Deneyi Sonuçları

Karışımların mini V hunisi deney sonuçları TS EN 12350-9 ve EFNARC standartlarına göre önerilen 7-11s aralığındaki değerleri (Çizelge 4.2.) elde edilmiştir [126, 140]. Karışımların bağıl huni hızları denklem (3.2) ile hesaplanarak Çizelge 4.2. ve Şekil 4.2.'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.2. Karışımların mini V hunisi ve bağıl huni hızı sonuçları

Karışım Kodu	V Hunisi Deneyi (7-11 sn)	Bağıl Huni Hızı (0.9-1.4)
Kontrol	8,9	1,1
GAÇ5	8,5	1,2
GAÇ10	8,8	1,1
GAÇ15	8,7	1,1
GAÇ20	8,4	1,2
SP5	8,5	1,2
SP10	8,3	1,2
SP15	8,7	1,1
SP20	8,1	1,2
GAÇ5+SP5	8,6	1,2
GAÇ5+SP10	8,7	1,1
GAÇ10+SP5	8,3	1,2
GAÇ10+SP10	8,5	1,2
GAÇ15+SP5	8,4	1,2
GAÇ15+SP10	8,2	1,2
GAÇ20+SP5	8,6	1,2
GAÇ20+SP10	8,6	1,2



Şekil 4.2. Numunelerin bağıl huni hız değerleri

4.3. Basınç ve Eğilme Dayanımı Deneyleri Sonuçları

Bu çalışmada, KYH karışımlarının mekanik özelliklerinden olan 3, 7 ve 28 günlük basınç dayanımı deney sonuçları Çizelge 4.3 ve Çizelge 4.4.'da gösterilmiştir.

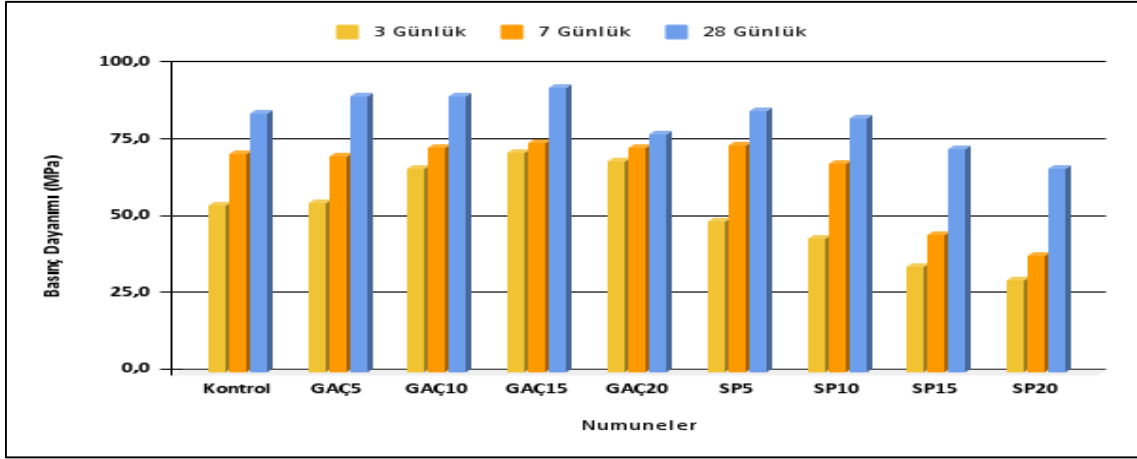
Çizelge 4.3. Tek tip mineral katkı içeren KYH'ların basınç dayanım sonuçları

Karışım Kodu	3 Günlük Basınç Dayanımı (MPa)	7 Günlük Basınç Dayanımı (MPa)	28 Günlük Basınç Dayanımı (MPa)
Kontrol	54,4	71,1	84,4
GAÇ5	55,2	71,4	89,9
GAÇ10	66,3	73,0	90,2
GAÇ15	71,7	74,7	92,7
GAÇ20	68,7	73,3	77,6
SP5	49,3	74,2	85,2
SP10	43,5	68,0	82,9
SP15	34,4	44,8	72,9
SP20	30,1	38,0	66,2

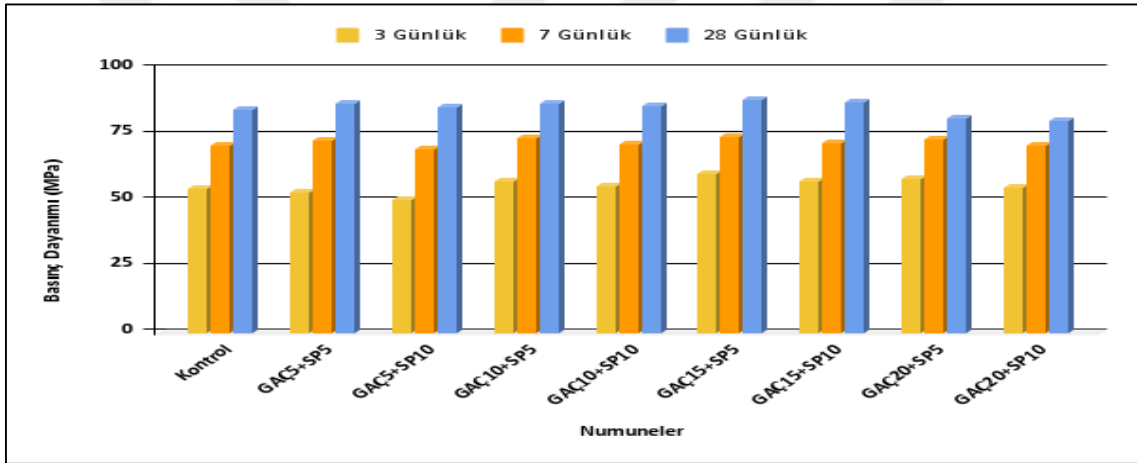
Çizelge 4.4. İki tip mineral katkı içeren KYH'ların basınç dayanım sonuçları

Karışım Kodu	3 Günlük Basınç Dayanımı (MPa)	7 Günlük Basınç Dayanımı (MPa)	28 Günlük Basınç Dayanımı (MPa)
Kontrol	54,4	71,1	84,4
GAÇ5SP5	53,0	72,8	86,9
GAÇ5SP10	50,5	69,4	85,6
GAÇ10SP5	57,2	73,9	87,0
GAÇ10SP10	55,4	71,3	85,9
GAÇ15SP5	60,1	74,4	88,3
GAÇ15SP10	57,4	72,1	87,4
GAÇ20SP5	58,2	73,4	81,4
GAÇ20SP10	55,0	70,8	80,2

Hazırlanan GAÇ5, GAÇ10, GAÇ15, GAÇ20, SP5, SP10, SP15, SP20 ve ikili karışımlardan GAÇ5SP5, GAÇ5SP10, GAÇ10SP5, GAÇ10SP10, GAÇ15SP5, GAÇ15SP10, GAÇ20SP5 ve GAÇ20SP10 numunelerin 3 günlük basınç dayanımları kontrol harcıyla karşılaştırıldığında %1.5, %21.9, %31.8, %26.3, -%9.4, -%20.1, -%36.8, -%44.7 ve ikili karışımlardan -%1.8, -%7.2, %5.2, %1.8, %10.5, %5.5, %7, %1.1 olarak Çizelge 4.5 ve Çizelge 4.4.'da gösterilmiştir. Basınç dayanımı sonuçları incelendiğinde, GAÇ15 serisinin en yüksek değeri sunduğu, buna karşılık SP20 numunesinin en düşük değeri verdiği görülmüştür. SP20 karışımında saptanan en yüksek basınç dayanımı azalma oranı, mineral katkı miktarının belirli bir eşiği aşmasının yanı sıra, SP mineralinin suyu bünyesinde tutarak karışımın akışkanlığını olumsuz etkilemesi sonucu mekanik özelliklerde önemli bir gerilemeye yol açtığını ortaya koymuştur. Şekil 4.3. ve Şekil 4.4. incelendiğinde, 7 günlük basınç dayanım numunelerinin GAÇ5, GAÇ10, GAÇ15, GAÇ20, SP5, SP10, SP15, SP20, GAÇ5SP5, GAÇ5SP10, GAÇ10SP5, GAÇ10SP10, GAÇ15SP5, GAÇ15SP10, GAÇ20SP5 ve GAÇ20SP10 sonuçları kontrol numunesiyle sırasıyla kıyaslandığında %0.4, %2.7, %5.1, %3.1, %4.4, -%4.4, -%36.9, -%46.5, %2.4, -%2.4, %3.9, %0.3, %4.6, %1.4, %3.2, -%0.4 sonuçları elde edilmiştir. GAÇ kullanılması dayanımı olumlu yönde artmasını sağlarken SP %5'ten fazla kullanılması dayanımı olumsuz yönde etkilemiştir. Bütün karışımlarda, 28 günlük su kürü sonrası GAÇ5, GAÇ10, GAÇ15, GAÇ20, SP5, SP10, SP15, SP20, GAÇ5SP5, GAÇ5SP10, GAÇ10SP5, GAÇ10SP10, GAÇ15SP5, GAÇ15SP10, GAÇ20SP5 ve GAÇ20SP10 karışımlarının basınç dayanımları kontrol harcına kıyasla %6.5, %6.9, %9.8, -%8.6, %1, -%1.8, -%13.6, -%21.6, %3, %1.4, %3.1, %1.8, %4.6, %3.6, -%3.6, -%5 oranında değişim yapmıştır. KYH'ta 28 günlük kür sonrası en yüksek basınç dayanımı GAÇ15'te görülürken en düşük basınç dayanımı SP20 de gözlemlenmiştir. İkili karışımlarda en yüksek basınç dayanımı GAÇ15SP5'te gözlemlenirken, en düşük basınç dayanımı ise GAÇ20SP10 da görülmüştür. Bunun en önemli nedenlerinden biri mineral katkı miktarının belirli bir miktarı aşmasının yanı sıra, kil minerali olan SP mineralinin %5'ten fazla kullanıldığında suyu bünyesinde tutarak karışımın akışkanlığını olumsuz etkilemesi sonucu mekanik özelliklerde önemli bir gerilemeye yol açtığını ortaya koymaktadır. SP ve GAÇ'ın yüksek basınç dayanımı sağladığı oranlarda hazırlanan KYH numunelerinde de benzer şekilde yüksek dayanım değerleri elde edilmiştir. Çimento miktarının yaklaşık %25 oranında azaltılarak yerine GAÇ15SP10 karışımının kullanılmasıyla basınç dayanımında bir iyileşme tespit edilmiştir.



Şekil 4.3. Tek tip mineral katkı içeren KYH'ların basınç dayanımları



Şekil 4.4. İki tip mineral katkı içeren KYH'ların basınç dayanımları

Şekil 4.3.'e göre, SP5 numunesi basınç dayanımı kontrol numunesinden daha iyi dayanım gösterirken, SP10 numunesi KNT numunesine yakın değerler elde edilmiştir. %15 ve %20 sepiyolit içeren SP15 ve SP20 numunelerinde 28 günlük dayanımlarda azalma tespit edilmiştir. Literatürde, %10 sepiyolit lifi kullanımının harcın mekanik (basınç ve eğilme dayanımlarında önemli artışlar) ve fiziksel özelliklerini olumlu yönde etkilediği vurgulanmaktadır. Bu iyileşmenin, sepiyolit liflerinin çimento matrisinde oluşturduğu üç boyutlu ağ yapısı sayesinde harcın işlenebilirliğinin (reolojisinin) düzenlenmesinden kaynaklandığı mikroskobik analizlerle desteklenmektedir [19].

Granit atık çamuru parçacıklarının küçük boyutlu olması, agrega iskeletinin çimento ve kum tanecikleri arasındaki boşlukların optimum düzeyde dolmasını sağlamıştır. Granit atık çamurunun, çimento hamuru ile kusursuz bir şekilde mekanik kilitlenmeye olanak tanımış,

bu da agrega ve çimento hamuru matrisi arasında daha sağlam bir arayüzey geçiş bölgesinin (ITZ) oluşmasına ve sonuç olarak basınç dayanımında artışa neden olmuştur. Bu durum, ilerleyen bölümlerde sunulan SEM görüntüleriyle de teyit edilmektedir. Sonuçlar daha önce yapılan araştırmacıların sonuçlarıyla uyusmaktadır [34, 36, 38]. Vijayalakshmi ve Sekar (2013) tarafından yayınlanan araştırmaya göre, granit modifiye edilmiş beton karışımlarının basınç dayanımı gibi mukavemet özellikleri, içeriğinde %15'e kadar granit tozu atığı bulunan bir kontrol betonunun mukavemet özelliklerine kıyasla ya eşdeğer bulunmuş ya da küçük bir oranda daha düşük çıkmıştır [36]. Elyamany ve diğerleri (2014) yaptıkları çalışmada, KYH üretiminde çeşitli dolgular kullanmış ve granit tozu arttıkça katkı maddesi ihtiyacının yükseldiğini gözlemlemişlerdir [141]. Ayrıca, granit tozu ilavesinin ise basınç dayanımını artırdığını bulmuşlardır. Karmegam ve diğerleri (2014) tarafından yapılan araştırmada, çimentonun farklı oranlarda (%0, 5, 10, 15 ve 20) granit kesme atığı ile ikame edildiği KYH karışımları üretmiş ve tüm karışımların taze özelliklerinin kabul edilebilir sınırlar içinde olduğunu belirtmişlerdir. %15'e kadar ikame oranında mukavemet artışı elde etmişler ve granit kesme atığının çimentoya kısmi bir alternatif olarak KYH üretiminde kullanılabileceği sonucuna varmışlardır [33].

KYH karışımlarının mekanik özelliklerinden olan eğilme dayanımı, 3, 7 ve 28 günlük 22 ± 3 °C su kürü periyotlarının tamamlanmasının ardından belirlenmiştir (Çizelge 4.5. ve Çizelge 4.6.).

Çizelge 4.5. Tek tip mineral katkı içeren KYH'ların eğilme dayanım sonuçları

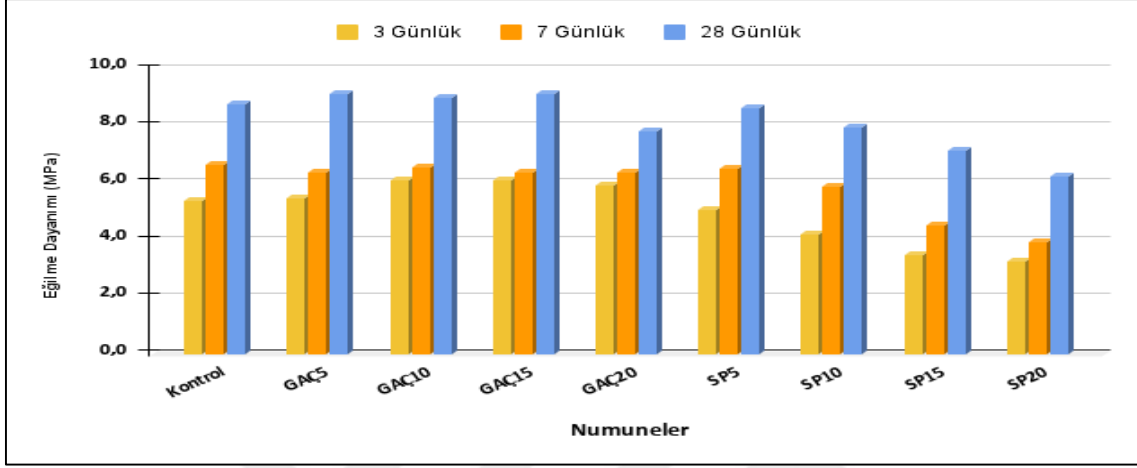
Karışım Kodu	3 Günlük Eğilmede Çekme Dayanımı (MPa)	7 Günlük Eğilmede Çekme Dayanımı (MPa)	28 Günlük Eğilmede Çekme Dayanımı (MPa)
Kontrol	5,4	6,6	8,7
GAÇ5	5,5	6,4	9,1
GAÇ10	6,1	6,5	9,0
GAÇ15	6,1	6,4	9,1
GAÇ20	5,9	6,4	7,8
SP5	5,0	6,5	8,6
SP10	4,2	5,8	7,9
SP15	3,5	4,5	7,1
SP20	3,2	3,9	6,2

Çizelge 4.6. İki tip mineral katkı içeren KYH'ların eğilme dayanım sonuçları

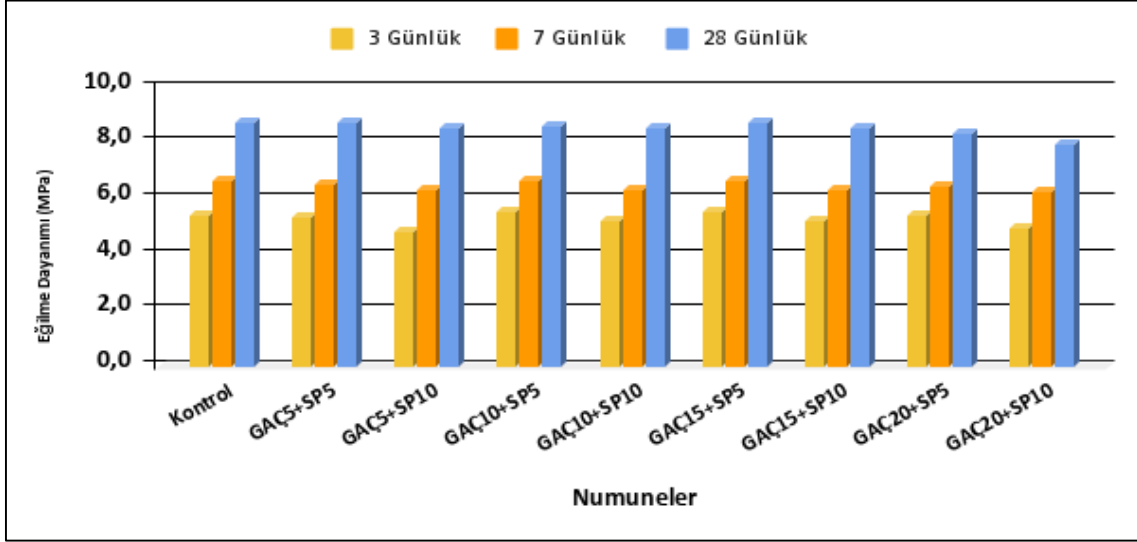
Karışım Kodu	3 Günlük	7 Günlük	28 Günlük
	Eğilmede Çekme Dayanımı (MPa)	Eğilmede Çekme Dayanımı (MPa)	Eğilmede Çekme Dayanımı (MPa)
Kontrol	5,4	6,6	8,7
GAÇ5+SP5	5,3	6,5	8,7
GAÇ5+SP10	4,8	6,3	8,5
GAÇ10+SP5	5,5	6,6	8,6
GAÇ10+SP10	5,2	6,3	8,5
GAÇ15+SP5	5,5	6,6	8,7
GAÇ15+SP10	5,2	6,3	8,5
GAÇ20+SP5	5,4	6,4	8,3
GAÇ20+SP10	4,9	6,2	7,9

GAÇ5, GAÇ10, GAÇ15, GAÇ20, SP5, SP10, SP15, SP20, GAÇ5SP5, GAÇ5SP10, GAÇ10SP5, GAÇ10SP10, GAÇ15SP5, GAÇ15SP10, GAÇ20SP5 ve GAÇ20SP10 karışımlarının 3 günlük eğilme dayanım sonuçları kontrol numunesiyle karşılaştırıldığında sırasıyla %1.9, %12.9, %12.9, %9.3, -%7.4, -%14.8, -%35.2, -%40.7, -%1.9, -%11.1, %1.9, -%3.7, %1.9, -%3.7, %0, -%9.3 oranında değerleri elde edilmiştir. Yapılan analizler sonucunda, en yüksek eğilme dayanımına GAÇ10 ve GAÇ15 numunelerinde ulaşılmış, buna karşın SP20 numunesi en düşük eğilme dayanımını sergilemiştir. GAÇ erken dayanımı olumlu yönde etkilerken, SP erken dayanımı olumsuz yönde etkilediği yapılan çalışmada gözlemlenmiştir. KYH'ta 7 günlük su kürü sonrası GAÇ5, GAÇ10, GAÇ15, GAÇ20, SP5, SP10, SP15, SP20, GAÇ5SP5, GAÇ5SP10, GAÇ10SP5, GAÇ10SP10, GAÇ15SP5, GAÇ15SP10, GAÇ20SP5 ve GAÇ20SP10 karışımlarının eğilme dayanım sonuçları kontrol numunesi ile kıyaslandığında sırasıyla -%3, -%1.5, -%3, -%3, -%1.5, -%12.1, -%31.8, -%40.9, -%1.5, -%4.5, %0, -%4.5, %0, -%4.5, -%1.5, -%6.1 verileri elde edilmiştir. Bu durumda en yüksek eğilme dayanımı GAÇ10SP5 ve GAÇ15SP5 numunelerinde gözlemlenirken, en düşük eğilme dayanımı ise SP20 numunesinde gözlemlenmiştir. Deneyde kullanılan bütün karışım serilerinde, 28 günlük su kürü periyodunun sonunda ölçülen eğilme dayanımı GAÇ5, GAÇ10, GAÇ15, GAÇ20, SP5, SP10, SP15, SP20, GAÇ5SP5, GAÇ5SP10, GAÇ10SP5, GAÇ10SP10, GAÇ15SP5, GAÇ15SP10, GAÇ20SP5 ve GAÇ20SP10 numunelerinin referans alınan kontrol karışımına kıyasla %4.6, %3.5, %4.6, -%10.3, -%1.1, -%9.2, -%18.4, -%28.7, %0, -%2.3, -%1.1, -%2.3, %0, -%2.3, -%4.6, -%9.2 olarak hesaplanmıştır. KYH'ta 28 günlük serilerde en yüksek eğilme dayanımı GAÇ5 ve

GAÇ15'te gözlemlenirken, en düşük eğilme dayanımı tüm serilerde SP20 olarak görülmüştür. Çalışma bulgularına göre, SP'nin %5'in üzerinde kullanılması durumunda eğilme dayanımı değerlerinde azalma meydana gelmiştir. Bu gözlem, daha önce bu konuda yapılmış bilimsel çalışmaların sonuçlarıyla benzerlik taşımaktadır [19, 122].



Şekil 4.5. Tek tip mineral katkı içeren KYH'ların eğilme dayanımları



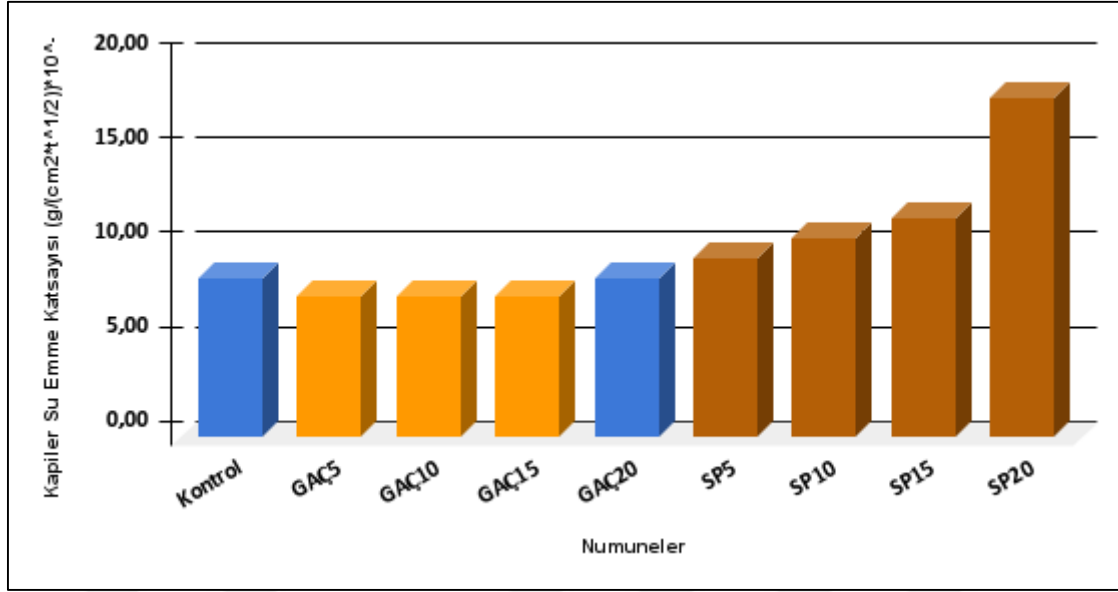
Şekil 4.6. İki tip mineral katkı içeren KYH'ların eğilme dayanımı

Şekil 4.5. ve Şekil 4.6. incelendiğinde diğer numunelerin, kontrol numunesinin eğilme dayanım değerleriyle karşılaştırıldığında, GAÇ katkısı %15 oranına kadar kullanıldığında 3, 7 ve 28 günlük dayanımlarda daha yüksek performans sergileyerek dayanımı olumlu yönde etkilediği görülmüştür. Ancak, %20 oranında GAÇ kullanımı ilk 3 günlük dayanımda kontrol numunesinden daha iyi sonuçlar vermesine rağmen, sonraki kür periyotlarında

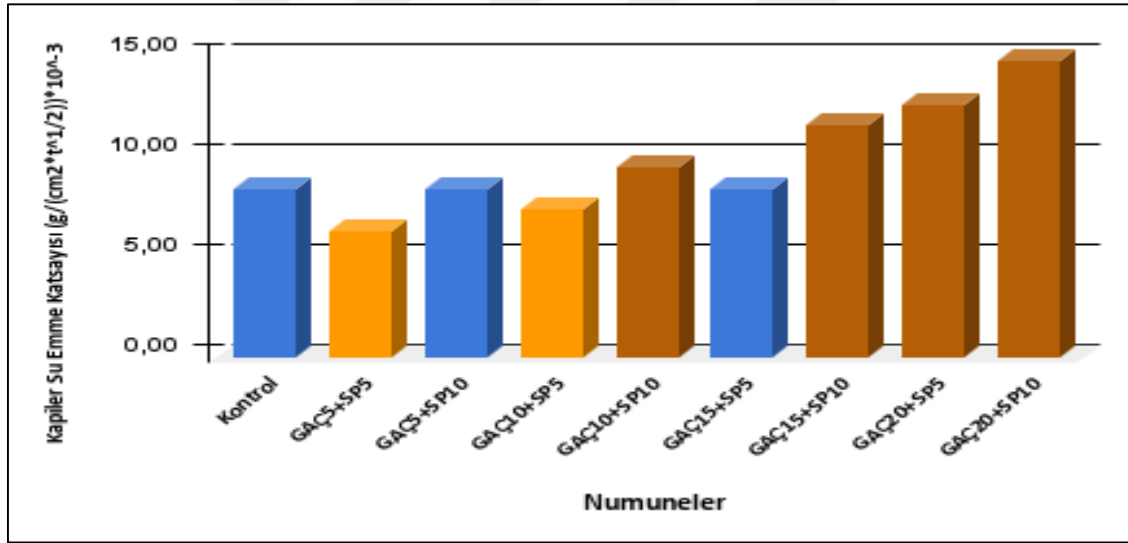
dayanımında azalmaya neden olmuştur. Bu çalışma sonuçları, konuyla ilgili daha önce yapılmış araştırmaların bulgularıyla paralellik arz etmektedir [142-144]. Granit atık parçacıklarının küçük boyutlu olması, agrega iskeletinin çimento ve kum tanecikleri arasındaki boşlukların optimum düzeyde dolmasını sağlamıştır.

4.4. Kapiler Su Emme Deneyi Sonuçları

Harç numunelerindeki su emme kapasitesi gözenek derecesiyle bağlantılıdır [145]. 28 günlük numuneler üzerinde yapılan kapiler su emme deneyi sonucunda Şekil 4.7. ve 4.8.'deki grafikler elde edilmiştir. Hazırlanan KYH karışımlarının 28 günlük kür süresi sonunda belirlenen kapiler su emme katsayılarının, referans olarak alınan kontrol betonunun aynı süredeki değeriyle karşılaştırıldığında, GAÇ5, GAÇ10, GAÇ15, GAÇ20, SP5, SP10, SP15, SP20, GAÇ5SP5, GAÇ5SP10, GAÇ10SP5, GAÇ10SP10, GAÇ15SP5, GAÇ15SP10, GAÇ20SP5 ve GAÇ20SP10 serilerinde sırası ile -%11.9, -%11.9, -%11.9, %0, %13.1, %25, %38.1, %113.1, -%25, %0, -%11.9, %13.1, %0, %38.1, %50, %76.2 sonuçları elde edilmiştir. Buna göre GAÇ numunelerin geçirimsizliğini bir miktar azaltırken, SP numunelerin geçirimsizliğini arttırmıştır. GAÇ'nin %5, %10 ve %15 kullanımı geçirimsizliği azaltırken GAÇ'nin %20 kullanımı geçirimsizliğe önemli bir katkı sağladığı görülmüştür. SP %5'ten itibaren geçirimsizliği arttırmıştır. GAÇ ve SP'nin birlikte kullanıldığı GAÇ15SP5 kontrol numunesiyle aynı değer gözlemlenirken, GAÇ5SP5 ve GAÇ10SP5 karışımlarda geçirimsizlik azalırken, diğer beş karışımda ise geçirimsizliği arttırmıştır. Yine de grafiklerin 10^{-3} mertebesinde çizildiği göz önünde bulundurulduğunda kapiler su emme kat sayısındaki bu artışın ihmal edilebilir sınırlar içerisinde olduğu görülür [128].



Şekil 4.7. Tek tip mineral katkı içeren numunelerin kapiler su emme katsayıları



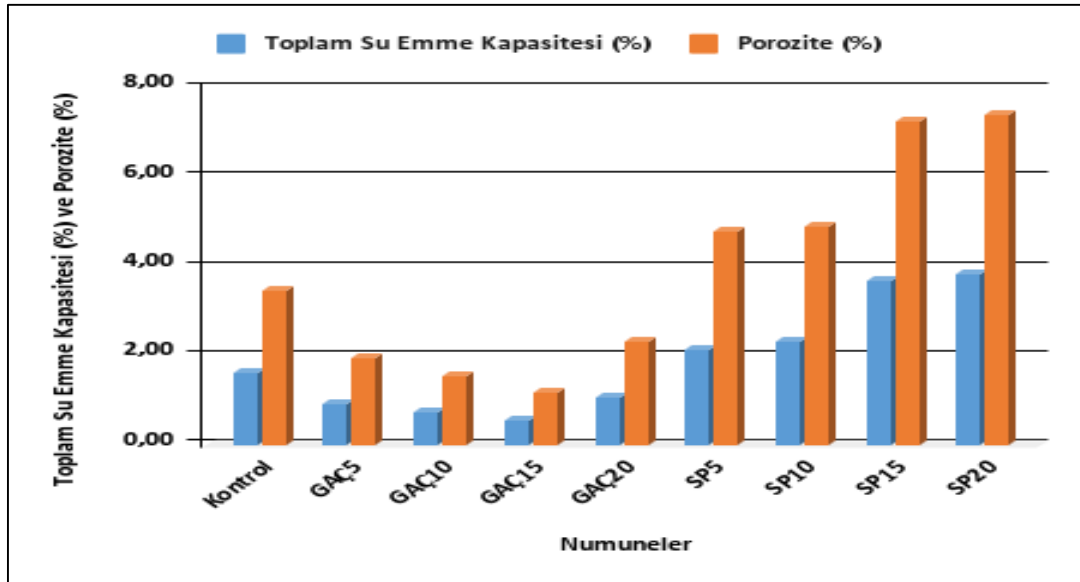
Şekil 4.8. İki tip mineral katkı içeren numunelerin kapiler su emme katsayıları

4.5. Yoğunluk ve Su Emme Deneyi Sonuçları

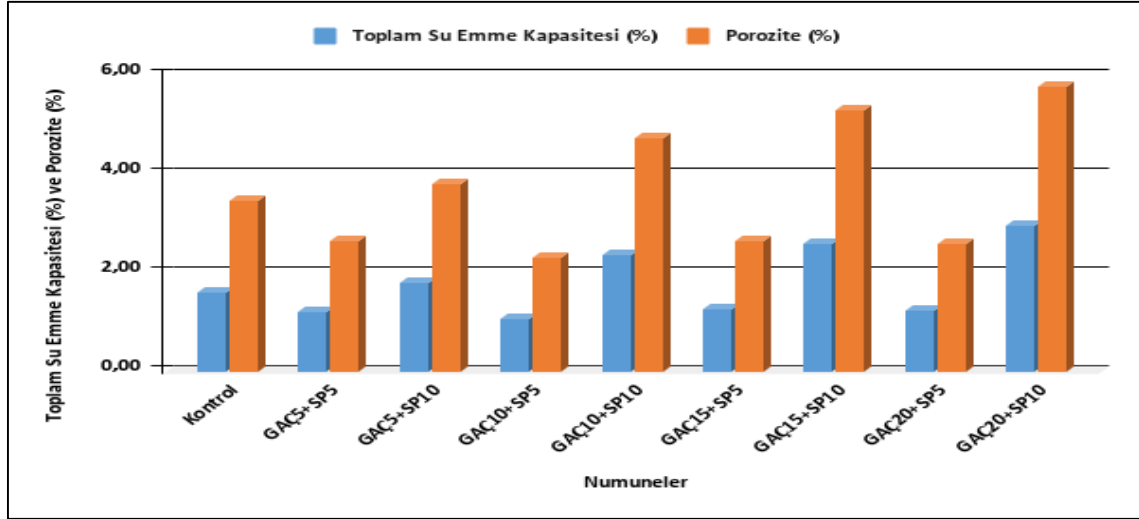
Betonun su geçirgenliği, içyapısındaki boşlukların miktarıyla yakından ilişkilidir. Betonun içerisinde bulunan, farklı boyutlarda ve süreklilikte olabilen bu boşluklar, betonun hem taşıma kapasitesini (dayanımını) hem de uzun ömürlü olma yeteneğini (dayanıklılığını) olumsuz yönde etkileyebilmektedir. Şekil 4.9. ve Şekil 4.10. incelendiğinde hazırlanan KYH karışımlarının 28 günlük kür sonundaki toplam su emme katsayıları ve porozite değerleri farklılıklar göstermektedir. SP20 numunesi en yüksek toplam su emme katsayıları ve

porozite değerine sahip olmuştur. GAÇ ikamesi kontrol numunesiyle kıyaslandığında toplam su emme katsayıları ve porozite değerlerini azaltırken, SP ikamesi toplam su emme katsayıları ve porozite değerlerinin artmasına neden olmuştur. Yapılan çalışmalarda çimento yerine KYH'larda granit atığı dahil edildiğinde su emilimine karşı daha iyi bir direnç oluşturduğunu bildirmişlerdir [21, 35]. Ayrıca, Elyamany ve diğerleri [141]. ve Sadek ve diğerleri [31], KYH'larda mineral katkı maddesi olarak granit atığının eklenmesiyle su emilimine karşı direncin iyileştiğine dair veriler elde etmişlerdir.

Çimento yerine mineral katkı olarak granit atığının eklenmesi ile belirli bir ikame seviyesine kadar su emilimine karşı direnci iyileştirilmesi, harç matrisinin gözenek yapısının yoğunlaştırılmasından kaynaklanıyor olabilir [35, 79, 146, 147]. Numunelerde kullanılan sepiyolit miktarının artmasıyla birlikte, içerdikleri boşluk oranında da bir yükselme gözlemlenmiştir. Bu durumun temel nedeni, sepiyolit mineralinin yüksek su absorpsiyon kapasitesi sayesinde önemli miktarda suyu bünyesine alması ve kuruma sürecinde bu suyu hızlı bir şekilde dışarı vermesi sonucu numune yapısında boşlukların meydana gelmesidir [148]. Ayrıca hazırlanan harç numunelerinin doygun kuru yoğunluğu ve görünür yoğunluğu hesaplanarak Çizelge 4.7.'da gösterilmiştir.



Şekil 4.9. Tek tip mineral katkı içeren numunelerin toplam su emme ve porozite değerleri



Şekil 4.10. İki tip mineral katkı içeren numunelerin toplam su emme ve porozite değerleri

Çizelge 4.7. Numunelerin doygun kuru yüzey ve görünür yoğunluk değerleri

Karışım Kodu	Doygun Kuru Yüzey Yoğunluk (g/cm ³)	Görünür Yoğunluk (g/cm ³)
Kontrol	2,20	2,24
GAÇ5	2,19	2,21
GAÇ10	2,19	2,21
GAÇ15	2,18	2,19
GAÇ20	2,20	2,23
SP5	2,28	2,35
SP10	2,16	2,22
SP15	2,05	2,13
SP20	2,00	2,08
GAÇ5SP5	2,23	2,28
GAÇ5SP10	2,14	2,19
GAÇ10SP5	2,17	2,22
GAÇ10SP10	2,07	2,09
GAÇ15SP5	2,15	2,18
GAÇ15SP10	2,09	2,15
GAÇ20SP5	2,11	2,14
GAÇ20SP10	2,02	2,08

4.6. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ve EDS Analizi Sonuçları

GAÇ15SP5, GAÇ15, KNT ve SP5 karışımların 3 ve 28 günlük kür süresinin ardından hazırlanan numune kesitleri üzerinde Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) analiz yapılmış

ve sonuçlar Resim 4.1-6' da verilmiştir. 3 günlük numunelerde kalsiyum-silikat-hidrat (C-S-H) jeli fazla gözlemlenmezken, 28 günlük numunelerin SEM görüntülerinde kalsiyum-silikat-hidrat (C-S-H) jeli baskın olarak mevcut olduğu görülmektedir. 3 günlük Resim 4.1. ve Resim 4.2.'de hidrasyon reaksiyonları sonucu oluşan CH plakalarının yoğun olduğu bölgeler bulunmaktadır. Resim 4.3-6'da verilen görüntüler genel olarak değerlendirildiğinde GAÇ ve SP ile üretilen harçlarda C-S-H jelleri ve CH plakaları oldukça yoğun olduğu görülmüştür. Sonuç olarak çimento yerine %15 GAÇ ve %5 SP ikame edilmesi harç karışımların mikro yapısında önemli bir iyileşme sağlamıştır ve bu önceki çalışmalarla uyumlu bulunmuştur [19, 31, 38, 147].

SEM görüntülerinin yorumlanması sırasında, koyu alanların boşluklar ve uzun, kesintisiz siyah kısımların ITZ olabileceği yönünde bir ön kabul bulunmaktadır. SEM görüntülerinin değerlendirilmesi sırasında, altıgen prizma geometrisine sahip belirgin kristallerin CH veya Ca(OH)_2 olduğu yönünde bir yorumlama yapılır. Aynı zamanda, görüntülerdeki ince liflerden oluşan yığınların ise C-S-H jelinin bir göstergesi olduğu düşünülmektedir [129].

Resim 4.1. ve Resim 4.2. incelendiğinde GAÇ15, KNT, GAÇ15SP5 ve SP5 karışımlarının 3 günlük SEM görüntüsünü göstermektedir. 3 günlük numunelerde C-H daha belirgin ve fazladır. Resim 4.1. ve Resim 4.2.'de C-H ve C-S-H jelleri gösterilmiştir. Erken yaşlarda (örneğin 3 gün), hidrasyon süreci henüz başlangıç aşamalarında olduğu için, nispeten daha büyük ve iyi tanımlanmış C-H kristalleri SEM görüntülerinde daha belirgin ve yoğun olarak gözlemlenirken, C-S-H jeli de oluşmaya başlar, ancak bu aşamada genellikle daha az olgunlaşmış ve daha dağınık bir yapıya sahiptir. Bu nedenle, C-H kristalleri görsel olarak daha baskın görünmüştür.

Resim 4.3-6 incelendiğinde GAÇ15SP5, GAÇ15, KNT ve SP5 karışımlarının 28 günlük SEM görüntüsünü veya mikrografını göstermektedir. Oklarla belirtilen koyu kısımlar boşlukları ve ITZ'yi temsil eder, SEM görüntüsünün lifli kısmı C-S-H jelini ve altıgen levha benzeri parçacıkların büyük miktarlarda bulunan CH kristalleri (iyi kristalleşmiş Ca(OH)_2 kristalleri) olduğunu gösterir. C-S-H jeli, hidrasyon ilerledikçe oluşan kılcal boşlukları doldurarak harcın mikroyapısını daha yoğun hale getirir. Bu yoğunlaşma, SEM görüntülerinde C-S-H'nin daha baskın ve sürekli bir matris olarak görülmesine neden olur. Bu nedenlerden dolayı, 28 günlük harç numunelerinin SEM görüntülerinde, ana bağlayıcı ve mukavemet sağlayıcı faz olan C-S-H jeli çok daha yoğun ve baskın bir şekilde görülürken,

CH kristalleri başlangıçtaki kadar belirgin olmayabilir veya C-S-H jeli içinde gömülü kalabilir.

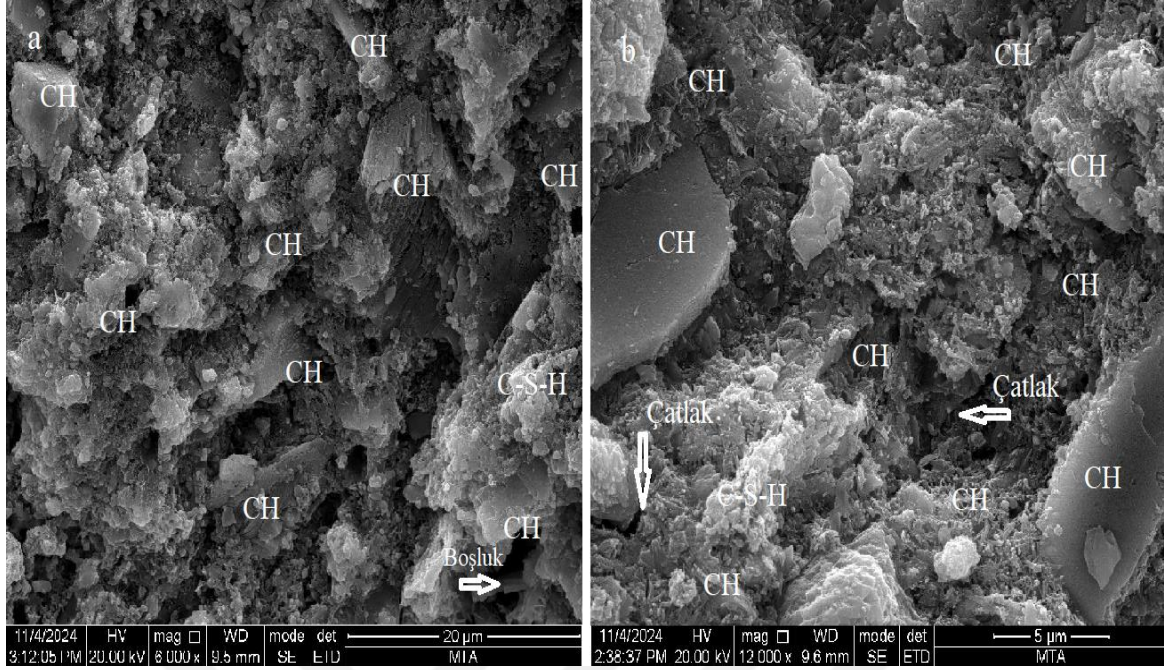
Kalsiyum silikat hidrat, hidrasyon reaksiyonunun en önemli ürünüdür. Çimento ve agregaları kompakt bir matris halinde bağlayarak harcın genel mukavemetini belirler. Yüksek C-S-H jel konsantrasyonu, harcın daha yüksek basınç mukavemetine yol açar [30]. GAÇ15, GAÇ15SP5, ve SP5; KNT karışımından daha iyi dayanım sonuçları elde edilmiştir. SEM görüntüleri incelendiğinde KNT numunesindeki boşluk miktarı daha fazladır. GAÇ ve SP'nin kullanıldığı karışımlar, KNT karışımının matrisine kıyasla nispeten daha kompakt ve yoğundur. Dahası, nispeten daha yüksek miktarda C-H kristallerine ek olarak C-S-H jeli gözlemlenmektedir. Çizelge 4.8. incelendiğinde Si/Al (Silisyum/Alüminyum) ve Ca/Si (Kalsiyum/Silisyum) oranları, alkali aktive bağlayıcı sistemlerde oluşan jelin yapısını ve buna bağlı olarak mekanik özellikleri doğrudan etkileyen önemli parametrelerdir. Si/Al oranı, oluşan aluminosilikat yapıların polimerleşme derecesini belirler. Bu oran 2,0–2,5 aralığında olduğunda jel daha yoğun ve dayanıklı hale gelir; bu da yüksek basınç dayanımıyla sonuçlanır. Örneğin GAÇ15 numunesi 2,12'lik Si/Al oranıyla 92,7 MPa gibi yüksek bir dayanım göstermiştir. Ancak bu oran çok yükseldiğinde (örneğin >3), yapı kırılganlaşabilir ve işlenebilirlik azalabilir.

Ca/Si oranı ise C-S-H veya C-H tipi jellerin oluşumunu kontrol eder. Orta düzeyde bir Ca/Si oranı (yaklaşık 2,5–3,5) jelin kompakt ve dayanıklı olmasını sağlar. GAÇ15 örneğinde 3,15'lik Ca/Si oranı ideal değerlere yakın olduğundan, dayanım açısından en iyi sonuç alınmıştır. Öte yandan Ca/Si oranı çok yüksek olduğunda (örneğin SP5'te 5,14 ve Kontrol numunesinde 5,40), jel yapısı daha gevşek olabilir, bu da uzun vadede dayanımı sınırlayabilir. En yüksek dayanımların elde edilebilmesi için Si/Al ve Ca/Si oranlarının dengeli bir şekilde optimize edilmesi gerekir. Bu oranlar uygun aralıkta tutulduğunda, bağlayıcı sistem daha dayanıklı, mikro yapısı daha sıkı ve performansı daha uzun ömürlü hale gelir. Çizelge 4.10.'de görüldüğü gibi GAÇ15 gibi örnekler bu dengenin sağlandığı ve maksimum verim alınan karışımları temsil etmektedir. Doostkami ve diğerleri (2023) yaptıkları çalışmayla, nispeten daha düşük Ca/Si oranı, önemli miktarda C-S-H jelinin oluşumuna ve dolayısıyla daha yüksek bir basınç dayanımına işaret ederek elde edilen sonuçları destekler niteliktedir [149].

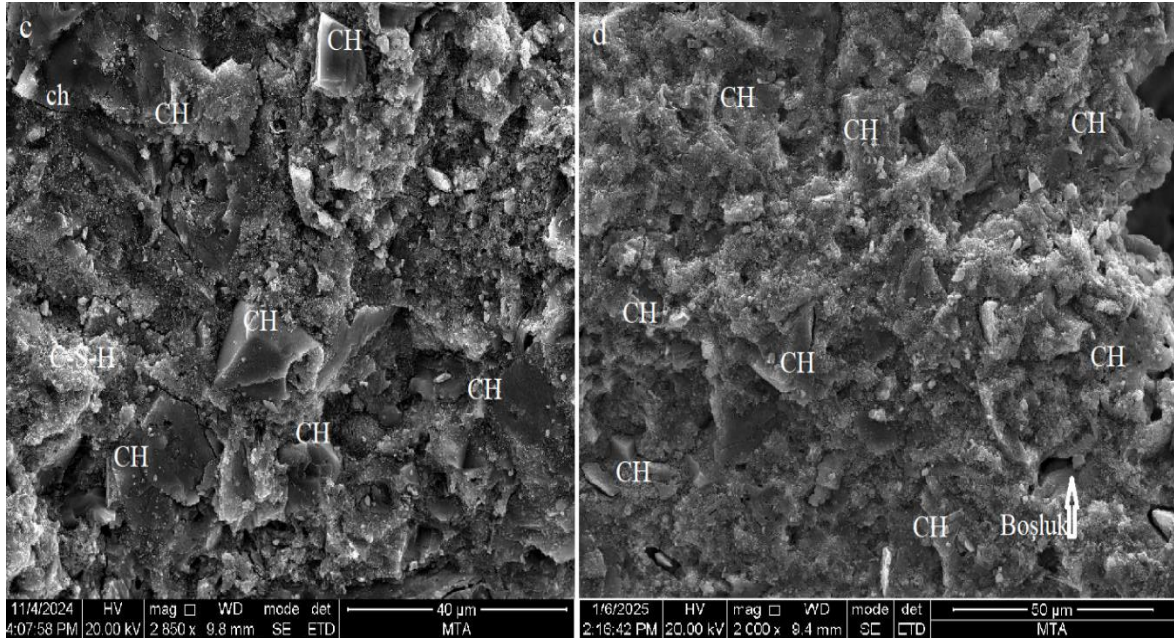
Singh ve diğerleri (2016) yaptıkları çalışmada, ince agrega yerine titreşimli betonlarda %25'e kadar granit atığı katıldığında ITZ'nin yoğunlaştığını ve gözenekliliğin azaldığını gözlemlediler [38]. Sadek ve diğerleri, granit atığının KYH'larda mineral katkı maddesi olarak katılmasıyla mikro yapıda bir incelik buldular [31]. Gupta ve Vyas (2018) yaptıkları çalışmada ayrıca, ince agrega yerine harç içine GA katıldığında daha güçlü ITZ ve kompakt mikro yapı gözlemlediler [147]. Resim 4.4. ve Resim 4.8. incelendiğinde sepiyolit lifleri çimento harcındaki boşlukları doldurarak basınç ve eğilme dayanımları üzerinde olumlu etkilere yol açmaktadır. Bu resimler sepiyolit liflerinin bir ağ yapısı sağladığına ve çimento harcının reolojik özelliklerini düzenleyebileceğine dair kanıt sağlamaktadır [19].

Çizelge 4.8. GAÇ15, SP5, GAÇ15SP5 ve KNT numunelerinin dayanımını etkileyen kimyasal içerikler ve oranları

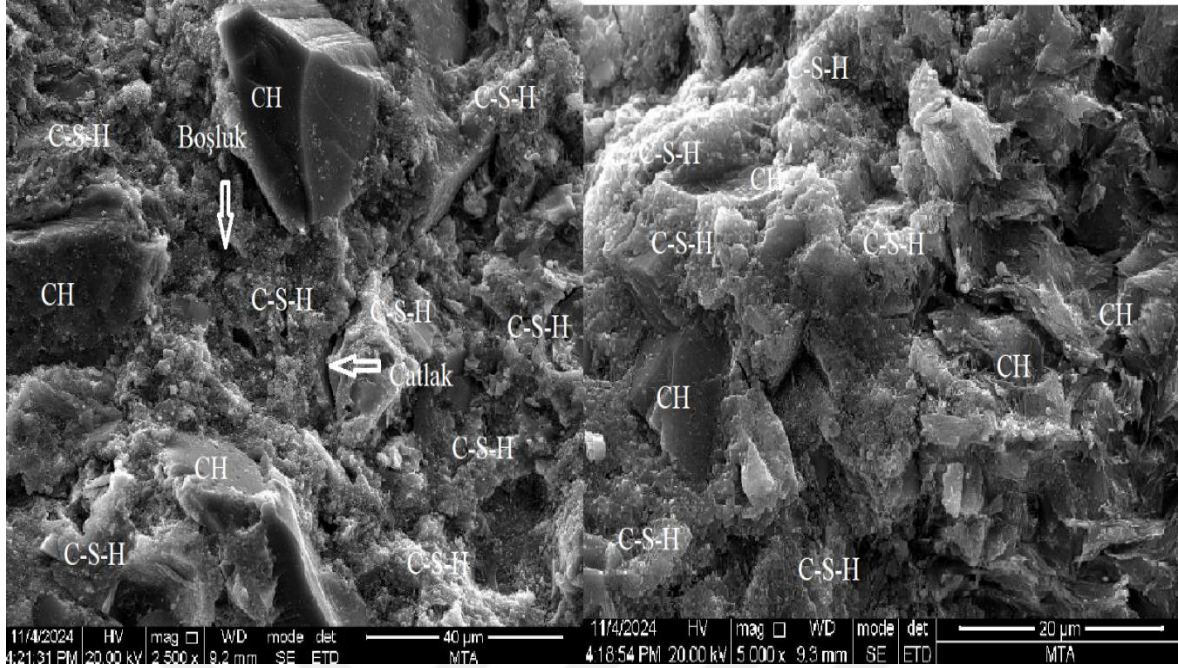
Karışım Kodu	Kür Süresi (Gün)	Kür Sıcaklığı (°C)	Oksit İçerikleri (%)					Basınç Dayanımı (MPa)	Si/Al Oranı	Ca/Si Oranı	S/B
			Na ₂ O	Al ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O	CaO				
GAÇ15 3G	3	21±5 (°C)	0,71	5,88	23,89	1,53	55,39	71,7	2,12	3,15	0,34
GAÇ15 28G	28		0,71	5,88	23,89	1,53	55,39	92,7	2,12	3,15	0,34
SP5 3G	3		0,19	3,82	17,05	0,95	62,34	49,3	2,38	5,14	0,39
SP5 28G	28		0,19	3,82	17,05	0,95	62,34	85,2	2,38	5,14	0,39
GAÇ15SP5 3G	3		0,7	5,70	23,94	1,48	53,43	60,1	2,23	3,21	0,37
GAÇ15SP5 28G	28		0,7	5,70	23,94	1,48	53,43	88,3	2,23	3,21	0,37
Kontrol 3G	3		0,2	4,0	17,0	1,0	64,3	54,4	2,21	5,40	0,37
Kontrol 28G	28		0,2	4,0	17,0	1,0	64,3	84,4	2,21	5,40	0,37



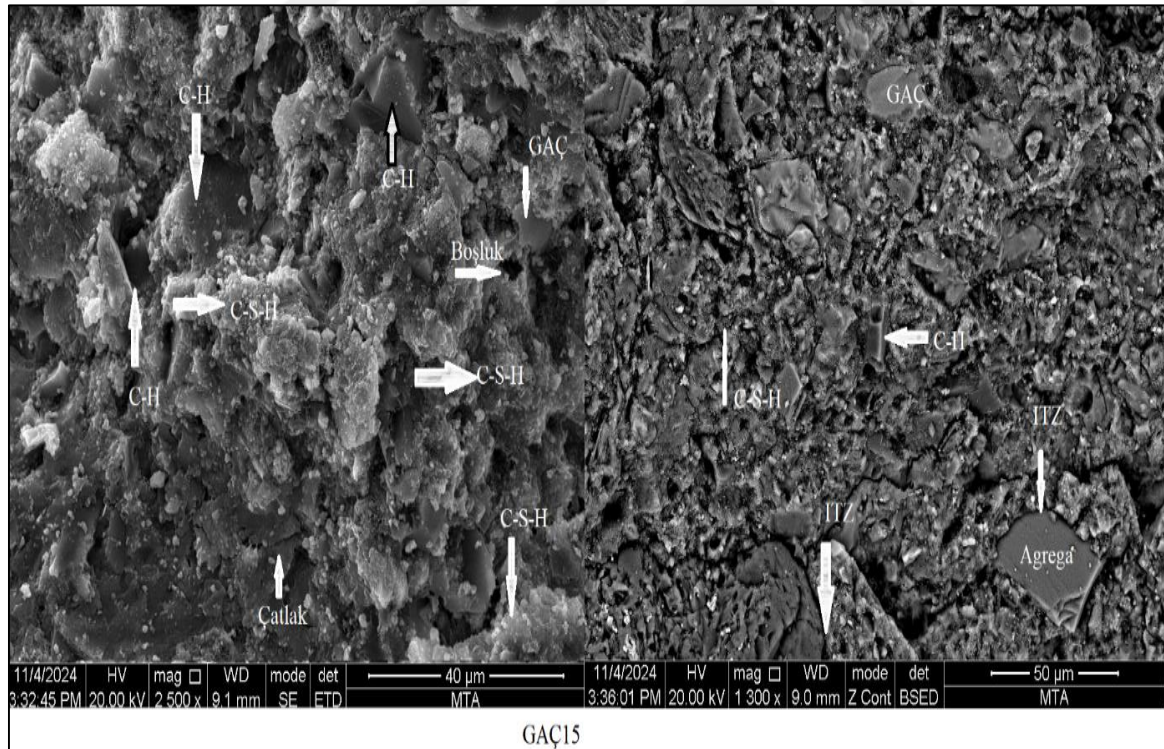
Resim 4.1. a)GAÇ15 ve b)SP5 3 günlük SEM görüntüsü



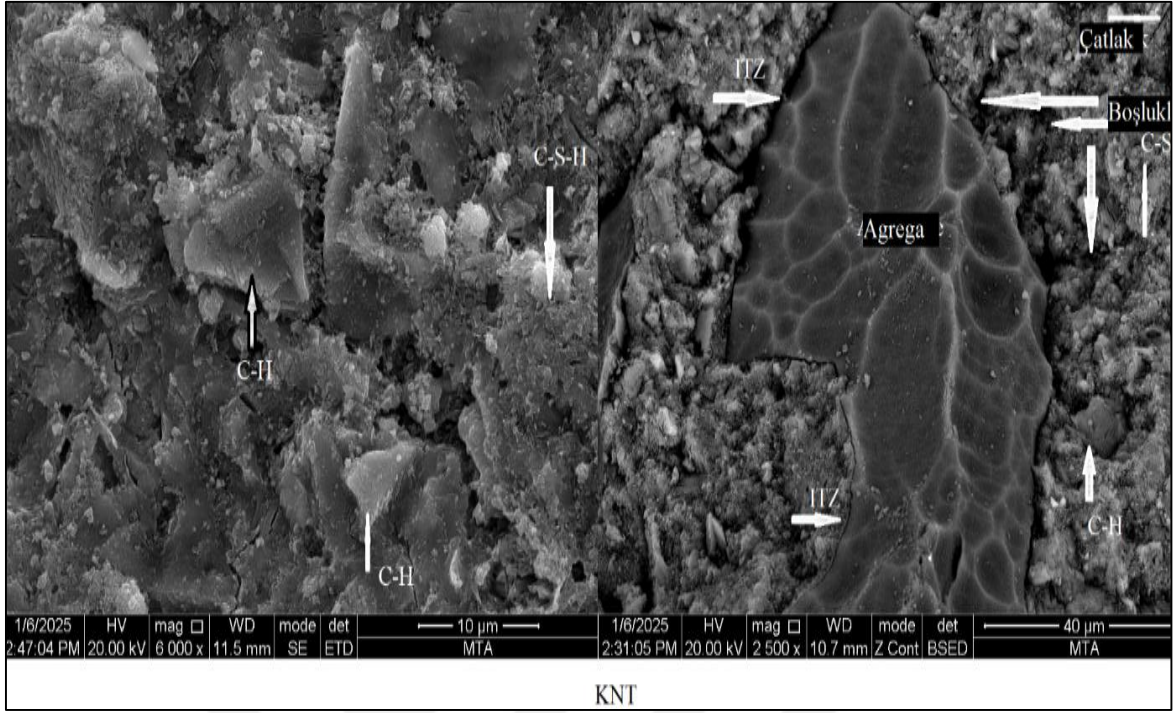
Resim 4.2. c)GAÇ15SP5 ve d)KNT 3 günlük SEM görüntüsü



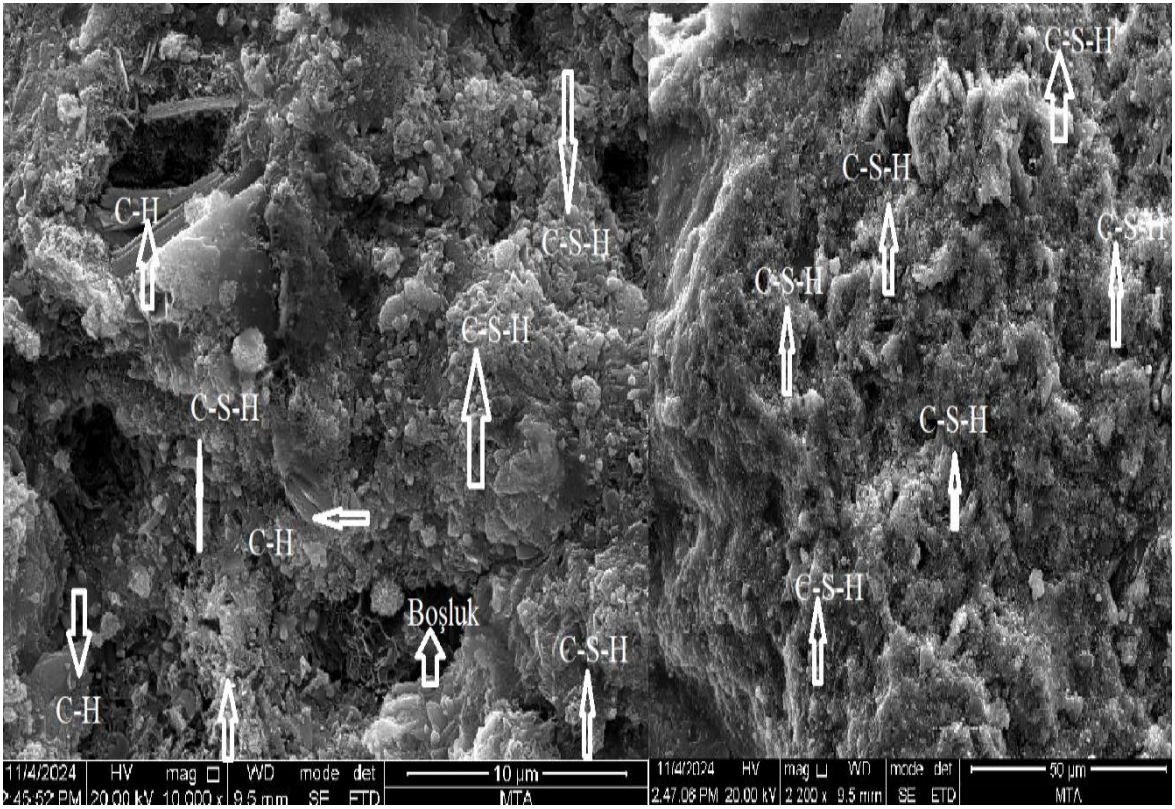
Resim 4.3. GAÇ15SP5 28 günlük SEM görüntüsü



Resim 4.4. GAÇ15 28 günlük SEM görüntüsü



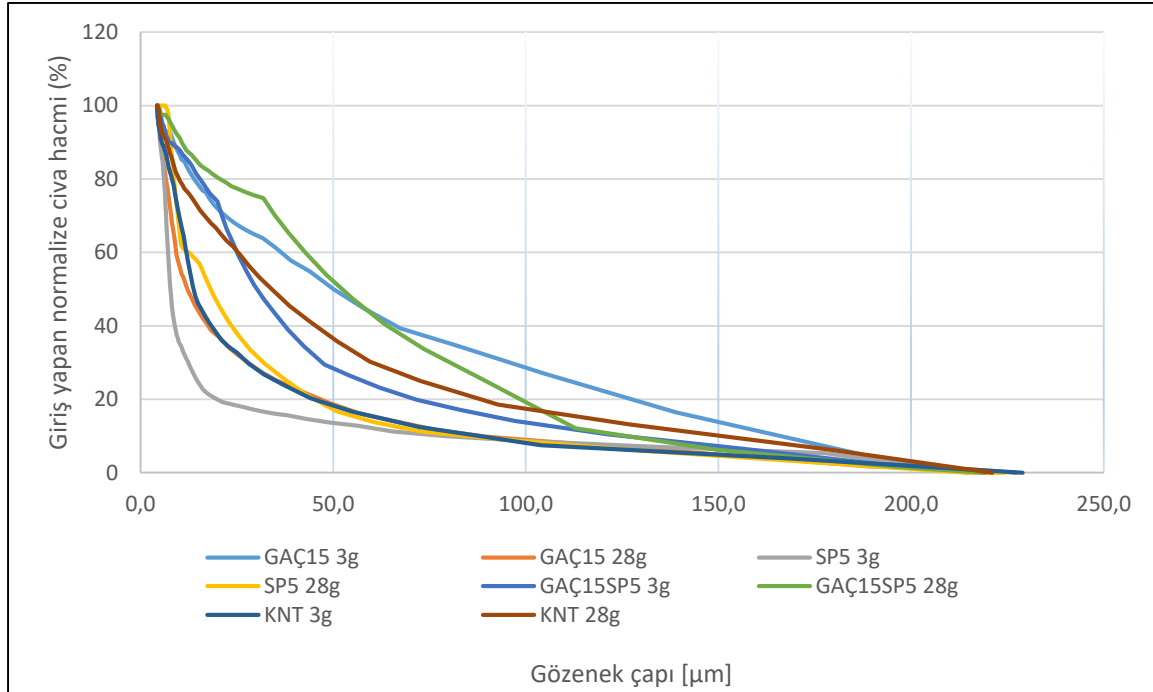
Resim 4.5. KNT 28 günlük SEM görüntüsü



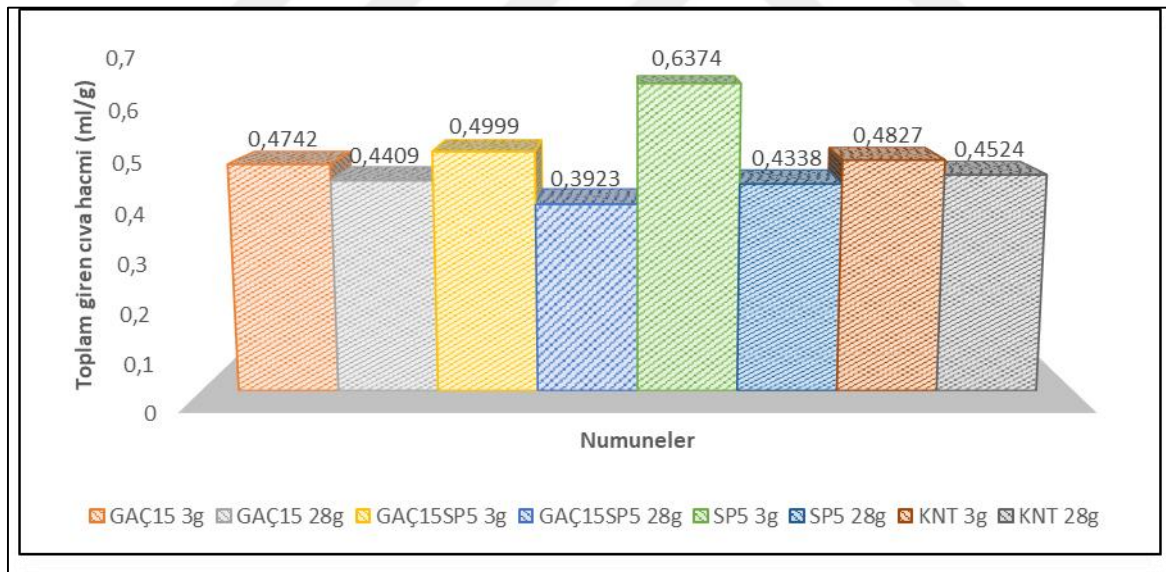
Resim 4.6. SP5 28 günlük SEM görüntüsü

4.7. Cıvalı Porozimetre Analizi Sonuçları

GAÇ15, GAÇ15SP5, SP5 ve KNT karışımlarının 3 ve 28 günlük örnekleri üzerinde yapılan cıvalı porozimetre yöntemiyle, toplam boşluk hacimleri ve boşluk çapları tespit edilerek karşılaştırılmıştır. Deney sonuçlarına göre, numunelere uygulanan cıva basıncı yükseldikçe, cıvanın erişebildiği boşlukların çapı küçülmüştür. Bu durum, artan basıncın öncelikle daha dar boşluklara nüfuz etmesinden kaynaklanmaktadır (agregalar arası, ara yüzey ve agrega içi boşluklar dahil). GAÇ15 3 günlük numunesi, Şekil 4.11 ve Çizelge 4.11.'e göre 4,292 μm ile 217,4 μm arasında değişen boşluk çaplarına sahiptir. Benzer şekilde, GAÇ15 28 günlük için bu aralık 4,298 μm ile 227,2 μm olarak tespit edilmiştir. GAÇ15SP5 3 günlük karışımın en büyük boşluk çapı 219,2 μm iken en küçük boşluk çapı 4,303 μm 'dir. GAÇ15SP5 28 günlük karışımın en büyük boşluk çapı 218,9 μm iken en küçük boşluk çapı 4,296 μm 'dir. SP5 3 günlük karışımın 4,271 μm ile 214,5 μm arasında değişen boşluk çaplarına sahiptir. Benzer şekilde, SP5 28 günlük serisi için bu aralık 4,309 μm ile 224,2 μm olarak tespit edilmiştir. KNT 3 günlük karışımın en büyük boşluk çapı 229,0 μm iken en küçük boşluk çapı 4,00 μm 'dir. KNT 28 günlük karışımın en büyük boşluk çapı 219,1 μm iken en küçük boşluk çapı 4,276 μm 'dir. Porozimetre prensibi gereği, numunelere uygulanan cıva basıncı arttıkça, yalnızca daha küçük çaptaki boşluklara giriş mümkün olmakta, bu da ölçülen boşluk çaplarının azalmasına neden olmaktadır. GAÇ15, GAÇ15SP5, SP5 ve KNT 3 günlük karışımlarına nüfuz eden cıva hacmi artarak devam etmiş ve sırasıyla 0,4742 ml/g, 0,4999 ml/g, 0,6374 ml/g ve 0,4827 ml/g değerinde sabit hale gelmiştir. GAÇ15, GAÇ15SP5, SP5 ve KNT 28 günlük karışımlarına nüfuz eden cıva hacmi artarak devam etmiş ve sırasıyla 0,4409 ml/g, 0,3923 ml/g, 0,4338 ml/g ve 0,4524 ml/g değerinde sabit hale gelmiştir.



Şekil 4.11. GAÇ15, GAÇ15SP5, SP5 ve KNT karışımlarının gözenek boyut dağılımı



Şekil 4.12. GAÇ15, GAÇ15SP5, SP5 ve KNT karışımlarının toplam giriş yapan cıva hacmi

Çizelge 4.9. GAÇ15, GAÇ15SP5, SP5 ve KNT karışımlarının 3 ve 28 günlük cıvalı porozimetre analiz verileri

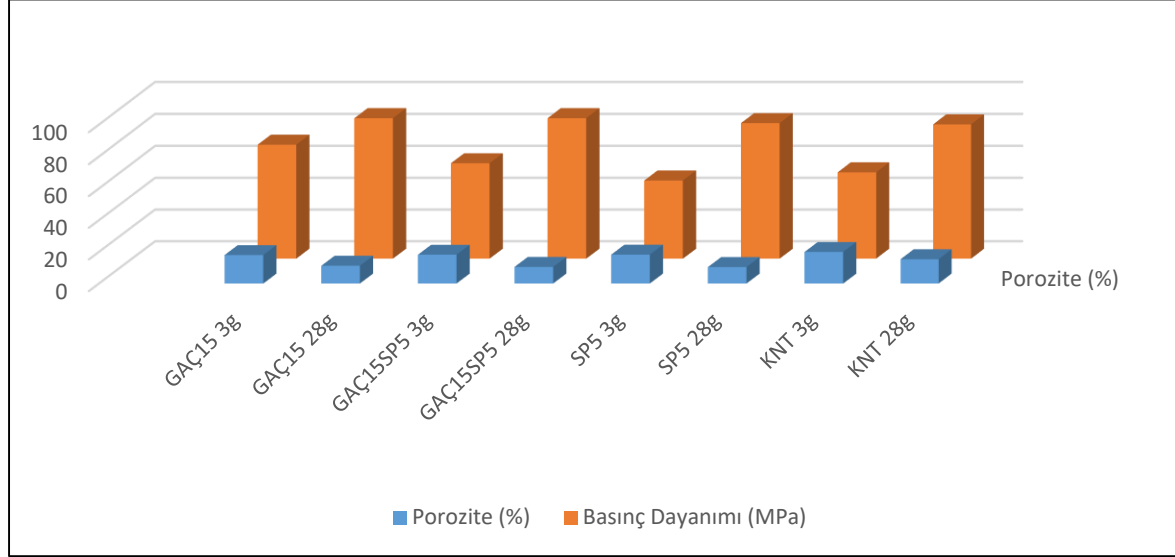
Karışım Kodu	Boşluk çapı (µm)		Cıva Sabiti (ml/g)	Porozite (%)	Gözenek Hacmi (ml/g)	Basınç Dayanımı (MPa)
	En büyük	En küçük				
GAÇ15 3g	217,4	4,292	0,4742	17,9636	0,2152	71,7
GAÇ15 28g	227,2	4,298	0,4409	11,2179	0,1814	92,7
GAÇ15SP5 3g	219,2	4,303	0,4999	18,1920	0,2387	60,1
GAÇ15SP5 28g	218,9	4,296	0,3923	10,4872	0,0658	88,3
SP5 3g	214,5	4,271	0,6374	18,2076	0,1038	49,3
SP5 28g	224,2	4,309	0,4338	10,3897	0,0532	85,2
KNT 3g	229,00	4,297	0,4827	19,9352	0,2949	54,4
KNT 28g	219,1	4,276	0,4524	15,3671	0,1967	84,4

Çizelge 4.11. ve Şekil 4.12. incelendiğinde GAÇ15 karışımının, 28 günlük kürlenmiş numune (GAÇ15 28g), 3 günlük kürlenmiş numuneye (GAÇ15 3g) göre daha düşük poroziteye, daha düşük gözenek hacmine ve çok daha yüksek basınç dayanımına sahiptir. Bu, kür süresinin mikro yapıyı iyileştirdiğini ve dayanımı artırdığını gösterir. En büyük ve en küçük boşluk çapları her iki kür süresinde de birbirine yakın değerlerdedir. Bu, boşluk boyut dağılımının kür süresinden çok etkilenmediği anlamına gelebilir, ancak toplam boşluk miktarı azalmıştır. GAÇ15SP5 karışımı Çizelge 4.9.'a göre incelendiğinde, 28 günlük kürlenmiş numune (GAÇ15SP5 28g), 3 günlük kürlenmiş numuneye (GAÇ15SP5 3g) göre çok daha düşük poroziteye, çok daha düşük gözenek hacmine ve çok daha yüksek basınç dayanımına sahiptir. SP5 katkısının kür süresiyle birlikte poroziteyi azaltmada ve dayanımı artırmada etkili olduğu görülmektedir. SP malzemesi GAÇ'ye göre daha ince taneli bir mineral katkı malzemesi olduğu için boşlukların daha iyi dolmasını sağlayarak iyi bir mikro yapı oluşturmaktadır. En büyük ve en küçük boşluk çapları her iki kür süresinde de GAÇ15 serisine benzer aralıktadır. SP5 karışımı Çizelge 4.9. ve Şekil 4.13.'e göre incelendiğinde, 28 günlük kürlenmiş numune (SP5 28g), 3 günlük kürlenmiş numuneye (SP5 3g) göre daha düşük poroziteye, daha düşük gözenek hacmine ve daha yüksek basınç dayanımına sahip olmuştur. Ancak, GAÇ15 serisine kıyasla genel olarak daha düşük porozite değerine sahip olmasına rağmen daha düşük dayanım değerleri dikkat çekicidir. Bu, SP5 karışımının GAÇ15 karışımına kıyasla daha az boşluklu bir yapı oluşturmasına rağmen GAÇ15'e göre

dayanımının düşük olmasının porozitenin tek başına dayanımı belirleyici bir faktör olmadığını, boşlukların boyutu, dağılımı ve bağlantılarının da önemli olduğunu göstermektedir. SP malzemesinin GAÇ'ye kıyasla daha ince taneli yapısı, harç veya beton içerisindeki boşlukların daha etkili bir şekilde doldurulmasına olanak tanır. Bu durum, daha yoğun ve kusursuz bir mikro yapının oluşmasını sağlayarak malzemenin genel kalitesini artırır. Ancak SP içeren karışımlar, GAÇ içeren karışımlardan daha fazla su/bağlayıcı (S/B) Malzeme miktarına sahip olduğu için dayanımı olumsuz yönde etkilemektedir. Çizelge 4.9. ve Şekil 4.13. incelendiğinde KNT karışımının, 28 günlük kürlenmiş numune (KNT 28g), 3 günlük kürlenmiş numuneye (KNT 3g) göre daha düşük poroziteye, daha düşük gözenek hacmine ve çok daha yüksek basınç dayanımına sahiptir. Bu, kür süresinin mikro yapıyı iyileştirdiğini ve dayanımı artırdığını gösterir. En büyük ve en küçük boşluk çapları her iki kür süresinde de birbirine yakın değerlerdedir. Bu, boşluk boyut dağılımının kür süresinden çok etkilenmediği anlamına gelebilir, ancak toplam boşluk miktarı azalmıştır.

Elde edilen cıvalı porozimetre sonuçları, çimentolu sistemlerde kullanılan farklı katkı malzemelerinin (sepiyolit ve granit atık çamuru) ve kür süresinin, numunelerin mikro yapısı (boşluk çapı, porozite, gözenek hacmi) ve mekanik dayanımı (basınç dayanımı) üzerinde önemli etkileri olduğunu göstermektedir. Tüm karışımlar incelendiğinde, 28 günlük kür süresinin 3 günlük kür süresine kıyasla basınç dayanımında belirgin bir artış sağladığı açıkça görülmektedir. Bu, çimento hidrasyonunun zamanla ilerleyerek daha yoğun ve güçlü bir mikro yapı oluşturmasının temel bir sonucudur. GAÇ içeren karışımlar, kür süresinden belirgin şekilde faydalanmaktadır. Porozite değerleri kontrol karışımına yakın seyretmekte, ancak dayanım değerleri 28 gün sonunda kontrol karışımından daha yüksek olabilmektedir. Bu, GAÇ'in çimento ile puzolanik bir reaksiyona girerek (zamanla) mikro yapıyı iyileştirebileceği ve dayanımı artırabileceği yönünde bir işaret olabilir [150]. İnce taneli yapısı nedeniyle sepiyolit katkısı, genel olarak porozite ve gözenek hacminde azalmaya eğilim göstermiştir. Bu durum, boşlukların daha iyi dolması ve daha yoğun bir mikro yapı oluşumu ile ilişkilendirilebilir. Ancak, bu mikro yapısal iyileşme her zaman orantılı bir dayanım artışı sağlamayabilir. Tek başına sepiyolit bağlayıcılı numuneler (SP5), kontrol karışımına kıyasla farklı bir boşluk yapısı sergilemekte ve benzer dayanım değerlerine ulaşabilmektedir. Bu, sepiyolit'in çimento ile etkileşimi ve bağlayıcılık özelliklerinin farklı olabileceğini düşündürmektedir. Mineral katkısız kontrol karışımı, temel çimento hidrasyonunun etkisini net bir şekilde göstermektedir. 28 günlük dayanımı, bazı katkılı karışımlara yakın olması, kullanılan çimentonun kalitesini yansıtmaktadır. Ancak, katkı

içeren karışımların bazılarında daha düşük porozite elde edilmesi, katkıların boşluk yapısını iyileştirme potansiyelini ortaya koymaktadır.

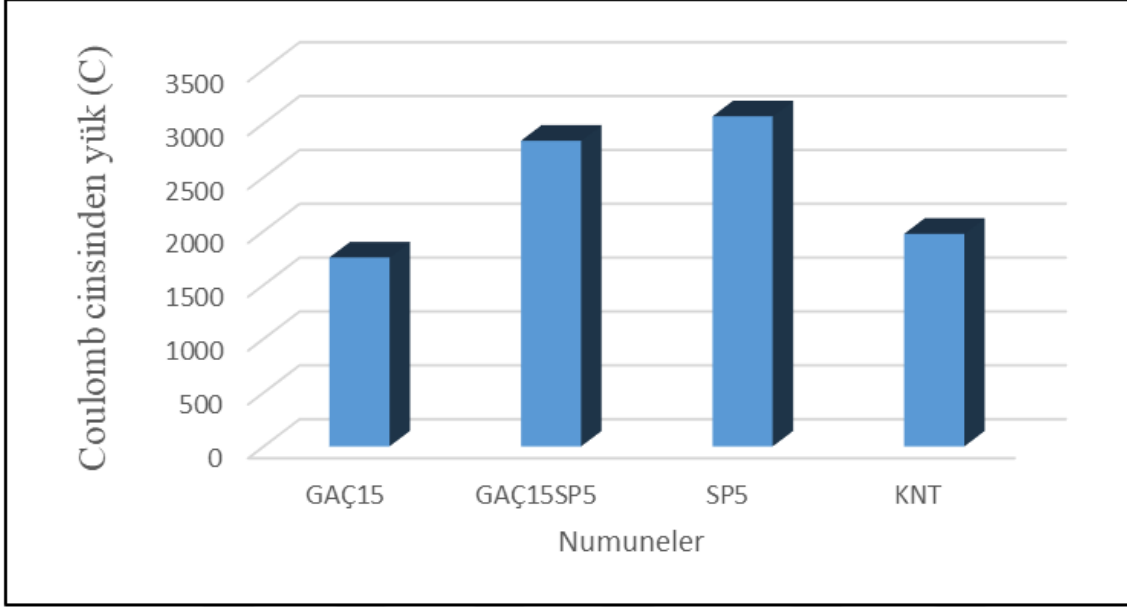


Şekil 4.13. GAÇ15, GAÇ15SP5, SP5 ve KNT karışımlarının 3 ve 28 günlük porozite ve basınç değerleri

4.8. Klorür Geçirgenliği Deney Sonuçları

ASTM C1202 [128]'ye göre, GAÇ15SP5, GAÇ15, SP5 ve KNT karışımlarının klorür transferine karşı direnç üzerindeki etkisini belirlemek amacıyla, tüm karışımlarda 28 günlük yaşlarda klorür penetrasyon testi yapılmıştır. Şekil 4.14., KYH karışımlarının klorür penetrasyonuna karşı direncini göstermektedir. Elde edilen sonuçlara göre sepiyolit varlığının, sepiyolit içermeyen diğer örneklere kıyasla, klorür iyonlarının malzeme içine daha kolay ve daha fazla nüfuz etmesine neden olduğu yani klorür iyonlarına karşı daha düşük bir direnç göstermiş olduğudur. Yapılan çalışmalarda, sepiyolit katkılı numunelerin, sepiyolit içermeyen örneklere kıyasla daha yüksek bir klorür penetrasyonu karşılaştığı göstermektedir [151-154]. GAÇ, KNT numunesine kıyasla daha düşük bir klorür penetrasyonu gösterdiği bu da basınç dayanımı yüksek olan betonların klorür geçirgenliği daha düşük olduğunun bir göstergesidir. Vijayalakshmi ve Sekar (2013) yaptıkları çalışmada, granit atığının %15'e kadar klorür penetrasyon değerlerinin kontrol numunesinin penetrasyon değerine eşdeğer olduğu, ancak granit atığının karışımlarda çimento yerine %20 ve %25'lere kadar kullanıldığında en yüksek geçirgenlik değerini gösterdiğini ve geçen toplam yükün 1500 Coulomb'un üzerinde olduğunu ifade etmişlerdir [36]. Çimento hamurunda granit atığının yeterli şekilde doldurulması ve granit atığı ile çimento hamuru

arasındaki sıkı mekanik etkileşimler, daha yoğun bir harç mikro yapısına katkıda bulunduğunu ve taze harçtaki geçirgenlik katsayısı ve zararlı gözeneklerin azaldığını ortaya koymuşlardır [150]. Granit atığının harcın işlenebilirliği artırdığı ve betonun mekanik mukavemeti ve geçirgenliği iyileştirdiğine ait birçok çalışma yapılmıştır [28, 35, 155, 156].

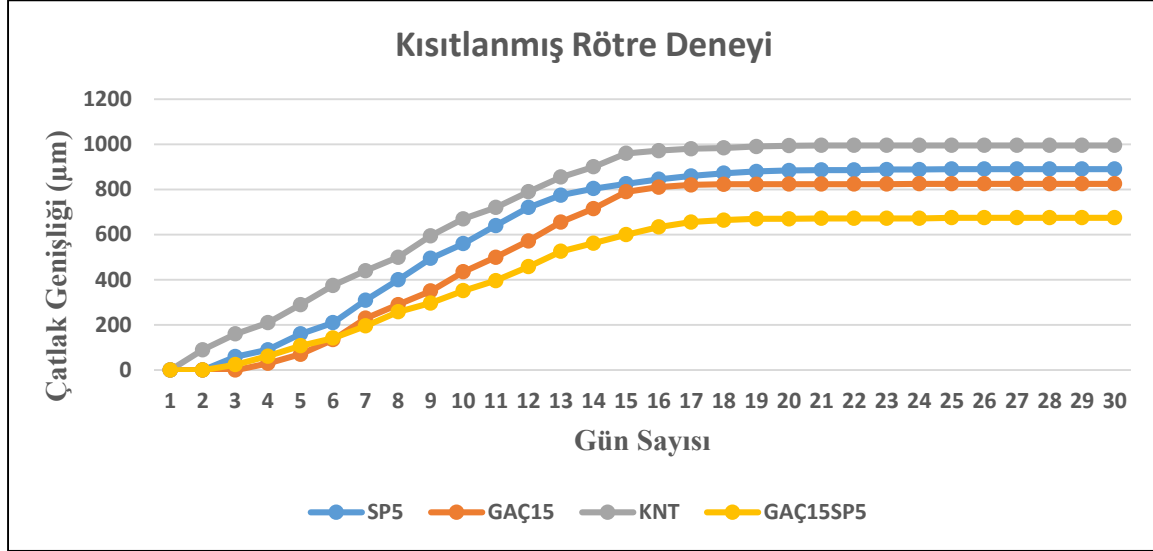


Şekil 4.14. Klor geçirgenliği deney verileri

Sonuç olarak, GAÇ15 kullanılması, harcın klor iyonu geçirgenliğini azaltarak performansını iyileştirmiştir. Granit atık çamuru, genellikle çok ince parçacıklardan oluşur ve harç matrisindeki boşlukları doldurarak daha yoğun bir yapı oluşturabilir. Bu durum, klor iyonlarının geçişini zorlaştırır ve donatı korozyonu riskini düşürür. Bu, granit atığının çevresel ve ekonomik faydalarının yanı sıra betonun dayanıklılığını artırma potansiyelini de gösterir. Hem GAÇ15SP5 hem de SP5 numuneleri, oldukça yüksek 28 günlük basınç dayanımlarına ulaşmalarına rağmen, orta seviyede klorür geçirgenliği değerleri sergilemektedir. Bu durum, sepiyolit varlığının, malzemenin mekanik özelliklerini olumsuz etkilemese bile, klorür iyonlarının içeriye nüfuz etmesine karşı direnci önemli ölçüde azalttığını açıkça göstermektedir. Bu yüksek geçirgenlik, sepiyolit kendine has mikroyapısı, su tutma kapasitesindeki farklılıklar veya diğer bileşenlerle olan etkileşimleri sonucu oluşan daha geçirgen bir gözenek ağı veya potansiyel mikro çatlaklarla ilişkilendirilebilir.

4.9. Kısıtlanmış Rötire Deneyi Sonuçları

GAÇ15SP5, GAÇ15, KNT ve SP5 numuneleri üzerinde 30 gün süre ile kısıtlanmış rötire deneyi yapılmıştır. Bu süre boyunca numuneler üzerinde oluşan çatlak genişlikleri ölçülmüş olup sonuçlar Şekil 4.15.'te verilmiştir.



Şekil 4.15. Kısıtlanmış rötire deney sonuçları

Şekil 4.15 incelendiğinde, GAÇ15 karışımı numunelerde ilk çatlak oluşumu 4 gün sonra gözlemlenmiştir. Çatlak oluşmaya başladıktan sonra 16. güne kadar genişlemeye devam etmiş ve bu süre zarfında 810 µm genişliğe ulaşılmıştır. 30. günün sonunda toplamda 825 µm'lik bir genişleme elde edilmiştir. SP5 karışımı numunelerde çatlak genişliği 19. günde 880 µm gibi önemli bir genişliğe ulaştığı ve sonrasında bu genişleme hızının azaldığı görülmüştür.

GAÇ15SP5 karışıma sahip numunelerde, kısıtlanmış rötire deneyi sırasında çatlak oluşumu 3. günden sonra gözlemlenmiştir. Şekil 4.15.'e göre çatlak oluşumu 17. günde 655 µm genişliğe ulaşmıştır. Bu aşamadan sonra çatlağın genişleme hızı yavaşlamış ve 30. gününde çatlağın genişliği 675 µm'ye ulaşmıştır.

Şekil 4.15 incelendiğinde, KNT karışımı numunelerde çatlağın, 24 saat sonra başladığı görülmüştür. Çatlak oluşumu 17. günün sonunda 980 µm kadar genişleme görülmüş, bu süreden sonra genişleme hızı yavaşlamış hatta zaman zaman duraksamalar ve tekrar

genişlemeler gözlemlenmiştir. Deneyin son 13 günlük bölümünde ise sadece 15 µm'lik bir genişleme olmuş, bu da çatlağın neredeyse sabitlendiğini göstermiştir ve deney bu noktada sonlandırılmıştır.

Yapılan kısıtlanmış rötre deneyi sonucunda elde edilen çatlak genişliği değerlerinin zamanla nasıl değiştiğini Şekil 4.15.'te gösterilmiştir. Deneye, harç numunelerini kurumaya bıraktıktan ve dökümden bir gün sonra etrafındaki dış halkayı çıkardıktan sonra başlandı. Harç çatladığı anda gerinimde ani bir değişiklik oluşmuştur. Hu ve diğerleri (2017) yaptıkları çalışmada, çatlak oluşuktan sonra ise harcın geriniminin olmadığını gözlemlemişlerdir. Bu da çatlakların oluşmasıyla harcın daha fazla çekmesinin engellendiği anlamına geldiğini ifade etmişlerdir [157].

Şekil 4.15. incelendiğinde, deneyin ilk 4 gün içerisinde bütün numunelerde çatlakların ortaya çıktığı görülmüştür. Ancak, GAÇ ve SP içeren karışımlarda çatlak oluşumu, kontrol harcına kıyasla daha geç bir zamanda gerçekleşmiştir. Deneyin sonuna gelindiğinde, 30 gün sonunda GAÇ ve SP içeren numunelerin, herhangi bir katkı maddesi içermeyen kontrol numunesine göre daha dar çatlaklar oluşturduğu tespit edilmiştir. Şekil 4.15 incelendiğinde en az çatlak genişliği GAÇ15SP5'te gözlemlenirken, en fazla çatlak genişliği mineral katkı içermeyen kontrol numunesinde tespit edilmiştir.

Duran-Herrera ve diğerleri (2019) ve Kou, S.C. and C.S. Poon (2009) yaptıkları çalışmada da harç/beton matrisine tamamlayıcı çimentolama malzemesiyle birlikte endüstriyel atıkların dahil edilmesiyle kısıtlanmış büzülme deformasyonunu daha az olduğunu bildirmişlerdir [158, 159]. Cheah ve diğerleri (2019) ve Guneyisi ve diğerleri(2010) tarafından yapılan çalışmalarda, çimento miktarının bir kısmının mineral katkı malzemeleriyle değiştirilmesinin, beton ve harçların büzülme miktarını azalttığını ortaya koymuştur. Ek çimentolu malzemelerin betonda oluşturduğu daha yoğun yapı, suyun buharlaşmasını zorlaştırarak büzülmeden kaynaklanan şekil değişikliklerinin daha iyi kontrol edildiği ifade edilmiştir [146, 160] .

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

Sürdürülebilir yapı malzemeleri arayışında, atık malzemelerin değerlendirilmesi önem kazanmaktadır. Bu bağlamda, çalışma kapsamında çimento matrisinde ikame malzemesi olarak kullanılan granit atık çamuru ve sepiyolit, kendiliğinden yerleşen harcın mühendislik davranışını nasıl etkilediğine dair elde edilen sonuçlar aşağıda detaylandırılmıştır.

- ✓ Kendiliğinden yerleşen harçlar işlenebilirliğini korurken, ince malzemenin yüzeyini saran su filmi için gerekli su/bağlayıcı oranı 0,33 ile 0,52 arasında değişmektedir. SP miktarı arttıkça su ihtiyacı artarken, GAÇ miktarının artması su ihtiyacını azaltmıştır.
- ✓ Kendiliğinden yerleşen harç bünyesinde mineral katkı olarak GAÇ kullanıldığında, en yüksek dayanım değerlerine GAÇ'ın %15 oranlarında çimentoya ikamesiyle elde edilmiştir. Granit atıklarının çimentoya göre daha küçük boyutlu olması, harcın içyapısında daha düzenli bir doluluk sağlamıştır. SP katkısının çimento yerine %5 oranında ikamesi nihai dayanımı artırırken, bu oranın üzerine çıkıldığında dayanım değerlerinde düşüş gözlemlenmiştir. Bu durum, sepiyolit optimum bir kullanım oranına sahip olduğunu ve %5 'in üzerinde kullanımının harcın mikro yapısında olumsuz değişikliklere yol açabileceğini göstermektedir.
- ✓ 28 günlük KYH numunelerinin eğilme dayanımı analizleri, GAÇ katkılı %5 ve %15'lik serilerin maksimum performansı gösterdiğini ortaya koymuştur. Buna karşın, %20 SP içeren karışım, incelenen tüm kür sürelerinde (3, 7 ve 28 gün) minimum eğilme dayanımına sahip olduğu bulunmuştur. Çalışma verileri, Sepiyolit %5 eşiğinin üzerinde kullanılmasının KYH'nin eğilme dayanımını azalttığını desteklemektedir.
- ✓ Hazırlanan KYH karışımlarının 28 günlük kür sonunda belirlenen kapiler su emme davranışları, kullanılan mineral katkı türüne göre farklılık göstermiştir. GAÇ ikamesi, özellikle %5, %10 ve %15 oranlarında kontrol numunesine kıyasla geçirimsizliğini düşürme eğilimi sergilemiştir. Ancak %20 GAÇ kullanımı bu olumlu etkiyi göstermemiştir. SP katkısı ise %5'ten itibaren geçirimsizliği artırmıştır. GAÇ ve SP'nin birlikte kullanıldığı karışımlarda; GAÇ15SP5 karışımı kontrol numunesiyle benzer

geçirimsizlik sunarken, GAÇ5SP5 ve GAÇ10SP5 karışımları geçirimsizliği azaltmış, diğer ikili karışımlarda ise artırmıştır.

- ✓ KYH karışımlarının 28 günlük kür sonrası toplam su emme ve porozite değerleri arasında önemli farklılıklar belirlenmiştir. GAÇ katkısı, kontrol numunesinin poroziteyi ve su emme özelliklerini iyileştirerek daha düşük değerlere ulaşılmasını sağlamıştır. Sepiyolit (SP) katkısı poroziteyi ve su emmeyi artırıcı bir etki göstermiştir.
- ✓ Yapılan analizler sonucunda, GAÇ15, GAÇ15SP5 ve SP5 karışımlarının, KNT karışımına göre daha yüksek dayanım gösterdiğini ortaya koymuştur. SEM mikroskop görüntüleri incelendiğinde, KNT numunesinde daha fazla boşluk olduğu görülmüş ve cıvalı porozimetre deney sonuçları da bu bulguyu desteklemiştir.
- ✓ Elde edilen cıvalı porozimetre sonuçları, çimentolu sistemlerde kullanılan farklı katkı malzemelerinin (sepiyolit ve granit atık çamuru) ve kür süresinin, numunelerin mikro yapısı (boşluk çapı, porozite, gözenek hacmi) ve mekanik dayanımı (basınç dayanımı) üzerinde önemli etkileri olduğunu göstermektedir.
- ✓ GAÇ15 karışımının kullanılması, harcın klor iyonu geçirgenliğini azaltarak performansını iyileştirmiştir. Hem GAÇ15SP5 karışımı hem de SP5 karışımı, oldukça yüksek 28 günlük basınç dayanımlarına ulaşmalarına rağmen, orta seviyede klorür geçirgenliği değerleri sergilemektedir. Bu durum, sepiyolit varlığının, malzemenin mekanik özelliklerini olumsuz etkilemese bile, klorür iyonlarının içeriye nüfuz etmesine karşı direnci önemli ölçüde azalttığını göstermektedir.
- ✓ Kısıtlanmış rötre deneyinde ilk 4 gün içerisinde bütün numunelerde çatlakların ortaya çıktığı görülmüştür. Ancak, GAÇ ve SP içeren karışımlarda çatlak oluşumu, kontrol harcına kıyasla daha geç bir zamanda gerçekleşmiştir. 30 gün sonunda GAÇ ve SP içeren karışımların, herhangi bir katkı maddesi içermeyen kontrol karışımına göre daha dar çatlaklar oluşturduğu tespit edilmiştir.
- ✓ Çalışma kapsamında yapılan tüm deney sonuçları değerlendirildiğinde Kırşehir Granitaş işletmesinden elde edilen GAÇ malzemesi, harçların taze ve sertleşmiş özelliklerindeki performansını iyileştirdiği göz önüne alınarak, %15'e kadar olan oranlarda harç bünyesinde mineral bir katkı olarak kullanımına uygun olduğunu söyleyebiliriz. Eskişehir Akmin Mineral ve Madencilik işletmesine ait SP'nin harçta mineral katkı olarak kullanımı, düşük ikame oranları (%5) için daha uygun görülmüştür.

5.2. Öneriler

Mevcut bilgiler ışığında, KYH'larda granit atık çamuru ve sepiyolit kullanımıyla ilgili daha fazla araştırma yapılmasına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu eksikliği gidermek üzere gelecekteki araştırmalar için çeşitli öneriler aşağıda sıralanmıştır:

- GAÇ'nin sadece çimento yerine değil, agrega yerine veya hem agrega hem de çimento yerine farklı oranlarda kullanıldığında KYH'larda veya betonda daha iyi dayanım sonuçları elde edileceği düşünülmektedir.
- Özellikle soğuk iklim koşullarında kullanılacak harçlar için donma-çözülme etkilerine karşı dayanımını belirlemek için GAÇ ve SP'de en yüksek dayanımı veren karışımlar üzerinde Donma-Çözülme Dayanımı Deneyi (ASTM C666) uygulanabilir. Ayrıca harcın asidik, sülfatlı veya diğer agresif ortamlara karşı dayanımını değerlendirmek için uygun çözeltilere daldırma deneyleri (ASTM C267) yapılabilir.
- Termal Analizler (TGA/DTG - Thermogravimetric Analysis/Derivative Thermogravimetry ve DSC - Differential Scanning Calorimetry) yapılarak harçtaki farklı fazların termal davranışlarını inceleyerek hidrasyon ürünlerinin miktarını ve ayrışma sıcaklıklarını belirlenmesine yardımcı olur. Ayrıca Su kaybı, kalsiyum hidroksit (CH) ayrışması ve karbonatlaşma gibi olaylar hakkında bilgi sağlayabilir.



KAYNAKLAR

1. Tekin, İ., Bolat H., Subaşı S. (2011). Çimentolu sistemlerde porozite analizi. *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 7(2), 31-39.
2. Ozawa, K. (1989). *High performance concrete based on the durability design of concrete structures*. in The Second East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering & Construction, 11-13.
3. Hossain, K., M. Lachemi. (2010). Fresh, mechanical, and durability characteristics of self-consolidating concrete incorporating volcanic ash. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 22(7), 651-657.
4. Haddadou, N. R., Chaid, Y. (2015). Ghernouti. Experimental study on steel fibre reinforced self-compacting concrete incorporating high volume of marble powder. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 19(1), 48-64.
5. Sharma, R., Khan, R.A. (2017). Sustainable use of copper slag in self compacting concrete containing supplementary cementitious materials. *Journal of cleaner production*, 151 179-192.
6. Okamura, H., Ouchi. M. (2003). Self-compacting concrete. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 1(1), 5-15,
7. Boukhelkhal, A., Azzouz, L., Kenai, S., Kadri E.H. (2019). Combined effects of mineral additions and curing conditions on strength and durability of self-compacting mortars exposed to aggressive solutions in the natural hot-dry climate in North African desert region. *Construction and Building Materials*, 197, 307-318.
8. Ishaq, M.S., Hussain, M.M., Afridi, M.S., Ali, G., Khattak ,M., (2014). In vitro phytochemical, antibacterial, and antifungal activities of leaf, stem, and root extracts of *Adiantum capillus veneris*. *The Scientific World Journal*, 2014(1), 269793.
9. Gautam, L., Jain, J.K., Jain, A., Kalla, P. (2022). Valorization of bone-china ceramic powder waste along with granite waste in self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 315, 125730.
10. Nagaratnam, B.H., Mannan, M.A., Rahman, M.E., Mirasa, A.K., Richardson, A., Nabinejad, O. (2019). Strength and microstructural characteristics of palm oil fuel ash and fly ash as binary and ternary blends in Self-Compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 202, 103-120.
11. El-Dieb, A.S. (2009). Mechanical, durability and microstructural characteristics of ultra-high-strength self-compacting concrete incorporating steel fibers. *Materials & Design*, 30(10), 4286-4292.
12. Ghorbani, S., Sharifi, S., Rokhsarpour, H., Shoja, S., Gholizadeh, M. (2020). Effect of magnetized mixing water on the fresh and hardened state properties of steel fibre reinforced self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 248, 118660.

13. Şahmaran, M., Christianto, H.A., Yaman, İ.Ö. (2006). The effect of chemical admixtures and mineral additives on the properties of self-compacting mortars. *Cement and Concrete Composites*, 28(5), 432-440,
14. Gomes, M.L.P., Carvalho, E.A.S., Vieira, F.M.C., Colorado A.H., Demartini, J.C.T. (2021). Mechanical and physical investigation of an artificial stone produced with granite residue and epoxy resin. *Journal of Composite Materials*, 55(9), 1247-1254.
15. Jin, J. (2002). *Properties of mortar for self-compacting concrete*. Doctoral thesis , University of London, 7-23.
16. Mardani-Aghabaglou, A., Sezer, G.I., Ramyar, K. (2014). Comparison of fly ash, silica fume and metakaolin from mechanical properties and durability performance of mortar mixtures view point. *Construction and Building Materials*, 70, 17-25.
17. Mohamed, O.A., Najm. O.F. (2017). Compressive strength and stability of sustainable self-consolidating concrete containing fly ash, silica fume, and GGBS. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 11, 406-411.
18. Li, L.G., Pui-Lam, N.G., Huang, Z.H., Jiang, Z.H.U. (2017). Effects of Micro-silica and Nano-silica on Fresh Properties of Mortar. *Materials Science*. 23(4), 362-371.
19. Kavas, T., Sabah, E. Çelik. M. (2004). Structural properties of sepiolite-reinforced cement composite. *Cement and Concrete Research*. 34(11), 2135-2139.
20. Taji, I., Ghorbani. S., De Brito. J., Tam. V.W.Y. (2019). Application of statistical analysis to evaluate the corrosion resistance of steel rebars embedded in concrete with marble and granite waste dust. *Journal of Cleaner Production*. 210, 837-846.
21. Aarthi, K., Arunachalam. K. (2018). Durability studies on fibre reinforced self compacting concrete with sustainable wastes. *Journal of Cleaner Production*. 174 247-255.
22. Choudhary, R., Gupta, R. Nagar. R. (2020). Impact on fresh, mechanical, and microstructural properties of high strength self-compacting concrete by marble cutting slurry waste, fly ash, and silica fume. *Construction and Building Materials*. 239, 117888,
23. Ostrowski, K., Stefaniuk, D., Sadowski, L., Gicala, M., Rozanska, M. (2020). Potential use of granite waste sourced from rock processing for the application as coarse aggregate in high-performance self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*. 238, 117794,
24. Singh, S., Nagar, R. V. (2016). Agrawal. Performance of granite cutting waste concrete under adverse exposure conditions. *Journal of Cleaner Production*. 127 172-182.
25. Rai. B., Kumar. S., Satish. K. (2016). Effect of Quarry Waste on Self-Compacting Concrete Containing Binary Cementitious Blends of Fly Ash and Cement. *Advances in Materials Science and Engineering*, 7, 1-11.

26. Binici, H., Shah, T., Aksogan, O., Kaplan, H. (2008). Durability of concrete made with granite and marble as recycle aggregates. *Journal of Materials Processing Technology*. 208(1-3), 299-308,
27. Ferraira, H.S., Neves, G.A., Lira, H.L., Ferreira, C.H. (2005). Use of granite sawing wastes in the production of ceramic bricks and tiles. *Journal of the European Ceramic Society*. 25(7), 1149-1158.
28. Mashaly, A.O., Shalaby, B.N. Rashwan. M.A. (2018). Performance of mortar and concrete incorporating granite sludge as cement replacement. *Construction and Building Materials*. 169, 800-818.
29. Chen, J., Chen J.J., Li B.H., Kwan A.K.H. (2020). Adding granite polishing waste as sand replacement to improve packing density, rheology, strength and impermeability of mortar. *Powder Technology*. 364, 404-415.
30. Singh, S., Khan, S., Khandelwal, R., Chugh, A. (2016). Performance of sustainable concrete containing granite cutting waste. *Journal of Cleaner Production*. 119, 86-98.
31. Sadek, D.M., El-Attar, M.M., Ali. H.A. (2016). Reusing of marble and granite powders in self-compacting concrete for sustainable development. *Journal of Cleaner Production*. 121, 19-32.
32. Thomas, F.K., Partheeban. P. (2010). Study on the effect of granite powder on concrete properties. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Construction Materials*. 163(2), 63-70.
33. Karmegam, A., A. Kalidass, D. (2014). Uporaba granitne prašine u samozbijajućem betonu. *Građevinar*. 66(11.), 997-1006.
34. Ghannam, S., Najm, R. (2016). Vasconez. Experimental study of concrete made with granite and iron powders as partial replacement of sand. *Sustainable Materials and Technologies*. 9, 1-9.
35. Ghorbani, S., Taji, I., De Brito, J., Negahban, M., Ghorbani, S., Tavakkolizadeh, M., Davoodi, A. (2019). Mechanical and durability behaviour of concrete with granite waste dust as partial cement replacement under adverse exposure conditions. *Construction and Building Materials*, 194, 143-152.
36. Vijayalakshmi, M. Sekar, A. (2013). Strength and durability properties of concrete made with granite industry waste. *Construction and Building Materials*. 46 1-7.
37. Ghorbani, S., Taji, I., Tavakkolizadeh, M., Davodi, A., (2018). Improving corrosion resistance of steel rebars in concrete with marble and granite waste dust as partial cement replacement. *Construction and Building Materials*, 185, 110-119.
38. Singh, S., Nande, N., Bansal, P., Nagar, R. (2017). Experimental investigation of sustainable concrete made with granite industry by-product. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29(6), 04017017.

39. Jain, A., Gupta, R. Chaudhary, S. (2020). Sustainable development of self-compacting concrete by using granite waste and fly ash. *Construction and Building Materials*, 262 120516,
40. Chen, Z., Li, J.S. Poon, C.S. (2018). Combined use of sewage sludge ash and recycled glass cullet for the production of concrete blocks. *Journal of Cleaner Production*. 171 1447-1459.
41. Mehrinejad Khotbehsara, M., Mohseni, E., Ozbakkaloglu, T., Ranjbar, M. M. (2017). Retracted: durability characteristics of self-compacting concrete incorporating pumice and metakaolin. *Journal of materials in civil engineering*, 29(11), 04017218.
42. Elsen, J. (2006). Microscopy of historic mortars—a review. *Cement and Concrete Research*. 36(8), 1416-1424,
43. Bingham, E.C., Reiner. M. (1933). The Rheological Properties of Cement and Cement-Mortar-Stone. *Physics*. 4(3), 88-96.
44. Gümüşsoy, M., (2019). *Geri dönüştürülmüş agregaların harç özelliklerine etkisi*. Yüksek Lisans Tezi Bartın Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 79.
45. Uğur, T. Güleç, A. (2016). Harç, sıva ve diğer kompozit malzemelerde kullanılan bağlayıcılar ve özellikleri. *Restorasyon ve Konservasyon Çalışmaları Dergisi*. (17), 77-91.
46. Aruntaş, H.Y., Şahinöz. M. (2021). Çimento hamur ve harçlarında kireç kullanımının incelenmesi. *Politeknik Dergisi*, 1-1.
47. Ashurst, J. (1983). Mortars, plasters and renders in conservation. *Ecclesiastical Architects' and Surveyors' Association*, 54.
48. Balksten, K., (2007). *Traditional lime mortar and plaster: reconstruction with emphasis on durability*. Ph. D. Thesis.Chalmers Tekniska Högskola, 52.
49. Uğur, T., Güleç, A. (2014). Harç, sıva ve diğer kompozit malzemelerde kullanılan bağlayıcılar ve özellikleri. *Restorasyon ve Konservasyon Çalışmaları Dergisi*. (17), 77-91.
50. Kozlu, H.H. (2010). *Kayseri yöresindeki tarihi harçların karakterizasyonu ve onarım harçlarının özellikleri*. Doktora Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 121.
51. Akman, M.S. (2003). Yapı malzemelerinin tarihsel gelişimi. *Türkiye Mühendislik Haberleri*, 426.
52. Yöney, N. (2010). 19. Yüzyılın Sonu ve 20. Yüzyılın Başında İstanbul'da Yapı Dış Cephelelerinde Kullanılan Yapay Taşların Mimari Değerlendirmesi - 4 Yapay Taşların Karakterizasyonu. *Dergi Park*, 5,78-92.
53. Güleç, A. (1992). *Bazı tarihi anıt harç ve sıvalarının incelenmesi*. Doktora Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 153.

54. Ekşi Akbulut, D. (2006). *Tarihi yapıların onarımında kullanılacak harçların seçimine yönelik bir öneri*. Doktora Tezi. Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 195.
55. Baradan, B. Aydın, S. (2013). *Betonun Durabilitesi (Dayanıklılık, Kalıcılık)*. Beton 2013 Hazır Beton Kongresi. 265-288.
56. Enstitüsü, TS EN 197-1 (2002). Çimento-Bölüm 1: Genel çimentolar-Bileşim, özellikler ve uygunluk kriterleri. TSE, Ankara. 3.
57. İstanbulluoğlu, S., (1988). Betonun Basınç Dayanımını Etkileyen Faktörler ve Ramble Betonunun Seçimi ile İlgili Bir Çalışma, *Bilimsel Madencilik Dergisi*, 27(3), 19-31
58. Baradan, B. Yazıcı, H. Aydın. S., (2012). *Beton*, (3 Baskı) İzmir: Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları, 12.
59. Sefidehkan, H.P., Şimşek, O. (2018). Farklı oranlarda geri dönüşüm agregası kullanılarak üretilen betonun bazı mühendislik özelliklerinin araştırılması. *Politeknik Dergisi*. 21(1), 83-91.
60. Topçu, İ.B., Canbaz, M. Karakurt, C. (2006). Beton üretiminde kimyasal katkı kullanımı. *Politeknik Dergisi*. 9(1), 59-63,
61. [61] Küçük, B. (2011). Betonun dayanım ve durabilitesini sağlayan parametreler. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*. 6(1), 79-85.
62. Troxell, G.E., Davis, H.E., Kelly. J.W. (1968). *Composition and properties of concrete*. (2 Baskı) New York: McGraw-Hill, 529.
63. Popovics, S. (1998). *Strength and related properties of concrete: a quantitative approach*. (Second Edition). New York: John Wiley & Sons, 122.
64. Powers, T.C. (1958). *The physical structure and engineering properties of concrete*, (Second Edition). New York: Portland Cement Association, 27.
65. Neville, A.M. (1963). *Properties of concrete*. (in The Second Edition). India: Pearson Education, 52.
66. Marshall, A. (1972). The thermal properties of concrete. *Building Science*. 7(3), 167-174,
67. Özden, A.V., (2010). *Betonun basınç ve çekme dayanımı ile elastisite modülü arasındaki ilişkiler üzerine bir araştırma*. Yüksek Lisan Tezi. Namık Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 74.
68. Surahyo, A. (2019). Concrete Construction: Practical Problems and Solutions. *Concrete Construction*, 61-88,
69. Glocker, E.F. (1847). *Generum et specierum mineralium, secundum ordines naturales digestorum, synopsis*. (Second Edition). Anton: Apud, 349.
70. Alvarez, A. (1913). Sepiolite: Properties and Uses. *Developments in Sedimentology*, 37, 253-287.

71. Bergaya, F., Lagaly, G. Beneke, K. (2006). History of clay science: a young discipline. *Developments in Clay Science*. 1, 1163-1181.
72. Alvarez, A., (1984). Sepiolite: properties and uses, in *Developments in sedimentology. Elsevier*, 253-287.
73. Çağlar, U. (2019). *Sepiyolit'in yaş öğütme ve asit liçi yöntemleriyle zenginleştirilmesi ve reolojik davranışının modellenmesi*, Doktora Tezi. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü. 117.
74. Burçak, E. Yalçın, S. (2016). Sepiyolit'in özellikleri ve hayvan beslemede kullanılması. *Lalahan Hayvancılık Araştırma Enstitüsü Dergisi*. 56, 78-86.
75. Sabah, E. Çelik, M. (1999). *Sepiyolit: özellikleri ve kullanım alanları*. Conference: 3. Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu. 14-15.
76. Devlet Planlama Teşkilatı (1996). *VII. Beş Yıllık Kalkınma, DPT*. Ankara: 80.
77. Rodriguez. M.V., Gonzalez. D.L., Munoz, M.B. (1994). Acid activation of a Spanish sepiolite: physico-chemical characterization, free silica content and surface area of products obtained. *Clay Minerals*. 29(3), 361-367.
78. Baykara, T., Göktaş, A. (1987). *Sepiyolit: Seramik malzeme olarak sinterleme davranımı ve fiziksel özellikleri*, III. Ulusal kil sempozyumu, Ankara, 167
79. Singh, S., Nagar, R., Agrawal, V., Rana, A., Tiwari, A. (2016). Sustainable utilization of granite cutting waste in high strength concrete. *Journal of Cleaner Production*, 116, 223-235.
80. Lasheen, E.S.R., Rashwan, M.A. Azer, M.K. (2023). Effect of mineralogical variations on physico-mechanical and thermal properties of granitic rocks. *Scientific Reports*. 13(1), 10320.
81. Adebayo, B., Arogundade, O. (2014). Physico-Chemical Properties of Granite Waste Material as Floor Tiles at Low Temperature. *The Journal of Solid Waste Technology and Management*, 39(4), 275-282.
82. Alhaji, M. M., Alhassan, M., Adejumo, T. W., Yahaya, A. M., Saidu, M., Abdulkadir, H. (2021). Effect of mineralogy on physico-chemical and some geotechnical properties of soils developed over granite, schist, and migmatite gneiss: a case study of Minna, Central Nigeria. *Arabian Journal of Geosciences*, 14(22), 2343.
83. Surra, E., Sousa, J., Correia, M., Carvalheiras, J., Labrincha, J. A., Marques, J. C., Delerue-Matos, C. (2023). Technical, environmental, and cost assessment of granite sludge valorisation. *Applied Sciences*, 13(7), 4513.
84. Meda, S.R., Sharma, S.K. Tyagi, G. (2021). Utilization of waste sludge as a construction material-a review. *Materials Today: Proceedings*. 46 4195-4202.
85. Akbulut, H., Gürer, C., Çetin, S., Elmacı, A. (2012). Investigation of using granite sludge as filler in bituminous hot mixtures. *Construction and Building Materials*, 36, 430-436.

86. Liu, P., Hai, R., Liu, J., Huang, Z. (2022). Mechanical properties and axial compression deformation property of steel fiber reinforced self-compacting concrete containing high level fly ash. *Materials*, 15(9), 3137.
87. Felekoğlu, B. (2003). *Kendiliğinden yerleşen betonun fiziksel ve mekanik özelliklerinin araştırılması*. Yüksek Lisans Tezi. Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 251 14.
88. Beycioğlu, A. (2013). *Kendiliğinden yerleşen betonlarda beton ile donatı aderansı ilişkisinin araştırılması*. Doktora Tezi. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 96.
89. Brameshuber, W., Uebachs, S. (2002). *The application of self-compacting concrete in Germany under special consideration of rheological aspects*. in First North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete, 89-91.
90. Semioli, W.J. (2001). Kendiliğinden Yerleşen Betonun Özellikleri. *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 21(1), 1-22.
91. Rwamamara, R., Simonsson, P. (2012). Self-compacting concrete use for construction work environment sustainability. *Journal of Civil Engineering and Management*, 18(5),724-734
92. Felekoğlu, B. Baradan, B. (2004). *Kendiliğinden yerleşen betonların mekanik özellikleri*. Yüksek Lisans Tezi. Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 92.
93. Demir, A. (2016). Sepiyolitli harçların mekanik ve fiziksel özelliklerinin incelenmesi. *Collages. Electronic Journal of Vocational Colleges*, 6(4),126 - 132.
94. Savaş, M., Demir, İ., Güzelküçük, S., Şengül, Ç. G., Yaprak, H. (2014). Sepiyolit İkame Edilmiş Gazbetonun Isıl ve Basınç Dayanım Özellikleri. *Politeknik Dergisi*, 17(1), 43-47
95. Es, K.C., Girgin, Z.C. (2017). Cephe Malzemesi Olarak Atmosferik Korozyona Dayanıklı Çelikler ve Dayanıklılığa Etki Eden Faktörler= Factors Affecting Weathering Steel Durability As Facade Material. *AURUM Journal of Engineering Systems and Architecture*, 1(2), 109-120.
96. Abu-Hasan, F., (2001). *Sepiyolit dolgulu epoksinin üretimi ve özellikleri*. Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. 63.
97. Özdemir, A.H.V., (2004). *Sepiyolit Çöp Deponi Tabakalarında Kullanılabilirliğinin Belirlenmesi*. Yüksek Lisans Tezi. Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. 97.
98. Divakar, Y.S., Manjunath, M. (2012). Aswath. Experimental investigation on behaviour of concrete with the use of granite fines. *International Journal of Advanced Engineering Research and Studies*. 1(4), 84-87.
99. Kala, D.T.F. (2013). Effect of granite powder on strength properties of concrete. *International Journal of Engineering Science*, 2(12), 36-50.

100. Ribeiro, S. Holanda, J. (2014). Soil-cement bricks incorporated with granite cutting sludge. *International Journal of Engineering Science and Innovative Technology*. 3(2), 401-408.
101. Singh, S., Nagar, R., Agrawal, V. (2016). Feasibility as a potential substitute for natural sand: a comparative study between granite cutting waste and marble slurry. *Procedia Environmental Sciences*. 35, 571-582.
102. Jeyaprabha, B., Elangovan, G. Prakash, P. (2016). Effects of elevated temperature and water quenching on strength and microstructure of mortars with river sand substitutes. *Construction and Building Materials*. 114 688-698.
103. Mármol, I., Ballester, P., Cerro, S., Monrós, G., Morales, J., Sánchez, L. (2010). Use of granite sludge wastes for the production of coloured cement-based mortars. *Cement and Concrete Composites*, 32(8), 617-622.
104. Abukersh, S. Fairfield, C. (2011). Recycled aggregate concrete produced with red granite dust as a partial cement replacement. *Construction and Building Materials*. 25(10), 4088-4094,
105. Abd Elmoaty, A.E.M. (2013). Mechanical properties and corrosion resistance of concrete modified with granite dust. *Construction and Building Materials*. 47 743-752.
106. Al-Hamaiedeh, H.D. Khushefati, W. (2013). Granite sludge reuse in mortar and concrete. *Journal of Applied Sciences*. 13(3), 444-450.
107. Ramos, T., Matos, A. M., Schmidt, B., Rio, J., Sousa-Coutinho, J. (2013). Granitic quarry sludge waste in mortar: Effect on strength and durability. *Construction and Building Materials*, 47, 1001-1009.
108. Bacarji, E., Toledo Filho, R. D., Koenders, E. A. B., Figueiredo, E. P., Lopes, J. L. M. P. (2013). Sustainability perspective of marble and granite residues as concrete fillers. *Construction and Building materials*, 45, 1-10
109. Li, H., Huang, F., Cheng, G., Xie, Y., Tan, Y., Li, L., Yi, Z. (2016). Effect of granite dust on mechanical and some durability properties of manufactured sand concrete. *Construction and Building Materials*, 109, 41-46.
110. Medina, G., Del Bosque, I. S., Frías, M., De Rojas, M. S., Medina, C. (2017). Granite quarry waste as a future eco-efficient supplementary cementitious material (SCM): Scientific and technical considerations. *Journal of Cleaner Production*, 148, 467-476
111. Demirel, S., Öz, H. Ö., Çiner, F., Güneş, M. (2019). Türkiye'de atık malzemeden yapılmış kendiliğinden yerleşen harç üretiminin yaşam döngüsü analizi. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 8(1), 1-8.
112. Altoubat, S., Junaid, M. T., Leblouba, M., Badran, D. (2017). Effectiveness of fly ash on the restrained shrinkage cracking resistance of self-compacting concrete. *Cement and Concrete Composites*, 79, 9-20.

113. Hama, S.M., Hilal. N.N. (2017). Fresh properties of self-compacting concrete with plastic waste as partial replacement of sand. *International Journal of Sustainable Built Environment*. 6(2), 299-308.
114. De Matos, P.R., Foiato, M. Prudêncio Jr . L.R.. (2019). Ecological, fresh state and long-term mechanical properties of high-volume fly ash high-performance self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*. 203 282-293.
115. Uygunoğlu, T., Güneş, İ., Ersoy, B., Evcin, A. (2017). Kendiliğinden yerleşen polimerik harçlarda mineral katkının reolojik özelliklere etkisi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 32(4), 1365-1378.
116. Demir, M., Şahin Yön M, Karataş M. (2025). Nevşehir taşı tozunun kendiliğinden yerleşen harçlarda portland çimentosu ikamesi olarak değerlendirilmesi: erken yaşta mukavemet ve reoloji. *Dicle University Journal of Engineering/Dicle Üniversitesi Mühendislik Dergisi*. 16(1), 29-35.
117. Elango, K. S., Vivek, D., Anandaraj, S., Saravanakumar, R., Sanfeer, J., (2022). Saravanaganesh. Experimental study on self compacting concrete using light weight aggregate. *Materials Today: Proceedings*, 60, 1362-1366.
118. Jain, A., S. Chaudhary, R. (2022). Gupta. Mechanical and microstructural characterization of fly ash blended self-compacting concrete containing granite waste. *Construction and Building Materials*. 314 125480.
119. Choudhary, R., Gupta, R., Alomayri, T., Jain, A., Nagar, R. (2021). Permeation, corrosion, and drying shrinkage assessment of self-compacting high strength concrete comprising waste marble slurry and fly ash, with silica fume. *In Structures*, 33, 971-985.
120. Sun, C., Chen, Q., Xiao, J., Liu, W. (2020). Utilization of waste concrete recycling materials in self-compacting concrete. *Resources, Conservation and Recycling*, 161, 104930.
121. Parashar, A., Aggarwal, P., Saini, B., Aggarwal, Y., Bishnoi, S. (2020). Study on performance enhancement of self-compacting concrete incorporating waste foundry sand. *Construction and Building Materials*, 251, 118875.
122. Angeline Jemina, J. Y., Sophia, M., Talluri, R., Muthuraman, U. (2023). Durability Studies on Self-Compacting Concrete Containing Sepiolite Powder and Recycled Coarse Aggregates. In International Conference on Interdisciplinary Approaches in Civil Engineering for Sustainable Development, 493-505.
123. Jain, A., Choudhary, S., Gupta, R., Chaudhary, S., Gautam, L. (2022). Effect of granite industry waste addition on durability properties of fly ash blended self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 340, 127727.
124. Topçu, İ.B., Bilir, T. Baylavlı, H. (2008). Kendiliğinden Yerleşen Betonun Özellikleri. *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*. 21(1), 1-22.
125. 12350-9, T.E. BetonTaze Beton Deneylemi, TS EN 12350, 2011.

126. İnternet: Specification and guidelines for self-compacting concrete. URL: <https://www.wp.feb.unesp.br/pbastos/c.especiais/Efnarc.pdf>. Son Erişim Tarihi: 02.03.2024.
127. Yeğınobalı, A. (2004). *Türkiye'de yeni çimento standartlarına geçiş*, Ankara: Türkiye Mühendisler Birlięi Yayınları, 11.
128. 4045, TS (1984). Yapı malzemelerinde kapiler su emme tayini, TSE,
129. Mehta, P.K., Monteiro, P. (2006). Concrete: microstructure, properties, and materials. (Third Edition). New York: McGraw-Hill, 684.
130. Oltulu, M. R. Şahin. (2014). Pore structure analysis of hardened cement mortars containing silica fume and different nano-powders. *Construction and Building Materials*, 53 658-664.
131. Zhang, B. (1998). Relationship between pore structure and mechanical properties of ordinary concrete under bending fatigue. *Cement and Concrete Research*. 28(5), 699-711.
132. Atahan, H.N., Oktar, O.N. (2009). Effects of water–cement ratio and curing time on the critical pore width of hardened cement paste. *Construction and Building materials*, 23(3), 1196-1200.
133. Abell, A., K. Willis, D. (1999). Mercurained shrinkage cracking of fiber-reinforced high-strength concrete. *Fibers*, 6(1), 12,nmv
134. 12350-9, TS EN (2011). BetonTaze Beton Deneyleri,
135. Elyamany, H.E., Abd Elmoaty, M. Mohamed, B. (2014). Effect of filler types on physical, mechanical and microstructure of self compacting concrete and Flow-able concrete. *Alexandria Engineering Journal*, 53(2), 295-307
136. Samad, H.A., Abd Rashid, R. (2020). *Influence of dolomite and granite waste content on the properties of artificial marble*. in IOP Conference Series. Materials Science and Engineering, IOP Publishing,
137. Boz, A.K., (2019). Granit arenasının beton içerisinde filler malzeme olarak kullanılması ve performans analizi. Yüksek Lisans Tezi. Harran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 36.
138. Lozano-Lunar, A., Dubchenko, I., Bashynskiy, S., Rodero, A., Fernández, J. M., Jiménez, J. R. (2020). Performance of self-compacting mortars with granite sludge as aggregate. *Construction and Building Materials*, 251, 118998.
139. Kim, H.-K., Jeon, J. Lee, H., Flow, K. (2012). water absorption, and mechanical characteristics of normal-and high-strength mortar incorporating fine bottom ash aggregates. *Construction and Building Materials*, 26(1), 249-256.
140. Cheah, C.B., Lim, J.S. Ramli, M.B. (2019). The mechanical strength and durability properties of ternary blended cementitious composites containing granite quarry dust

- (GQD) as natural sand replacement. *Construction and Building Materials*. 197 291-306.
141. Gupta, L.K., Vyas, A.K. (2018). Impact on mechanical properties of cement sand mortar containing waste granite powder. *Construction and Building Materials*. 191 155-164.
 142. Emiroğlu, M., (2008). *Sepiyolit in harç ve beton özelliklerine etkisinin incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 41-46.
 143. Gupta, T., Chaudhary, S. Sharma, R.K. (2016). Mechanical and durability properties of waste rubber fiber concrete with and without silica fume. *Journal of Cleaner Production*, 112 702-711,
 144. Zhang, T., Wu, B. (2024). Compressive behavior and water permeability of recycled lump-aggregate concrete with recycled sand from weathered residual soil of granite. *Construction and Building Materials*, 419, 135487.
 145. Doostkami, H., Formagini, S., Roig-Flores, M., Serna, P. (2023). *The influence of sepiolite on the self-healing capability of concrete by means of water permeability*. In MATEC Web of Conferences, 378, 02020.
 146. Sepulcre-Aguilar, A., Hernández-Olivares, F. (2010). Assessment of phase formation in lime-based mortars with added metakaolin, Portland cement and sepiolite, for grouting of historic masonry. *Cement and Concrete Research*. 40(1), 66-76,
 147. Abbaslou, H., Ghanizadeh, A.R. Amlashi, A.T. (2016). The compatibility of bentonite/sepiolite plastic concrete cut-off wall material. *Construction and Building Materials*, 124 1165-1173.
 148. Ghanizadeh, A. R., Abbaslou, H., Amlashi, A. T., Alidoust, P. (2019). Modeling of bentonite/sepiolite plastic concrete compressive strength using artificial neural network and support vector machine. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 13(1), 215-239.
 149. Ying, P.J. (2012). The research on the effect of granite powder on concrete performance. *Applied Mechanics and Materials*, 204 3760-3764.
 150. Ying, P. J., Liu, F. S., Ren, S. X., Dong, G. G. (2021). The research on the effect of granite powder on concrete performance. *Applied Mechanics and Materials*, 204, 3760-3764,
 151. Hu, X., Shi, Z., Shi, C., Wu, Z., Tong, B., Ou, Z., De Schutter, G. (2017). Drying shrinkage and cracking resistance of concrete made with ternary cementitious components. *Construction and Building Materials*, 149, 406-415.
 152. Duran-Herrera, A., De-León-Esquivel, J., Bentz, D. P., Valdez-Tamez, P. (2019). Self-compacting concretes using fly ash and fine limestone powder: Shrinkage and surface electrical resistivity of equivalent mortars. *Construction and Building Materials*, 199, 50-62.

153. Kou, S.C. C.S. Poon. (2009). Properties of self-compacting concrete prepared with recycled glass aggregate. *Cement and Concrete Composites*. 31(2), 107-113.
154. Güneyisi, E., Gesoğlu, M. Özbay, E. (2010). Strength and drying shrinkage properties of self-compacting concretes incorporating multi-system blended mineral admixtures. *Construction and Building Materials*. 24(10), 1878-1887.





Gazili olmak ayrıcalıktır