

**T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ**



**BAKTERİ İÇEREN GEOPOLİMER HARÇLARIN ÖZELLİKLERİNİN
ARAŞTIRILMASI**

Fatma BELİN KAVAZOĞLU

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS

HAZİRAN 2021

ANTALYA

**T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ**



**BAKTERİ İÇEREN GEOPOLİMER HARÇLARIN ÖZELLİKLERİNİN
ARAŞTIRILMASI**

Fatma BELİN KAVAZOĞLU

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS

HAZİRAN 2021

ANTALYA

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BAKTERİ İÇEREN GEOPOLİMER HARÇLARIN ÖZELLİKLERİNİN
ARAŞTIRILMASI

Fatma BELİN KAVAZOĞLU
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS

Bu tez 25/06/2021 tarihinde jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Niyazi Uğur KOÇKAL (Danışman)

Prof. Dr. Turhan BİLİR

Doç. Dr. İbrahim AYDOĞDU

ÖZET

BAKTERİ İÇEREN GEOPOLİMER HARÇLARIN ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Fatma BELİN KAVAZOĞLU

Yüksek Lisans Tezi, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Niyazi Uğur KOÇKAL

Haziran 2021; sayfa 67

Son yıllarda geopolimer adı verilen çimento özelliklerine sahip yeni bir malzeme formu geliştirilmiştir. Geopolimer harçlar, Portland çimento harçlarının yerini alma potansiyeli yüksek olan yeni nesil inorganik bağlayıcılardır, fakat betona göre geopolimer daha kırılgandır. Bu nedenle, geopolimere kendi kendini iyileştirmenin kazandırılması oldukça arzu edilir. Çatlak genişliğini kontrol etmek için mikro fiberler kullanılmış ve geniş kimyasal maddeler ilave edilmiştir. Ancak epoksi sistemler, akrilik reçineler ve silikon bazlı polimerler gibi stratejilerin çoğu pahalı ve çoğunlukla çevreye zararlı malzemelerin kullanımını içermektedir. Başka bir yaklaşımda, çatlakları kapatmak ve iyileştirmek amacıyla mikrobiyal karbonat çökeltmesini indüklemek için betondaki alkali ortama dayanabilen bakteriler kullanılmıştır. Mikrobiyal karbonat çökeltme yöntemi, geopolimerde kendi kendini iyileştirmeyi devreye sokmanın potansiyel bir yoludur.

Bu çalışmada bakteri kullanarak kendi iyileştiren geopolimer harç özellikleri araştırılmıştır. Daha önce geopolimer harç içerisine bakteri kullanımı neredeyse hiç araştırılmaması sebebiyle çimento içerikli çalışmalar araştırılmış olup Bacillus türü bakteriler kullanıldığı belirlenmiştir. Yapılan deneysel çalışmada Bacillus Subtilis kullanılarak geopolimer harç numuneleri üretilmiştir. Bacillus Subtilis sporları, kapsül veya immobilizasyon olmadan doğrudan geopolimer harca ilave edilmiştir. Numuneler üzerinde fiziksel ve mekanik özellikleri araştırılmış ve alınan harç örnekleri üzerinde SEM analizleri yapılmıştır. Deneysel sonuçlar, bakteri kullanımının hem fiziksel hem de mekanik özelliklerine olumlu etkisi olduğu gözlemlenmiştir. SEM görüntülerinde ise kalsit oluşumu gözlemlenmiş olup çatlak oluşumunu engellediğini göstermiştir.

ANAHTAR KELİMELER: geopolimer, kendi kendini iyileştirme, bakteri, bacillus subtilis

JÜRİ: Prof. Dr. Niyazi Uğur KOÇKAL

Prof. Dr. Turhan BİLİR

Doç. Dr. İbrahim AYDOĞDU

ABSTRACT

INVESTIGATION OF PROPERTIES OF BACTERIAL CONTAINING GEOPOLYMER MORTARS

Fatma BELİN KAVAZOĞLU

MSc Thesis in Civil Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Niyazi Uğur KOÇKAL

June 2021; pages 67

In recent years, a new material form with cement properties called geopolymer has been developed. Geopolymer mortars are new generation inorganic binders with a high potential to replace Portland cement mortars, but geopolymer is more brittle than concrete. Therefore, it is highly desirable to impart self-healing to the geopolymer. Microfibers are used to control crack width in concrete, while broad chemicals are added to concrete to reduce crack width. However, most strategies such as epoxy systems, acrylic resins and silicone-based polymers involve the use of expensive and often environmentally harmful materials. In another approach, bacteria that can withstand the alkaline environment in concrete are used to induce microbial carbonate precipitation to seal and heal cracks. The microbial carbonate precipitation method is a potential way to enable self-healing in geopolymer.

In this study, self-healing geopolymer mortar properties were investigated using bacteria. Since the use of bacteria in geopolymer mortar was almost never investigated before, cement-containing studies were investigated, and it was determined that *Bacillus* type bacteria were used. In the experimental study, geopolymer mortar samples were produced using *Bacillus Subtilis*. *Bacillus Subtilis* spores were added directly to the geopolymer mortar without encapsulation or immobilization. The physical and mechanical properties of the samples were investigated and SEM analyses were performed on the mortar samples. Experimental results show that the use of bacteria has a positive effect on both physical and mechanical properties. Calcite formation was observed in SEM images and showed that it prevented crack formation.

KEYWORDS: geopolymer, self-healing, bacteria, *bacillus subtilis*

COMMITTEE: Prof. Dr. Niyazi Uğur KOÇKAL

Prof. Dr. Turhan BİLİR

Assoc. Prof. Dr. İbrahim AYDOĞDU

ÖNSÖZ

Yüksek lisans eğitimim boyunca engin bilgi ve deneyimlerini benimle paylaştığı ve bana yol gösterdiği için sayın hocam ve tez danışmanım Prof. Dr. Niyazi Uğur KOÇKAL'a çok teşekkür ederim.

Her zaman yanımda olan, zor zamanlarımda bana her türlü desteği sağlayan ve tecrübelerini benimle paylaşan sevgili eşim İnş. Müh. Hüdahan Kavazoğlu'na teşekkür ederim.

Bir bilim insanı olmamı yürekten isteyen, varlığıyla sınırsız güç bulabildiğim canım anneme, ruhuyla hep yanımda olduğunu hissettiğim, canım babama gönülden teşekkür ederim.

Ayrıca bu tez çalışmamı, gönlünü ilime ve bilime, ömrünü her türlü sorgulamaya ve araştırmaya adanmış bütün insanlara atfediyorum.

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
ÖNSÖZ	iii
AKADEMİK BEYAN	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ	xi
1. GİRİŞ.....	1
2. KAYNAK TARAMASI.....	5
2.1. Geopolimer Tarihçesi	6
2.2. Geopolimerin Kimyasal Reaksiyonları	6
2.3. Metakaolin.....	9
2.4. Silis Dumanı	14
2.5. Alkali Aktivatör.....	16
2.6. Bakteri Kullanarak Kendini İyileştirme	18
2.6.1. Bakteri kullanılarak yapılmış çalışmalar	20
3. MATERYAL VE METOT	25
3.1. Materyal	25
3.1.1. Bağlayıcılar.....	25
3.1.2. Agregat	25
3.1.3. Alkali Aktivatör.....	27
3.1.4. Su	27
3.1.5. Kalsiyum Laktat	27
3.1.6. Distile Su	27
3.1.7. Luria Broth (LB).....	27
3.1.8. Nutrient Broth (NB)	27
3.1.9. Agar	27
3.2. Metot	28
3.2.1. Karışım tasarım yöntemi	28
3.2.2. Taze harçlar üzerinde gerçekleştirilen deneyler	29
3.2.3. Sertleşmiş harçların fiziksel özelliklerinin belirlenmesi.....	31

3.2.4. Sertleşmiş harçların mekanik özelliklerinin belirlenmesi.....	32
3.2.5. Sertleşmiş harçların durabilite özelliklerinin belirlenmesi.....	34
3.2.6. Geopolimer harçların sem görüntüleri.....	35
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	36
4.1. Taze Harçlar Üzerinde Gerçekleştirilen Deneylerin Bulguları	36
4.2. Sertleşmiş Harçlarda Fiziksel Hal Deney Bulguları.....	38
4.2.1. Kuru yığın yoğunluk değerleri	39
4.2.2. Suya doymuş kuru yüzey yığın yoğunluk değerleri.....	40
4.2.3. Görünür yığın yoğunluk değerleri	40
4.2.4. Yüzdece su emme değerleri.....	42
4.2.5. Yüzdece görünür boşluk değerleri.....	42
4.3. Sertleşmiş Harçlarda Mekanik Hal Deney Bulguları	44
4.3.1. Eğilme dayanımı deney bulguları.....	44
4.3.2. Basınç dayanımı deney bulguları	46
4.3.3. Gerilme-şekil değiştirme	47
4.4. Sertleşmiş Harçlarda Durabilite Hal Deney Bulguları	54
4.4.1. Kılcal su geçirimsizlik tayini	54
4.5. SEM görüntüleri	55
5. SONUÇLAR	59
6. KAYNAKLAR.....	60
ÖZGEÇMİŞ	

AKADEMİK BEYAN

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Bakteri içeren geopolimer harçların özelliklerinin araştırılması” adlı bu çalışmanın, akademik kurallar ve etik değerlere uygun olarak yazıldığını belirtir, bu tez çalışmasında bana ait olmayan tüm bilgilerin kaynağını gösterdiğimi beyan ederim.

25/06/2021

Fatma BELİN KAVAZOĞLU



SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

A_1	: Kuru birim ağırlık,
A_2	: Görünür birim ağırlık,
A_3	: Görünür boşluk oranı (%),
A_y	: Yükün uygulandığı kesit alanı (mm^2)
A_k	: Kılcal su emme yüzeyi alanı (cm^2)
Al	: Alüminyum
Ca	:Kalsiyum
d_1	: Numunenin genişliği (mm)
d_2	: Numunenin yüksekliği (mm)
E	: Elastisite modülü
F_1	: Maksimum yük (N)
F_2	: Deney makinesinde kırılma anındaki en büyük yük (N)
K	: Kılcal su emme katsayısı ($\text{cm}/\text{sn}^{1/2}$)
L	: Yükleme tablası mesnetler arasındaki açıklık (mm)
m_1	: Kabın ağırlığı (kg)
m_2	: Kabın ve taze harcın ağırlığı (kg)
O_2	: Oksijen
Q	: t zaman aralığında emilen su miktarı (cm^3)
Si	: Silisyum
T	: Ölçüm aralığı süresi (sn)
V	: Kabın Hacmi (m^3)
ρ_m	: Taze harç birim hacim ağırlığı (kg/m^3)
σ_1	: Eğilme dayanımı (MPa)
σ_2	: Basınç dayanımı (MPa)

Bu tez çalışmasında, ondalık ayırıcı olarak “virgül (,)” kullanılmıştır.

Kısaltmalar

ACI	:American Concrete Institute
$\text{Al}_2\text{O}_3.2\text{SiO}_2$	:Metakaolinit
ASTM	:American Society for Testing and Materials
ASR	:Alkali silika reaksiyonu
BS	:Bacillus Subtilis
CaCO_3	:Kalsiyum karbonat
CH	:Kalsiyum hidroksit
CO_2	:Karbondioksit
C-S-H	:Kalsiyum-Silikat-Hidrat
DT	: Diyatumlu toprak
DTA	: Diferansiyel termal analiz
GBA	: Görünür birim ağırlık
GBO	: Görünür boşluk oranı
GPC	: Geopolimer portland çimentosu

HR-SEM	: Yüksek çözünürlüklü taramalı elektron mikroskobu
KBA	: Kuru birim ağırlık
KOH	: Potasyum hidroksit
MK	: Metakaolin
NaOH	: Sodyum hidroksit
N-A-S-H	: Sodyum alüminosilikat hidrat
OH ⁻	: Hidroksit iyonu
PC	: Portland çimentosu
PCB	: Portland çimento betonu
PU	: Poliüretan
SD	: Silis Dumanı
SDYK	: Suyu doymuş kuru yüzey
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu (Scanning Electron Microscope)
SEO	: Su emme oranı
SEP	: Süper emici polimer
SiO ₂	: Silika
SPC	: Sıradan Portland çimentosu
TG	: Termogravimetrik analiz
TiO ₂	: Titanyum dioksit
TS EN	: Türk Standartları Enstitüsü
UK	: Uçucu kül
XRF	: X ışını floresans analizi

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Polisialatların kimyasal yapıları (Davidovits 1984)	7
Şekil 2.2. Alkali ile poli (sialat-silokso) halinde polikondenzasyon örneği (Wallah ve Rangan 2006)	7
Şekil 2.3. Geopolimerizasyon için kavramsal model (Duxson vd. 2007a).....	8
Şekil 2.4. Saf standart kaolinin HR-SEM görüntüsü (Mansour vd. 2010).	10
Şekil 2.5. Kaolin plakalarını ve yığınlarını gösteren SEM (Murray 2000)	10
Şekil 3.1. Kırma kum agregası.....	25
Şekil 3.2. a) Le Chatelier Balonu; (b) Balon Joje	26
Şekil 3.3. Agreganın tane boyutu dağılımı	26
Şekil 3.4. Harçların kalıplara yerleştirilmesi	28
Şekil 3.5. Taze harç kıvam tayini	30
Şekil 3.6. Taze harçlarda birim hacim kütle tayini	31
Şekil 3.7. Numunelerin suya konulması	32
Şekil 3.8. Eğilme deneyi düzeneği.....	33
Şekil 3.9. Kılcal su emme tayini deneyi düzeneği	34
Şekil 4.1. Yayılma çapı değerleri.....	37
Şekil 4.2. Birim hacim kütlesi değerleri	37
Şekil 4.3. Yüzdece hava miktarı değerleri	38
Şekil 4.4. Karışımların kuru birim ağırlık değerleri	39
Şekil 4.5. Karışımların suya doymun kuru yüzey değerleri.....	40
Şekil 4.6. Karışımların görünür birim ağırlık değerleri	41
Şekil 4.7. MK serisi KBA-SDYK-GBA değerleri.....	41
Şekil 4.8. MKB serisi KBA-SDYK-GBA değerleri	41
Şekil 4.9. Karışımların yüzdece su emme değerleri	42
Şekil 4.10. Karışımların görünür boşluk oranı değerleri	43
Şekil 4.11. MK serisi SEO-GBO değerleri.....	43
Şekil 4.12. MKB serisi SEO-GBO değerleri	43
Şekil 4.13. Karışımların SEO-GBO değerleri	44
Şekil 4.14. Karışımların 3 günlük eğilme dayanımı değerleri	45
Şekil 4.15. Karışımların 7 günlük eğilme dayanımı değerleri	45
Şekil 4.16. Karışımların 3 günlük basınç dayanımı değerleri.....	47
Şekil 4.17. Karışımların 7 günlük basınç dayanımı değerleri.....	47
Şekil 4.18. MK serisinin basınç yükleri altındaki 3 günlük gerilme-şekil değiştirme eğrileri	48
Şekil 4.19. MKB serisinin basınç yükleri altındaki 3 günlük gerilme-şekil değiştirme eğrileri	48
Şekil 4.20. Karışımların basınç yükleri altındaki 3 günlük gerilme-şekil değiştirme eğrileri	49
Şekil 4.21. MK serisinin basınç yükleri altındaki 7 günlük gerilme-şekil değiştirme eğrileri	49

Şekil 4.22. MKB serisinin basınç yükleri altındaki 7 günlük gerilme-şekil değiştirme eğrileri	50
Şekil 4.23. Karışımların basınç yükleri altındaki 7 günlük gerilme-şekil değiştirme eğrileri	50
Şekil 4.24. MK serisinin eğilme yükleri altındaki 3 günlük gerilme-şekil değiştirme eğrileri	51
Şekil 4.25. MKB serisinin eğilme yükleri altındaki 3 günlük gerilme-şekil değiştirme eğrileri	51
Şekil 4.26. Karışımların eğilme yükleri altındaki 3 günlük gerilme-şekil değiştirme eğrileri	52
Şekil 4.27. MK serisinin eğilme yükleri altındaki 7 günlük gerilme-şekil değiştirme eğrileri	52
Şekil 4.28. MKB serisinin eğilme yükleri altındaki 7 günlük gerilme-şekil değiştirme eğrileri	53
Şekil 4.29. Karışımların eğilme yükleri altındaki 7 günlük gerilme-şekil değiştirme eğrileri	53
Şekil 4.30. MK serisi 1S-4S-24S sürelerindeki kılcal su emme katsayısı değerleri.....	54
Şekil 4.31. MKB serisi 1S-4S-24S sürelerindeki kılcal su emme katsayısı değerleri	55
Şekil 4.32. MK20 serisi SEM görüntüsü	56
Şekil 4.33. MK20B serisi SEM görüntüsü.....	56
Şekil 4.34. MK50 serisi SEM görüntüsü	57
Şekil 4.35. MK50B serisi SEM görüntüsü.....	57
Şekil 4.36. MK80 serisi SEM görüntüsü	58
Şekil 4.37. MK80B serisi SEM görüntüsü.....	58

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1. Bağlayıcılar ve agreganın kimyasal kompozisyonları (%)	25
Çizelge 3.2. Karışıma giren malzeme hacimleri (dm ³).....	29
Çizelge 4.1. Karışımların taze haldeki yayılma çapı, birim hacim kütlesi ve hava miktarı değerleri.....	36
Çizelge 4.2. Karışımların KBA-SDYK-GBA değerleri	38
Çizelge 4.3. Karışımların GBO-SEO değerleri.....	39
Çizelge 4.4. Karışımların eğilme dayanımı değerleri (MPa).....	44
Çizelge 4.5. Karışımların basınç dayanımı değerleri.....	46
Çizelge 4.6. Karışımların kılcal su emme katsayısı değerleri (cm/sn ^{1/2}).....	54



1. GİRİŞ

Beton, altyapının en önemli unsurudur ve iyi tasarlanmış beton, dayanıklı bir yapı malzemesi olabilir. Ancak, endüstriyel kaynaklardan dünya çapında toplam emisyonların yaklaşık %2,5'inden çimento üretimi sorumlu olduğundan Portland çimentosunun (PC) çevresel yönleri büyüyen bir endişe kaynağıdır. Portland çimento imalatı enerji bakımından oldukça yoğun bir süreçtir ve atmosfere büyük miktarda sera gazı salmaktadır (Aldea vd. 2000). Çimento üretiminde hava kirliliğine neden olan en önemli sera gazlarından biri %8 oranı ile CO₂ gazıdır. Günümüz çimento üretim teknikleri, CO₂ emisyonuna neden olan ana faktörler arasındadır. Bu nedenle çevre dostu malzemelerle ilgili bilimsel araştırmalar yoğun bir şekilde devam etmektedir.

Son yıllarda geopolimer adı verilen çimento özelliklerine sahip yeni bir malzeme türü geliştirilmiştir. İnşaat sektöründe çimentonun yerini alabilecek geopolimer harçlar üretilmektedir. Geopolimer harçlar, Portland çimento harçlarının yerini alma potansiyeli yüksek olan yeni nesil inorganik bağlayıcılardır. Geopolimer olarak adlandırılan yeni ürün, üretiminde atık malzeme kullanma özelliklerine sahip olup, CO₂ emisyonunda %80'e varan tasarruf sağlar. Hammadde seçimine ve işlem koşullarına bağlı olarak, geopolimerler, yüksek basınç dayanımı, hızlı veya yavaş sertleşme, asit direnci, yangın direnci ve düşük termal iletkenlik dahil olmak üzere çeşitli özellikler sergileyebilir (Duxson vd. 2007).

Genellikle geopolimerizasyon olarak adlandırılan alkalin aktivasyonu, iyi sıkıştırılmış ve çimento özellikli kompozitlerde camsı bileşenleri değiştiren kimyasal bir işlem olarak tanımlanır. Geopolimerizasyon, inorganik bir polikondensasyon reaksiyonu ile oluşturulur. Alkali aktivasyon sisteminde, alkali silika, hidroksit, damıtılmış su vb. gibi farklı kombinasyonlar vardır. Bu proses, alümino-silikat malzemelerin geopolimerizasyonunu, hammaddelerin çözünmesini, taşınmasını veya yönlendirilmesini ve reaksiyon ürünlerinin polikondensasyonunu içeren karmaşık bir kimyasal işlemdir. Amorf Si ve Al içermesi şartıyla, herhangi bir doğal mineral veya endüstriyel atık bağlayıcı olarak kullanılabilir (De Vargas vd. 2011). Çoğu atık madde reaktif alümina ve silis içerir, bu da onları geopolimerizasyon reaksiyonlarında hammadde olarak kullanılmaya uygun hale getirir. Daha önce, geopolimerlerin sentezi için hammadde olarak silis dumanı, uçucu kül, fırın cürufu, metakaolin vb. gibi birçok Al-Si içeren malzeme kullanılmıştır.

Silis dumanı, silikon metal veya ferrosilikon alaşımlarının üretiminin yan ürünüdür ve 1970'lerden önce fabrika yığınının havaya serbest bırakılmıştır, ancak çevre yasalarındaki değişikliklerle fabrikalar bu tozu toz toplayıcılarla toplamaya başlamıştır. Silis dumanı üretimi için, yüksek saflıkta kuvars 2000°C'de fırında eritilir ve proses sırasında silikon monoksit üretilir ve havada O₂ ile oksitlenerek SiO₂ oluşur (Erdoğan 1997). Silis dumanı en etkili puzolanik malzemelerden biridir, yani su ile tek başına reaksiyona girmez, ancak betona katıldığında betonun özelliklerini iyileştirir. Silis dumanı betonda iki şekilde kullanılabilir; birincisi betonda katkı maddesi olarak, ikincisi ise Portland çimentosunun yerine geçmesi için kullanılabilir. Silis dumanı, kimyasal ve fiziksel özelliklerinden dolayı betonun performansını artırmak için etkili bir seçimdir (Bapat 2012).

Son zamanlarda, beton inşaat sektöründe ek bir çimento malzemesi olarak yüksek reaktiviteli metakaolinin kullanımına artan bir ilgi vardır. Metakaolin, kimyasal olarak

bağlı suyu uzaklaştırmak ve kristal yapıyı bozmak için saflaştırılmış kaolinit kilinin 700-900°C arasında değişen bir sıcaklıkta kalsine edilmesiyle üretilen ultra ince bir puzolandır (Brooks ve Megat Johari 2001). Uçucu kül, silis dumanı, yüksek fırın cürufu gibi endüstriyel yan ürünlerden farklı olarak metakaolin, rengini açmak, inert kirliliği gidermek ve partikül boyutunu kontrol etmek için dikkatlice rafine edilir. Metakaolinin parçacık boyutu çoğunlukla 2 µm'den küçüktür ve silis dumanı kadar ince olmasa da çimento parçacıklarından önemli ölçüde daha küçük bir yapıya sahiptir. Metakaolin kullanımına olan ilgi, düşük dayanımla ilişkilendirilen çimento hidrasyonu ile üretilen kalsiyum hidroksit (CH) tüketimine dikkat çekmiştir. Bu nedenle, metakaolin kullanımı uzun vadede gücü ve dayanıklılığı artırır. Ek olarak, dolgu etkisi nedeniyle erken dayanım artışı elde etmek de oldukça mümkündür.

Silis dumanı, puzolanik reaksiyonu büyük ölçüde artıracak yüksek amorf silis içeriği nedeniyle geopolimer harç üretiminde temel bir bileşen olarak kabul edilir. Metakaolin gibi kalsine edilmiş kaolinit killer, tamamlayıcı çimentolama malzemeleri olarak kullanılabilir ve dolayısıyla beton karışımına kısmen çimentonun ikamesi olarak eklenebilir. Kaolinit kili bol miktarda bulunur. Metakaolinin betona katılması, yüksek puzolanik reaksiyonu ile geçirgenliği, kimyasal direnci ve mekanik özellikleri iyileştirmenin yanı sıra, ince partiküller nedeniyle matrisin partikül paketlemesini iyileştirecektir. Çoğu çalışma, metakaolinin beton matrisin taze ve sertleştirilmiş performansını silis dumanının performansından daha fazla destekleyeceğini göstermiştir. Aksine, silis dumanının metakaolinden daha iyi çimentolama performansı gösterdiği kaydedilmiştir. Diğer araştırmalar, sıradan betonda hem metakaolin hem de silis duman kombinasyonlarını yürütmektedir. Bu kombinasyonlar, sıradan betonarmede betonun hem işlenebilirliğinde hem de mekanik performansında önemli gelişme göstermiştir.

Polimerizasyon sırasında malzemelerde bulunan belirli miktarda silis ve alüminadan oluşan bir çözünme ile arttırmak için hammadde partiküllerinin yüzey hidrolizine güçlü bir alkali ortam gereklidir (Görhan ve Kürklü 2014). Bu ortam, aktivatörler olarak adlandırılan tekli veya kombine alkalin çözeltilerle elde edilebilir. Alkali aktivatör çözeltileri, Si ve Al oksitlerin çözünmesinde önemli etkisi vardır. Bu nedenle, geopolimerler, güçlü alkali çözeltiler olan en yaygın alkali aktivatörlerin alüminosilikat reaktif malzemelerle karıştırılmasıyla bireşim oluşturur. Alkali aktivatörlerin en yaygın olarak kullanılanları sodyum hidroksit (NaOH), potasyum hidroksit (KOH), potasyum silikat veya sodyum silikattır.

Aktivatör konsantrasyonu, geopolimerlerin fiziksel, mekanik ve durabilite gibi özellikleri üzerine etkisi oldukça önemlidir. İdeal aktivatör konsantrasyonu, geopolimerin gücünü artırır. İdeal konsantrasyonun haricinde, alkali aktif matriste bulunan ve malzemenin geopolimer yapısını değiştirebilen serbest hidroksit (OH⁻) iyonlarından dolayı malzemenin mekanik özelliklerinde bazı kayıplar meydana gelebilmektedir. Numunelerin basınç dayanımını etkilen bir diğer parametre ise geopolimerlerin yaşı ve sertleşme sıcaklığıdır. Bununla birlikte, bu değişkenlerin etkili olabilmesi için, geopolimerizasyon sırasında ortamda yeterli aktivatör konsantrasyonu bulunmalıdır, çünkü sodyum hidroksit konsantrasyonunun mukavemet değerleri üzerinde, kürlenme sıcaklığı ve kürlenme süresi değerlerinden daha büyük bir etkisi vardır (De Vargas vd. 2011; Hu, Zhu ve Long 2009; Bakharev 2005).

Betonun en büyük dezavantajı, düşük dayanım ve dayanıklılıkla sonuçlanan mikro çatlaklarda ilerlemeye ve birleşmeye yatkın hale getiren düşük çekme dayanımıdır. Bu çekme gerilmeleri, çekme yükü, plastik büzülme ve genişleyen kimyasal reaksiyonlardan kaynaklanabilir (Mehta ve Monteiro 2006). Bu çatlama eğilimi, sadece betonun mukavemetinin azalmasına neden olmakla kalmaz, aynı zamanda betonu zararlı çevreye karşı savunmasız hale getirir. Bu çatlaklardan zararlı kimyasalların girmesi, kimyasal saldırı yoluyla betonun zayıflamasına ve çelik donatıda korozyona neden olması mümkündür. Bu korozyon, çatlak hasarında artışa neden olarak beton yapılarda mukavemet ve sertlik kaybına neden olur (Reinhardt ve Jooss 2003). Hem beton hem de donatı için betonarmedeki bu zarar, yüksek bakım maliyetine yol açar. Portland çimentosuna alternatif yeni bir yeşil bağlayıcı olarak bilinen geopolimer, betondan daha iyi ateş direnci ve ağır metal hareketsizleştirme performansına sahip olduğu gösterilmiştir. Bununla birlikte, betona göre geopolimer daha kırılmandır ve bu nedenle, geopolimere kendi kendini iyileştirmenin kazandırılması oldukça arzu edilir (Jadhav vd. 2018).

Kendi kendini iyileştirme, hasarları iyileştirme kapasitesiyle birlikte yüksek kaliteli malzemeler sağlama konusunda ortaya çıkan bir kavramdır ve son on yılda bina yapılarında uygulama için çok ilgi görmüştür. Bu nedenle, etkili bir kendi kendini iyileştirme mekanizması, onarım ve bakım çalışmalarını önemli ölçüde azaltabilir ve bununla birlikte ortaya çıkan çevresel ve ekonomik etkileri de azaltabilir. Betonun kendi kendini iyileştirmesini desteklemek için birkaç mühendislik yaklaşımı denenmiştir. Betondaki çatlak genişliğini kontrol etmek için mikro fiberler kullanılırken, çatlak yüzeylerinin genişlemesini sağlamak ve böylece çatlak genişliğini azaltmak için betona geniş kimyasal maddeler ilave edilmiştir (Yang vd. 2009; Qiu, Tan ve Yang 2016; Ahn ve Kishi 2010; Sisomphon, Copuroglu ve Koenders 2012; Sherir, Hossain ve Lachemi 2016). Ancak epoksi sistemler, akrilik reçineler ve silikon bazlı polimerler gibi stratejilerin çoğu hem betonla uyumsuz ve pahalı hem de çevreye zararlı malzemelerin kullanımını içermektedir. Başka bir yaklaşımda, çatlakları kapatmak ve iyileştirmek amacıyla mikrobiyal karbonat çökmesini indüklemek için betondaki alkali ortama dayanabilen bakteriler kullanılmıştır (Jonkers vd. 2010; Wiktor ve Jonkers 2011; Van Tittelboom vd. 2010).

Mikrobiyal kaynaklı karbonat çökmesi olarak bilinen bu yöntem, son yıllarda geliştirilmekte olan biyobeton olarak da tanımlanmaktadır. Biyobeton, mikrobiyal aktivite ile mineral bileşikler üreterek çatlakların iyileşmesini sağlayan bir yöntemdir. Bu yöntemde meydana gelen otonom iyileşme, beton çatlaklarını azaltarak yapısal dayanıklılığı arttırırken diğer yandan betonarme yapılar için gerekli bakım ihtiyacını da azaltır. Biyo-mineralizasyon doğal bir süreç olması, çevre dostu olması ve çatlak betonun basınç dayanımını arttırması nedeniyle tercih edilmektedir (Vekariya ve Pitroda 2013). Kendi kendini iyileştirme süreci, betonun pH'ı, çözünmüş inorganik karbon, çekirdeklenme yerleri ve karışım boyunca kalsiyum iyonlarının varlığı gibi birçok faktöre bağlı olan kalsiyum karbonat üretimi ile doğrudan ilgilidir. Ek olarak, kullanılan bakteri türü de betonun kendi kendini verimli bir şekilde iyileştirmesinde önemli rol oynar (Hammes vd. 2003).

Biyomineralizasyon, doğal ortamlarda her yerde bulunan karmaşık bir fenomendir. Mineral fazların görünür hücre dışı kimyasal çökmesine izin veren belirli

koşullar altında organizmalar tarafından oluşturulan yerel mikro ortamlarda biyolojik olarak indüklenen çökelmeyi bütünleştirir (Hamilton 2003). Bakteri kullanımı sayesinde meydana gelen karbonat çökmesi de biyomineralizasyonla doğrudan ilişkilendirilmektedir. Bazı bakteriler, büyümeleri ve metabolizmaları sırasında biyo mineraller üretebilir veya indükleyebilir. Uygun koşullar altında, çoğu bakteri karbonat çökmesini tetikleyebilir (Wang, De Belie ve Verstraete 2012).

Bakteriyel sporlar, istenen sıvı ortamda aktive edilebilir ve çevresinde lokal alkali ortam oluşturabilir. Hücre duvarı negatif yüklüdür ve çekirdeklenme için Ca^{2+} çeker. Bu tür kimyasal ortam, $CaCO_3$ oluşumunu etkili bir şekilde destekler (Jonkers vd. 2010). *Bacillus Subtilis* dahil bakteri türlerinin kalsiyum laktat gibi kalsiyum bileşiği üzerinde doğrudan etkisiyle veya ürenin *Bacillus Sphaericus* gibi üreolitik bakteriler tarafından ayrıştırılmasıyla kalsiyum karbonatın çatlaklarda çökmesini içerir. Bu nedenle, *Bacillus* en çok araştırma çalışmalarında kalsit çökeltmesi için biyo-madde olarak kullanılmıştır (Souradeep, Sze Dai ve Harn Wei 2017).

Betondan farklı olarak, çimentonun hidrasyonu yoluyla kendi kendini iyileştirme ve hidrasyon ürünlerinin süzülmesi ve karbonatlaşması geopolimerde mümkün değildir, çünkü geopolimer susuz çimento veya dışarı sızacak çözünabilir Ca^{2+} içermemektedir (Duxson, Mallicoat vd. 2007). Bakteri kullanımı sağlanarak karbonat çökmesi yöntemi, geopolimerde kendi kendini iyileştirmeyi devreye koymanın en mümkün bir yoludur. Bununla birlikte, kullanılan bakteri türünün değişen konsantrasyonları, farklı kürleme işlemleri ve bakterilerin ilave edilmesi için kullanılan malzemeler gibi diğer değişkenler de geopolimer harcın kendi kendini verimli bir şekilde iyileştirmesini destekler.

Bu çalışmada mikrobiyal kaynaklı karbonat çökmesi olarak bilinen yöntem ile kendi iyileştiren geopolimer harç özellikleri araştırılmıştır. Daha önce geopolimer harç içerisine bakteri kullanımı neredeyse hiç araştırılmaması sebebiyle çimento içerikli çalışmalar araştırılmış olup *Bacillus* türü bakteriler kullanıldığı belirlenmiştir. Yapılan deneysel çalışmada silis dumanı ve metakaolin kendi aralarında çeşitli oranlarda hacimce yer değiştirmiştir. *Bacillus Subtilis* kullanılarak geopolimer harç numuneleri üretilmiştir. *Bacillus Subtilis* sporları, kapsül veya immobilizasyon olmadan doğrudan geopolimer harca ilave edilmiştir. Hazırlanan harçların taze ve sertleşmiş özellikleri incelenmiş, bakterilerin harçlar üzerinde etkisi gözlemlenmiştir. Yayılma çapı, birim hacim ağırlık tayini ve hava miktarı tayini taze harçlar üzerinde, yığın yoğunluk, görünür boşluk oranı, su emme, basınç dayanımı ve eğilmede çekme dayanımı sertleşmiş harçlar üzerinde gerçekleştirilmiştir. Durabilite özellikleri kapsamında kılcal geçirimsizlik deneyi gerçekleştirilmiştir. Üretilmiş olan harç örnekleri üzerinde SEM analizleri yapılmıştır. Deneysel sonuçlar, bakteri kullanımının hem fiziksel, mekanik ve durabilite özelliklerine olumlu etkisi olduğu gözlemlenmiştir. SEM görüntülerinde ise kalsit oluşumu gözlemlenmiştir. Kalsit oluşumu sayesinde numune içerisindeki boşlukları kapatma eğilimi göstermiştir.

2. KAYNAK TARAMASI

Çimento, dünya çapında en yaygın yapı malzemelerinden biridir ve öncelikle beton üretiminde kullanılır. Beton sudan sonra en çok tüketilen malzemedir (AİTCİN 2000). Betonun insanlık için kullanılmasının temel nedenleri, üstün mekanik özelliklerinin yanı sıra uygun maliyeti ve uygulanabilirliğidir. Ancak bu olumlu özelliklerinin yanı sıra beton kullanımı çevreye ve sürdürülebilirliğe ciddi şekilde zarar vermektedir. Çimento endüstrisi, dünya çapında CO₂ emisyonlarının yaklaşık %8'ini oluşturmaktadır (Scrivener ve Kirkpatrick 2008). Bu zararlı etkileri azaltmak için birçok araştırmacı ve kuruluş, çimento ve betona alternatif çevre dostu malzemeler geliştirmeye odaklanmıştır. Bu bağlamda geopolimer teknolojisi ön plana çıkmıştır. Geopolimerler, malzeme teknolojisi alanında yeni nesil çevre dostu malzemelerdir. Geopolimerler, yüksek eğilme ve basınç dayanımı, yüksek sıcaklık dayanımı, düşük CO₂ emisyon ayak izi ve düşük maliyet gibi çok sayıda üstün özelliğe sahip olmaları nedeniyle çimento ve betona alternatif olarak önemli bir yere sahiptir. Geopolimerler hakkında detaylı bilgi ilerleyen bölümlerde verilmektedir.

Beton üretimi çevreye ciddi zararlar vermektedir. Klinker üretimi için gerekli hammaddelerin çıkarılması hem doğal kaynakların yok olmasını hem de yüksek enerji ihtiyacını beraberinde getirmektedir. Genel olarak, 1 ton klinker üretmek için 4427 MJ enerji gereklidir (Boesch, Koehler ve Hellweg 2009). Hem doğal kaynakların tüketilmesine neden olan hem de sürdürülebilirliği engelleyen betona alternatif olarak geopolimer teknolojisi büyük önem taşımaktadır. Bilindiği üzere 1 ton çimento üretimi için yaklaşık 900 kg CO₂ atmosfere salınır (Benhelal vd. 2013). Bulgularına göre, kendi geliştirdiği volkanik tüf esaslı geopolimer çimento durumunda, CO₂ salınımı sadece 184 kg'dır (Davidovits 2002). Ancak tamamen atık veya yan ürün olarak kabul edilen kaynak malzemeler kullanılarak bu oran daha da düşürülebilir. Bu nedenle geopolimer bağlayıcı sistemlerin kullanılması hem enerji tasarrufuna hem de sürdürülebilirliğe ve doğal kaynakların korunmasına katkı sağlayacaktır.

"Geopolimerler" olarak adlandırılan malzemeler de akademik literatürde "mineral polimerler", "inorganik polimerler", "inorganik polimer camlar", "alkali bağlı seramikler", "alkali kül malzemesi", "toprak çimentosu", hidroseramikler " ve diğer farklı isimlerle tanımlanmıştır (Provis ve van Deventer 2009). Literatürde aynı materyal için birçok farklı terimin kullanılması kafa karıştırıcıdır. Mevcut tez kapsamında geopolimer, alkalilerle alüminosilikat öncüllerinin alkali aktivasyon işlemi sonucunda oluşan bağlayıcı malzeme olarak tanımlanmaktadır.

Geopolimer, dünyanın dikkatini çeken çok popüler bir malzeme olmasına rağmen, inorganik polimerlerin ve dolayısıyla alkali ile aktifleştirilmiş malzemelerin bir alt kümesi olarak düşünülebilir. Alkali ile aktive edilmiş malzeme (AAM), teoride, katı veya çözünmüş bir alkali metal kaynağının katı bir silikat tozu ile reaksiyonundan kaynaklanan herhangi bir bağlayıcı sistemi içeren en geniş biçimde kategorilendirilmiştir (Buchwald, Kaps ve Hohmann 2003; Provis ve van Deventer 2014). Kalsiyum silikat, metalürjik cüruf, doğal puzolan, uçucu kül veya dip külü bu silikat tozu olabilir (Provis ve van Deventer 2014). Bununla birlikte, geopolimerlerin, bağlanma aşamasının ağırlıklı olarak alüminosilikat olduğu ve oldukça koordineli olduğu alkali ile aktive edilmiş malzemelerin bir alt sınıfı olduğu bilinmektedir.

2.1. Geopolimer Tarihçesi

1940'ta bir kilometre taşı makalesi yayınlayan Shi vd. (2011), yapısal uygulamalar için öncüler üzerine kapsamlı araştırmalar gerçekleştirmiştir. Alkali aktivasyonlu cürufun, Portland Çimento Betonuna (PCB) kıyasla yüksek mekanik özelliklere ve düşük su geçirgenliğine sahip olabileceğini göstermiştir. 1950'lerde Glukhovsky (1994) Portland Çimento Betonuna bir alternatif bulmak için eski uygarlık yapılarında kullanılan öncülleri araştırmaya başlamıştır. Araştırmanın bir sonucu olarak, olağanüstü dayanıklılığa sahip eski çimento türlerinin genellikle kalsiyum bakımından düşük ve alkali, Al ve Si bakımından zengin olduğunu fark etmiştir Alkali endüstriyel atıklardan gelen çözeltilerle çeşitli cüruf formlarını bir araya getiren "toprak çimentosu" adlı bir bağlayıcı geliştirmiştir. Bu tarihten sonra alkali aktif malzemelerle ilgili araştırmalar ve gelişmeler ön plana çıkmıştır. Glukhovsky'nin icadı 1960'larda çok çeşitli uygulamalara tanık olmuştur.

1970'lerin sonlarında Joseph Davidovits, bir alüminosilikat tozunun bir alkali çözelti ile reaksiyona sokulmasıyla malzemeler geliştirmiştir (Davidovits 1982; 1991). "Geopolimer" adını vererek bu ürünün patentini almış ve "Pirament, Geopolisem ve Geopolimit" gibi ticari ürünler geliştirmiştir (Davidovits 1994). Çeşitli mühendislik faydaları nedeniyle, alkali ile aktif hale getirilmiş sistemler üzerine çalışmalar, 1980'lerden itibaren küresel olarak artmaya başladı. Sonraki yıllarda tüm dünyada farklı etkinlikler ve konferanslar düzenlenmiştir (Krivenko 1994).

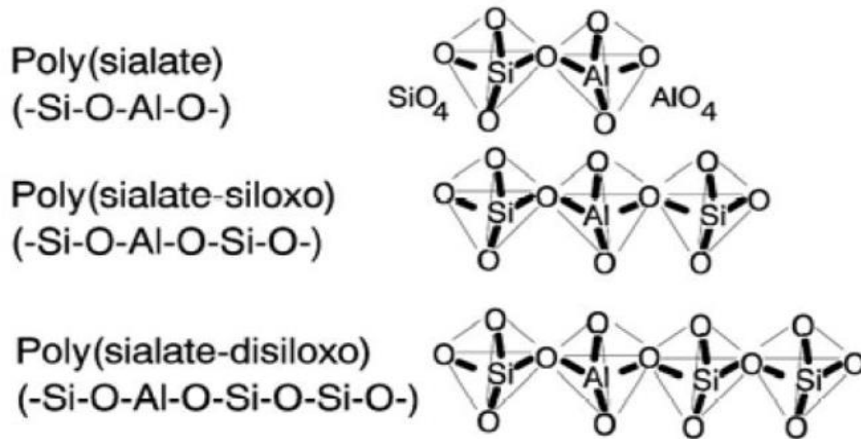
Başka bir öncü raporda, farklı endüstriyel yan ürünler kullanılarak alkalilerle aktif hale getirilen malzemeler hakkında bahsedilmiştir (Wastiels vd. 1994). Uçucu kül bazlı geopolimerler üzerindeki popülerlik, önemli çevresel avantajları nedeniyle önemli ölçüde artmıştır. Uçucu kül hem mekanik hem de dayanıklılık özelliklerini iyileştirmek ve sürdürülebilirliği sağlamak için sıradan Portland çimentosunda uzun yıllardır kullanılmaktadır. Dünyada gelişen teknoloji ve artan nüfustan kaynaklanan enerji ihtiyacının karşılanması için kömür üretiminin hızla arttığı bilinmektedir. Bu üretim sonucunda ortaya çıkan uçucu külün bir kısmı betonda kullanılmakta ve büyük bir kısmı atık olarak depolanmaktadır. Çevre bilinci ve sürdürülebilirlik kavramlarının önemiyle birlikte geopolimer teknolojisindeki gelişmelerle birlikte uçucu kül bazlı geopolimer çalışmaları ivme kazanmış ve bu konu birçok araştırmacının ilgisini çekmiştir.

Son yıllarda, düzenli depolama sahalarında bulunan tüm katı atıkların önemli bir bölümünü oluşturan uçucu külün yanı sıra inşaat ve yıkım alanlarından kaynaklanan atıklar da (tuğla atıkları, kiremit tozu, cam ve beton atıkları) geopolimer geliştirmenin kullandığı malzemeler arasında yer almaktadır.

2.2. Geopolimerin Kimyasal Reaksiyonları

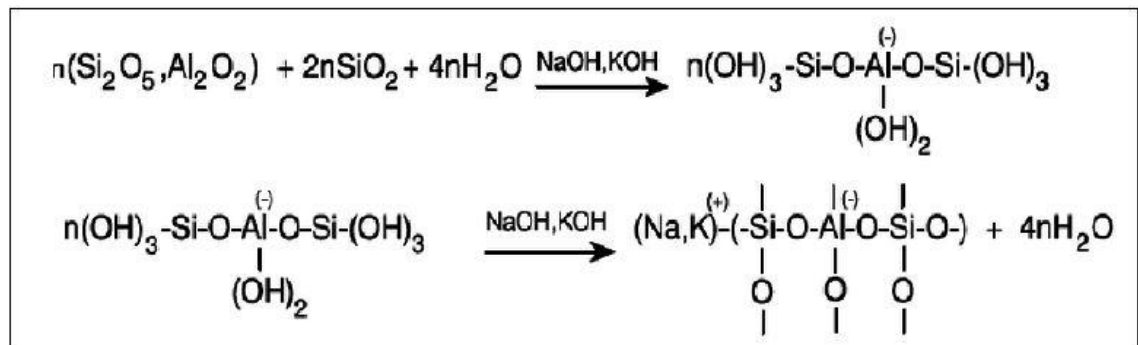
Kimyasal olarak geopolimerler, Portland çimentosundan tamamen farklı bir yönteme dayanmaktadır. Portland çimentosu, esasen kalsiyum silikatların hidrasyonuna dayalı bir hidrolik bağlayıcıdır, geopolimer ise alkali aktivasyonu alüminosilikatların polikondensasyonuna dayanır ve genellikle hiç kalsiyum içermez veya sınırlı kalsiyum içerir. Portland çimentosuna benzer şekilde, kullanılan malzemeler, içerik vb. gibi birçok parametre, geopolimerin taze ve sertleşmiş özelliklerini etkileyerek nihai ürünler üzerinde bir etkiye sahip olabilir.

Davidovits (1984) tarafından siliko-alüminat bazlı geopolimerlerin kimyasal tanımı için 'poli(sialat)' teriminin kullanılmasını önerilmiştir. Sialate, silikon-okso-alüminatın kısaltmasıdır. Ayrıca Poly (sialate) tip (-Si-O-Al-O), Poly (sialate-siloxo) type (-Si-O-Al-O-Si-O) ve Poli(sialat-disilokso) tipi (-Si-O-Al-O-Si-O) olmak üzere 3 tip polisialatı ayırt etmiştir. Bu polisialatların yapıları Şekil 2.1'deki gibi şematize edilebilir.



Şekil 2.1. Polisialatların kimyasal yapıları (Davidovits 1984)

Geopolimerizasyon, alümino-silikat oksitlerin (Si_2O_5 , Al_2O_3) alkali polisilikatlar ile polimerik Si-O-Al bağları veren kimyasal reaksiyonunu içerir. Polisilikatlar genellikle kimya endüstrisi tarafından sağlanan sodyum veya potasyum silikat veya ferro-silikon metalurjisinin bir yan ürünü olarak üretilen ince silis tozudur.

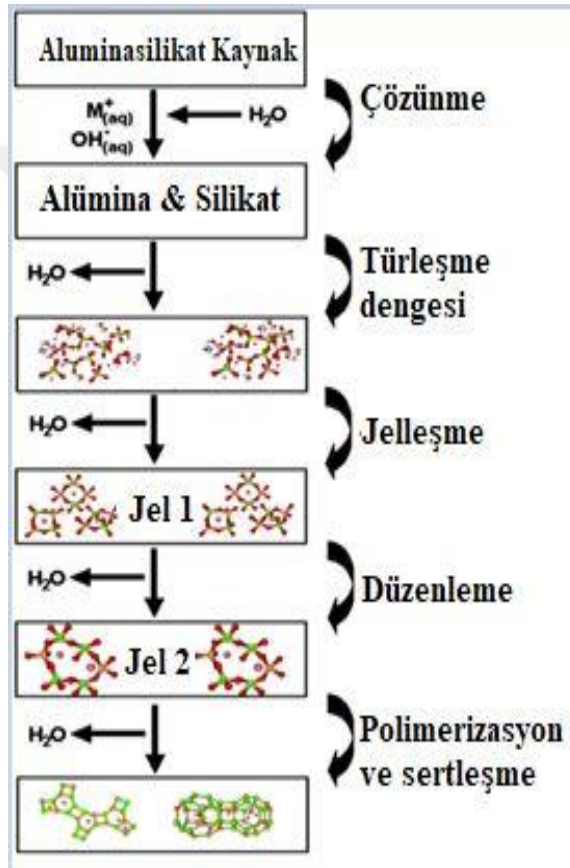


Şekil 2.2. Alkali ile poli (sialat-silokso) halinde polikondenzasyon örneği (Wallah ve Rangan 2006)

Alkali ortam varlığında geopolimerizasyon reaksiyonu oluşur. İşlem üç farklı aşamayı içerir ve ilk karıştırma sırasında alkali çözelti, katı malzemede (metakaolin, uçucu kül, cüruf vb.) bulunan silis ve alüminyum iyonlarını çözer. Yukarıdaki Şekil 2.2’de görüldüğü gibi geopolimer oluşumu sırasında kimyasal reaksiyon sonucunda su açığa çıkar. Açığa çıkan su, geopolimerin yapısında aralarında bağlantı olmaksızın nano gözeneklerin oluşmasına neden olan, kullanılan sıcaklık ve kurutma işleminden dolayı

kürleme fazı ile geopolimerin iç yapısından buharlaşır. Açığa çıkan su sadece karışımın işlenebilirliğini artırabilir, ancak çimentonun hidrasyonundaki rolünün aksine kimyasal reaksiyonda herhangi bir rol oynamaz (Wallah ve Rangan 2006).

Geopolimerler, genellikle alkali ile aktive edilmiş malzeme olarak bilinen bir grup malzemeye dahil edilmiştir. Alkali aktif bağlayıcılar, kullanılan malzemelere ve oluşan reaksiyon fazlarına bağlı olarak bileşim açısından iki ana bölüme ayrılabilir (Palomo, Grutzeck ve Blanco 1999). İlki, Si ve Ca bakımından zengin malzemelerin (yani Portland çimentosu veya cüruf) yumuşak alkalilerle aktivasyonunu içerir. İkincisi, Si ve Al açısından zengin maddelerin (metakaolin, doğal puzolanlar, vb.) etkili alkalilerle aktivasyonunu içerir.



Şekil 2.3. Geopolimerizasyon için kavramsal model (Duxson vd. 2007a)

Şekil 2.3, yüksek alkali bir çözelti kullanarak katı parçacıkların jele dönüştürülmesini içeren basitleştirilmiş bir geopolimerizasyon mekanizmasını göstermektedir (Duxson vd. 2007a). Bu planlama, alüminyum-silikat malzemenin geopolimere dönüştürülmesinin işlenmesini göstermektedir, ancak bu işlem, planlamada gösterildiği gibi basit değildir. İlk işlem (çözünme), hammaddeyi (alüminosilikat kaynağı) alkali bir çözelti kullanarak alüminat ve silikat türlerine dönüştürür. Bu işlem su tüketimi ile tamamlanmaktadır. Artan yüzey alanı veya alüminosilikat malzeme ve yüksek alkali çözelti, yüksek pH'da amorf alüminosilikatların çözünmesi hızlıdır, geopolimerizasyon sürecini hızlandırır. Ek olarak, alüminosilikat ile doyurulmuş sıvı faz,

geopolimer jel oluşumuna yol açar. Suyu serbest bırakma süreci yapının yoğunlaşmasına neden olur. Bu nedenle reaksiyon ve gözenek oluşumunda su çok önemli bir rol oynar. Jel ağını artırarak, jel oluşumu yeniden düzenlenmeye ve yeniden düzenlenmeye devam eder ve son olarak, üç boyutlu alüminosilikat ağ genellikle geopolimerlere atfedilir. Önerilen partikülden jele dönüşüm mekanizması daha sonraki çalışmalarda doğrulanmıştır (Hajimohammadi, Provis ve Van Deventer 2011).

Literatür çalışmaları neticesinde (Palomo vd. 2004; Bakharev 2005; Criado, Palomo, ve Fernández-Jiménez 2005) bu jelin özelliklerinin kürlenme süresi, kürlenme sıcaklığı ve aktivatör türü gibi faktörlerle değişebileceği belirtilmiştir. Daha uzun kürlenme sonucunda silis ürünlerin oluşumu artacağından mukavemet olumlu etkilenmiştir. Alkali aktivatör olarak kullanılan malzemelerden biri olan sodyum silikat, silikon dioksit (SiO_2) içermektedir. Çözünürlüğü yüksek olan silikon dioksitin N-A-S-H jel yapısına katılabileceği belirtilmektedir (Duxson, Mallicoat vd. 2007b; Criado vd. 2007).

2.3. Metakaolin

2.3.1 Kalsine kaolin (KK)

Kaolin, yüzyıllar önce kilin çıkarıldığı Çin anakarası Yaochao Fu yakınlarındaki bir tepenin adıdır. Kaolin, rastgele yönlendirilmiş kaolinit pul yığınlarının gevşek bir kümelenmesinden oluşan yumuşak, beyaz bir plastik kildir. Kaolin mineral grubundaki en yaygın mineral kaolinittir (Mermerdas 2006). Kaolinin fiziksel ve kimyasal özellikleri, endüstriyel bir mineral olarak kullanılabilir olduğunu gösterir. Kaolinin oluştuğu jeolojik koşullar, kaolin yatağının toplam mineralojik bileşimi ve fiziksel ve kimyasal özellikler dahil olmak üzere birçok faktörün kontrolü sağlanır. Kaolin birikintileri tortul, artık veya hidrotermal olabilir. Fakat hemen hemen her durumda kaolin farklı özellikler barındırır. Bu nedenle kullanımını belirlemek için tamamen test edilmeli ve değerlendirilmelidir. Kaolin oluşumu yaygın olmasına rağmen ticari olarak kullanılabilirliği nispeten azdır. Kaolin genellikle beyaz veya beyaza yakın bir renktedir.

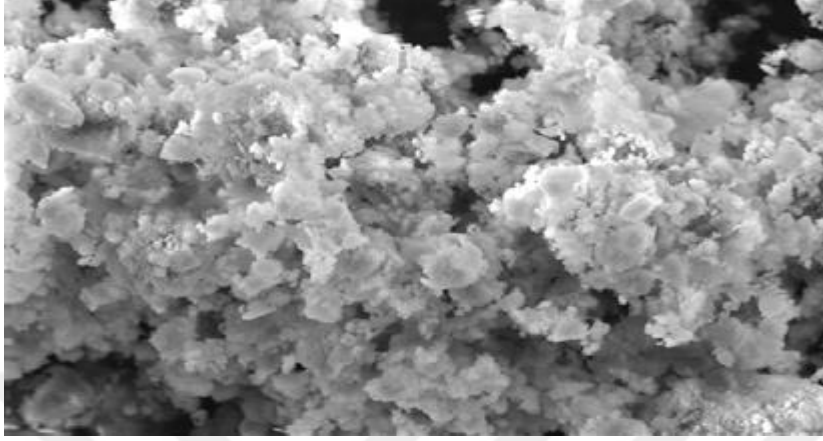
Kaolinin endüstriyel kullanımlarının belirlenmesinde partikül boyutu ve partikül boyutu dağılımı da çok önemlidir. Kaba partiküllü kaolin, ince partikül boyutlu kaolin ile karşılaştırıldığında çok farklı fiziksel ve optik özelliklere sahiptir (Agnello 2005). Önemli olan diğer özellikler, Simektit-Montmorillonit ve Sepiyolit-Paligorskit kıyasla nispeten düşük yüzey alanı ve minimum katman yükü ve düşük yüzey alanıyla ilgili düşük emme kapasitesidir. Yüksek katı konsantrasyonlarında nispeten düşük bir viskozite, bazı kaolinlerin önemli bir özelliğidir. Bu özellikle kağıt kaplama ve boya uygulamalarında önemlidir. Kaolin ürünlerinin viskozitesi, mineral içeriği de dahil olmak üzere çeşitli faktörlere bağlıdır;

- a) Parçacık boyutu
- b) Şekli ve dağılımı
- c) Çözünür tuzların varlığı
- d) Dağılabilirlik

İdeal Kaolin Bileşimi: $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$;

2.3.2. Kaolinin mikroyapısı

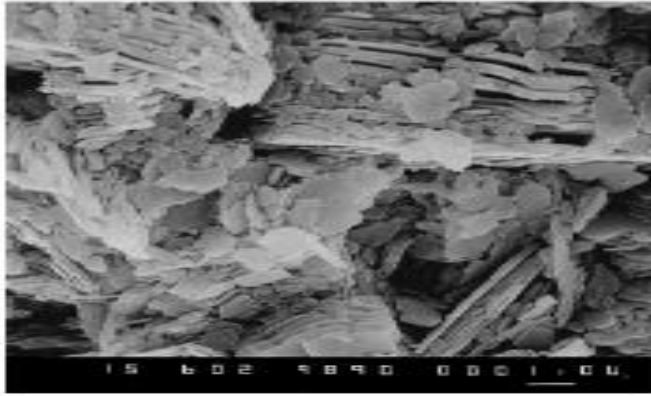
Kaolinit, genellikle tek yönde belirgin bir uzama ile iyi biçimlendirilmiş altı kenarlı pullara sahip dioktahedral 1:1 tabakalı silikat mineralidir. Standart kaolinin tipik mikro yapısı, Şekil 2.4'te gösterilmektedir (Mansour vd. 2010).



Şekil 2.4. Saf standart kaolinin HR-SEM görüntüsü (Mansour vd. 2010)

Yüksek Çözünürlüklü Taramalı Elektron Mikroskobu (HR SEM), amorfizasyon derecesinin kaolinitin puzolanik aktivitesi üzerindeki etkisini gözlemlemek için dijital taramalı elektron mikroskobu kullanılarak yapılmıştır (Shvarzman vd. 2003). Portlandit ve hem işlenmemiş hem de ısıtılmış kaolinit bazlı malzemeler (yerel kaolin kili, standart kaolin, metamax) içeren pastalardaki amorf faz içeriğinin kimyasal aktivite üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Bu etki, kaolin karışımlarındaki amorf faz içeriğinin bir fonksiyonu olarak basınç dayanımı için verilerle gösterilmiştir.

Bazı kil minerallerinin geleneksel ve yeni uygulamalarını incelemiş ve kaolin plakaları ve yığınlarının SEM görüntüsünü göstermiştir (Murray 2000). Yapısal kafeste çok az ikame vardır ve bu nedenle minimum bir katman yüküne ve düşük bir taban değişim kapasitesine sahiptir. Kaolin birikintilerinin çoğunu oluşturan kaolinit kristalleri, plakalar, bazı büyük kitaplar ve vermiküler yığınlarla birlikte sözde altıgendir.



Şekil 2.5. Kaolin plakalarını ve yığınlarını gösteren SEM (Murray 2000)

2.3.3. Kaolin üzerinde kalsinasyon süreci

Kalsine kaolin, ultra ince doğal kaolinin yüksek sıcaklığa ısıtılmasıyla üretilen susuz, termal olarak yapılandırılmış bir alümino-silikat ürünüdür (Al-Akhras 2006). Kalsine kaolin formundaki metakaolin (1990'ların ortalarından beri ticari olarak mevcuttur), kimyasal olarak bağlı suyu uzaklaştırmak ve kristal yapıyı yok etmek için 600 ile 800°C arasında değişen bir sıcaklıkta saflaştırılmış kaolinit kilinin kalsine edilmesiyle üretilir.

Kalsinasyon prosesi, kaolinin partikül şeklini değiştirir ve dayanımı arttırır, oldukça reaktif olan bir metakaolin oluşur. Tamamen kalsine edilmiş kaolin özellikleri şunları içerir:

1. Yüksek renk tutma
2. Mükemmel termal stabilite
3. Enerjiyi ısı olarak dağıtarak UV ışığının absorpsiyonu.

Kalsine kaolinin çoğu uygulamalarında TiO_2 pigmentlerinin %15-25'inin değiştirilir, bu da saydamlığının azaltılmasına katkı sağlar (Agnello 2005). Kalsine kaolinin düşük yüzey hidroksil içeriği, neme duyarlı uygulamalarda mükemmel performans sağlayan düşük nem alımına yol açar.

Kalsinasyon işleminde ısı işlemi değişebilir. Literatürde ısı işlemi kalsine kaolinin kimyasal ve fiziksel özellikleri üzerindeki etkisini ortaya koyan birkaç çalışma bulunmaktadır (Sabir, Wild ve Bai 2001; Shvarzman vd. 2003). Örneğin, farklı kaolin killerinin farklı sıcaklıklarda kalsinasyonu sırasında oluşan dehidrasyon süreci incelenmiştir (Shvarzman vd. 2003). Bunları bulmuşlardır;

1. 450°C'nin altındaki kalsinasyon sıcaklıklarında, kaolin killeri nispeten düşük seviyede dehidrasyon derecesi göstermiştir.
2. 450° ile 570°C aralığında, dehidrasyon derecesi keskin bir şekilde artmıştır.
3. Son olarak, 570 ile 700°C arasındaki sıcaklıklarda kaolinit tamamen dehidrasyonla edilmiştir.

2.3.4. Metakaolin

Metakaolin (MK), saflaştırılmış kaolin veya kaolinit killerinin belirli bir sıcaklık aralığında etüvlenmesi ve yüksek incelikte öğütülmesi ile oluşan reaktif alümino-silikat puzolandır. Metakaolin, hidratlar oluşturmak için kalsiyum hidroksit ile birleştirilebilir. Bu, harç ve betonun özelliklerinin iyileştirilmesine katkıda bulunur. Metakaolinin reaksiyon kapasitesi esas olarak mineral bileşimine, ham kaolin kaynağına ve üretim koşullarına bağlıdır.

Nispeten yeni ve faydalı birçok ürün günümüzde beton endüstrisinin emrindedir ve bunların arasında bir dizi mineral katkı da bulunmaktadır. Ticari, teknolojik ve sürdürülebilirlik argümanları, bu tür mineral katkıların kullanılmasının temelinde olabilir. Öncelikle, teknolojik potansiyeller, yüksek performanslı beton üretimi için silis dumanı, metakaolin ve pirinç kabuğu külü gibi mineral katkıların kullanılmasıyla yansıtılır. Beyaz rengi nedeniyle metakaolin, mimari betonda da uygulama için uygun bir adaydır. Metakaolinin ticari üretimi bu nedenle hızla büyüyor.

2.3.5. Metakaolinin doğası

Metakaolin, ham kaolin veya kaolinit kilinden üretilir. Kimyasal olarak metakaolin, SiO_2 , Al_2O_3 gibi ana bileşenler oksitleri ve daha küçük miktarlarda Fe_2O_3 , TiO_2 , Na_2O ve K_2O oksitlerini kapsar. Metakaolinin çimento ve betonda bir mineral katkı maddesi olarak etkinliği, yüksek SiO_2 ve Al_2O_3 içerikleri tarafından yönetilir (Wild, Khatib ve Jones 1996).

Ticari metakaolin, amorf veya zayıf kristal formdaki $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ (metakaolinit) ve SiO_2 gibi aktif bileşenlerden oluşur (Karaoğlu 2010). Bununla birlikte, kaolin veya kaolinit kilinin dehidrasyon ürünlerinin kesin doğası bir tartışma konusudur. Eskiden metakaolin, amorf alüminyum ve silisyum oksitlerin bir karışımı olarak tasarlanmıştır. Daha sonra, metakaolinin kaolinitin bazı orijinal yapısal özelliklerini hala açığa çıkardığı kanıtlanmıştır. Günümüzde çoğu araştırmacı, metakaolinin amorf ve zayıf kristal formdaki metakaolinitten oluştuğu fikrini paylaşmaktadır.

Daha yüksek sıcaklık rejimi altında kil minerallerinin davranışı, yapıya, kristal boyutuna ve kristallik derecesine bağlıdır (Karaoğlu 2010). Kaolinit, hidroksil gruplarını su şeklinde kaybederek yaklaşık 450°C 'nin üzerinde ayrışır. 900°C veya daha yüksek bir sıcaklıkta, metakaolin, serbest silis oksit ve mullitten oluşan kristalli bileşikler oluşturmak için yapısal değişikliklere uğrar. Optimum sıcaklıklarda (650°C ile 800°C aralığında), kalsine kaolinin ana minerali metakaolinittir. Kalsine kaolinin genellikle metakaolin olarak atfedilmesinin nedeni budur. Kalsine kaolinin puzolanik aktivitesi, metakaolinit içeriği ile artar.

2.3.6. Metakaolinin oluşumu ve reaksiyon mekanizması

MK, kaolinitin kalsinasyonu ile elde edilen termal olarak aktif hale getirilmiş çimentolu bir malzemedir (Mermerdas 2013). Kaolinit, bir kil mineralidir ve kimyasal bileşimi $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ (hidratlı alüminyum disilikat) olarak formüle edilebilir. Tabakalı yapıya sahip silikat minerallerinden biridir.

Kaolinit bakımından zengin kayaçlar (%40-70 kaolinit içerir) kaolin olarak bilinir (Rashad 2013). Kaolin, doğası gereği oldukça stabildir, ancak kalsinasyon işlemi sırasında $650-900^\circ\text{C}$ 'ye ısıtılan kaolin, bağlı hidroksilasyonlarda kütlelerinin yaklaşık %14'ünü kaybeder. Bu işlem, kaolinin yapısının kırılmasına neden olur, böylece kaolin içindeki alümina ve silis tabakaları uzun menzilli düzenini kaybeder. Bu dehidroksilasyon aşamasından sonra MK ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) oluşur.

Ana reaksiyon, MK ve çimento hidrasyonundan türetilen kalsiyum hidroksit (CH) arasında meydana gelir (Kostuch, Walters ve Jones 1993). Bu reaksiyon sırasında ek çimentolu Kalsiyum-Silika-Hidrat (C-S-H) jeli ve kristal ürünler oluşur. MK/CH oranı ve reaksiyon sıcaklığı, kristalin ürünlerin oluşumunu etkiler. MK'nin reaktivite seviyesi hidrasyon reaksiyonunda en önemli faktördür. MK'nin reaktivite düzeyini belirlemek için Chapelle Testi kullanılır ve bu düzey, puzolanların gram başına CH oranı olarak ifade edilir. Sertleştirilmiş betondaki CH miktarının belirlenmesi için termogravimetrik analiz (TG) ve diferansiyel termal analiz (DTA) kullanılabilir. Puzolanların reaktivite oranı, hidratlı Portland çimentosu (PC) puzolan macunlarında reaksiyona girmemiş puzolanın kimyasal tayini ile de değerlendirilebilir (Siddique ve Klaus 2009).

2.3.7. Metakaolinin puzolanik özelliği

Bir puzolan ile kalsiyum hidroksit arasındaki reaksiyona puzolanik reaksiyon denir (Kumar Mehta ve Monteiro 1997). Puzolanın betonun özelliklerini iyileştirdiği kimyasal mekanizma, çimento hidratlandığında kalsiyum hidroksitin açığa çıkmasıyla açıklanmaktadır. Bu kalsiyum hidroksit, kararlı bir çimentolama malzemesi oluşturmak için amorf alüminyum silikatlarla reaksiyona girebilir (Hago, Al-Rawas ve Al-Riyami 2002).

Harç ve beton için puzolanik malzeme olarak metakaolin (MK) formundaki kalsine kaolinin kullanımı son yıllarda büyük ilgi görmüştür. Bu ilgi, üretimi çevreye zarar veren Portland çimentosu (PC) tüketimini en aza indirmek için atıkların ve endüstriyel yan ürünlerin kullanımına yönelik geniş çaplı dikkatin bir parçasıdır. Diğer bir neden ise puzolanik malzemeler içeren harç ve betonun dayanıklılık özelliklerinde önemli artış göstermesidir (Sabir, Wild ve Bai 2001). Çoğunlukla yan ürün olan puzolan olan ve değişken bileşime, saflığa ve reaktiviteye sahip olabilen diğer mineral katkıların aksine, MK üretimi yakından kontrol edilebilir ve böylece daha yüksek derecede saflık ve puzolanik reaktivite elde edilebilir (Brooks ve Megat Johari 2001).

Başlangıçta puzolan terimi, su varlığında ortam sıcaklıklarında kireçle reaksiyona giren doğal olarak oluşan volkanik küller ve kireçlenmiş topraklarla ilişkilendirilmiştir (Sabir, Wild ve Bai 2001). Son zamanlarda terim, ince bölünmüş formda ve su varlığında, çimento benzeri özelliklere sahip bileşikler oluşturmak için kimyasal olarak kalsiyum hidroksit (CH) ile reaksiyona girecek olan tüm silisli/alüminli malzemeleri kapsayacak şekilde genişletilmiştir.

Ana reaksiyon, su varlığında metakaolinit, $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$ veya AS_2 ile çimento hidrasyonundan türetilen CH arasındadır. Bu reaksiyon, kalsiyum alüminat hidratlar ve alümino-silikat hidratlar (yani, C_2ASH_8 , C_4AH_{13} ve C_3AH_6) içeren kristal ürünlerle birlikte C-S-H jeli oluşturur (Sabir, Wild ve Bai 2001). PC'nin MK ile optimum yer değiştirme seviyeleri, PC-MK sisteminde oluşan farklı reaksiyon ürünlerinin (bileşime bağlı olarak) sıcaklık ve reaksiyon süresinin doğası ve oranındaki değişikliklerle ilişkilidir.

Literatürde metakaolinin puzolanik etkisi üzerine çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Örneğin; Metakaolin, sıradan Portland çimentosu (SPC) için kısmi bir ikame olarak kullanıldığında, metakaolinin, Portland çimentosundan elde edilenlere benzer bileşim ve yapı olarak kalsiyum-silikat-hidrat oluşturmak üzere portlandit ile reaksiyona girebildiği gözlenmiştir (Ramlochan, Thomas ve Gruber 2000). Araştırmalar ayrıca, Çin kilinden üretilen metakaolin için, oluşan kalsiyum-silikat-hidratın düşük bir Ca/Si oranına (0,8 ila 1,5 arasında) sahip olduğunu ve bu da bunların gözenek çözeltisinden alkali iyonlarını yakalamalarına izin verdiğini göstermiştir. Gözenek çözeltisindeki alkalinite (ve ilişkili pH'da) azalma ve portlanditin tükenmesi, alkali-silis reaksiyonuna (ASR) bağlı genleşmeyi azaltmada puzolanların en yararlı etkileri olarak kabul edilir. Bunun ışığında, betondaki alkali-silis genleşmesini kontrol etmek için metakaolin kullanma potansiyeli rapor edilmiştir.

MK katkılı çimento hamurlarında puzolanik reaksiyon oranı incelenmiştir MK katkılı çimento hamurlarının puzolanik reaksiyonunun ilerlemesini (Poon vd. 2001). MK katkılı çimento macunlarının puzolanik reaksiyonunun ilerlemesini su-bağlayıcı oranı

(w/b) 0,30 olarak belirlenmiştir. MK katkılı çimento macunlarının basınç dayanımı, gözeneklilik ve gözenek boyutu dağılımı, pozolanik reaksiyon derecesi ve $\text{Ca}(\text{OH})_2$ içeriği üzerine bir dizi test gerçekleştirilmiştir. SD ve UK katkılı çimento macunlarından elde edilen sonuçlarla ve diğer araştırmacılar tarafından daha yüksek w/b oranlarına sahip MK pastaları için elde edilen sonuçlarla karşılaştırmalar yapılmış ve aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir (Poon vd. 2001).;

- a) Erken yaşlarda MK katkılı çimento hamurlarında pozolanik reaksiyon ve CH tüketimi oranları SD veya UK katkılı çimento hamurlarına göre daha yüksektir. Bu, bu çalışmada kullanılan MK'nin, 0,30 w/b oranına sahip çimento macunlarında kullanıldığında SD ve UK'den daha yüksek bir başlangıç reaktivitesine sahip olduğunu göstermiştir.
- b) Yüksek ilk reaktivitesi nedeniyle, MK, SD ile karşılaştırıldığında yüksek performanslı çimento pastaları için daha yüksek oranda basınç dayanımı gelişimi ve gözenek yapısı iyileştirmesi ile sonuçlanmıştır. Ayrıca, kontrole göre daha düşük cıva ile girilen gözeneklilik ile sonuçlanmıştır.
- c) MK pastalarındaki pozolanik reaksiyon hızı 28 günlük kürlenmenin ardından yavaşlamıştır. Bundan sonra, MK pastalarının gözenek boyutu dağılımı biraz kabalaşmıştır. Bu kabalaşma, daha yüksek bir w/b oranına sahip bir hamurdan daha düşük bir w/b oranına sahip bir çimento hamurunda daha sonraki bir yaşta meydana gelmiştir. Bununla birlikte, MK'nin pozolanik reaksiyonu 90 günlükken hala tamamlanmamıştır ve MK'nin yaklaşık yarısı reaksiyona girmemiştir. SD pastalarının pozolanik reaksiyon derecesi ve CH tüketim düzeyi, 28-90 günlük yaşlarda MK pastalarınıninkine ulaşmış veya aşmıştır.

2.4. Silis Dumanı

Silis dumanı, silikon metal veya ferrosilikon alaşımlarının üretimi sırasında bir elektrik ark fırınında kömür veya kok ve odun yongaları ile yüksek saflıktaki kuvarsın indirgenmesinden kaynaklanan bir yan üründür. Fırınlardan çıkan gazlardan yoğunlaşan silis dumanı, çok yüksek amorf silikon dioksit içeriğine sahiptir ve çok ince küresel parçacıklardan oluşur.

Ferrosilikon alaşımları, %61-98 nominal silikon içerikleriyle üretilmektedir. Silikon içeriği yüzde 98'e ulaştığında ürüne ferrosilikon yerine silikon metal deniyor. Alaşımdaki silikon içeriği arttıkça, silis dumanındaki SiO_2 içeriği artacaktır. Silis dumanının yayınlanmış verilerinin ve sahada kullanımının çoğu, %75 veya daha yüksek ferrosilikon alaşımlarının üretiminden alınmıştır. %50 ferrosilikon alaşımlarının üretiminden elde edilen silis dumanı kullanılarak sınırlı uygulamalar yapılmıştır (ACI 234R-96 1996).

Çoğu silis dumanının rengi açıktan koyu griye değişir. SiO_2 renksiz olduğu için renk, tipik olarak karbon ve demir oksit içeren silis olmayan bileşenler tarafından belirlenir. Genel olarak, karbon içeriği ne kadar yüksekse, silis dumanının rengi o kadar koyu olur. Silis dumanının karbon içeriği, üretim süreciyle ilgili birçok faktörden etkilenir:

1. Odun yongası bileşimi,
2. Odun yongası kullanımına karşı kömür kullanımı,

3. Fırın sıcaklığı, fırın egzoz sıcaklığı
4. Üretilen ürünün türü (metal alaşımı),

Sıkıştırma derecesi de rengi etkileyebilir. Sıradan bir Portland çimentosu veya uçucu kül için 250-450 m²/kg ile karşılaştırıldığında, silis dumanı partiküllerinin ortalama çapı 0,1 µm'dir ve özgül yüzey alanı yaklaşık 20000 m²/kg'dır. Silis dumanı, üretilen silikon alaşımının türüne bağlı olarak %85-95 SiO₂ içerir. İşlemden kullanılan iki ana hammaddenin (kuvars ve kömür) yüksek saflığı nedeniyle kimyasal bileşimi genellikle çok sabittir. Karbon içeriği genellikle %2'den azdır (Delage ve Aitcin 1983).

2.4.1. Silis dumanı formları

Silis dumanı ticareti dört tipte yapılır (Shakouri 2017):

- a) Toz veya yoğunlaştırılmamış silis dumanı: Yoğunlaştırılmamış silis dumanının yığın yoğunluğu, normal Portland çimentosuna ($\square 1000-1200 \text{ kg/m}^3$) kıyasla 350 kg/m^3 'e kadar çıkabilir, çok daha düşük yoğunluğa sahiptir. Düşük yığın yoğunluğu, tozlu ve yapışkan formu bazı taşıma ve nakliye sorunlarına neden olur. Yoğunlaşmamış silis dumanı, harmanlanmış çimento, harç ve tamir harçlarında sınırlı kullanıma sahiptir.
- b) Yoğunlaştırılmış veya sıkıştırılmış silis dumanı: Yoğunlaştırılmamış silis dumanının yoğunlaştırılmasıyla yığın yoğunluğu $\square 480-720 \text{ kg/m}^3$ 'e yükselir, bu nedenle önceden belirtilen sorunlardan bazıları çözülür. Yoğunlaştırma işlemi, yoğunlaştırılmamış silis dumanının depolandığı siloların tabanından hava üflenmesiyle gerçekleştirilir. Bu yöntemle silis dumanı parçacıkları birbirleriyle sürtünür ve bunların yüzeyinde oluşan van der Waals kuvveti agregasyonu ve daha yüksek yığın yoğunluğu meydana getirir. Son parçacıklar küçük boncuklara benzemektedir ve daha az toz üretimi gerçekleşir.
- c) Peletlenmiş Silis Dumanı: Yoğunlaştırılmamış silis dumanı, su ile karıştırılır ve doğrudan beton ve diğer karışımlarda kullanılması çok zor olan 10-25 mm çaplı disklerde peletlenir. Silis dumanı katkılı çimento edinebilmek için çimento klinkeriyle birlikte tanelendirilebilir. Peletlenmiş silis dumanının yığın yoğunluğu yaklaşık 1000 kg/m^3 'tür.
- d) Bulamaç haline getirilmiş silis dumanı: Yoğunlaştırılmamış silis dumanı ile ilgili sorunların giderilmesi için bir başka yöntem, silis dumanını kütlenin %50-60'ı kadar suyla karıştırmaktır. Bu tür silis dumanındaki yığın yoğunluğu $\square 1300-1400 \text{ kg/m}^3$ 'e kadar artış gösterebilir, bu da nakil işlemini ve sürecini daha ekonomik hale getirir. Geciktiriciler, su azaltıcılar ve süperplastikleştiriciler gibi kimyasal katkıları da bulamaç haline gelmiş silis dumanına ilave edilebilir.

2.4.2. Silis dumanının bileşimi ve kimyasal özellikleri

Silis dumanının yüksek reaktivitesi, %85-98 amorf silis içeriğinden kaynaklanmaktadır. Demir, alüminyum, kalsiyum, magnezyum, potasyum, kükürt, sodyum ve kristalin silisyum oksitleri gibi diğer bileşikler silis dumanında çok küçük miktarlarda bulunur (Bapat 2012).

2.4.3. Geopolimerlerde silis dumanı kullanımı

Uçucu kül geopolimerlerine silis dumanı eklenmesinin etkisini değerlendirilmiş, yüksek sıcaklıkta kürlenene bu matrisi diğer araştırmalara göre test edilmiştir (Okoye, Durgaprasad ve Singh 2016). Üretilen betonların taze özellikleri ile çekme ve basınç dayanımları belirlenmiştir. Silis dumanının genel olarak mukavemet sonuçlarını arttırdığı bulunmuştur.

Hem geopolimerik sistem içinde silis dumanı kullanarak birleştirilmiş hem de bu sistemi yüksek sıcaklıklara maruz kalmaya test edilmiştir (Duan, Yan ve Zhou 2017). Beklendiği gibi, silis dumanının sonuçtaki matrisin iyileştirilmesinde faydalı olduğu bulunmuştur. Bununla birlikte, daha yüksek sıcaklıklara maruz kalma, eklenen silis dumanına bakılmaksızın, bir güç kaybı ve fiziksel davranışta bir azalma sergilenmiştir.

Uçucu küllü geopolimer betona silis dumanının dahil edilmesini incelenmiştir ve nihai ürünün klorür ve sülfürik saldırılara karşı direncini araştırılmıştır (Okoye, Prakash ve Singh 2017). Mukavemet ve ağırlık kayıplarındaki bozulma oranları, fabrikasyon betonlar için test edilmiş ve sıradan bir Portland çimentosu beton karışımı ile karşılaştırılmıştır. Genel bir sonuç olarak, silis dumanının varlığı, kimyasal çözeltilere maruz kaldıktan sonra ağırlık kaybı ve mukavemet performansı açısından bir iyileşme ile sonuçlanmıştır.

2.5. Alkali Aktivatör

Alkali aktivatörler açısından, herhangi bir güçlü alkali çözelti, geopolimerlerin üretimi için kullanılabilir (Rowles 2004). Piramitleri eski günlerde inşa etmek için sırasıyla alkali aktivatör ve kaynak malzeme olarak kireç çözeltisi $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ve volkanik külün kullanıldığını bildirmiştir (Davidovits 1987). Ayrıca $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 'nin geopolimer üretimi için alkali aktivatör olarak kullanımını incelemişlerdir (Alonso ve Palomo 2001). Günümüzde, geopolimerlerin üretiminde alkin aktivatörleri olarak sodyum hidroksit ve sodyum veya potasyum hidroksit ve potasyum silikat solüsyonlarının bir kombinasyonu yaygın olarak kullanılmaktadır (Nematollahi 2017).

Geopolimer üretmek için en çok kullanılan çözelti, sodyum hidroksit ile sodyum silikat veya potasyum hidroksit ile potasyum silikat kombinasyonudur (Palomo, Grutzeck ve Blanco 1999). Alkali çözeltinin rolü, bağlayıcı malzemeyi aktive etmektir. Reaksiyon hızı, alkali sıvıda çözünür silikatın varlığıyla artar, bu nedenle sodyum hidroksite sodyum silikatın eklenmesi, yalnızca çözeltinin maliyetini düşürmekle kalmaz, aynı zamanda aktivasyonu da hızlandırır. Düşük konsantrasyonlu bir aktivatör olarak sadece sodyum hidroksit kullanılması durumunda, bu, OH^- iyonlarının miktarının bağlayıcı malzemeden Si^{4+} ve Al^{3+} 'ı tamamen çözmesine ve Na^+ 'da ağırlık polimerizasyonunu tamamlamak için yetersizliğe neden olur. Bunlar, bağlayıcı malzemenin tepkimemiş kısımlarına ve dolayısıyla mukavemette azalmaya neden olur (Yip vd. 2008).

2.5.1. Farklı aktivatör molaritelerinin etkisi

Mukavemet özellikleri hem SPC hem de geopolimer kompozitler alanlarında pek çok deneysel araştırmada incelenen ana parametreler arasında sınıflandırılır. Geopolimer alanındaki araştırmalarla ilgili olarak, ana malzemeler, agregalar, kütleme detayları ve kimyasal aktivatörler gibi birçok farklı faktör kullanılarak dayanım parametreleri çalışılmıştır. Sodyum hidroksit ve sodyum silikat karışımı, geopolimerizasyon sürecini

başlatmak için bir aktivatördür. Çeşitli molaritelere sahip uçucu kül geopolimerinin mekanik ve dayanıklılık özellikleri üzerine bir araştırma yapılmıştır (Chindaprasirt, Chareerat ve Sirivivatnanon 2007b). Molaritelerdeki farkın, imalat numunelerinin gücü üzerinde hafif bir etkiye sahip olduğu sonucuna varmışlardır.

Farklı sodyum hidroksit molaritelerinin uçucu kül geopolimer kompozitlerinin mukavemet ve sızdırma özellikleri üzerindeki etkisini incelenmiştir. Bulgular, hidroksit konsantrasyonunun artırılmasının, numunelerin mukavemetinde ve sızma davranışında belirli bir iyileşme sağladığını belirtmiştir (Álvarez-Ayuso vd. 2008).

Üretilen kompozitlerin davranışı üzerindeki farklı molaritelerin etkisi üzerine bir çalışma yapılmıştır (Chindaprasirt vd. 2009). Mukavemet özelliklerini anlamak için harçlar üretilirken, üretilen matrisin mikroyapısal bileşimini ve kimyasal yapısını incelemek için macun numuneleri sentezlenmiştir. Araştırmalarında, incelenen karışımların daha iyi anlaşılmasını sağlamak için düşük molaritelerden yüksek molaritelere geçiş yapılmıştır. Temel sonuçlar, en iyi sonuçların orta molaritelerden olduğunu göstermiştir. Ayrıca ana malzemeler olarak farklı endüstriyel yan ürünler kullanıldığından, yapılan testlerle birlikte incelenen molariteler, fabrikasyon matrisin türü ve mukavemetinin büyük ölçüde ana malzemelerin türüne bağlı olduğunu belirtmiştir.

Molarite, geopolimerik matrisin mukavemetini ve kimyasal stabilitesini etkileyen önemli bir faktördür, bu arada bu faktör, karıştırma süresi, hidroksitin silikata oranı ve bunun tersi gibi diğer faktörlerle güçlü bir şekilde ilişkilidir (Komnitsas, Zaharaki ve Perdikatsis 2009). Bu faktörler birlikte sonuç matrisi etkiler, ayrıca sodyum hidroksiti sentezlemek için kullanılan su türü çok önemlidir, eğer ikinci reaksiyon dikkate alınırsa, daha spesifik olmak gerekirse, örneğin suyun saflığı çok önemli bir faktördür. Geopolimerik reaksiyonun şeklini ve kararlılığını etkiler. Dahası, sodyum yerine potasyum kullanılması bu reaksiyonda önemli bir faktördür.

Farklı karıştırma prosedürleri ile birlikte sodyum hidroksit molaritelerini değiştirme etkisini gerçekleştirmiş, geopolimerik matrisi oluşturan aktivatörleri farklı şekillerde karıştırmışlardır (Rattanasak ve Chindaprasirt 2009). Bu çalışmada süzme davranışı ve mukavemet özellikleri incelenmiştir. Bu araştırmanın en önemli bulgusu, kimyasal aktivatörlerin eklenmesinin zamanlamasının, fabrikasyon numunelerin performansını etkileyen ana faktör olarak kabul edilebilmesidir.

Bazı deneysel araştırmalara göre, NaOH molaritesindeki artış, üretilen numunelerin basınç dayanımının artırılmasından, geopolimer matrisin içinde kristal fazın oluşturulmasından ve geopolimer kompozitlerin üretim sürecinde meydana gelen kimyasal reaksiyonla ilgili diğer özelliklerin artırılmasından sorumludur. Çeşitli NaOH molariteleri kullanmanın üretilen örneklerin mukavemeti ve mikroyapısal karakterizasyonu üzerindeki etkisini test edilmiştir (Somna vd. 2011). Büyüyen molaritenin güç artışı sağladığını keşfetmişlerdir. Dahası, bulguları, aşırı dozda sodyum hidroksitin numunelerin güç kazanımını bozabileceğini belirtmiştir.

Geopolimerlerin kimyasal reaksiyonu ile temas halinde olan parametrelere odaklanarak, uçucu kül kompozitler için mühendislik uygulamalarına uygun bir karışım tasarlamayı amaçlanmıştır (De Vargas vd. 2011). Kimyasal aktivatörlerin içindeki oranlar farklılaştırılmış ve varyasyonlarının etkisi incelenmiştir. Sonuçlar deneysel olarak elde edilmiş ve bir bilgisayar simülasyon prosedürü gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar,

sodyum oksidin silikon okside oranının, üretilen numunelerin mukavemetini ve iç yapısını kontrol eden ana faktör olarak kabul edildiğini ortaya koyulmuştur. Ayrıca, mikroyapısal analizler kararlı ve kompakt bir matris sistemi gösterdi ve sentezlenen matris için uygun reaktivite derecesini gösteren kristalli bir faza ek olarak üretilen numuneler için kabul edilebilir derecede geopolimerizasyon gözlemlenmiştir.

Uçucu küllü geopolimer harçların hem kür sıcaklıklarının hem de farklı molaritelerin fiziksel özellikleri ve fiziksel özellikleri üzerindeki etkisini araştırılmıştır (Görhan ve Kürklü 2014). Ana hedefleri, farklı sodyum hidroksit konsantrasyonlarını, deneylerin kürlene süresine veya kürlene sıcaklığına önem vermeden, sonuçta elde edilen matrisin genel davranışı üzerindeki etkisini ortaya çıkartmıştır. Dayanım açısından yavaş dayanım sonuçları elde etmelerine rağmen, NaOH konsantrasyonunun önemini ispatlamış ve incelenen özellikler üzerindeki etkisini kesinleştirmişlerdir.

2.6. Bakteri Kullanarak Kendini İyileştirme

Beton, diğer inşaat malzemelerine göre mukavemeti, dayanıklılığı ve düşük maliyeti nedeniyle inşaat en çok kullanılan mühendislik malzemesidir. Betonun en büyük dezavantajı, düşük mukavemet ve dayanıklılıkla sonuçlanan mikro çatlaklarda ilerlemeye ve birleşmeye yatkın hale getiren düşük çekme mukavemetidir (Kumar Mehta ve Monteiro 2006).

Kimyasal büzülme, kuru büzülme, otojen büzülme, nispeten düşük gerilme mukavemeti vb. nedenlerle betonda kaçınılmaz olarak çatlaklar mevcuttur. Potansiyel olarak zararlı maddeler içeren sıvı ve gazların taşınması için kolay bir yol sağladıkları için bu çatlaklar betonun dayanıklılığını bozmaktadır. Mikro çatlaklar büyür ve donatıya kadar ulaştıklarında sadece betonun kendisine zarar vermekle kalmaz, aynı zamanda güçlendirici çelik çubuklar da korozyona uğrar. Bu nedenle çatlakları kontrol edilmesi ve bir an önce iyileştirilmesi oldukça önem arz etmektedir. Bunlara ek olarak, çatlaklı bölgeye erişim zor olmasına rağmen, bu tür işlemler sermaye ve iş gücü gerektirmektedir. Antropojenik faaliyetler ve daha fazla onarım bakım malzemesi kullanımı nedeniyle çevreye zararları bulunmaktadır. Ancak günümüzde beton yapıların uygun arıtma ve bakım maliyetleri oldukça yüksektir. Avrupa'da yıllık inşaat bütçesinin yaklaşık% 50'sinin mevcut altyapıların rehabilitasyonu ve onarımına harcandığı tahmin edilmektedir (van Breugel 2007). Bu nedenle, betondaki çatlakların kendi kendine iyileşmesi, düşük bakım maliyetlerine ve beton yapıların daha uzun hizmet ömrüne katkı sağlamaktadır.

Bakterilerle kendi kendini iyileştirme, bakterilerin neden olduğu karbonat çökeltmesi ile otonom çatlakların kapatılması, dünya çapında birçok araştırmacı tarafından yoğun olarak incelenen çevre dostu bir mekanizmadır (Souradeep, Dai ve Wei 2017). Bu yöntem aynı zamanda, mikrobiyal kaynaklı karbonat çökeltmesi olarak bilinir. Beton çatlaklarını iyileştirmek için bakteri kullanırken, aşağıdaki üç husus kapsamlı bir şekilde değerlendirilmelidir:

1. Taşıyıcı malzemelerin kendilerinin özellikleri ve bakteriyel sporların aktivitesi üzerindeki etkileri;
2. Taşıyıcıların eklenmesinin betonun işlenebilirliği üzerindeki etkisi
3. Bakterilerin beton çatlağı kendi kendine iyileşmesi üzerindeki etkisi.

Mikrobiyal kaynaklı karbonat çökeltme tekniği ile beton çatlakların etkili bir şekilde kendi kendini iyileştirmesinin anahtarı, uygun bakteri taşıyıcılarının seçiminde yatıyor gibi görünmektedir.

Bakterilerle kendi kendine iyileşme, *Bacillus* türü, yüksek alkali ortama ve neme tolerans ve betonda kendi kendini iyileştirme maddesi olarak kullanılmasını uygun kılan sporlar oluşturma kapasitesi gibi özelliklere sahiptir. Bu nedenle *Bacillus*, araştırma çalışmalarında kalsit çökeltmesi için biyo-madde olarak en yaygın şekilde kullanılmıştır (Jonkers 2011; Wang vd. 2014; Wang vd. 2012)

Bazı mikro organizmalar, kalsiyum karbonatı gerçek analiz yoluyla çökeltme kabiliyetine sahiptir. Literatürün kapsamlı bir incelemesi, belirli bakteri uygulamalarını ortaya çıkarmıştır. *Bacillus Subtilis* bakterileri, hafif agrega ve grafit nanoplateletler ile betonun mukavemetini artırabilir (Khaliq ve Ehsan 2016). Pirinç kabuğu külü betonunda *Bacillus Aerius* bakterisi incelenmiş ve betonun dayanıklılığının arttığı gözlenmiştir (Siddique vd. 2016). *Bacillus Megaterium* bakterileri betonda kullanılmış ve sonuçlar basınç dayanımında %24 artış göstermektedir (Andalib vd. 2016). *Bacillus Sphaericus* tarafından betonda kalsiyum karbonatın birikmesi betonun dayanıklılığını artırır (Wang vd. 2014). Uçucu küllü betonda kullanılan *Sporosarcina Pasteurii* bakterileri, kendi kendini iyileştirme etkisiyle uçucu kül betonunun mukavemetinde ve dayanıklılığında gelişme göstermiştir (Chahal, Siddique ve Rajor 2012). Silis dumanı betonunda kullanılan *Sporosarcina Pasteurii* bakterisi, silis dumanı betonunun kendi kendini iyileştirme etkisiyle mukavemetinde ve dayanıklılığında iyileşme olduğu bulunmuştur (Chahal, Siddique ve Rajor 2012). *Bacillus Sphaericus* bakterisi betonda yüzey işlemini kontrol etmek için kullanıldı ve sonuçlar bakteriyel karbonat çökeltmesinin beton için alternatif bir yüzey işlemi olarak kullanılabileceğini ortaya koydu.

Jonkers vd., *Bacillus* sporlarının kendi kendini iyileştirme amacıyla betonda yaşayabilirliğini inceleyen ilk kişilerdi (Jonkers vd. 2010). Sonuçlar, çimentonun hidrasyonu, çimento hamurunun gözenek boyutunu azaltan ve sporları ezen sürekli bir süreç olduğundan, betonun yaşı arttıkça sporların canlılığının önemli ölçüde azaldığını göstermiştir. Bu sorunun üstesinden gelmek için, birkaç araştırmacı, beton karışımına eklenmeden önce sporların koruyucu bir matris içinde kapsüllenmesini veya hareketsizleştirilmesini önermiştir. Genel olarak, etkili kendi kendini iyileştirme eyleminin sağlanması, biyo-maddelerin etkisi, kapsül ve genel sistem tasarımı gibi farklı yönlerin optimizasyonunu ve değerlendirilmesini gerektirir. Bu incelemede ele alınan temel hususlar (Gupta, Pang ve Kua 2017);

1. Kapsül malzemesi ve biyo-maddelerin kapsüllenmesi,
2. Beton karıştırma sırasında kapsüllerin hayatta kalması,
3. Biyo-madde veya kapsül ilavesinin beton özelliklerine etkisi,
4. Sızdırmazlık özelliği ve mekanik dayanıklılık özelliklerinin geri kazanımı.

Poliüretan köpük, gözenekli cam boncuklar, SiranTM, kizelgur, gözenekli genişletilmiş kil parçacıkları, silissol jelleri, hidrojel gibi çeşitli yumuşak veya gözenekli malzemeler, hafif agregalar bakteriyel sporların kapsüllenmesi için kullanılmıştır. Bu yaklaşımlar gerçekten sporları sert beton ortamından korumuştur. Birkaç yüz mikrona kadar olan çatlakların tamamen kapatılabildiği ve mikrobiyal kaynaklı karbonat çökeltme

teknikleriyle kendi kendini iyileştiren beton için gözle görülür mekanik geri kazanımın da fark edildiği bildirilmiştir (Jadhav vd. 2018).

2.6.1. Bakteri kullanılarak yapılmış çalışmalar

Doğal ortamda kalsiyum karbonatın çökmesi ideal olarak kalsiyum iyonlarının konsantrasyonu, çözeltinin pH'ı, çözünmüş inorganik karbon konsantrasyonu ve çekirdeklenme alanlarının mevcudiyetinden etkilenir (Hammes ve Verstraete 2002). İlk üç şart somut matriks ile ilgili iken sonuncusu bakteri hücrelerinin kendisi tarafından gerçekleştirilir. Bakteriyel çökeltme, kalsiyum laktat gibi kalsiyum bileşiğinin dönüşümü veya (üreolitik) bakteriyel metabolizma ile ürenin hidrolizi gibi farklı yollarla sağlanabilir. İlk mekanizmada, çatlak açıklıkları oksijenin betonun içine girmesine sebep olur ve çatlak yüzeyler boyunca bakteriler kalsiyum laktatı kalsiyum karbonat ve karbondioksit çevirir. Çevrede portlandit parçacıkları olduğunda, üretilen karbondioksit ile reaksiyon daha fazla kalsiyum karbonat oluşturur ve bu da iyileşmeyi gerçekleştirir. Bu nedenle, taze beton durumunda hala susuz kalsiyum hidroksit partikülleri olduğunda bu mekanizmanın daha verimli olacağı anlaşılabılır. İkinci yol, ürenin amonyum ve karbonata hidrolizi yoluyla kalsiyum karbonatın çökmesidir. Bakteriler *Bacillus Sphaericus*, proste katalizör görevi gören enzim üreaz üretmektedir. Negatif yüklü bakteri hücresi, kalsiyum karbonatı çökeltmek için üretilen karbonat ile reaksiyona girmek istediğinden kalsiyum nitrat gibi bir kalsiyum kaynağından kalsiyum iyonu çeker. Bu nedenle, bakteri yoluyla kendi kendini iyileştirme, bu mekanizmalardan herhangi biri ile sağlanabilir, ancak betonda iyileşmenin verimliliği nemin varlığı, çatlak büyüklüğü, betonun yaşı gibi birçok başka faktöre bağlıdır.

2.6.1.1. Biyo-maddelerin betona doğrudan eklenmesiyle iyileştirme

Kendi kendini iyileştiren betonun geliştirilmesi için bakteri sporlarının uygulanmasının uygunluğunu test edilmiştir (Jonkers ve Schlangen 2007). Çimento taşına ilave edilen üç bakteri türü test edilmiştir: *Bacillus cohnii*, *Bacillus halodurans* ve *Bacillus pseudofirmus*. Çimento taş yongaları, maya ekstraktı ve pepton bazlı ortamda kürlenmiş ve daha sonra mekanik özellikleri test edilmiştir. Bakteri içeren numuneler ile kontrol numuneleri arasında önemli bir fark görünmediği gözlemlenmiştir. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri, 12 günlük inkübasyondan sonra kalsiyum karbonat kristallerinin çökmesini kanıtlamıştır. Bunlara ek olarak, ön araştırmada, organik karbon kaynakları veya bakteriler için yiyecekler dışarıdan temin edilmiş ve ortamdaki numuneler sertleştikten sonra çimlenme görülmüştür. Mineral öncü bileşiğiyle birlikte maya özütü ve pepton ilavesinin olası etkisi Jonkers tarafından daha sonraki bir çalışmada gerçekleştirilmiştir (Jonkers vd. 2010). Kendi kendini iyileştirme eyleminin gerçekleştirilebilmesi için birincil zorluk, yüksek alkali beton ortamında bakterilerin hayatta kalmasıdır. Jonkers vd. doğrudan betona eklenirken canlı kalabilen bakteri türleri tarafından karbonat çökeltme potansiyelini araştırmıştır (Jonkers vd. 2010). İki tür spor oluşturan alkalifilik bakteri *Bacillus pseudofirmus* ve *Bacillus cohnii* test edilmiştir. Kalsiyum asetat ve kalsiyum laktat, mineral öncü bileşik olarak deneyler gerçekleştirilmiştir. Sadece kalsiyum laktatın hafif bir dayanım artışı ile sonuçlanmıştır. Örneklerde 20–80 mm boyutunda kalsiyum karbonat kristalleri gözlenmiş ancak çökelti sadece genç örneklerde (7 gün) görülmüş ve 28 günlük örneklerde görülmeyeceği ortaya çıkmıştır. Bunun nedeni, betonun alkali ortamına bağlı olarak canlı bakteri sporlarının azalması ve Luo vd. (Luo, Qian ve Li 2015) tarafından da desteklenen gözenek boyutunun

azalması olabilir. Bununla birlikte, bu mekanizmanın üreaz bazlı yaklaşımdan daha iyi olduğu iddia edilmektedir çünkü donatı korozyonuna neden olabilecek veya beton matrisini bozabilecek daha fazla metabolizma ile nitrik asit oluşturabilecek fazla amonyak üretmemektedir.

Alkaliye dirençli spor oluşturan bakteriler doğrudan alt tabakayla birlikte betona eklendiğinde çatlak genişliği, kürlenme durumu ve çatlama yaşının etkilerini incelemiştir (Luo, Qian ve Li 2015). 0,1–0,5 mm'lik çatlak büyüklükleri tanıtılmış ve ıslak kürlenme, suyla kürlenme (suya daldırma) ve ıslak-kuru döngüleri (tümü 25°C'de) dahil olmak üzere üç farklı çatlama sonrası inkübasyon koşulu test edilmiştir. İyileşme, 7, 14, 28, 60 ve 90 günlük farklı çatlama yaşlarında genişlik onarım oranıyla ölçülmüştür. Suya daldırıldığında 0,3 mm'ye kadar çatlak genişliğinin tamamen iyileştiği gözlemlenmiş, ek olarak 0,1 ile 0,3 mm arasındaki çatlakların iyileşme oranının yaklaşık %85 olduğu gözlemlenmiştir. Kürlenme koşulları açısından, suyla kürlenme ve ıslak-kuru döngüleri en iyi iyileştirme performansını göstermiş, ancak onarım hızı ıslak-kuru döngü koşulu için daha yavaş olduğu görülmüştür. Erken yaştaki çatlaklar verimli bir şekilde onarılırken, daha sonraki yaştaki çatlaklar o kadar etkili bir şekilde iyileşmediği ortaya çıkmıştır. Bu, herhangi bir koruyucu kabuğun yokluğunda bakterilerin hayatta kalma oranının düşük olmasına ve beton gözenekliliğindeki düşüşe atfedilebilir ve bu da mineralin daha kısa taşıma mesafesine neden olmuştur.

Verimli onarım için, mineral çökeltinin özelliklerini ve bunun yanı sıra orijinal matrisle bağlanmasını incelemek önemli bir role sahiptir. Karıştırma suyunun bir parçası olarak üreolitik olmayan bakterileri içeren kendi kendini iyileştiren betonun mekanik performansını incelenmiş ve çöktürülmüş kalsiyum karbonatın nanomekanik özelliklerini ve bunun ana betonla bağlanmasını değerlendirmek için bir nano-girinti tekniği kullanılmıştır (Xu ve Yao 2014). Bu oldukça değişik ve yeni bir yaklaşımdı, çünkü çatlaklar oluştururken numunelerin bütünlüğünü korumak, çimento hamurunun alkaliliğini azaltmak ve sırasıyla bakterilerin yaşamaya devam edebilmesi için boşluklar oluşturmak amacıyla bazalt lifleri, silis dumanı ve hava sürükleyici maddeler eklenmiştir. Betonun donma ve çözölmeye karşı direncini artırmak için ılıman ülkelerde hava boşluklarının eklenmesi kabul edilebilir olsa da mekanik ve dayanıklılık özelliklerini etkileyebileceği için tropik bölgelerde kabul edilmesinin zor olabileceği unutulmamalıdır. Bununla birlikte, boşluklar yangın sırasında beton içindeki buhar basıncının serbest kalmasına izin verdiği için betonun yangın direncinde bir miktar iyileşme sağlanabilir. Mineral öncü bileşik olarak kalsiyum laktat ve kalsiyum glutamat denenmiştir. Kalsiyum iyonunun karbonata dönüşümünün kalsiyum glutamat için daha yüksek olduğu ve oluşan kristalin laktattan oluşandan farklı olarak granüler şekle sahip olduğu görülmüştür. Bununla birlikte, glutamat ve laktattan oluşan karbonatların bağlanması, glutamattan karbonat olması durumunda geçiş bölgesi, laktattan daha kalın ve daha yoğun olmasına rağmen, önemli ölçüde farklı olmadığı görülmüştür. Kalsiyum glutamat içeren numunelerde bükülme mukavemetinin geri kazanılması açısından daha iyi iyileşme elde edilmiştir. Çatlak genişlikleri 0,1 ila 0,4 mm arasında değişmiştir ve kısmen bakteriyel metabolizma tarafından oluşturulan mineral çökeltiyle çatlak onarımı gerçekleştirilmiştir. Bakteriyel sporları olan örnekler, kontrol örneklerine göre üstün iyileşme göstermiş, ancak etkinliği dış iyileşmeden daha az olduğu ortaya çıkmıştır. Bu tür gözlemlerin temel nedeni, sınırlı besin takviyesi olmasından kaynaklıdır. Boşluklar bakterileri barındırır da besin eksikliğinden dolayı eylemleri sınırlı kalmıştır.

2.6.1.2.Kapsüllenmiş biyo-maddelerin eklenmesiyle iyileşme

Etkili kendi kendini iyileştirme, sızdırmazlık uzun vadede etkili olduğunda gerçekleşir ve bir yapının ömrü boyunca gerçekleştirilebilir. Bu nedenle bakterilerin hayatta kalması çok önemlidir. Bununla birlikte, biyo-maddeler doğrudan betona eklendiğinde, bakterilerin hayatta kalabilmesinin önünde birkaç engel olabilir. Bakteri sporları eklenmesine rağmen korumasız sporların yaşam süresinin sadece iki ay ile sınırlı olduğunu ve bu nedenle etkili kendi kendini iyileştirmenin sadece genç örneklerde gözlemlendiğini belirtilmiştir (Jonkers 2011). Bunun çimento matrisinin alkalinitesi, betonun karıştırılması ve çimentonun hidrasyonu dahil olmak üzere birkaç faktör etkili olabilir. Sporlar uzun süre yüksek alkali ortama maruz kaldığında aktivite önemli ölçüde azalabilir. Ayrıca, karıştırma sırasında bazı sporlar, agregaların karıştırma kuvveti veya etkisi nedeniyle zarar görebilir. Çimentonun hidrasyonu, zaman içinde matrisin gözenekliliğini ve gözenek boyutunu 0,5 mm'ye kadar düşürürken, bakteri hücreleri tipik olarak bu boyuttan daha büyüktür (Wang vd. 2014). Bu nedenle, gözeneklerin küçülmesi ile hücrelerin çimlenmesi, beton bir yapının geç aşamasında büyük ölçüde azaltılabilir veya durdurulabilir. Bu sınırlama ciddi bir engel olarak görülmekte olup sorunun çözülmesi için bakteri tarafından beton özelliklerini ve karbonat çökeltisini etkilemeden bakterileri korumak için kapsül kullanmaktır. Literatürde genişletilmiş kil agregası (Jonkers 2011; Wiktor ve Jonkers 2011), diyatumlu toprak (Wang, De Belie ve Verstraete 2012), cam tüplerde silis jel ve poliüretan (PU) (Wang vd. 2012), melamin bazlı mikrokapsüller (Wang vd. 2014) ve hidrojel (Wang, Snoeck vd. 2014; Wang vd. 2015) dahil olmak üzere bakterileri korumak için farklı kapsülleme teknikleri kullanılmıştır.

Bacillus Sphaericus sporlarını kapsüllemek için melamin bazlı mikrokapsüller kullanılmıştır (Wang, Soens vd. 2014). Mineral öncü olarak kalsiyum nitrat kullanılmış ve maya ekstraktı ve üre gibi diğer besinler ile karıştırılarak beton harcına ilave edilmiştir. Bakteriler sayesinde iyileşme, iyileşmiş çatlak büyüklüğü ile ilk çatlak alanı arasındaki oran olarak araştırılmıştır. Kapsüllenmiş sporlar içeren beton %48 ile %80 arasında iyileşme oranı gösterirken, spor içermeyen örnekler için iyileşme oranı sadece %50 ile sınırlandırılmıştır. Çatlak büyüklüğünde en yüksek azalma, numuneler ortam olarak su ile ıslak ve kuru döngüyle kürlendiğinde sağlanmıştır. Islak döngü önemli ölçüde daha uzun, yaklaşık 16 saattir ve bu, normal koşullar altında manuel müdahale olmaksızın elde edilmesi zor olabilir. İyileştirilen maksimum çatlak genişliği yaklaşık 970 µm'dir. %3'lük kapsül dozajı %5'lik dozaj durumunda daha az değişiklik görülmesine rağmen, su geçirgenliğinin geri kazanılması ve çatlakların kapatılması açısından en iyi performansı göstermiştir. Ancak %3 konsantrasyonu normal olduğu söylenebilir çünkü beton dayanımındaki düşüş %3'e göre %5 olması durumunda daha fazla olduğu görülmüştür.

Bakterilerin kapsüllenmesi için hidrojel kullanımı, çünkü bu teknik, bakteri aktivitesi ve büyümesi için en az manuel müdahale ile bir iç nem kaynağı sağlar (Wang, Snoeck vd. 2014). Aynı zamanda bakteriler için koruyucu bir tabaka görevi görür. Bakteriler hidrojelde biyo-reaktiflerle birlikte kapsüllendiğinde önemli ölçüde daha yüksek iyileşme, yaklaşık %40-90 gözlenmiştir. Su geçirgenliğinde yaklaşık %68'lik bir maksimum düşüş görülmüştür. Hidrojel kapsüllenmiş bakterilerin kullanımıyla etkili iyileşme, hidrojellerin su alma ve tutma kapasitesi nedeniyle mümkündür. Kullanılan saf hidrojinin %60 bağıl nem ve 20°C havaya maruz kaldığında sırasıyla 12 saat ve 24 saat sonra emilen suyun %70 ve %30'unu tutabildiğini belirtilmiştir (Wang, Snoeck vd. 2014). Bu, yüksek nem ve yağış ile nitelendirilen tropikal yerler için hidrojellerin, bakteriyel

etkiyi sağlamak için suyu absorbe etmek için iyi bir seçim olmuştur. Bununla birlikte, hidrojel iyonik veya iyonik olmayan türüne de bağlıdır (Wang, Snoeck vd. 2014). İyonik hidrojeller pH'a duyarlıdır ve bu nedenle alım kapasiteleri havada bulunan kimyasallardan etkilenebilir. Nemde bulunan iyonlar su alma ve tutma kapasitesini etkilemediğinden, iyonik olmayan bu tür uygulamalar için daha iyi olabilir. Melamin bazlı mikrokapsüllerin kullanıldığı yerlerde, en iyi iyileşme performansı, kürlenme koşulu olarak ıslak ve kuru döngü (ıslak periyot 16 saat ve kuru periyot 8 saat) kullanıldığında gözlemlenmiştir (Wang, Soens vd. 2014). Hidrojel kullanımı sağlandığında, su ile temas süresi büyük oranda azaltılabilir. Ek olarak, hidrojeller havadan nemi emebildikleri için suyu manuel olarak sağlamaya çok az ihtiyaç vardır ve bu da bu tür betonu fiili inşaat için kullanmak için daha iyi olanaklar sunar.

Yakın zamanda yapılan bir çalışmada, bakteriyel spor taşıyıcısı olarak modifiye edilmiş sodyum aljinat bazlı hidrojel kullanmanın fizibilitesini test edilmiştir (Wang vd. 2015). Bakteri sporlarının, beton numunelerde hasarlı alandaki oksijen tüketimi ile ölçülen hidrojelde kapsüllemeyen sonra hala yaşadıkları belirtilmiştir. Betonun karıştırılırken modifiye edilmiş hidrojelden bir miktar spor sızıntısı fark edilmiştir, bu duruma rağmen sporların %99'u kapsüllenmiş formda zarara uğramadan kalmıştır. Kütle olarak %0,5 ve %1 hidrojel ilave edilmesi, betonun işlenebilirliğini hafif ölçüde etkilemiştir; ancak mekanik özellikleri, hidrojinin %1 eklenmesiyle sırasıyla yaklaşık %20-%30 oranında bozulma gözlemlenmiştir. Bu tür bir ters etki, hidrojel ilavesinden kaynaklanan makro boşlukların oluşumuna yorumlanmıştır. Süper emici polimerin (SEP) beton üzerinde iki zıt etkisi vardır; iç kürlenme için nem sağlarken ve mukavemet gelişimine yardımcı olurken, betonda boşluklar oluşturarak mukavemeti azaltır. Bu iki etkinin baskınlığı su-çimento oranına (w/c), SEP dozajına ve betonun yaşına bağlıdır (Jensen 2013). 0,45'ten daha büyük w/c oranında jel-boşluk oranı konseptinin uygulanmasıyla SEP ilavesinin mukavemet gelişimi üzerinde çok daha az etkisi vardır ve mukavemeti azaltabilir. Nispeten yüksek w/c oranı 0,5 kullanılmıştır ve bu da SEP eklenmiş örneklerde güçteki azalmanın nedenlerinden biri olabilir (Wang vd. 2015).

Daha önceki araştırmalarda, bakteri sporlarını ve mineral çökeltisinin öncü bileşiği olan kalsiyum laktatı hareketsiz hale getirmek için gözenekli genişletilmiş kil agregası kullanmıştır (Jonkers 2011). Kil agregaları hafif ve yumuşaktır ve çatladığında kalsiyum karbonat hava mevcudiyetinde bakteriyel hareketle çökeltme gerçekleşir. Musluk suyuna iki hafta batırıldıktan sonra test edilen numuneler, yaklaşık 0.46 mm'lik maksimum iyileşmiş çatlak büyüklüğü gözlemlenmiştir. 6 ay sonra, şu ana kadar bakteri canlılığında herhangi bir kayıp bildirilmemiştir. Kil agregaları, hafif beton geliştirmek için yaygın olarak kullanılmaktadır ve ayrıca bakteriyel çökeltme eylemini desteklemek için gerekli olan dahili nem kaynağı olarak işlev görürler. Ek olarak, agrega içindeki su miktarı, genişletilmiş kil agrega aralığı ve gözenek yapısı gibi bir dizi faktör, verimliliği etkiler (Reynolds, Browning ve Darwin 2009). Normal granit agregalarının yerini almak için kil agregalarının kullanılmasının ana sınırlaması, sonuçta dayanım düşüşü gerçekleştirmesidir. Normal dayanımlı betonda, agregalar betonun kütlesini oluşturmuş ve agrega tokluğu betonun basınç dayanımını belirlemiştir. Normal betondaki sert agregalar, sonuçta agregadan daha zayıf olan matrizen geçen çatlaklara direnç gösterir. Bununla birlikte, kil agrega kullanımı sağlandığında, çatlaklar önemli oranda agregaları parçalayacaktır, çünkü agrega sertliği matristedeki sertlikten daha az olmaktadır. Yumuşak agregaların zayıf bir düzlem meydana getirdiği ve çatlakları zayıf düzleme doğru

yönelttiği anlamına gelir. Hafif kil agregasının devreye girmesi nedeniyle 28 günde %50'ye varan mukavemet azalması gözlemlenmiştir, bu da yapısal uygulamalar için kabul edilebilir olmayabilir (Jonkers 2011).

Diyatomlu toprak (DT), silis bakımından zengin ve diatom adı verilen mikroorganizmaların kabuğundan oluşan bir tür mineral bileşiktir. Oldukça gözenekli bir yapıya sahip olduğu için immobilizasyon potansiyeli sunar. DT'yi *Bacillus Sphaericus*'u hareketsiz kılmak için kullanılmıştır (Wang, De Belie ve Verstraete 2012). Bakteriler hava veya su ile aktive olduktan sonra parçalandığında, üre hidrolize olur ve mineral öncü olarak kullanılan kalsiyum nitrattan kalsiyum karbonat çökeltir. İyileştirilmiş çatlak genişliği ayrıca daldırma ortamına (su veya besleyici ortam) bağlıdır; ancak 0,15 ile 0,17 mm arasında genişliğe sahip çatlakların neredeyse tamamen iyileştiği görülmüştür. Daha yüksek miktarda DT, daha iyi koruma anlamına gelir çünkü bakteri hücreleri esas olarak bazı içi boş gözeneklerde emilim sağlar. Bununla birlikte DT, birçok nano ölçekli gözenekle yüksek inceliğe sahiptir. Bu, çimento matrisindeki nemi emen yüksek DT konsantrasyonu kullanıldığında harcın kurummasına yol açar.

3. MATERYAL VE METOT

3.1. Materyal

3.1.1. Bağlayıcılar

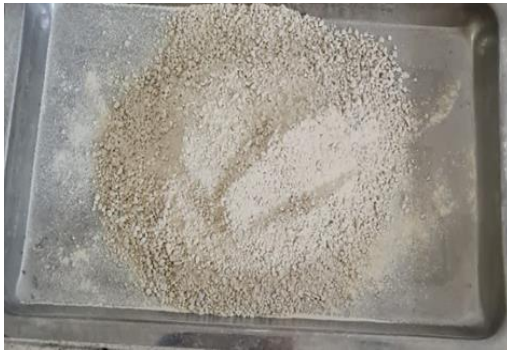
Çalışmada 2 farklı bağlayıcı kullanılmıştır. Metakaolin ve silis dumanı ağırlıkça farklı yüzdelerde kendi aralarında yer değiştirerek farklı karışımlar elde edilmiştir. Metakaolin, Antalya Başergün Boya ve Kimya A.Ş.'den temin edilmiştir. Silis dumanı ise, Antalya Eti Elektrometalurji A.Ş.'den sağlanmıştır. Silis dumanı ve metakaolinin özgül ağırlıkları ASTM C188-95'e göre tayin edilmiş olup, sırasıyla 2,26 g/cm³ ve 2,5 g/cm³'tür.

Çizelge 3.1. Bağlayıcılar kimyasal kompozisyonları (%)

Oksit	Silis Dumanı	Metakaolin
Na ₂ O	2,15	0,28
MgO	14,32	0,25
Al ₂ O ₃	1,684	41,5
SiO ₃	78,02	53,4
P ₂ O ₅	0,024	-
SO ₃	0,298	-
K ₂ O	1,10	0,04
CaO	0,193	2,15
TiO ₂	-	0,81
MnO	0,06	-
Fe ₂ O ₃	0,32	4,32

3.1.2. Agregat

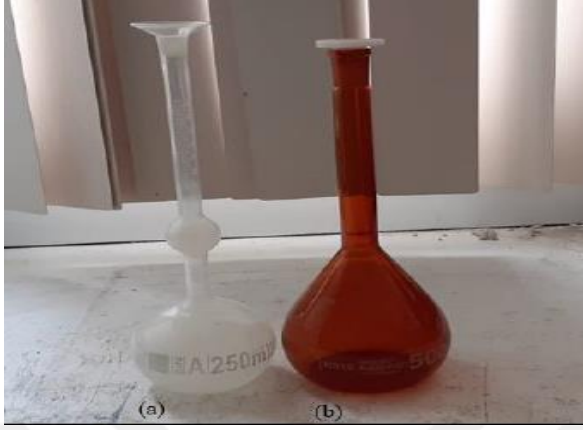
Çalışmada agregat olarak kırma kum kullanılmıştır.



Şekil 3.1. Kırma kum agregası

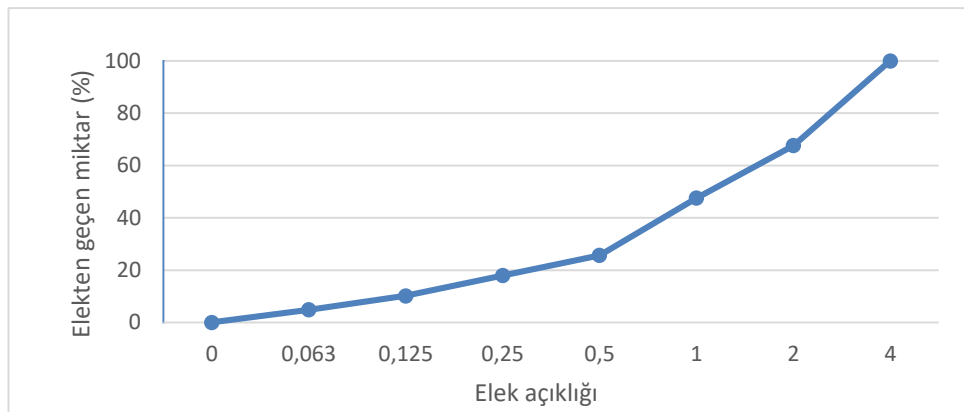
Agreganın özgül ağırlığı, karışıma girecek agregat miktarını belirlemek için tayin edilmiş ve ASTM C128-01'e göre yapılmıştır. Le Chatelier balonu ve balon joje deneyi

yönetimi ile özgül ağırlık değerleri bulunup her iki yönteminin ortalaması alınmıştır. Özgül ağırlığı $2,6 \text{ g/cm}^3$ 'tür.



Şekil 3.2. a) Le Chatelier Balonu; (b) Balon Joje

Agreganın granülometresini (tane boyut dağılımı) belirlemek için elek analizi TS EN 933-1 ve ASTM C-136 standardına göre yapılmıştır. Elek analizi deneyi sonucunda, agregaların tane boyut dağılımları belirlenmiştir. Harç üretmek istenildiği için 4 mm göz açıklıklı elek altında kalan, tane boyutuna sahip agregalar kullanılmıştır. Kullanılan elek göz açıklıkları sırasıyla 4 mm, 2 mm, 1 mm, 0,5 mm, 0,25 mm, 0,125 mm, 0,063 mm olarak belirlenmiştir. Elekler, yukarıdan aşağıya doğru yerleştirilen eleklerin elek açıklıkları sırasıyla 4, 2, 1, 0,5, 0,25 ve 0,125 mm şeklinde olup sarsma cihazı ile sarsılmıştır. Her bir elek üstünde kalan agrega miktarları tartılarak, akabinde elek üstü yığışımli ağırlıklar hesaplanmıştır. Elek üstü yüzde yığışımli değerler hesap edilerek agregaların incelik modülleri tayin edilmiştir. Granülometri eğrileri logaritmik olarak, elekten geçen yüzde yığışımli değerler kullanılarak çizilmiştir.



Şekil 3.3. Agreganın tane boyutu dağılımı

3.1.3. Alkali Aktivatör

Aktivasyon işleminde kullanılan alkali çözelti, sodyum hidroksit çözeltisi kullanıldı. Sodyum hidroksit, çok yüksek kostik performansa ve beyaz renge sahip inorganik bir metal bazdır. Sodyum hidroksitin molar kütlesi 40 g/mol'e eşittir. Sodyum hidroksit, pelet formunda kullanıldı. NaOH çözeltisinin konsantrasyonu, molarite cinsinden ifade edilir. Bu araştırmada kullanılan NaOH çözeltisi, NaOH peletlerin (%99 saflıkta) damıtılmış su içinde 10M konsantrasyona kadar çözülmesiyle hazırlandı.

3.1.4. Su

Harç karışımları için kullanılan su, içilebilir temiz şebeke suyudur.

3.1.5. Kalsiyum laktat

Kalsiyum laktat $\text{Ca}(\text{C}_3\text{H}_5\text{O}_3)_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, toz şeklinde olup kırık beyaz bir renge sahiptir. Laktik asitin tuzu ve bakteriler tarafından tüketilen doğal bir asit türüdür. Kalsiyum laktat besin olarak harçta kullanıldığında bakteriler tarafından tüketilerek kalsit oluşturmaktadır.

3.1.6. Distile su

Distile su, buhar haline getirilmiş ve ayrı bir kapta tekrar sıvı haline getirilmiş sudur. Orijinal sudaki suyun kaynama noktasının altında veya yakınında kaynamayan safsızlıklar orijinal kapta kalır. Dolayısıyla damıtılmış su, bir tür arıtılmış sudur.

3.1.7. Luria broth (LB)

Luria'nın düşük tuzlu LB'si, *E. coli*'nin kültivasyonu için kullanılan bir mikrobiyal büyüme ortamıdır. Besin açısından zengin bu mikrobiyal sıvı besiyeri olarak, çok düşük tuz formülasyonunda peptitler, amino asitler, suda çözünür vitaminler ve karbonhidratlar içerir.

3.1.8. Nutrient broth (NB)

In vitro yapılan standart mikrobiyolojik analizlerde genel sıvı besiyeri olarak kullanılır. Hazırlanan besiyeri oda koşullarında sıvıdır, berrak ve sarımsı kahve renklidir, pH'sı $7,0 \pm 0,2$ 'dir. Genellikle mikroorganizma stoklarını muhafaza etmek için kullanılabilirler.

3.1.9. Agar

In vitro yapılan standart mikrobiyolojik analizlerde sıvı besiyeri ortamını katılaştırabilmek için kullanılan, Yüksek kalitede katılaştırma bileşeni olan besiyeri katkı maddesidir. Böylelikle çeşitli mikroorganizmaların alt kültürlerinin yapılabilmesi için

besiyerini uygun hale getirir. Suda çözünebilen bir poligalaktozittir. Oda sıcaklığında jel formdadır, Pek çok mikroorganizmanın inkübasyon sıcaklığında katı formunu korur.

3.2. Metot

3.2.1. Karışım tasarım yöntemi

Geopolimer harçların üretimi, 1 dm³'lük hacimdeki karışım olarak tasarlanmıştır. Karışıma giren malzemelerin hacmi, her bir hacmin kendi yoğunluğuyla çarpılmasıyla kütleye dönüştürülmüştür. Harç üretimi için laboratuvar tipi 2 dm³ hazneli mikser kullanılmıştır

Karışım aşaması şu şekilde gerçekleştirilmiştir: İlk olarak bağlayıcılar (silis dumanı ve metakaolin) ve agrega kuru halde karıştırılmıştır. Yaklaşık olarak 1 dakika boyunca 2. devrede karıştırıldıktan sonra NaOH peletlerinin saf su içerisinde çözünmesiyle 10M konsantrasyonda hazırlanmış olan NaOH çözeltisi yavaşça karışıma ilave edilip 4. devrede karıştırılmıştır. Hemen ardından karışım suyu ilave edilmiştir. 2 dakika daha karıştırıldıktan sonra hazne tabanını bir ıspatula yardımı ile karıştırılıp dağılan ve yapışan taneciklerin tekrar karışım içerisine dönmesi sağlanmıştır. Geopolimer harca en son bakteri eklenmiştir.

Karışıma giren malzeme miktarları hacimsel olarak Çizelge 3.2'de verilmiştir. Karışım serilerinin her birinde aşağıdaki özellikler sabit tutulmuştur.

Sodyum hidroksit konsantrasyonu: 10M

Alkali aktivatör/bağlayıcı oranı: 1,75 (hacimsel olarak)

Üretilen karışımlar 40x40x160 mm'lik prizmatik kalıplara yerleştirilerek üstünü nem kaybına uğramaması için plastik örtüyle kapatılmıştır. 24 saat sonra sertleşmiş numuneler kalıptan çıkarılıp normal hava sıcaklığında 21±2 C°'de deneyi gününe kadar bırakılmıştır.



Şekil 3.4. Harçların kalıplara yerleştirilmesi

MK20 Karışım Serisi: Bağlayıcı olarak kullanılan silis dumanı, hacimce %20 metakaolin ile yer değiştirmiştir.

MKB20 Karışım Serisi: Bağlayıcı olarak kullanılan silis dumanı, hacimce %20 metakaolin ile yer değiştirip Besin+B. Subtilis eklenmiştir.

MK40 Karışım Serisi: Bağlayıcı olarak kullanılan silis dumanı, hacimce %40 metakaolin ile yer değiştirmiştir

MKB40 Karışım Serisi: Bağlayıcı olarak kullanılan silis dumanı, hacimce %40 metakaolin ile yer değiştirip Besin+B. Subtilis eklenmiştir.

MK50 Karışım Serisi: Bağlayıcı olarak kullanılan silis dumanı, hacimce %50 metakaolin ile yer değiştirmiştir

MKB50 Karışım Serisi: Bağlayıcı olarak kullanılan silis dumanı, hacimce %50 metakaolin ile yer değiştirip Besin+B. Subtilis eklenmiştir.

MK60 Karışım Serisi: Bağlayıcı olarak kullanılan silis dumanı, hacimce %60 metakaolin ile yer değiştirmiştir

MKB60 Karışım Serisi: Bağlayıcı olarak kullanılan silis dumanı, hacimce %60 metakaolin ile yer değiştirip Besin+B. Subtilis eklenmiştir.

MK80 Karışım Serisi: Bağlayıcı olarak kullanılan silis dumanı, hacimce %80 metakaolin ile yer değiştirmiştir.

MKB80 Karışım Serisi: Bağlayıcı olarak kullanılan silis dumanı, hacimce %80 metakaolin ile yer değiştirip Besin+B. Subtilis eklenmiştir.

Çizelge 3.2. Karışıma giren malzeme hacimleri (dm³)

Karışım Kodu	Silis Dumanı	Metakaolin	Agrega	NaOH	Su	Besin	BS
MK20	160	40	450	350	30	0	0
MKB20	160	40	450	350	30	10	4-8*10 ⁸
MK40	120	80	450	350	30	0	0
MKB40	120	80	450	350	30	10	4-8*10 ⁸
MK50	100	100	450	350	30	0	0
MKB50	100	100	450	350	30	10	4-8*10 ⁸
MK60	80	120	450	350	30	0	0
MKB60	80	120	450	350	30	10	4-8*10 ⁸
MK80	40	160	450	350	30	0	0
MKB80	40	160	450	350	30	10	4-8*10 ⁸

3.2.2. Taze harçlar üzerinde gerçekleştirilen deneyler

3.2.2.1. Taze harç kıvam tayini

Bu deney TS EN 1015-3 standardına göre yapılmıştır. Deneyden önce yüzeyde serbest su kalmayacak şekilde akma tablası nemlendirilmiştir. Taze harç kesik koniye iki eşit tabaka halinde, spatula yardımıyla doldurulmuştur. İlk tabaka doldurulduktan sonra sıkıştırma çubuğu ile 10 defa şişlenmiştir. Kesik huninin geri kalan kısmı taze harç ile

doldurulmuş ve yeniden 10 defa şişlenmiştir. Kalıp üst seviyesinden taşan fazla harç, mala kullanılarak sıyrılıp alınmış ve tabladaki harç kalıntıları temizlenmiştir. Mala yardımıyla kesik koninin üzeri düzleştirilmiş ve harcın taşması engellenmiştir. Kesik huni düşey şekilde yukarıya doğru çekilerek alınmıştır. Kol 15 kez çevrilerek yayılma tablası düşürülmüştür. Düşürme işlemi gerçekleştirildikten sonra üst tablaya yayılan harcın en büyük iki yayılan çapı birbirine dik olacak şekilde ölçülmüştür. Bu ölçümlerin ortalaması alınmış ve böylelikle yayılma çapı elde edilmiştir.



Şekil 3.5. Taze harç kıvam tayini

3.2.2.2. Taze harçlarda birim hacim kütle ve hava miktarının ağırlık yöntemiyle tayini

Taze harçların birim hacim kütlesi TS 1015-6'ya göre bulunmuştur. Deney yöntemi, bilinen hacimdeki harç kütlesinin hesaplanmasını içermektedir. Belirli bir hacim içerisine sıkıştırılarak yerleştirilmiş taze harcın birim hacmine isabet eden ağırlığın kg/m^3 olarak ifade edilmesi ve harç içindeki hapsolmuş hava miktarını belirlemek için bu deney yapılmıştır. Bu deney TS EN 1015-7 standardına göre uygulanmıştır.

Yöntem, yayılma tablası deneyi ile belirlendiği üzere taze harcın kıvamına bağlı olarak gerçekleştirilmektedir.

i) Yayılma değeri 140 mm'den daha düşük ise (kuru harç) – Vibrasyon yöntemi: Kalibre edilmiş kap, taşana kadar harç ile doldurulur, daha sonra titreşimli bir tabla üzerine yerleştirilir ve titreşim, malzemenin daha fazla yerleşemediği durum gözlenene kadar devam eder, gerektiğinde malzeme ilavesi yapılır. Kap daha sonra 0,01 gram hassasiyetle tartılır.

ii) Yayılma değeri 140 mm ve 200 mm arasında ise (plastik kıvamda harç) – Şok yöntemi: Kalibre edilmiş kap, yüksekliğinin yaklaşık olarak yarısına kadar harçla doldurulur, daha sonra kap, karşılıklı kenarları üzerinde yaklaşık 30 mm kadar eğilir ve sağlam bir tabana 10 kez düşmesine izin verilir. Harcın hava sürükleyici katkı içermesi durumunda, şokların sayısı beşe indirilir. Kap daha sonra taşana kadar doldurulur ve şok sıkıştırması tekrarlanır. Kap, 0,01 gram hassasiyetle tartılır.

iii) Yayılma değeri 200 mm'den daha büyük ise (akıcı kıvamda harç): Kalibre edilmiş kap, taşana kadar doldurulur ve kabın kenarları nemli bir bez ile silinir ve kap, 0,01 gram hassasiyetle tartılır.

Birim hacim kütlesi (ρ_m , kg/m^3) aşağıdaki formül kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\rho_m = \left(\frac{m_2 - m_1}{V} \right)$$

ρ_m : Taze harç birim hacim ağırlığı (kg/m³)

m_1 : Kabin ağırlığı (kg)

m_2 : Kabin ve taze harcın ağırlığı (kg)

V : Kabin Hacmi (m³)



Şekil 3.6. Taze harçlarda birim hacim kütle tayini

3.2.3. Sertleşmiş harçların fiziksel özelliklerinin belirlenmesi

3.2.3.1. Yığın yoğunluk, su emme ve görünür porozite

Yığın yoğunluk, su emme ve görünür porozite değerleri ASTM C 642-06 standartına uygun olarak elde edilmiştir. 40x40x160 mm'lik prizma numuneler kalıptan çıkarıldıktan sonra, 7 gün normal hava kürü uygulandıktan sonra 24 saat boyunca normal su küründe 21±2 °C'de bekletilmiştir. Sudan alınan numunelerin yüzeyi bir havlu ile yüzey nemi alınarak kurutulmuş ve kütle belirlenmiştir. Kuru yüzey kütlesi W_2 olarak adlandırılmıştır. Numune askıda duran bir tel aracılığıyla suya daldırılarak sudaki kütlesi belirlenmiş ve bu kütle ise W_3 olarak isimlendirilmiştir. Ardından numuneler 80 saat boyunca 40°C'lik sıcaklıktaki etüvde kurutulmuştur. Her örnek fırından çıkarıldıktan sonra havada, 20-25 °C'lik bir sıcaklığa soğumaya bırakılmış ve kütle belirlenmiştir. Bu değer ise W_1 olarak belirlenmiştir.

Yukarıda açıklanan prosedüre uygun olarak belirlenen değerler kullanılarak, sertleşmiş harç içerisindeki kuru yığın yoğunluğu, su emme ve görünür porozite hesaplamaları aşağıdaki gibi yapılmıştır.

$$A_1 = \frac{W_1}{W_2 - W_3}$$

$$A_2 = \frac{W_1}{W_1 - W_3}$$

$$A_3 = \frac{W_2 - W_1}{W_2 - W_3} \times 100$$

$$A_4 = \frac{W_2 - W_1}{W_1} \times 100$$

A₁: Kuru birim ağırlık,

A₂: Görünür birim ağırlık,

A₃: Görünür boşluk oranı (%),

A₄: Ağırlıkça su emme oranı (%)



Şekil 3.7. Numunelerin suya konulması

3.2.4. Sertleşmiş harçların mekanik özelliklerinin belirlenmesi

3.2.4.1. Eğilme dayanımı tayini

Deney öncesi 40x40x160 mm boyutlarındaki numuneler kür tankından çıkarılmıştır. Her bir numune yükleme tablasındaki iki mesnet üzerine ortalayacak şekilde yerleştirilmiş ve mesnetlere ters yönde, numunenin tam ortasından yük uygulanmıştır. Eğilme dayanımı deneyi 3 ve 7 günlük kür sürelerinin her birinin sonucunda TS-EN 1015-11'e göre gerçekleştirilmiştir. Maksimum yük üzerinden formül yerine veriler yerleştirilerek eğilme dayanımı MPa cinsinden hesaplanmıştır.

$$\sigma_1 = \frac{3F_k l}{2d_1 d_2^2}$$

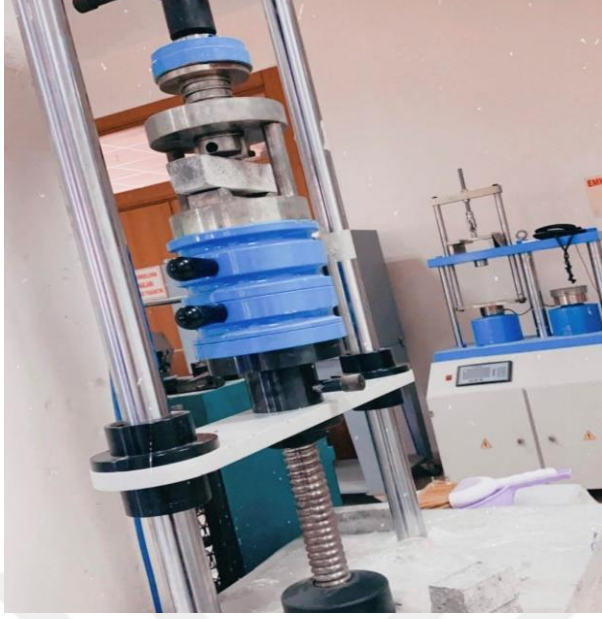
σ_1 : Eğilme dayanımı (MPa)

F: Deney makinesinde kırılma anındaki en büyük yük (N)

l: Yükleme tablası mesnetler arasındaki açıklık (mm)

d₁: Numunenin genişliği (mm)

d₂: Numunenin yüksekliği (mm)



Şekil 3.7. Eğilme deneyi düzeneği

3.2.4.2. Basınç dayanımı tayini

Basınç dayanımı tayini için, üç nokta eğilme deneyi sonucu ortadan ikiye bölünen 40x40x160 mm ebatlı numuneler kullanılmıştır. Kırık parçalar, numuneye alt ve üstten temas eden 40x40 mm ebatlı yükleme yüzeylerine sahip çerçeve içerisine, kalıp yüzeyi yükleme ekseninde kalmayacak şekilde yerleştirilmişlerdir. Kalıp yüzeyi, diğer yüzeylere göre daha pürüzlü olduğu için yükleme ekseninde kaldığı takdirde, uygulanan yük numune üzerine üniform bir şekilde yayılmayacak ve yanlış ölçümler yapılmasına sebep olacaktır. Numunenin kendi ayrıtı da 40 mm olduğu için, ölçümler 40x40x40 mm boyutlarında bir küp numune test ediliyor kabulüyle gerçekleştirilmiştir. Basınç dayanımı deneyi 3 ve 7 günlük kür sürelerinin her birinin sonucunda TS-EN 1015-11'e göre gerçekleştirilmiştir. Kırılma anındaki maksimum yük yardımıyla basınç dayanımı değeri MPa cinsinden hesaplanmıştır.

$$\sigma_2 = \frac{F_y}{A_y}$$

σ_2 : Basınç dayanımı (MPa)

F_y : Maksimum yük (N)

A_y : Yükün uygulandığı kesit alanı (mm²)

3.2.4.3. Gerilme-şekil değiştirme

Bir malzemenin gerilme ve şekil değiştirme arasındaki ilişkisi o malzemenin gerilme-deformasyon eğrisi olarak bilinir. Malzemeye özgüdür ve farklı zaman aralıklarında uygulanan çekme veya basma gerilmelerinin yarattığı deformasyon miktarı kaydedilerek bulunur. Bu eğriden elastisite modülü (E) gibi malzemeye ait birçok özellik ortaya çıkarılabilir. Gerilme-şekil değiştirme eğrisi malzemenin malzemeye

değişir ve numunenin sıcaklığına ve uygulanan yükün hızına bağlı olarak eğrideki sonuçlar farklılık gösterebilir. Fakat yine de malzemeleri kabaca sünek ve kırılgan olmak üzere iki gruba ayırmak mümkündür.

Sertleşmiş numunelerin gerilme-şekil değiştirme eğrileri UTEST presi ile 40x40x160 prizmatik numuneler dakikada 1 mm deformasyon yapacak şekilde, 40x40x40 küp numuneler ise dakikada 3 mm deformasyon yapacak şekilde kırılmıştır ve cihazdan alınan veriler UTEST MALZEME TEST programı kullanılarak elde edilmiştir. Bu veriler yardımıyla gerilme-şekil değiştirme eğrileri çizilmiştir.

3.2.5. Sertleşmiş harçların durabilite özelliklerinin belirlenmesi

3.2.5.1. Kılcal su geçirimsizlik tayini

TS EN 480-5 standartına uygun olarak, 80 saat 40°C etüvde kurutulmuş 40x40x160 mm³lik prizma numuneler alt yüzeylerinden su ile temas ettirilerek kılcal su emme deneyine tabii tutulmuştur. Numuneler suya değen alt kısmı hariç, diğer yüzeylerinden su emmesini önlemek için parafin ile kaplanmıştır. Kılcal yolla emilen su miktarları 60 dk, 2 saat, 4 saat ve 24 saat sonrasında, numuneler tartılarak ölçülmüştür. Kılcal su emme katsayısı ise aşağıdaki bağıntıdan hesaplanmıştır.

$$K = \frac{Q}{(A_k \sqrt{t})}$$

K: Kılcal su emme katsayısı (cm/sn^{1/2})

t: Ölçüm aralığı süresi (sn)

A_k: Kılcal su emme yüzeyi alanı (cm²)

Q: t zaman aralığında emilen su miktarı (cm³)



Şekil 3.8. Kılcal su emme tayini deneyi düzeneği

3.2.6. Geopolimer Harçların SEM Görüntüleri

Taramalı Elektron Mikroskopu (SEM) cihazı ile görüntüleme, numuneye gönderilen hızlandırılmış elektronların numunenin atomları ile etkileşmesi sonucunda saçılan elektronların çeşitli dedektörler yardımıyla analiz edilmesi esasına dayanır. Bu saçılmaların değerlendirilmesi ile malzeme içerisindeki yapıların mikro (10^{-6}) ve nano(10^{-9} m) mertebesinde görüntüleme analizi yapılabilmektedir.

Üretilen geopolimer harçların mekanik özelliklerinin belirlendiği numunelerden alınan küçük parçalar taramalı elektron mikroskobu ile incelenmiştir. SEM fotoğrafları İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarları Uygulama ve Araştırma Merkezi Carl Zeiss 300VP SEM cihazı ile iletken olmayan numunelerde daha ayrıntılı ve net görüntü alınabilmesi için QUORUM Q150 RES kaplama cihazı kullanılarak 500, 1000, 2500 ve 5000 kez farklı büyütme ile elde edilmiştir.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Taze Harçlar Üzerinde Gerçekleştirilen Deneylerin Bulguları

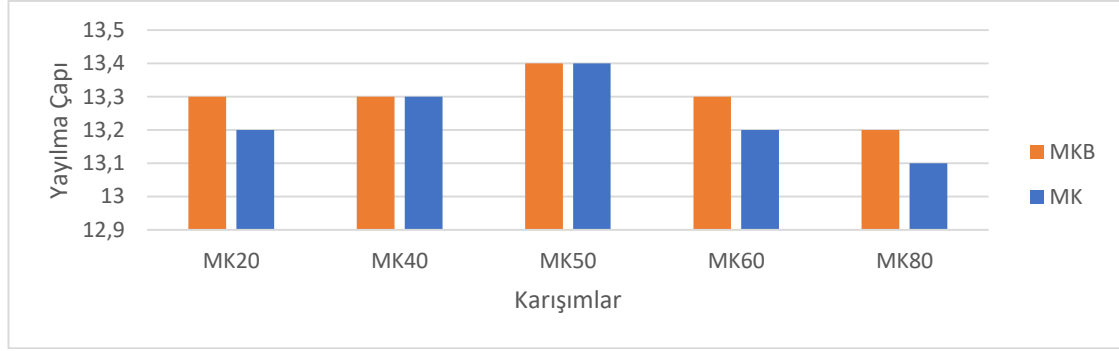
Taze harçların üzerinde kıvam tayini ve birim hacim ağırlık tayini deneyleri gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 4.1. Karışımların taze haldeki yayılma çapı, birim hacim kütlesi ve hava miktarı değerleri

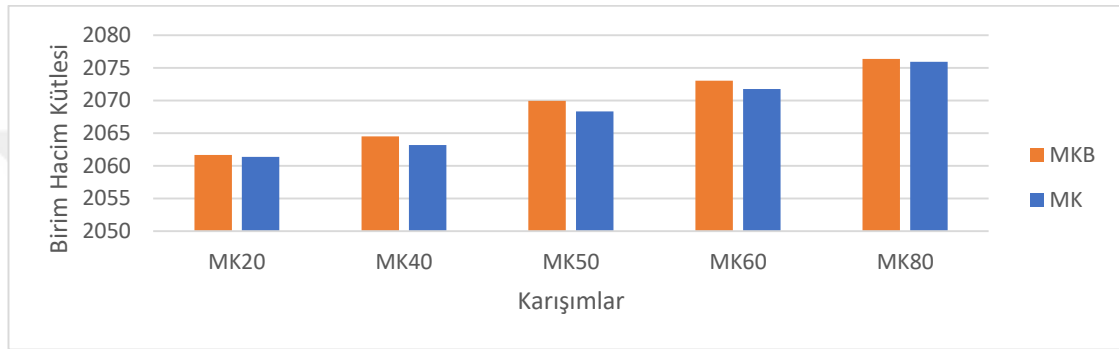
Karışım Kodu	Yayılma Çapı (cm)	Birim Hacim Kütlesi (g/dm ³)	Taze halde içerdiği hava miktarı (%)
MK20	13,2	2061,37	14,86
MK20B	13,2	2061,68	14,59
MK40	13,3	2063,21	15,24
MK40B	13,3	2064,54	14,93
MK50	13,4	2068,34	15,26
MK50B	13,4	2069,95	14,94
MK60	13,2	2071,76	15,33
MK60B	13,2	2073,05	15,03
MK80	13,1	2075,92	15,62
MK80B	13,1	2076,38	15,35

Çizelge 4.1’de çalışma kapsamındaki tüm karışımlara ait yayılma değerleri verilmiştir. Yukarıdaki tablo incelendiğinde, yayılma değerlerinin 13,1 ile 13,4 cm ve birim hacim ağırlık değerlerinin 2061,37 ile 2076,38 arasında değiştiği gözlenmiştir. En yüksek yayılma çapı 13,4 ile MK50 (%50 silis dumanı-%50 metakaolin) karışımında, en düşük yayılma ise 13,1 ile MK80 (%20 silis dumanı-%80 metakaolin) karışımında olduğu görülmektedir. Bakteri ekiminin harçlarda yayılma değerine bir etkisinin olmadığı görülmüştür.

En yüksek birim hacim ağırlık değeri 2076,38 ile MK80B, en düşük birim hacim ağırlık ise 2061,37 ile MK20 olduğu belirtilmiştir. Bakteri ekiminin harçlarda birim hacim ağırlık değerlerini arttırdığı görülmektedir. Bunun sebebi, bakteri besiyerinin kendi çok az da hacmi olmasından kaynaklı olduğu düşünülmüştür.



Şekil 4.1. Yayılma çapı değerleri

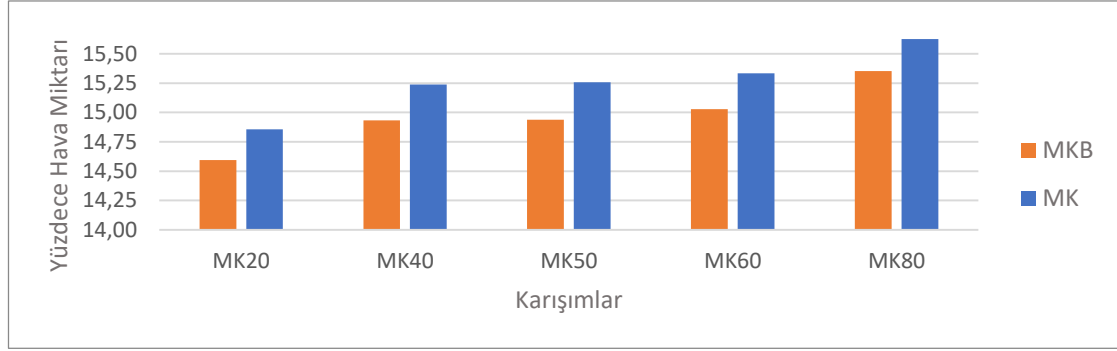


Şekil 4.2. Birim hacim kütlesi değerleri

MK karışım serisine dikkat edildiğinde, en yüksek yayılma çapı ve birim hacim ağırlık değerlerini sırasıyla 13,4 cm ve 2075,92 g/dm³, en düşük değerler sırasıyla 13,1 cm ve 2061,37 g/dm³'tür.

MKB karışım serisine dikkat edildiğinde, en yüksek yayılma çapı ve birim hacim ağırlık değerlerini sırasıyla 13,4 cm ve 2076,38 g/dm³, en düşük değerler sırasıyla 13,1 cm ve 2061,68 g/dm³'tür.

Üretilen seriler karşılaştırıldığında yüksek oranda silis dumanı içeren harçların birim hacim ağırlığı daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Genel olarak elde edilen sonuçlar incelendiğinde, üretilen tüm karışımlarda metakaolin oranının artmasıyla yayılma çapının düştüğü görülmüştür. Elde edilen sonuçlara göre; metakaolin ilave edilmiş harçlarda, metakaolin harcın işlenebilirliğini azaltmıştır. Bu etkisi metakaolinin kökeni ve inceliğine bağlıdır. Metakaolin çeşitlerindeki kalsinasyon sıcaklık ve sürelerindeki farklılık, metakaolin karıştırılmış harçlarında normal kıvamların farklılaşmasına yol açmaktadır. Sonuç olarak, harç içerisindeki metakaolinin varlığı su ihtiyacını artırır, ancak harç ve beton içerisinde oluşabilecek agrega segregasyonu riskini arttırmaz. Metakaolinin varlığı su ihtiyacına sebep olduğu için harçların işlenebilirliklerini azalttığı söylenebilir.



Şekil 4.3. Yüzdece hava miktarı değerleri

Yüzdece hava miktarı değerleri Şekil 4.3'te verilmektedir. Tüm seriler incelendiğinde, en yüksek yüzdece hava miktarı değeri %15,62 ile MK80 karışımı gösterirken, en düşük değeri ise %14,59 ile MK20B göstermektedir. MK serisi dikkate alındığında, en yüksek değeri %15,62 ile MK80 numunesi gösterirken, en düşük değeri %14,86 ile MK20 numunesi göstermiştir. MKB serisi dikkate alındığında, en yüksek değer %15,35 ile MK80B numunesinde elde edilirken, en düşük değer %14,59 ile MK20B numunesinde elde edilmiştir.

Elde edilen sonuçlar metakaolin ile silis dumanının farklı etkiler oluşturduğunu göstermiştir. Metakaolinin en fazla kullanıldığı numunelerin yüzdece hava miktarının yüksek çıkmasının nedeni özgül ağırlığının ve tane boyutunun silis dumanının yüksek olmasından kaynakladığı düşünülmüştür. Bakteri kullanımı, bakterisiz numunelere kıyasla yüzdece hava miktarını azaltmıştır, bu sebeple bakteri kullanımının olumlu bir etkisi olduğu gözlemlenmiştir.

4.2. Sertleşmiş Harçlarda Fiziksel Hal Deney Bulguları

Çizelge 4.2. Karışımların KBA-SDYK-GBA değerleri

Karışım Kodu	KBA	Std. Sap. (±)	SDYK	Std. Sap. (±)	GBA	Std. Sap. (±)
MK20	1,849	0,014	2,061	0,006	2,348	0,008
MK20B	1,915	0,012	2,091	0,011	2,325	0,012
MK40	1,926	0,024	2,094	0,024	2,314	0,029
MK40B	1,885	0,005	2,072	0,003	2,318	0,004
MK50	1,955	0,002	2,106	0,002	2,303	0,002
MK50B	1,935	0,012	2,096	0,008	2,306	0,005
MK60	1,931	0,010	2,108	0,010	2,348	0,013
MK60B	1,957	0,015	2,122	0,013	2,343	0,015
MK80	1,916	0,009	2,103	0,003	2,357	0,008
MK80B	1,932	0,003	2,104	0,003	2,334	0,005

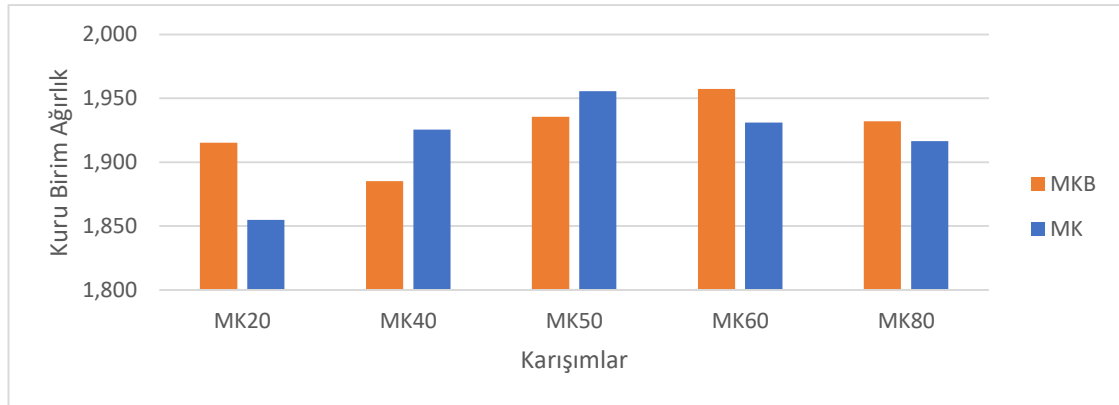
Çizelge 4.3. Karışımların yüzde GBO-SEO değerleri

Karışım Kodu	GBO	Std. Sapma ($\pm$)	SEO	Std. Sapma ($\pm$)
MK20	21,254	0,853	11,496	0,533
MK20B	17,617	0,083	9,199	0,099
MK40	16,796	0,204	8,723	0,153
MK40B	18,682	0,233	9,910	0,145
MK50	15,100	0,037	7,722	0,026
MK50B	16,067	0,329	8,302	0,220
MK60	17,750	0,041	9,192	0,025
MK60B	16,474	0,333	8,417	0,211
MK80	18,694	0,635	9,755	0,373
MK80B	17,214	0,154	8,910	0,088

4.2.1. Kuru birim ağırlık değerleri

Sertleşmiş harçların kuru birim ağırlık değerleri Çizelge 4.3 ve Şekil 4.7-10’da verilmektedir. Tüm seriler incelendiğinde, en yüksek kuru birim ağırlık değeri $1,957 \text{ g/cm}^3$ ile MK60B gösterirken, en düşük değeri ise $1,849 \text{ g/cm}^3$ ile MK20 göstermektedir.

MK serisi dikkate alındığında, en yüksek kuru birim ağırlık değeri $1,955 \text{ g/cm}^3$ ile MK50 gösterirken, en düşük değeri ise $1,849 \text{ g/cm}^3$ ile MK20 elde etmiştir. MKB serisi dikkate alındığında, en yüksek kuru birim ağırlık değeri $1,957 \text{ g/cm}^3$ ile MK60B gösterirken, en düşük değeri ise $1,885 \text{ g/cm}^3$ ile MK40 elde etmiştir. MK20 ile MK80’i ele aldığımızda $1,87$ ’den $1,92$ ’ye çıktığı gözlemlenmiştir, fakat MK20B ile MK80B kıyaslandığında aynı oranda artış görülmemiştir.

**Şekil 4.4.** Karışımların kuru birim ağırlık değerleri

4.2.2. Suya doymun kuru yüzey ağırlık değerleri

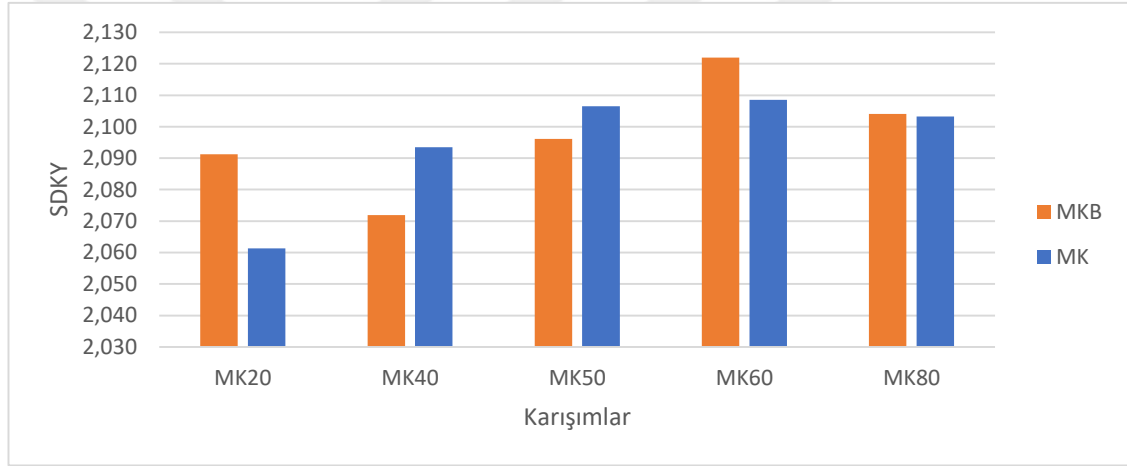
Sertleşmiş harçların suya doymun kuru yüzey ağırlık değerleri Çizelge 4.3 ve Şekil 4.7-10'da verilmektedir. Tüm seriler incelendiğinde, en yüksek suya doymun kuru yüzey ağırlık değeri $2,122 \text{ g/cm}^3$ ile MK60B gösterirken, en düşük değeri ise $2,061 \text{ g/cm}^3$ ile MK20 göstermektedir.

MK serisi dikkate alındığında, en yüksek kuru ağırlık değeri $2,108 \text{ g/cm}^3$ ile MK60 gösterirken, en düşük değeri ise $2,061 \text{ g/cm}^3$ ile MK20 elde etmiştir.

MKB serisi dikkate alındığında, en yüksek kuru ağırlık değeri $2,122 \text{ g/cm}^3$ ile MK60B gösterirken, en düşük değeri ise $2,072 \text{ g/cm}^3$ ile MK40 elde etmiştir.

MK20 ile MK80'i ele aldığımızda $2,061$ 'den $2,103$ 'ye çıktığı gözlemlenmiştir, fakat MK20B ile MK80B kıyaslandığında aynı oranda artış görülmemiştir.

Kuru yığın yoğunluk değerleri ile suya doymun kuru yüzey ağırlık değerlerinin doğru orantılı olduğu tespit edilmiştir.

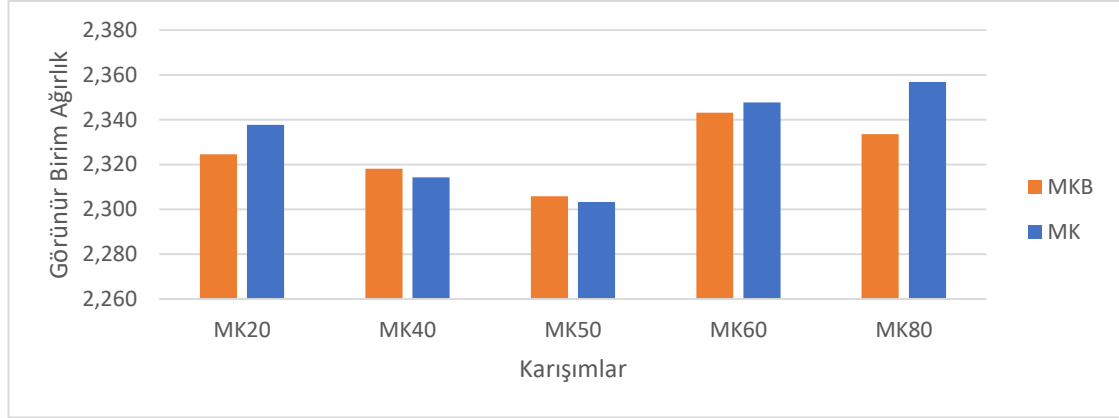


Şekil 4.5. Karışımların suya doymun kuru yüzey değerleri

4.2.3. Görünür birim ağırlık değerleri

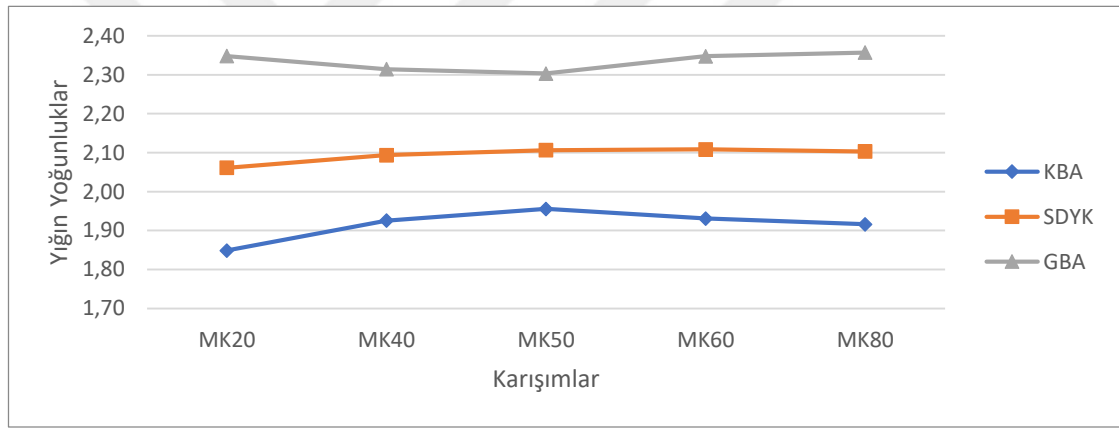
Sertleşmiş harçların görünür birim ağırlık değerleri Çizelge 4.3 ve Şekil 4.7-10'da verilmektedir. Tüm seriler incelendiğinde, en yüksek görünür yığın yoğunluk değeri $2,357 \text{ g/cm}^3$ ile MK80 gösterirken, en düşük değeri ise $2,303 \text{ g/cm}^3$ ile MK50 göstermektedir.

MK serisi dikkate alındığında, en yüksek görünür birim ağırlık değeri $2,357 \text{ g/cm}^3$ ile MK80 gösterirken, en düşük değeri ise $2,303 \text{ g/cm}^3$ ile MK50 elde etmiştir. MKB serisi dikkate alındığında, en yüksek kuru birim ağırlık değeri $2,343 \text{ g/cm}^3$ ile MK60B gösterirken, en düşük değeri ise $2,306 \text{ g/cm}^3$ ile MK50B elde etmiştir.

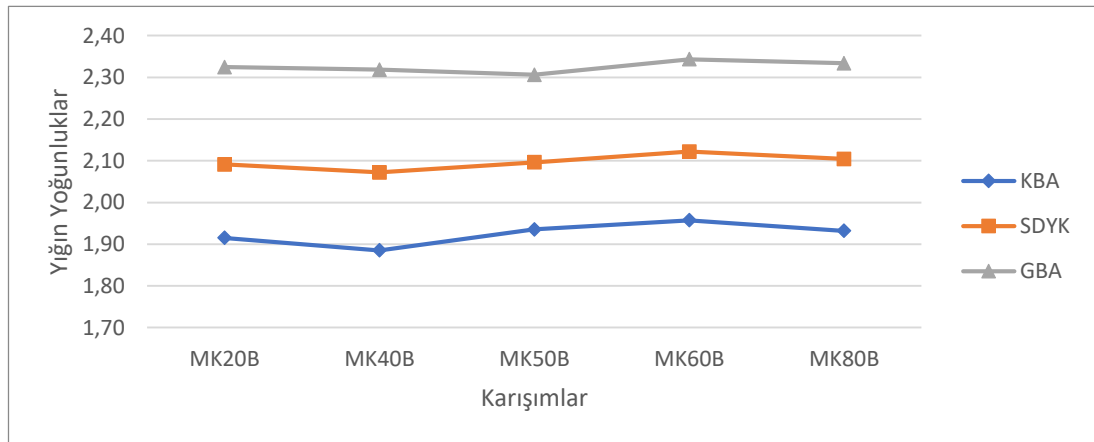


Şekil 4.6. Karışımların görünür birim ağırlık değerleri

Kuru yığın yoğunluk değerleri ile suya doymun kuru yüzey yığın yoğunluk değerlerinin doğru orantılı iken görünür birim ağırlık, diğer yığın yoğunluklarla ters orantılıdır.



Şekil 4.7. MK serisi KBA-SDYK-GBA değerleri

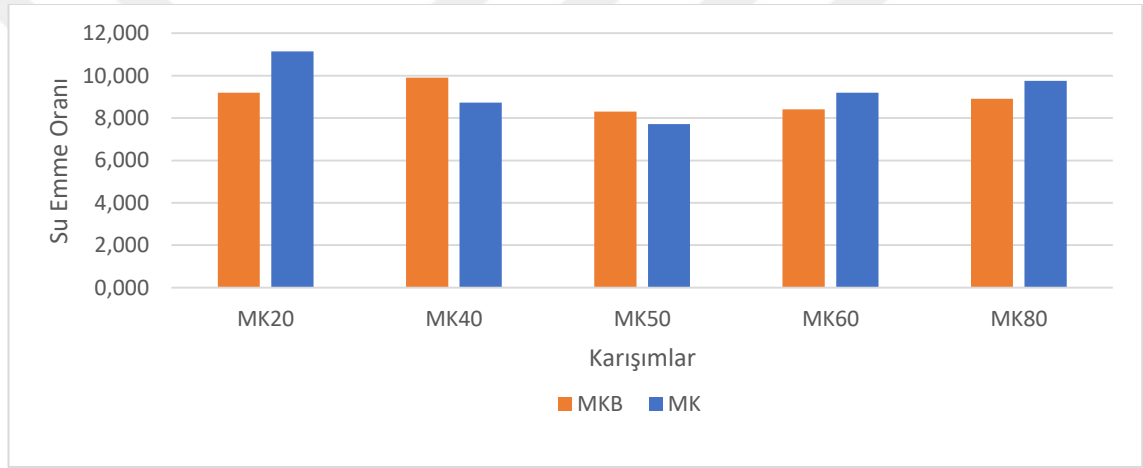


Şekil 4.8. MKB serisi KBA-SDYK-GBA değerleri

4.2.4. Yüzdece su emme oranları

Sertleşmiş harçların yüzdece su emme oranları Çizelge 4.3 ve Şekil 4.7-10'da verilmektedir. Tüm seriler incelendiğinde, en yüksek su emme oranı %11,141 ile MK20 gösterirken, en düşük su emme oranı ise %7,722 ile MK50 göstermektedir.

MK serisi dikkate alındığında, en yüksek su emme oranı %11,141 ile MK20 gösterirken, en düşük su emme oranı ise %7,722 ile MK50 elde etmiştir. MKB serisi dikkate alındığında, en yüksek su emme oranı %9,910 ile MK40B gösterirken, en düşük su emme oranı ise %8,302 ile MK50B elde etmiştir. MK20 ile MK80'i ele aldığımızda %11,141'den %9,755'ye düştüğü gözlemlenmiştir, fakat MK20B ile MK80B kıyaslandığında aynı oranda düşüş görülmemiştir. Bunun sebebi bakterili numunelerin, bakterisiz numunelere kıyasla boşlukların doldurulduğunu düşündürmüştür. Yüzdece hava miktarı tayini bu sonuçları desteklemektedir.

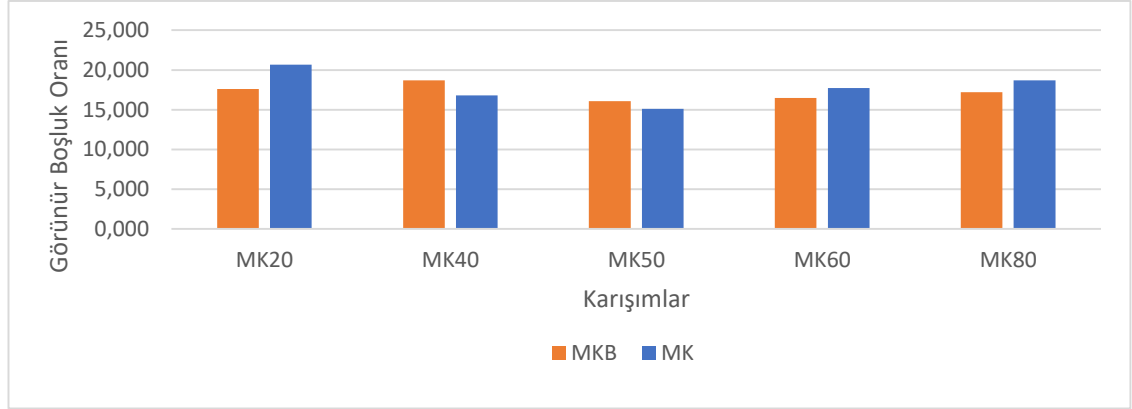


Şekil 4.9. Karışımların yüzdece su emme oranları

4.2.5. Yüzdece görünür boşluk oranları

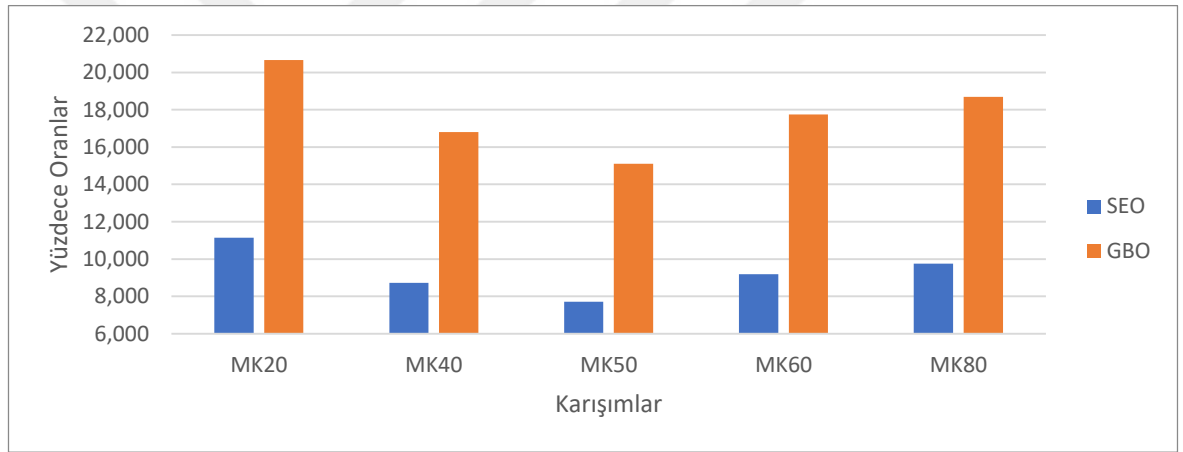
Sertleşmiş harçların yüzdece görünür boşluk oranları Çizelge 4.3'te verilmektedir. Tüm seriler incelendiğinde, en yüksek görünür boşluk oranı %20,663 ile MK20 gösterirken, en düşük su emme oranı ise %15,10 ile MK50 göstermektedir.

MK serisi dikkate alındığında, en yüksek görünür boşluk su emme oranı %20,663 ile MK20 gösterirken, en düşük su emme oranı ise %15,100 ile MK50 elde etmiştir. MKB serisi dikkate alındığında, en yüksek görünür boşluk su emme oranı %18,682 ile MK40B gösterirken, en düşük su emme oranı ise %16,067 ile MK50B elde etmiştir. MK20 ile MK80'i ele aldığımızda %20,663'ten %18,694'e düştüğü gözlemlenmiştir, fakat MK20B ile MK80B kıyaslandığında aynı oranda artış görülmemiştir. Bakteri kullanımının olumlu etkisi olduğunu gözlemlenmiştir.

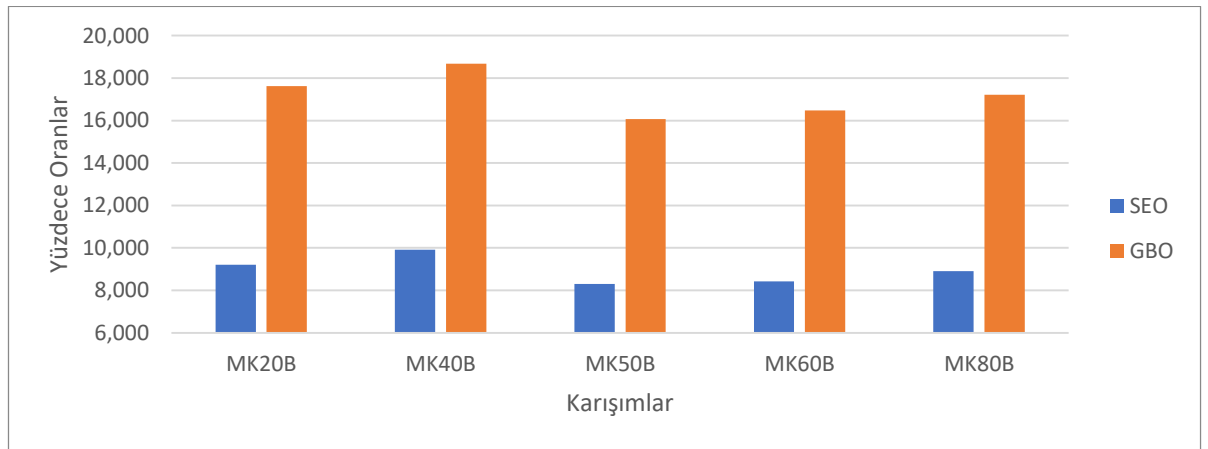


Şekil 4.10. Karışımların yüzdede görünür boşluk oranları

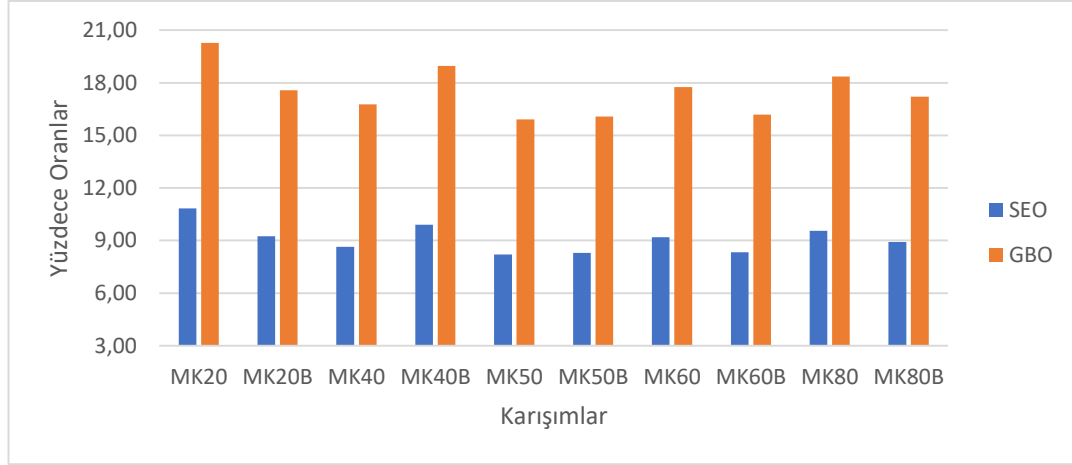
Yüzdece su emme oranı değerleri ile yüzdede görünür boşluk değerlerinin doğru orantılı olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 4.11. MK serisi SEO-GBO değerleri



Şekil 4.12. MKB serisi SEO-GBO değerleri



Şekil 4.13. Karışımların SEO-GBO değerleri

4.3. Sertleşmiş Harçlarda Mekanik Hal Deney Bulguları

4.3.1. Eğilme dayanımı deney bulguları

Çizelge 4.4. Karışımların eğilme dayanımı değerleri (MPa)

Karışım Kodu	3. gün	Std. Sapma ($\pm$)	7.gün	Std. Sapma ($\pm$)
MK20	2,87	0,35	6,58	0,45
MK20B	2,68	0,14	6,72	0,70
MK40	2,90	0,14	6,50	0,57
MK40B	3,50	0,36	8,87	0,32
MK50	2,53	0,06	6,97	0,45
MK50B	2,95	0,21	8,50	0,35
MK60	3,17	0,21	7,42	0,75
MK60B	2,67	0,15	8,15	0,51
MK80	3,03	0,25	4,13	0,67
MK80B	2,93	0,15	6,38	0,89

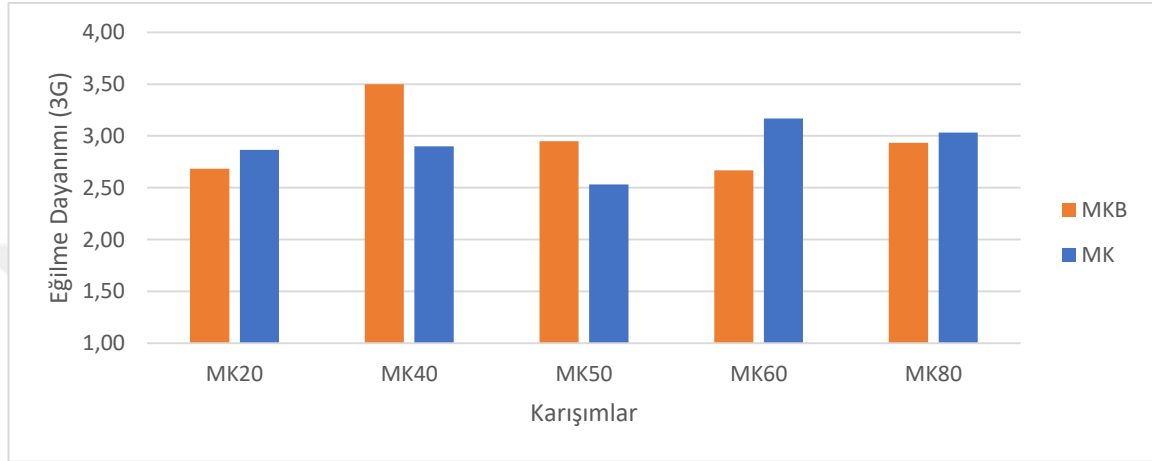
Eğilme dayanımı değerleri Tablo 4.4’te verilmektedir. Tüm seriler incelendiğinde, en yüksek eğilme dayanımlarını 3.gün ve 7.gün için sırasıyla 3,50 ve 8,87 MPa olmak üzere MK40B numunesi gösterirken, en düşük değerler ise 3.günde 2,53 MPa ile MK50 ve 7.günde 4,13 MPa ile MK80 numunesinde elde edilmiştir.

MK serisi dikkate alındığında, en yüksek basınç dayanımlarını 3.gün ve 7.gün için sırasıyla 3,17 ve 7,42 MPa olmak üzere MK60 numunesi gösterirken, en düşük değerler ise 3.günde 2,53 MPa ile MK50 ve 7.günde 4,13 MPa olmak üzere MK80 numunesinde elde edilmiştir.

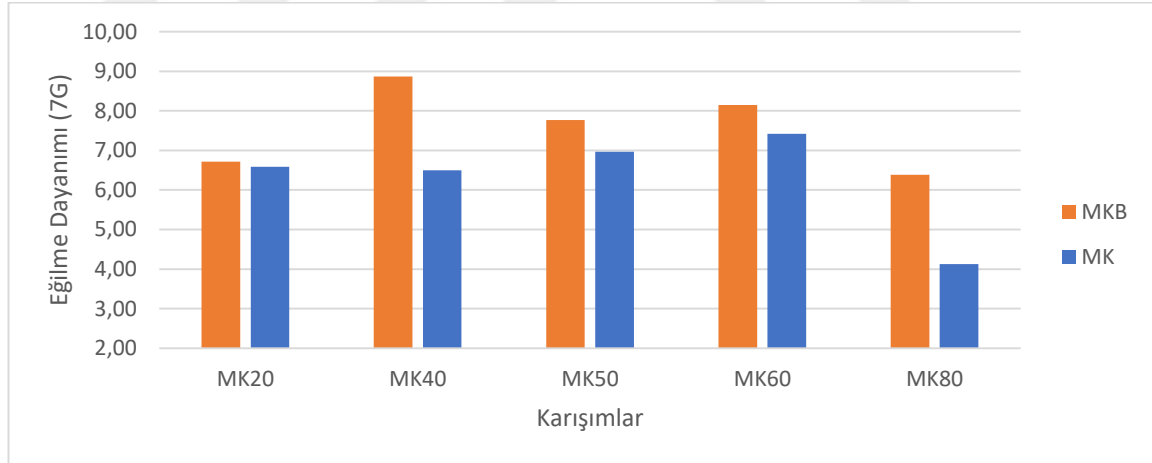
MKB serisi dikkate alındığında, en yüksek basınç dayanımlarını 3.gün ve 7.gün için sırasıyla 3,50 ve 8,87 MPa olmak üzere MK40B numunesi gösterirken, en düşük

değerler ise 3.günde 2,67 MPa ile MK60B ve 7.günde 6,38 MPa olmak üzere MK80B numunesinde elde edilmiştir.

Elde edilen sonuçlar metakaolin ile silis dumanının farklı etkiler oluşturduğunu göstermiştir. Bakteri kullanımı, metakaolinin en fazla kullanıldığı numunede eğilme dayanımını artırırken, silis dumanın en fazla kullanıldığı numunede neredeyse hiç etki göstermemiştir. 7 günlük numunelerde ise bakteri kullanımı eğilme dayanımını tüm seriler için olumlu etki göstermiştir.



Şekil 4.14. Karışımların 3 günlük eğilme dayanımı değerleri



Şekil 4.15. Karışımların 7 günlük eğilme dayanımı değerleri

Harca metakaolin ilavesi, çimento macunu ile agrega parçacıkları arasındaki bağı iyileştirmenin yanı sıra çimento hamurunun yoğunluğunu artırır ve bu da betonun dayanımını önemli ölçüde iyileştirir. Literatüre göre metakaolinin mukavemete katkısını etkileyen ana faktörler a) doldurma etkisi, b) seyreltme etkisi ve c) metakaolinin CH ile puzolanik reaksiyonudur (Wild, Khatib ve Jones 1996).

Diğer yazarlar, metakaolin macunlarının aktivasyonunu incelediler ve geopolimerizasyon sırasında oluşan ilk fazın daha sonra daha düzenli ikinci bir faza

dönüştüğünü doğrulamışlardır (J. L. Provis ve van Deventer 2007). Ancak $\text{SiO}_2/\text{AlO}_3$ oranının artmasının genellikle ilk reaksiyon hızını düşürdüğünü fark etmişlerdir.

4.3.2. Basınç dayanımı deney bulguları

Çizelge 4.5. Karışımların basınç dayanımı değerleri

Karışım Kodu	3. gün	Std. Sapma ($\pm$)	7. gün	Std. Sapma ($\pm$)
MK20	4,43	0,14	12,93	0,94
MK20B	4,75	0,18	14,24	0,62
MK40	4,54	0,15	10,85	0,43
MK40B	4,60	0,21	15,43	0,63
MK50	3,93	0,12	9,80	0,28
MK50B	4,26	0,07	11,82	0,64
MK60	4,21	0,13	9,93	0,55
MK60B	4,38	0,09	10,57	0,63
MK80	4,53	0,05	8,25	0,25
MK80B	4,72	0,12	8,55	0,41

Basınç dayanımı değerleri Çizelgede verilmektedir. Tüm seriler incelendiğinde, en yüksek basınç dayanımlarını 3.günde 4,75 MPa ile MK20B ve 7.günde 15,43 MPa ile MK40B numunesi gösterirken, en düşük değerler ise 3.günde 3,93 MPa ile MK50 ve 7.günde 8,25 MPa ile MK80 numunesinde elde edilmiştir.

MK serisi dikkate alındığında, en yüksek basınç dayanımlarını 3.günde 4,54 MPa ile MK40 ve 7.günde 12,93 MPa ile MK20 numunesi gösterirken, en düşük değerler ise 3.günde 3,93 MPa ile MK50 ve 7.günde 8,25 MPa ile MK80 numunesinde elde edilmiştir.

MKB serisi dikkate alındığında, en yüksek basınç dayanımlarını 3.günde 4,75 MPa ile MK20B ve 7.günde 15,43 MPa ile MK40B numunesi gösterirken, en düşük değerler ise 3.günde 4,26 MPa ile MK50B ve 7.günde 8,55 MPa ile MK80B numunesinde elde edilmiştir.

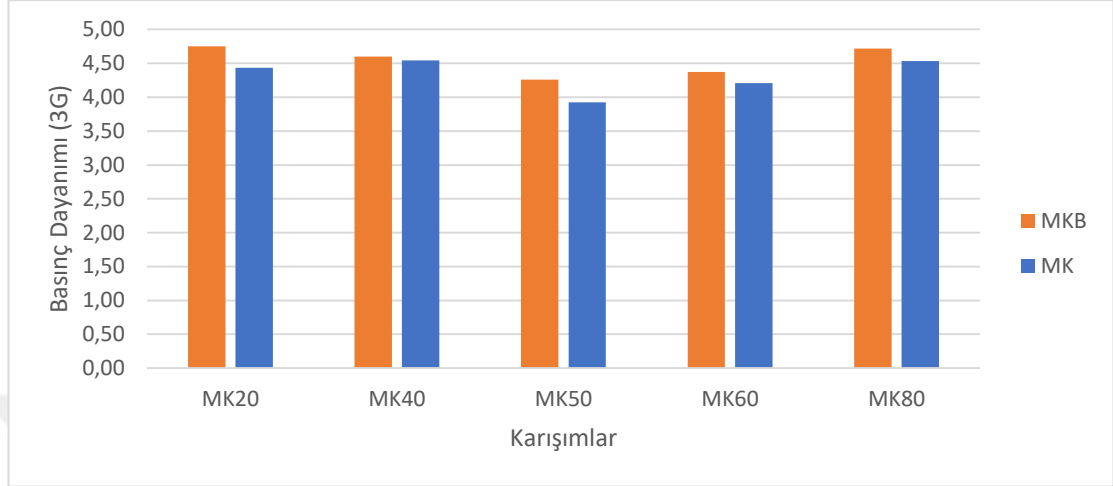
Elde edilen sonuçlar metakaolin ile silis dumanının farklı etkiler oluşturduğunu göstermiştir. Silis dumanının kullanımı basınç dayanımı arttırırken, metakaolin kullanımı basınç dayanımının düşmesine yol açmıştır.

Bakteri kullanımı silis yoğun kullanıldığı numunelerde basınç dayanımını arttırırken, metakaolinin yoğun kullanıldığı numunelerde neredeyse hiç etki göstermemiştir. 3 ve 7 günlük numunelerde ise bakteri kullanımı basınç dayanımını tüm seriler için olumlu etki göstermiştir.

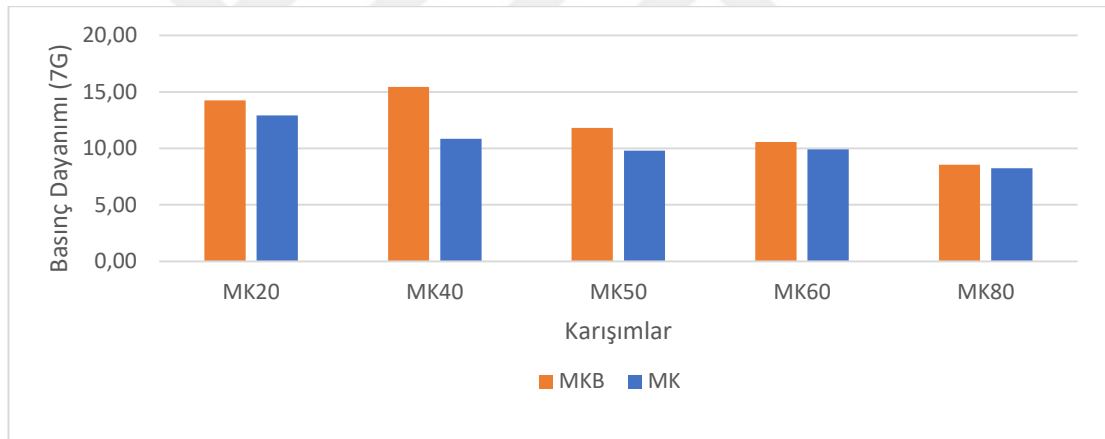
Geopolimerlerin basınç dayanımlarına aktivatör konsantrasyonu önemli etki yapmaktadır. İdeal aktivatör konsantrasyonu geopolimerin dayanımında artış gerçekleştirmektedir (De Vargas vd. 2011). Bu ideal konsantrasyonun ötesinde malzemenin geopolimer yapısını değiştirebilecek alkali aktifleştirilmiş matris de bulunan serbest OH^- iyonlarından dolayı malzemenin mekanik özelliklerinde kayıplar da oluşabilmektedir. Geopolimerlerin yaşı ve kür sıcaklığı da örneklerin basınç dayanımında etkili olan diğer değişkenlerdir. Bununla birlikte bu değişkenlerin etkili olabilmesi için geopolimerizasyon süresinde ortamda yeterli aktivatör konsantrasyonu bulunmalıdır.

Phair ve Van Deventer (2001), Si ve Al türlerinin metakaolinden çözünmesinin pH 12 için yüksek olduğunu belirtmektedir. Bununla birlikte, bu koşullar için Na, Ca ve

Mg hemen hemen hiç çözünmeye sahip değildir. Kaolin ile karşılaştırıldığında alüminyum çözünmesi 10 kat, silis çözünmesi ise iki kat daha fazladır. Na, Mg ve Ca ise metakaolinde çözünmesi daha düşüktür.



Şekil 4.16. Karışımların 3 günlük basınç dayanımı değerleri



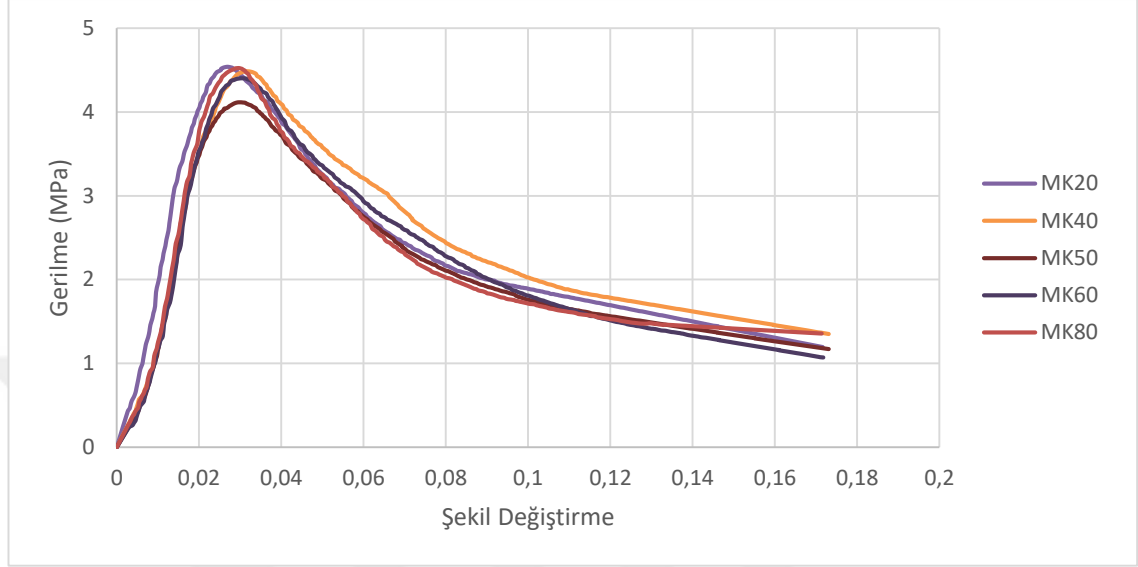
Şekil 4.17. Karışımların 7 günlük basınç dayanımı değerleri

4.3.3. Gerilme-şekil değiştirme

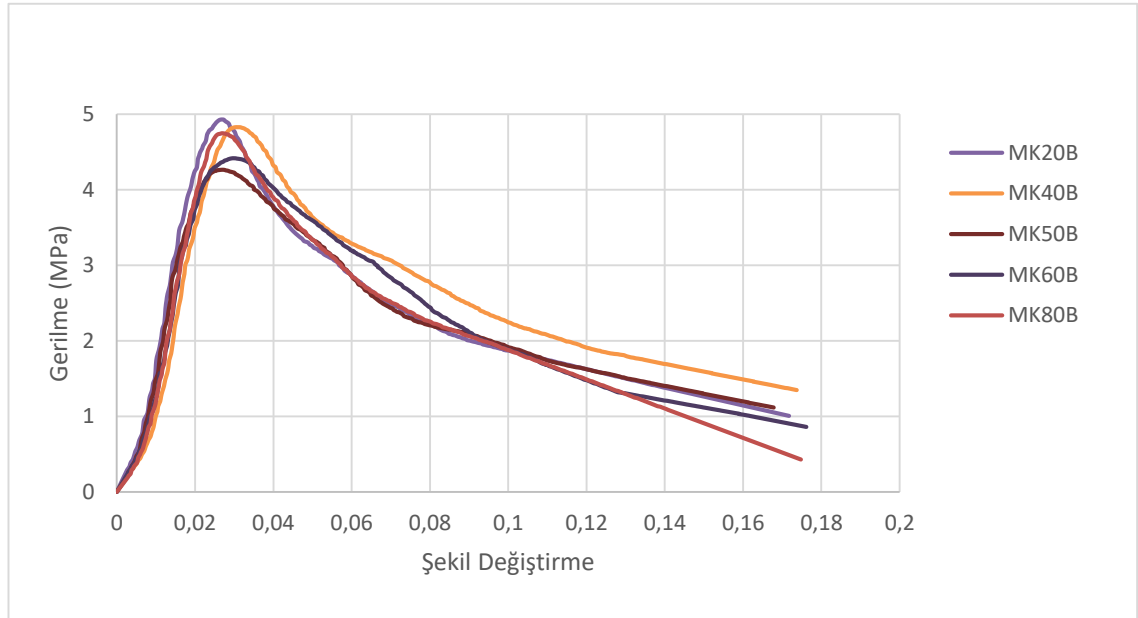
Sertleşmiş harçlar üzerinde gerçekleştirilen eğilme ve basınç deneylerden 3. ve 7.günlerde alınan yük ve deplasman verileri kullanılarak karışımların gerilme-şekil değiştirme davranışları hem basınç hem de eğilme yükleri altında incelenmiştir.

Basınç yükleri altında çizilen gerilme-şekil değiştirme eğrileri incelendiğinde, karışımlarda metakaolin oranının artmasıyla dayanım silis dumanına kıyasla düşmüş olsa da karışımlar daha fazla şekil değiştirme göstermiş daha fazla yük taşıyarak nihai dayanıma ulaşmışlardır.

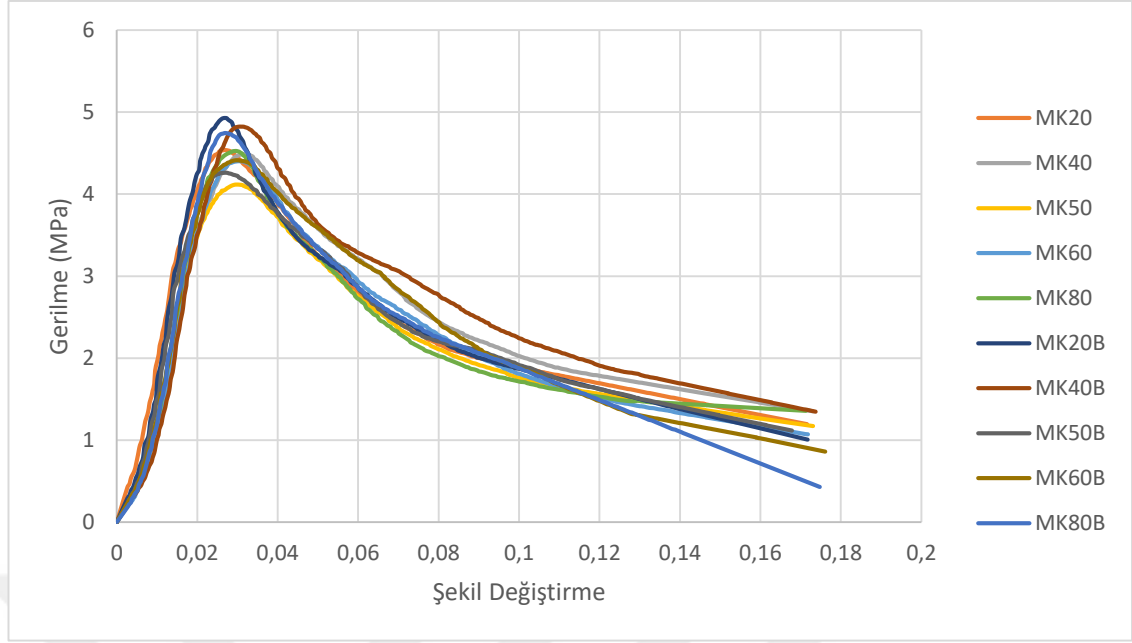
3. gün alınan verilere göre, bakterisiz karışım serileri içerisinde MK80 numunesi daha az şekil değiştirme göstermiştir. Bakterili karışım serileri içerisinde ise MK20B numunesi en fazla şekil değiştirme göstermiştir. Bu karışımda rijit bir davranış ve elastik bölgedeki gerilme-şekil değiştirme eğrisinin daha dik bir açığa sahip olduğu görülmüştür. Bunun nedeni yüksek silis dumanı içeriğiyle yüksek dayanıma sahip olması olabilir.



Şekil 4.18. MK serisinin basınç yükleri altındaki 3 günlük gerilme-şekil değiştirme eğrileri

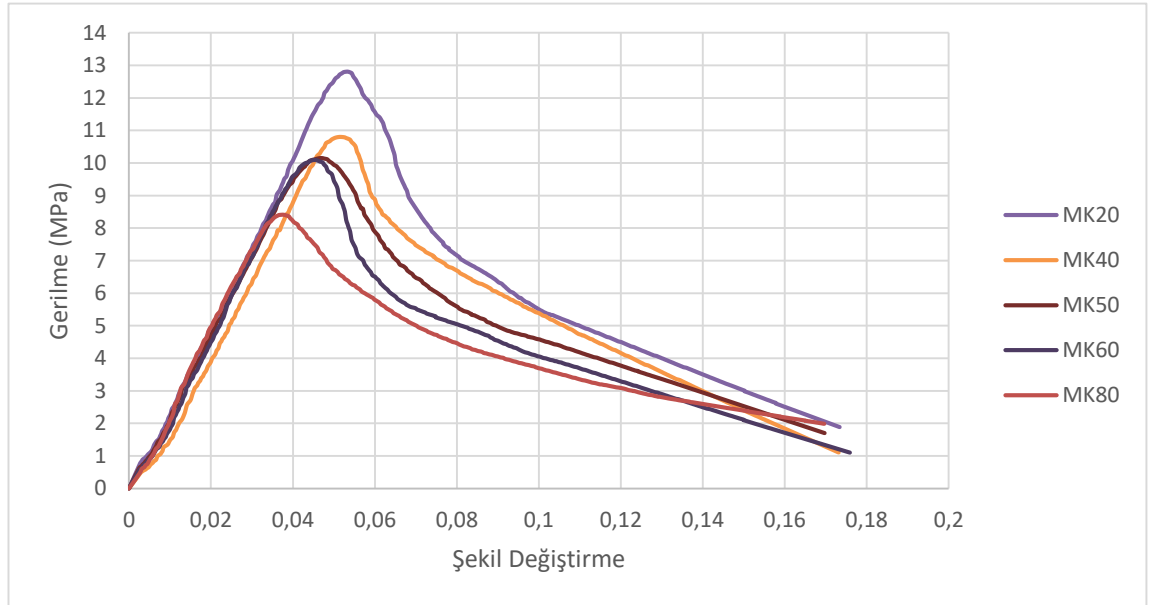


Şekil 4.19. MKB serisinin basınç yükleri altındaki 3 günlük gerilme-şekil değiştirme eğrileri

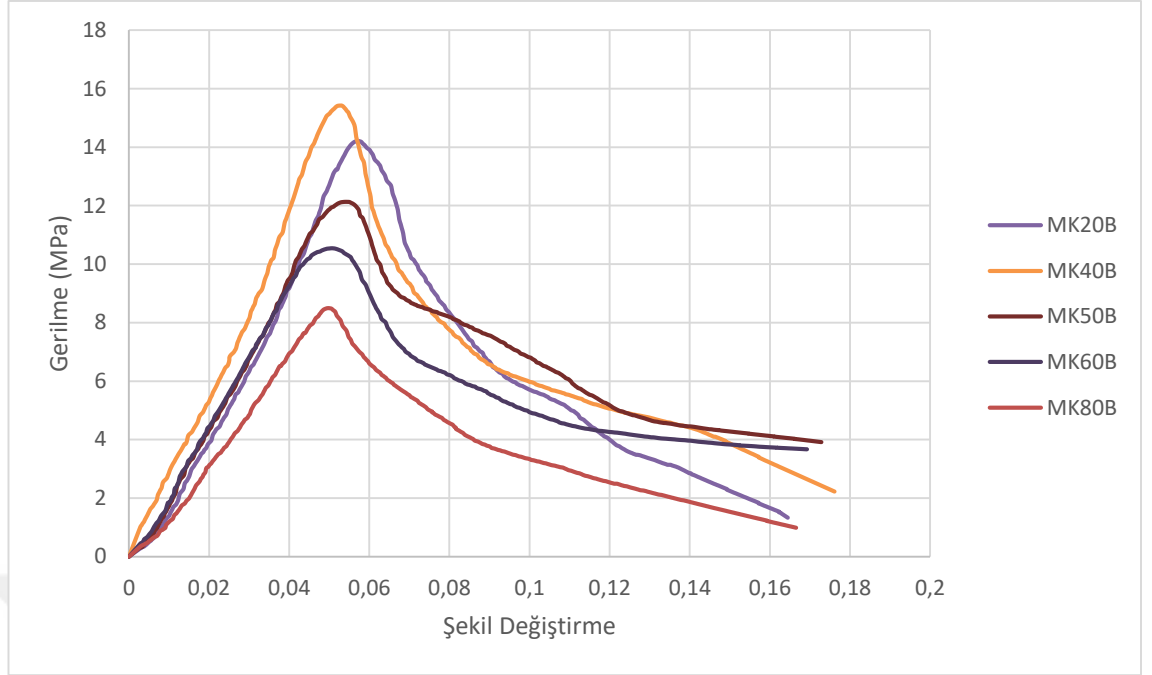


Şekil 4.20. Karışımların basınç yükleri altındaki 3 günlük gerilme-şekil değiştirme eğrileri

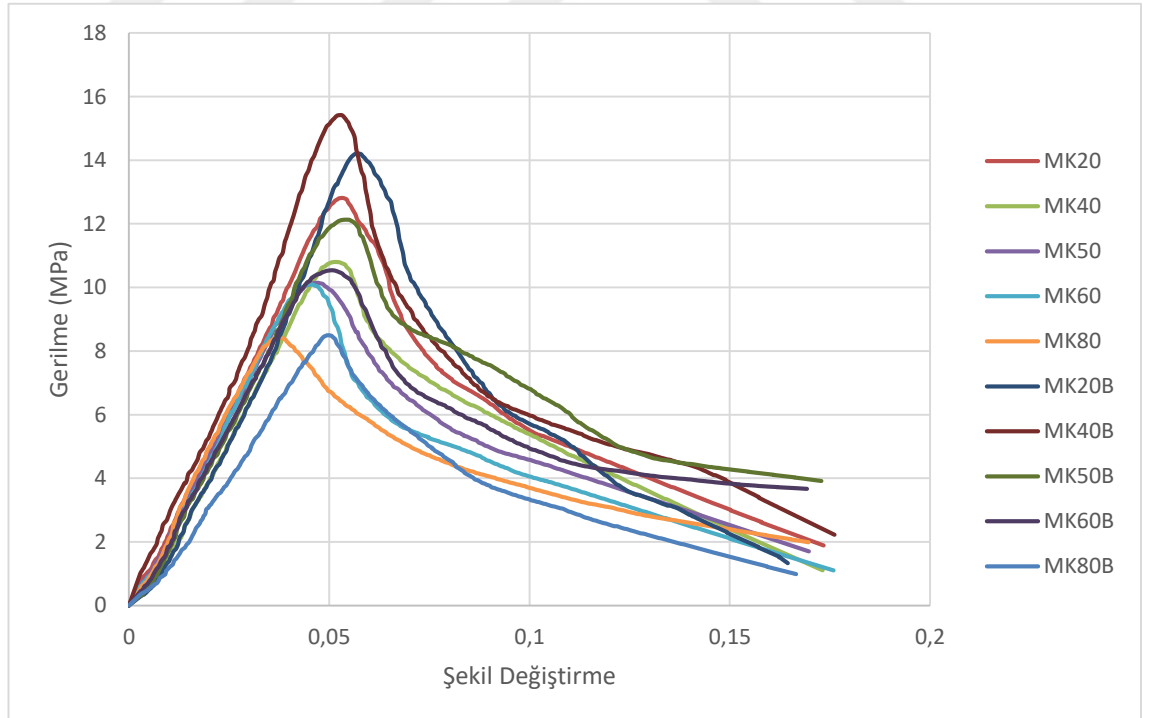
7. gün alınan verilere göre, bakterisiz karışım serileri içerisinde MK80 numunesi daha az şekil değiştirme gösterirken MK20 daha fazla şekil değiştirme göstermiştir. Bakterili karışım serileri içerisinde ise MK40B numunesi en fazla şekil değiştirme gösterirken MK80B en az şekil değiştirme göstermiştir. Ayrıca eklenen bakterili harçların kırılma sonrası davranışını geliştirdiğini, çatlakların oluşmasını ve yayılmasını engellediğini söylenebilir.



Şekil 4.21. MK serisinin basınç yükleri altındaki 7 günlük gerilme-şekil değiştirme eğrileri

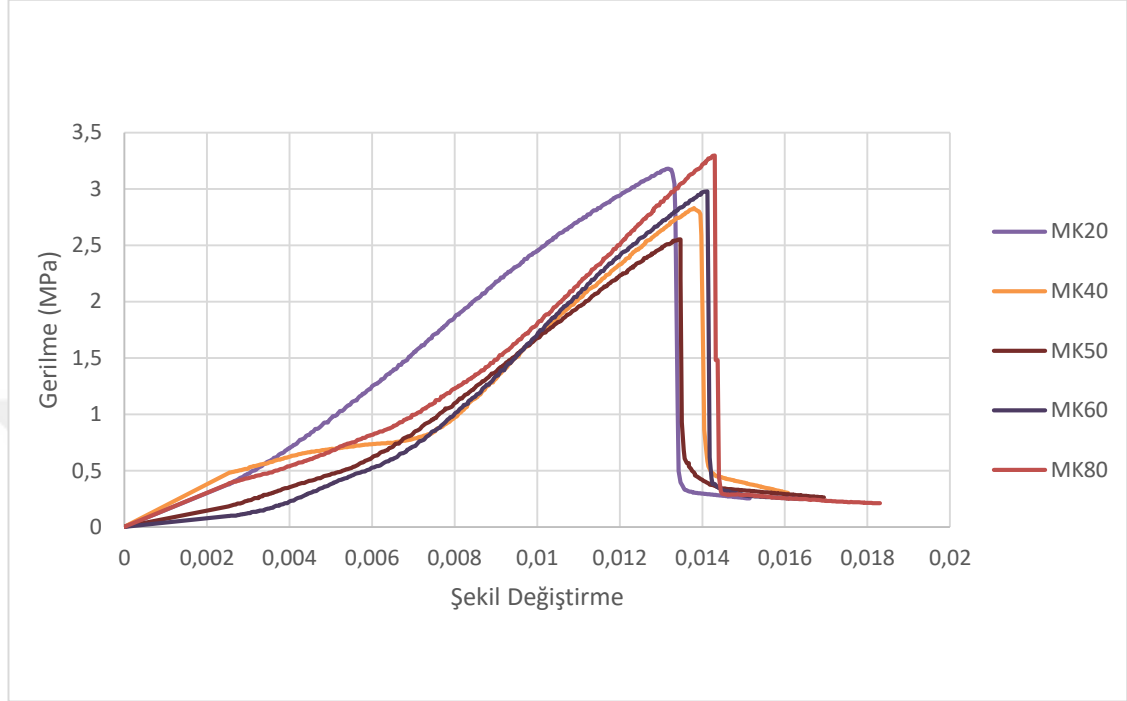


Şekil 4.22. MKB serisinin basınç yükleri altındaki 7 günlük gerilme-şekil değiştirme eğrileri

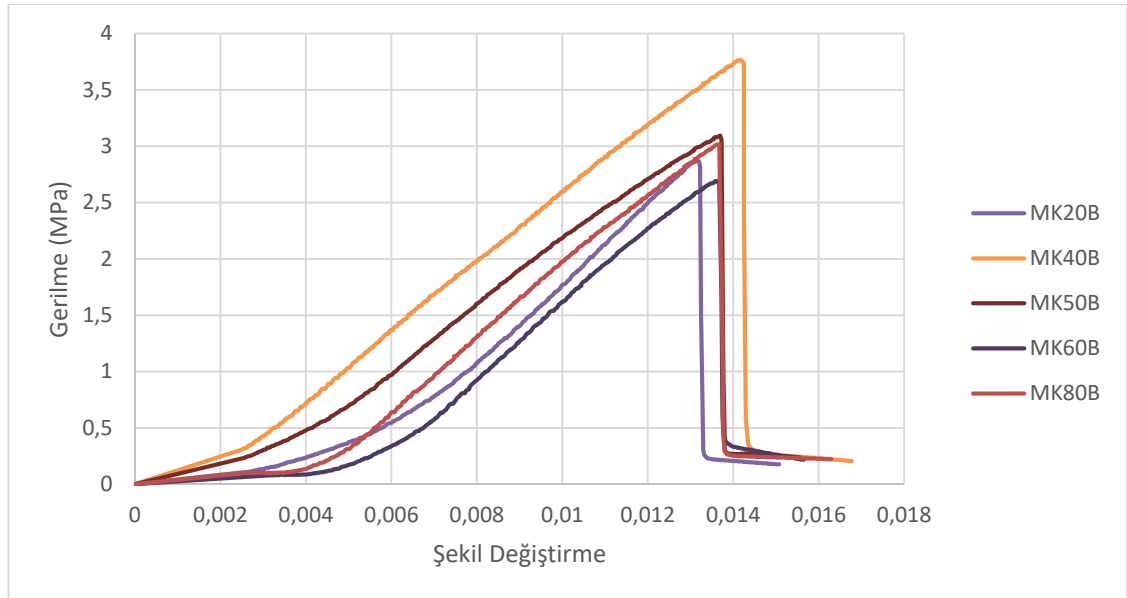


Şekil 4.23. Karışımların basınç yükleri altındaki 7 günlük gerilme-şekil değiştirme eğrileri

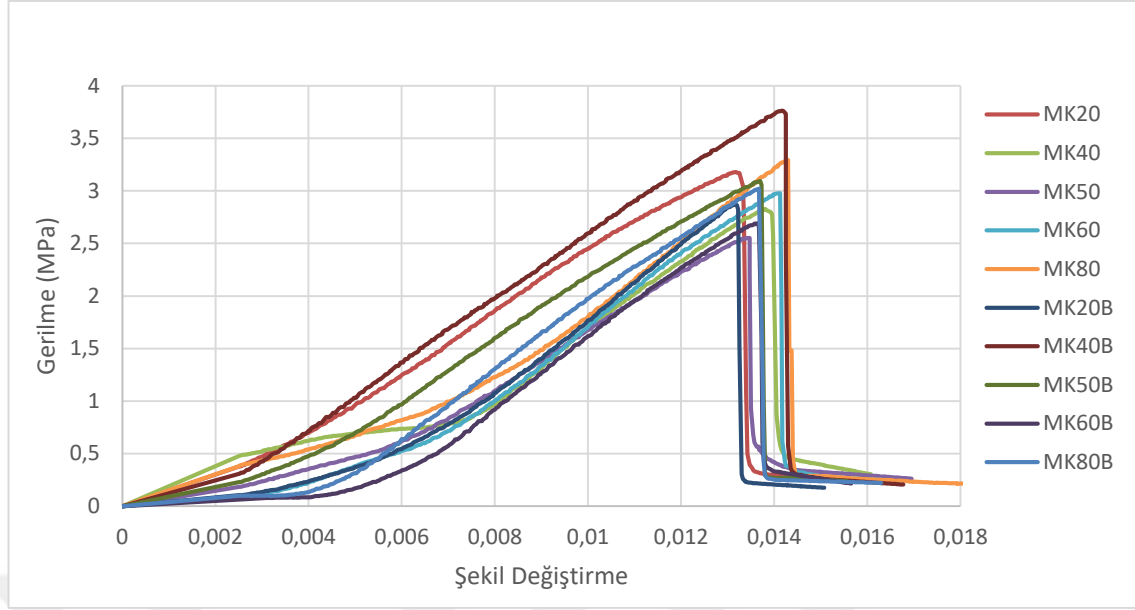
Eğilme yükleri altında çizilen gerilme-şekil değiştirme eğrileri incelendiğinde, 3. gün alınan verilere göre, bakterisiz karışım serileri içerisinde MK80 numunesi daha fazla şekil değiştirme göstermiştir. Bakterili karışım serileri içerisinde ise MK40B numunesi en fazla şekil değiştirme göstermiştir.



Şekil 4.24. MK serisinin eğilme yükleri altındaki 3 günlük gerilme-şekil değiştirme eğrileri

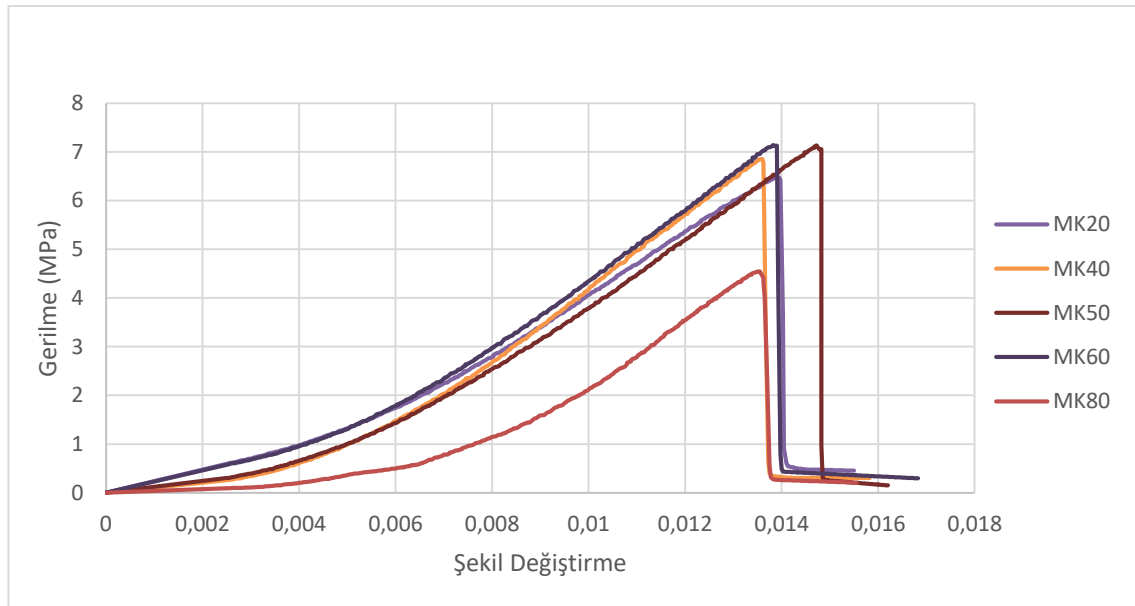


Şekil 4.25. MKB serisinin eğilme yükleri altındaki 3 günlük gerilme-şekil değiştirme eğrileri

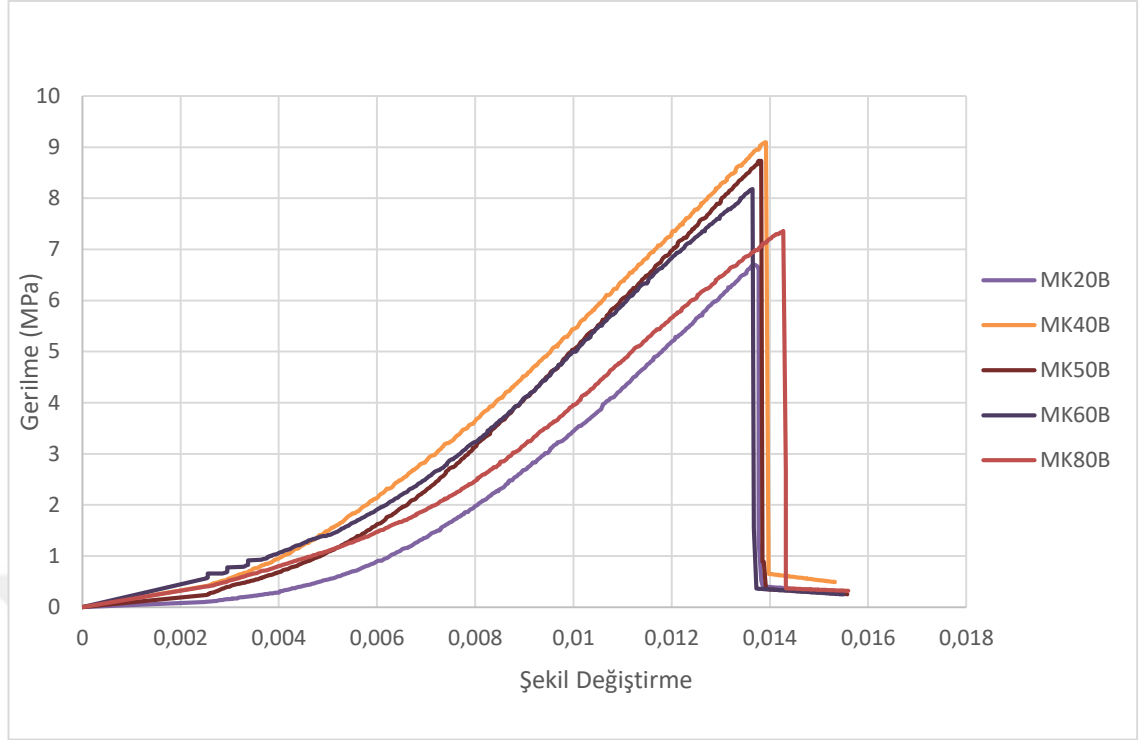


Şekil 4.26. Karışımların eğilme yükleri altındaki 3 günlük gerilme-şekil değiştirme eğrileri

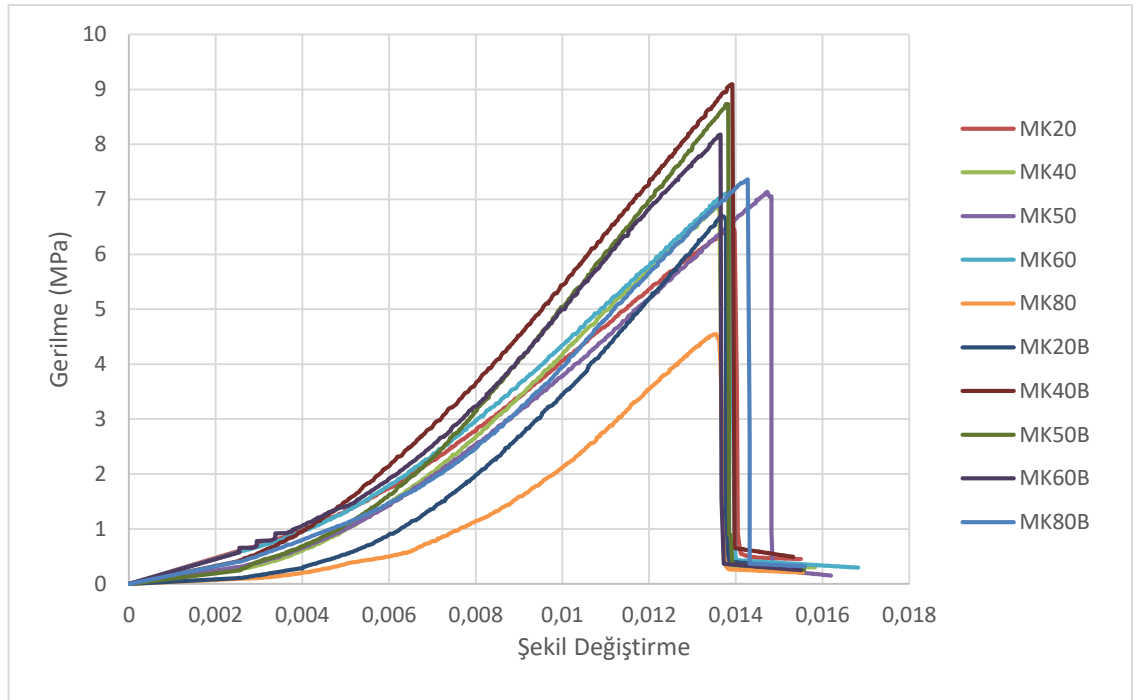
7. gün alınan verilere göre, bakterisiz karışım serileri içerisinde MK20 numunesi daha fazla şekil değiştirme gösterirken MK80 daha az şekil değiştirme göstermiştir. Bakterili karışım serileri içerisinde ise MK40B numunesi en fazla şekil değiştirme gösterirken MK20B en az şekil değiştirme göstermiştir. Ayrıca eklenen bakterili harçların kırılma sonrası davranışını geliştirdiğini, çatlakların oluşmasını ve yayılmasını engellediğini söylenebilir. Bakterisiz karışımlarla karşılaştırıldığında, bakterili karışımların dayanımları daha yüksek değerler almıştır.



Şekil 4.27. MK serisinin eğilme yükleri altındaki 7 günlük gerilme-şekil değiştirme eğrileri



Şekil 4.28. MKB serisinin eğilme yükleri altındaki 7 günlük gerilme-şekil değiştirme eğrileri



Şekil 4.29. Karışımların eğilme yükleri altındaki 7 günlük gerilme-şekil değiştirme eğrileri

4.4. Sertleşmiş Harçlarda Durabilite Hal Deney Bulguları

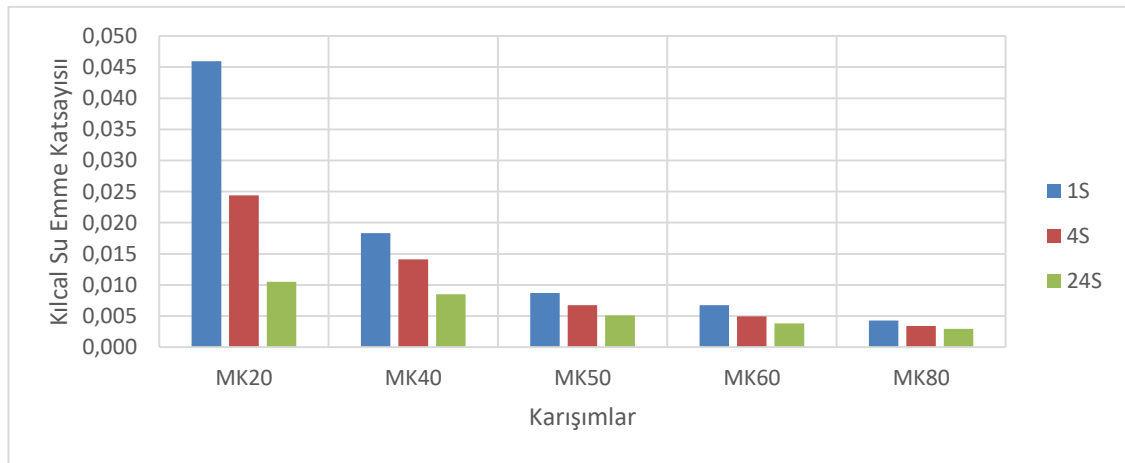
4.4.1. Kılcal su geçirimsizlik tayini

Çizelge 4.6. Karışımların kılcal su emme katsayısı değerleri ($\text{cm/sn}^{1/2}$)

Karışım Kodu	K_1	K_4	K_{24}
MK20	0,0459	0,0244	0,0105
MK20B	0,0156	0,0134	0,0088
MK40	0,0183	0,0141	0,0085
MK40B	0,0200	0,0169	0,0093
MK50	0,0087	0,0068	0,0051
MK50B	0,0127	0,0110	0,0075
MK60	0,0067	0,0050	0,0038
MK60B	0,0072	0,0057	0,0056
MK80	0,0043	0,0034	0,0029
MK80B	0,0051	0,0042	0,0045

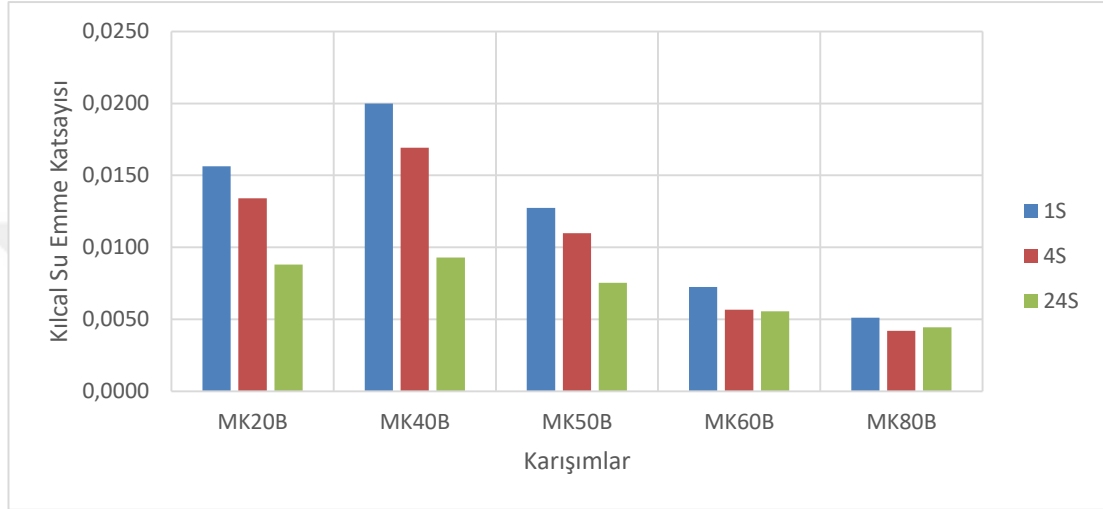
Tablo 4.6’da karışımlara ait, belirli saatlerde hesaplanmış kılcal su emme katsayıları gösterilmiştir. 1 saatlik sürenin, boşluklar içerisinde yükselmesi için yeterli bir süre olmadığını düşünülebilir. Bu yüzden 24 saat sonucunda elde edilen veriler, harçların kılcal geçirimsizliği üzerine yorumlanmasında daha isabetli olmuştur.

MK serisi incelendiğinde, 1 saatlik verilere göre, en yüksek kılcal su emme katsayısını $0,0459 \text{ cm/sn}^{1/2}$ ile MK20 numunesi gösterirken, en düşük değeri ise $0,0043 \text{ cm/sn}^{1/2}$ ile MK80 numunesi göstermiştir. 4 saatlik verilere göre, en yüksek kılcal su emme katsayısını $0,0244 \text{ cm/sn}^{1/2}$ ile MK20 numunesi gösterirken, en düşük değeri ise $0,0034 \text{ cm/sn}^{1/2}$ ile MK80 numunesi göstermiştir. 24 saatlik verilere göre, en yüksek kılcal su emme katsayısını $0,0105 \text{ cm/sn}^{1/2}$ ile MK20 numunesi gösterirken, en düşük değeri ise $0,0029 \text{ cm/sn}^{1/2}$ ile MK80 numunesi göstermiştir.



Şekil 4.30. MK serisi 1S-4S-24S sürelerindeki kılcal su emme katsayısı değerleri

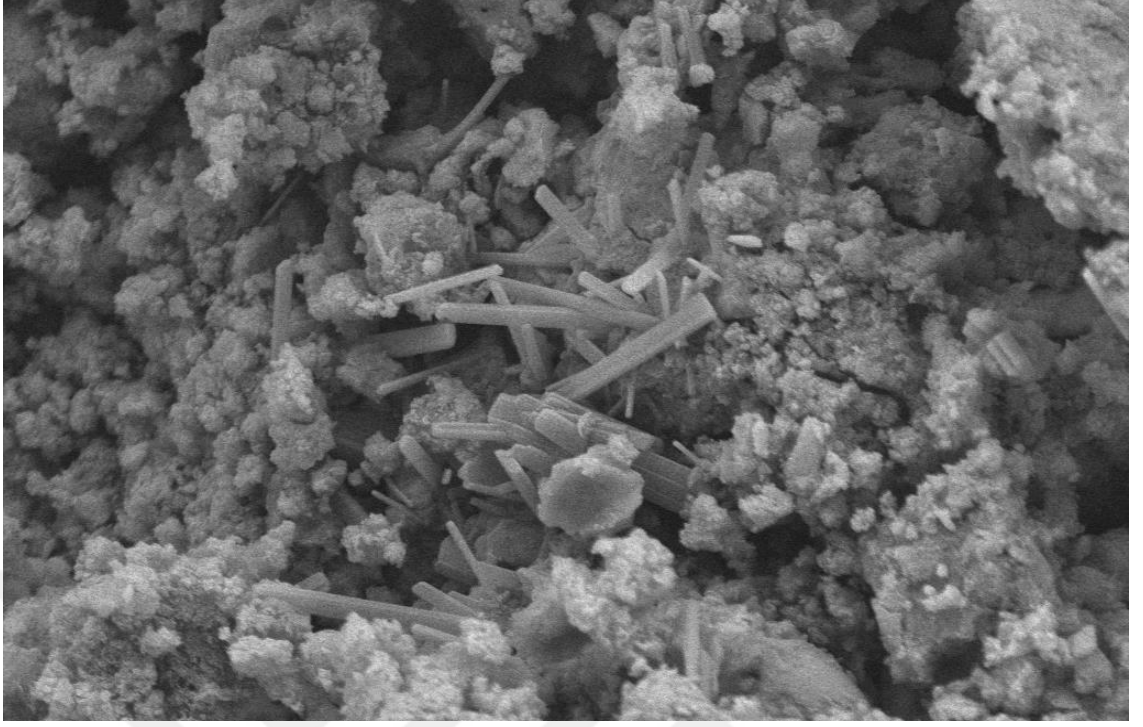
MKB serisi incelendiğinde, 1 saatlik verilere göre, en yüksek kılcal su emme katsayısını $0,0200 \text{ cm/sn}^{1/2}$ ile MK40B numunesi gösterirken, en düşük değeri ise $0,0051 \text{ cm/sn}^{1/2}$ ile MK80B numunesi göstermiştir. 4 saatlik verilere göre, en yüksek kılcal su emme katsayısını $0,0169 \text{ cm/sn}^{1/2}$ ile MK40B numunesi gösterirken, en düşük değeri ise $0,0042 \text{ cm/sn}^{1/2}$ ile MK80B numunesi göstermiştir. 24 saatlik verilere göre, en yüksek kılcal su emme katsayısını $0,0093 \text{ cm/sn}^{1/2}$ ile MK40B numunesi gösterirken, en düşük değeri ise $0,0045 \text{ cm/sn}^{1/2}$ ile MK80B numunesi göstermiştir.



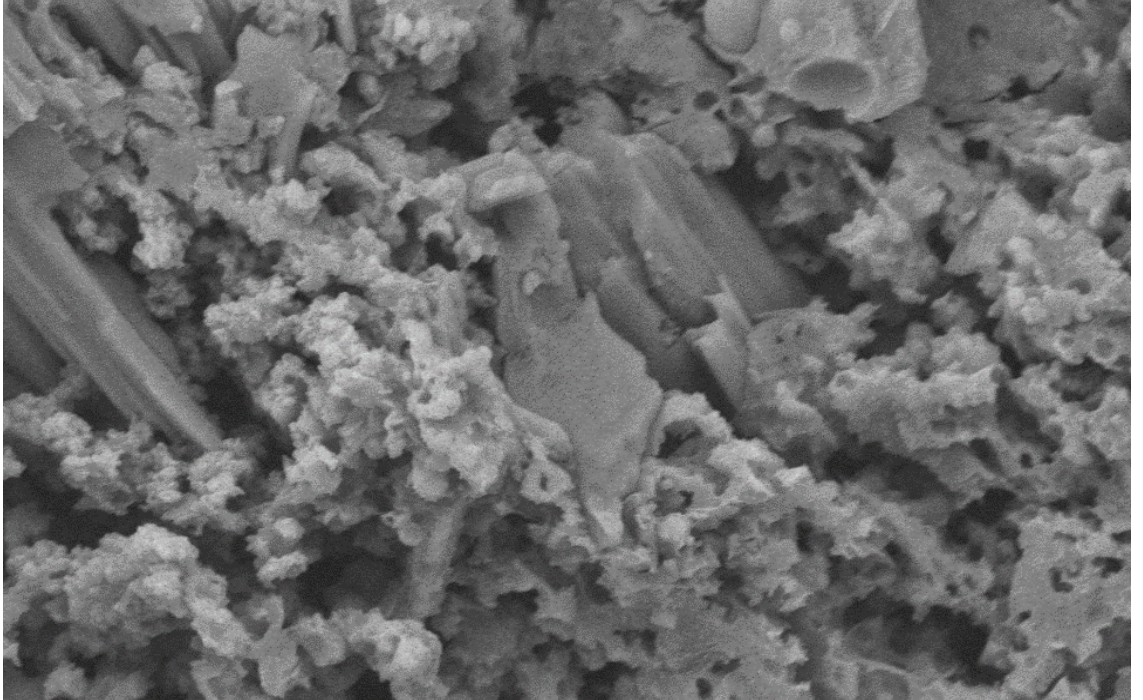
Şekil 4.31. MKB serisi 1S-4S-24S sürelerindeki kılcal su emme katsayısı değerleri

4.5. SEM görüntüleri

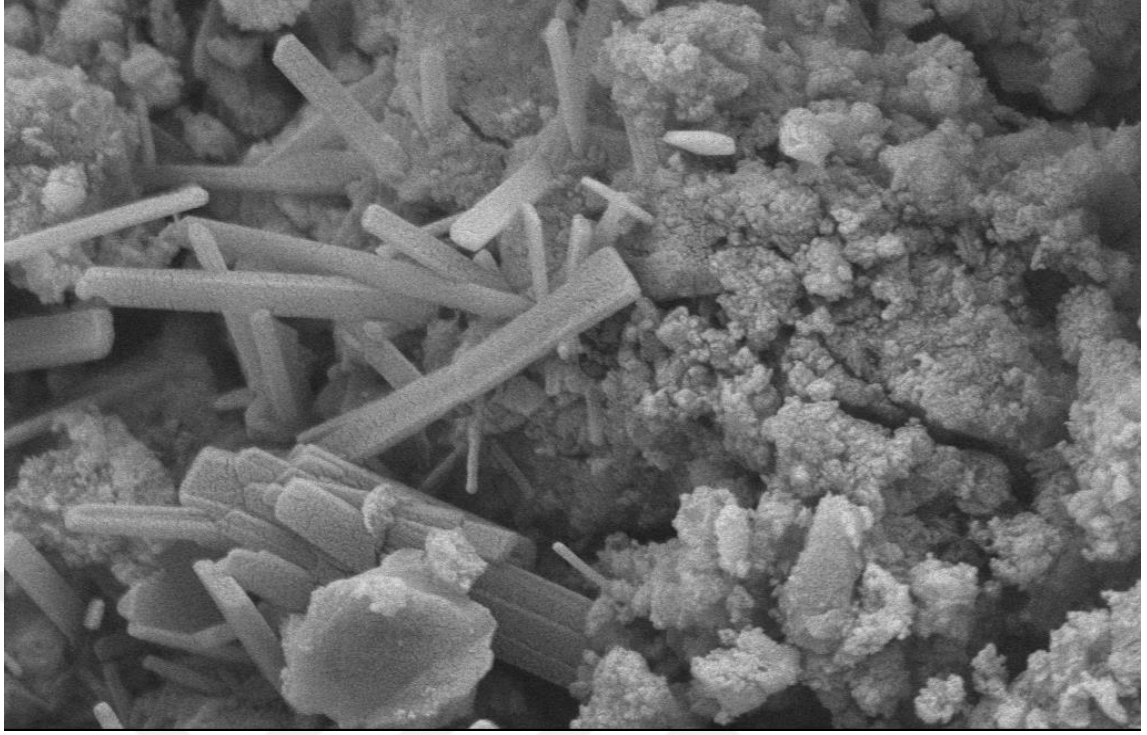
Normal hava küre koşullarına tabii tutulan numuneler MK20, MK20B, MK50, MK50B, MK80 VE MK80B numunelerinin 25.00 KX ve 50.00 KX büyütmedeki taramalı elektron mikroskobu görüntüleri Şekil 4.32-37’de verilmiştir. SEM görüntülerinde, MK serisi yani bakterisiz numunelerin yapısında oluşan CSH jelleri ve etrenjit dikkat çekmektedir. MKB serisi, SEM görüntülerine göre geopolimer harç içinde kalsit (CaCO_3) kristalleri oluşumu olup, mikro çatlakların doldurulmasına neden olmuştur. Böylece hem basınç dayanımında ve hem de eğilme dayanımında artışa yol açmıştır.



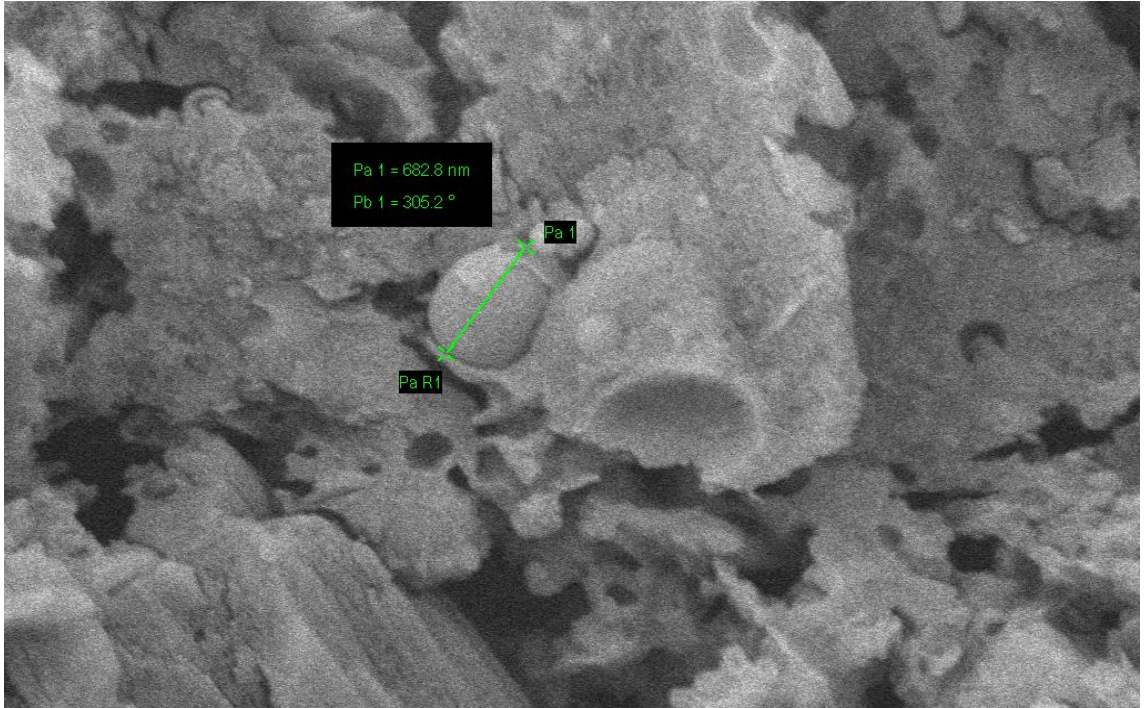
şekil 4.32. MK20 serisi SEM görüntüsü



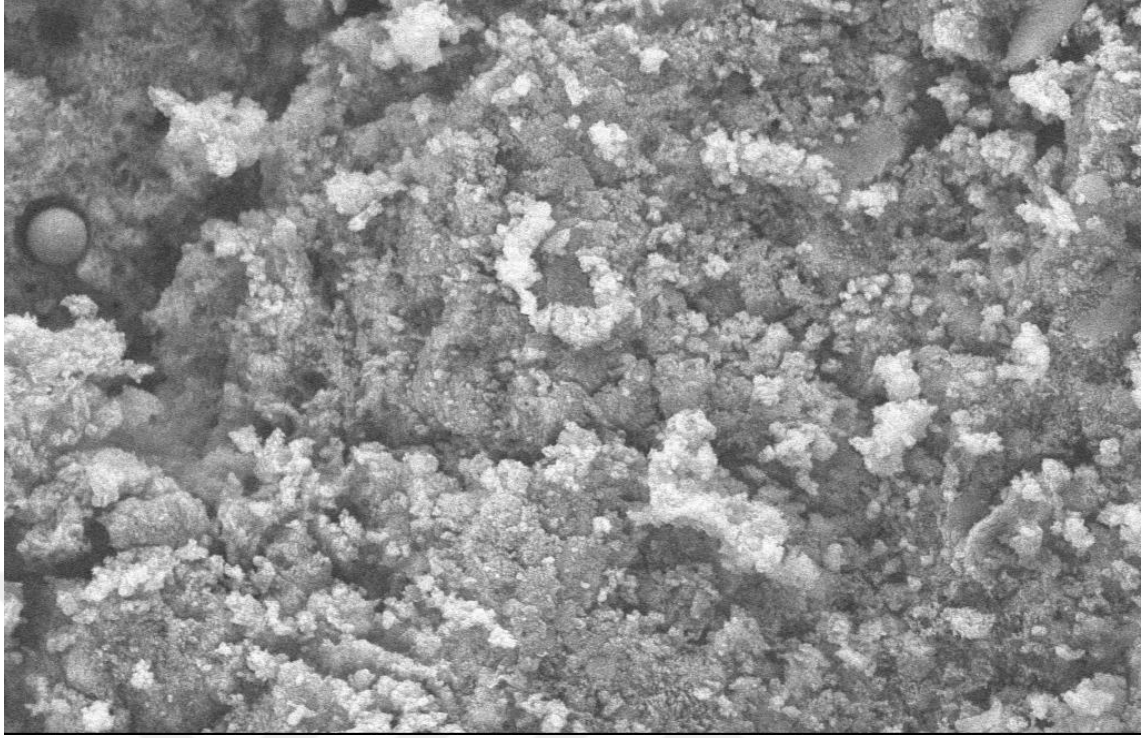
şekil 4.33. MK20B serisi SEM görüntüsü



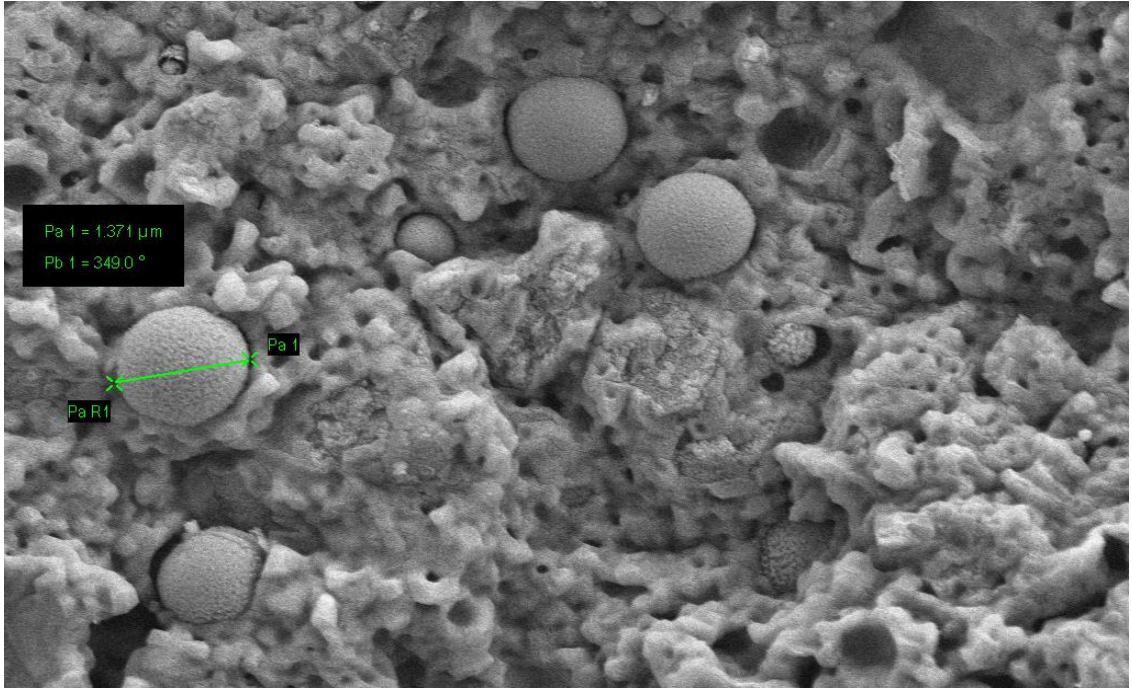
şekil 4.34. MK50 serisi SEM görüntüsü



şekil 4.35. MK50B serisi SEM görüntüsü



şekil 4.36. MK80 serisi SEM görüntüsü



şekil 4.37. MK80B serisi SEM görüntüsü

5. SONUÇLAR

Yapılan çalışmada daha önce geopolimer harçlarda neredeyse hiç denenmemiş olan *Bacillus Subtilis* bakterisinin kendi kendini onaran geopolimer harçlar üzerinde etkisini belirlemektir. Bu amaçla *Bacillus Subtilis* bakterisi geopolimer harca ilave edilmiştir. Üretilen harç numuneleri üzerinde bakterilerin etkisi araştırılmıştır. Çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır.

1. Sonuçlar, metakaolin oranı arttıkça birim hacim kütlesi artış göstermiştir. Bu durum metakaolinin tane boyutunun silis dumanına göre büyük olması sebebiyle kütlesi artışı olduğu düşünülmektedir. Aynı zamanda metakaolin artışı ile yayılma çapında düşüş gözlemlenmiştir. Metakaolin morfolojik yapısındaki farklılıklar sebebiyle daha fazla suya ihtiyaç duyar bu da yayılma çapında düşüşe neden olmuştur. Bakteri kullanımının ise hava miktarı tayininde olumlu etkisi gözlemlenmiştir. Geopolimer harç içerisindeki boşlukların bakteriler sayesinde doldurulduğu sonucuna varılmıştır.
2. Fiziksel hal deney sonuçlarında, bakteri içeren ve içermeyen numuneler arasında gözlemlenen en iyi fark, silis dumanın en fazla olduğu MK20 ve MK20B numunesidir. Kuru birim ağırlığı, bakteri içermeyen MK20 numunesi $1,855 \text{ g/cm}^3$ iken bakteri içeren MK20B numunesi $1,915 \text{ g/cm}^3$ 'tür. Kuru birim ağırlık, suya doymun kuru yüzey ile doğru orantılı olup görünür birim ağırlığı ile ters orantılıdır. Yüzdece değerler dikkate alındığında, aynı şekilde en iyi fark MK20 ve MK20B'de gözlemlenmiştir. Yüzdece su emme oranı, bakteri içermeyen MK20 numunesi %11,41 iken bakteri içeren MK20B numunesi %20,66 olarak elde edilmiştir. Su emme oranı ile görünür boşluk oranının doğru orantılı olduğu tespit edilmiştir.
3. Mekanik hal deney sonuçları dikkate alındığında, bakteri kullanımı olumlu etki göstermiştir. Bakteri içeren numunelerde kalsit çökeltileri, dayanımı arttırmıştır. 3 günlük eğilme dayanımı değerlerinde, bakteri içeren ve içermeyen numuneler arasında en iyi sonuç 3,50 MPa ile MK40B göstermiştir. Metakaolin oranının fazla olan numuneye dikkat edildiğinde bakteri içeren ve içermeyen numuneler arasında fark olmadığı gözlemlenirken 7 günlükte gözle görülür bir fark elde edilmiştir. Bunun sebebi olarak metakaolinin silis dumanına göre doldurma etkisi ve CH ile puzolanik reaksiyon farkı olduğu düşünülmektedir. Basınç dayanımı değerlerinin karışımdaki silis dumanı içeriğinin artışıyla metakaoline kıyasla daha fazla artış gösterdiği gözlemlenmiştir. En iyi fark 7 günlük MK40 ve MK40B basınç dayanım değerleri arasında görülmüştür. MK40 numunesi 10,85 MPa iken MK40B numunesi 15,43 MPa'dır.
4. SEM görüntülerinde, oluşan kalsit kristalleri görülmektedir. Deneysel verilerle elde edilen dayanım artışları SEM görüntüleri ile de desteklenmiştir.

6. KAYNAKLAR

- ACI 234R-96. 1996. "Guide for the Use of Silica Fume in Concrete". *American Concrete Institute* 96 (Reapproved): 0–64.
- Agnello, VN. 2005. "The Kaolin Industry in the Republic of South Africa".
- Ahn, Tae Ho, ve Toshiharu Kishi. 2010. "Crack self-healing behavior of cementitious composites incorporating various mineral admixtures". *Journal of Advanced Concrete Technology* 8 (2): 171–86. <https://doi.org/10.3151/jact.8.171>.
- Aïtcin, Pierre Claude. 2000. "Cements of yesterday and today - concrete of tomorrow". *Cement and Concrete Research*. Elsevier Science Ltd. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00365-3](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00365-3).
- Al-Akhras, Nabil M. 2006. "Durability of metakaolin concrete to sulfate attack". *Cement and Concrete Research* 36 (9): 1727–34. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.03.026>.
- Aldea, C. M., F Young, K. Wanga, ve S. P. Shaha. 2000. "Effects of curing conditions on properties of concrete using slag replacement". *Cement and Concrete Research* 30: 465–72.
- Alonso, S., ve A. Palomo. 2001. "Alkaline activation of metakaolin and calcium hydroxide mixtures: Influence of temperature, activator concentration and solids ratio". *Materials Letters* 47 (1–2): 55–62. [https://doi.org/10.1016/S0167-577X\(00\)00212-3](https://doi.org/10.1016/S0167-577X(00)00212-3).
- Álvarez-Ayuso, E., X. Querol, F. Plana, A. Alastuey, N. Moreno, M. Izquierdo, O. Font, vd. 2008. "Environmental, physical and structural characterisation of geopolymer matrixes synthesised from coal (co-)combustion fly ashes". *Journal of Hazardous Materials* 154 (1–3): 175–83. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.10.008>.
- Andalib, Ramin, Muhd Zaimi Abd Majid, Mohd Warid Hussin, Mohanadoss Ponraj, Ali Keyvanfar, Jahangir Mirza, ve Han Seung Lee. 2016. "Optimum concentration of *Bacillus megaterium* for strengthening structural concrete". *Construction and Building Materials* 118: 180–93. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.142>.
- Bakharev, T. 2005. "Geopolymeric materials prepared using Class F fly ash and elevated temperature curing". *Cement and Concrete Research* 35 (6): 1224–32. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.06.031>.
- Bapat, J. D. 2012. *Mineral admixtures in cement and concrete*. *Mineral Admixtures in Cement and Concrete*. <https://doi.org/10.1201/b12673>.
- Barbosa, Valeria F.F., ve Kenneth J.D. MacKenzie. 2003. "Synthesis and thermal behaviour of potassium silicate geopolymers". *Materials Letters* 57 (9–10): 1477–82. [https://doi.org/10.1016/S0167-577X\(02\)01009-1](https://doi.org/10.1016/S0167-577X(02)01009-1).
- Benhelal, Emad, Gholamreza Zahedi, Ezzatollah Shamsaei, ve Alireza Bahadori. 2013. "Global strategies and potentials to curb CO₂ emissions in cement industry". *Journal of Cleaner Production*. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.10.049>.
- Boesch, Michael Elias, Annette Koehler, ve Stefanie Hellweg. 2009. "Model for cradle-to-gate life cycle assessment of clinker production". *Environmental Science and Technology* 43 (19): 7578–83. <https://doi.org/10.1021/es900036e>.
- Bredy, P.; Chabannet, M.; Pera, J.: 1989. "Microstructure and Porosity of Metakaolin Blended Cements" 136: 275–80.
- Breugel, K van. 2007. "Is there a market for self-healing cement-based materials?" İçinde

- Proceedings of the First International Conference on Self Healing Materials*, 1–9.
- Brooks, J. J., ve M. A. Megat Johari. 2001. “Effect of metakaolin on creep and shrinkage of concrete”. *Cement and Concrete Composites* 23 (6): 495–502. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(00\)00095-0](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(00)00095-0).
- Buchwald, A., Kaps, C., ve Hohmann, M. 2003. “Alkali-Activated Binders and Pozzolan Cement Binders – Compete Binder Reaction or Two Sides of the Same Story”. *11th International Congress on the Chemistry of Cement.*, sayı May: 1238–47.
- Chahal, Navneet, Rafat Siddique, ve Anita Rajor. 2012. “Influence of bacteria on the compressive strength, water absorption and rapid chloride permeability of concrete incorporating silica fume”. *Construction and Building Materials* 37: 645–51. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.07.029>.
- Cheng, T. W., ve J. P. Chiu. 2003. “Fire-resistant geopolymer produce by granulated blast furnace slag”. *Minerals Engineering* 16 (3): 205–10. [https://doi.org/10.1016/S0892-6875\(03\)00008-6](https://doi.org/10.1016/S0892-6875(03)00008-6).
- Chindaprasirt, P., T. Chareerat, ve V. Sirivivatnanon. 2007a. “Workability and strength of coarse high calcium fly ash geopolymer”. *Cement and Concrete Composites* 29 (3): 224–29. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2006.11.002>.
- Chindaprasirt, Prinya, Chai Jaturapitakkul, Wichian Chalee, ve Ubolluk Rattanasak. 2009. “Comparative study on the characteristics of fly ash and bottom ash geopolymers”. *Waste Management* 29 (2): 539–43. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2008.06.023>.
- Cioffi, R., L. Maffucci, ve L. Santoro. 2003. “Optimization of geopolymer synthesis by calcination and polycondensation of a kaolinitic residue”. *Resources, Conservation and Recycling* 40 (1): 27–38. [https://doi.org/10.1016/S0921-3449\(03\)00023-5](https://doi.org/10.1016/S0921-3449(03)00023-5).
- Courard, Luc, Anne Darimont, Marleen Schouterden, Fabrice Ferauche, Xavier Willem, ve Robert Degeimbre. 2003. “Durability of mortars modified with metakaolin”. *Cement and Concrete Research* 33 (9): 1473–79. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(03\)00090-5](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(03)00090-5).
- Criado, M., A. Fernández-Jiménez, A. G. de la Torre, M. A.G. Aranda, ve A. Palomo. 2007. “An XRD study of the effect of the SiO₂/Na₂O ratio on the alkali activation of fly ash”. *Cement and Concrete Research* 37 (5): 671–79. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.01.013>.
- Criado, M., A. Palomo, ve A. Fernández-Jiménez. 2005. “Alkali activation of fly ashes. Part 1: Effect of curing conditions on the carbonation of the reaction products”. *Fuel* 84 (16): 2048–54. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2005.03.030>.
- Davidovits, Joseph. 1982. Mineral polymers and methods of making them. *U.S. Patent*, issued 1982.
- Delage, Pierre, ve Pierre Claude Aitcin. 1983. “Influence of Condensed Silica Fume on the Pore-Size Distribution of Concretes”. *Industrial and Engineering Chemistry Product Research and Development* 22 (2): 286–90. <https://doi.org/10.1021/i300010a024>.
- Dias, W. P.S. 2000. “Reduction of concrete sorptivity with age through carbonation”. *Cement and Concrete Research* 30 (8): 1255–61. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00311-2](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00311-2).
- Duan, Ping, Chunjie Yan, ve Wei Zhou. 2017. “Compressive strength and microstructure of fly ash based geopolymer blended with silica fume under thermal cycle”. *Cement and Concrete Composites* 78: 108–19. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.01.009>.

- Duxson, P., A. Fernández-Jiménez, J. L. Provis, G. C. Lukey, A. Palomo, ve J. S.J. Van Deventer. 2007. "Geopolymer technology: The current state of the art". *Journal of Materials Science* 42 (9): 2917–33. <https://doi.org/10.1007/s10853-006-0637-z>.
- Duxson, P., S. W. Mallicoat, G. C. Lukey, W. M. Kriven, ve J. S.J. van Deventer. 2007. "The effect of alkali and Si/Al ratio on the development of mechanical properties of metakaolin-based geopolymers". *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* 292 (1): 8–20. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2006.05.044>.
- Erdoğan, T. Y. 1997. "Admixtures for concrete". İçinde *Middle East Technical University Press*.
- Fernández-Jiménez, Ana M.; Palomo, A.; López-Hombrados, Cecilio. 2006. "Engineering Properties of Compacted Fly Ash". *ACI Materials*. <https://doi.org/10.1061/jsfeaq.0001744>.
- Fernández-Jiménez, A., ve A. Palomo. 2003. "Characterisation of fly ashes. Potential reactivity as alkaline cements". *Fuel* 82 (18): 2259–65. [https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(03\)00194-7](https://doi.org/10.1016/S0016-2361(03)00194-7).
- Frías, Moisés, ve Joseph Cabrera. 2000. "Pore size distribution and degree of hydration of metakaolin-cement pastes". *Cement and Concrete Research* 30 (4): 561–69. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00203-9](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00203-9).
- Gailani, Mohammed Mahmud. 2016. "Effect of Molarity of NaOH on Strength of Geopolymer Mortar".
- Glukhovskiy, V.D. 1994. "Alkaline cements and concretes". İçinde *Proceedings of the first International Conference*, 11–14.
- Görhan, Gökhan, ve Gökhan Kürklü. 2014. "The influence of the NaOH solution on the properties of the fly ash-based geopolymer mortar cured at different temperatures". *Composites Part B: Engineering* 58: 371–77. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.10.082>.
- Hago, Abdel Wahid, Amer Ali Al-Rawas, ve Ahmed Al-Riyami. 2002. "Effect of varying cement content and curing conditions on the properties of sarooj". *Building and Environment* 37 (1): 45–53. [https://doi.org/10.1016/S0360-1323\(00\)00086-X](https://doi.org/10.1016/S0360-1323(00)00086-X).
- Hajimohammadi, Ailar, John L. Provis, ve Jannie S.J. Van Deventer. 2011. "The effect of silica availability on the mechanism of geopolymerisation". *Cement and Concrete Research* 41 (3): 210–16. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.02.001>.
- Hamilton, W. A. 2003. "Microbially influenced corrosion as a model system for the study of metal microbe interactions: A unifying electron transfer hypothesis". *Biofouling* 19 (1): 65–76. <https://doi.org/10.1080/0892701021000041078>.
- Hammes, Frederik, Nico Boon, Johan De Villiers, Willy Verstraete, ve Steven Douglas Siciliano. 2003. "Strain-specific ureolytic microbial calcium carbonate precipitation". *Applied and Environmental Microbiology* 69 (8): 4901–9. <https://doi.org/10.1128/AEM.69.8.4901-4909.2003>.
- Hammes, Frederik, ve Willy Verstraete. 2002. "Key roles of pH and calcium metabolism in microbial carbonate precipitation". *Re/Views in Environmental Science & Bio/Technology* 1: 3–7.
- Hardjito, Djwantoro, ve B V Rangan. 2005. "Development and Properties of Low-calcium Fly Ash Based Geopolymer". *Australia : University of Technology Perth*.
- Hu, Mingyu, Xiaomin Zhu, ve Fumei Long. 2009. "Alkali-activated fly ash-based geopolymers with zeolite or bentonite as additives". *Cement and Concrete Composites* 31 (10): 762–68. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.07.006>.
- Ismail, Idawati, Susan A. Bernal, John L. Provis, Rackel San Nicolas, David G. Brice,

- Adam R. Kilcullen, Sinin Hamdan, ve Jannie S.J. Van Deventer. 2013. "Influence of fly ash on the water and chloride permeability of alkali-activated slag mortars and concretes". *Construction and Building Materials* 48: 1187–1201. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.07.106>.
- Jadhav, Umesh U., Mukund Lahoti, Zhitao Chen, Jishen Qiu, Bin Cao, ve En Hua Yang. 2018. "Viability of bacterial spores and crack healing in bacteria-containing geopolymer". *Construction and Building Materials* 169: 716–23. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.039>.
- Jensen, O. Mejlhede. 2013. "Use of Superabsorbent Polymers in Concrete". *Concrete International* 35 (1): 48–52.
- Jonkers, H. M.; Arjan; Thijssen, Gerard; Muyzer, ve Erik Copuroglu, Oguzhan; Schlangen. 2010. "Application of bacteria as self-healing agent for the development of sustainable concrete". *Ecological Engineering* 36 (2): 230–35. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2008.12.036>.
- Jonkers, H. M. 2011. "Bacteria based self healing concrete – A review". *HERON* 56 (1): 1008–14.
- Jonkers, H. M., ve E. Schlangen. 2007. "Self-healing of cracked concrete: A bacterial approach". *Proceedings of the 6th International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures* 3: 1821–26.
- Karaoğlu, Seda. 2010. "Effect of metakaolin and silica fume on the mechanical property, shrinkage, and gas permeability of high performance concrete".
- Khaliq, Wasim, ve Muhammad Basit Ehsan. 2016. "Crack healing in concrete using various bio influenced self-healing techniques". *Construction and Building Materials* 102: 349–57. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.11.006>.
- Khatib, J.M.; Mangat, P. S.; 1995. "Research in the Built Environment, University of Glamorgan, Pontypridd CF37 IDL, UK ** School of Construction, Sheffield Hallam University, Sheffield S1 1W13, UK". *Science* 25 (5): 999–1010.
- Khatib, J. M., ve S. Wild. 1996. "Pore size distribution of metakaolin paste". *Cement and Concrete Research* 26 (10): 1545–53. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(96\)00147-0](https://doi.org/10.1016/0008-8846(96)00147-0).
- Khatib, Jamal M., ve Roger M. Clay. 2004. "Absorption characteristics of metakaolin concrete". *Cement and Concrete Research* 34 (1): 19–29. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(03\)00188-1](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(03)00188-1).
- Komnitsas, Kostas, Dimitra Zaharaki, ve Vasillios Perdikatsis. 2009. "Effect of synthesis parameters on the compressive strength of low-calcium ferronickel slag inorganic polymers". *Journal of Hazardous Materials* 161 (2–3): 760–68. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.04.055>.
- Kostuch, J.A., Walters, G.V., Jones, T.R. 1993. "High performance concrete incorporating metakaolin – a review." *Concrete* 2000, 1799–1811. <https://doi.org/10.4236/ojce.2013.32007>.
- Kovalchuk, G., A. Fernández-Jiménez, ve A. Palomo. 2007. "Alkali-activated fly ash: Effect of thermal curing conditions on mechanical and microstructural development - Part II". *Fuel* 86 (3): 315–22. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2006.07.010>.
- Krivenko, V. P. 1994. "Alkaline cements". İçinde *Proceedings of the 1st International Conference on Alkaline Cements and Concretes, Kiev, Ukraine, 1994*, 1:11–129. VIPO Stock Company. <http://ci.nii.ac.jp/naid/10027275971/en/>.
- Kumar Mehta, P.; Monteiro, Paulo J.M. 2006. *Concrete: Microstructure, properties and materials*. McGraw-Hill. [https://doi.org/10.1016/0262-5075\(86\)90055-2](https://doi.org/10.1016/0262-5075(86)90055-2).

- Luo, Mian, Chun Xiang Qian, ve Rui Yang Li. 2015. "Factors affecting crack repairing capacity of bacteria-based self-healing concrete". *Construction and Building Materials* 87: 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.117>.
- Mermerdas, Kasim. 2006. "Effectiveness of metakaolin on the strength and durability properties of air-cured and air-cured concretes". *Gaziantep University Graduate School of Natural&Applied Sciences*.
- Mermerdas, Kasım. 2013. "Characterization and utilization of calcined Turkish kaolins for improving strength and durability aspects of concrete". <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.33722.49600>.
- Murray, Haydn H. 2000. "Traditional and new applications for kaolin, smectite, and palygorskite: A general overview". *Applied Clay Science* 17 (5–6): 207–21. [https://doi.org/10.1016/S0169-1317\(00\)00016-8](https://doi.org/10.1016/S0169-1317(00)00016-8).
- Nematollahi, B. 2017. "Investigation of Geopolymer as a Sustainable Alternative Binder for Fiber-Reinforced Strain-Hardening Composites". <https://researchbank.swinburne.edu.au/file/f0409321-1dba-49ca-9430-eb0d31339813/1/Behzad Nematollahi Thesis.pdf>.
- Okoye, F. N., J. Durgaprasad, ve N. B. Singh. 2016. "Effect of silica fume on the mechanical properties of fly ash based-geopolymer concrete". *Ceramics International* 42 (2): 3000–3006. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2015.10.084>.
- Okoye, Francis N., Satya Prakash, ve Nakshatra B. Singh. 2017. "Durability of fly ash based geopolymer concrete in the presence of silica fume". *Journal of Cleaner Production* 149: 1062–67. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.02.176>.
- Palomo, A., M. W.; Grutzeck, ve M. T. Blanco. 1999. "Alkali-activated fly ashes: A cement for the future". *Cement and Concrete Research* 29 (8): 1323–29. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(98\)00243-9](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(98)00243-9).
- Palomo, Angel, Ana Fernández-jiménez, Santiago Alonso, ve Ana Fernandez-jime. 2004. "Alkaline Activation of Fly Ashes : NMR Study of the Reaction Products Alkaline Activation of Fly Ashes : NMR Study of the Reaction Products". *Journal of the American Ceramic Society* 87 (6): 1141–45. <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1551-2916.2004.01141.x/abstract>.
- Phair, J. W., ve J. S.J. Van Deventer. 2001. "Effect of silicate activator pH on the leaching and material characteristics of waste-based inorganic polymers". *Minerals Engineering* 14 (3): 289–304. [https://doi.org/10.1016/S0892-6875\(01\)00002-4](https://doi.org/10.1016/S0892-6875(01)00002-4).
- Poon, C. S., L. Lam, S. C. Kou, Y. L. Wong, ve Ron Wong. 2001. "Rate of pozzolanic reaction of metakaolin in high-performance cement pastes". *Cement and Concrete Research* 31 (9): 1301–6. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(01\)00581-6](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(01)00581-6).
- Provis, J. L., ve J. S.J. van Deventer. 2007. "Geopolymerisation kinetics. 2. Reaction kinetic modelling". *Chemical Engineering Science* 62 (9): 2318–29. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2007.01.028>.
- Provis, John L., ve Jannie S. J. van Deventer. 2009. *Geopolymers: Structure, processing, properties and industrial applications*. <https://doi.org/10.1533/9781845696382.frontmatter>.
- Provis, John L., ve Jannie S. J. van Deventer. 2014. *Alkali Activated Materials. RILEM State-of-the-Art Reports*.
- Qiu, Jishen, Han Siang Tan, ve En Hua Yang. 2016. "Coupled effects of crack width, slag content, and conditioning alkalinity on autogenous healing of engineered cementitious composites". *Cement and Concrete Composites* 73: 203–12. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2016.07.013>.

- Ramlochan, Terrence, Michael Thomas, ve Karen A. Gruber. 2000. "Effect of metakaolin on alkali-silica reaction in concrete". *Cement and Concrete Research* 30 (3): 339–44. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(99\)00261-6](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(99)00261-6).
- Rangan, B. V. 2008. "FLY ASH-BASED GEOPOLYMER CONCRETE (Column)". *Engineering Faculty Curtin University of Technology Perth, Australia*, 3124–30.
- Rashad, Alaa M. 2013. "Metakaolin as cementitious material: History, scours, production and composition-A comprehensive overview". *Construction and Building Materials* 41: 303–18. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.12.001>.
- Rattanasak, Ubolluk, ve Prinya Chindaprasirt. 2009. "Influence of NaOH solution on the synthesis of fly ash geopolymer". *Minerals Engineering* 22 (12): 1073–78. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2009.03.022>.
- Reinhardt, Hans Wolf, ve Martin Jooss. 2003. "Permeability and self-healing of cracked concrete as a function of temperature and crack width". *Cement and Concrete Research* 33 (7): 981–85. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)01099-2](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)01099-2).
- Reynolds, Diane, JoAnn Browning, ve David Darwin. 2009. "Lightweight Aggregates As an Internal Curing Agent for Low-Cracking High-Performance" 5 (97).
- Rowles, Matthew Ryan. 2004. "The Structural Nature of Aluminosilicate Inorganic Polymers : A Macro to Nanoscale Study". *Curtin University of Technology*.
- Sabir, B., S. Wild, ve J. Bai. 2001. "Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete: A review". *Cement and Concrete Composites* 23 (6): 441–54. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(00\)00092-5](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(00)00092-5).
- Scrivener, Karen L., ve R. James Kirkpatrick. 2008. "Innovation in use and research on cementitious material". *Cement and Concrete Research* 38 (2): 128–36. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.09.025>.
- Shakouri, Sahra. 2017. "Production of silica fume-based geopolymeric foam".
- Sherir, Mohamed A.A., Khandaker M.A. Hossain, ve Mohamed Lachemi. 2016. "Self-healing and expansion characteristics of cementitious composites with high volume fly ash and MgO-type expansive agent". *Construction and Building Materials* 127: 80–92. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.09.125>.
- Shi, Caijun, A. Fernández Jiménez, ve Angel Palomo. 2011. "New cements for the 21st century: The pursuit of an alternative to Portland cement". *Cement and Concrete Research*. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.03.016>.
- Shvarzman, A., K. Kovler, G. S. Grader, ve G. E. Shter. 2003. "The effect of dehydroxylation/amorphization degree on pozzolanic activity of kaolinite". *Cement and Concrete Research* 33 (3): 405–16. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)00975-4](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)00975-4).
- Siddique, Rafat, ve Juvas Klaus. 2009. "Influence of metakaolin on the properties of mortar and concrete: A review". *Applied Clay Science* 43 (3–4): 392–400. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2008.11.007>.
- Siddique, Rafat, Karambir Singh, Pau Kunal, Malkit Singh, Valeria Corinaldesi, ve Anita Rajor. 2016. "Properties of bacterial rice husk ash concrete". *Construction and Building Materials* 121: 112–19. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.146>.
- Sisomphon, K., O. Copuroglu, ve E. A.B. Koenders. 2012. "Self-healing of surface cracks in mortars with expansive additive and crystalline additive". *Cement and Concrete Composites* 34 (4): 566–74. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.01.005>.
- Somna, Kiatsuda, Chai Jaturapitakkul, Puangrat Kajitvichyanukul, ve Prinya Chindaprasirt. 2011. "NaOH-activated ground fly ash geopolymer cured at ambient

- temperature”. *Fuel* 90 (6): 2118–24. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2011.01.018>.
- Souradeep, Gupta, Pang Sze Dai, ve Kua Harn Wei. 2017. “Autonomous healing in concrete by bio-based healing agents – A review”. *Construction and Building Materials* 146: 419–42. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.111>.
- Tittelboom, Kim Van, Nele De Belie, Willem De Muynck, ve Willy Verstraete. 2010. “Use of bacteria to repair cracks in concrete”. *Cement and Concrete Research* 40 (1): 157–66. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2009.08.025>.
- Vandendaele, P, ve R. Temmerman. 2010. Microcapsules Containing Microorganisms, issued 2010.
- Vargas, Alexandre Silva De, Denise C.C. Dal Molin, Antônio C.F. Vilela, Felipe José Da Silva, Bruno Pavão, ve Hugo Veit. 2011. “The effects of Na₂O/SiO₂ molar ratio, curing temperature and age on compressive strength, morphology and microstructure of alkali-activated fly ash-based geopolymers”. *Cement and Concrete Composites* 33 (6): 653–60. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.03.006>.
- Vekariya, Mayur Shantilal, ve Jayeshkumar Pitroda. 2013. “Bacterial Concrete: New Era for Construction Industry”. *International Journal of Engineering Trends and Technology* 4 (9): 4128–37.
- Wallah, Steenie E, ve B Vijaya Rangan. 2006. “Low-calcium fly ash-based geopolymer concrete: Long-term properties”. *Research report GC*. http://www.geopolymer.org/fichiers_pdf/curtin_flyash_GC-2.pdf.
- Wang, J. Y., N. De Belie, ve W. Verstraete. 2012. “Diatomaceous earth as a protective vehicle for bacteria applied for self-healing concrete”. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology* 39 (4): 567–77. <https://doi.org/10.1007/s10295-011-1037-1>.
- Wang, J. Y., D. Snoeck, S. Van Vlierberghe, W. Verstraete, ve N. De Belie. 2014. “Application of hydrogel encapsulated carbonate precipitating bacteria for approaching a realistic self-healing in concrete”. *Construction and Building Materials* 68: 110–19. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.06.018>.
- Wang, J. Y., H. Soens, W. Verstraete, ve N. De Belie. 2014. “Self-healing concrete by use of microencapsulated bacterial spores”. *Cement and Concrete Research* 56: 139–52. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2013.11.009>.
- Wang, Jianyun, Jan Dewanckele, Veerle Cnudde, Sandra Van Vlierberghe, Willy Verstraete, ve Nele De Belie. 2014. “X-ray computed tomography proof of bacterial-based self-healing in concrete”. *Cement and Concrete Composites* 53: 289–304. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.07.014>.
- Wang, Jianyun, Arn Mignon, Didier Snoeck, Virginie Wiktor, Sandra Van Vlierberghe, Nico Boon, ve Nele De Belie. 2015. “Application of modified-alginate encapsulated carbonate producing bacteria in concrete: A promising strategy for crack self-healing”. *Frontiers in Microbiology* 6 (OCT): 1–14. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2015.01088>.
- Wang, Jianyun, Kim Van Tittelboom, Nele De Belie, ve Willy Verstraete. 2012. “Use of silica gel or polyurethane immobilized bacteria for self-healing concrete”. *Construction and Building Materials* 26 (1): 532–40. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.06.054>.
- Wastiels, J., X. Wu, S. Faignet, ve G. Patfoort. 1994. “Mineral polymer based on fly ash”. *The Journal of resource management and technology* 22 (3): 135–41.
- Wiktor, Virginie, ve Henk M. Jonkers. 2011. “Quantification of crack-healing in novel

- bacteria-based self-healing concrete”. *Cement and Concrete Composites* 33 (7): 763–70. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.03.012>.
- Wild, S., J. M. Khatib, ve A. Jones. 1996. “Relative strength, pozzolanic activity and cement hydration in superplasticised metakaolin concrete”. *Cement and Concrete Research* 26 (10): 1537–44. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(96\)00148-2](https://doi.org/10.1016/0008-8846(96)00148-2).
- Williams, G. J., I. P. Bond, ve R. S. Trask. 2009. “Compression after impact assessment of self-healing CFRP”. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 40 (9): 1399–1406. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2008.05.021>.
- Xu, Hua, ve Jannie S.J. Van Deventer. 2002. “Geopolymerisation of multiple minerals”. *Minerals Engineering* 15 (12): 1131–39. [https://doi.org/10.1016/S0892-6875\(02\)00255-8](https://doi.org/10.1016/S0892-6875(02)00255-8).
- Xu, Jing, ve Wu Yao. 2014. “Multiscale mechanical quantification of self-healing concrete incorporating non-ureolytic bacteria-based healing agent”. *Cement and Concrete Research* 64: 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2014.06.003>.
- Yang, Yingzi, Michael D. Lepech, En Hua Yang, ve Victor C. Li. 2009. “Autogenous healing of engineered cementitious composites under wet-dry cycles”. *Cement and Concrete Research* 39 (5): 382–90. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2009.01.013>.
- Yip, Christina K., Grant C. Lukey, John L. Provis, ve Jannie S.J. van Deventer. 2008. “Effect of calcium silicate sources on geopolymerisation”. *Cement and Concrete Research* 38 (4): 554–64. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.11.001>.

ÖZGEÇMİŞ

FATMA BELİN KAVAZOĞLU

ÖĞRENİM BİLGİLERİ

Yüksek Lisans 2019-2021	Akdeniz Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Antalya
Lisans 2014-2019	Antalya Bilim Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Antalya

MESLEKİ VE İDARİ GÖREVLER

Stajyer Saha Mühendisi 2016 2017	Konyaaltı Belediyesi-İmar ve Şehircilik Müdürlüğü
2018	İKA MÜHENDİSLİK MİM. İNŞ. SAN. TİC. LTD. ŞTİ