

T.C.
İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SÖNMÜŞ KİREÇ VE Na_2SiO_3 İLE AKTİVE EDİLMİŞ
GERİ DÖNÜŞTÜRÜLMÜŞ AGREGALI ÇİMENTOSUZ KYB'NİN
MÜHENDİSLİK ÖZELLİKLERİ VE ADERANS DAYANIMI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Rumeysa ÜTÜ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Kâzım TÜRK

KASIM-2025

T.C
İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SÖNMÜŞ KİREÇ VE Na_2SiO_3 İLE AKTİVE EDİLMİŞ
GERİ DÖNÜŞTÜRÜLMÜŞ AGREGALI ÇİMENTOSUZ KYB’NİN
MÜHENDİSLİK ÖZELLİKLERİ VE ADERANS DAYANIMI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Rumeysa ÜTÜ
(36223621931)

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Kâzım TÜRK
Eş Danışman: Doç. Dr. Ceren KINA

KASIM-2025

TEŞEKKÜR VE ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasının her aşamasında benden hiçbir yardımını esirgemeyen, bilgi ve deneyimi ile yanımda olan ve kıymetli vaktini ayırarak beni her konuda yönlendiren danışman hocam Sayın Prof. Dr. Kâzım TÜRK'e teşekkür ederim.

Çalışma sürecinde bana her konuda yardımcı olan eş danışman hocam Sayın Doç. Dr. Ceren KINA'ya teşekkür ederim.

Deneysel çalışmalarımın her aşamasında bana yardım eden Ayman TURKMANI'ya, büyük ölçekli betonarme kirişlerin üretilmesinden test edilmesine kadarki tüm süreçte emeği olan Sayın Öğr. Gör. Metin KATLAV'a ve Sayın Öğr. Gör. İzzeddin DÖNMEZ'e teşekkürü borç bilirim.

Hayatım boyunca bana yol gösteren, emekleriyle bugünlere gelmemi sağlayan, bu süreçte her zaman destekçim olan, sabırla yanımda duran ve varlıklarıyla güç veren canım babam Yusuf ÜTÜ'ye, canım annem Aynur ÜTÜ'ye, ablalarım Saliha DENİZ ve Sümeyye ÜTÜ'ye, kardeşim Muhammed Emre ÜTÜ'ye ve eniştem Mustafa Cevdet DENİZ'e sonsuz teşekkür ederim.

Bu çalışma, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) 1002 Hızlı destek Programı (MAG- 124M789) ve İnönü Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projesi Birimi (FYL-2024-3758) tarafından desteklenmiştir. Desteklerinden dolayı TÜBİTAK, İnönü Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi'ne ve deneysel çalışmalar için sağladıkları desteklerden dolayı SİKA Yapı Kimyasalları A.Ş.'ye ve Malatya Battalgazi Belediye'sine teşekkür ederim.

ONUR SÖZÜ

Yüksek lisans tezi olarak sunduğum “Sönmüş Kireç ve Na_2SiO_3 ile Aktive Edilmiş Geri Dönüştürülmüş Agregalı Çimentosuz KYB’nin Mühendislik Özellikleri ve Aderans Dayanımı” başlıklı bu çalışmanın bilimsel ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yardıma başvurmaksızın tarafımdan yazıldığına ve yararlandığım bütün kaynakların hem metin içinde hem de kaynakçada yöntemine uygun biçimde gösterilenlerden oluştuğunu belirtir, bunu onurumla doğrularım.

Rumeysa ÜTÜ



İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR VE ÖNSÖZ	i
ONUR SÖZÜ	ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	v
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vi
SEMBOLLER VE KISALTMALAR	viii
ÖZET	x
ABSTRACT	xi
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR ÖZETİ.....	5
2.1 Geri Dönüştürülmüş Agrega.....	5
2.1.1 Geri dönüştürülmüş agrega ve farklı beton tiplerinde kullanımı.....	6
2.2 Geopolimer Beton	8
2.2.1 Geopolimer beton ile ilgili yapılan çalışmalar	10
2.3 Kendiliğinden Yerleşen Beton (KYB)	14
2.3.1 KYB karışım tasarımı.....	15
2.3.2 İşlenebilirlik testleri.....	17
2.3.2.1 Çökme-yayılma ve T ₅₀₀ deneyi	18
2.3.2.2 L-kutusu deneyi	19
2.3.3 Kendiliğinden yerleşen geopolimer beton (KYGB) ile ilgili çalışmalar...	20
2.4 Donatının Aderans Dayanımı	22
3. DENEYSEL ÇALIŞMA VE YÖNTEM	26
3.1 Malzemeler	26
3.1.1 Bağlayıcılar.....	26
3.1.1.1 Silis dumanı	27
3.1.1.2 Yüksek fırın cürufu.....	27
3.1.1.3 Uçucu kül.....	27
3.1.1.4 Çimento	28
3.1.2 Aktivatörler.....	28
3.1.2.1 Sönmüş kireç	28
3.1.2.2 Sodyum Silikat	28
3.1.3 Geri dönüştürülmüş agrega.....	29
3.1.4 Kimyasal katkı.....	32
3.1.5 Karışım suyu.....	32
3.2 Karışımların Tasarımı.....	32
3.2.1 Karışım oranlarının belirlenmesi	32
3.2.2 Taze çimentosuz KYB karışımlarının hazırlanması	35
3.2.3 Numunelerin üretilmesi ve boyutları.....	38
3.2.4 Numunelerin kür edilmesi	38
3.3 Taze ve sertleştirilmiş beton deneyleri	39
3.3.1 Taze beton deneyleri.....	39
3.3.1.1 İşlenebilirlik testleri.....	40
3.3.1.1.1 Çökme-yayılma ve T ₅₀₀ deneyi	40
3.3.1.1.2 L kutusu deneyi	41
3.3.1.2 Priz süresi deneyi.....	42
3.3.2 Sertleşmiş beton deneyleri.....	44
3.3.2.1 Basınç dayanımı	44

3.3.2.2 Elastisite modülü	45
3.3.2.3 Yarmada çekme dayanımı	47
3.3.2.4 Kılcal su emme	48
3.4 Büyük Ölçekli Betonarme Kirişlerin Üretimi ve Test Düzenegi	49
3.4.1 Numunelerin üretimi	49
3.4.2 Test düzenegi.....	54
3.4.3 Bindirmeli-ekli donatıya sahip kirişlerin aderans dayanımının hesabı	54
3.4.4 Eğilmeye maruz çift donatılı betonarme kirişlerde donatıdaki gerilmenin hesabı.....	55
4. DENEYSEL BULGULAR ve TARTIŞMA.....	58
4.1 Taze Beton Deneylerine Ait Bulgular	58
4.1.1 İşlenebilirlik.....	59
4.1.1.1 Çökme-yayılma ve T_{500}	59
4.1.1.2 L-kutusu.....	62
4.1.2 Priz süreleri.....	63
4.2 Sertleşmiş Beton Deneylerine Ait Bulgular	67
4.2.1 Basınç dayanımı	69
4.2.2 Yarmada çekme dayanımı	74
4.2.3 Elastisite modülü	77
4.2.4 Kılcal su emme	79
4.3 Büyük Ölçekli Bindirmeli-Ekli Donatılı Geri Dönüştürülmüş Agrega İçeren Kontrol ve Hibrit Alkali Aktivatörlü Çimentosuz KYB Kirişlerin Aderans Dayanımı	81
4.3.1 Aderans dayanımlarının değerlendirilmesi.....	81
4.3.2 Yük-orta açıklık sehim eğrilerinin değerlendirilmesi.....	84
4.3.3 Çatlak modelleri ve göçme modunun değerlendirilmesi.....	87
5. SONUÇLAR.....	96
KAYNAKÇA.....	100

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1: EFNARC tarafından tavsiye edilen karışım oranları.....	17
Çizelge 2.2: EFNARC (2005) tarafından önerilen işlenebilirlik testleri ve belirlenen parametreler.....	17
Çizelge 2.3: EFNARC (2005)'e göre yayılma çapı sınıfları.....	19
Çizelge 3.1: Bağlayıcılara ait kimyasal ve fiziksel özellikler.....	26
Çizelge 3.2: Sönmüş kirece ait kimyasal ve fiziksel özellikler.....	28
Çizelge 3.3: Sodyum silikate ait kimyasal ve fiziksel özellikler.....	28
Çizelge 3.4: Çimentosuz KYB karışım oranları (kg/m ³).....	34
Çizelge 3.5: Donatıların mekanik özellikleri.....	51
Çizelge 4.1: Karışımlara ait işlenebilirlik test sonuçları.....	58
Çizelge 4.2: KYB karışımlarına ait mekanik ve durabilite özellikler.....	68
Çizelge 4.3: Bindrimeli-ekli donatıya sahip çimentosuz KYB karışımlarına ait test bulguları.....	81

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1: Geri dönüştürülmüş agreganın işleme süreci (Wu ve diğ, 2024)	6
Şekil 2.2: Geopolimer betonun geleneksel Portland çimentolu betonla karşılaştırılması.....	9
Şekil 2.3: Geopolimer betonun üretim süreci (Thomas ve diğ, 2022)	10
Şekil 2.4: KYB tasarımının elde edilmesi için temel yöntem (Okamura ve Ozawa, 1995)	15
Şekil 2.5: KYB ile geleneksel betonun karışım oranlarının karşılaştırılması	16
Şekil 2.6: Çökme-yayılma ve T_{500} test düzeneği	18
Şekil 2.7: L-kutusu test düzeneği (EFNARC (2005))	20
Şekil 3.1: Bağlayıcı malzemelerin SEM görüntüleri	27
Şekil 3.2: a) İnşaat yıkıntı atıklarının alındığı yer, b) Beton blokların küçültülmesi, c) Küçültülen beton blokların konkasör şantiyesine taşınması	29
Şekil 3.3: Geri dönüştürülmüş agregaların elde edilmesi	31
Şekil 3.4: Agreganın karışım granülometri eğrisi ve TS 802 sınır eğrileri	32
Şekil 3.5: Tez çalışması deneylerinde kullanılan drum tipi beton mikseri	35
Şekil 3.6: Karışımların hazırlanmasında izlenen yollar	35
Şekil 3.7: Katı malzemelerin kuru halde karıştırılması	36
Şekil 3.8: Su ve akışkanlaştırıcının ilave edilmesi	37
Şekil 3.9: Alkali aktivatörün ilave edilmesi ve karışımın bir bütün haline gelmesi	37
Şekil 3.10: Kalan akışkanlaştırıcının aşama aşama karışıma dahil edilmesi	37
Şekil 3.11: Hazırlanan çimentosuz KYB karışımı	38
Şekil 3.12: Sertleşmiş beton özelliklerinin belirlenmesi için numunelerin üretilmesi	38
Şekil 3.13: Numunelerin kür edilmesi	39
Şekil 3.14: Karışımlara uygulanan deneyler	39
Şekil 3.15: Çökme-yayılma ve T_{500} deney düzeneği	40
Şekil 3.16: Çökme-yayılma deneyi	41
Şekil 3.17: L kutusu deney aparatı	42
Şekil 3.18: Beton harç penetrometresi	43
Şekil 3.19: Taze betonun 4.75 mm elekten elenmesi	43
Şekil 3.20: Beton penetrasyon direncinin ölçülmesi	44
Şekil 3.21: Penetrasyon direnci-geçen süre grafiği	44
Şekil 3.22: Basınç dayanımı test düzeneği	45
Şekil 3.23: Elastisite modülü test düzeneği	47
Şekil 3.24: Yarmada çekme dayanımı test düzeneği	48
Şekil 3.25: Kılcal su emme deney düzeneği	49
Şekil 3.26: Donatı detayı	50
Şekil 3.27: Betonarme kiriş numunelerinin boyuna ve enine kesitleri	50
Şekil 3.28: Donatı çekme deneyi	51
Şekil 3.29: Büyük ölçekli kirişler için hibrit alkali aktivatör içeren çimentosuz KYB karışımlarının hazırlanması	52
Şekil 3.30: Aderans deneyi için hazırlanan betonarme kiriş numuneleri	53
Şekil 3.31: Büyük ölçekli kirişler için test düzeneği	54
Şekil 3.32: Çift donatılı kirişte şekil değiştirme ve gerilmeler (Türk, 2002)	56
Şekil 4.1: Karışımların çökme-yayılma ve T_{500} değerleri	59
Şekil 4.2: Kontrol KYB karışımına ait çökme-yayılma görseli	60
Şekil 4.3: $Na_2SiO_3/(Na_2SiO_3+SK)$ oranı 0,15 olan karışımlara ait çökme-yayılma görseller	65
Şekil 4.4: $Na_2SiO_3/(Na_2SiO_3+SK)$ oranı 0,20 olan karışımlara ait çökme-yayılma görseller	

.....	61
Şekil 4.5: $\text{Na}_2\text{SiO}_3/(\text{Na}_2\text{SiO}_3+\text{SK})$ oranı 0,25 olan karışımlara ait çökme-yayılma görseller	62
.....	63
Şekil 4.6: Karışımların L-kutusu H_2/H_1 değerleri	63
Şekil 4.7: Kontrol karışımın priz sürelerine ait garfik	694
Şekil 4.8: $\text{Na}_2\text{SiO}_3/(\text{Na}_2\text{SiO}_3+\text{SK})$ oranı 0,15 olan karışımların priz sürelerine ait garfikler	65
.....	66
Şekil 4.9: $\text{Na}_2\text{SiO}_3/(\text{Na}_2\text{SiO}_3+\text{SK})$ oranı 0,20 olan karışımların priz sürelerine ait garfikler	66
.....	66
Şekil 4.10: $\text{Na}_2\text{SiO}_3/(\text{Na}_2\text{SiO}_3+\text{SK})$ oranı 0,25 olan karışımların priz sürelerine ait garfikler	66
.....	70
Şekil 4.11: Kontrol KYB karışımına ait 28 günlük SEM görüntüsü	70
Şekil 4.12: $\text{Na}_2\text{SiO}_3/(\text{Na}_2\text{SiO}_3+\text{SK})$ oranı 0,15 olan çimentosuz KYB karışımlarına ait 28 günlük SEM görüntüleri	70
Şekil 4.13: $\text{Na}_2\text{SiO}_3/(\text{Na}_2\text{SiO}_3+\text{SK})$ oranı 0,20 olan çimentosuz KYB karışımlarına ait 28 günlük SEM görüntüleri	71
Şekil 4.14: $\text{Na}_2\text{SiO}_3/(\text{Na}_2\text{SiO}_3+\text{SK})$ oranı 0,25 olan çimentosuz KYB karışımlarına ait 28 günlük SEM görüntüleri	72
Şekil 4.15: Karışımlara ait basınç dayanımı değerleri	73
Şekil 4.16: Karışımlara ait yarmada çekme dayanım değerleri	75
Şekil 4.17: Çimentosuz KYB karışımları için yarmada çekme ve basınç dayanımı arasındaki ilişki	76
Şekil 4.18: Karışımlara ait 28 günlük elastisite modülü değerleri	78
Şekil 4.19: Çimentosuz KYB karışımları için elastisite modülü ve basınç dayanımı arasındaki ilişki	79
Şekil 4.20: Karışımlara ait 90 günlük kılcal su emme katsayıları	80
Şekil 4.21: Çimentosuz KYB kirişlerine ait u_{test} değerleri	82
Şekil 4.22: Çimentosuz KYB kiriş numunelerinde donatı aderans dayanımı ve maksimum moment arasındaki ilişki	83
Şekil 4.23: Kontrol ve çimentosuz KYB kiriş numunelerine ait yük-sehim eğrileri	85
Şekil 4.24: Bindirmeli-ekli çimentosuz KYB kirişler için tipik çatlak yayılması ve göçme modu	88
Şekil 4.25: Geri dönüştürülmüş agrega içeren Kontrol KYB kiriş numunesinin çatlak modelleri	89
Şekil 4.26: $\text{Na}_2\text{SiO}_3/(\text{Na}_2\text{SiO}_3+\text{SK})$ oranı 0,15 olan tekli, ikili ve üçlü bağlayıcı harmanlamasına sahip geri dönüştürülmüş agrega içeren çimentosuz KYB kiriş numunelerinin çatlak modelleri	92
Şekil 4.27: $\text{Na}_2\text{SiO}_3/(\text{Na}_2\text{SiO}_3+\text{SK})$ oranı 0,20 olan tekli, ikili ve üçlü bağlayıcı harmanlamasına sahip geri dönüştürülmüş agrega içeren çimentosuz KYB kiriş numunelerinin çatlak modelleri	93
Şekil 4.28: $\text{Na}_2\text{SiO}_3/(\text{Na}_2\text{SiO}_3+\text{SK})$ oranı 0,20 olan tekli, ikili ve üçlü bağlayıcı harmanlamasına sahip geri dönüştürülmüş agrega içeren çimentosuz KYB kiriş numunelerinin çatlak modelleri	95

SEMBOLLER VE KISALTMALAR

ASTM	: American Society for Testing Materials
EFNARC	: European Federation of National Trade Associations
SCC	: Self-compacting concrete
LVDT	: Linear variable differential transformers
KYB	: Kendiliğinden yerleşen beton
KYGB	: Kendiliğinden yerleşen geopolimer beton
UKBGB	: Uçucu kül bazlı geopolimer beton
GPB	: Geopolimer beton
EGC	: Tasarlanmış geopolimer kompozit
AAB	: Alkali ile aktifleştirilmiş beton
GVB	: Geleneksel vibrason betonu
PÇB	: Portland çimentolu beton
GDBA	: Geri dönüştürülmüş beton agregası
GDŞCA	: Geri dönüştürülmüş şişe cam agregası
GDTA	: Geri dönüştürülmüş tuğla agregası
GDİA	: Geri dönüştürülmüş iri agregası
DİA	: Doğal iri agregası
İYA	: İnşaat yıkıntı atığı
GDA	: Geri dönüştürülmüş agregası
DA	: Doğal agregası
CETP	: Cam elyaf takviyeli polimer
CO₂	: Karbondioksit
Ca(OH)₂	: Kalsiyum hidroksit,
Na₂SiO₃	: Sodyum silikat
NaOH	: sodyum hidroksit
Na₂CO₃	: Sodyum karbonat
CaO	: Sodyum oksit
YFC	: Yüksek fırın cürufu
UK	: Uçucu kül
SD	: Silis dumanı
SK	: sonmuş kireç
N	: Sodyum silikat
SEM	: Scanning Electron Microscope
XRD	: X-Ray Diffraction
EDX	: Enerji Dağıtıcı X-ışını Spektrometrisi
FTIR	: Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi
DYK	: Doygun yüzey kuru
LVDT	: Deplasman ölçer
HA	: Hiper akışkanklaştırıcı
S/B	: Su/bağlayıcı
S/TM	: Su/toz malzeme
D_ç	: Çökme-yayılma çapı
T₅₀₀	: Yayılma süresi
Φ	: Donatı çapı
E	: Elastisite modülü
f_{yç}	: Yarmada çekme dayanımı
P	: Kesitin taşıyabileceği maksimum yük
L	: Numunenin uzunluğu

D	: Numunenin çapı
k	: Su emme katsayısı
Q	: Absorbe edilen su miktarı
A	: Su ile temas eden yüzey alanı
t	: zaman
u_{test}	: Aderans dayanımı
d	: donatı çapı
A_s	: Donatı kesit alanı
l_s	: Bindirme uzunluğu
F_c	: Basınç blok derinliğinin oluşturduğu kuvvet
F_s	: Boyuna donatının çekme kuvveti
F_s'	: Basınç donatısının oluşturduğu kuvvet
f_c	: Beton basınç dayanımı
f_s	: Çekme donatısındaki gerilme
f_s'	: Basınç donatısındaki gerilme
M_r	: Kesitin taşıyabilceği moment
c	: Tarafsız eksen derinliği
a	: Basınç blok derinliği
d	: Faydalı yükseklik
d'	: Paspayı
b	: Kiriş gövde genişliği
ϵ_{cu}	: Betonun nihai basınç birim şekil değiştirmesi
ϵ_s'	: Boyuna basınç donatısının birim şekil değiştirmesi
P_{max}	: Maksimum göçme yükü
M_{max}	: Maksimum eğilme momenti
R^2	: Korelasyon katsayısı

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

SÖNMÜŞ KİREÇ VE Na_2SiO_3 İLE AKTİVE EDİLMİŞ GERİ DÖNÜŞTÜRÜLMÜŞ AGREGALI ÇİMENTOSUZ KYB'NİN MÜHENDİSLİK ÖZELLİKLERİ VE ADERANS DAYANIMI

Rumeysa ÜTÜ

İnönü Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

111+XI sayfa

2025

Danışman: Prof. Dr. Kâzım TÜRK

Günümüzde, betonu oluşturan çimento ve agrega yerine sırasıyla yapay ve doğal puzolanlar (silis dumanı (SD), yüksek fırın cürufu (YFC), uçucu kül (UK) ve tras gibi) ile inşaat yıkıntı atıklarının kullanımı sürdürülebilirlik ve çevre açısından önemli bir alternatif sunmaktadır. Bu tez çalışması kapsamında, hibrit aktivatörlü (sönmüş kireç ve Na_2SiO_3) geri dönüştürülmüş agrega içeren çimentosuz KYB'nin taze ve sertleşmiş beton özellikleri üzerinde hibrit aktivatör oranı ($\text{Na}_2\text{SiO}_3/(\text{Na}_2\text{SiO}_3+\text{SK})$) ile bağlayıcı miktarı ve kombinasyonunun etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla, tüm çimentosuz KYB karışımlarında sönmüş kireç (SK) miktarı toplam bağlayıcının %67'si oranında sabit tutulmuş olup değişken parametreler, $\text{Na}_2\text{SiO}_3/(\text{Na}_2\text{SiO}_3+\text{SK})$ oranı (0.15, 0.20 ve 0.25) ile bağlayıcı malzeme miktarı ve kombinasyonu (tekli, ikili ve üçlü harmanlama) olarak seçilmiştir. $\text{Na}_2\text{SiO}_3/(\text{Na}_2\text{SiO}_3+\text{SK})$ oranından 3 seri ile farklı bağlayıcı malzeme miktarı ve kombinasyonundan 4 farklı karışım olmak üzere toplamda 12 karışım ve karşılaştırma amaçlı geri dönüştürülmüş agrega içeren Kontrol KYB karışımı tasarlanmıştır. Tasarlanan tüm KYB karışımları için çökme yayılma, T_{500} ve L kutusu işlenebilirlik testleri ile priz süresi deneyi gerçekleştirilmiştir. Daha sonra tüm karışımlardan üretilen ve 7, 28 ve 90 gün kür edilen numuneler üzerinde basınç ve yarmada çekme dayanımı testleri gerçekleştirilirken elastisite modülü testi 28 günlük ve kılcal su emme testi ise 90 günlük numuneler kullanılarak yapılmıştır. Ayrıca, bir adet Kontrol ve 12 adet çimentosuz KYB olmak üzere toplamda 13 adet 90 günlük büyük ölçekli bindirmeli-ekli donatı detayına sahip kirişler üretilip dört noktalı eğilmeye maruz bırakılmışlardır. Sonuç olarak, tüm karışımların taze beton özellikleri EFNARC'ın önerdiği çökme-yayılma SF2 (660-750 mm) ve L-kutusu ($H_2/H_1 \geq 0.80$) kriterlerini sağlamıştır. Sertleşmiş beton özellikleri açısından ise, $\text{Na}_2\text{SiO}_3/(\text{Na}_2\text{SiO}_3+\text{SK})$ oranı 0.15 olan ikili harmanlanmış karışımların en iyi performansı sergilediği belirlenmiştir. Ayrıca, büyük ölçekli kiriş numuneleri üzerinde gerçekleştirilen eğilme deneyleri sonucunda en yüksek aderans dayanımı değerleri $\text{Na}_2\text{SiO}_3/(\text{Na}_2\text{SiO}_3+\text{SK})$ oranı 0.15 olan ikili harmanlanmış karışımlardan elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Hibrit alkali aktivatör, Bağlayıcı kombinasyonu, Geri dönüştürülmüş agrega, Çimentosuz kendiliğinden yerleşen beton, Büyük ölçekli bindirmeli-ekli donatılı kiriş, Aderans dayanımı

ABSTRACT

Master Thesis

ENGINEERING PROPERTIES AND BOND STRENGTH OF CEMENTLESS SCC WITH RECYCLED AGGREGATE ACTIVATED BY SLAKED LIME AND Na_2SiO_3

Rumeysa ÜTÜ

Inonu University
Graduate School of Nature and Applied Sciences
Department of Civil Engineering

111+XI sayfa

2025

Supervisor: Prof. Dr. Kâzım TÜRK

Today, the use of artificial and natural pozzolans (such as silica fume (SF), blast furnace slag (BFS), fly ash (FA), and trass) and construction demolition waste instead of cement and aggregates, respectively, which constitute concrete, offers an important alternative in terms of sustainability and the environment. Within the scope of this thesis study, the effect of the hybrid activator ratio ($\text{Na}_2\text{SiO}_3/(\text{Na}_2\text{SiO}_3+\text{SK})$), the quantity and combination of binder on the fresh and hardened concrete properties of cementless SCC containing recycled aggregate with a hybrid activator (slaked lime and Na_2SiO_3) was investigated. For this purpose, the amount of slaked lime (SL) was kept constant at 67% of the total binder in all cementless SCC mixtures, and the variable parameters were selected as the $\text{Na}_2\text{SiO}_3/(\text{Na}_2\text{SiO}_3+\text{SL})$ ratio as 0.15, 0.20, and 0.25 and the amount and combination of binder materials (single, binary, and ternary blends). A total of 12 mixtures were designed, consisting of 3 series of $\text{Na}_2\text{SiO}_3/(\text{Na}_2\text{SiO}_3+\text{SL})$ ratios and 4 different mixtures of varying binder material quantities and combinations, along with a Control SCC mixture containing recycled aggregate for comparison purposes. Slump-flow, T_{500} , and L-box of the workability tests as well as setting time tests, were performed for all designed SCC mixtures. Subsequently, compressive strength and flexural strength tests were conducted on samples produced from all mixtures for 7, 28, and 90 curing days, while the modulus of elasticity test was performed using 28-day samples and the capillary water absorption test using 90-day samples. Additionally, a total of 13 beams large-scale beams with lap-spliced reinforcing bar details, consisting of Control and 12 cementless SCC beams, were produced and subjected to four-point bending. As a result, the fresh concrete properties of all mixtures met the slump-flow SF2 (660-750 mm) and L-box ($H_2/H_1 \geq 0.80$) criteria recommended by EFNARC. In terms of hardened concrete properties, it was determined that binary blended mixtures with a $\text{Na}_2\text{SiO}_3/(\text{Na}_2\text{SiO}_3+\text{SK})$ ratio of 0.15 exhibited the best performance. Furthermore, bending tests conducted on large-scale beam specimens revealed that the highest bond strength values were obtained from binary blended mixtures with a $\text{Na}_2\text{SiO}_3/(\text{Na}_2\text{SiO}_3+\text{SK})$ ratio of 0.15.

Keywords: Hybrid alkali activator, Binder combination, Recycled aggregate, Cementless self-compacting concrete, Large-scale beam with lap-spliced bar, Bond strength

1. GİRİŞ

Beton sahip olduğu yüksek basınç dayanımı, hammaddelerinin kolay temin edilebilirliği, uzun ömürlülüğü ve ekonomik verimliliği gibi avantajları sayesinde günümüzde inşaat sektöründe en çok kullanılan yapı malzemesi haline gelmiştir (Wang ve diğ., 2025). Günümüzde inşaat sektöründe kullanılan betonun üretiminde ana bağlayıcı olarak Portland çimentosu kullanılmakta olup bu malzemeye olan talebin 2050 yılına kadar küresel ölçekte yıllık yaklaşık 18 milyar tona ulaşacağı düşünülmektedir (Kishore, 2023; Singh ve diğ., 2016). Ancak çimento üretimi hem yoğun hammadde ve enerji tüketimi gerektirmekte hem de bu süreçte yüksek miktarda sera gazı salımına neden olmaktadır. Örneğin, 1 ton Portland çimentosu üretmek için 1.5 ton hammadde gerekmektedir, bu da yaklaşık 1 ton karbondioksit açığa çıkartmasına sebep olmaktadır (Wan ve diğ., 2025). Nitekim Portland çimentosu üretimi, küresel karbondioksit (CO₂) emisyonlarının yaklaşık %5–7'sini oluşturarak çevresel sürdürülebilirlik açısından önemli bir sorun teşkil etmektedir (Lin ve diğ., 2025; Wibowo ve diğ., 2025).

Çevresel kaygıların artması, araştırmacıları Portland çimentosunun kısmen ya da tamamen yerini alabilecek, daha çevre dostu ve sürdürülebilir bağlayıcılar geliştirmeye teşvik etmiştir. Bu bağlamda, düşük karbon ayak izine sahip geopolimer beton sürdürülebilir bir alternatif olarak öne çıkmaktadır. (Sona ve Sangeetha, 2025; Ulugöl ve diğ., 2021). Geopolimer beton, aluminosilikat açısından zengin doğal malzemelerin ve endüstriyel yan ürünlerin (Uçucu kül, yüksek fırın cürufu, silis dumanı vb.) alkali aktivatörler (örn. NaOH, Na₂SiO₃) ile reaksiyona girerek bağlayıcı bir polimerik matris oluşturması sonucu elde edilen çimentosuz bir bağlayıcı sistemdir (Davidovits, 1991b). 'Geopolimer' kavramı ilk kez 1970'li yıllarda Fransız bilim insanı Joseph Davidovits tarafından literatüre kazandırılmış olup, günümüzde çevre dostu ve sürdürülebilir bir alternatif bağlayıcı olarak ilgi görmektedir (Hassan ve diğ., 2019; Davidovits, 1991a). Yapılan araştırmalarda, eşdeğer bağlayıcı miktarıyla üretilen geopolimer betonun, geleneksel çimentolu betona kıyasla sera gazı salımlarını %62–66 oranında düşürdüğü rapor edilmiştir (Davidovits, 2015). Bu sonuçlar, geopolimer betonun geleneksel betona güçlü bir çevre dostu alternatif sunduğunu ortaya koymaktadır (Eltantawi ve diğ., 2025; Al-Tam ve diğ., 2025). Geopolimer betonlarda genellikle alkali aktivatör olarak kullanılan NaOH, yüksek OH⁻ iyonları sayesinde yüksek mukavemet sağlasa da hızlı priz, yüksek pH toksisitesi ve maliyet sorunları içermektedir. Sönmüş kireç (Ca(OH)₂) sodyum hidroksitten (NaOH) çok daha ucuz olduğundan dolayı alkali aktivatörlere potansiyel bir alternatif olmuştur (Kim ve diğ., 2013). Bun ve diğ. (2022)

yaptıkları çalışmada, %100 geri dönüştürülmüş malzemelerden üretilen betonlarda YFC ve UK'nın sönmüş kireç (Ca(OH)_2) ile aktive edilerek bağlayıcı olarak kullanılabileceğini ve uzun vadede 40 MPa'ya kadar dayanım elde edilebildiğini göstermiştir. Diğer bir çalışmada (Kadum ve diğ., 2017) ise, sönmüş kireç ve farklı puzolanlardan (silis dumanı, uçucu kül, metakaolin) üretilen "PozzoLime" karışımlarının Portland çimentosu yerine sürdürülebilir bağlayıcı olarak kullanılabileceğini ve silis dumanı içeren karışımların 28 günde 22 MPa'nın üzerinde dayanımlarıyla yapısal beton için uygun sürdürülebilir bir alternatif sunduğu belirlenmiştir. Yang ve diğ. (2012) tarafından yapılan çalışmada, Ca(OH)_2 bazlı alkali ile aktive edilmiş öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu (YFC) harçları üzerinde farklı yardımcı aktivatörler (Na_2SiO_3 , Na_2CO_3) ve kür koşullarının etkileri incelenmiş, su ile kürlemenin uzun vadede daha yüksek dayanım sağladığını ve özellikle Na_2SiO_3 ile aktive edilen harçların daha yoğun C-S-H jeli oluşumu ve daha yüksek basınç dayanımı gösterdiği sonucuna varılmıştır.

Diğer taraftan, doğal afetler, artan kentsel dönüşüm ve inşaat faaliyetleri sonucu oluşan inşaat ve yıkım atıkları (İYA) ciddi bir çevresel problem haline gelmektedir (Wu ve diğ., 2024; Zong ve diğ., 2025). Veriler, dünya çapında her yıl yaklaşık bir milyar ton inşaat atığının üretildiğini göstermektedir (Zhang ve diğ., 2023). Yapılan tahminlere göre, inşaat yığıntı atıklarının yaklaşık %35'i hiçbir işleme tabi tutulmadan doğrudan depolama alanlarında depolanmaktadır. Ancak, depolama sahalarının sınırlı olması ve yüksek nakliye maliyetleri ciddi çevresel problemlere neden olmaktadır (Liu ve diğ., 2024; Menegaki ve Damigos, 2018). Bu bağlamda, inşaat yığıntı atıklarının geri dönüştürülerek betonda agrega olarak yeniden kullanımı, hem doğal agrega kaynaklarına olan talebi azaltmakta hem de atık miktarını en aza indirerek çevresel sorunların azaltılması açısından etkili bir çözüm sunmaktadır (Wang ve diğ., 2024).

Bunlara ilaveten, inovatif bir beton olarak kendiliğinden yerleşen beton (KYB) ise, yüksek akışkanlık ve ayrışmaya karşı dayanıklılık özellikleri sayesinde, herhangi bir vibrasyon uygulanmadan yalnızca kendi ağırlığı ile kalıba kolayca yerleşebilen özel bir beton türüdür. İlk kez 1980'li yıllarda Japonya'da geliştirilen KYB, dar kesitli elemanlarda ve yoğun donatılı yapılarda yerleşme sorununu ortadan kaldırarak uygulamada önemli kolaylıklar sağlamaktadır (Okamura, 1997). Bununla birlikte geopolimer beton, yapısı gereği yüksek viskoziteye sahip olduğundan, sahada uygulanması sırasında çeşitli zorluklar yaşanabilmektedir. Bu tür betonun yerleştirilip sıkıştırılması esnasında, geleneksel çimentolu betona kıyasla daha fazla dikkat gösterilmesi ve deneyimli iş gücünden

yararlanılması gerekmektedir. Bu güçlüklerin üstesinden gelmek için, geopolimer betonun üstün özelliklerini kendiliğinden yerleşen betonun akışkanlığıyla birleştirerek kendiliğinden yerleşen geopolimer beton (KYGB) geliştirilmiştir (Elhag ve diğ, 2025; TD, 2025). Mekanik vibrasyon gereksinimini ortadan kaldırarak işçilikten tasarruf sağlamak ve aynı zamanda daha homojen ve dayanıklı beton elde edilmesine katkı sağlamaktadır (Panda ve diğ, 2025). Kendiliğinden yerleşen geopolimer beton üzerine literatürde bazı çalışmalar mevcuttur. Bunlardan biri de Memon ve diğ. (2013) tarafından yapılan çalışmadır. Bu çalışmada, uçucu kül esaslı KYGB’de farklı oranlarda silis dumanı ikamesinin taze ve sertleşmiş beton özelliklerine etkisi incelenmiştir. Bulgular, %10’a kadar silis dumanı ikamesinin dayanımı artırdığını, ancak daha yüksek oranlarda ikamenin hem işlenebilirliği hem de mekanik performansı olumsuz etkilediğini göstermiştir. Başka bir çalışmada (Pradhan ve diğ, 2022) ise YFC esaslı KYGB’de doğal iri agrega (DİA) yerine geri dönüştürülmüş iri agrega (GDİA) kullanımının ve sodyum silikat molaritesinin (10M, 12M, 14M) taze ve sertleşmiş beton özellikleri üzerindeki etkilerini incelemiştir. Bulgular, GDİA kullanımının işlenebilirlik ve dayanımı olumsuz etkilediğini, buna karşın molarite oranının artmasının basınç ve yarmada çekme dayanımlarını iyileştirdiği sonucuna varılmıştır.

Öte yandan, betonarmenin varlığını borçlu olduğu beton ile donatı arasındaki aderansın da geopolimer betonlar için araştırılmasının büyük önem arzettiği açıktır. Çünkü aderans, donatının betonla kenetlenmesini sağlayarak iki malzemenin birlikte çalışabilmesine olanak tanır. Donatı ile çevresindeki beton arasında kuvvet aktarımı kimyasal bağ, yüzey pürüzlülüğünden kaynaklanan sürtünme ve mekanik kenetleme mekanizmaları sayesinde gerçekleşmektedir (Özdemir ve diğ, 2025; Li ve diğ, 2022). Yeterli aderansın sağlanamadığı takdirde, beton ile donatı arasındaki yük aktarımının zayıflamasına neden olur ve bu da çatlakların ilerlemesine, kesitlerin taşıma kapasitesini kaybetmesine ve yapı bütünlüğünün bozulmasına sebep olabilir. Dolayısıyla aderans, betonarmenin yalnızca taşıma gücünü değil, aynı zamanda güvenilirliğini ve dayanıklılığını da doğrudan etkileyen temel bir mekanizmadır (Bayrak ve diğ, 2024). Bu nedenle, beton ile donatı arasındaki bağlanma mekanizmasını etkileyen tüm parametrelerin geopolimer betonlar için de araştırılması bilimsel açıdan büyük önem taşımaktadır.

Bu tez çalışması kapsamında, hibrit alkali aktivatörlü (sönmüş kireç ve Na_2SiO_3) geri dönüştürülmüş agrega içeren çimentosuz KYB’nin taze ve sertleşmiş beton özellikleri üzerinde farklı hibrit aktivatör oranı ile bağlayıcı miktarı ve kombinasyonlarının etkisi incelenmiştir. Tüm çimentosuz KYB karışımlarında alkali aktivatörlerden biri olan sönmüş

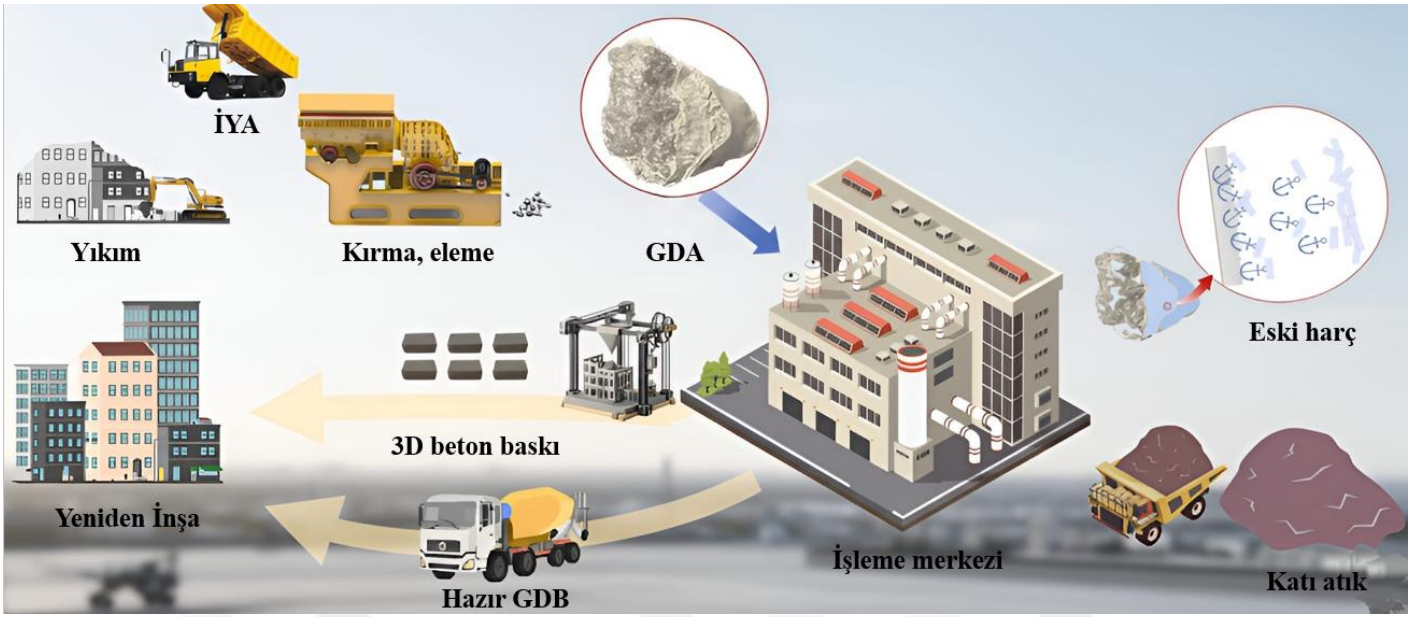
kireç toplam bağlayıcının %67'si oranında sabit tutulmuş olup değişken parametrelerden biri olan $\text{Na}_2\text{SiO}_3/(\text{Na}_2\text{SiO}_3+\text{SK})$ oranı 0.15, 0.20 ve 0.25 oranlarında kullanılarak 3 seri karışım tasarlanmıştır. Diğer bir değişken parametre ise bağlayıcı bileşenlerin kombinasyonudur. Bu kapsamda; SD'nin tek başına kullanıldığı (%100 SD) tekli harmanlama, SD'nin %50 ve %75 oranlarında YFC ile birlikte kullanıldığı ikili harmanlamalar (0.50SD_0.50YFC ve 0.75SD_0.25YFC), SD'nin %75 oranında YFC ve UK ile birlikte üçlü harmanlama (0.75SD_0.125YFC_0.125UK) olarak 4 farklı karışım olmak üzere toplamda 12 karışım tasarlanmıştır. Ayrıca, çimentosuz KYB karışımlarındaki değişken parametrelerin etkisini görebilmek ve karşılaştırma yapabilmek için geri dönüştürülmüş agrega içeren ve çimento ile uçucu külün bağlayıcı olarak kullanıldığı aktivatör içermeyen geleneksel KYB Kontrol karışımı tasarlanmıştır. Ayrıca, çimentosuz KYB'nin donatı ile olan aderans dayanımını belirlemek için 12 adet çimentosuz KYB ve 1 adet de Kontrol KYB olmak üzere toplam 13 adet büyük ölçekli bindirmeli-ekli donatı detayına sahip kirişler üretilmiş ve dört noktalı eğilmeye maruz bırakılarak test edilmiştir.

2. LİTERATÜR ÖZETİ

2.1 Geri Dönüştürülmüş Agregası

Beton, hammaddelerinin kolay temin edinilebilirliğı, yüksek dayanıklılığı, uzun ömürlülüğü ve ekonomik verimliliğı gibi avantajları sayesinde dünyada en yaygın kullanılan yapı malzemesi haline gelmiştir (Shaikh, 2016). Betonun en büyük bileşeni olan agrega, toplam hacmin yaklaşık %70–80'ini oluşturmaktadır. 2015 yılı itibarıyla, küresel ölçekte inşaat sektöründe kullanılan agrega miktarının yaklaşık 48,3 milyar ton olduğu rapor edilmektedir (Mathew ve diğ., 2023). Artan nüfus, kentleşme ve sanayileşmeden dolayı inşaat sektöründe betona olan talep her geçen yıl daha da artmaktadır. Nitekim 2023 yılı itibarıyla küresel ölçekte yıllık beton tüketiminin yaklaşık 25 milyar ton, kişi başına ise ortalama 3,5 ton seviyelerine ulaştığı rapor edilmektedir (Lin ve diğ., 2025). Bu talepteki artış, betonun temel bileşeni olan agregaya duyulan ihtiyacı da önemli ölçüde artırmaktadır.

Doğal agrega kaynaklarının kısıtlılığı, beton üretimindeki artışın çevresel sürdürülebilirlik açısından ciddi bir sorun haline gelmesine yol açmış ve bu durum, yeni ve yenilikçi çözüm arayışlarını zorunlu kılmıştır (Zhang ve diğ., 2019). Ayrıca, doğal afetler, yapıların ekonomik ömrünü tamamlaması ve kentsel dönüşüm faaliyetleri gibi sebeplerden ötürü dünya genelinde büyük miktarda inşaat ve yıkım atığı ortaya çıkmaktadır (Zong ve diğ., 2025). Bu inşaat yıkıntı atıkları (İYA) yaklaşık %35'inin herhangi bir işleme tabi tutulmaksızın doğrudan düzenli depolama alanlarına gönderildiğı tahmin edilmektedir (Menegaki ve Damigos, 2018). Ancak, yüksek nakliye maliyetleri ve düzenli depolama sahalarının sınırlı olması ciddi çevresel sorunlara yol açmaktadır (Parthiban ve Mohan, 2017). Bu bağlamda, İYA'larının işlenerek geri dönüştürülmüş agrega haline getirilmesi ve beton üretiminde doğal agreganın yerine kısmen ya da tamamen ikame edilmesi hem atıkların yeniden değerlendirilmesine hem de doğal kaynakların korunmasına katkı sağlayarak çevresel sorunların azaltılması açısından etkili bir çözüm sunmaktadır (Şekil 2.1) (Zhou ve Chen, 2017).



Şekil 2.1: Geri dönüştürülmüş agreganın işleme süreci (Wu ve diğ, 2024)

2.1.1 Geri dönüştürülmüş agrega ve farklı beton tiplerinde kullanımı

Literatürde inşaat yıkıntı atığını geri dönüştürerek betonda agrega olarak kullanan birçok çalışma mevcuttur. Bunlardan bir tanesi de Zhou ve Chen (2017) tarafından yapılan çalışmadır. Bu çalışmada iki farklı tipte geri dönüştürülmüş agrega içeren betonun mekanik özellikleri incelenmiştir. Çalışmada, doğal agrega geri dönüştürülmüş agrega ile %0, %10, %20, %30, %40, %50, %60, %70, %80, %90 ve %100 oranında değiştirilerek toplamda 22 adet karışım hazırlanmış ve bu karışımlardan üretilen numuneler üzerinde mekanik testler gerçekleştirilmiştir. Testler sonucunda elde edilen bulgulara göre, geri dönüştürülmüş agrega içeren karışımların basınç dayanımları %100 doğal agrega içeren kontrol karışıma göre hemen hemen aynı dayanım değerlere sahip olduğu görülmüştür. Hatta %80 geri dönüştürülmüş agrega içeren karışımlarda basınç dayanımının kontrol numunesinin basınç dayanımlarından daha yüksek olduğu sonucuna varılmıştır. Geri dönüştürülmüş agrega içeren tüm karışımların elastisite modülü değerlerinin %100 doğal agrega içeren kontrol karışımının elastisite modülü değerlerinden daha düşük çıktığı tespit edilmiştir.

Neupane ve diğ. (2025) bu çalışmada, inşaat yıkıntı atıklarından elde edilen geri dönüştürülmüş agreganın betonda kullanılabilirliğinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Doğal agrega ağırlıkça %0, %25, %50, %75 ve %100 oranında geri dönüştürülmüş beton agregası ile değiştirilerek beş farklı karışım tasarlanmıştır ve beton numuneleri üretilmiştir. Üretilen numuneler üzerinde geri dönüştürülmüş beton agregasının betonun mekanik özelliklerine etkisini incelemek için basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı ve eğilme dayanımı

tesleri yapılmıştır. Basınç dayanımı testi sonucunda geri dönüştürülmüş agregaya içermeyen betona kıyasla %25 oranında geri dönüştürülmüş agregaya içeren beton %20,13 lük dayanım artışı görülürken %50 ve %75 oranında geri dönüştürülmüş agregaya içeren betonlarda ise bu artış sırasıyla %8,08 ve %1,28 olarak bulunmuştur. %100 geri dönüştürülmüş agregaya içeren betonda ise %5,87 lik bir düşüş görülmüştür. Yarmada çekme ve eğilme dayanımlarında da benzer şekilde kısmi artışlar ve ardından düşüşler tespit edilmiştir. Çıkan sonuçları literatürle kıyasladıklarında dayanımlardaki artışın sebebinin diğer çalışmalarda kullanılan geri dönüştürülmüş beton agregasına kıyasla çalışmada kullanılan geri dönüştürülmüş beton agregasının daha yüksek dayanımına ve daha düşük su emme oranına bağlı olduğu ifade edilmiştir.

Alkhteeb ve Dawood (2025) yaptıkları inceleme çalışmasında, geri dönüştürülmüş beton agregasının (GDA) beton üzerindeki etkilerini araştırmış ve bu alanda yapılan diğer çalışmaları incelemişlerdir. İncelemeler sonucunda, GDA içeren betonların işlenebilirlikleri doğal agregalı (DA) betonlara göre daha düşük olduğu, ayrıca GDA içeren betonların DA içeren betonlara kıyasla daha gözenekli bir yapıya sahip olduğu belirlenmiştir. Sertleşmiş beton özellikleri açısından ise, GDA içeren betonların DA içeren betonlara kıyasla daha düşük basınç dayanımı değerleri sergilediği görülmüştür. Ayrıca GDA'lı betonların elastisite modülü değerleri DA betona göre daha düşük olduğu hatta artan GDA içeriğinin elastisite modülü değerlerinde daha da azalma meydana geldiği sonucuna ulaşılmıştır.

Son yıllardaki geopolimer beton (alkali ile aktifleştirilmiş beton) üzerine yapılan çalışmalarda, doğal agregaya kullanımının yanı sıra geri dönüştürülmüş agregaların da tercih edildiği örnekler literatürde yer almaktadır. Bu araştırmalardan biri de Parthiban ve Mohan (2017) tarafından gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada, doğal iri agregaya yerine belli oranlarda (%25, %50 ve %75) geri dönüştürülmüş iri agregaya (GDİA) kullanımının alkali ile aktifleştirilmiş cüruf betonunun (AAB) taze ve sertleşmiş beton özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Sonuçta, kullanılan GDİA oranının artması işlenebilirliği olumsuz etkilemiştir. Bütün oranlarda GDİA içeren AAB karışımların sadece doğal iri agregaya içeren AAB karışımlarına kıyasla basınç, yarmada çekme ve eğilme dayanımlarında artış gözlenmiştir. Fakat yüksek oranlarda GDİA içeren karışımlarda bu dayanım artışı daha sınırlı kalmıştır. En iyi dayanım değerleri ise %50 GDİA içeren AAB'larda elde edilmiştir.

Shaikh (2017) yaptığı çalışmada, uçucu kül bazlı geopolimer betonun mekanik özellikleri üzerine, doğal iri agregaya yerine %15, %30 ve %50 oranında geri dönüştürülmüş agreganın kullanımının etkilerini araştırmıştır. Toplamda dört adet karışım hazırlanmış ve karışımlardan üretilen numuneler üzerinde basınç, çekme ve elastisite modülü testleri

gerçekleştirilmiştir. Testlerden elde edilen bulgulara, doğal iri agrega yerine geri dönüştürülmüş iri agrega kullanımının uçucu kül bazlı geopolimer betonların basınç, çekme ve elastisite modülü değerlerinde azalmaya sebep olduğu görülmüştür. Ayrıca bu azalmaların geri dönüştürülmüş iri agrega oranı arttıkça daha belirgin hale geldiği sonucuna varılmıştır.

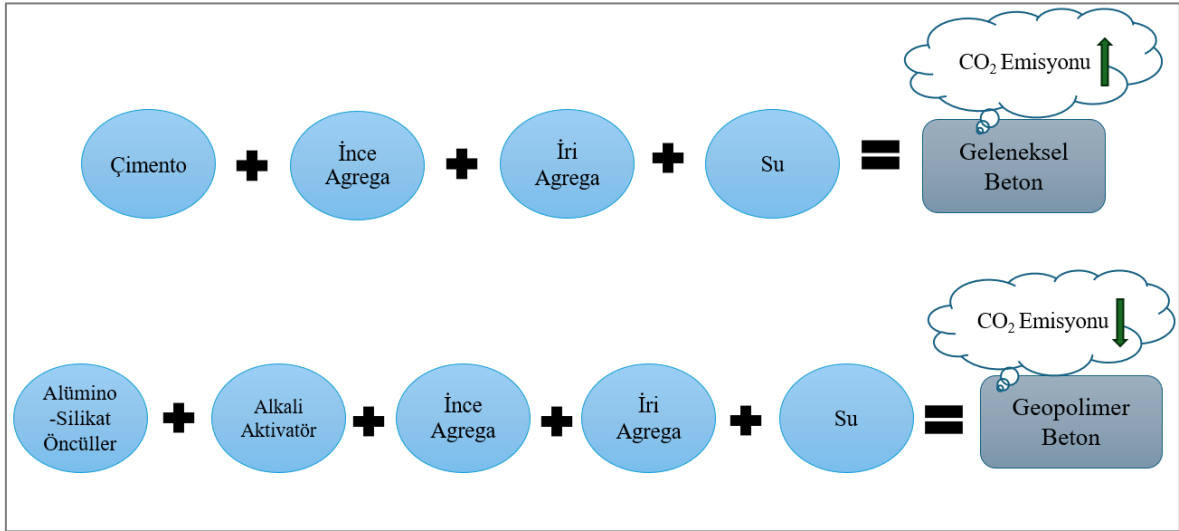
Nikmehr ve diğ. (2024) tarafından yapılan çalışmada geri dönüştürülmüş iri agreganın (GDİA) kendiliğinden yerleşen geopolimer betonun (KYGB) taze, sertleşmiş ve su emme özellikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Ayrıca, geopolimer bulamacı ile kaplanarak iyileştirilen GDİA'nın KYGB performansına katkısı da araştırılmıştır. GDİA %0, %25, %50 ve %100 oranlarında DİA ile yer değiştirdiği dört farklı karışım hazırlanmış ve bunlara ek olarak DİA yerine %100 oranında iyileştirilmiş GDİA kullanılarak KYGB karışımları da üretilmiştir. Deneysel sonuçlara göre, kullanılan GDİA oranı arttıkça KYGB karışımların işlenebilirliği azaldığı belirlenmiştir. Kaplamalı GDİA içeren karışımlar ise KYB için gerekli olan işlenebilirlik sınır değerlerini sağlayamamıştır. DİA yerine GDİA kullanılması KYGB'nin basınç ve yarmada çekme dayanımı ile elastisite modülü değerlerini azalttığı, su emme değerlerini ise arttırdığı görülmüştür. Ancak kaplanmış GDİA ile hazırlanan karışımlarda %100 kaplanmamış GDİA içeren KYGB'lara kıyasla basınç ve çekme dayanımı ile elastisite modülü değerlerinde artış, su emme değerlerinde ise azalma gözlemlenmiştir.

2.2 Geopolimer Beton

Günümüzde beton, en yaygın kullanılan yapı malzemelerinden biri olmasına rağmen, sürdürülebilirlik açısından bazı çevresel ve yapısal dezavantajları bulunmaktadır. Beton üretiminde ana bağlayıcı olarak Portland çimentosu kullanılmakta olup bu malzemeye olan talebin 2050 yılına kadar küresel ölçekte yıllık yaklaşık 18 milyar tona ulaşacağı düşünülmektedir (Kishore, 2023; Singh ve diğ., 2016). Portland çimentosunun üretiminde ise, büyük miktarda hammadde tüketiminin yanı sıra yüksek enerji gereksinimiyle de dikkat çekmektedir (Almutairi ve diğ., 2021; Lin ve diğ., 2025). Bunun yanı sıra, portland çimentosu üretimi küresel insan kaynaklı karbondioksit (CO₂) emisyonlarının yaklaşık %5–7'sinden sorumludur. Örneğin, 1 ton Portland çimentosu üretmek için 1.5 ton hammadde gerekmektedir, bu da yaklaşık 1 ton karbondioksit açığa çıkartmasına sebep olmaktadır (Wan ve diğ., 2025).

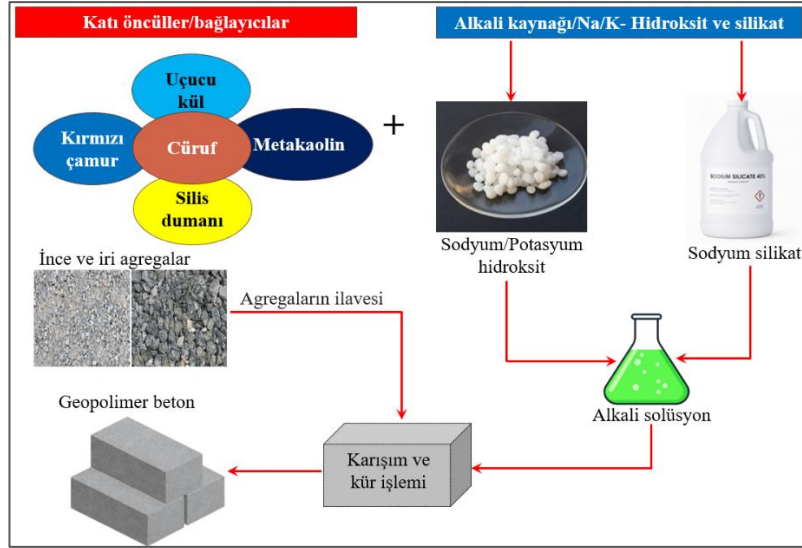
Geleneksel çimentolu betonun üretim ve kullanım süreçleri, doğal kaynakların hızla tükenmesine ve sera gazı emisyonlarının artmasına neden olduğundan dolayı çevresel açıdan

ciddi sorunlara yol açmaktadır. Bu durum araştırmacıları portland çimentosunun kısmen ya da tamamen yerini alabilecek, daha çevre dostu ve sürdürülebilir bağlayıcılar aramaya teşvik etmiştir. Bu bağlamda, düşük karbon ayak izine sahip geopolimer beton bu noktada güçlü bir alternatif olarak öne çıkmaktadır (Sona ve Sangeetha, 2025; Dönmez ve diğ, 2023; Ulugöl ve diğ, 2021). Şekil 2.2’de geopolimer beton ile geleneksel beton arasındaki fark görülmektedir.



Şekil 2.2: Geopolimer betonun geleneksel Portland çimentolu betonla karşılaştırılması

Beton üretiminde çimentonun tamamen ikame edilebilmesini sağlayan en dikkat çekici yeniliklerden biri, geopolimer adı verilen alkali ile aktive edilmiş malzemelerdir. 'Geopolimer' kavramı ilk kez 1970’li yıllarda Fransız bilim insanı Joseph Davidovits tarafından literatüre kazandırılmış olup, günümüzde çevre dostu ve sürdürülebilir bir alternatif bağlayıcı olarak ilgi görmektedir (Hassan ve diğ, 2019; Davidovits, 1991). Geopolimer kelimesindeki ‘geo’ terimi uçucu kül (UK), yüksek fırın cürufu (YFC) ve silis dumanı (SD) gibi endüstriyel yan ürünleri ifade ederken, ‘polimer’ terimi ise aynı yapı birimlerinin kimyasal reaksiyonlar sonucunda zincirler halinde bağlanarak oluşturduğu moleküler yapıyı ifade etmektedir (Thomas ve diğ, 2022). Şekil 2.3’de geopolimer betonun üretim sürecinin aşamaları gösterilmektedir.



Şekil 2.3: Geopolimer betonun üretim süreci (Thomas ve diğ, 2022)

2.2.1 Geopolimer beton ile ilgili yapılan çalışmalar

Geopolimer betonlarda, silika ve alümina kaynaklı öncül malzemelerin çözünmesi ve geopolimerizasyon sürecinin ilerlemesi için alkali çözeltilerin kullanılması gerekmektedir. Bu amaçla, literatürde en yaygın kullanılan alkali aktivatörler sodyum silikat (Na_2SiO_3) ve sodyum hidroksit (NaOH) olarak belirtilmektedir (Rihan ve diğ, 2024, Luukkonen ve diğ, 2018). Bunun birçok örnekleri literatürde mevcuttur. Bunlardan bir tanesi de Bellum ve diğ. (2020) tarafından yapılan çalışmadır. Bu çalışmada, uçucu kül (UK) esaslı geopolimer betonda yüksek fırın cürufu (YFC) ikame oranının elastisite modülü ve basınç dayanımı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Aktivatör olarak sodyum hidroksit (NaOH) ve sodyum silikat (Na_2SiO_3) kullanılmıştır. Çalışmada yüksek fırın cürufu %0, %10, %20, %30, %40, %50, %60 ve %70 oranlarında uçucu kül ile yer değiştirilerek toplam sekiz adet karışım hazırlanmıştır. Karışımlardan hazırlanan numuneler üzerinde basınç dayanımı ve elastisite modülü testleri yapılmıştır. Sonuç olarak, YFC ikame oranı arttıkça basınç dayanımlarında belirgin bir artış olduğu bulunmuştur. Nitekim, %10 oranında YFC'nin kullanıldığı karışımda basınç dayanımı 17.14 MPa iken bu oran %70'e çıkartıldığında basınç dayanımı 38.25 MPa'ya ulaşmıştır. Elastisite modüllü değerleri de basınç dayanımıyla benzer bir eğilim göstererek YFC oranının artmasıyla birlikte yükseldiği görülmüştür.

Geopolimer betonlarda Na_2SiO_3 ve NaOH 'in alkali aktivatör olarak kullanan bir diğer çalışma ise Nakum ve Arora (2022) tarafından yapılan çalışmadır. Bu çalışmada, çeşitli alkali çözelti/Uçucu Kül Oranları'nın (0,6, 0,7 ve 0,8) ve sodyum hidroksit molaritelerinin (10 M, 12 M ve 14 M) uçucu kül içeren kendiliğinden yerleşen geopolimer betonun taze ve sertleşmiş beton özellikleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Çalışmada toplam dokuz adet

karışım hazırlanmıştır. Sonuçlar, sodyum hidroksit molaritesinin sertleşmiş beton özelliklerini olumlu yönde etkilerken, taze beton özellikleri üzerinde olumsuz etkiler oluşturduğunu göstermiştir. Ayrıca, sodyum hidroksit molaritesinin artması basınç dayanımlarında da artışa neden olmuştur. Buna karşın, Alkali çözelti/uçucu kül oranları arttırıldığında ise basınç dayanımlarında azalma gözlemlenmiştir.

Sodyum hidroksit (NaOH) kullanılan mevcut tipik alkali aktivatördür. Sodyum hidroksitler, yüksek konsantrasyondaki hidroksit iyonlarından (OH^-) kaynaklanan yüksek bir mukavemet gelişimi sağlamalarına rağmen, bu aktivatörün hızlı sertleşme süresi, yüksek PH ile ilişkili toksisite ve nispeten yüksek maliyet gibi sorunları vardır. Sönmüş kirecin ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) sodyum hidroksitten çok daha ucuz olduğundan alkali aktivatörlere potansiyel bir alternatif olmuştur (Kim ve diğ., 2013).

Literatürde sönmüş kireci aktivatör olarak kullanarak beton üreten bilimsel çalışmalar bulunmaktadır. Bunlardan bir tanesi Bun ve diğ. (2022) tarafından yapılan çalışmadır. Bu çalışmada, farklı atıklar ve yan ürünler kullanılarak %100 geri dönüştürülmüş malzemelerden üretilen betonun fizibilitesinin incelenmesi amaçlanmıştır. Bu çalışmada bağlayıcı olarak öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu (YFC) ve F sınıfı uçucu kül (UK) kullanılmıştır. Bir kireç fabrikasının atıklarından elde edilen kalıntı olan sönmüş kireç ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), hem YFC'nin hem de UK'nın aktivatörü olarak kullanılmıştır. Karışım suyu olarak laboratuvar beton üretiminden gelen atık yıkama suyu kullanılmıştır. Betonun işlenebilirliğini iyileştirmek için, kullanılmış yemeklik yağdan (UCO) ve kullanılmış motor yağından elde edilen geleneksel olmayan katkılar karışıma dahil edilmiştir. Karışımlarda agrega olarak geri dönüştürülmüş beton agregaları (GDBA), geri dönüştürülmüş atık şişe cam agregaları (GDŞCA) ve geri dönüştürülmüş tuğla agregaları (GDTA) ince ve iri agrega olarak, denizden tarakla temizlenen katı madde kum olarak kullanılmıştır. Taze ve sertleşmiş özelliklerini değerlendirmek amacıyla çeşitli beton formülasyonları test edilmiştir. Bu çalışmada birçok karışım hazırlanmış ve bu karışımlara çökme ve basınç dayanımı testleri yapılmıştır. Sonuç olarak; uçucu kül veya granüle yüksek fırın cürufu, geri dönüştürülmüş atık kireç ile aktive edilmesi durumunda bağlayıcı olarak kullanılabileceği belirlenmiştir. UK bağlayıcılarının dayanım kazanabilmesi için en az %30 atık kirece ihtiyaç olduğu ve bu durumda yaklaşık 2 MPa dayanıma ulaşabildiği bulunmuştur. %5-10 kireç atığından oluşan YFC bağlayıcıları kullanılarak elde edilen betonların 2 günde 6-11 MPa'ya ve özellikle daha ince YFC kullanılması durumunda uzun vadede basınç dayanımlarının 40 MPa'ya ulaşabildiği belirlenmiştir. %100 geri dönüştürülmüş malzemelerden yapılan betonlar, 9,5

ayda 37 MPa'ya kadar basınç dayanımına ulaşmış fakat işlenebilirlikleri geri dönüştürülmüş agregaların su emmesi nedeniyle düşük kaldığı tespit edilmiştir.

Bir diğer çalışma ise Kadum ve diğ. (2017) tarafından yapılan çalışmadır. Bu çalışmada sönmüş kireç ve farklı puzolan türlerinden (silis dumanı, uçucu kül ve metakaolin) üretilen ve “pozzoLime” adı verilen beton karışımların Portland çimentosu içermemesi ve yapısal betonda kullanılabilmesi amaçlanmıştır. PozzoLime'nin betonda Portland çimentosu yerine kullanılabilecek alternatif bir sürdürülebilir bağlayıcı olarak kullanılması hedeflenmiştir. Çalışma puzolan-sönmüş kireç karışımlarını optimize ederek, işlenebilirlik, dayanım ve dayanıklılık bakımından betonun performansını arttırmaya yöneliktir. Su/bağlayıcı oranı, agrega/bağlayıcı oranı ve puzolan türleri gibi değişken parametrelerin karışımların taze ve sertleşmiş haldeki özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Farklı puzolan ve kireç kullanılarak dokuz adet karışım üretilmiş ve bir adet de sadece normal Portland çimentosu içeren referans karışım hazırlanmıştır. Tüm karışımlarda puzolan kireç oranı 1:1 dir. Bu karışımlara hidratasyon ısı artışı, çökme, taze ve fırın kurusu birim ağırlık, dinamik elastisite modülü, basınç, yarmada çekme ve eğilme dayanımı testleri yapılmıştır. Sonuçta, basınç dayanımı açısından silis dumanı-kireç ve silis dumanı-uçucu kül-kireç karışımlarının yapısal beton üretimi için uygun oldukları kanıtlanmış olup 28 günlük kür sonunda 22 MPa'dan daha yüksek bir değere ulaşmıştır.

Brzyski (2018) yaptığı çalışmada sönmüş kirecin kısmi ikamesi olarak farklı miktarda kullanılan metakaolin, silis dumanı ve doğal zeolit gibi puzolanik katkı maddelerinin kireç harcının fiziksel ve mekanik özellikleri üzerindeki etkisinin analizini sunmaktadır. Ayrıca bu puzolanik malzemelerin taze harç karışımının kıvamı üzerindeki etkisi de incelenmektedir. Bu çalışmada farklı puzolan ve kireç kullanılarak dokuz adet ve bir adet de puzolan ilave edilmeden bağlayıcı olarak sadece sönmüş kireç kullanılarak referans karışımı hazırlanmıştır. Karışımlarda agrega olarak silis kumu kullanılmıştır. Karışımların hepsinde bağlayıcı-kum-su oranları 1:3:0,8'dir. Bu makalede yapılan testlerle kıvam, eğilme ve basınç dayanımı, ağırlıkça su emme ve su emme katsayıları belirlenmiştir. Sonuç olarak puzolanların eklenmesi, kireç harçlarının dayanımını arttıran hidrolik bileşenlerin oluşmasına neden olmuştur. Özellikle sönmüş kireç yerine %30 metakaolin ve %30 silis dumanı ikameli kireç harcı numunelerinin basınç dayanımlarında sırasıyla 9,40 MPa ve 9,23 MPa ile en yüksek değerler elde edilmiştir. Kireç harçlarına puzolan eklenmesi harçların kütlece su emmesinde ve su emme katsayılarında azalmaya neden olmuştur. Taze harcın kıvamı puzolan miktarına bağlı olup puzolan miktarı arttıkça akıcılığın arttığı tespit edilmiştir.

Yang ve diğ. (2012) tarafından yapılan çalışmada, Ca(OH)_2 bazlı alkali ile aktive edilmiş öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu (YFC) harçlarının uygulanabilirliğini geliştirmek amacıyla farklı yardımcı aktivatörlerin (Na_2SiO_3 ve Na_2CO_3) ve farklı kür koşullarının (hava ile kür ve su ile kür) hidratasyon ürünleri ve basınç dayanımı üzerindeki etkileri incelemiştir. Çalışma kapsamında, hidratasyon ürünlerini ve basınç dayanımı gelişimini incelemek için farklı yardımcı aktivatörler ve kür koşullarına sahip 3 adet hamur karışımı, su/bağlayıcı oranının etkilerini görmek için 9 adet harç karışımı ve ince agrega/bağlayıcı oranının dayanım gelişimine etkisini görmek için ise 12 adet harç karışımı hazırlanmıştır. Üretilen numuneler üzerinde SEM, XRD, EDX analizleri ve basınç dayanımı testleri gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın sonuçlarına göre, kalsiyum silikat hidrat (CSH) jelleri, su ile kürlenmede hava ile kürlenmeye göre ve yardımcı aktivatörlü Ca(OH)_2 bazlı aktive edilmiş YFC'de yardımcı aktivatörsüz Ca(OH)_2 aktivasyonlu YFC'ye göre daha yoğun olduğu görülmüştür. Su ile kürlenlen harçlarda erken yaşlarda dayanım kazanımı düşükken, uzun vadede hava ile kürlenlen harçlardan daha yüksek dayanım kazanımına sahip olduğu bulunmuştur. Ayrıca aynı su/bağlayıcı oranında, Ca(OH)_2 ve Na_2SiO_3 ile aktive edilmiş YFC harçlarının, Ca(OH)_2 ve Na_2CO_3 ile aktive edilmiş harçlarına kıyasla 28 günlük basınç dayanımının daha yüksek olduğu sonucuna varılmıştır.

Wang ve diğ. (2024) bu çalışmada hibrit alkali aktivatörlerin (CaO ve Na_2SiO_3) granüle yüksek fırın cürufu ve kükürt atığı kullanılarak hazırlanan sülfür atığı bazlı geopolimerin (STBG) dayanım gelişimine ve polimerizasyon reaksiyon mekanizması üzerindeki etkisini incelemişler ve düşük maliyetli, verimli bir aktivatör keşfetmeyi amaçlamışlardır. Farklı $\text{CaO}/(\text{CaO}+\text{Na}_2\text{SiO}_3)$ kütlece oranının STBG'nin performansına etkisi araştırılmıştır. Üretilen numuneler üzerinde XRD, FTIR, TG-DTG, SEM, MIP ve basınç dayanımı testleri yapılmıştır. Sonuç olarak hibrit aktivatörlerdeki CaO içeriğinin STBG'nin erken dayanımını arttırabildiği ve daha fazla geopolimerizasyon jel ürünlerinin oluşumunu sağladığı bulunmuştur. CaO oranı %10 olduğunda 32,2 MPa ile en yüksek basınç dayanımına sahip STBG elde edildiği görülmüştür.

Jeon ve diğ. (2015) tarafından yapılan bu çalışmanın amacı, kalsiyum hidroksit (Ca(OH)_2) ile aktive edilen uçucu kül bağlayıcısının dayanım kazanımı ve mikroyapısal gelişimi üzerinde Sodyum karbonat (Na_2CO_3) katkısının potansiyel iyileştirici etkisini incelemektir. Bu amaçla, hem Ca(OH)_2 ile aktive edilmiş uçucu kül macunu (CF) hem de içerisinde Na_2CO_3 bulunan Ca(OH)_2 ile aktive edilmiş uçucu kül macunu (CNF) karışımları hazırlanmıştır. Ayrıca Na_2CO_3 'ün Na ve Ca bazlı aktivatörlerin üzerindeki etkisini incelemek için de bir adet NaOH ile aktive edilmiş uçucu kül macunu (NF) bir adet de

içerisinde Na_2CO_3 bulunan NaOH ile aktive edilmiş uçucu kül macunu (NNF) karışımları hazırlanmıştır. Bu çalışmada basınç dayanımı testi yapılmıştır. Sonuçlar, NaOH ile aktive edilen numunelerin ilk 3 gün içerisinde neredeyse hiç dayanım kazanmadığını, buna karşılık $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ile aktive edilen örneklerde daha yüksek dayanımlar elde edildiğini göstermektedir. CNF numunesini 28 günlük basınç dayanımı 36 MPa ölçülürken, CF numunesi yalnızca 8,3 MPa dayanımı göstermiştir. Özellikle $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ile birlikte az miktarda Na_2CO_3 eklenmesi (CNF numunesi), erken yaşlarda yüksek alkalinite sağlayarak uçucu külün çözünürlüğünü artırmış ve 7. ile 28. günlerde CF numunesine göre 4–5 kat daha yüksek dayanım gelişimi sağlarken, buna karşın Na_2CO_3 , NaOH ile aktive edilen karışımlarda benzer bir iyileştirici etki göstermemiştir.

Lv ve diğ. (2021) yaptıkları bu çalışmada uçucu kül bazlı geopolimer betonun dayanımı ve mikro yapısı üzerinde alkali aktivatör olan sodyum silikatin modül değeri ($\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$) ve dozajının etkisini incelemeyi amaçlamışlardır. Bu amaçla, uçucu kül miktarı sabit tutularak farklı modül değerlerine (1.5, 2.1, 2.7, 3.,3) ve farklı sodyum silikat dozajlarına (%5, %10, %15, %20) sahip 16 adet macun karışımları hazırlanmıştır. Karışımlardan üretilen numuneler üzerinde serbet basınç dayanımı testi, SEM, EDX, XRD ve FTIR analizleri yapılmıştır. Sonuç olarak, sodyum silikatin modül değerinin azaltılması ve dozajının artırılmasının mikro yapıyı iyileştirdiği ve basınç dayanımını arttırdığı bulunmuştur. Ayrıca modül değeri azaldıkça ve dozaj arttıkça uçucu külün çözünme hızında bir artış olduğu gözlemlenmiştir. Reaksiyonlar sonucu oluşan ana ürünün ise sodyum silika hidrat (N-A-S-H) jellerinin olduğu tespit edilmiştir.

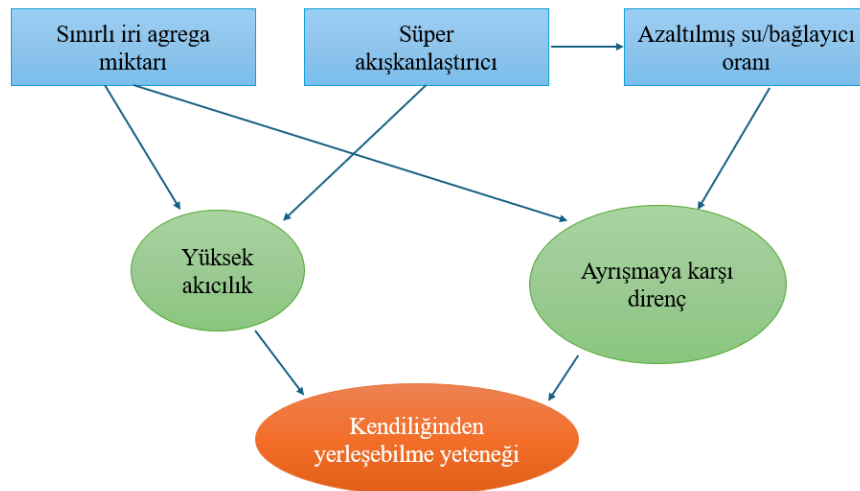
2.3 Kendiliğinden Yerleşen Beton (KYB)

Kendiliğinden yerleşen beton (KYB), yüksek akışkanlık özelliği sayesinde herhangi bir mekanik vibrasyon uygulanmadan kendi ağırlığı ile kalıbı tamamen doldurabilen ve bu sırada ayrışmaya veya terlemeye uğramadan stabilitesini koruyabilen özel bir beton türüdür. İlk kez 1980’li yıllarda Japon araştırmacılar tarafından geliştirilmiş olan KYB, özellikle sık donatılı elemanlarda veya dar kesitli yapılarda yerleşme zorluğunu ortadan kaldırmasıyla öne çıkmaktadır (Okamura, 1997). KYB, geleneksel betona göre birçok avantaj sunmaktadır. Titreşim ihtiyacını ortadan kaldırması sayesinde hem işçilik hem de zaman tasarrufu sağlamakta, böylece inşaat süresini kısaltıp maliyetleri düşürmektedir. Gürültü kirliliğini azaltması, özellikle şehir içi uygulamalarda önemli bir avantaj oluşturmaktadır. Ayrıca, yoğun donatılı veya dar kesitli elemanların kolayca doldurulabilmesi ve çimento

hamuru ile agrega ve donatı arasındaki arayüz geçiş bölgesini iyileştirmesi sayesinde betonarme yapıların mekanik performansını artırırken, düşük geçirgenliği sayesinde de dayanıklılığı geliştirmektedir. Tüm bu özellikleriyle KYB, betonarme elemanlarda yüksek yapısal performans sağlamaktadır (Gesoglu ve diğ, 2009, Shi ve diğ, 2015).

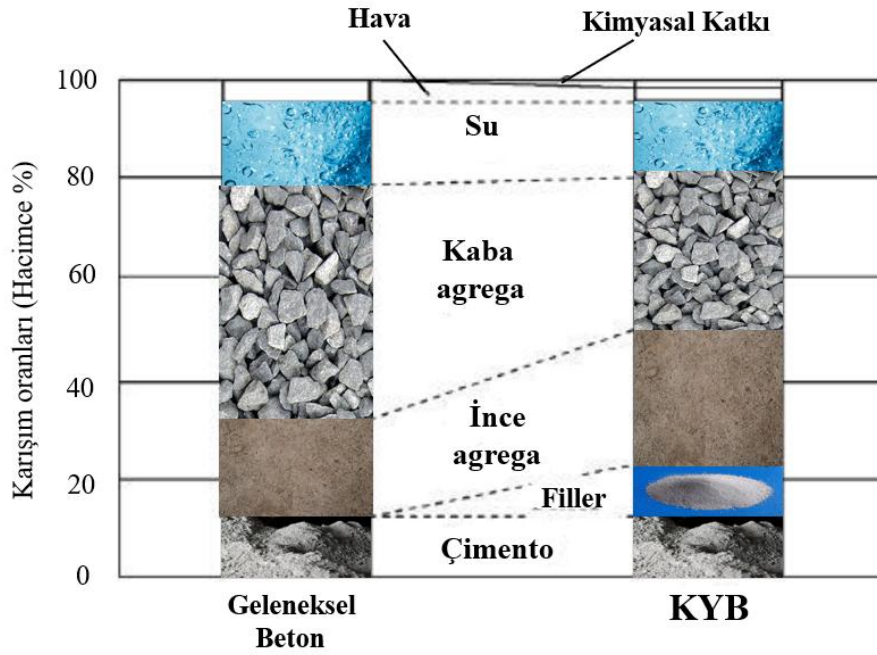
2.3.1 KYB karışım tasarımı

Kendiliğinden yerleşen betonun (KYB) başarılı bir şekilde tasarlanabilmesi için dikkate alınması gereken bazı temel kriterler bulunmaktadır. Bu kriterler, betonun kalıba kolayca yerleşebilmesi (doldurma yeteneği), segregasyona karşı dayanıklılık göstermesi ve dar boşluklar ve yoğun donatı aralıklarından sorunsuz bir şekilde geçiş yapabilmesidir. Bu özelliklerin sağlanabilmesi için bazı hususlara dikkat etmek gerekir. Öncelikle, segregasyon riskini minimize etmek ve karışımın yeterli akıcılık göstermesini sağlamak amacıyla, beton karışımında iri agrega miktarı sınırlı tutulmalı ve maksimum agrega tane çapı düşük seçilmelidir. Bu sayede hem agregalar arasındaki çarpışmalar azaltılır hem de dar kalıp boşlukları ve yoğun donatılı bölgelerden geçiş kolaylaşır. Akıcılık ve viskozite dengesinin korunabilmesi için de puzolanik özellik taşıyan veya mineral katkıları kullanılarak bağlayıcı miktarı artırılmalıdır; bu uygulama, karışımın homojenliğini ve doldurma yeteneğini güçlendirmektedir. Ayrıca, betonun akma gerilmesini düşürmek ve böylece kendiliğinden yerleşme performansını iyileştirmek için uygun tip ve dozajda süperakışkanlaştırıcı katkı malzemeleri karışıma dahil edilmelidir (Topçu ve diğ, 2008; Gürdal ve Yüceer, 2004; Okamura ve Ozawa, 1995). Şekil 2.4’de verilen diyagramda, KYB’nin hedeflenen özellikleri sergileyebilmesi için karışım bileşenlerinin uyumlu ve dengeli bir şekilde düzenlenmesi gerektiği gösterilmektedir.



Şekil 2.4: KYB tasarımının elde edilmesi için temel yöntem (Okamura ve Ozawa, 1995)

Şekil 2.5’de görüldüğü üzere KYB’nin bileşenleri, temelde geleneksel betondakilerle benzerlik gösterse de karışımın tasarımında bazı farklılıklar bulunmaktadır. Bu farklılıklar arasında, iri agrega miktarının azaltılarak ince agrega oranının artırılması, karışıma yeterli kıvam ve stabilite kazandırmak amacıyla mikrofiller katkıların eklenmesi, su/bağlayıcı oranının düşük tutulması ve betonun akışkanlığını sağlamak için yüksek oranda süperakışkanlaştırıcı kullanılması sayılabilir.



Şekil 2.5 : KYB ile geleneksel betonun karışım oranlarının karşılaştırılması

Kendiliğinden yerleşen beton tasarımında, ince malzeme miktarı geleneksel betonlara kıyasla daha yüksektir. EFNARC (2005)’e göre toz malzeme kullanımı genellikle 380–600 kg/m³ aralığında olup, toz malzemenin 0.125 mm’den küçük olması ve 0.063 mm elekten geçen miktarın >70% olması önerilmektedir. Su/toz malzeme oranı hacimsel olarak 0.85–1.10 civarında tutulur. KYB’de çimento dışında silis dumanı, uçucu kül, yüksek fırın cürufu gibi mineral katkıları veya inert mikrofiller de toz malzeme olarak kullanılabilir. Karışımın ayrışma ve segregasyon direncini artırmak için hamur hacmi geleneksel betona göre daha fazladır ve tipik olarak %30–38 aralığında tutulur. Ayrıca, toplam agreganın %48–55’i kadar ince agrega kullanılması ve maksimum agrega tane boyutunun 10–20 mm arasında seçilmesi önerilmektedir. EFNARC (2005) tarafından önerilen karışım oranları Çizelge 2.1’de verilmiştir.

Çizelge 2.1: EFNARC tarafından tavsiye edilen karışım oranları

Bileşenler	Tipik ağırlık oranları (kg/m ³)	Tipik Hacimsel Oranları (litre/m ³)
Toz malzeme	380-600	-
Çimento hamuru	-	300-380
Su	150-210	150-210
Kaba agregası	750-1000	270-360
İnce agregası	Genel olarak toplam agregası ağırlığının %48-55'i	
Su/toz malzeme (hacimce)	-	0.85-1.10

2.3.2 İşlenebilirlik testleri

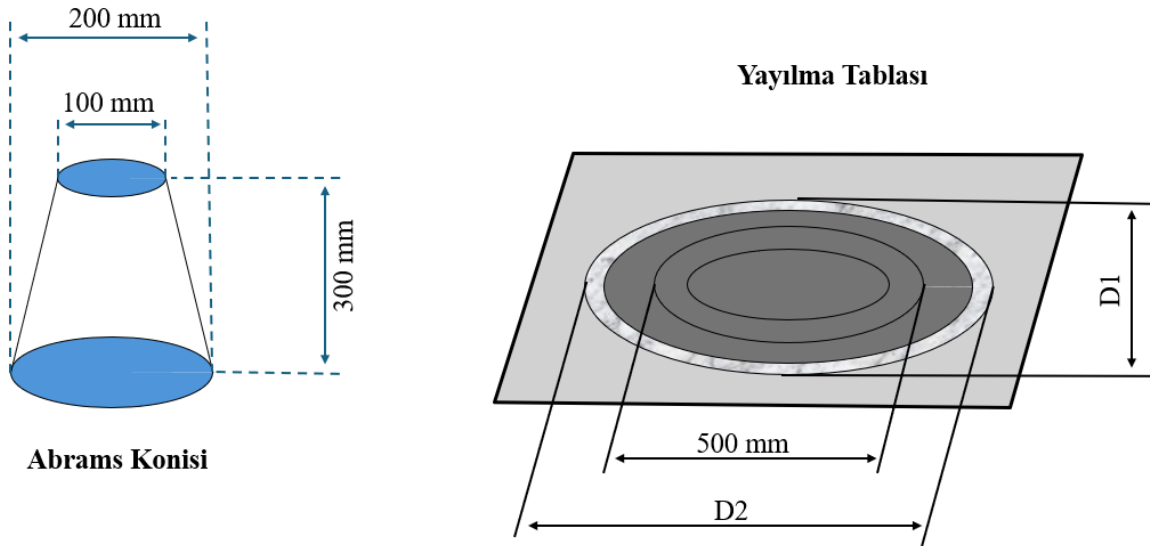
Kendiliğinden yerleşen betonun (KYB) taze hal performansını değerlendirmek için çeşitli deney yöntemleri geliştirilmiştir. Bu deneyler, betonun akıcılığını, kalıpları tam olarak doldurma yeteneğini, donatıların arasından rahatça geçişini ve ayrışmaya karşı direncini ölçmeyi amaçlamaktadır. EFNARC (2005) tarafından önerilen standartlara göre çökme-yayılma, T₅₀₀, J-halkası, V-hunisi, L-kutusu ve U-kutusu testleri KYB'nin işlenebilirlik özelliklerini tanımlamak için yaygın şekilde kullanılmaktadır (Çizelge 2.2).

Çizelge 2.2: EFNARC (2005) tarafından önerilen işlenebilirlik testleri ve belirlenen parametreler

Test Yöntemi	Karakteristik Özellikleri
Çökme-Yayılma	Doldurma yeteneği, akıcılık
T ₅₀₀ akma süresi	Vizkozite, akıcılık
L-kutusu	Geçiş kabiliyeti
V-hunisi	Vizkozite, akıcılık
J-halkası	Doldurma yeteneği, geçiş kabiliyeti
U-kutusu	Geçiş kabiliyeti

2.3.2.1 Çökme-yayılma ve T₅₀₀ deneyi

Çökme-yayılma deneyi, kendiliğinden yerleşen betonun taze haldeki akışkanlık özelliklerini belirlemek amacıyla kullanılan deney yöntemlerinden biridir. Bu deney sayesinde betonun herhangi bir vibrasyon veya dış etki olmaksızın kendi ağırlığıyla yayılabilme ve kalıbı doldurabilme kapasitesi belirlenmektedir. Ayrıca deney sırasında karışımın 500 mm çapına ulaşması için geçen sürenin ölçülmesiyle bulunan T₅₀₀ süresi sayesinde de betonun akış hızı ve viskozitesi belirlenerek, karışımın hem akıcılığı hem de stabilitesi hakkında önemli veriler elde edilmektedir. Böylece çökme-yayılma ve T₅₀₀ deneyleri birlikte değerlendirilerek KYB'nin akıcılık, doldurma kabiliyeti ve viskozite özellikleri hakkında kapsamlı bilgi edinilir.



Şekil 2.6: Çökme-yayılma ve T₅₀₀ test düzeneği

Deneyde kullanılan aparatlar Şekil 2.6'da görüldüğü gibi bir adet Abrams konisi ve 900x900 mm boyutlarındaki çelik tabladan oluşmaktadır. Alt çapı 200 mm, üst çapı 100 mm ve yüksekliği 300 mm olan bu Abrams konisi tabla üzerine yerleştirilir ve taze haldeki KYB karışımı herhangi bir sıkıştırma işlemi uygulanmadan koni tamamen dolacak şekilde yerleştirilir. Ardından koni doldurulduktan 30 sn içerisinde dik bir şekilde yukarı doğru kaldırılır ve KYB karışımının yayılması sağlanır. Sonrasında koninin kaldırıldığı an ile yayılmanın 500 mm'ye ulaştığı an arasında geçen süre ölçülür ve T₅₀₀ süresi olarak kaydedilir. EFNARC (2005) tarafından önerilen T₅₀₀ sınır değerleri 2-5 sn'dir. Bu sürenin kısa olması betonun aşırı akışkan olduğunu, sürenin uzun olması ise betonun viskozitesinin yüksek ve akıcılığının az olduğunu gösterir. Taze KYB karışımının yayılma işlemi tamamen

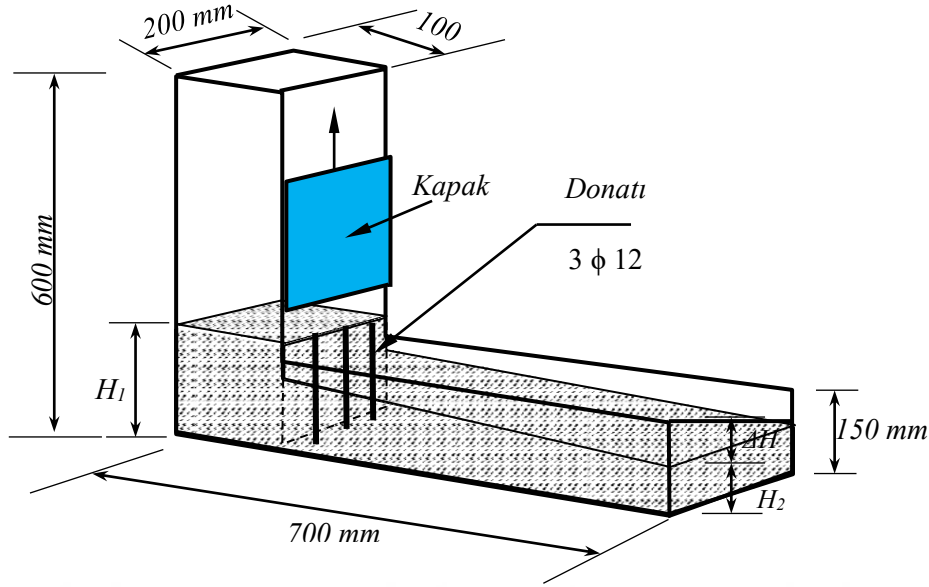
bittikten sonra birbirine dik iki yöndeki D1 ve D2 çapları ölçülüp ortalaması alınarak KYB karışımın yayılma çapı belirlenmiş olur. EFNARC (2005) komitesi çökme-yayılma çaplarına göre KYB karışımlarını 3 ayrı kategoriye ayırmış olup bu kategoriler Çizelge 2.3’de verilmiştir.

Çizelge 2.3: EFNARC (2005)’e göre yayılma çapı sınıfları

KYB Sınıfı	Yayılma Çapı (mm)
SF1	550-650
SF2	660-750
SF3	760-850

2.3.2.2 L-kutusu deneyi

L-kutusu deneyi, kendiliğinden yerleşen betonun (KYB) donatıların arasından geçme kabiliyetini ölçmek için yapılan bir deneydir. Şekil 2.7’de görülen L kutusu, düşey ve yatayda iki hazneden oluşup bu iki hazne arasında gerçek donatı düzeneğini temsil eden demir donatı engelleri bulunmaktadır. Bu hazneler arasındaki geçişi kapatmak için donatıların tam arkasında bir adet sürgülü kapak bulunmaktadır. Deney başlamadan önce bu sürgülü kapak kapatılıp düşeydeki haznenin içerisi taze haldeki KYB karışımı ile doldurulur ve bu işlemin ardında 60 ± 10 sn bekledikten sonra sürgülü kapak açılarak taze betonun donatılar arasından yatayda bulunan hazneye tamamen geçmesi beklenir. Geçme işleminin tamamlanmasının ardından yataydaki haznenin uç kısmındaki beton yüksekliği (H_2) ve düşeydeki hazne içerisindeki betonun yüksekliği (H_1) ölçülür ve H_2/H_1 oranı kaydedilir.



Şekil 2.7: L-kutusu test düzeneği (EFNARC (2005))

2.3.3 Kendiliğinden yerleşen geopolimer beton (KYGB) ile ilgili çalışmalar

Literatürde kendiliğinden yerleşen geopolimer beton (KYGB) ile ilgili bazı çalışmalar mevcuttur. Bunlardan bir tanesi de Patel ve Shah (2018) tarafından yapılan çalışmadır. Bu deneysel çalışmada, yüksek fırın cürufu (YFC) kullanılarak hazırlanan kendiliğinden yerleşen geopolimer beton (KYGB) üzerinde %5, 15 ve 25 oranlarında pirinç kabuğu külünün (RHA) ikamesinin etkisi araştırılmıştır. Hazırlanan karışımlar üzerinde işlenebilirlik testleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca üretilen numuneler hem ortam kürüne hem de sıcak küre maruz bırakılarak bu kür yöntemlerinin numunelerin mekanik dayanımlarına etkisi incelenmiştir. Sonuçta, YFC yerine RHA'nın ikame edilmesi işlenebilirliği azalttığı bulunmuştur. En iyi işlenebilirlik sonuçları %100 YFC ve %5 RHA içeren karışımlarda elde edilirken, en kötü işlenebilirlik sonuçları ise %25 RHA içeren karışımlarda elde edilmiştir. Ortam sıcaklığında kürlen numunelerde %5'e kadar RHA'nın ikame edilmesi, sıcaklıkla kürlen numunelerde ise %15'e kadar RHA'nın ikame edilmesi YFC'li KYGB'nin mekanik özelliklerinde iyileşme sağlamıştır.

Memon ve diğ. (2013) yaptıkları çalışmada, uçucu kül esaslı kendiliğinden yerleşen geopolimer betonda (KYGB) uçucu kül yerine ağırlıkça %5, %15 ve %20 oranlarında silis dumanının ikame edilmesinin KYGB üzerindeki etkisi incelenmiştir. Üretilen karışımlar üzerinde taze (çökme-yayılma, V-hunisi ve L-kutusu) ve sertleşmiş beton (basınç, yarmada çekme ve eğilme dayanımı) testleri gerçekleştirilmiştir. Sonuçlardan elde edilen bulgulara

göre, uçucu kül yerine silis dumanının ikame edilmesi işlenebilirliğin azalmasına neden olmuştur. KYGB'nun sertleşmiş beton özelliklerinde (basınç, yarmada çekme ve eğilme dayanımı) uçucu kül yerine %10'a kadar silis dumanının ikame edildiği karışımlarda iyileşme görülürken, %10'dan fazla silis dumanının ikame edilmesinin sertleşmiş beton özelliklerini olumsuz etkilediği tespit edilmiştir.

Das ve diğ. (2024) tarafından yapılan çalışmada, farklı tip (polikarboksilat esaslı, naftalin esaslı ve lignodülfanat esaslı) ve farklı oranlarda (%4, %6 ve %8) kullanılan süperakışkanlaştırıcının yüksek fırın cürufu (YFC) esaslı kendiliğinden yerleşen geopolimer beton (KYGB) üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Hazırlanan karışımlar üzerinde taze beton özelliklerini belirlemek için işlenebilirlik testleri gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak, bütün tip süperakışkanlaştırıcılar için de kullanılan dozajın arttırılmasıyla KYGB'nin akışkanlık özelliğini arttırdığı görülmüştür. Herhangi bir çeşit süperakışkanlaştırıcının %4 oranında kullanıldığı KYGB'ların tam uygulanabilir olmadığı görülmüştür. En iyi işlenebilirlik sonucu, %6 oranında kullanılan naftalin esaslı süperakışkanlaştırıcının olduğu YFC esaslı KYGB karışımlarında elde edilmiştir.

Pradhan ve diğ. (2022) tarafından yürütülen deneysel programda, doğal iri agrega (DİA) ve geri dönüştürülmüş iri agrega (GDİA) kullanılarak üretilen yüksek fırın cüruf (YFC) esaslı kendiliğinden yerleşen geopolimer betonun (KYGB) taze ve sertleşmiş beton özellikleri araştırılmıştır. Bu taze ve sertleşmiş beton özellikleri üzerinde sodyum silikat molaritesinin (10M, 12M, 14M) ve alkali aktive edilmiş çözeltili (AAÇ) oranının (2, 2.5, 3) etkisini incelemişlerdir. Yapılan deneyler sonucunda elde edilen bulgulara göre, tüm molarite ve AAÇ oranlarında, DİA yerine GDİA kullanımının KYGB'nun taze beton özelliklerini olumsuz etkilediği belirlenmiştir. Ayrıca hem molarite hem de AAÇ oranının artması DİA ve GDİA içeren kendiliğinden yerleşen geopolimer betonlarda çökme-yayılma değerlerinde azalmaya neden olmuştur. Sertleşmiş beton özellikleri açısından ise, molarite ve AAÇ oranındaki artışın basınç ve yarmada çekme dayanımlarını artırdığı; ancak DİA yerine GDİA kullanımının bu dayanımlarda azalmaya yol açtığı sonucuna ulaşılmıştır.

Luo ve diğ. (2023) yaptıkları çalışmada farklı miktarda kullanılan uçucu kül (UK), metakaolin (MK) ve yüksek fırın cürufunun (YFC) kendiliğinden yerleşen geopolimer betonun taze ve sertleşmiş beton özellikleri üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Yapılan taze beton deneyleri sonucunda, MK ve YFC kullanımının UK'ye kıyasla betonun akıcılığını azalttığı, ayrıca MK'nın akıcılığı YFC'den daha olumsuz etkilediği belirlenmiştir. Sertleşmiş beton özellikleri açısından ise, mekanik performansı artırmada en başarılı

bağlayıcının YFC olduğu, bunu MK'nın takip ettiği görülmüştür. UK'nin ise mekanik özelliklerin iyileştirilmesinde sınırlı etkiye sahip olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

2.4 Donatının Aderans Dayanımı

Betonarmenin varlığını borçlu olduğu ve yapıların temelini oluşturan en kritik unsur beton ve donatı arasındaki aderanstır. Aderans, donatının betona kenetlenmesini sağlayarak iki malzemenin birlikte çalışmasına olanak tanır. Donatı ile onu çevreleyen beton arasındaki kuvvet aktarımı, kimyasal yapışma, yüzey sürtünmesi ve mekanik kenetlenme mekanizmalarıyla gerçekleşmektedir (Li ve diğ, 2022). Yeterli aderansın sağlanamadığı durumlarda donatı ile beton arasındaki kuvvet aktarımı zayıflar, bu da çatlakların ilerlemesine, kesitlerin göçmesine ve yapının bütünlüğünün bozulmasına yol açabilir. Dolayısıyla aderans, betonarmenin yalnızca dayanımını değil, aynı zamanda güvenliğini ve uzun ömürlülüğünü de doğrudan belirleyen temel bir mekanizmadır (Bayrak ve diğ, 2024). Bu bağlamda, beton ve donatı arasındaki bağlanma mekanizmasını etkileyen tüm etkenlerin incelenmesi bilimsel açıdan önem taşımaktadır. Azaltılmış su içeriğine sahip beton ve çekme donatısı arasındaki aderans dayanımının araştırıldığı bir çalışmada (Türk ve diğ, 2004), donatı çapının ve yükleme koşullarının beton ile çekme donatısı arasındaki aderans dayanımına etkisini incelemişlerdir. Farklı çaplarda (12, 16 ve 22 mm) donatı kullanılarak yirmi yedi adet kiriş numunesi hazırlanmış olup bu numuneler üzerinde dört noktalı eğilme testi gerçekleştirilmiştir. Yapılan deney sonucunda, donatı çapının azalmasının aderans dayanımını ve sünekliği arttırdığı görülmüştür. Türk ve Başsürücü (2021) tarafından yapılan bir çalışmada ise farklı lif tipi ve kombinasyonlarının aderans dayanımına etkisini incelemek için lifsiz, tek lifli (%1 makro çelik lif) ve karma lifli (%0,8 makro ve %0,2 mikro çelik lif) tam ölçekli betonarme kiriş deney numuneleri dört noktalı eğilme altında test edilmiştir. Sonuçta, lif takviyeli kiriş numunelerinin aderans dayanımının lif takviyesiz numunelerden daha yüksek olduğu görülmüştür. Lif takviyesiz kontrol numunelerine kıyasla, tek lif takviyeli numunelerin aderans dayanımı %39, karma lif takviyeli kiriş numunelerinin aderans dayanımı ise %65 artış gösterdiği bulunmuştur. Cam elyaf takviyeli polimer (CETP) donatı ile beton arasındaki aderans dayanımının araştırıldığı bir deneysel çalışmada (Algın ve diğ, 2019), CETP donatı çapının (12, 14, 16 ve 18 mm), beton sınıfının (C20 ve C40) ve yüksek sıcaklığın (150 ve 250 °C) aderans dayanımına etkisi araştırılmıştır. Üretilen deney numuneleri üzerinde sıyrılma testleri gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak, CETP donatı çapının artmasının aderans dayanımını arttırdığı bulunmuştur. Bununla birlikte, beton basınç dayanımı arttıkça aderans dayanımının arttığı tespit edilmiştir. Beton ile CETP arasındaki

aderans dayanımının numunelerin maruz kaldığı sıcaklık değerinin artmasıyla azaldığı görülmüştür. Kına ve Türk (2021(a)) tarafından yapılan bir çalışmada tek ve hibrit çelik lif takviyeli kendiliğinden yerleşen beton (KYB) ile bindirmeli ekli donatı çubukları arasındaki aderans dayanımının kiriş numuneleri üzerinde deneysel olarak incelenmiştir. Bir adet sadece makro lif içeren, bir adet hem makro hem de mikro lif içeren ve bir adet de lif içermeyen KYB karışımları tasarlanmıştır. Tasarlanan her bir karışım için bindirmeli ekli donatı çubuklarına sahip iki adet büyük ölçekli kirişler hazırlanmıştır ve bu kirişler üzerinde dört noktalı eğilme testi yapılmıştır. Yapılan testler sonucunda, mikro ve makro çelik liflerin hibrit olarak kullanılması donatı çubukları ile beton arasında daha etkili bir aderans dayanımı sağladığı görülmüştür. Aderans dayanımlarındaki en yüksek artış, lifsiz KYB numunelerine kıyasla %41,5 ile hibrit lif takviyeli KYB kirişlerde ve daha sonra %39 ile sadece makro çelik lif takviyeli KYB kirişlerde görülmüştür. Kına ve Türk (2021(b)) tarafından yapılan diğer bir çalışmada ise tek lif ile ikili, üçlü ve dörtlü lif hibridizasyonlu kendiliğinden yerleşen beton (KYB) ile bindirmeli ekli donatı çubukları arasındaki aderans dayanımının büyük ölçekli kiriş numuneleri üzerinde deneysel olarak incelenmesi amaçlanmıştır. Farklı tür (çelik ve PVA), boyut (makro ve mikro) ve lif hibridizasyonu (ikili, üçlü ve dörtlü) incelenen parametreler olarak seçilmiştir. Bu çalışmada beş adet lif takviyeli KYB ve bir adet de lif içermeyen kontrol KYB karışımı hazırlanmıştır. Her karışım için bindirmeli ekli donatı çubuklarına sahip iki adet büyük ölçekli kirişler hazırlanmış ve dört noktalı eğilme testine maruz bırakılmıştır. Sonuç olarak, lif içermeyen KYB kiriş numunelerine kıyasla, üçlü lif hibridizasyonuna sahip KYB kiriş numunelerinin aderans dayanımları %65,9 ile en yüksek artışı göstermiştir. Bunu PVA içeren ikili, 13 mm mikro çelik lif içeren ikili, sadece makro çelik lif içeren tekli ve dörtlü lif kombinasyonuna sahip numuneler izlemiştir. Kendiliğinden yerleşen betona (KYB) gömülü donatı çubuklarının aderans dayanımı ile geleneksel vibrasyonlu betonun (GVB) aderans dayanımı karşılaştırıldığı bir deneysel programda (Desnerck ve diğ., 2010), beton tipi (GVB ve KYB), su/çimento oranı ve donatı çubuğunun çapı (12, 20, 25, 32 ve 40 mm) değişken parametreler olarak seçilmiştir. Bu çalışmada aderans dayanımının belirlenmesi RILEM’de tanımlandığı gibi standart kiriş testi kullanılmıştır. Sonuçta, küçük çaplı donatılar kullanılarak gerçekleştirilen deneylerde KYB’nin donatı ile olan aderans dayanımının GVB’nin aderans dayanımından daha yüksek olduğu görülmüştür. Bunun yanında, büyük çaplı donatılar kullanılarak gerçekleştirilen deneylerde aderans dayanımı farkının azaldığı sonucuna varılmıştır. Seara-Paz ve diğ. (2014) yaptıkları çalışmada çelik donatı çubuğu ile doğal agrega yerine farklı oranlarda (%20, %50 ve %100) geri dönüştürülmüş beton agregası kullanılarak üretilen beton

arasındaki aderans dayanımı incelenmiştir. Üretilen numuneler üzerinde farklı yaşlarda (7, 28, 90 ve 365 gün) çekip-çıkarma testleri yapılmıştır. yapılan testler sonucunda geri dönüştürülmüş kaba agregaya yüzdesinin artmasıyla 28 günlük aderans dayanımının azaldığı görülmüştür. 7 günden 28 güne kadar zamana bağlı aderans dayanımındaki gelişme incelendiğinde geri dönüştürülmüş agregalı betonlarda aderans dayanımlarında artış gözlenmiştir.

Betonarme sistemlerin güvenli ve etkin bir şekilde çalışabilmesi için beton ve çelik donatı arasındaki aderans dayanımının yeterli düzeyde olması gerekmektedir. Bu nedenle, geleneksel OPC betona alternatif olan geopolimer betonun aderans dayanımının araştırılması mühendislik açısından büyük öneme sahiptir (Sarker, 2011). Geopolimer beton (GPB) ve donatı arasındaki aderans dayanımının araştırıldığı bir çalışmada (Petcherdchoo ve diğ., 2020), kür süresinin aderans dayanımına etkisi incelenmiştir. Sonuçlar Portland çimentolu beton (PÇB) ile karşılaştırılmıştır. Hem 12 hem de 16 mm çaplarında nervürlü donatılı 24 adet PÇB ve 24 adet GPB numuneleri, 28 ve 56 gün kür edildikten sonra aderans dayanımını ölçmek için çekip-çıkarma testlerine maruz bırakılmıştır. Sonuçta, küçük çaplı donatı içeren PÇB'nin aderans dayanımı, kür süresi artışına daha duyarlı iken yüksek basınç dayanımına sahip PÇB'nin donatı ile olan aderans dayanımının kür süresinin artışına daha az duyarlı olduğu görülmüştür. Yüksek basınç dayanımına sahip GPB'nin aderans dayanımına gelince, donatı ile olan aderans dayanımının kür süresinin artışına daha duyarlı olduğu belirlenmiştir. Bunun yanında, küçük çaplı donatı kullanılması durumunda GPB ile olan aderans dayanımının kür süresinin artışına daha az duyarlı olduğu bulunmuştur. Bilek ve diğ. (2017) tarafından yapılan bir çalışmada donatı çeliği ile üç tip beton (Portland çimentosu esaslı beton, alkali ile aktifleştirilmiş beton, cüruf ve Portland çimentosu içeren alkali ile aktifleştirilmiş beton) arasındaki aderans dayanımı incelenmiştir. Her beton türü için numuneler hazırlanmış ve numuneler üzerinde aderans dayanımını ölçmek için çekip-çıkarma testleri yapılmıştır. Yapılan testler sonucunda, alkali ile aktifleştirilmiş beton ile Portland çimentolu betonun donatı aderans dayanımlarında önemli bir fark olmadığı bulunmuştur. Bunun yanında, cüruf ve Portland çimentosu içeren alkali ile aktifleştirilmiş beton ile donatı arasındaki aderans dayanımının diğer beton türlerine göre çok daha düşük olduğu görülmüştür. Farklı oranlarda (%10, %20 ve %30) cüruf ikamesinin düşük kalsiyumlu uçucu kül bazlı polivinil alkol (PVA) lif takviyeli tasarlanmış geopolimer kompozitin (EGC) mekanik özellikleri ve aderans dayanımına etkisinin araştırıldığı bir deneysel programda (Ling ve diğ., 2019), %0, %10, %20 ve %30 cüruf içeren dört adet uçucu

kül bazlı EGC karışımları hazırlanmıştır. Daha sonra, düz yüzeyli donatı çeliği ile uçucu kül bazlı EGC arasındaki aderans dayanımını ölçmek için çekip-çıkarma testleri yapılmıştır. Sonuçta, cüruf ikameli tüm EGC karışımlarının donatı ile olan aderans dayanımının, cüruf içermeyen karışımlara göre daha yüksek olduğu bulunmuştur. En iyi donatı aderans dayanımının %20 cüruf ikameli karışımlarda elde edildiği görülmüştür. Al-Azzawi ve diğ. (2018) tarafından yürütülen diğer bir çalışmada ise, uçucu kül bazlı geopolimer betondaki (UKBGB) farklı uçucu kül kaynaklarının (Eraring, Mt-Piper, Bayswater, Gladstone ve Collie Avustralya uçucu külleri), uçucu kül miktarının (300, 400 ve 500 kg/m³) ve farklı alkali aktivatör oranının (1.5, 2.0 ve 2.5 oranında Na₂SiO₃/NaOH) UKBGB ile çelik donatı arasındaki aderans dayanımına etkisi incelenmiştir. Toplamda 45 adet numune hazırlanmıştır ve aderans dayanımlarını belirlemek için numuneler üzerinde çekip-çıkarma testleri yapılmıştır. Sonuç olarak, farklı uçucu kül kaynağının UKBGB ile çelik donatı arasındaki aderans dayanımını önemli ölçüde etkilediği görülmüştür. Eraring uçucu külü kullanılarak üretilen UKBGB'nin donatı çeliği ile arasındaki aderans dayanımı en yüksek iken, Bayswater uçucu külünün kullanıldığı UKBGB ile çelik donatı arasındaki aderans dayanımının en düşük olduğu görülmüştür. UKBGB karışımlarındaki uçucu kül miktarının 300'den 500 kg/m³'e çıkartılması aderans dayanımını %16 ila %36 arasında arttırdığı tespit edilmiştir. Gladstone ve Collie uçucu külleri kullanıldığı ve Na₂SiO₃/NaOH oranının arttığı durumda UKBGB'nin donatı aderans dayanımında sırasıyla %13 ve %19 oranında azalma meydana geldiği belirlenirken, Eraring, Mt-Piper ve Bayswater uçucu külleri kullanılması durumunda aderans dayanımında %36'ya kadar artış olduğu bulunmuştur. Hem nervürlü hem de düz yüzeyli çelik donatı çubuklar ile geopolimer beton (%85.2 uçucu kül, %14.8 granüle yüksek fırın cürufu ve aktivatör olarak sodyum hidroksit ile sodyum oksit içeren sodyum silikattan oluşan) arasındaki aderans dayanımının farklı ısı kür koşulları altında, dökümünden sonraki 24 saat ile 28 gün arasındaki gelişimini incelendiği bir deneysel çalışmada (Castel ve Foster, 2015), üretilen numuneler üzerinde çekip-çıkarma testleri yapılmıştır. Elde edilen bulgular Portland çimentolu betonun performansı ile karşılaştırılmıştır. Sonuçta , 80 °C'de 48 saatlik ısı kürü durumunda geopolimer betonun Portland çimentolu betonla benzer performans sergilediği görülmüştür. Ayrıca, eşdeğer basınç dayanımlarında geopolimer betonun aderans dayanımının Portland çimentolu betonun aderans dayanımından daha iyi olduğu gözlemlenmiştir. Diğer taraftan, geopolimer betonun 48 saat 80 °C'de ısı kürleme süresindeki aderans dayanımı, Portland çimentolu betonun 28 gün sonraki aderans dayanımından daha üstün olduğu belirlenmiştir.

3. DENEYSEL ÇALIŞMA VE YÖNTEM

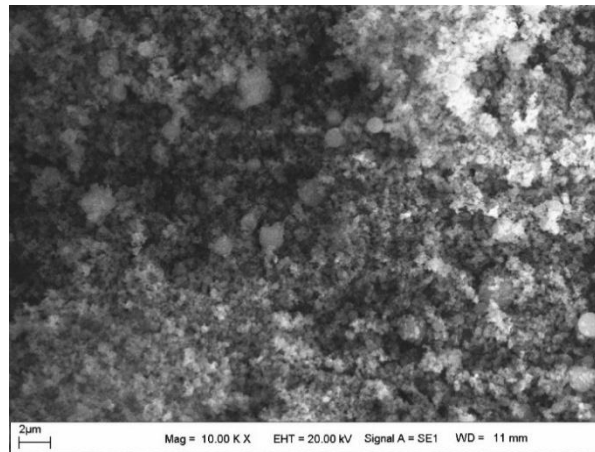
3.1 Malzemeler

3.1.1 Bağlayıcılar

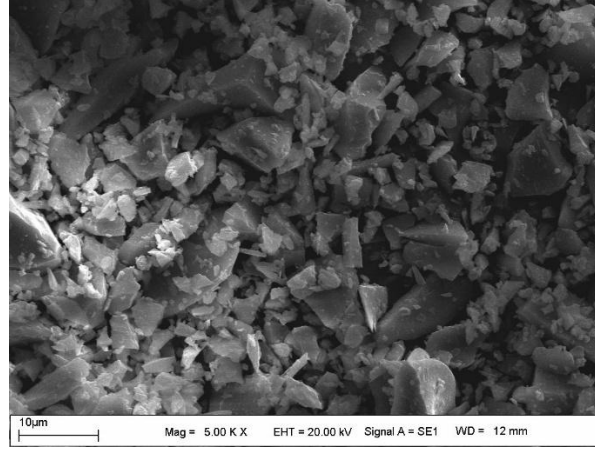
Tez çalışması kapsamında kullanılan çimento ve puzolanik özelliğe sahip malzemelerin kimyasal kompozisyonu ve fiziksel özellikleri Çizelge 3.1’de verilmiştir. Ayrıca Şekil 3.1’de bağlayıcılara ait SEM görüntüleri sunulmuştur.

Çizelge 3.1: Bağlayıcılara ait kimyasal ve fiziksel özellikler

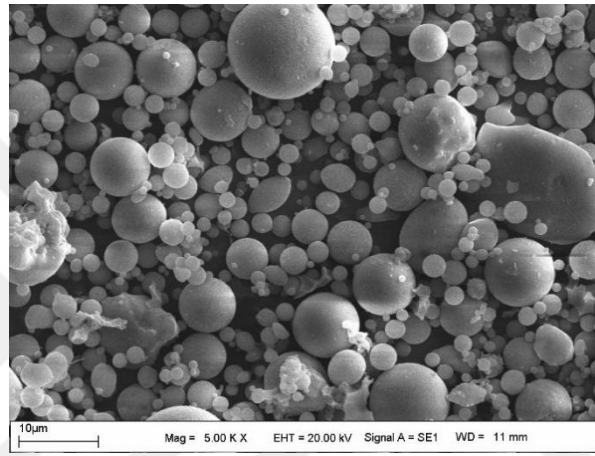
Bağlayıcı	SiO ₂ (%)	Al ₂ SiO ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	SO ₃ (%)	Na ₂ O (%)	K ₂ O (%)	Kızdırma kaybı (%)	Özgül yüzey alanı (cm ² /g)	Özgül ağırlık
Çimento	23.90	7.28	5.94	47.08	3.74	2.87	1.42	0.9	5.92	4295	2.97
Silis dumanı	96.20	-	0.78	-	1.2	0.13	-	1.69	1.81	18000	2.20
Yüksek fırın cürufu	32.37	10.00	1.33	32.94	9.77	0.7	0.42	0.83	-	4085	2.86
Uçucu kül	63.09	21.63	6.77	1.07	-	0.10	2.79	-	2.68	2900	2.30



a)



b)



c)

Şekil 3.1: Bağlayıcı malzemelerin SEM görüntüleri: a) SD, b) YFC, c) UK

3.1.1.1 Silis dumanı

Hibrit alkali aktivatör içeren çimentosuz KYB karışımların hazırlanmasında kullanılan silis dumanı ülkemizde faaliyet gösteren ve kimyasal malzemeler pazarlayan yerli bir firma aracılığıyla temin edilmiş olup kimyasal ve fiziksel özellikleri Çizelge 3.1’de sunulmuştur.

3.1.1.2 Yüksek fırın cürufu

Tez kapsamında yapılan deneysel çalışmalarda, bağlayıcı malzeme olarak silis dumanı yerine ikame edilen Karabük’te bulunan Karçimsa fabrikasına ait öğütülmüş yüksek fırın cürufu kullanılmıştır. Yüksek fırın cürufuna ait özellikler Çizelge 3.1’de verilmiştir.

3.1.1.3 Uçucu kül

Bazı karışımların hazırlanmasında, bağlayıcı malzeme olarak silis dumanı yerine ikame edilen puzolanik özellik taşıyan ve İskan Sugözü Termik Santrali’nden temin edilen

F sınıfı uçucu kül kullanılmıştır. Söz konusu uçucu küle ait özellikler Çizelge 3.1’de verilmiştir.

3.1.1.4 Çimento

Tez kapsamında yapılan Kontrol karışımında kullanılan CEM IV / B (P) 32.5 R – SR Puzolanik Çimento Elazığ SEZA-SYCS İnşaat ve Çimento A.Ş. tarafından temin edilmiştir. Çimentoya ait özellikler Çizelge 3.1’de sunulmuştur.

3.1.2 Aktivatörler

3.1.2.1 Sönmüş kireç

Tez çalışması kapsamında Kontrol karışımı dışındaki hazırlanan tüm karışımlarda aktivatörlerden biri olarak kullanılan CL80-S sönmüş kirece ait kimyasal kompozisyon ve fiziksel özellikler Çizelge 3.2’de verilmiştir.

Çizelge 3.2: Sönmüş kirece ait kimyasal ve fiziksel özellikler

Kimyasal Özellikler (%)	
SiO ₂	0.19
Al ₂ O ₃	0.14
Fe ₂ O ₃	0.11
CaO	72.4
MgO	1.4
SO ₃	0.12
Na ₂ O	0.03
K ₂ O	0.01
Kızdırma kaybı	25.6
Fiziksel Özellikler	
Özgül ağırlık	2.39

3.1.2.2 Sodyum Silikat

Deneyisel çalışma kapsamında Kontrol karışımı dışındaki tüm karışımların hazırlanmasında diğer bir aktivatör olarak kullanılan sodyum silikate ait özellikler Çizelge 3.3’de belirtilmiştir.

Çizelge 3.3: Sodyum silikate ait kimyasal ve fiziksel özellikler

Özellikler	Sodyum Silikat
Molekül formülü	Na ₂ SiO ₃
Görünüş	Renksiz sıvı
Yoğunluk (g/cm ³)	1.50
Baume, Bé (20 C°)	49.02

Na ₂ O (%)	13.9
SiO ₂ (%)	29.10
H ₂ O (%)	57
Modül	2.09

3.1.3 Geri dönüştürülmüş agrega

Tez çalışmasındaki tüm karışımlarda agrega olarak inşaat yıkıntı atıklarından geri dönüştürülmüş ince (0-5 mm) ve iri (5-12 mm) elek aralıkları kullanılmıştır. Bu geri dönüştürülmüş agregalar, 6 Şubat 2023 tarihinde meydana gelen Kahramanmaraş merkezli depremler sonrasında İnönü Üniversitesi Merkez Kampüsünde bulunan ve ağır hasar tespiti nedeniyle yıkılan binalardan Fen-Edebiyat Fakültesine ait olan bir binanın yıkıntı atıklarından elde edilmiştir (şekil 3.2.a). İnönü Üniversitesi İnşaat Mühendisliği laboratuvarı yanına getirilen büyük beton bloklar şekil 3.2.b’de görüldüğü üzere, öncelikle bir hidrolik beton kırıcı yardımıyla konkasörde kırılacak boyutlarda küçültülmüştür.



Şekil 3.2: a) İnşaat yıkıntı atıklarının alındığı yer, b) Beton blokların küçültülmesi, c) Küçültülen beton blokların konkasör şantiyesine taşınması

Daha sonrasında küçültülen beton bloklar Malatya Battalgazi Belediyesine ait olan Pütürge yolu üzerinde bulunan konkasör şantiyesine taşınıp (şekil 3.2.c) dane çapı 0-5 mm ve 5-12 mm olacak şekilde öğütülerek iki farklı agrega grubu elde edilmiştir (Şekil 3.3). Öğütme işlemi, küçültülen beton blokların konkasöre boşaltılarak (Şekil 3.3.a) daha küçük

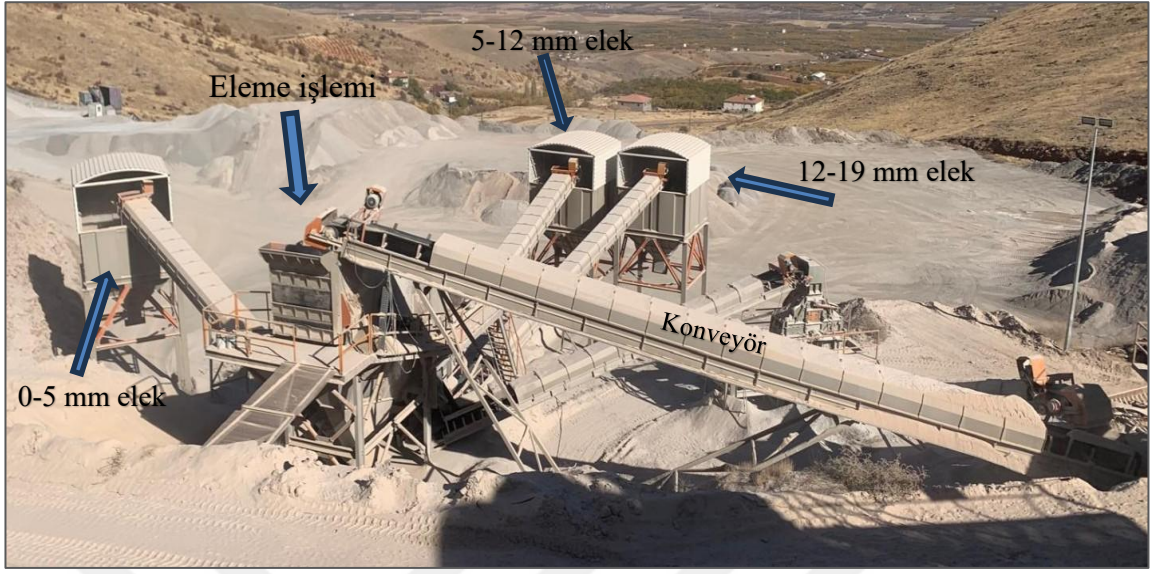
parçalara ayrılması (Şekil 3.3.b), daha sonra konveyörler yardımıyla son öğütme işleminin yapılacağı kısma taşınması ve son olarak öğütülen yıkıntı atığının farklı tane boyutlarına ayırtmak için yine konveyör yardımı ile eleme kısmına taşınarak 0-5 mm ve 5-12 mm olmak üzere iki farklı agrega gruba ayrılması (Şekil 3.3.c) şeklinde gerçekleştirilmiştir. Böylece elde edilen ve beton karışımlarında kullanılacak olan geri dönüştürülmüş agrega tekrar İnönü Üniversitesi İnşaat Mühendisliği laboratuvarı yanına taşınmıştır (Şekil 3.3.d).



a) Yıkıntı atığı beton blokların konkasöre boşaltılması



b) İnşaat yıkıntı atığının küçük parçalara ayrılması ve öğütülmesi



c) Öğütülen inşaat yıkıntı atığının eleme işlemiyle farklı elek sınıflarına ayrılması

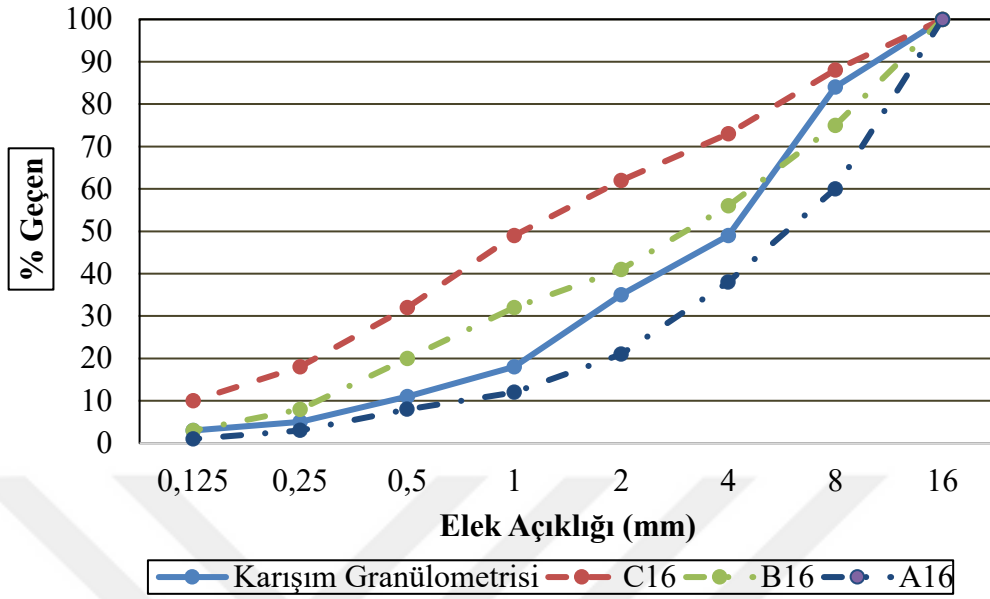


d) Geri dönüştürülmüş agreganın İnşaat Mühendisliği laboratuvarına getirilmesi

Şekil 3.3: Geri dönüştürülmüş agreganın elde edilmesi

Elde edilen geri dönüştürülmüş agregalar üzerinde özgül ağırlık, su emme ve elek analizi deneyleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda ince agreganın doygun yüzey kuru (DYK) özgül ağırlığı 2.38 gr/cm^3 ve su emme kapasitesi %10.53 olup incelik modülü 4.94 olarak bulunmuştur. 0,125 mm elekten geçen malzeme miktarı %3 olarak tespit edilmiştir. İri agreganın ise DYK özgül ağırlığı 2.51 gr/cm^3 ve su emme kapasitesi %3.93

olarak hesaplanmıştır. Elek analizi deneyi sonucu elde edilen karışım granülometri eğrisi ve ve TS 802’de tanımlanan sınır değerlerine ait eğriler Şekil 3.4’te gösterilmiştir.



Şekil 3.4: Agrega karışım granülometri eğrisi ve TS 802 sınır eğrileri

3.1.4 Kimyasal katkı

Tüm karışımlarda hem su/bağlayıcı oranını düşürmek hem de KYB işlenebilirlik kriterlerini sağlayabilmek için hiperakışkanlaştırıcı kullanılmıştır. TS EN 934-2 standardına uygun, yoğunluğu 1.06 g/cm³ olan ViscoCrete Hi-Tech 51 modifiye polikarboksilat esaslı hiperakışkanlaştırıcı, Sika Yapı Kimyasalları A.Ş. tarafından sağlanmıştır.

3.1.5 Karışım suyu

Tüm karışımlarda Malatya şehir şebeke suyu kullanılmıştır.

3.2 Karışımların Tasarımı

3.2.1 Karışım oranlarının belirlenmesi

Bu tez çalışması kapsamında, sönmüş kireç ve Na₂SiO₃ içeren alkali ile aktive edilmiş geri dönüştürülmüş agregalı çimentosuz KYB karışımlar, EFNARC (2005) tarafından tavsiye edilen SF2 (660-750 mm) çökme-yayılma değeri esas alınarak deneme-yayılma yöntemiyle belirlenmiştir. Donatı aderansının belirlenmesi amacıyla hazırlanacak olan büyük ölçekli kiriş elemanlarının üretiminde de kullanılacak olan hibrit alkali aktivatör

(Na_2SiO_3 ve SK) içeren bu karışımlarda, alkali aktivatörlerden biri olan sönmüş kireç miktarı tüm karışımlar için toplam bağlayıcının %67'si oranında sabit tutulmuş olup değişken parametre olarak; (i) $\text{Na}_2\text{SiO}_3/(\text{Na}_2\text{SiO}_3+\text{SK})$ 3 farklı oranda olmak üzere 3 seri karışım ve (ii) bağlayıcı bileşenler için toplam bağlayıcı miktarının en az %50'si oranında silis dumanının kullanıldığı 4 farklı karışım olmak üzere 12 karışım ve kontrol karışımı ile birlikte toplamda 13 karışım kullanılmıştır. Bu bağlamda, karışımlarda alkali aktivatörler olarak $\text{Na}_2\text{SiO}_3/(\text{Na}_2\text{SiO}_3+\text{SK})$ oranı 0.15, 0.20 ve 0.25 olup bağlayıcı olarak ise SD'nin toplam bağlayıcılara oranı 0.50, 0.75 ve 1 olacak şekilde SD'nin %100 kullanıldığı tekli (1SD), SD'nin %50 ve %75 olmak üzere iki farklı oranda YFC ile birlikte ikili harmanlama (0.50SD_0.50YFC ve 0.75SD_0.25YFC); SD'nin %75 oranında YFC ve UK ile birlikte üçlü harmanlama (0.75SD_0.125YFC_0.125UK) olarak tasarlanmıştır. Ayrıca, çimentosuz KYB karışımlarındaki değişken parametrelerin etkisini görebilmek ve karşılaştırma yapabilmek için geri dönüştürülmüş agrega içeren ve çimento ile uçucu külün bağlayıcı olarak kullanıldığı aktivatör içermeyen geleneksel KYB Kontrol karışımı tasarlanmıştır.

Tasarlanan karışımlarda kendiliğinden yerleşilebilirliği sağlamak amacıyla toz malzeme ($<0,125\text{mm}$) olarak SK, SD, YFC ve UK ile ince agrega miktarı mümkün olduğunca yüksek tutulmuştur. Karışımlarda toplam bağlayıcı miktarı 360 kg/m^3 , su/bağlayıcı ve su/toz malzeme oranları sırasıyla, yaklaşık olarak 0,78 ve 0,47 olup geri dönüştürülmüş ince ve iri agrega oranları ise sırasıyla, %70 ve %30 olarak belirlenmiştir. Ayrıca su/bağlayıcı oranı tüm karışımlar için sabit tutulduğundan dolayı benzer işlenebilirlik elde etmek için hiperakışkanlaştırıcı miktarı ayarlanmıştır. Tez çalışması kapsamında kullanılacak olan karışım oranları Çizelge 3.4'te verilmiştir. Karışımların etiketlendirmesinde bileşen malzemeler büyük harflerle ve karışıma hacimce katılma miktarları ise bileşen malzemenin sol tarafına rakamlarla gösterilmiştir. Örneğin; 0.67SK_0.75SD_0.125YFC_0.125UK_0.15N şeklinde isimlendirilen karışım, toplam bağlayıcının %67'si oranında sönmüş kireç, %75 oranında silis dumanı, %12,5 oranında yüksek fırın cürufu, %12.5 oranında uçucu kül ve 0.15N ise $\text{Na}_2\text{SiO}_3/(\text{Na}_2\text{SiO}_3+\text{SK})$ oranı %15 anlamına gelmektedir.

Çizelge 3.4: Kontrol ve Çimentosuz KYB karışım oranları (kg/m³)

Karışım Adı	Bağlayıcılar (kg/m ³)				Aktivatörler (kg/m ³)		Agrega (kg/m ³)		Su (kg/m ³)	HA* (kg/m ³)	S/B** (%)	S/TM*** (%)
	Silis Dumanı	Yüksek Fırın Cürufu	Uçucu Kül	Çimento	Sönmüş Kireç	Sodyum Silikat	(0-5) mm	(5-12) mm				
0.67SK_1SD_0.15N	360	-	-	-	241.2	42	597	256	350	15.5	0.78	0.47
0.67SK_0.75SD_0.25YFC_0.15N	270	90	-	-	241.2	42	618	265	350	12.5	0.78	0.47
0.67SK_0.50SD_0.50YFC_0.15N	180	180	-	-	241.2	42	638	273	350	10	0.78	0.47
0.67SK_0.75SD_0.125YFC_0.125UK_0.15N	270	45	45	-	241.2	42	613	263	350	11.5	0.78	0.47
0.67SK_1SD_0.20N	360	-	-	-	241.2	60	563	241	350	24	0.78	0.47
0.67SK_0.75SD_0.25YFC_0.20N	270	90	-	-	241.2	60	588	252	350	18	0.78	0.47
0.67SK_0.50SD_0.50YFC_0.20N	180	180	-	-	241.2	60	609	261	350	15	0.78	0.47
0.67SK_0.75SD_0.125YFC_0.125UK_0.20N	270	45	45	-	241.2	60	584	250	350	17.5	0.78	0.47
0.67SK_1SD_0.25N	360	-	-	-	241.2	80	512	219	350	42	0.78	0.47
0.67SK_0.75SD_0.25YFC_0.25N	270	90	-	-	241.2	80	535	229	350	37.5	0.78	0.47
0.67SK_0.50SD_0.50YFC_0.25N	180	180	-	-	241.2	80	553	237	350	36	0.78	0.47
0.67SK_0.75SD_0.125YFC_0.125UK_0.25N	270	45	45	-	241.2	80	531	227	350	36.5	0.78	0.47
KONTROL	-	-	200	350	-	-	919	394	350	15	0.78	0.47

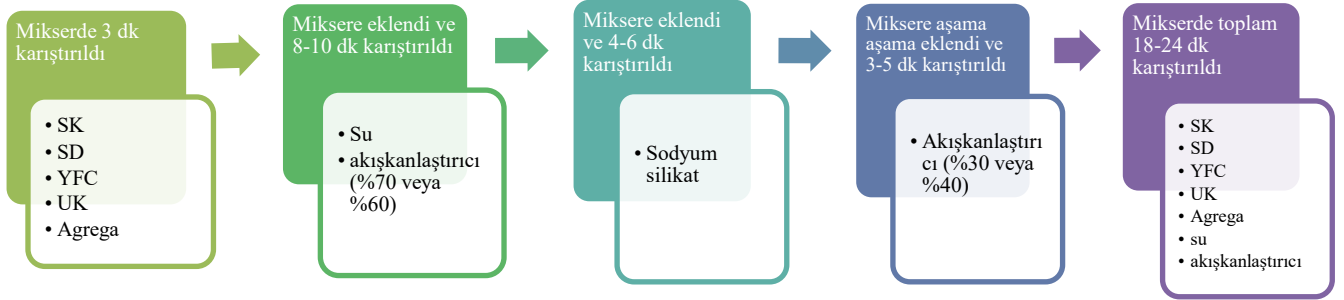
*H.A.: Hiperakışkanlaştırıcı ** S/B: Su/bağlayıcı malzeme oranı ***S/TM: Su/ toz malzeme oranı

3.2.2 Taze çimentosuz KYB karışımlarının hazırlanması

Tez çalışması kapsamında, hibrit alkali aktivatörlü tüm karışımlara ait işlenebilirlik ve sertleşmiş beton testleri için karışımların hazırlanması ve numunelerin üretilmesinde Şekil 3.5'teki 125 dm³ kapasitesine sahip drum tipi beton mikseri kullanılmıştır.



Şekil 3.5: Tez çalışması deneylerinde kullanılan drum tipi beton mikseri



Şekil 3.6: Karışımların hazırlanmasında izlenen yollar

Geleneksel KYB kontrol karışımı, agregalar ve 2/3 su 2 dk, daha sonra bağlayıcılar ile birlikte kalan su ve hiperakışkanlaştırıcı 6 dk olmak üzere toplamda 8 dk karıştırılarak hazırlanırken, hibrit alkali aktivatör içeren çimentosuz KYB karışımların hazırlanmasında ise Şekil 3.6'da da özetlendiği gibi sırasıyla aşağıdaki yollar izlenmiştir:

- İlk olarak, tüm katı malzemeler (sönmüş kireç, silis dumanı, yüksek fırın cürufu, uçucu kül, ince ve iri agrega) kuru olarak 3 dakika boyunca karıştırılmıştır (Şekil 3.7).
- İkinci olarak, $\text{Na}_2\text{SiO}_3/(\text{Na}_2\text{SiO}_3+\text{SK})$ oranı 0.25 ve 0.15 olan karışımlarda akışkanlaştırıcının %70'i, 0.20 olan karışımlarda ise akışkanlaştırıcının %60'ı ve tüm karışımlar için de suyun hepsi ayrı bir kapta homojen olacak şekilde karıştırıldıktan sonra mikserde eklenerek 8-10 dakika daha karıştırma işlemi gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.8).
- Üçüncü olarak, prizin işlenebilirlik üzerindeki etkisini minimize etmek için sıvı haldeki sodyum silikat mikserde eklenerek 4-6 dakika da bu şekilde karıştırma işlemine devam edilmiş (Şekil 3.9.a) ve karışımın mikserde bir bütün halde birleşerek top haline geldiği gözlemlenmiştir (Şekil 3.9.b).
- Mikserde bütün malzemeler birleşip büyük bir top haline gelen karışımın açılıp akıcı hale gelmesi için kalan akışkanlaştırıcı 3 veya 4 aşamada mikserde dahil edilerek 3-5 dakika karıştırılmıştır (Şekil 3.10). Böylece tüm karışımlar dikkate alındığında toplamda 18 ila 24 dakika arasında karıştırma süresi sonrasında çimentosuz KYB karışımları hazır hale gelmiştir (Şekil 3.11).



Şekil 3.7: Katı malzemelerin kuru halde karıştırılması



Şekil 3.8: Su ve akışkanlaştırıcının ilave edilmesi



a) Sodyum silikatin dahil edilmesi



b) Karışımın büyük top haline gelmesi

Şekil 3.9: Alkali aktivatörün ilave edilmesi ve karışımın bir bütün hale gelmesi



a) 1. aşama-top halinde



b) 2. aşama- kısmen açılma



c) 3 veya 4. aşama-açılma öncesi

Şekil 3.10: Kalan akışkanlaştırıcının aşama aşama karışıma dahil edilmesi



Şekil 3.11: Hazırlanan çimentosuz KYB karışımı

3.2.3 Numunelerin üretilmesi ve boyutları

Hazırlanan hibrit alkali aktivatör içeren çimentosuz KYB karışımlar, sertleşmiş beton özelliklerinin belirlenmesi için kalıplara yerleştirilerek numuneler üretilmiştir (Şekil 3.12). Sertleşmiş beton deneylerinde kullanmak üzere, her bir karışım için farklı şekiller ve boyutlarda numuneler üretilmiştir. Basınç dayanımı deneyi için $100 \times 100 \times 100$ mm boyutlarında küp numuneler, yarmada çekme deneyi ve elastisite modülü için de $\phi 100 \times 200$ mm boyutlarında silindir numuneler üretilmiştir.



Şekil 3.12: Sertleşmiş beton özelliklerinin belirlenmesi için numunelerin üretilmesi

3.2.4 Numunelerin kür edilmesi

Sertleşmiş beton özelliklerinin belirlenmesi için hazırlanan karışımlar küp ve silindir kalıplara yerleştirildikten 24 saat sonra numuneler çıkartılıp su sıcaklığı $23 \pm 2^\circ\text{C}$ olan kür

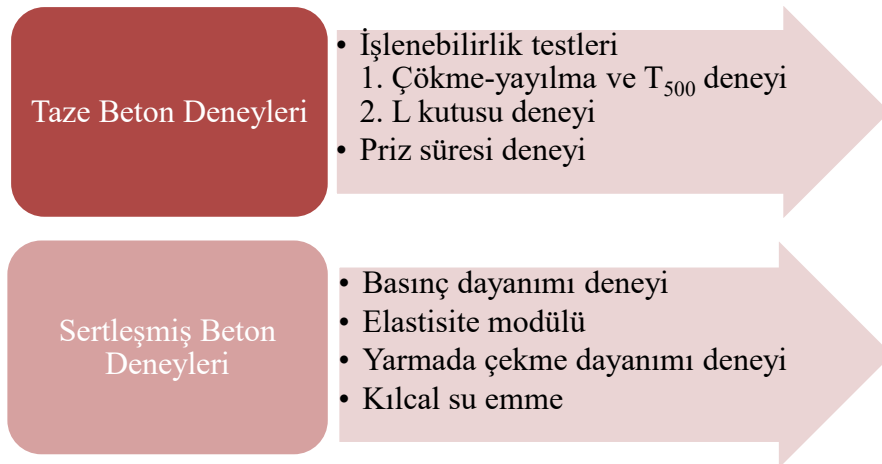
havuzunda TS EN 12390-2 standartına uygun bir şekilde 7, 28 ve 90 gün boyunca kür edilmiştir (Şekil 3.13).



Şekil 3.13: Numunelerin kür edilmesi

3.3 Taze ve Sertleştirilmiş Beton Deneyleri

Tez çalışması kapsamında, hazırlanmış olan geri dönüştürülmüş agrega içeren kontrol KYB ve 12 farklı hibrit alkali aktivatörlü çimentosuz KYB karışımlar ile bu karışımlardan üretilen numunelere ait taze ve sertleşmiş beton özelliklerinin belirlenmesi amacıyla Şekil 3.14’de verilen deney programı gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.14: Karışımlara uygulanan deneyler

3.3.1 Taze beton deneyleri

Geri dönüştürülmüş agrega içeren Kontrol KYB ve hibrit alkali aktivatörlü çimentosuz KYB karışımlar, EFNARC (2005) tarafından belirlenmiş olan SF2 (660-750

mm) çökme-yayılma değeri esas alınarak deneme-yayılma yöntemiyle elde edilmiş olup daha sonra karışımlar üzerinde diğer işlenebilirlik testleri (T_{500} ve L kutusu) ile priz sürelerine ait deneyler gerçekleştirilmiştir. Karışımlara ait işlenebilirlik testlerinde EFNARC (2005) tarafından önerilen sınır değerlerinin sağlanması amaçlanmıştır.

3.3.1.1 İşlenebilirlik testleri

3.3.1.1.1 Çökme-yayılma ve T_{500} deneyi

Çökme-yayılma ve T_{500} işlenebilirlik testleriyle, üretilen geri dönüştürülmüş agrega içeren Kontrol KYB ve hibrit alkali aktivatörlü çimentosuz KYB karışımlarının sırasıyla doldurma kabiliyeti ve kendi ağırlığı altında yayılma yeteneği ile viskozite ve stabilitesinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu deneyde kullanılan düzeneği, Şekil 3.15’de görüldüğü gibi 1000×1000 mm boyutlarındaki çelik bir yayılma tablası ile üst çapı 100 mm, alt çapı 200 mm ve yüksekliği 300 mm olan kesik koniden oluşmaktadır.



Şekil 3.15: Çökme-yayılma ve T_{500} deney düzeneği

Deneyi yapmak için kesik koni ve yayılma tablası nemli bir bez yardımıyla silinip nemlendirilmiş ve kesik koni yayılma tablasının tam orta noktasına yerleştirilmiştir. Mikserde hazırlanan taze haldeki beton karışımı homojen bir şekilde alınarak huni yardımıyla kesik koniye herhangi bir mekanik sıkıştırma uygulanmaksızın doldurulmuştur. Sonrasında kesik koni doldurulduktan 30 sn içerisinde dik bir şekilde yukarıya doğru kaldırılmıştır. Yayılma işlemi tamamlandıktan sonra en büyük yayılma çapı (D_1) ve ona dik yöndeki yayılma çapı (D_2) ölçülüp iki çapın ortalaması alınarak KYB karışımının yayılma

apı hesaplanmıştır ($D_$) (şekil 3.16). T_{500} süresini belirlemek için kesik koninin kaldırıldığı an ile yayılma çapının 500 mm'ye ulaştığı an arasında geçen süre ölçülerek T_{500} süresi olarak kaydedilmiştir.



şekil 3.16: Çökme-yayılma deneyi

3.3.1.1.2 L kutusu deneyi

Tez alışması kapsamında hazırlanan geri dönüştürülmüş agrega içeren Kontrol KYB ve hibrit alkali aktivatörlü imentosuz KYB karışımlarında, taze betonun donatılar arasından geçebilme yeteneğini belirlemek için L kutusu deneyi gerçekleştirilmiştir. Deneyde kullanılan L kutusu, düşey ve yatayda iki hazneden oluşup bu iki hazne arasında 3 adet $\phi 12$ mm çapında donatılar bulunmaktadır (şekil 3.17). Bu hazneler arasındaki geçişi kapatmak için donatıların tam arkasında bir adet sürgülü kapak bulunmaktadır. Deneye başlamadan önce L kutusunun hazneleri, kapak ile donatılar bir miktar yağlanır ve beton sızmayacak şekilde hazneler arasındaki kapak kapatılır. Ardından hazırlanan karışım mikserden homojen olacak şekilde alınarak L kutusunun düşeydeki hazneye doldurulur. Doldurma işleminin ardından 60 ± 10 sn bekleddikten sonra sürgülü kapak açılarak taze betonun donatılar arasından yatayda bulunan hazneye tamamen geçmesi beklenir. Geçme işlemi tamamlandıktan sonra yataydaki haznenin uç kısmındaki beton yüksekliği (H_2) ve düşeydeki hazne içerisindeki betonun yüksekliği (H_1) llmş ve H_2/H_1 oranı değerleri kaydedilmiştir.



Şekil 3.17: L kutusu deney aparatı

3.3.1.2 Priz süresi deneyi

Tez çalışmasında taze haldeki geri dönüştürülmüş agrega içeren Kontrol KYB ve hibrit alkali aktivatörlü çimentosuz KYB karışımlarının priz başlama ve sona erme sürelerini belirlemek amacıyla ASTM C 403 (1994) standardına göre taze beton karışımının penetrasyona karşı direncinin ölçülmesi yöntemi kullanılmıştır. Bu deney Şekil 3.18’de görülen farklı uç alanlarına sahip sondalar (645, 323, 161, 65, 32 ve 16 mm²) içeren beton harç penetrometresi aletiyle gerçekleştirilmiştir. Deney taze beton karışımını oluşturan harç üzerinde yapılması gerektiğinden dolayı hazırlanan taze beton karışımı Şekil 3.19’da görüldüğü gibi 4.75 mm çapında elekten elenerek harç kısmı ayrılır. Ayrılan harç kısmı 150 × 150 × 150 mm boyutlarındaki küp kalıba yerleştirildikten sonra harcın sıcaklığı ölçülür ve kaydedilir. ASTM C 403 (1994) standartına göre geleneksel çimentolu betonlarda karıştırma işlemi gerçekleştirildikten sonra yaklaşık 2-3 saat sonra betonun penetrasyon direnci ölçülmeye başlanır. Ancak bu tez çalışması kapsamında hibrit alkali aktivatör içeren çimentosuz KYB karışımlar incelendiğinden penetrasyon direncinin ölçülmeye başlanacağı sürenin belirlenmesi için ön deneme testleri gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak harç kalıba yerleştirildikten 100 dk sonrasında penetrasyon direncinin ölçülmesinin başlanmasına karar verilmiştir. Daha sonra seçilen 645 mm² lik sonda aletin ucuna yerleştirilir ve betonun yüzeyine dik bir şekilde sabit bir hızla bastırılıp 2.5 cm harç içerisine nüfuz etmesi sağlanır (Şekil 3.20). Ardından aletin üzerindeki kuvvet okunarak not edilir. Bu işlemin ardından en az 30 dakika aralıklarla farklı noktalardan diğer sonda uçlarıyla aynı işlem tekrarlanır. Ölçüm sonuçları ile penetrasyon dayanımı-geçen süre grafiği çizilir. Bu grafikte penetrasyon

direncinin 3.5 MPa'ya ulaştığı andaki süre priz başlama süresi, penetrasyon direncinin 27.6 MPa'ya ulaştığı andaki süre ise priz sona erme süresi olarak belirlenmektedir (şekil 3.21).



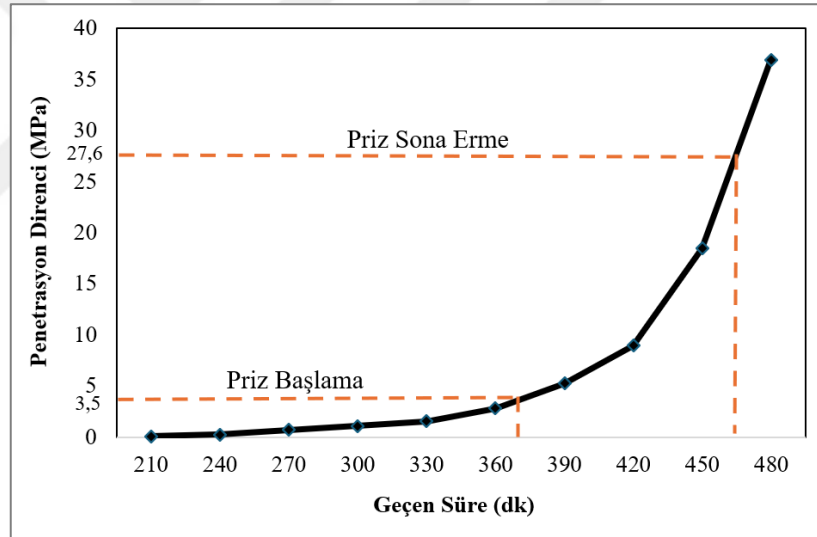
şekil 3.18: Beton harç penetrometresi



şekil 3.19: Taze betonun 4.75 mm elekten elenmesi



Şekil 3.20: Beton penetrasyon direncinin ölçülmesi



Şekil 3.21: Penetrasyon direnci-geçen süre grafiği

3.3.2 Sertleşmiş beton deneyleri

3.3.2.1 Basınç dayanımı

Tez çalışmasında yer alan geri dönüştürülmüş agrega içeren Kontrol KYB ve hibrit alkali aktivatörlü çimentosuz KYB karışımlarının basınç dayanımı testleri ASTM C39 (2018) standardı esas alınarak Şekil 3.22’de gösterilen 3000 KN kapasiteli ve eksenel yük uygulayabilen pres cihazında gerçekleştirilmiştir. Tüm numuneler için yükleme, sabit 6 kN/sn hızında uygulanmıştır. Deneyde kullanılmak üzere her bir kür süresi (7, 28 ve 90 gün)

için her karışımından 3'er adet olmak üzere $100 \times 100 \times 100$ mm boyutlarında üretilen toplamda 117 adet küp numuneleri test edilmiştir. Numunelere ait basınç dayanımı değerleri, numunelerin maruz kaldığı maksimum yükün numunenin kesit alanına bölünmesiyle hesaplanmıştır.



şekil 3.22: Basınç dayanımı test düzeneği

3.3.2.2 Elastisite modülü

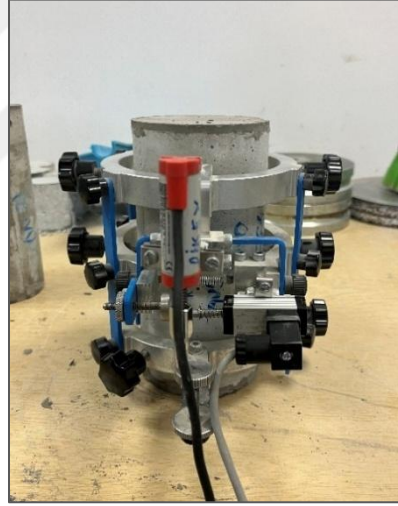
Elastisite modülü deneyi ASTM C469/ C469M-14 (2014) standartlarına göre gerçekleştirilmiştir. Bu deney için de basınç ve yarmada çekme dayanımını belirlemede kullanılan 3000 KN yük kapasiteli pres cihazı kullanılmıştır (şekil 3.22). Deney sırasında yükleme hızı tüm numuneler için sabit 1,8 kN/sn olarak ayarlanmıştır. Tez çalışmasında yer alan geri dönüştürülmüş agrega içeren Kontrol KYB ve hibrit alkali aktivatörlü imentosuz KYB karışımının 28 günlük elastisite modüllerini belirlemek için her bir karışımından 3'er adet olmak üzere $\phi 100 \times 200$ mm boyutlarında toplamda hazırlanan 39 adet silindir numuneler test edilmiştir.

İlk olarak numunenin üniform yayılı yüke maruz kalması için üretilen silindir numunelerin st ve alt kısmına şekil 3.23. a'da görüldüğü gibi imento şerbeti ile başlıklama yapılmıştır. Daha sonrasında, uygulanan yük altında numunede meydana gelecek olan eksenel ve yanal deplasmanları ölçmek amacıyla numuneler şekil 3.23. b'de gösteridiği gibi ereve sisteme yerleştirilmiş olup yatay ve düşey potansiyometrik cetveller ereve sistemde uygun konumlara sabitlenmiştir. Numunelerde oluşan yatay ve düşey deplasmanlar, veri toplama nitesi (data logger) aracılığıyla bilgisayara aktarılmış (şekil 3.23.c) ve elde edilen veriler kullanılarak her bir numune için gerilme-birim şekil değiştirme grafikleri Excel yardımıyla çizilmiştir. Sonrasında oluşturulan grafikler üzerinde maksimum

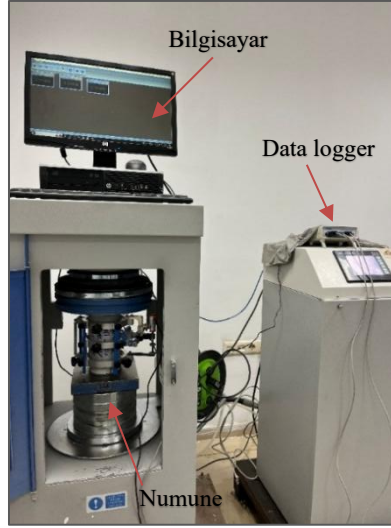
gerilme değerinin yaklaşık %40'a karşılık gelen doğrusal elastik bölgedeki eğim kullanılarak her bir karışım için elastisite modülü (E) hesaplanmıştır.



a) Numunelere çimento şerbetiyle başlık yapılması



b) Yatay ve düşey potansiyometrik cetvellerin yerleştirilmesi



c) Numunelerin test edilmesi

Şekil 3.23: Elastisite modülü test düzeneği

3.3.2.3 Yarmada çekme dayanımı

Tez çalışması kapsamında yer alan geri dönüştürülmüş agrega içeren Kontrol KYB ve hibrit alkali aktivatörlü çimentosuz KYB karışımlarının yarmada çekme dayanımlarını belirlemek amacıyla her bir kür süresi (7, 28 ve 90 günlük) için her karışımdan 3'er adet olmak üzere $\phi 100 \times 200$ mm boyutlarında toplamda 117 adet silindir numune test edilmiştir. Testler ASTM C496 (2017) standartlarına uygun olarak 3000 KN yük kapasiteli ve yük kontrollü pres cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.24). Yükleme hızı tüm numuneler için sabit 1,6 kN/sn olarak ayarlanmıştır. Yük uygulaması sırasında üniform yayılı yüke maruz kalması için numunelerin alt ve üst kısmına 1×2.5 cm ahşap plakalar yerleştirilmiştir. Deney sonunda yarmada çekme dayanımları, Denklem 3.1 kullanılarak her bir numune için hesaplanmıştır.

$$f_{y\zeta} = \frac{2 \times P}{\pi \times L \times D} \quad (3.1)$$

$f_{y\zeta}$: Yarmada çekme dayanımı (MPa)

P: Silindire uygulanan maksimum yük (N)

L: Silindir numunenin uzunluğu (mm)

D: Silindir Numunenin çapı (mm)



Şekil 3.24: Yarmada çekme dayanımı test düzeneği

3.3.2.4 Kılcal su emme

Kılcal su emme deneyi, betonun gözeneklilik yapısını ve su geçirgenlik özelliğini değerlendirmek amacıyla ASTM C1585 (2004) standartına göre yapılmıştır. Bu amaçla 90 gün kür edilmiş geri dönüştürülmüş agregaya içeren Kontrol KYB ve hibrit alkali aktivatörlü çimentosuz KYB karışımlarının kılcal su emme performansını belirlemek için, her karışımdan ikişer adet olmak üzere 100x200 mm boyutlarında silindirik numuneler hazırlanmıştır. Test edilecek numuneler tamamen kuru hale getirmek için 105 °C sıcaklıkta 24 saat boyunca etüvde kurutulmuştur. Etüvden çıkartılan numunelerin soğumasının ardından emilecek suyun buharlaşarak kaybolmasını önlemek amacıyla numunelerin yan yüzeyleri su geçirmez elektrik bandı ile sarılmıştır. Bantlama işleminin ardından numuneler tartılmış ve elde edilen kütle, fırın kuru su numune ağırlığı olarak kaydedilmiştir. Daha sonra, Şekil 3.25'te görüldüğü gibi tavanın altına numunelerin üzerine konulacağı mesnet amaçlı bir metal çubuk yerleştirilmiştir. Tava, mesnet amaçlı bir metal çubuğun üst seviyesini 3 mm geçecek şekilde musluk suyu ile doldurulmuştur. Deney süresince, mesnet amaçlı bir metal çubuğun 3 mm üstündeki su seviyesi korunmuştur. Numuneler suya yerleştirildikten sonra sırasıyla 5., 10., 20., 30., 60., 240. ve 1440. dakikalarda sudan çıkartılarak alt yüzeyleri nemli bir bez yardımıyla silinmiş ve tartılmıştır. Bu işlem sayesinde her bir zaman aralığında numunelerin ne kadar su emdiği belirlenmiştir. Elde edilen su emme miktarları kullanılarak, su emme katsayıları Denklem 3.2'te verilen formülü yardımıyla en küçük kareler yöntemi kullanılarak su emme katsayıları hesaplanmıştır.

$$k = \frac{Q}{A * \sqrt{t}} \quad (3.2)$$

k: Kılcal su emme katsayısı (cm/s^{1/2})

Q: Absorbe edilen su miktarı (cm³)

A: Su ile temas eden yüzey alanı (cm²)

t: Zaman (saniye)



Şekil 3.25: Kılcal su emme deney düzeneği

3.4 Büyük Ölçekli Betonarme Kirişlerin Üretimi ve Test Düzeneği

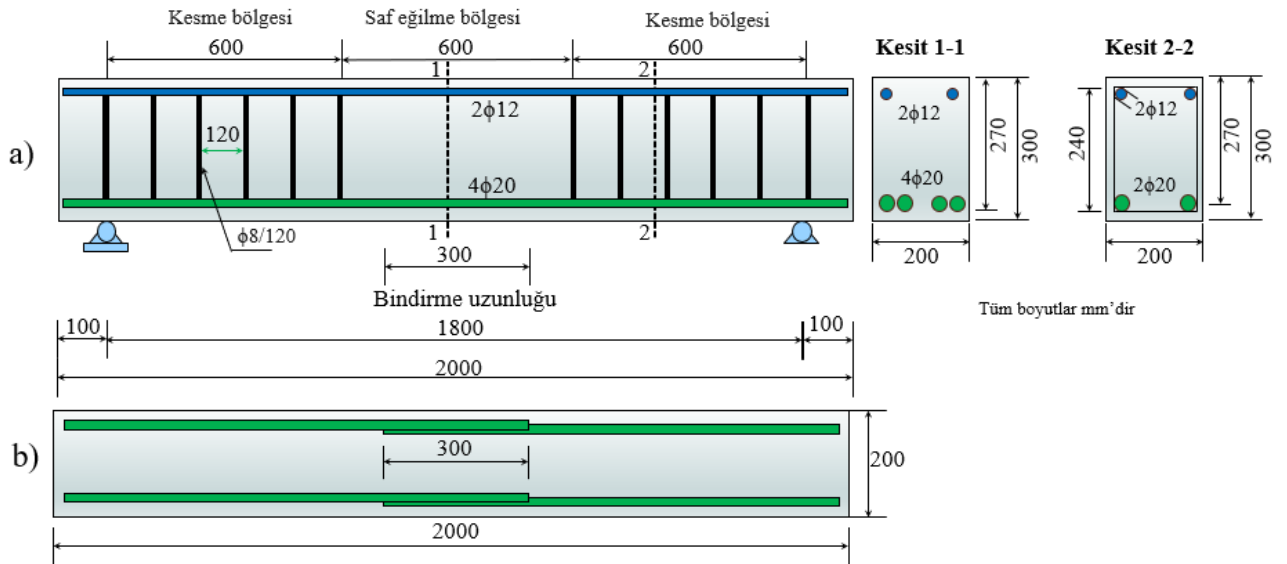
3.4.1 Numunelerin üretimi

Tez çalışması kapsamında tasarlanan geri dönüştürülmüş agrega içeren Kontrol KYB ve 12 farklı hibrit alkali aktivatörlü çimentosuz KYB karışımlardan 1'er tane olacak şekilde toplam 13 adet kiriş numuneleri üretilmiştir. Kiriş numuneler tam ölçekli ve dikdörtgen kesitli olup bu kiriş numuneler çekme bölgesinde bindirmeli ekli-donatı detayı içerecek şekilde tasarlanmış ve dört noktalı eğilmeye maruz bırakılarak test edilmiştir. Şekil 3.26'da gösterildiği gibi kirişlerde, iki adet $\Phi 20$ nervürlü boyuna donatılar açıklık ortasında bindirmeli-ekli olarak çekme bölgesine yerleştirilirken, donatı detaylandırılmasında iki adet boyuna $\Phi 12$ montaj donatısı ve 12 adet $\Phi 8$ enine donatı da kullanılmıştır. Çekme bölgesindeki üst üste bindirilen boyuna donatının bindirme boyu olan 300 mm, kiriş eğilmeye maruz bırakıldığında donatı akma gerilmesine ulaşmadan önce donatının beton örtüyü yaparak aderans göçmesine sebep olacak şekilde belirlenmiştir (Şekil 3.27). Donatı

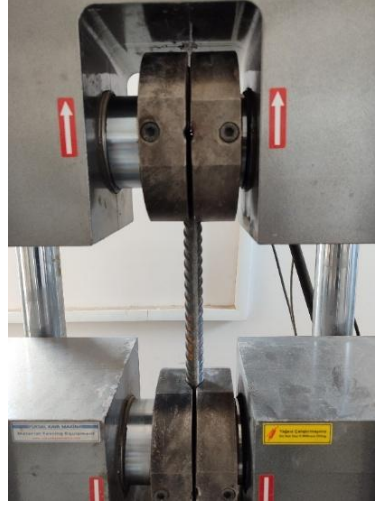
aderansının belirlenmesi amacıyla hazırlanacak olan büyük ölçekli kiriş elemanlarının üretiminde, TS 708 (2010)'a uygun olan 8 mm, 12 mm ve 20 mm olmak üzere toplamda 3 farklı çaptaki her donatıdan üçer adet numune alınıp çelik çekme deneyleri yapılarak donatıların mekanik özellikleri tespit edilmiştir (Şekil 3.28). Deneyler sonucunda elde edilen verilerin ortalama değerleri Çizelge 3.5'te verilmiştir. Donatı elastisite modülü değerleri ise 200000 MPa olarak alınmıştır.



Şekil 3.26: Donatı detayı



Şekil 3.27: Betonarme kiriş numunelerinin boyuna ve enine kesitleri



Şekil 3.28: Donatı çekme deneyi

Çizelge 3.5 : Donatılarının mekanik özellikleri

Donatı	Çapı (mm)	Kesit alanı (mm ²)	Akma dayanımı (MPa)	Çekme dayanımı (MPa)	Toplam uzama (%)
Φ8	8	50.24	588	732	17.01
Φ12	12	113.04	531	624	10.74
Φ20	20	314.00	491	602	12.10

Kiriş donatıları Şekil 3.26’da gösterildiği gibi teşkil edildikten sonra, iç yüzeyi yağlanarak hazır hale getirilmiş çelik kalıplar içerisine yerleştirilmiştir (Şekil 3.30.a). Tüm büyük ölçekli betonarme kirişlerin üretimi, İnönü Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Mekaniği laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Betonarme kirişlerin üretiminde kullanılan tüm karışımlar, 350 litre kapasiteli betoniyer kullanılarak hazırlanmıştır (şekil 3.29.a). Büyük ölçekli betonarme kiriş karışımların hazırlanmasında ilk olarak, tüm katı malzemeler (sönmüş kireç, silis dumanı, yüksek fırın cürufu, uçucu kül, ince ve iri agrega) kuru olarak 3 dakika boyunca karıştırılmıştır. Daha sonra, $\text{Na}_2\text{SiO}_3/(\text{Na}_2\text{SiO}_3+\text{SK})$ oranı 0.25 ve 0.15 olan karışımlarda akışkanlaştırıcının %70’i, 0.20 olan karışımlarda ise akışkanlaştırıcının %60’ı ve tüm karışımlar için de suyun hepsi ayrı bir kapta homojen olacak şekilde karıştırıldıktan sonra mikserle eklenerek yeterli düzeyde karıştırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Üçüncü aşama olarak, prizın işlenebilirlik üzerindeki etkisini minimize etmek için sıvı haldeki sodyum silikat mikserle eklenerek karışımın mikserde bir bütün halde birleşerek top haline gelene kadar karıştırma işlemine devam edilmiştir. Son olarak, kalan akışkanlaştırıcı 3 veya 4 aşamada mikserle dahil edilerek karışım açılıp belli bir akıcılığa ulaşana kadar karıştırılmıştır. Böylece tüm karışımlar dikkate alındığında toplamda 25 ila 30

dakika arasında karıştırma süresi sonrasında büyük ölçekli kirişlerin üretimi için çimentosuz KYB karışımları hazır hale gelmiştir (şekil 3.29.b).



a) Betoniyer



b) Hazırlanmış karışım

Şekil 3.29: Büyük ölçekli kirişler için hibrit alkali aktivatör içeren çimentosuz KYB karışımların hazırlanması

Hibrit alkali aktivatör içeren çimentosuz KYB karışımlar, betoniyer yardımıyla hazırlandıktan sonra el arabasıyla taşınarak büyük ölçekli kirişler için hazırlanan çelik kalıplara herhangi bir sıkıştırma işlemi uygulanmadan yerleştirilmiştir. Bununla birlikte, büyük ölçekli betonarme kiriş numunelerin üretiminde kullanılan betonun basınç dayanımlarını belirlemek amacıyla her bir karışım için 2 adet 100 mm boyutunda küp numuneler hazırlanmıştır. Beton dökümünden 24 saat sonra hem büyük ölçekli betonarme kiriş ve hem de küp numuneler kalıptan çıkarılmıştır (Şekil 3.30.b). Kalıptan çıkarılan tüm büyük ölçekli betonarme kiriş numuneler ve basınç dayanımının belirlenmesi için hazırlanan küp numuneler laboratuvarında 90 gün boyunca aynı şartlarda plastik örtüler altında nemli çuval bezi ile sarılarak kür edilmiştir (Şekil 3.30.c).



a) Donatıların kiriş kalıplara yerleştirilmesi



b) Dökümü tamamlanıp kalıptan çıkarılan betonarme kirişler

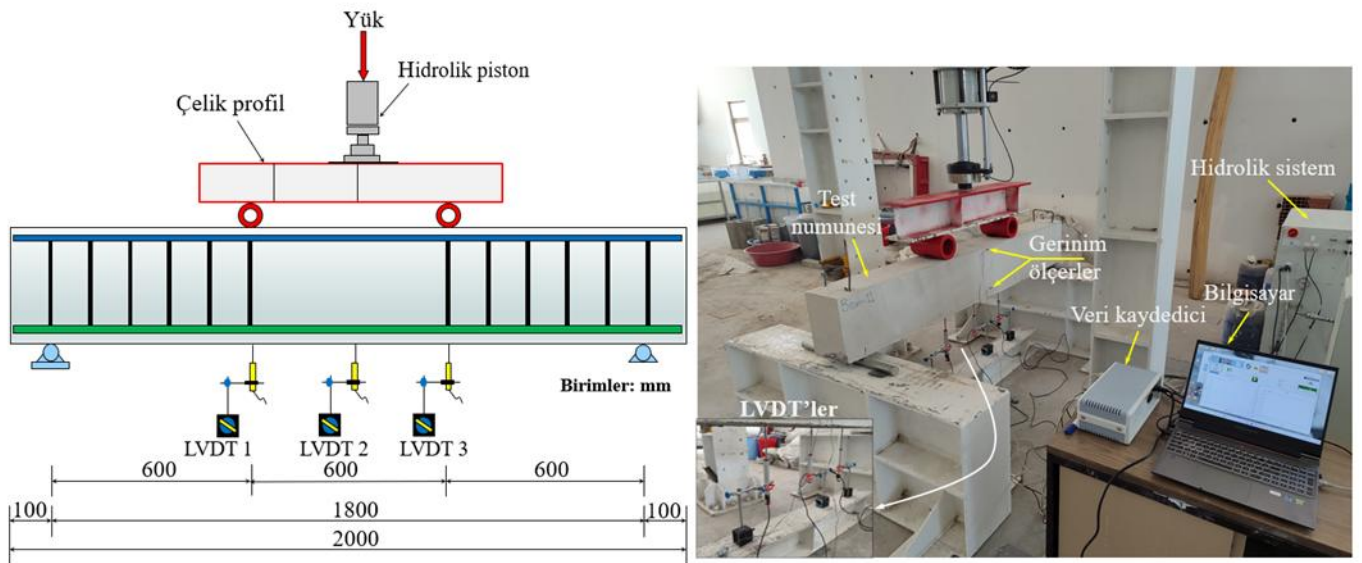


c) Betonarme kirişlerin kür işlemi

Şekil 3.30: Aderans deneyi için hazırlanan betonarme kiriş numuneleri

3.4.2 Test düzeneği

Büyük ölçekli betonarme kiriş numuneleri, 1800 mm net açıklığa sahip olacak şekilde deney düzeneğine yerleştirilmiş ve basit mesnetli kiriş olarak test edilmiştir. Kirişler, üst yüzeylerine konumlandırılan rijit çelik profil aracılığıyla yükün eşit olarak etki etmesi sağlanarak iki tekil yük ve iki mesnet olmak üzere dört noktalı eğilmeye maruz bırakılmıştır. Sehim değerleri ise, bir adet kirişin açıklık ortasına ve iki adet de tekil yük hizasına olmak üzere toplam üç adet deplasman ölçer (LVDT) kullanılarak ölçülmüş olup ihmal edilecek düzeyde oluşan mesnetteki oturmalar dikkate alınmamıştır. Ayrıca, kirişlerin salt eğilme bölgesinde alt ve üst yüzeylerine 30 mm uzunluğunda gerinim ölçerler (strain gauge) yerleştirilmiştir. Yükleme hızı 1.2 mm/dak olarak ayarlanmış olan testte, hibrit alkali aktivatör içeren çimentosuz KYB karışımından üretilen betonarme kiriş numunelere ait deneyin tamamlanması yaklaşık 8 dakika iken, Kontrol KYB karışımına ait numunede bu süre yaklaşık 10 dakikada gerçekleşmiştir. Şekil 3.31’de dört noktalı eğilmeye maruz kirişlerin test düzeneği gösterilmektedir.



Şekil 3.31: Büyük ölçekli kirişler için test düzeneği

3.4.3 Bindirmeli-ekli donatıya sahip kirişlerin aderans dayanımının hesabı

Bindirmeli-ekli çekme donatısına sahip basit mesnetli kiriş numuneleri, dört noktalı eğilmeye maruz bırakılmaktadır. Maksimum momentin oluştuğu saf eğilme bölgesinde bindirmeli olarak detaylandırılan donatıların bindirme uzunluğu, donatı akmaya uğramadan önce, aderans göçmesi meydana gelecek şekilde belirlenmektedir. Aderans göçmesine uğrayan kirişte bindirmeli-ekli donatı maksimum kapasitesine ulaşmaktadır. Çünkü,

nervürlü donatının çıkıntıları yükleme ile birlikte betonu zorlamakta ve donatıyı saran betonda donatının eksenine dik çevresel gerilmeler meydana gelmektedir. Bu gerilmeler sebebiyle çok sayıda yarıma-aderans çatlağı oluşmakta ve böylece, donatı akmaya uğramadan numune göçmektedir. Bu nedenle, aderans dayanımı (u_{test}), donatıda oluşan gerilme ile doğrudan alakalıdır. Bu nedenle, u_{test} , elastik bölgede donatı çeliğinin gerilme durumuyla doğrudan ilgilidir. Bu bağlamda, u_{test} , Denklem 3.1 kullanılarak hesaplanır:

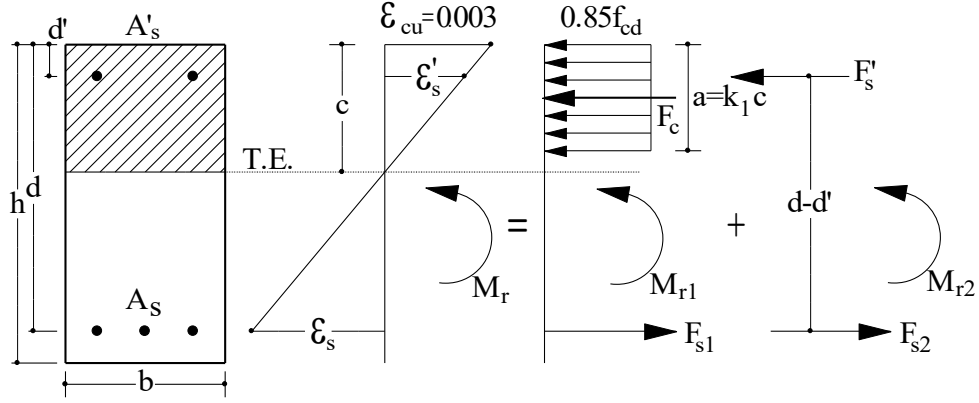
$$u_{test} = \frac{(A_s \times f_s)}{(\pi \times d \times l_s)} = \frac{f_s \times d}{4l_s} \quad (3.1)$$

Burada, A_s donatı kesit alanı, f_s boyuna çekme donatısında oluşan çekme gerilmesi, d , donatı çapı ve l_s bindirmeli-ekleme uzunluğudur.

3.4.4 Eğilmeye maruz çift donatılı betonarme kirişlerde donatıdaki gerilmenin hesabı

Betonarme kirişlerde basınç bölgesine enine donatıların detaylandırılması amacıyla montaj donatısı yerleştirilir. Bununla birlikte montaj donatısının basınç bölgesinde meydana gelen gerilmeleri beton ile birlikte taşıma durumunun göz önüne alınması için çift donatılı kesit durumu dikkate alınır ve çözümleme buna göre yapılır (Şekil 3.32). Tek donatılı kirişin moment taşıma gücü yetersiz kaldığında, taşıma gücünü arttırmak için ya kiriş kesiti (b.d) büyütülür yada basınç bölgesine de donatı konur. Şekilde basınç donatısı A'_s ile çekme donatısı da A_s ile gösterilmiştir. Basınç donatısı aynı zamanda montaj görevi görür, ayrıca montaj donatısı konmaz (Topçu, 2025).

Şekil 3.32' de çift donatılı kiriş kesitine ait iç kuvvetler ve şekil değiştirme durumu verilmiştir. Kesite ait geometrik boyutlar ve malzeme dayanımları verilmiş olup taşıma gücünün hesaplanması, tek donatılı kesitlerde olduğu gibi yapılabilir. Öncelikle basınç kuvveti, betondaki ve basınç donatısındaki olmak üzere iki farklı kuvvet şeklinde dikkate alınabilir. Basınç donatısının akma gerilmesine erişip erişmemesi tarafsız eksenin kesitteki yerine bağlıdır. Şekil 3.32 esas alınarak aşağıda yazılan bağıntılar yardımıyla bindirmeli-ekli çekme donatısındaki gerilme (f_s) hesaplanabilir:



Şekil 3.32: Çift donatılı kirişte şekil değiştirme ve gerilmeler (Türk, 2002).

$$F_c = 0.85f_{cd}ab$$

$$F_s' = A_s'f_s'$$

$$M_{r1} = 0.85f_{cd}ab(d - 0.5a)$$

$$M_{r2} = A_s'f_s'(d - d')$$

$M_r = M_{r1} + M_{r2}$ Bağıntısında M_{r1} ve M_{r2} değerleri yerine yazılırsa

$$M_r = 0.85f_{cd}ab(d - 0.5a) + A_s'f_s'(d - d') \quad (3.2)$$

$$f_s' = E_s \varepsilon_s' = E_s \varepsilon_{cu} \frac{c-d'}{c} \quad (3.3)$$

(3.3) bağıntısı ve tarafsız eksen $c = \frac{a}{k_1}$, (3.2) bağıntısında yerine yazılarak,

$$(0.425f_{cd}b_w)a^3 - (0.85f_{cd}b_wd)a^2 + (M_r - A_s'E_s\varepsilon_{cu}(d - d'))a + (k_1A_s'E_s\varepsilon_{cu}d'(d - d')) = 0$$

(3.4) bağıntısı bulunur. Bu bağıntıda k_1 değeri beton sınıfına bağlı bir katsayıdır ve değeri

aşağıdaki bağıntıdan hesaplanır:

$$k_1 = 0.85 - 0.006(f_{ck} - 25)$$

Üçüncü dereceden bir bilinmeyenli (3.4) bağıntısından bulunan a değeri ile c mesafesi hesaplanıp,

(3.3) bağıntısında yerine yazılırsa f_s' gerilmesi elde edilir.

$$F_t = F_c + F_s' \quad (3.5)$$

$$F_t = 0.85f_{cd}b_w a + f'_s A'_s \quad (3.6)$$

(3.6) bağıntısından asal donatının karşıladığı kuvvet hesaplanır ve

$$F_t = f_s A_s \quad (3.7)$$

(3.7) bağıntısında yerine yazılırsa asal donatının karşıladığı gerilme f_s bulunur.



4. DENEYSEL BULGULAR ve TARTIŞMA

4.1 Taze Beton Deneylerine Ait Bulgular

Tez çalışması kapsamında, tasarlanan geri dönüştürülmüş agrega içeren Kontrol KYB karışımı ile 12 farklı hibrit alkali aktivatörlü çimentosuz KYB karışımları üzerinde yapılan işlenebilirlik (çökme-yayılma, T500 ve L-kutusu) ve priz süreleri deneylerinden elde edilen sonuçlar Çizelge 4.1’de verilmiştir.

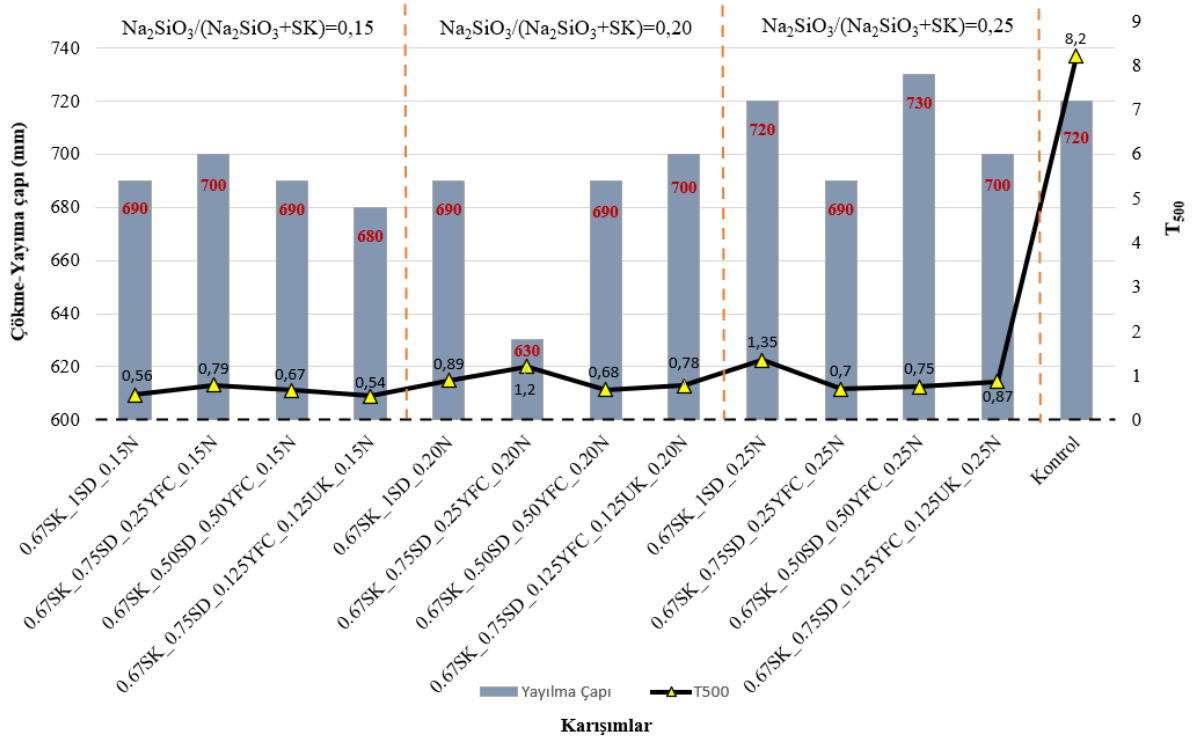
Çizelge 4.1: Karışımlara ait işlenebilirlik test sonuçları

Karışım Adı	Çökme-Yayılma		L-kutusu	Priz Süreleri	
	D _ç	T ₅₀₀	H ₂ /H ₁	Priz Başlama	Priz Sona Erme
	(mm)	(sn)		(dk)	(dk)
0.67SK_1SD_0.15N	690	0,56	1	270	1847
0.67SK_0.75SD_0.25YFC_0.15N	700	0,79	0,82	238	1820
0.67SK_0.50SD_0.50YFC_0.15N	690	0,67	1	263	1725
0.67SK_0.75SD_0.125YFC_0.125UK_0.15N	680	0,54	0,9	308	1703
0.67SK_1SD_0.20N	690	0,89	0,91	185	1608
0.67SK_0.75SD_0.25YFC_0.20N	630	1,2	0,86	211	1581
0.67SK_0.50SD_0.50YFC_0.20N	690	0,68	0,9	246	1853
0.67SK_0.75SD_0.125YFC_0.125UK_0.20N	700	0,78	0,95	182	1712
0.67SK_1SD_0.25N	720	1,35	1	432	2071
0.67SK_0.75SD_0.25YFC_0.25N	690	0,7	0,86	415	2062
0.67SK_0.50SD_0.50YFC_0.25N	730	0,75	0,91	540	2065
0.67SK_0.75SD_0.125YFC_0.125UK_0.25N	700	0,87	0,95	439	1872
KONTROL	720	8,2	1	479	675
EFNARC sınır değerleri	660-750	2-5	≥0.80	-	-
TS EN 196-3 sınır değerleri	-	-	-	60	720

4.1.1 İşlenebilirlik

4.1.1.1 Çökme-yayılma ve T₅₀₀

Hazırlanan geri dönüştürülmüş agrega içeren Kontrol KYB ve hibrit alkali aktivatörlü çimentosuz KYB karışımlarının doldurma kabiliyeti ve kendi ağırlığı altında yayılma yeteneği ile viskozite ve stabilitesini belirlemek amacıyla sırasıyla çökme-yayılma ve T₅₀₀ deneyleri yapılmış olup bu deneylere ilişkin bulgular Çizelge 4.1 ve Şekil 4.1’de verilmiştir. Bulgular EFNARC (2005) komitesi tarafından önerilen sınır değerler esas alınarak değerlendirildiğinde, geri dönüştürülmüş agrega içeren kontrol KYB ve hibrit alkali aktivatörlü çimentosuz KYB karışımlarının çökme-yayılma değerlerinin, bir karışım (0.67SK_0.75SD_0.25YFC_0.20N) dışında tamamının SF2 sınıfı (660–750 mm) aralığında yer aldığı görülmüştür. Ayrıca, en yüksek çökme-yayılma değeri 730 mm ile 0.67SK_0.50SD_0.50YFC_0.25N karışımında elde edilirken en düşük çökme-yayılma değeri 630 mm ile 0.67SK_0.75SD_0.25YFC_0.20N karışımında elde edilmiştir. Bunun yanında, karışımlara ait T₅₀₀ süresi değerlerinin EFNARC (2005) tarafından önerilen sınır değerleri sağlamazken en yüksek T₅₀₀ değeri 8,2 sn ile Kontrol karışımında elde edilmiş olup bunu 1,35 sn ile 0.67SK_1SD_0.25N karışımı takip etmiştir. En düşük T₅₀₀ değeri ise 0,54 sn ile 0.67SK_0.75SD_0.125YFC_0.125UK_0.15N karışımından elde edilmiştir.



Şekil 4.1: Karışımların çökme-yayılma ve T₅₀₀ değerleri

Şekil 4.1’de görüldüğü gibi $\text{Na}_2\text{SiO}_3/(\text{Na}_2\text{SiO}_3+\text{SK})$ oranının 0.15 olan karışımlarda bağlayıcı malzeme olan SD yerine diğer bağlayıcılar olan YFC ve UK’nin ikame edilmesinin çökme-yayılma değerleri üzerinde kayda değer bir değişime neden olmadığı tespit edilmiştir. Bunun yanında, $\text{Na}_2\text{SiO}_3/(\text{Na}_2\text{SiO}_3+\text{SK})$ oranının 0.20 ve 0.25 olduğu karışımlarda %100 SD içeren çimentosuz KYB karışımına kıyasla, SD yerine %25 oranında YFC kullanılımasının karışımların çökme-yayılma değerlerinde azalmaya neden olduğu görülürken, SD yerine %50 YFC kullanılan ikili harmanlama ve UK’nde dahil edildiği üçlü harmanlamaya sahip karışımların çökme-yayılma değerlerinde önemli bir değişim olmadığı görülmüştür. Bütün bunlara ilaveten, $\text{Na}_2\text{SiO}_3/(\text{Na}_2\text{SiO}_3+\text{SK})$ oranı 0,25 olan karışımlara ait çökme-yayılma değerlerinin alkali aktivatör oranı daha düşük olan diğer karışım oranlarına kıyasla daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Bunun sebebi alkali aktivatör oranı yüksek olan karışımların akışkanlaştırıcı ihtiyacının daha fazla olmasına dayandırılmaktadır.

T_{500} değerleri incelendiğinde, $\text{Na}_2\text{SiO}_3/(\text{Na}_2\text{SiO}_3+\text{SK})$ oranının artmasının bu değerlerde artışa neden olduğu bulunmuştur. Karışımların vizkozitesindeki bu artış, yoğunluğu 1.5 olan sodyum silikat miktarının artmasına dayandırılmaktadır. Bağlayıcı miktar ve kombinasyonlarının karışımların stabilitesi üzerindeki etkisine gelince, $\text{Na}_2\text{SiO}_3/(\text{Na}_2\text{SiO}_3+\text{SK})$ oranının 0.15 ve 0.20 olduğu karışımlarda bağlayıcıların miktar ve kombinasyonlarının karışımların stabilitesi üzerinde kayda değer bir etkisi olmadığı görülürken $\text{Na}_2\text{SiO}_3/(\text{Na}_2\text{SiO}_3+\text{SK})$ oranının 0.25 olduğu karışımlarda SD miktarının azaldığı ikili ve üçlü harmanlamaya sahip karışımların vizkozitelerinin az bir miktarda düşüş gösterdiği gözlemlenmiştir (Şekil 4.1). Bütün bunlara ilaveten, Şekil 4.2, 4.3, 4.4 ve 4.5’teki tüm karışımlara ait çökme-yayılma resimlerinden görüldüğü üzere tüm karışımların genelde stabil davranmış ve herhangi bir ayrışma ve kasma göstermemiştir.



Şekil 4.2: Kontor KYB karışımına ait çökme-yayılma görseli



a) 0.67SK_1SD_0.15N



b) 0.67SK_0.75SD_0.25YFC_0.15N



c) 0.67SK_0.50SD_0.50YFC_0.15N



d) 0.67SK_0.75SD_0.125YFC_0.125UK_0.15N

Şekil 4.3: $\text{Na}_2\text{SiO}_3/(\text{Na}_2\text{SiO}_3+\text{SK})$ oranı 0,15 olan karışımlara ait çökme-yayılma görselleri



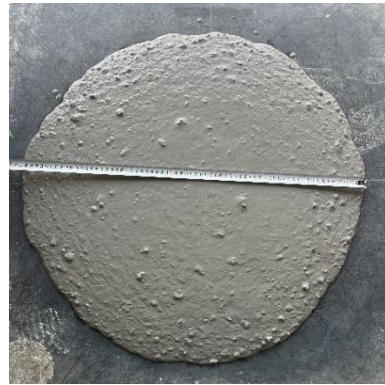
a) 0.67SK_1SD_0.20N



b) 0.67SK_0.75SD_0.25YFC_0.20N



c) 0.67SK_0.50SD_0.50YFC_0.20N



d) 0.67SK_0.75SD_0.125YFC_0.125UK_0.20N

Şekil 4.4: $\text{Na}_2\text{SiO}_3/(\text{Na}_2\text{SiO}_3+\text{SK})$ oranı 0,20 olan karışımlara ait çökme-yayılma görselleri



a) 0.67SK_1SD_0.25N



b) 0.67SK_0.75SD_0.25YFC_0.25N



c) 0.67SK_0.50SD_0.50YFC_0.25N



d) 0.67SK_0.75SD_0.125YFC_0.125UK_0.25N

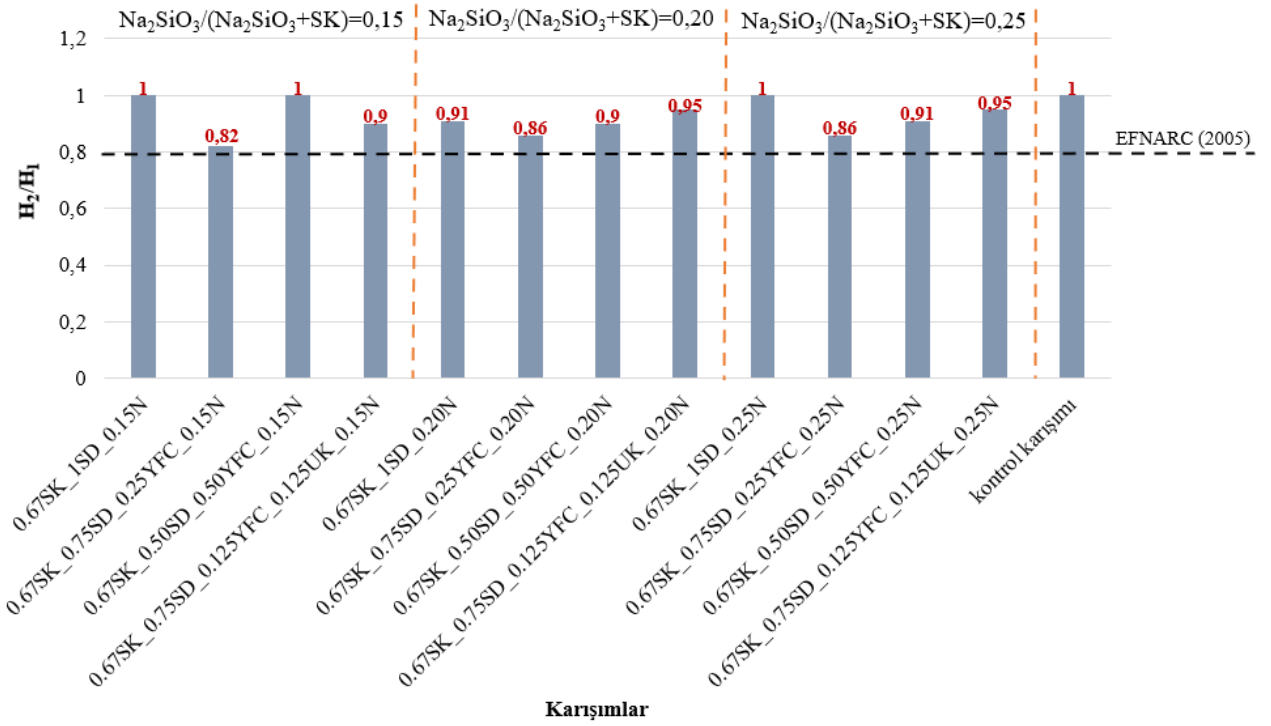
Şekil 4.5: $\text{Na}_2\text{SiO}_3/(\text{Na}_2\text{SiO}_3+\text{SK})$ oranı 0,25 olan karışımlara ait çökme-yayılma görselleri

4.1.1.2 L-kutusu

Tez çalışması kapsamında hazırlanan geri dönüştürülmüş agrega içeren Kontrol KYB ve hibrit alkali aktivatörlü çimentosuz KYB karışımlarının taze betonun donatılar arasından geçebilme yeteneğini belirlemek için L kutusu deneyi gerçekleştirilmiş ve deneye ilişkin elde edilen veriler Çizelge 4.1 ve Şekil 4.6’da sunulmuştur. Tüm karışımlara ait H_2/H_1 değerleri 0.82-1 aralığında olup EFNARC (2005) tarafından önerilen $H_2/H_1 \geq 0.80$ sınır değerini tüm karışımlar sağlamıştır (Şekil 4.7). Bunun yanında, en düşük H_2/H_1 oranı 0.82 ile 0.67SK_0.75SD_0.25YFC_0.15N karışımında elde edilirken en yüksek H_2/H_1 oranı 1 ile 0.67SK_1SD_0.15N, 0.67SK_0.50SD_0.50YFC_0.15N ve 0.67SK_1SD_0.25N karışımlarında görülmüştür.

$\text{Na}_2\text{SiO}_3/(\text{Na}_2\text{SiO}_3+\text{SK})$ oranı arttıkça, L kutusu deney bulgularına ait H_2/H_1 değerlerinin azaldığı; yani karışımlara ait engeller arasından geçme ve seviyelenme yeteneğinin olumsuz etkilendiği gözlemlenmiştir. Bu durum, karışıma sıvı olarak dahil edilen ve yoğunluğu suya kıyasla daha fazla olan sodyum silikat miktarının artmasına dayandırılmaktadır. Bağlayıcıların miktarı ve harmanlanma durumu dikkate alındığında,

karışımların engeller arasından geçme ve seviyelenme yeteneğini karışımlara YFC'nin ikili harmanlama ile dahil edilmesi olumsuz etkilerken UK'nin üçlü harmanlama şeklinde karışımlara dahil edilmesinin ise olumlu etkilediği gözlemlenmiştir. Bu bulgu UK'nin tane şeklinin küresel ve paketleme kabiliyetinin de yüksek olması sebebiyle işlenebilirliği arttırmasına dayandırılabilir (Thakur ve Bawa, 2022; Astuti, 2025).



Şekil 4.6: Karışımların L-kutusu H₂/H₁ değerleri

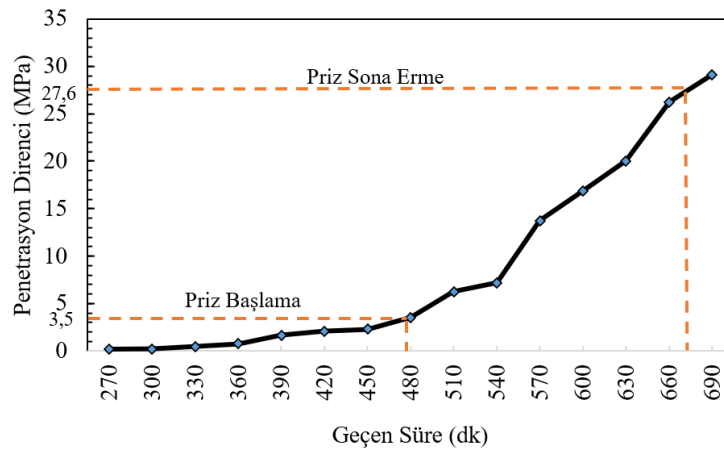
4.1.2 Priz süreleri

Tez çalışmasında taze haldeki geri dönüştürülmüş agrega içeren Kontrol KYB ve hibrit alkali aktivatörlü çimentosuz KYB karışımlarının priz başlama ve sona erme sürelerini belirlemek amacıyla yapılan penetrasyon deneyine ait değerler Şekil 4.7-10'da sunulan grafikler yardımıyla elde edilmiş olup tüm veriler Çizelge 4.1'de sunulmuştur.

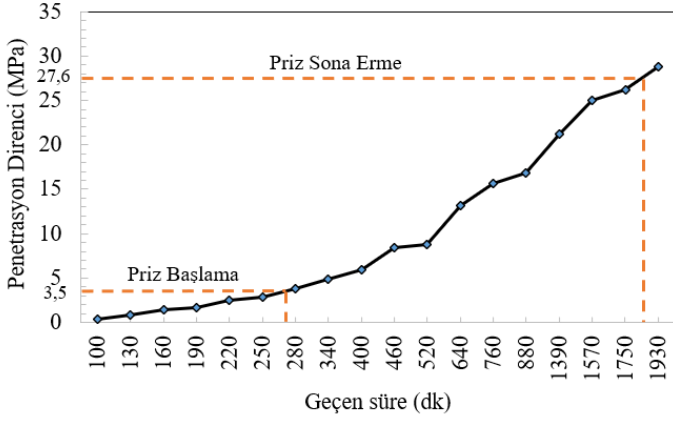
Elde edilen verilere göre geri dönüştürülmüş agrega içeren Kontrol numunesinin priz başlama süresi 479 dk, priz sona erme süresi ise 675 dk olarak bulunmuştur (Şekil 4.7). Geri dönüştürülmüş agrega içeren çimentosuz KYB karışımları arasında en yüksek priz başlama süresi 540 dk ile 0.67SK_0.50SD_0.50YFC_0.25N karışımında, en düşük priz başlama süresi ise 182 dk ile 0.67SK_0.75SD_0.125YFC_0.125UK_0.20N karışımında görülmüştür. Benzer şekilde, en yüksek priz sona erme süresi 2071 dk ile 0.67SK_1SD_0.25N karışımında en düşük priz sona erme süresi 1581 dk ile 0.67SK_0.75SD_0.25YFC_0.20N

karışımında elde edilmiştir. Kontrol numunesiyle kıyaslandığında, çimentosuz KYB numunelerinde $0.25 \text{ Na}_2\text{SiO}_3/(\text{Na}_2\text{SiO}_3+\text{SK})$ oranına sahip karışımların priz başlama süreleri hemen hemen kontrolünkine benzerken diğer karışımların priz başlama sürelerinin 182-308 dk aralığında gerçekleşerek daha kısa olduğu görülmüştür. Tüm çimentosuz KYB karışımlarda ise priz sona erme sürelerinin 1581-2071 dk aralığında gerçekleşerek kontrol KYB karışımına (675 dk) kıyasla oldukça uzun olduğu görülmüştür. Özellikle Kontrol KYB dahil tüm karışımların priz başlama sürelerinin yüksek olmasının sebebi, karışımlarda kullanılan geri dönüştürülmüş agreganın su emmesinin çok yüksek olması ve basınç dayanımını olumsuz etkileyen yüksek su/bağlayıcı oranından kaçınmak ve gerekli işlenebilirliğin sağlanması için karışıma olması gerekenden daha fazla hiperakışkanlaştırıcının dahil edilmesine dayandırılabilir (Çizelge 3.4). Bunun yanında, KYB kontrol numunesinin priz sona erme süresinin olması gereken düzeyde 675 dk (11 saat 15 dk) ile makul bir değer olarak elde edildiği görülmüştür.

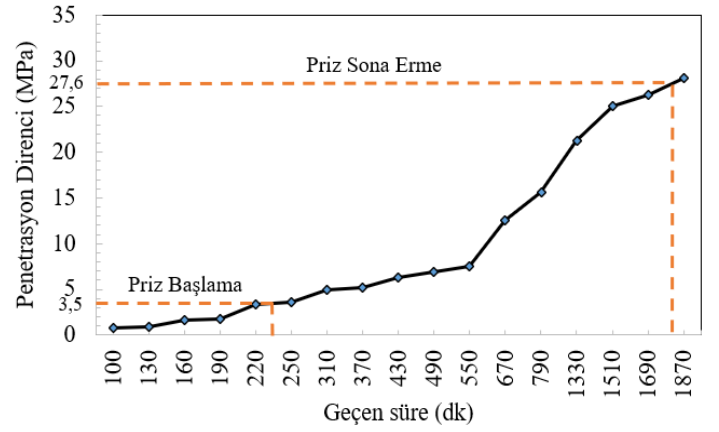
Çizelge 4.1’den görüldüğü üzere, $\text{Na}_2\text{SiO}_3/(\text{Na}_2\text{SiO}_3+\text{SK})$ oranının 0.15’ten 0.20’ye artmasıyla birlikte priz başlama ve sona erme sürelerinde düşüş olduğu fakat bu oranın 0.25 olduğu karışımlarda priz başlama ve sona erme sürelerin en yüksek olduğu tespit edilmiştir. Bu durum, $\text{Na}_2\text{SiO}_3/(\text{Na}_2\text{SiO}_3+\text{SK})$ oranı 0.25 olan karışımlarda hiperakışkanlaştırıcının çok yüksek miktarlarda ($36\text{-}42 \text{ kg/m}^3$ aralığında) kullanılmasına dayandırılmaktadır. Priz süresinin polikarboksilat süperakışkanlaştırıcının miktarıyla büyük ölçüde ilişkili olduğu literatürden bilinmektedir (Ma ve diğ., 2014). Ayrıca Zeyad ve Almalki (2020) tarafından yapılan deneysel çalışmada betona yüksek miktarda SP ilavesinin priz başlama süresinin gecikmesine sebep olduğu bulunmuştur. Bağlayıcı miktarı ve kombinasyonlarının priz süreleri üzerindeki etkisine gelince, tüm karışımların hem priz başlama hem de priz sona erme süreleri üzerinde kayda değer bir değişikliğe sebep olmadığı sonucuna varılmıştır.



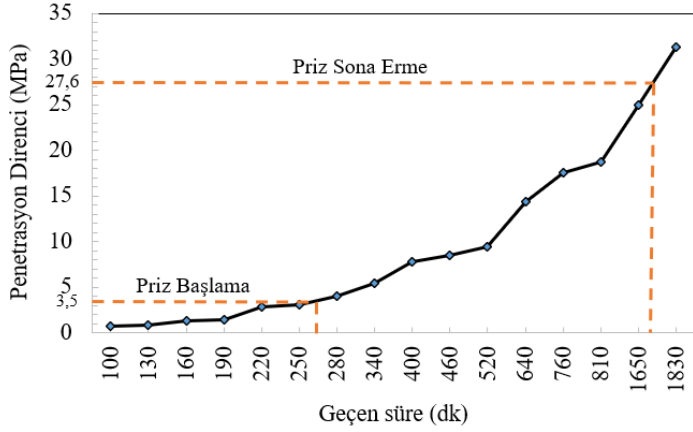
Şekil 4.7: Kontrol karışımının priz sürelerine ait grafik



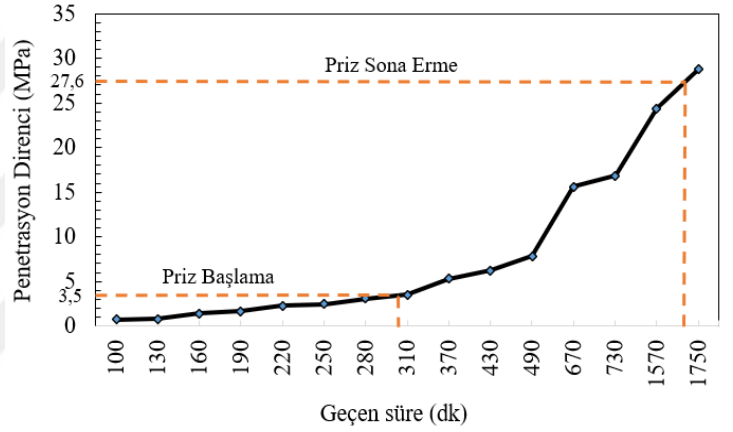
a) 1SD_0.15N



b) 0.75SD_0.25YFC_0.15N

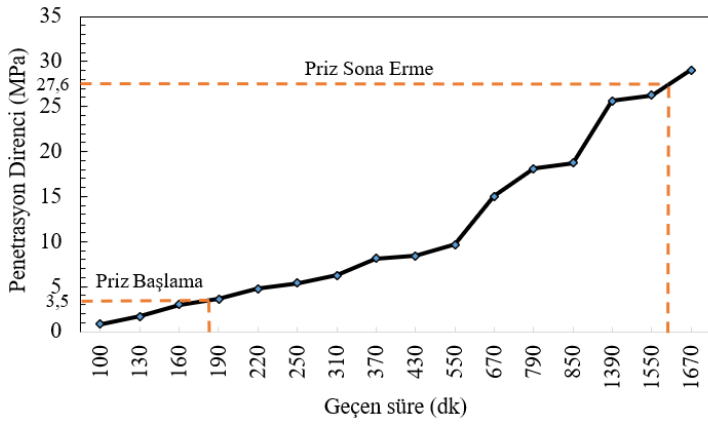


c) 0.50SD_0.50YFC_0.15N

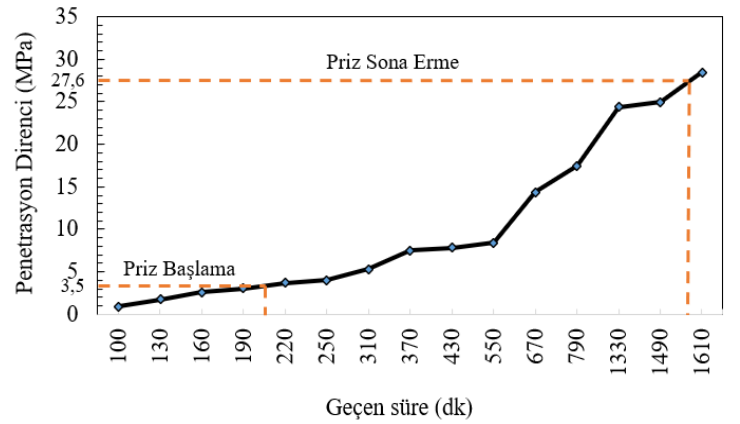


d) 0.75SD_0.125YFC_0.125UK_0.15N

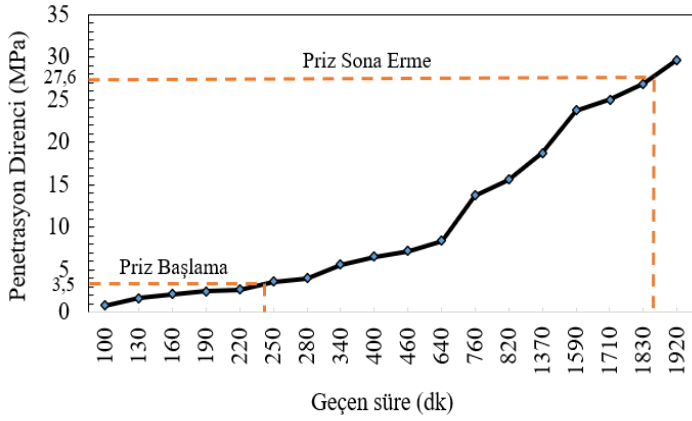
Şekil 4.8: $\text{Na}_2\text{SiO}_3/(\text{Na}_2\text{SiO}_3+\text{SK}) = 0.15$ karışımlarının priz sürelerine ait grafikler



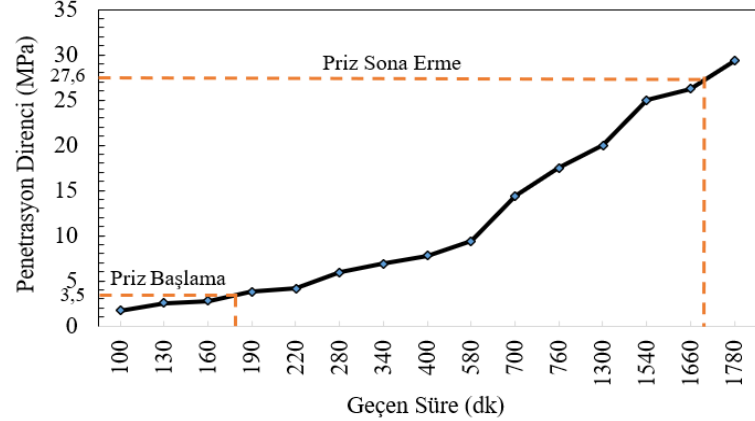
a) 1SD_0.20N



b) 0.75SD_0.25YFC_0.20N

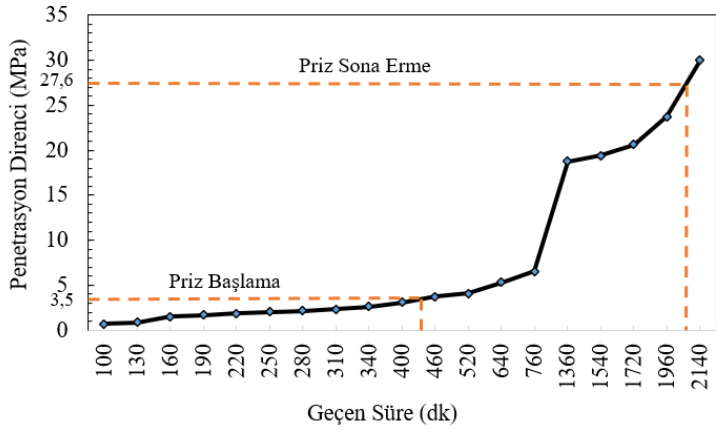


c) 0.50SD_0.50YFC_0.20N

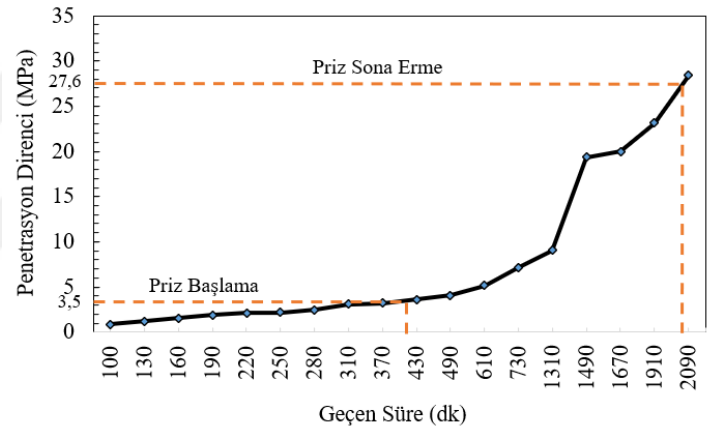


d) 0.75SD_0.125YFC_0.125UK_0.20N

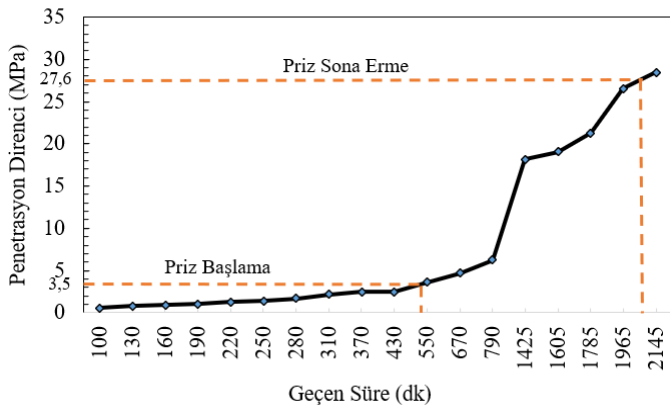
Şekil 4.9: $\text{Na}_2\text{SiO}_3/(\text{Na}_2\text{SiO}_3+\text{SK})=0.20$ karışımlarının priz sürelerine ait grafikler



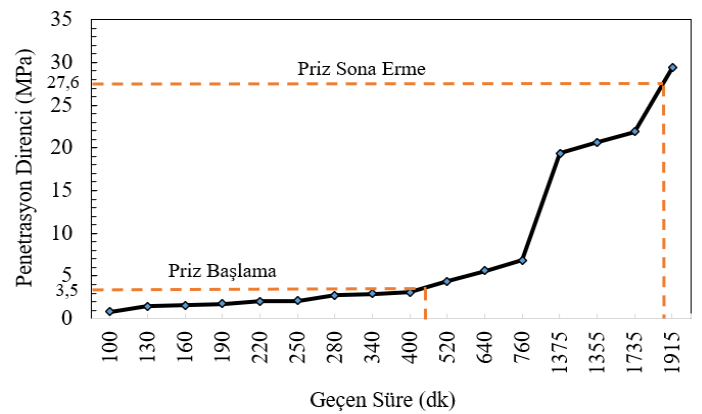
a) 1SD_0.25N



b) 0.75SD_0.25YFC_0.25N



c) 0.50SD_0.50YFC_0.25N



d) 0.75SD_0.125YFC_0.125UK_0.25N

Şekil 4.10: $\text{Na}_2\text{SiO}_3/(\text{Na}_2\text{SiO}_3+\text{SK})=0.25$ karışımlarının priz sürelerine ait grafikler

4.2 Sertleşmiş Beton Deneylerine Ait Bulgular

Tez çalışması kapsamında tasarlanan geri dönüştürülmüş agrega içeren Kontrol KYB karışımı ile 12 farklı hibrit alkali aktivatörlü çimentosuz KYB karışımlarından üretilen numuneler üzerinde yapılan sertleşmiş beton testlerine ait mekanik (basınç, yarmada çekme ve elastisite modülü) ve durabilite (kılcal su emme) deneylerinden elde edilen bulgular Çizelge 4.2’de sunulmuştur.



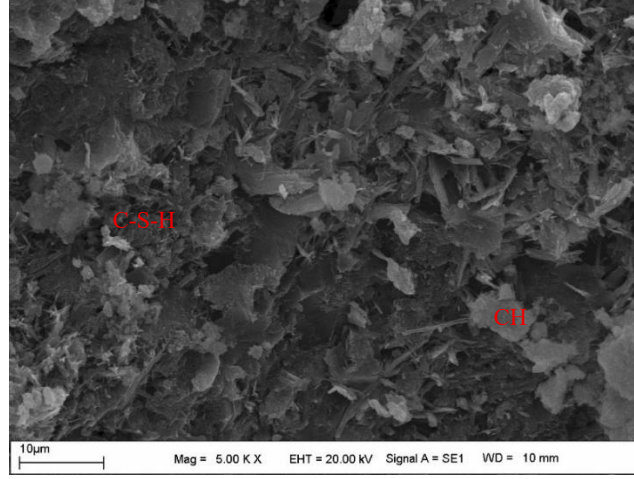
Çizelge 4.2: KYB karışımlarına ait mekanik ve durabilite özellikleri

Karışım Adı	Mekanik							Durabilite
	Basınç Dayanımları (MPa)			Yarmada Çekme Dayanımları (MPa)			Elastisite Modülü (MPa)	Kılcal Su Emme Katsayıları (x10 ⁻³) (cm/sn ^{1/2})
	7 g	28 g	90 g	7 g	28 g	90 g	28 g	90 g
0.67SK_1SD_0.15N	22	34.3	37.1	1.2	2.2	2	6710	6.62
0.67SK_0.75SD_0.25YFC_0.15N	21	39.5	39.9	1.7	2.3	2.5	8830	7.74
0.67SK_0.50SD_0.50YFC_0.15N	22.8	37.5	42.4	1.9	2.2	1.7	7760	15.67
0.67SK_0.75SD_0.125YFC_0.125UK_0.15N	24.1	40.3	40.4	1.6	1.8	2	7840	10.06
0.67SK_1SD_0.20N	20.5	31.4	35.2	1.4	1.6	1.9	5890	8.59
0.67SK_0.75SD_0.25YFC_0.20N	23.4	40.2	41.2	1.6	2.2	2.4	7910	12.41
0.67SK_0.50SD_0.50YFC_0.20N	23.2	40.2	41.6	1.7	1.9	2.5	7090	23.12
0.67SK_0.75SD_0.125YFC_0.125UK_0.20N	23.4	35.2	39.3	1.7	2.1	2	7670	14.01
0.67SK_1SD_0.25N	16	31.7	26.8	1	1.5	1.5	4090	7.30
0.67SK_0.75SD_0.25YFC_0.25N	17.7	32.9	34.2	1.6	2.1	2	6290	8.97
0.67SK_0.50SD_0.50YFC_0.25N	16.2	33.5	34.6	1.6	2	2.1	4400	17.44
0.67SK_0.75SD_0.125YFC_0.125UK_0.25N	19	31.8	31.4	1.3	1.8	1.8	4240	11.06
Kontrol	31.6	47	56.4	2.9	4.2	4.8	24910	3.08

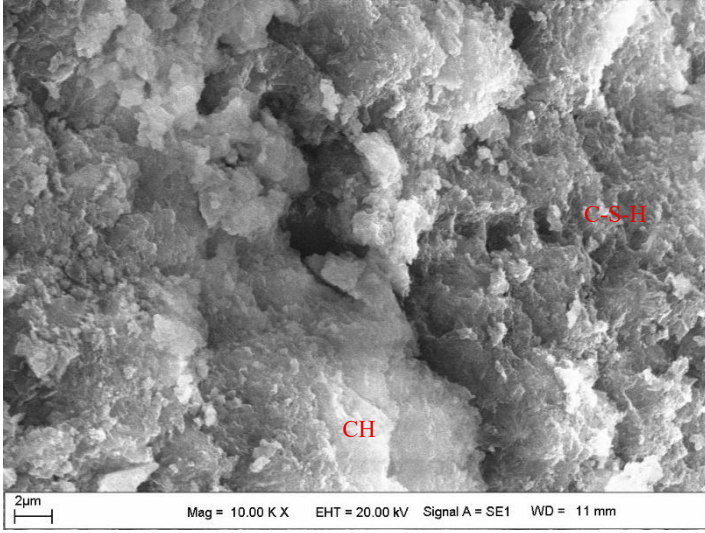
4.2.1 Basınç dayanımı

Tez çalışması kapsamında hazırlanan geri dönüştürülmüş agrega içeren Kontrol KYB ve hibrit alkali aktivatörlü çimentosuz KYB karışımlarına ait basınç dayanımı değerleri Çizelge 4.2 ve Şekil 4.15'te verilmiştir. Elde edilen verilere göre geri dönüştürülmüş agrega içeren Kontrol KYB numunesine ait 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımı değerleri sırasıyla 31.6, 47.0 ve 56.4 MPa olarak bulunmuştur. Bazı araştırmacılar tarafından da bulunduğu üzere (El-Diadamony ve diğ, 2018; Zhang ve diğ, 2021; Türk, 2012), kür gününün artmasıyla birlikte artan basınç dayanımının nedeni zamanla gelişen C-S-H hidratasyon ürünlerine dayandırılabilir (Bakınız Şekil 4.11).

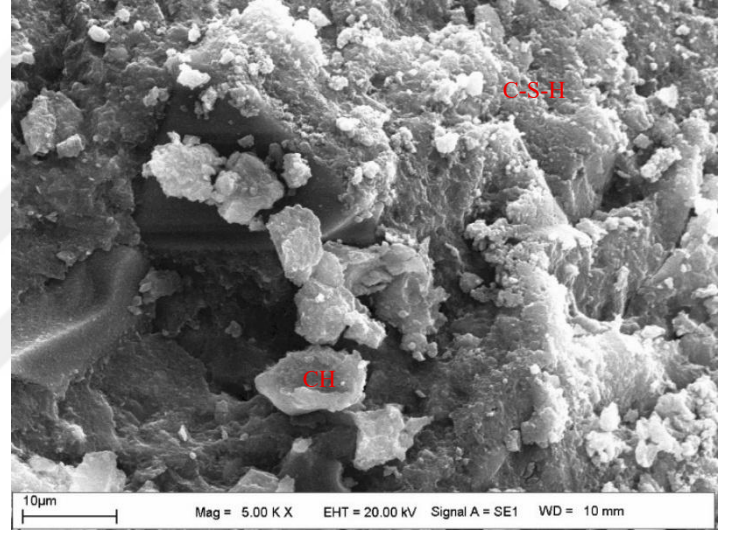
Geri dönüştürülmüş agrega içeren çimentosuz KYB karışımları arasında 28 günlük en yüksek basınç dayanımı değeri 40.3 MPa ile 0.67SK_0.75SD_0.125YFC_0.125UK_0.15N karışımında elde edilmiştir. Bunu 40.2 MPa ile 0.67SK_0.75SD_0.25YFC_0.20N ve 0.67SK_0.50SD_0.50YFC_0.20N karışımları takip etmiştir. Diğer taraftan, en düşük basınç dayanımı değerleri ise 31.4, 31.7 ve 31.8 MPa ile sırasıyla 0.67SK_1SD_0.20N, 0.67SK_1SD_0.25N ve 0.67SK_0.75SD_0.125YFC_0.125UK_0.25N karışımlarında elde edilmiştir. Bu bulgular Şekil 4.12.d, Şekil 4.13.a, Şekil 4.14 a ve d'de gösterilen Scanning Electron Microscopy (SEM) görüntüleri ile tutarlıdır. Çünkü en yüksek basınç dayanımına sahip olan 0.67SK_0.75SD_0.125YFC_0.125UK_0.15N numunesinde en fazla C-S-H jelleri oluşurken basınç dayanımı düşük olan numunelerin (0.67SK_1SD_0.20N, 0.67SK_1SD_0.25N ve 0.67SK_0.75SD_0.125YFC_0.125UK_0.25N) SEM görüntülerinde ise daha fazla miktarda CH hidratasyon ürününün olduğu görülmektedir. 90 günlük en yüksek basınç dayanımı değeri 42,4 MPa ile 0.67SK_0.50SD_0.50YFC_0.15N karışımında elde edilirken, 90 günlük en düşük basınç dayanımı değeri 26,8 MPa ile 0.67SK_1SD_0.25N karışımında bulunmuştur. Elde edilen bulgulardan görüldüğü üzere tüm karışımların basınç dayanım değerleri tez çalışmasının hedef dayanımı olan 25 MPa'ı sağlamıştır. Ayrıca yukarıdaki bulgular esas alındığında karışıma aktivatör olarak dahil edilen sodyum silikat miktarının artmasının basınç dayanımı üzerinde genelde olumsuz bir etkiye sahip olduğu ve dolayısıyla bu çalışmada $\text{Na}_2\text{SiO}_3/(\text{Na}_2\text{SiO}_3+\text{SK})$ oranı için 0.15 ve 0.20'nin basınç dayanımı açısından çimentosuz KYB için daha uygun oranlar olduğu sonucuna varılabilir.



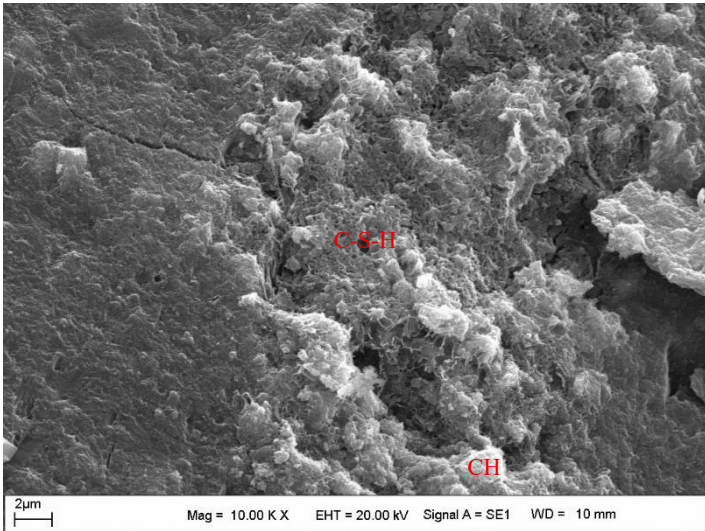
Şekil 4.11: Kontrol KYB karışımına ait 28 günlük SEM görüntüsü



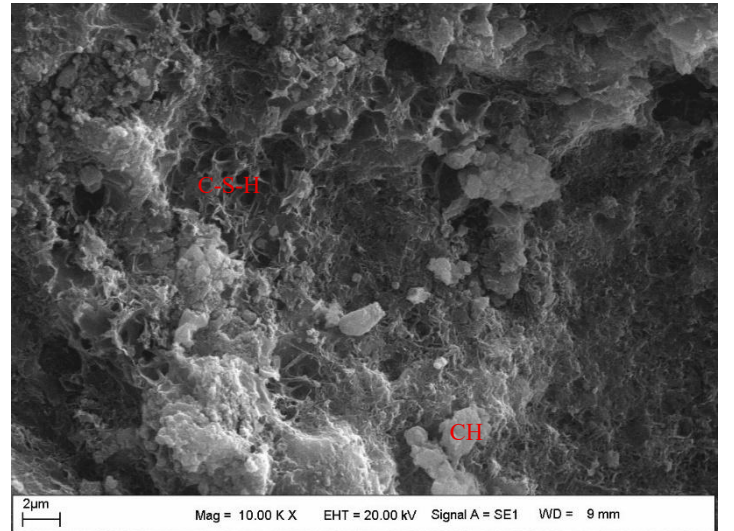
a) 0.67SK_1SD



b) 0.67SK_0.75SD_0.25YFC

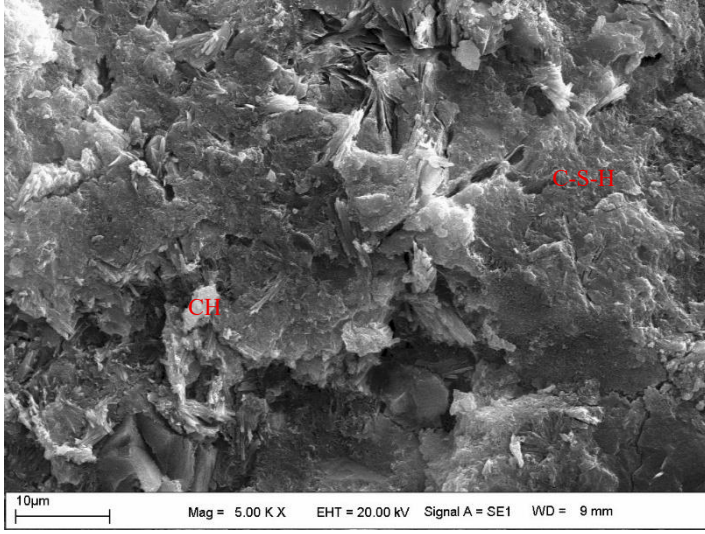


c) 0.67SK_0.50SD_0.50YFC

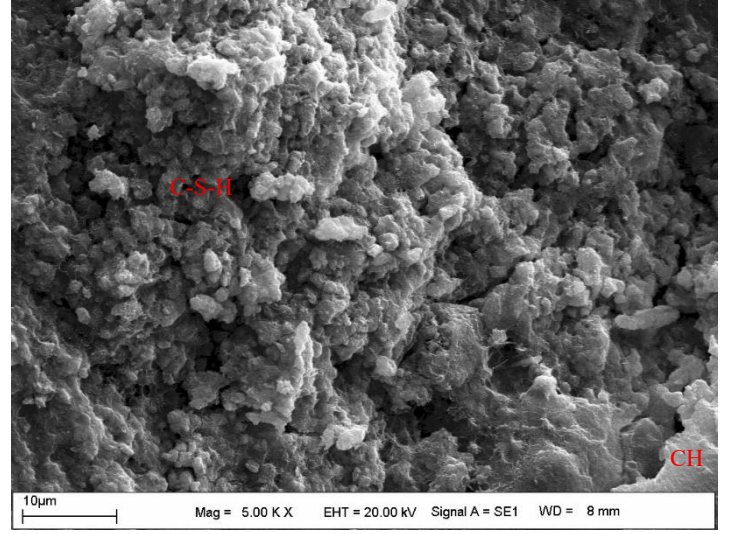


d) 0.67SK_0.75SD_0.125YFC_0.125UK

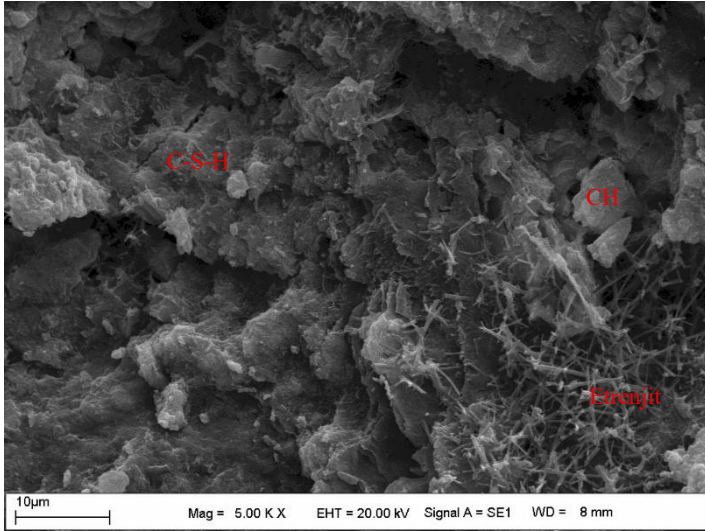
Şekil 4.12: $\text{Na}_2\text{SiO}_3/(\text{Na}_2\text{SiO}_3+\text{SK})$ oranı 0.15 olan çimentosuz KYB karışımlarına ait 28 günlük SEM görüntüleri



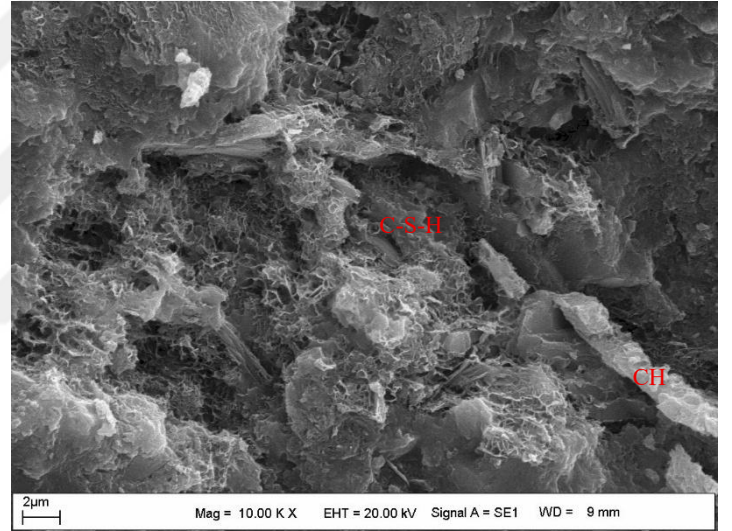
a) 0.67SK_1SD



b) 0.67SK_0.75SD_0.25YFC

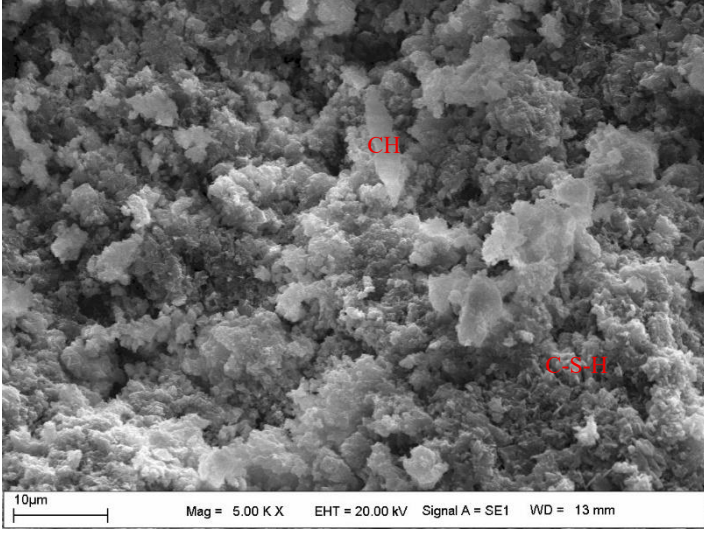


c) 0.67SK_0.50SD_0.50YFC

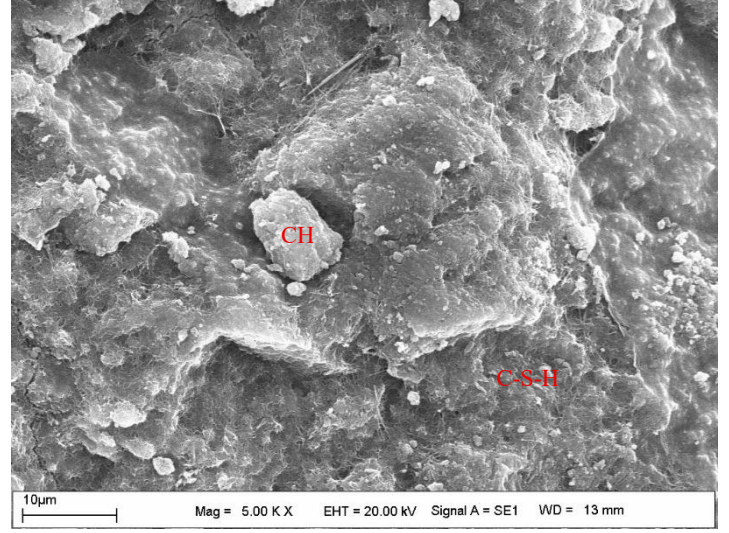


d) 0.67SK_0.75SD_0.125YFC_0.125UK

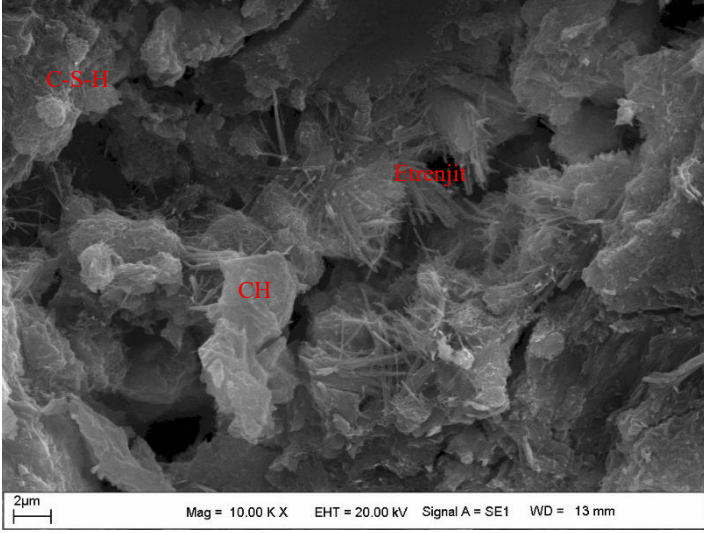
Şekil 4.13: $\text{Na}_2\text{SiO}_3/(\text{Na}_2\text{SiO}_3+\text{SK})$ oranı 0.20 olan çimentosuz KYB karışımlarına ait 28 günlük SEM görüntüleri



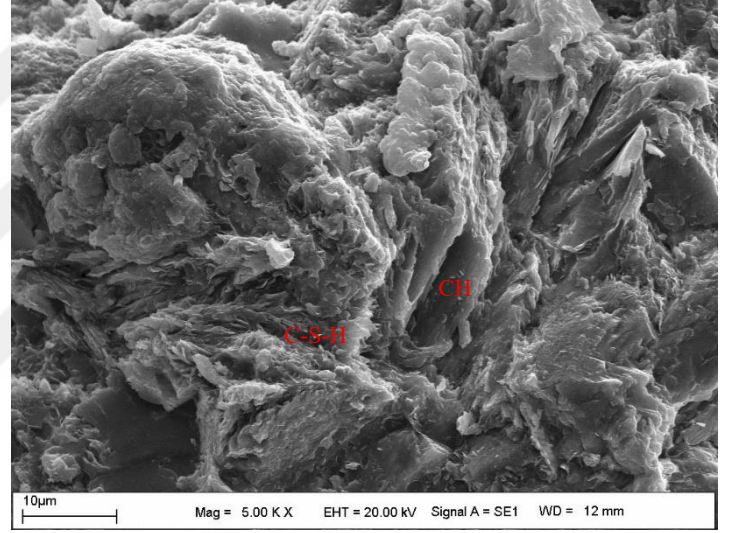
a) 0.67SK_1SD



b) 0.67SK_0.75SD_0.25YFC



c) 0.67SK_0.50SD_0.50YFC



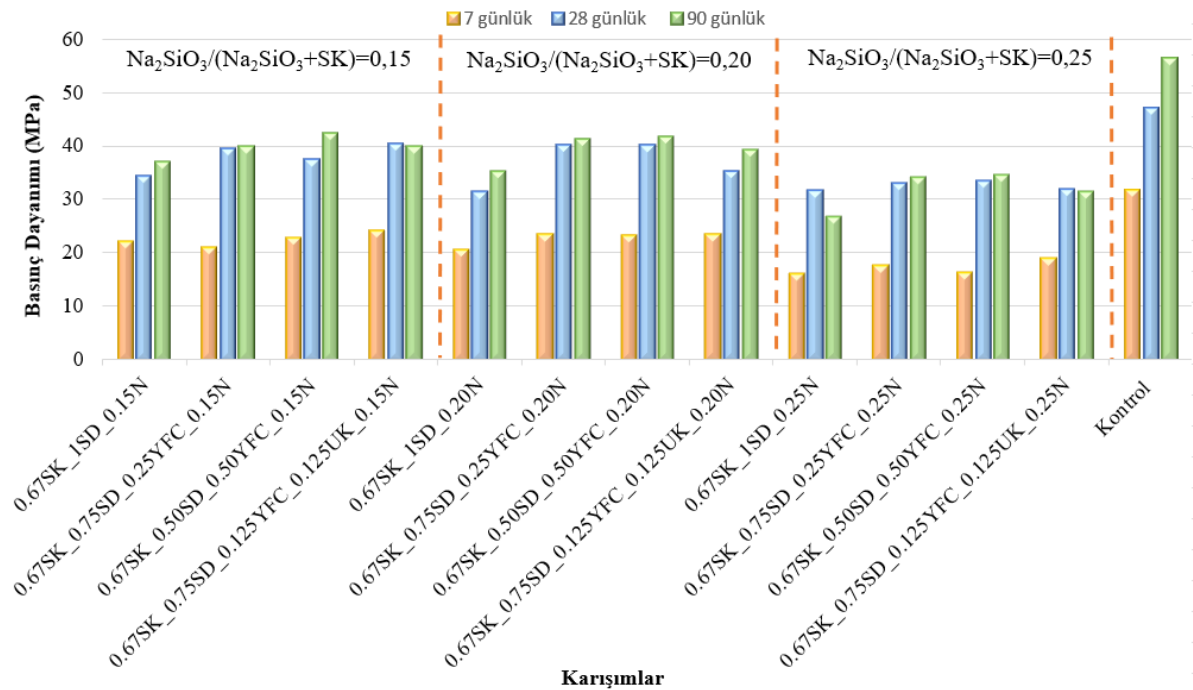
d) 0.67SK_0.75SD_0.125YFC_0.125UK

Şekil 4.14: $\text{Na}_2\text{SiO}_3/(\text{Na}_2\text{SiO}_3+\text{SK})$ oranı 0.25 olan çimentosuz KYB karışımlarına ait 28 günlük SEM görüntüleri

Tüm $\text{Na}_2\text{SiO}_3/(\text{Na}_2\text{SiO}_3+\text{SK})$ oranları için tüm karışımlara ait numunelerin standart 28 günlük dayanımları 7 günlük erken dayanımlarından daha yüksek çıkarken 90 günlük dayanımların 28 günlük dayanımlara kıyasla genelde çok az arttığı (yaklaşık %5,94) görülmüştür. Bunun yanında, 90 günlük dayanımların 28 günlük dayanımlara kıyasla, 0.67SK_1SD_0.25N ve 0.67SK_0.75SD_0.125YFC_0.125UK_0.25N karışımlarına ait numuneler için sırasıyla, %15,45 ve %1,26 oranlarda azaldığı tespit edilmiştir. 90 günlük numunelerin basınç dayanımlarındaki azalma suda kür edilen söz konusu numunelerdeki cam suyu (Na_2SiO_3) alkali sızıntısı (Leaching) olayına dayandırılmaktadır. Çünkü uzun süreli su kürü esnasında numune içerisinde bulunan Na^+ ve OH^- suya geçmesi sebebiyle

numunede boşluklu bir iç yapıya neden olduğu ve dolayısıyla dayanım kaybına yol açtığı bilinmektedir.

Bağlayıcıların miktarı ve harmanlanma durumu dikkate alındığında, tüm $\text{Na}_2\text{SiO}_3/(\text{Na}_2\text{SiO}_3+\text{SK})$ oranlarında 28 ve 90 günlük kür günleri için en düşük basınç dayanımı değeri %100 SD içeren karışımlarda görülmüştür. İçerisinde UK'nin bulunduğu üçlü harmanlamaya sahip karışımların 28 ve 90 günlük basınç dayanımlarının, %100 SD içeren karışımlardan daha yüksek olduğu fakat 0.67SK_0.75SD_0.125YFC_0.125UK_0.15N karışımı hariç ikili harmanlanmış karışımlardan genelde daha düşük olduğu tespit edilmiştir. En iyi basınç dayanımı değerleri ise, tüm $\text{Na}_2\text{SiO}_3/(\text{Na}_2\text{SiO}_3+\text{SK})$ oranlarında da 28 ve 90 kür günleri için genelde YFC içeren ikili harmanlanmış karışımlardan elde edilmiştir. Bu sonuç YFC içerisinde yüksek oranda bulunan CaO miktarına dayandırılabilir. Kim ve diğ. (2013) tarafından yürütülen YFC bazlı geopolimer betonda CaO aktivatör olarak kullanımı ile ilgili deneysel çalışmada da benzer sonuç bulunmuş olup, söz konusu çalışmada CaO kullanımının $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 'den daha yüksek dayanım sağladığı bulunmuştur. İkili harmanlamaya sahip karışımlara ait numunelerin basınç dayanımlarının genelde diğer tüm karışımlara kıyasla daha yüksek olmasını Şekil 4.12, Şekil 4.13 ve Şekil 4.14'de sunulan SEM görüntüleri de desteklemektedir. Çünkü basınç dayanımı düşük olan numunelere ait SEM görüntülerinde daha fazla miktarda CH hidratasyon ürününün geliştiği görülmektedir.



Şekil 4.15: Karışımlara ait basınç dayanımı değerleri

4.2.2 Yarmada çekme dayanımı

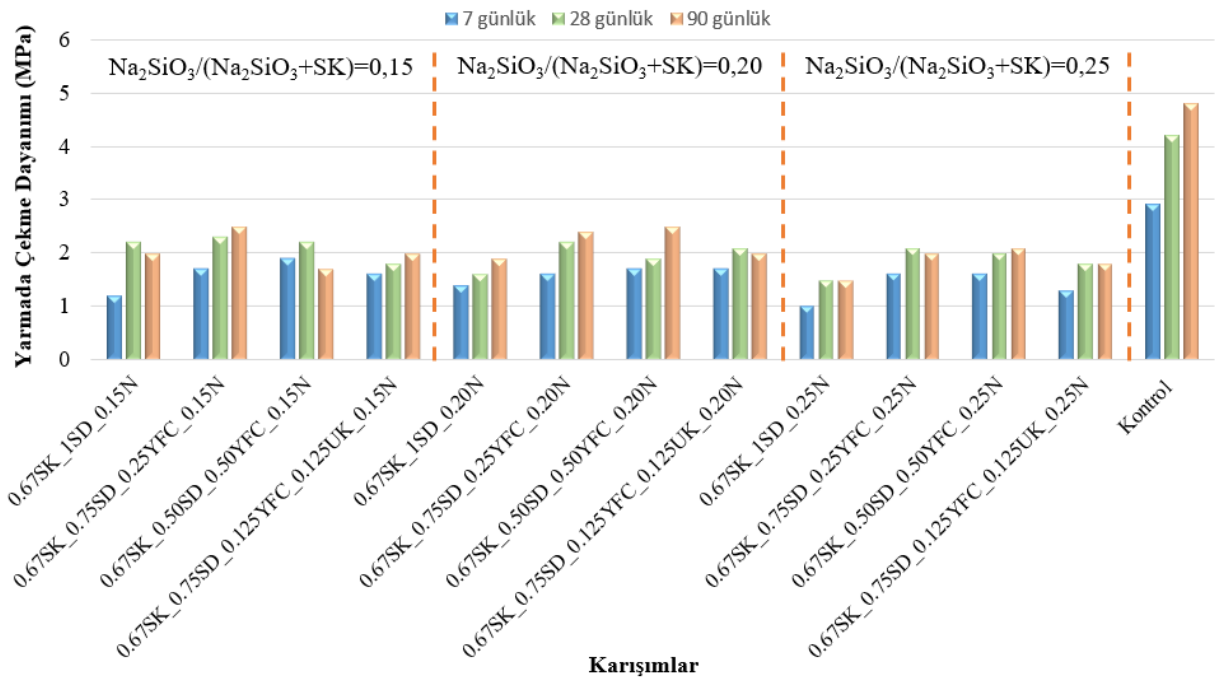
Hazırlanan geri dönüştürülmüş agrega içeren Kontrol KYB ve hibrit alkali aktivatörlü çimentosuz KYB karışımlarına ait yarmada çekme değerleri Çizelge 4.2 ve Şekil 4.16'da verilmiştir. Bulgulara göre, geri dönüştürülmüş agrega içeren Kontrol KYB numunesinin 7, 28 ve 90 günlük yarmada çekme dayanımı değerleri sırasıyla 2.9, 4.2, 4.8 MPa olarak bulunmuştur. Zamanla artan bu dayanım gelişen C-S-H jellerine dayandırılabilir (Zhang ve diğ, 2021; Türk, 2012). Geri dönüştürülmüş agrega içeren çimentosuz KYB numunelerinde ise 28 günlük kür günü için en yüksek yarmada çekme dayanımı 2.3 MPa ile 0.67SK_0.75SD_0.25YFC_0.15N karışımında elde edilmiştir. 90 günlük kür günleri için en yüksek yarmada çekme dayanımı ise 2.5 MPa ile 0.67SK_0.75SD_0.25YFC_0.15N ve 0.67SK_0.50SD_0.50YFC_0.20N karışımlarından elde edilmiştir. Diğer yandan, hem 28 hem de 90 günlük kür günleri için en düşük yarmada çekme dayanımı değeri ise 1.5 MPa olarak 0.67SK_1SD_0.25N karışımında görülmüştür.

Tüm $\text{Na}_2\text{SiO}_3/(\text{Na}_2\text{SiO}_3+\text{SK})$ oranları için tüm karışımlara ait numunelerin standart 28 günlük yarmada çekme dayanımlarının 7 günlük erken dayanımlardan daha yüksek çıktığı görülmüştür. Bunun yanında, bazı karışımlara ait numunelerin 90 günlük yarmada çekme dayanımlarında 28 günlük dayanımlara kıyasla genelde çok az artış olduğu (yaklaşık %14,04), bazı karışımlara ait numunelerde ise 90 günlük dayanımlarda 28 günlük dayanımlara kıyasla azalmalar (yaklaşık %10,34) meydana geldiği tespit edilmiştir. Diğer taraftan 0.67SK_1SD_0.25N ve 0.67SK_0.75SD_0.125YFC_0.125UK_0.25N karışımlara ait numunelerin 90 günlük yarmada çekme dayanımlarında 28 günlük dayanımlara kıyasla herhangi bir değişiklik olmadığı, dayanımların aynı kaldığı görülmüştür. 90 günlük numunelerin yarmada çekme dayanımlarındaki azalma veya dayanımlarında herhangi bir değişim olmaması suda kürün sebep olduğu cam suyu (Na_2SiO_3) alkali sızıntısı (Leaching) olayına dayandırılmaktadır. Çünkü uzun süreli su kürü esnasında numune içerisinde bulunan Na^+ ve OH^- suya geçmesi sebebiyle bağlayıcı jel yapısının bozulması ve dolayısıyla dayanım kaybına yol açtığı bilinmektedir.

$\text{Na}_2\text{SiO}_3/(\text{Na}_2\text{SiO}_3+\text{SK})$ oranının 0.15'ten 0.20'ye artmasının tüm karışımlara ait numunelerin yarmada çekme dayanımları üzerinde 7, 28 ve 90 günlük kür günleri için önemli bir etkiye sahip olmadığı görülmüştür. Ancak $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{Na}_2\text{SiO}_3+\text{SK}$ oranının 0.15'ten 0.25'e artması durumunda tüm kür günleri için tüm karışımlara ait numunelerin yarmada çekme dayanımlarında genelde bir azalmaya neden olurken bu azalmanın standart ve nihai yarmada çekme dayanım değerleri için kayda değer düzeyde olduğu tespit

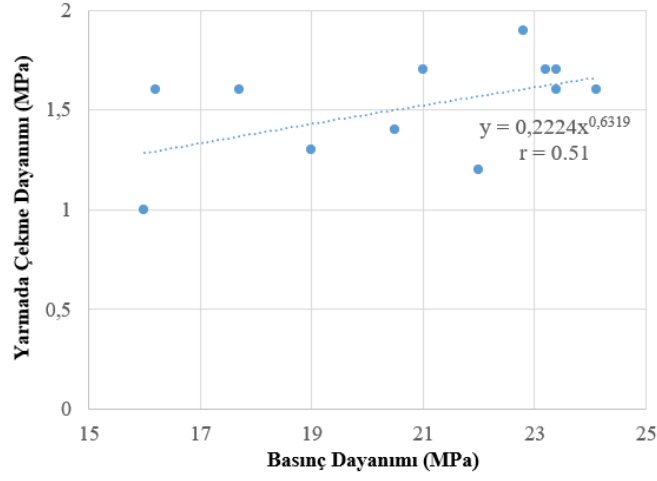
edilmiştir. Bütün bunlara ilaveten, bu çalışmada, Yarmada çekme dayanımı açısından basınç dayanımında olduğu gibi $\text{Na}_2\text{SiO}_3/(\text{Na}_2\text{SiO}_3+\text{SK})$ oranı için 0.15 ve 0.20'nin çimentosuz KYB için daha uygun oranlar olduğu sonucuna varılabilir.

Bağlayıcıların miktarı ve harmanlanma durumu dikkate alındığında, tüm $\text{Na}_2\text{SiO}_3/(\text{Na}_2\text{SiO}_3+\text{SK})$ oranları için genelde 28 ve 90 günlük kür günleri için de en düşük yarmada çekme dayanımları %100SD içeren karışımlarda görülürken en yüksek yarmada çekme dayanımları ise genellikle ikili harmanlanmış karışımlarda elde edilmiştir.

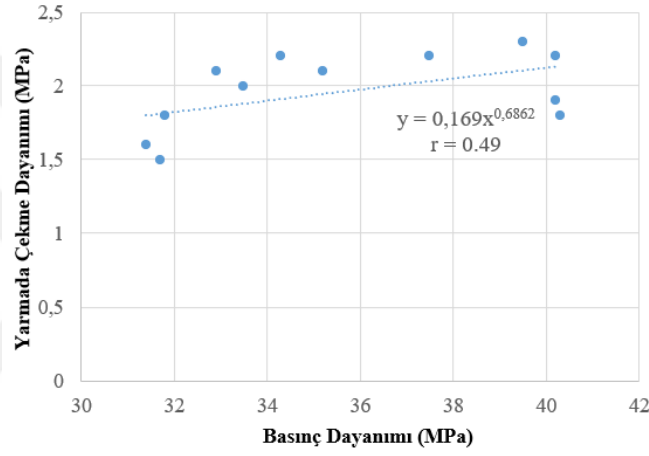


Şekil 4.16: Karışımlara ait yarmada çekme dayanım değerleri

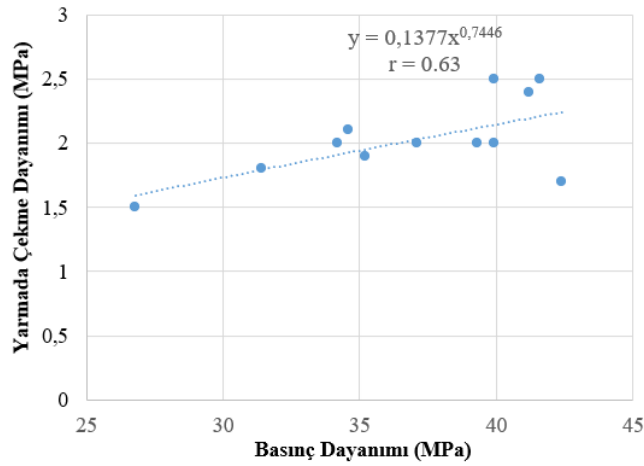
Şekil 4.17 a,b ve c'de hibrit alkali aktivatör içeren çimentosuz KYB karışımları için erken, standart ve nihai kür günlerine ait basınç ve yarmada çekme dayanımları arasındaki polinomsal regresyon analizleri için grafikler sunulmuştur. Bu analizden belirlenen formülasyonda, iki regresyon parametresi x ve y tanımlanmıştır. y eksenini basınç dayanımını ve x eksenini yarmada çekme dayanımını temsil etmektedir. Grafiklerden görüldüğü üzere çimentosuz KYB karışımları için en iyi yarmada çekme dayanımı tahmini $r = 0.63$ ile 90 günlük kür süresi için olduğu sonucu ortaya çıkmaktadır. Dolayısıyla, bu denklemin çimentosuz KYB için 90 günlük basınç dayanımı ile yarmada çekme dayanımı arasındaki ilişkiyi tahmin etmede kabul edilebilir düzeye yakın olduğu sonucuna varılabilir.



a) 7 günlük kür süresi için



b) 28 günlük kür süresi için



c) 90 günlük kür süresi için

Şekil 4.17: Çimentosuz KYB karışımları için yarmada çekme ve basınç dayanımı arasındaki ilişki

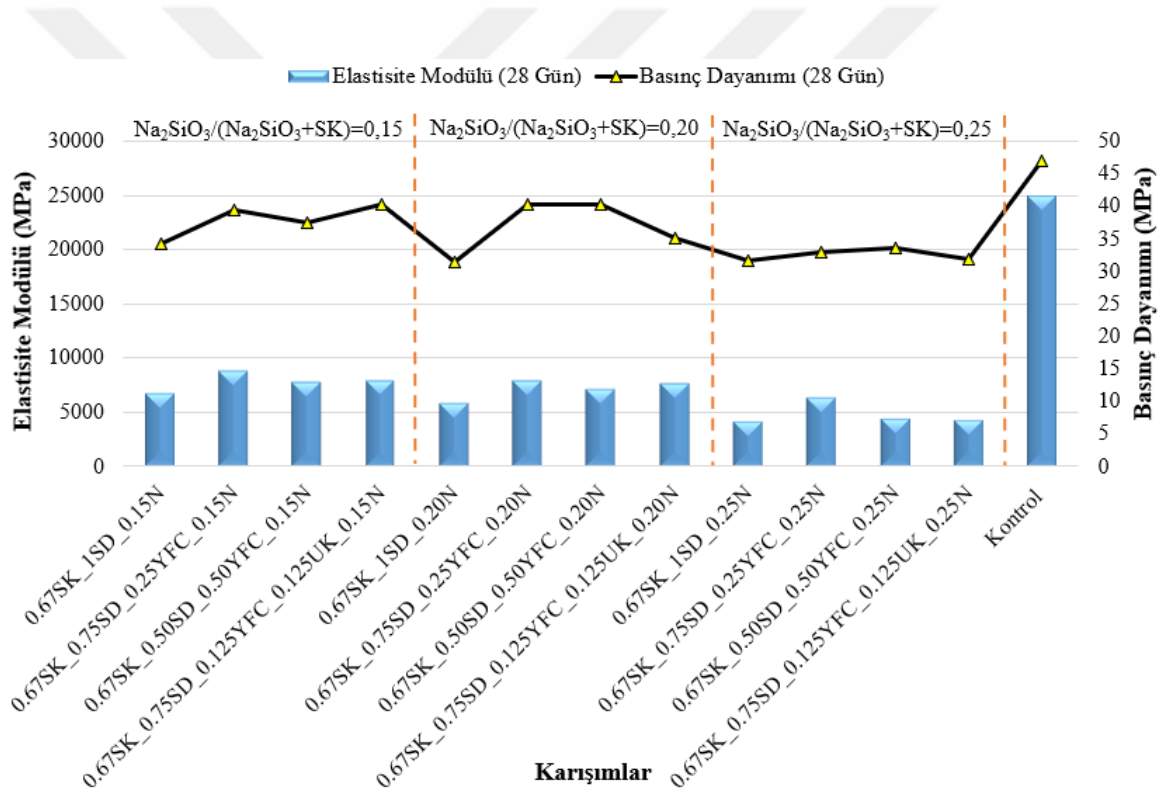
4.2.3 Elastisite modülü

Tez çalışması kapsamında hazırlanan geri dönüştürülmüş agregaya içeren Kontrol KYB ve hibrit alkali aktivatörlü çimentosuz KYB karışımlarına ait elastisite modülü değerleri Çizelge 4.2 ve Şekil 4.18’de verilmiştir. Elde edilen bulgulara göre geri dönüştürülmüş agregaya içeren Kontrol KYB numunesinin 28 günlük elastisite modülü değeri 24910 MPa olarak bulunmuştur. Geleneksel KYB’nin elastisite modülünün literatüre kıyasla düşük çıkmasının sebebi doğal agregaya yerine %100 geri dönüştürülmüş agregaya kullanımına dayandırılabilir (Mohammed ve diğ, 2018; Lye ve diğ, 2013; Alkhteeb ve diğ, 2025). Geri dönüştürülmüş agregaya içeren çimentosuz KYB numunelerinde ise en yüksek 28 günlük elastisite modülü 8830 MPa ile 0.67SK_0.75SD_0.25YFC_0.15N karışımında elde edilmiş olup en düşük 28 günlük elastisite modülü ise 4090 MPa ile 0.67SK_1SD_0.25N karışımından elde edilmiştir. Bulgular esas alındığında literatürdeki geopolimer betonlara göre bu çalışmadaki hibrit alkali aktivatör içeren çimentosuz KYB karışımlarına ait numunelerin daha düşük elastisite modülü değerlerine sahip olmalarının sebebi doğal agregaya yerine %100 oranında geri dönüştürülmüş agregaya kullanılmasına dayandırılabilir. Literatürdeki ilgili çalışmalar tez çalışmamızın bulgularını desteklemektedir. Örneğin, Nikmehr ve diğ. (2024) yapılan çalışmada doğal agregaya yerine %25, %50 ve %100 oranlarında geri dönüştürülmüş agregaya içeren geopolimer betonların elastisite modülü değerlerinin sırasıyla 7.15 GPa, 6.60 GPa ve 6.45 GPa aralığında elde edildiği görülmektedir. Ayrıca literatürde yer alan başka bir deneysel çalışmada (Shaikh, 2016) doğal iri agregaya yerine %15, %30 ve %50 oranlarında geri dönüştürülmüş agregaya içeren geopolimer betonların 28 günlük elastisite modülleri sırasıyla 20, 15 ve 14 GPa olduğu bulunmuştur.

$\text{Na}_2\text{SiO}_3/(\text{Na}_2\text{SiO}_3+\text{SK})$ oranının artmasının tüm karışımlara ait numunelerin elastisite modülü değerlerinde azalmaya sebep olduğu görülmüştür. $\text{Na}_2\text{SiO}_3/(\text{Na}_2\text{SiO}_3+\text{SK})$ oranının 0.15’ten 0.20’ye artmasının elastisite modülü değerleri üzerinde önemli oranda bir azalmaya sebep olmadığı tespit edilmiştir. Bu azalmanın %100SD içeren karışımlar için %12.2 oranında, ikili bağlayıcı harmanlamasına sahip karışımlar için ortalama %9.5 oranında ve UK içeren üçlü bağlayıcı harmanlamasına sahip karışımlar için %2 oranında bir azalmanın olduğu bulunmuştur. Bunun yanında $\text{Na}_2\text{SiO}_3/(\text{Na}_2\text{SiO}_3+\text{SK})$ oranının 0.15’ten 0.25’e artması durumunda tekli, ikili ve üçlü bağlayıcı harmanlamasına sahip karışımlara ait numunelerin elastisite modülü değerlerinde önemli oranda (ortalama %39.23) azalmanın olduğu görülmüştür. Dolayısıyla çimentosuz KYB açısından en iyi $\text{Na}_2\text{SiO}_3/(\text{Na}_2\text{SiO}_3+\text{SK})$

oranının 0.15 olduğu ve 0.20 oranının da çimentosuz KYB üretmek için kullanılabilir olduğu sonucuna varılmıştır.

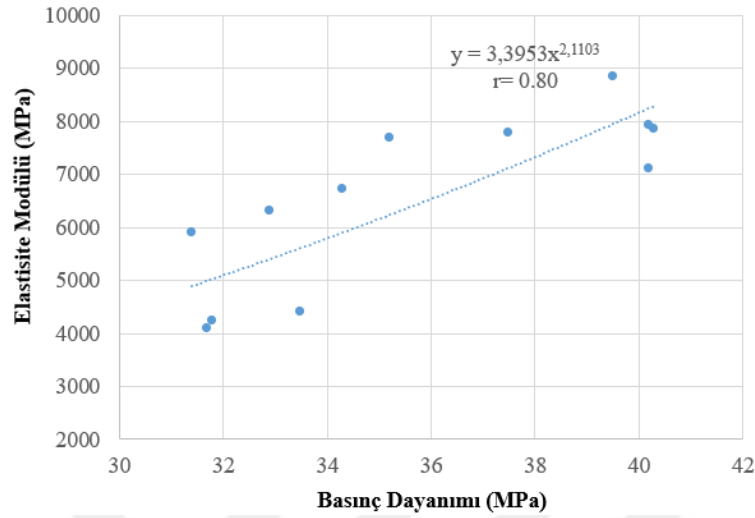
Bağlayıcı miktarı ve kombinasyonları dikkate alındığında ise tüm $\text{Na}_2\text{SiO}_3/(\text{Na}_2\text{SiO}_3+\text{SK})$ oranları için en düşük elastisite modülü değeri %100 SD nin olduğu karışımlara ait numunelerde görülürken, tüm $\text{Na}_2\text{SiO}_3/(\text{Na}_2\text{SiO}_3+\text{SK})$ oranları içinde en yüksek elastisite modülü değerleri ise %25 YFC içeren ikili harmanlanmış karışımlara ait numunelerde elde edilmiştir. Elde edilen bu bulgunun sebeplerinden biri de Şekil 4.12, Şekil 4.13 ve Şekil 4.14 sunulan SEM görüntülerinden de görüleceği üzere, bu numunelerin iç yapısındaki C-S-H jellerinin daha yoğun olmasından kaynaklandığı değerlendirilmektedir. Çünkü bu durum iç yapı bütünlüğü sağlayarak elastisite modülü değerinde artışa sebep olabileceği düşünülmektedir.



Şekil 4.18: Karışımlara ait 28 günlük elastisite modülü değerleri

Şekil 4.19’da verilen grafikte hibrit alkali aktivatör içeren çimentosuz KYB karışımları için 28 günlük kür sürelerine ait basınç dayanımı ve elastisite modülü arasındaki polinomsal regresyon analizi sunulmuştur. Bu analizden belirlenen formülasyonda, iki regresyon parametresi x ve y tanımlanmıştır. y eksenini basınç dayanımını ve x eksenini elastisite modülü değerini temsil etmektedir. Grafiklerden görüldüğü üzere çimentosuz KYB karışımları için elastisite modülü tahmini $r = 0.80$ olarak bulunmuştur. Dolayısıyla, bu denklemin

çimentosu KYB için 28 günlük basınç dayanımı ile elastisite modülü arasındaki ilişkiyi tahmin etmede kullanılabileceği sonucuna varılabilir.



Şekil 4.19: Çimentosuz KYB karışımları için elastisite modülü ve basınç dayanımı arasındaki ilişki

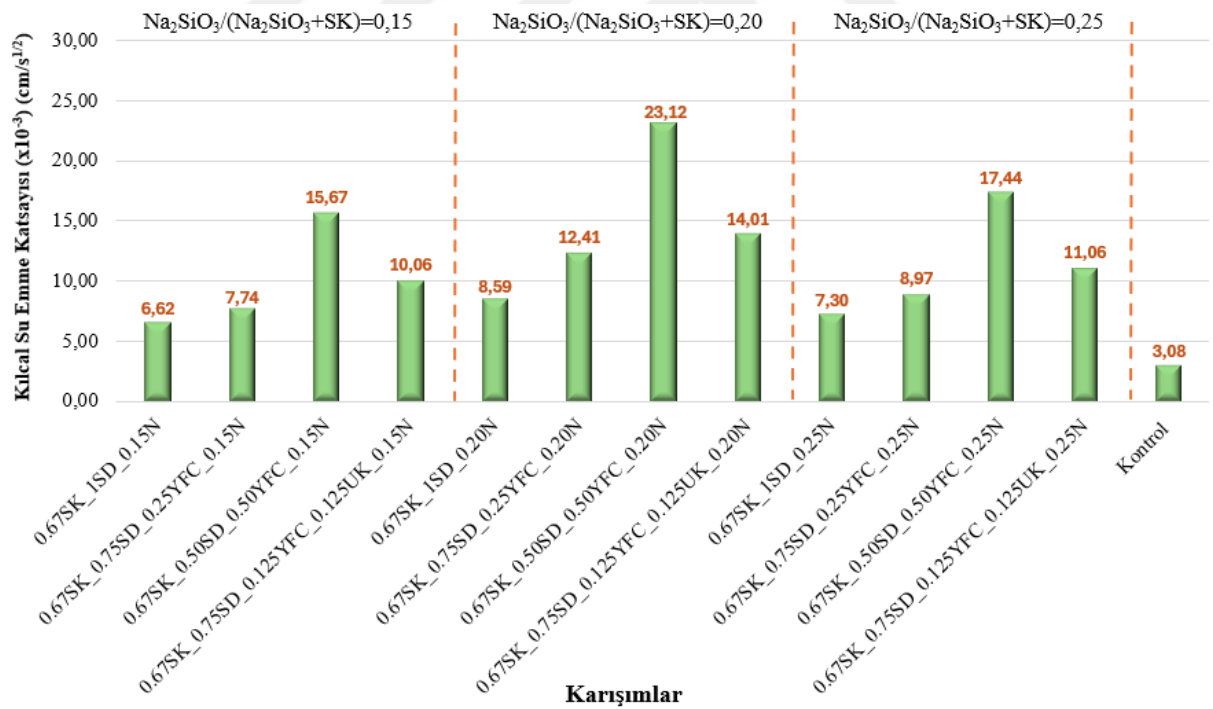
4.2.4 Kılcal su emme

Betonun gözeneklilik yapısını ve su geçirgenlik özelliğini değerlendirmek amacıyla kılcal su emme deneyi gerçekleştirilmiş ve elde edilen veriler Çizelge 4.2 ve Şekil 4.20’de sunulmuştur. Bulgulara göre, geri dönüştürülmüş agregaya içeren Kontrol KYB numunesinin kılcal su emme katsayısı $3.08 \times 10^{-3} \text{ cm/s}^{1/2}$ olarak bulunmuştur. Geri dönüştürülmüş agregaya içeren çimentosuz KYB numunelerinde ise en yüksek su emme katsayısı $23.12 \times 10^{-3} \text{ cm/s}^{1/2}$ ile 0.67SK_0.50SD_0.50YFC_0.20N numunesinde olduğu görülürken, en düşük su emme katsayısı $6.62 \times 10^{-3} \text{ cm/s}^{1/2}$ ile 0.67SK_1SD_0.15N numunesinde elde edilmiştir.

$\text{Na}_2\text{SiO}_3/(\text{Na}_2\text{SiO}_3+\text{SK})$ oranları karşılaştırıldığında, bu oranın 0.15 ve 0.25 olan karışımlara ait numunelerin kılcal su emme katsayıları arasında bariz bir fark olmadığı görülmüştür. Ancak $\text{Na}_2\text{SiO}_3/(\text{Na}_2\text{SiO}_3+\text{SK})$ oranı 0.20 olan karışımlara ait numunelerin su emme katsayılarının $\text{Na}_2\text{SiO}_3/(\text{Na}_2\text{SiO}_3+\text{SK})$ oranı 0.15 ve 0.25 olan karışımlara ait numunelerin su emme katsayılarından daha yüksek olduğu görülmüştür.

Bağlayıcıların miktarı ve harmanlanma durumu dikkate alındığında ise, tüm $\text{Na}_2\text{SiO}_3/(\text{Na}_2\text{SiO}_3+\text{SK})$ oranları için en düşük su emme katsayıları %100 SD içeren karışımlara ait numunelerde elde edilirken bunu %75 SD ve %25 YFC içeren ikili harmanlamaya sahip karışımlar takip etmektedir. Bağlayıcı olarak %100 SD ve %75 SD içeren tekli ve ikili bağlayıcı harmanlamasına sahip karışımların tüm $\text{Na}_2\text{SiO}_3/(\text{Na}_2\text{SiO}_3+\text{SK})$

oranları için en düşük su emme katsayısına sahip olmasının sebebi, SD'nin özgül yüzeyinin çimentonunkine göre çok daha yüksek olduğundan ve aynı zamanda karışım içerisinde dolgu etkisi oluşturarak beton karışımındaki mikro boşlukları azalmasına dayandırılabilir. Ayrıca, silis dumanının yüksek pozolanik reaktivite özelliği sebebiyle matrisin homojenliğini artırması ve emiciliğini azaltmasına sebep olan C-S-H jellerini üretmesi de betonun geçirimsizliği açısından büyük öneme sahiptir (Bilal ve diğ., 2021; Chen ve diğ., 2020; Chu ve diğ., 2019; Azizi ve Samimi, 2025). Tüm $\text{Na}_2\text{SiO}_3/(\text{Na}_2\text{SiO}_3+\text{SK})$ oranları için en yüksek su emme katsayıları ise %50 YFC içeren ikili harmanlanmış karışımda görülürken bunu UK içeren üçlü harmanlamanın olduğu karışımlar takip etmektedir. $\text{Na}_2\text{SiO}_3/(\text{Na}_2\text{SiO}_3+\text{SK})$ oranı 0.20 ve 0.25 olan %50 YFC içeren ikili harmanlanmış karışımların su emme katsayılarının çok fazla olmasının bir sebebi de Şekil 4.13.c ve Şekil 4.14.c'de sunulan SEM görüntülerinden de görüleceği üzere geri dönüştürülmüş agrega ile birlikte gelen sülfat iyonlarının hücumu nedeniyle iç yapıda oluşan etrenjitin varlığına dayandırılabilir. Çünkü etrenjit bünyesinde fazla miktarda su (32 mol) tutabilen bir hidratasyon ürünü olduğu literatürden de bilinmektedir (Erdoğan, 2003).



Şekil 4.20: Karışımlara ait 90 günlük kılcal su emme katsayıları

4.3 Büyük Ölçekli Bindirmeli-Ekli Donatılı Geri Dönüştürülmüş Agregalı İçeren Kontrol ve Hibrit Alkali Aktivatörlü Çimentosuz KYB Kirişlerin Aderans Dayanımı

Tez çalışması kapsamında, farklı hibrit aktivatör oranının ve bağlayıcı malzeme kombinasyonunun geri dönüştürülmüş agrega içeren çimentosuz KYB ile donatı arasındaki aderansı üzerindeki etkisini incelemek için her bir karışımdan birer adet olmak üzere 12 adet 200x300x2000 mm³ boyutlarında büyük ölçekli bindirmeli-ekli kiriş numuneleri üretilmiştir. Ayrıca çimentosuz KYB kirişlerin aderans dayanımını karşılaştırmak amacı ile aynı boyutlarda bir adet de çimento içeren geri dönüştürülmüş agregalı Kontrol KYB kiriş numunesi ile birlikte toplamda 13 adet kiriş numunesi üretilmiştir. Tam ölçekli ve dikdörtgen kesitli olarak tasarlanan bu kiriş numuneleri, çekme bölgesinde bindirmeli ekli donatı detayı içerecek şekilde tasarlanmış ve dört noktalı eğilmeye maruz bırakılarak test edilmiştir.

4.3.1 Aderans dayanımlarının değerlendirilmesi

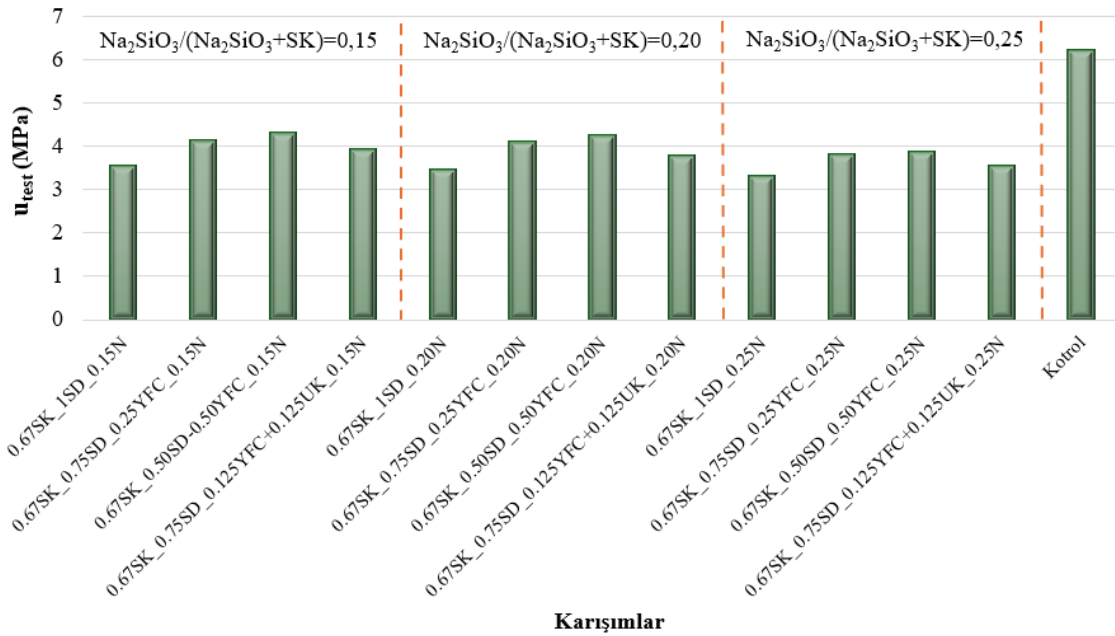
Dört noktalı eğilmeye maruz bırakılan büyük ölçekli Kontrol ve çimentosuz KYB kiriş numunelere ait maksimum göçme yükü ve bu yüklere karşılık gelen sehim değerleri test esnasında kaydedilmiştir. Kiriş elemanların açıklık ortasında bindirmeli-ekli olarak çekme bölgesine yerleştirilen donatıda meydana gelen gerilme aderans dayanımını belirlemek için doğrudan kullanılmıştır. Elde edilen bulgular Çizelge 4.3'te sunulmuştur.

Çizelge 4.3: Bindirmeli-ekli donatıya sahip çimentosuz KYB kirişlerine ait test bulguları

Karışım adı	f_c (MPa)	P_{max} (kN)	M_{max} (kN.m)	f_s' (Mpa)	f_s (MPa)	u_{test} (MPa)
0.67SK_1SD_0.15N	36.30	68.02	20.41	83.4	212.6	3.54
0.67SK_0.75SD_0.25YFC_0.15N	37.90	90.61	27.18	126.8	248.6	4.14
0.67SK_0.50SD-0.50YFC_0.15N	38.50	96.58	28.97	135.0	258.4	4.31
0.67SK_0.75SD_0.125YFC+0.125UK_0.15N	44.90	80.68	24.20	79.2	235.7	3.93
0.67SK_1SD_0.20N	38.50	64.27	19.28	67.6	207.5	3.46
0.67SK_0.75SD_0.25YFC_0.20N	44.70	87.74	26.32	94.9	246.9	4.11
0.67SK_0.50SD_0.50YFC_0.20N	42.20	93.36	28.01	116.4	254.5	4.24
0.67SK_0.75SD_0.125YFC+0.125UK_0.20N	41.45	75.54	22.66	81.2	226.5	3.77
0.67SK_1SD_0.25N	43.00	57.12	17.14	35.4	198.3	3.30
0.67SK_0.75SD_0.25YFC_0.25N	35.60	78.16	23.45	109.5	228.0	3.80
0.67SK_0.50SD_0.50YFC_0.25N	36.45	80.14	24.04	111.3	231.5	3.86
0.67SK_0.75SD_0.125YFC+0.125UK_0.25N	38.40	67.51	20.25	75.3	212.6	3.54
Kontrol	62.45	161.72	48.52	371.9	173.77	6.20

Not: f_c beton basınç dayanımı, P_{max} maksimum göçme yükü, M_{max} maksimum eğilme momenti, f_s' boyuna basınç donatısında oluşan gerilme, f_s boyuna çekme donatısında oluşan çekme gerilmesi ve u_{test} aderans dayanımıdır.

Çizelge 4.3 ve Şekil 4.21 incelendiğinde geri dönüştürülmüş agrega içeren çimentosuz KYB numunelerinde en yüksek u_{test} değeri 4.31 MPa ile 0.67SK_0.50SD_0.50YFC_0.15N numunesinde olduğu görülürken, en düşük u_{test} değeri ise 3.30 MPa ile 0.67SK_1SD_0.25N numunesinde elde edilmiştir. Bunun yanında geri dönüştürülmüş agrega içeren Kontrol KYB'nin u_{test} değeri 6.20 MPa olarak elde edilirken, Kontrol KYB numunesinin aderans dayanımının tüm çimentosuz KYB numunelerinden daha yüksek olduğu bulunmuştur. Bunun nedeni kontrol numunesinin çimento içermesine ve dolayısıyla hidrasyon ürünlerinden C-S-H jellerinin diğer çimentosuz KYB karışımlarına kıyasla daha fazla oluşmasına bağlı olarak basınç dayanımının daha yüksek olmasına dayandırılabilir (Şekil 4.11,12, 13 ve 14).

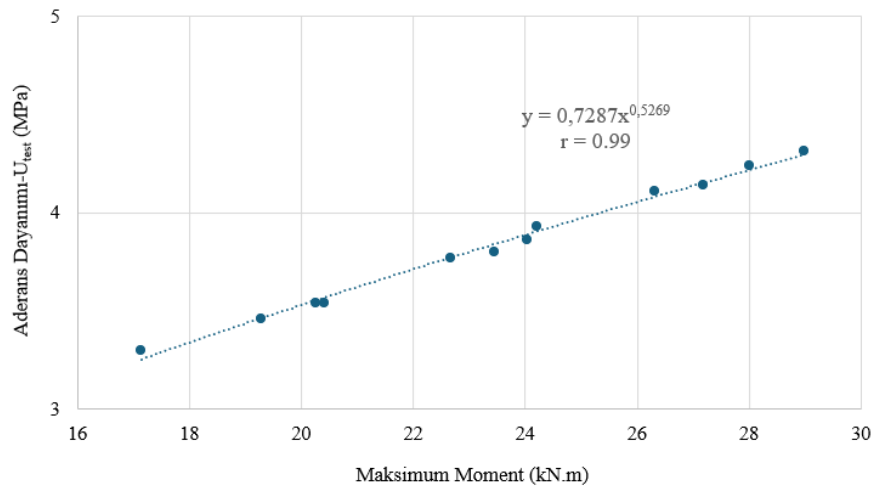


Şekil 4.21: Çimentosuz KYB karışımlarına ait u_{test} değerleri

$Na_2SiO_3/(Na_2SiO_3+SK)$ oranının artmasıyla u_{test} değerlerinde önemli bir düşüşe sebep olduğu görülmüştür (Şekil 4.21). Örneğin, hibrit alkali aktivatör oranı 0,15'ten 0,20'ye çıkarıldığında, aderans ortalama %2 azalırken, bu oranın 0,15'ten 0,25'e çıkarıldığında ise azalmanın %9'a ulaştığı görülmüştür. Al-Azzawi ve diğ. (2018) de yürüttükleri deneysel çalışmada alkali aktivatör oranının ($Na_2SiO_3/NaOH$) arttığı durumda uçucu kül bazlı geopolimer betonun (UKGB) donatı aderans dayanımında azalma meydana geldiğini bulmuşlardır. Dolayısıyla $Na_2SiO_3/(Na_2SiO_3+SK)$ 'nin çimentosuz KYB'de 0.15 oranında kullanılmasının hem ekonomik olacağı hem de hibrit aktivatörün yüksek oranda

kullanılmasının donatı aderans dayanımının üzerindeki olumsuz etkisinin bertaraf edilebileceği sonucu ortaya çıkmaktadır.

Bağlayıcı miktarı ve kombinasyonları açısından değerlendirildiğinde, Şekil 4.21’de görüldüğü üzere, tüm $\text{Na}_2\text{SiO}_3/(\text{Na}_2\text{SiO}_3+\text{SK})$ oranları için en düşük u_{test} değeri %100 SD içeren karışımlara ait numunelerde elde edilmiştir. Bunu UK içeren üçlü harmanlamanın olduğu karışımlar takip etmektedir. Tüm $\text{Na}_2\text{SiO}_3/(\text{Na}_2\text{SiO}_3+\text{SK})$ oranları için en yüksek u_{test} değeri ise %50 YFC içeren ikili harmanlamanın olduğu karışıma ait numunelerde görülürken bunu %25 YFC içeren ikili harmanlamanın olduğu karışıma ait numuneler takip etmektedir. Bu bulgu Şekil 4.12.c ve Şekil 4.14.a’da sunulan çimentosuz KYB karışımlarına ait SEM görüntüleri ile uyushmaktadır. Şöyle ki, en yüksek aderans dayanımına sahip olan %50 YFC içeren ikili harmanlamaya sahip kirişlerin üretiminde kullanılan 0.67SK_0.50SD_0.50YFC_0.15N karışımında en fazla C-S-H jellerinin oluştuğu görülmektedir. Ayrıca Ling ve diğ (2019) tarafından yapılan çalışmada YFC ikame oranının artmasıyla aderans dayanımında artış meydana geldiği bulunmuş olup bu tez çalışması kapsamında elde edilen aderans ile ilgili bulgularla tutarlıdır. Diğer taraftan %100 SD içeren tekli harmanlamaya sahip kirişlerin en düşük donatı aderansına sahip olması ise bu kirişlerin üretiminde kullanılan 0.67SK_1SD_0.25N karışımına ait SEM görüntülerinde diğer tüm çimentosuz KYB karışımlarına kıyasla daha fazla miktarda CH hidratasyon ürününün oluşmasına dayandırılabilir. Çünkü C-S-H jelleri sürekli bir iç yapı bütünlüğüne sebep olarak beton ve donatı arasındaki aderansı arttırabileceği düşünülmektedir.

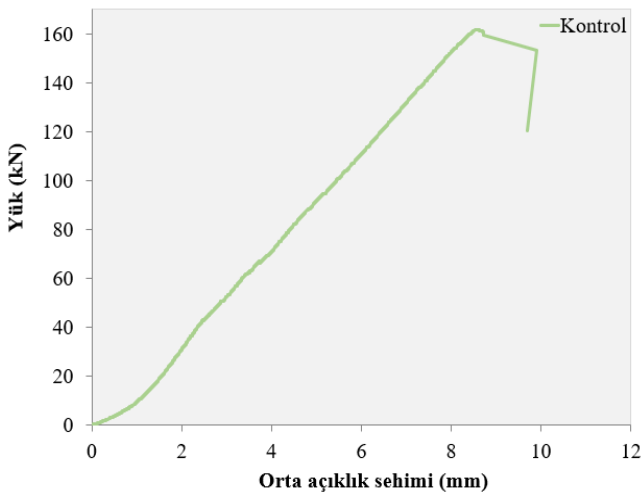


Şekil 4.22: Çimentosuz KYB kiriş numunelerinde donatı aderans dayanımı ve maksimum moment arasındaki ilişki

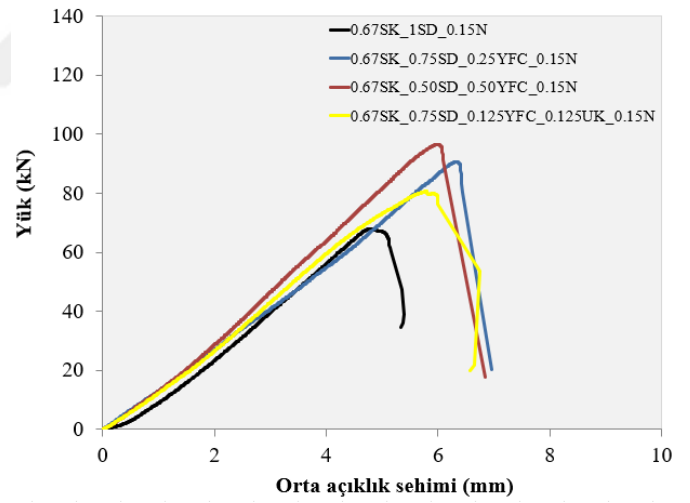
Şekil 4.22’de verilen grafikte hibrit alkali aktivatör içeren çimentosuz KYB karışımlarından üretilen ve 90 gün kür edilen büyük ölçekli kirişlere ait aderans dayanımı ile maksimum moment arasındaki doğrusal regresyon analizi sunulmuştur. Bu analizden belirlenen formülasyonda, iki regresyon parametresi x ve y olarak tanımlanmıştır. y eksenini aderans dayanımı ve x eksenini ise maksimum moment değerlerini temsil etmektedir. Grafikten görüleceği üzere, çimentosuz KYB’den üretilen kirişlerin donatı aderansı tahmini $r = 0.99$ olarak bulunmuştur. Dolayısıyla, bu denklemin çimentosuz KYB’nin donatı aderansı ve maksimum moment arasındaki ilişkiyi tahmin etmek için kullanılabileceği sonucuna varılabilir.

4.3.2 Yük-orta açıklık sehim eğrilerinin değerlendirilmesi

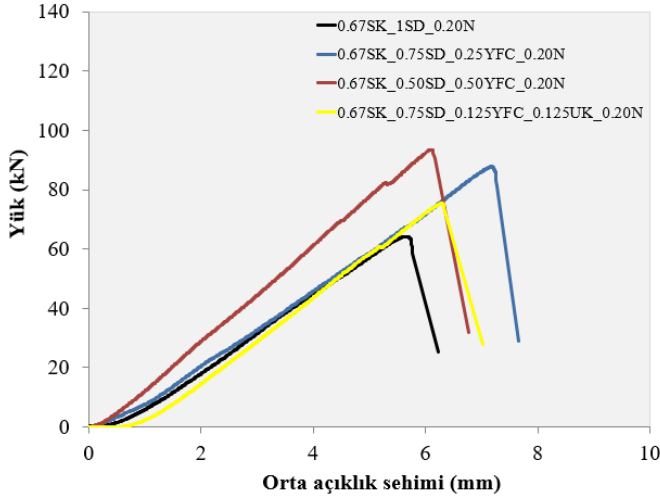
Geri dönüştürülmüş agrega içeren çimentosuz KYB ve donatı arasındaki aderans üzerinde farklı hibrit aktivatör oranının ve bağlayıcı malzeme kombinasyonunun etkisini incelemek için dört noktalı eğilmeye maruz bırakılan büyük ölçekli 12 adet kiriş numunesi ile karşılaştırmak amaçlı geri dönüştürülmüş agrega içeren 1 adet Kontrol KYB kiriş numunesine ait yük-orta açıklık sehim eğrileri Şekil 4.23’te sunulmuştur.



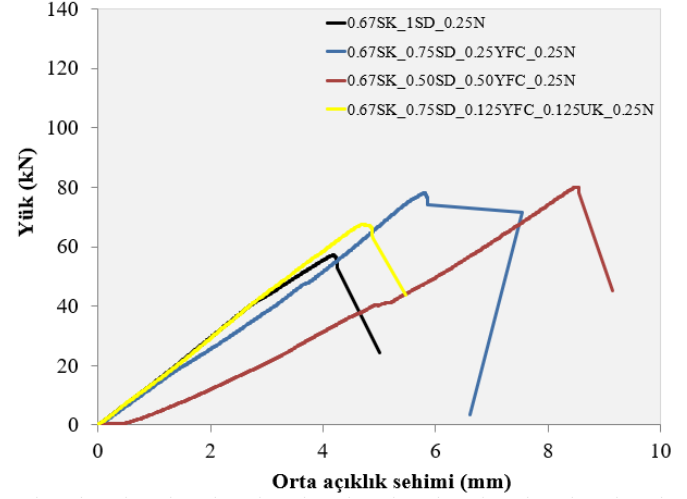
a) Kontrol



b) $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{Na}_2\text{SiO}_3+\text{SK}=0.15$



c) $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{Na}_2\text{SiO}_3+\text{SK}=0.20$



d) $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{Na}_2\text{SiO}_3+\text{SK}=0.25$

Şekil 4.23: Kontrol ve çimentosuz KYB kiriş numunelerine ait yük-orta açıklık sehim eğrileri

Şekil 4.23'te görüldüğü üzere, yük-orta açıklık sehim eğrilerinin zirve yük öncesi kısmı kontrol ve tüm çimentosuz KYB'ler için hemen hemen lineer iken eğrinin zirve yük sonrası kısmında ise Kontrol KYB ile %25 YFC içeren ikili harmanlamaya sahip 0.67SK_0.75SD_0.25YFC_0.25N karışımına ait çimentosuz KYB kiriş numuneleri hariç sehimin artmasıyla birlikte yük değerinde hızlı bir düşüş meydana gelmiştir. Sonuçta numunelerin yük taşıma kapasitelerini tamamen kaybettiği gözlemlenmiştir. Kina ve Türk (2021) tarafından yapılan çalışmada da benzer sonuç elde edilmiştir. Kontrol KYB kiriş numunesinin tüm çimentosuz KYB numunelerine kıyasla daha rijit davrandığı ve yük taşıma kapasitesinin daha yüksek olduğu görülmektedir (Şekil 4.23.a). Dolayısıyla kontrol KYB kiriş numunesinin daha yüksek maksimum moment ve aderans dayanımı değerlerine sahip olduğu bulunmuştur. Ayrıca tüm çimentosuz KYB numunelerine kıyasla Kontrol KYB numunesinin maksimum yük taşıma kapasitesine karşılık gelen sehim değerinin genelde daha yüksek olduğu da görülmüştür.

Genel olarak, bu eğriler iki belirgin aşamadan oluşmaktadır. Aşama I: Yüklemenin başlangıcında, numuneler doğrusal elastik davranış sergiler ve çatlaklar henüz fark edilemez. Bu aşamada, rijitlik sabit kalır ve yer değiştirme yük ile orantılı olarak artar. Aşama II: Eğilme çatlakları oluşmaya başladıkça, özellikle saf eğilme bölgesinde rijitlikte kademeli bir azalma gözlemlenir. Bu aşamada, çatlakların sayısı ve genişliği giderek artar; yükleme devam ettikçe, çatlak yayılması bindirmeli-ekli bölgede yoğunlaşır ve sonunda aderans göçmesi meydana gelir. Bu göçme mekanizmasının başlamasıyla birlikte, rijitlik ani ve

keskin bir şekilde azalır. Bu araştırmada test edilen çimentosuz KYB kirişlerin Aşama I ve Aşama II'si aşağıdaki şekilde karakterize edilebilir:

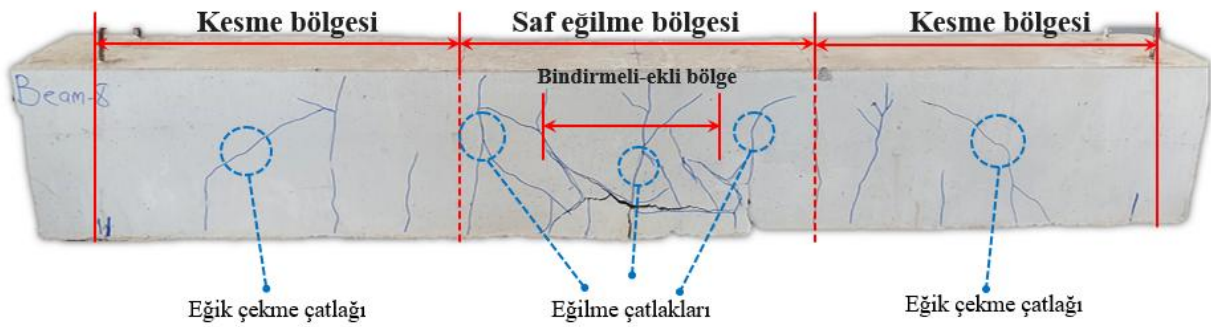
Aşama I: Şekil 4.23.b, c ve d incelendiğinde, tüm büyük ölçekli çimentosuz KYB kirişlerin beton çatlamadan önce elastik davranış sergilediği ve bu aşamada uygulanan yük ile orta açıklık yer değiştirme arasında doğrusal bir ilişki olduğu anlaşılmaktadır. Bu elastik aşamada, yer değiştirme yük ile doğrusal olarak artmış ve görünür çatlaklar (makro) gözlemlenmemiştir. Bununla birlikte, hibrit aktivatör oranının artmasıyla eğrilerin eğiminin azaldığı ve başlangıç rijitliğinde önemli bir azalma meydana geldiği dikkat çekicidir; bu da yüksek hibrit aktivatör oranlarının çimentosuz KYB kirişlerin rijitliğini olumsuz etkileyebileceğini göstermektedir. Ayrıca, bağlayıcı malzeme kombinasyonunun da çimentosuz KYB kirişlerin yük taşıma kapasitesi üzerinde önemli etkileri olduğu gözlemlenmiştir. Özellikle, ikili harmanlamaya sahip numuneler, tüm $\text{Na}_2\text{SiO}_3/(\text{Na}_2\text{SiO}_3+\text{SK})$ oranları için en yüksek zirve yük değerlerine ulaşmıştır. En yüksek zirve yük, $\text{Na}_2\text{SiO}_3/(\text{Na}_2\text{SiO}_3+\text{SK})$ oranı 0.15 ve %50 YFC içeren ikili harmanlamaya sahip (0.67SK_0.50SD_0.50YFC_0.15N) numunede 96.58 kN olarak elde edilirken, en düşük değer $\text{Na}_2\text{SiO}_3/(\text{Na}_2\text{SiO}_3+\text{SK})$ oranı 0.25 olan ve %100SD içeren numunede (0.67SK_1SD_0.25N) 57.12 kN olarak gözlemlenmiştir. Öte yandan, her bir $\text{Na}_2\text{SiO}_3/(\text{Na}_2\text{SiO}_3+\text{SK})$ oranı için zirve yük değerleri dikkate alındığında, %100 SD içeren tekli, %25 YFC içeren ikili, %50 YFC içeren ikili ve UK içeren üçlü harmanlamaya sahip çimentosuz KYB kirişlerin ortalama zirve yük değerleri sırasıyla 63, 86, 90 ve 75 kN'ye ulaşmıştır. Tüm bunlara ilaveten, Kontrol KYB numunesine kıyasla 0.15 N ve %50 YFC içeren ikili harmanlamaya sahip (0.67SK_0.50SD_0.50YFC_0.15N) çimentosuz KYB kiriş numunelerinde zirve yük değerinde %40.3 ile en düşük azalma sağlanırken, 0.25N ve %100 SD içeren (0.67SK_1SD_0.25N) çimentosuz KYB kiriş numunelerinde ise %64.67 ile en fazla azalma görülmüştür.

Aşama II: Şekil 4.23.b, c ve d'de gösterildiği gibi, çimentosuz KYB kirişleri maksimum yüke ulaştıktan sonra, yük-orta açıklık yer değiştirme eğrisinde ani ve önemli bir düşüş gözlemlenmiştir. Diğer bir deyişle, yük taşıma kapasitesinde hızlı bir düşüş yaşanırken, orta açıklıktaki yer değiştirme artmaya devam etmiştir. Bu durum, tipik olarak ani bir rijitlik kaybıyla karakterize edilen aderans göçmesi ile başlayan ve basınç bölgesindeki betonun nihai birim kısılmasına ulaşmasıyla sona eren bir hasar süreci olarak tanımlanabilir. Öte yandan, Aşama II'de bu çalışmada esas alınan $\text{Na}_2\text{SiO}_3/(\text{Na}_2\text{SiO}_3+\text{SK})$

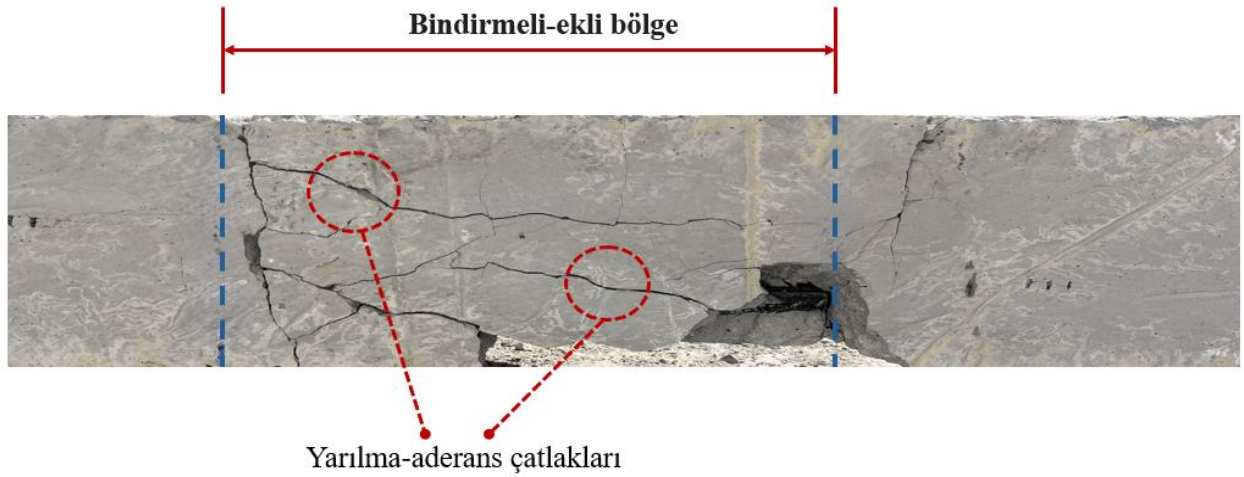
oranı, bağlayıcı malzeme miktar ve kombinasyonlarının etkilerinin sınırlı olduğu tespit edilmiştir (Şekil 4.23 b, c ve d).

4.3.3 Çatlak modelleri ve göçme modunun değerlendirilmesi

Dört noktalı eğilmeye maruz bırakılan büyük ölçekli bindirmeli-ekli geri dönüştürülmüş agrega içeren Kontrol ve hibrit alkali aktivatörlü çimentosuz KYB kiriş numunelerinde gözlemlenen tipik çatlak yayılması ve göçme modu durumu Şekil 4.24'de gösterilirken, tüm kirişlerin nihai çatlak modelleri ve göçme modu Şekil 4.25-28'de gösterilmektedir. İlk olarak, Şekil 4.24.a'da görüldüğü gibi, hem Kontrol hem de çimentosuz KYB kirişlerinde ilk çatlaklar, ilk yükleme seviyelerinde saf eğilme bölgesinde eğilme çatlakları olarak gelişmiştir. Yük seviyesi arttıkça, bu çatlaklar saf eğilme bölgesinde düzenli olarak dağılmıştır. Bu arada, kesme bölgeleri dikkate alındığında, düşük yük seviyelerinde gelişen çatlakların genellikle dikey eğilme çatlakları şeklinde olduğu ve bu çatlakların yük arttıkça kademeli olarak eğik kesme çatlaklarına dönüştüğü görülmüştür (Şekil 4.24.a). Ayrıca, bindirmeli-ekli donatının olduğu bölgelerde çekme donatıları boyunca uzunlamasına oluşan yarılma-aderans çatlaklarının kiriş alt yüzünde belirginleştiği gözlemlenmiştir (Şekil 4.24.b). Bu çatlakların yük arttıkça genişlediği ve birbirleriyle birleşerek yarılma hasar modu sürecini hızlandırdığı ve sonunda tüm KYB kiriş numunelerinde yarılma-aderans göçme modu meydana gelmiştir.



a) Kiriş ön yüzünde meydana gelen eğik çekme ve eğilme çatlakları

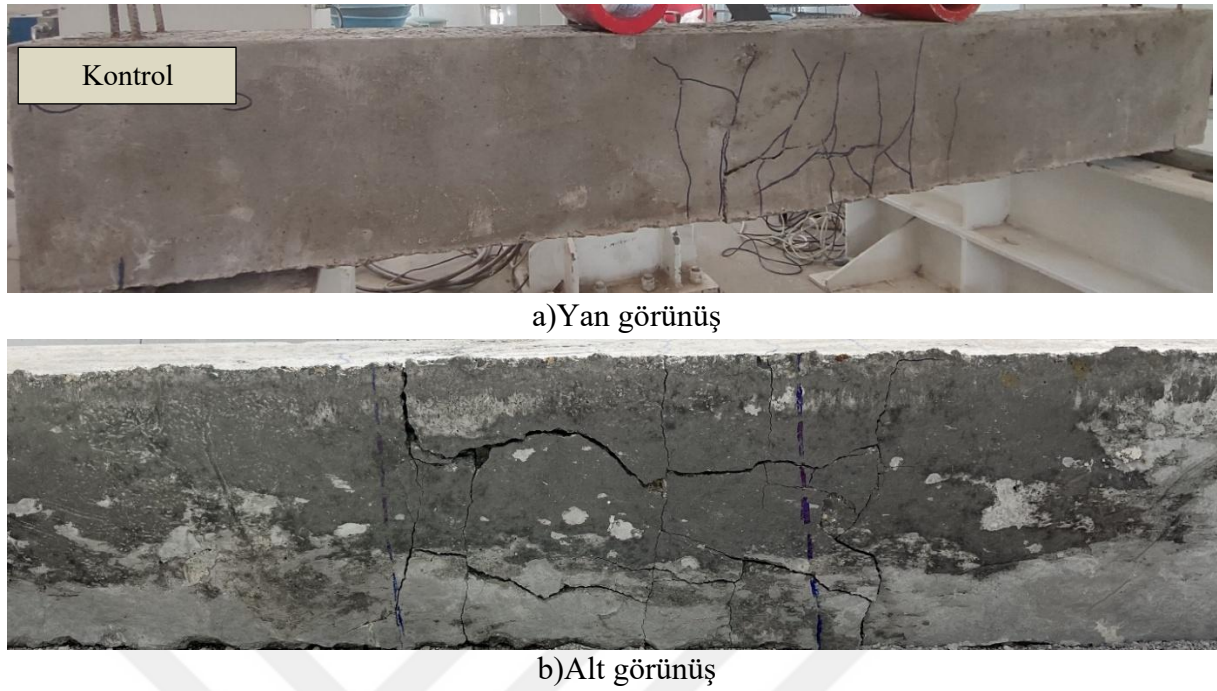


b) Kiriş alt yüzünde meydana gelen yarılma-aderans çatlakları

Şekil 4.24: Bindirmeli-ekli Kontrol ve çimentosuz KYB kirişler için tipik çatlak yayılması ve göçme modu.

Farklı hibrit aktivatör oranının ve bağlayıcı malzeme kombinasyonunun geri dönüştürülmüş agrega içeren çimentosuz KYB kiriş numunelerinin çatlak oluşumu üzerindeki etkisini otaya koymak amacıyla ilgili çatlak modelleri Şekil 4.26-28'de sunulmuştur. Bunun yanında çimentosuz KYB kirişlerin çatlak modellerini ve göçme modunun daha doğru bir şekilde değerlendirilmesi için geri dönüştürülmüş agregalı Kontrol KYB kiriş numunesine ait çatlak modelleri ve göçme modu da Şekil 4.25'de sunulmuştur.

Kontrol KYB kiriş numunesinin yan yüzündeki çatlaklar incelendiğinde sadece saf eğilme bölgesinde eğilme çatlaklarının olduğu görülürken kesme bölgesinde çatlak oluşmadığı gözlemlenmiştir (Şekil 4.24.a). Bunun sebebi kesme bölgesinde oluşacak eğik çekme çatlaklarına sebep olan asal gerilmelerin etriyelerin yanında betonun dayanımının yüksek olmasına bağlı olarak aşılmadığına ve dolayısıyla kesme çatlaklarının oluşmadığına dayandırılabilir. Kontrol KYB kiriş numunesinin alt yüzünde tüm numunelerde olduğu gibi yarılma aderans çatlaklarının belirgin bir şekilde olduğu fakat tüm çimentosuz KYB kiriş numunelerinin aksine (Şekil 4.26.b, 27.b ve 28.b) kontrol numunesinde paspayı kabuğunun bütünlüğünü koruduğu görülmektedir (Şekil 4.25.b). Bu durumun Kontrol KYB ile donatı arasındaki aderansın yüksek olmasından kaynaklandığı değerlendirilmektedir. Bütün bunlara ilaveten Kontrol KYB kiriş numunesinin yan yüzünde tüm çimentosuz KYB kiriş numunelerine kıyasla daha az sayıda çatlak olduğu belirlenmiştir. Bunun sebebi de yukarıda belirtildiği üzere Kontrol KYB kirişin kesme bölgelerinde hiç çatlak oluşmamasından kaynaklanmaktadır.



Şekil 4.25: Geri dönüştürülmüş agrega içeren Kontrol KYB kiriş numunesinin çatlak modelleri

$\text{Na}_2\text{SiO}_3/(\text{Na}_2\text{SiO}_3+\text{SK})$ oranının artmasıyla birlikte numunelerde oluşan toplam çatlak sayısında belirgin bir artış gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, daha yüksek $\text{Na}_2\text{SiO}_3/(\text{Na}_2\text{SiO}_3+\text{SK})$ oranının, özellikle kesme bölgesinde eğik çekme (kesme) çatlaklarının daha erken ve daha belirgin bir şekilde gelişmesine neden olduğu görülmüştür. Örneğin, $\text{Na}_2\text{SiO}_3/(\text{Na}_2\text{SiO}_3+\text{SK})$ oranı 0,15 olan çimentosuz KYB numunelerinde çatlak oluşumu, esas olarak saf eğilme bölgesinde ve diğer oranlara kıyasla sınırlı sayıda meydana gelirken (Şekil 4.26), $\text{Na}_2\text{SiO}_3/(\text{Na}_2\text{SiO}_3+\text{SK})$ oranı 0,20 veya 0,25'e arttırıldığında çatlak sayısının arttığı ve eğilme çatlaklarının kesme bölgesine doğru ilerleyerek eğik çekme (kesme) çatlaklarına dönüştüğü gözlemlenmiştir (Şekil 4.27 ve 28). Eğik çekme çatlaklarının artmasının nedeni, $\text{Na}_2\text{SiO}_3/(\text{Na}_2\text{SiO}_3+\text{SK})$ oranının artmasıyla basınç dayanımındaki azalmaya dayandırılabilir. Ayrıca, çimentosuz KYB numunelerde $\text{Na}_2\text{SiO}_3/(\text{Na}_2\text{SiO}_3+\text{SK})$ oranının artmasıyla birlikte, yarılma-aderans göçmesi daha ani ve şiddetli bir şekilde meydana geldiği gözlemlenmiştir. Şöyle ki, $\text{Na}_2\text{SiO}_3/(\text{Na}_2\text{SiO}_3+\text{SK})$ oranının 0.25 olduğu tüm karışımlarda yarılma-aderans göçmesinin çok daha belirgin olduğu test edilen kirişlerin beton örtüsünün bindirmeli-ekli bölgede bütünlüğünü koruyamayarak tamamen döküldüğü gözlemlenmiş olup söz konusu kirişlere ait bu görüntüler Şekil 4.28'deki alttan görünüşlerde sunulmuştur.

Bağlayıcıların miktarı ve harmanlanma durumu dikkate alındığında, aynı $\text{Na}_2\text{SiO}_3/(\text{Na}_2\text{SiO}_3+\text{SK})$ oranına sahip gruplar içinde YFC içeren ikili harmanlanmış karışımlara sahip çimentosuz KYB kirişler, SD içeren tekli ve UK içeren üçlü harmanlamaya sahip karışımlara kıyasla daha fazla sayıda ve daha eşit dağılımlı çatlaklar sergilemiş, ayrıca çatlakların çoğu saf eğilme bölgesinde eğilme çatlakları şeklinde gelişmiş ve kesme bölgesinde sınırlı sayıda oluşmuştur. Yine aynı $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{Na}_2\text{SiO}_3+\text{SK}$ oranına sahip gruplar dikkate alındığında, özellikle %50 YFC içeren ikili harmanlamaya sahip karışımlara ait numuneler, daha sünek davranış sergilemesi ve çatlak dağılımındaki simetriklik açısından öne çıkmaktadır (Şekil 4.26-28). Bu iyileştirilmiş çatlak davranışının, mikro yapının homojenliğiyle ilişkili olduğu düşünülmektedir. Şöyle ki, YFC'nin bir diğer önemli avantajı, C-(A)-S-H jellerin oluşumunu etkili bir şekilde destekleyen yüksek kalsiyum oksit (CaO) içeriği sebebiyle $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 'e kıyasla daha yüksek dayanım sağladığı bilinmektedir (Kim ve diğ., 2013). Çünkü hem %50 oranında hem YFC hem de SD içeren ikili harmanlamaya sahip karışımlarının yüksek silisyumdioksit (SiO_2) içeriğine sahip olması, bağlayıcı jel fazlarının silika zenginliğini artırarak polimerizasyon derecesini iyileştirdiği ve iç yapısal sürekliliği sağladığı sonucuna varılabilir (Şekil 4.12.c, 13.c ve 14.c). Böylece, uzunlamasına çekme donatısı etrafındaki arayüz geçiş bölgesindeki mikro yapının yoğunluğunu ve bütünlüğünü artırarak, bu bölgede çatlakların oluşmasını zorlaştırır ve çatlak yayılmasını saf eğilme bölgesine yönlendirir. Sonuçta, çatlak oluşumu ve yayılma olasılığını azaltarak, küçük genişliklere sahip çok sayıda mikro çatlakların oluşumunu teşvik eder.



a) Yan görünüş



b) Alt görünüş



a) Yan görünüş



b) Alt görünüş



a) Yan görünüş



b) Alt görünüş



a) Yan görünüş



b) Alt görünüş

Şekil 4.26: $\text{Na}_2\text{SiO}_3/(\text{Na}_2\text{SiO}_3+\text{SK})$ oranı 0.15 olan tekli, ikili ve üçlü bağlayıcı harmanlamasına sahip geri dönüştürülmüş agrega içeren çimentosuz KYB kiriş numunelerinin çatlak modelleri



a) Yan görünüş



b) Alt görünüş



a) Yan görünüş



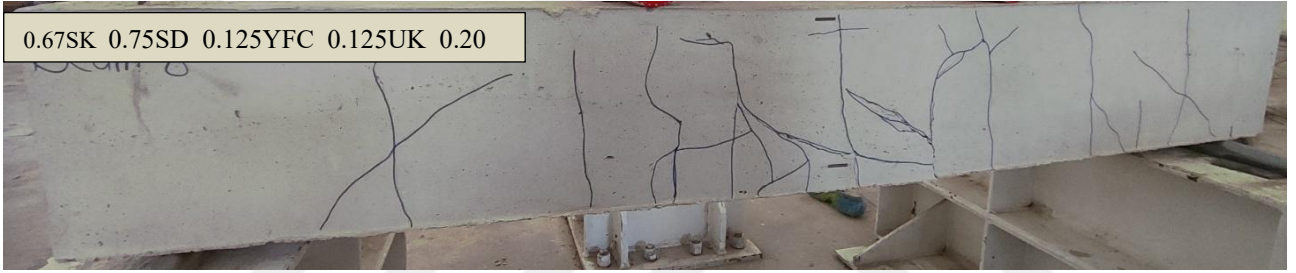
b) Alt görünüş



a) Yan görünüş



b) Alt görünüş



a) Yan görünüş



b) Alt görünüş

Şekil 4.27: $\text{Na}_2\text{SiO}_3/(\text{Na}_2\text{SiO}_3+\text{SK})$ oranı 0.20 olan tekli, ikili ve üçlü bağlayıcı harmanlamasına sahip geri dönüştürülmüş agrega içeren çimentosuz KYB kiriş numunelerinin çatlak modelleri



a) Yan görünüş



b) Alt görünüş



a) Yan görünüş



b) Alt görünüş



a) Yan görünüş



b) Alt görünüş



a) Yan görünüş



b) Alt görünüş

Şekil 4.28: $\text{Na}_2\text{SiO}_3/(\text{Na}_2\text{SiO}_3+\text{SK})$ oranı 0.25 olan tekli, ikili ve üçlü bağlayıcı harmanlamasına sahip geri dönüştürülmüş agregaya içeren çimentosuz KYB kiriş numunelerinin çatlak modelleri

5. SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında, hibrit alkali aktivatörlü (sönmüş kireç ve Na_2SiO_3) geri dönüştürülmüş agrega içeren çimentosuz KYB'lerin hibrit alkali aktivatör oranı ($\text{Na}_2\text{SiO}_3/(\text{Na}_2\text{SiO}_3+\text{SK})$) ile bağlayıcı miktarı ve kombinasyonunun taze ve sertleşmiş beton özellikleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Ayrıca çimentosuz KYB'nin donatı ile olan aderans dayanımını incelemek için 12 adet çimentosuz KYB ve karşılaştırma amaçlı 1 adet de Kontrol KYB olmak üzere toplam 13 adet açıklık ortasında bindirmeli-ekli çekme donatı detayına sahip büyük ölçekli kirişler üretilmiş olup 90 günlük kürün ardından dört noktalı eğilmeye maruz bırakılarak test edilmiştir. Yapılan tüm deneylerden elde edilen bulgular esas alındığında aşağıdaki sonuçlara varılabilir:

- ❖ Geri dönüştürülmüş agrega içeren kontrol ve hibrit alkali aktivatörlü çimentosuz KYB karışımlarının, bir karışım (0.67SK_0.75SD_0.25YFC_0.20N) dışında, 700 ± 20 mm ile hemen hemen benzer çökme-yayılma çaplarına sahip olduğu ve EFNARC komitesi tarafından önerilen SF2 sınıfı (660–750 mm) aralığında yer aldığı görülmüştür. Bunun yanında geri dönüştürülmüş agrega içeren kontrol KYB karışımına ait T_{500} süresi 8.5 sn olurken çimentosuz KYB karışımlarına ait T_{500} süresi değerlerinin 0.54-1.35 sn aralığında kaldığı ve tüm karışımların EFNARC (2005) tarafından önerilen sınır değerleri sağlamadıkları bulunmuştur.
- ❖ Geri dönüştürülmüş agrega içeren kontrol ve hibrit alkali aktivatörlü çimentosuz KYB karışımlarına ait L-kutusu deneyi sonuçları esas alındığında, tüm karışımların H_2/H_1 oranlarının 0.82–1 aralığında yer aldığı ve EFNARC (2005) tarafından önerilen $H_2/H_1 \geq 0.80$ kriterini sağladığı belirlenmiştir. Çimentosuz KYB karışımlarında $\text{Na}_2\text{SiO}_3/(\text{Na}_2\text{SiO}_3+\text{SK})$ oranının artmasının ve YFC'nin ikili harmanlama şeklinde karışımlara dahil edilmesinin H_2/H_1 değerleri üzerinde olumsuz bir etkisi görülürken UK'nin üçlü harmanlama şeklinde karışımlara dahil edilmesinin ise olumlu bir etkiye sahip olduğu gözlemlenmiştir.
- ❖ Geri dönüştürülmüş agrega içeren kontrol ve hibrit alkali aktivatörlü çimentosuz KYB karışımlarında, priz başlama sürelerinin genellikle kontrol karışımına göre daha kısa, priz sona erme sürelerinin ise belirgin şekilde daha uzun olduğu belirlenmiştir. Kontrol KYB numunesinin priz sona erme süresi 675 dk ile TS EN 196-3'e göre uygun çıkmıştır. Bunun yanında, Kontrol KYB numunesinin priz başlama süresinin 479 dk ile söz konusu standarda göre çok fazla uzun olması, karışımın geri dönüştürülmüş agrega içermesinin

yanında gerekli işlenebilirliğin elde edilmesi için fazla miktarda hiperakışkanlaştırıcı ihtiyaç duyulmasından kaynaklandığı sonucuna varılmıştır. Çimentosuz KYB karışımlarında $\text{Na}_2\text{SiO}_3/(\text{Na}_2\text{SiO}_3+\text{SK})$ oranının 0.25 çıkarılması durumunda tüm karışımların priz başlama (415-540 dk) ve sona erme (1872-2071 dk) sürelerinin çok fazla arttığı görülmüştür. Ayrıca, tüm $\text{Na}_2\text{SiO}_3/(\text{Na}_2\text{SiO}_3+\text{SK})$ oranları için bağlayıcı miktarı ve kombinasyonlarının priz süreleri üzerinde belirgin bir etkisinin olmadığı sonucuna varılmıştır.

- ❖ Kontrol KYB karışımlarının basınç ve yarmada çekme dayanımı değerleri tüm çimentosuz KYB'lere göre tüm kür günleri için en yüksek çıkmıştır. En yüksek basınç dayanımı 42.4 MPa ile 90 günlük 0.67SK_0.50SD_0.50YFC_0.15N numunesinden elde edilmiş olup kontrol numunesine kıyasla basınç dayanımında %24 oranında azalma olduğu görülmüştür. Diğer taraftan, geri dönüştürülmüş agrega içeren tüm çimentosuz KYB karışımlarına ait numunelerin standart 28 ve 90 günlük basınç ve yarmada çekme dayanımları 7 günlük erken dayanımlarından daha yüksek çıkarken 90 günlük basınç ve yarmada çekme dayanımları 28 günlük dayanımlara kıyasla genelde sınırlı artış gösterdiği, hatta bazı karışımlarda ise alkali sızıntısı nedeniyle dayanımlarda azalma görüldüğü tespit edilmiştir. Ayrıca, sodyum silikat miktarının artmasının basınç ve yarmada çekme dayanımı üzerinde genelde olumsuz bir etkiye sahip olduğu ve dolayısıyla $\text{Na}_2\text{SiO}_3/(\text{Na}_2\text{SiO}_3+\text{SK})$ oranı için 0.15 ve 0.20'nin basınç ve yarmada çekme dayanımı açısından çimentosuz KYB için daha uygun oranlar olduğu belirlenmiştir. Bağlayıcı miktarı ve harmanlamasının etkisine gelince, tüm $\text{Na}_2\text{SiO}_3/(\text{Na}_2\text{SiO}_3+\text{SK})$ oranları için genelde YFC içeren ikili harmanlanmış karışımların 28 ve 90 günlük basınç ve yarmada çekme dayanım değerleri en yüksek çıkmıştır.
- ❖ Tüm çimentosuz KYB karışımlarının elastisite modülü değerlerinin (4090-8830 MPa) Kontrol KYB karışımının elastisite modülü değerine (24910 MPa) kıyasla çok düşük olduğu bulunmuştur. Bunun sebebi, karışımların hiç çimento içermemesinin yanında tamamen geri dönüştürülmüş agregadan üretilmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Ayrıca çimentosuz KYB karışımlarında, $\text{Na}_2\text{SiO}_3/(\text{Na}_2\text{SiO}_3+\text{SK})$ oranının artmasının elastisite modülü değerlerinde azalmaya sebep olduğu tespit edilmiştir. Diğer taraftan, bağlayıcı miktarı ve kombinasyonları dikkate alındığında, tüm $\text{Na}_2\text{SiO}_3/(\text{Na}_2\text{SiO}_3+\text{SK})$ oranları için en düşük elastisite modülü değeri %100 SD'nin olduğu karışımlara ait numunelerde görülürken, en yüksek elastisite modülü değerleri ise %25 YFC içeren ikili harmanlanmış karışımlara ait numunelerde elde edilmiştir.

- ❖ Tüm çimentosuz KYB karışımlarının kılcal su emme katsayılarının (6.62×10^{-3} - 23.12×10^{-3} cm/s^{1/2}) Kontrol KYB karışımının kılcal su emme katsayısına (3.08×10^{-3} cm/s^{1/2}) kıyasla çok yüksek olduğu görülmüştür. Kontrol KYB de dahil tüm karışımlara ait su emme katsayılarının yüksek olması özellikle karışımların tamamen geri dönüştürülmüş agregadan üretilmesinden kaynaklandığı söylenebilir. Çimentosuz KYB'lerde Na₂SiO₃/(Na₂SiO₃+SK) oranının ikili harmanlamaya sahip karışımlar hariç su emme katsayı değerleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olmadığı görülmüştür. Bağlayıcı miktarı ve harmanlanmasının kılcal su emme katsayı değerleri üzerindeki etkisine gelince, en düşük su emme katsayıları %100 SD içeren karışımlarda, en yüksek değerler ise %50 YFC içeren karışımlara ait numunelerde elde edilmiştir.
- ❖ Çimento içeren en yüksek basınç dayanımına sahip Kontrol KYB numunesinin aderans dayanımının tüm çimentosuz KYB numunelerinden daha yüksek olduğu görülmüştür. Çimentosuz KYB'lerin aderans dayanımı değerlerine gelince, Na₂SiO₃/(Na₂SiO₃+SK) oranının artması aderans dayanımını olumsuz etkilemiştir. Ayrıca bağlayıcı miktarı ve harmanlaması açısından tüm Na₂SiO₃/(Na₂SiO₃+SK) oranları için en yüksek aderans dayanım değerleri, ikili harmanlamaya sahip karışımlardan üretilen kırı ş numunelerinden elde edilirken, en düşük aderans dayanımı değerleri ise %100 SD içeren tekli harmanlamaya sahip karışımlara ait kırı ş numunelerinde bulunmuştur.
- ❖ Tüm büyük ölçekli çimentosuz KYB kırı ş numunelerinde yük-orta açıklık sehim eğrileri dikkate alındığında, tüm numuneler elastik aşamada doğrusal davranış sergilerken Na₂SiO₃/(Na₂SiO₃+SK) oranı arttıkça başlangıç rijitliklerinde azalma olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, bağlayıcı miktarı ve kombinasyonu esas alındığında, özellikle ikili harmanlamaya sahip numuneler, tüm Na₂SiO₃/(Na₂SiO₃+SK) oranları için en yüksek zirve yük değerlerine ulaşmıştır. Bütün bunlara ilaveten, Kontrol KYB numunesine kıyasla 0.15 Na₂SiO₃/(Na₂SiO₃+SK) oranına ve %50 YFC içeren ikili harmanlamaya sahip çimentosuz KYB kırı ş numunelerinde %40.3 ile zirve yük değerinde en düşük azalma görülürken, 0.25 Na₂SiO₃/(Na₂SiO₃+SK) oranına ve %100 SD içeren tekli harmanlamaya sahip çimentosuz KYB kırı ş numunelerinde ise %64.67 ile en fazla azalma görülmüştür.
- ❖ Çimentosuz KYB kırı ş numunelerinde Na₂SiO₃/(Na₂SiO₃+SK) oranındaki artış çatlak sayısında önemli bir artışa ve kesme bölgesinde eğik çekme çatlaklarının oluşmasına sebep olmuştur. Özellikle, hibrit aktivatör içeriği 0.15 olan numunelerde çatlak oluşumu

esas olarak saf eğilme bölgesiyle sınırlıyken, hibrit aktivatör içeriği 0.25'e çıkarıldığında çatlaklar daha yaygın olarak gelişmiş ve kesme bölgesine doğru daha eğimli hale gelmiştir. Ayrıca YFC içeren ikili harmanlamaya sahip karışımlardan üretilen kirişlerin çatlak modelleri, SD içeren tekli ve UK içeren üçlü harmanlamaya sahip karışımlardan üretilen kirişlerinkine kıyasla daha fazla sayıda ve daha eşit dağılımlı çatlaklar şeklinde gerçekleşmiştir. Bunun yanında, bu çatlakların çoğu saf eğilme bölgesinde eğilme çatlakları şeklinde geliştiği ve kesme bölgesinde sınırlı sayıda olduğu görülmüştür.

- ❖ Kontrol KYB kiriş numunesinin alt yüzünde belirgin yarılma-aderans çatlak oluşmasına rağmen tüm çimentosuz KYB kiriş numunelerine kıyasla paspayı kabuğunun bütünlüğünü koruduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca, çimentosuz KYB numunelerde $\text{Na}_2\text{SiO}_3/(\text{Na}_2\text{SiO}_3+\text{SK})$ oranının artmasıyla birlikte, özellikle söz konusu oranın 0.25 olması durumunda tüm bağlayıcı harmanlamaları için yarılma-aderans göçmesinin çok daha belirgin ve gevrek bir şekilde meydana geldiği gözlemlenmiştir. Dolayısıyla söz konusu kirişlerin beton örtüsünün bindirmeli-ekli bölgede bütünlüğünü koruyamayarak tamamen döküldüğü görülmüştür.

KAYNAKÇA

- ACI 318-19 (2019)** Building Code Requirements for Structural Concrete. *ACI Committee 318*.
- ACI 408R-03 (2003)** Bond and Development of Straight Reinforcing Bars in Tension. *ACI Committee 408*.
- Ahmet Topçu (2025)**. Betonarme 1 Ders notları, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Eskişehir
- Al-Azzawi, M., Yu, T., & Hadi, M. N. (2018)**. Factors affecting the bond strength between the fly ash-based geopolymer concrete and steel reinforcement. In *Structures* (Vol. 14, pp. 262-272). Elsevier.
- Aldawsari, S., & Kampmann, R. (2025)**. Durability of fly ash/slag geopolymers: Role of OPC and silica under sulfate attack. *Construction and Building Materials*, 465, 139855.
- Algın, Z., Mermerdaş, K. ve Şeker, M. (2019)**. Yüksek Sıcaklığın Cam Elyaf Takviyeli Polimer Donatı ile Beton Arasındaki Aderans Dayanımına Etkisi. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 19(3), 804-813.
- Alkhteeb, L., & Dawood, M. B. (2025)**. The effect of recycled aggregate on properties of concrete: A review. *Hybrid Advances*, 100535.
- Alkhteeb, L., & Dawood, M. B. (2025)**. The effect of recycled aggregate on properties of concrete: A review. *Hybrid Advances*, 100535.
- Almutairi, A. L., Tayeh, B. A., Adesina, A., Isleem, H. F., & Zeyad, A. M. (2021)**. Potential applications of geopolymer concrete in construction: A review. *Case Studies in Construction Materials*, 15, e00733.
- AL-Tam, S. M., Riad, A., Mohammed, N., Al-Otaibi, A., & Youssf, O. (2025)**. Advancement of eco-friendly slag-based high-strength geopolymer concrete. *Journal of Materials Research and Technology*, 34, 1636-1653.
- ASTM C1585 (2004)**. Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-Cement Concretes. *ASTM International, West Conshohocken, PA*.

- ASTM C39 (2018).** Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. *ASTM International, West Conshohocken, PA.*
- ASTM C403 (1994).** Standard Test Method for Time of Setting of Concrete Mixtures by Penetration Resistance. *ASTM International, West Conshohocken, PA*
- ASTM C469 / C469M-14 (2014).** Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression. *ASTM International, West Conshohocken, PA.*
- ASTM C496 (2017).** Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression. *ASTM International, West Conshohocken, PA.*
- Astuti, P. (2025).** The mechanical performance evaluation of fly-ash derived geopolymer mortar for concrete patch repair. *Multidisciplinary Science Journal*, 7(3), 2025161-2025161.
- Azizi, M., & Samimi, K. (2025).** Effect of silica fume on Self-compacting Earth Concrete: Compressive strength, durability and microstructural studies. *Construction and Building Materials*, 472, 140815.
- Bayrak, B., Akarsu, O., Kılıç, M., Alcan, H. G., Çelebi, O., Kaplan, G., & Aydın, A. C. (2024).** Experimental study of bond behavior of geopolymer concrete under different curing condition using a pull-out test. *Construction and Building Materials*, 439, 137357.
- Bellum, R. R., Muniraj, K., & Madduru, S. R. C. (2020).** Investigation on modulus of elasticity of fly ash-ground granulated blast furnace slag blended geopolymer concrete. *Materials Today: Proceedings*, 27, 718-723.
- Bilal, H., Chen, T., Ren, M., Gao, X. ve Su, A. (2021).** Silika dumanı, metakaolin ve SBR lateksinin geçirgen betonun mukavemet ve dayanıklılık performansına etkisi. *İnşaat ve Yapı Malzemeleri*, 275, 122124.
- Bilek, V., Bonczková, S., Hurta, J., Pytlík, D., & Mrovec, M. (2017).** Bond strength between reinforcing steel and different types of concrete. *Procedia engineering*, 190, 243-247.
- Brzyski, P. (2018).** The effect of pozzolan addition on the physical and mechanical properties of lime mortar. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 49, p. 00009). EDP Sciences.

- Bun, P., Cyr, M., Lanieste, P., Bun, K. N., & Idir, R. (2022).** Concrete made of 100% recycled materials-Feasibility study. *Resources, Conservation and Recycling*, 180, 106199.
- Castel, A., & Foster, S. J. (2015).** Bond strength between blended slag and Class F fly ash geopolymer concrete with steel reinforcement. *Cement and Concrete Research*, 72, 48-53.
- CEB-FIP (2010).** Model Code 2010.
- Chen, JJ, Ng, PL, Chu, SH, Guan, GX ve Kwan, AKH (2020).** Bağlayıcı macunun paketleme yoğunluğunu ve performansını iyileştirmek için metakaolin ve silika dumanı ile üçlü harmanlama. *İnşaat ve Yapı Malzemeleri*, 252, 119031.
- Chu, S. H., & Kwan, A. K. H. (2019).** Co-addition of metakaolin and silica fume in mortar: effects and advantages. *Construction and Building Materials*, 197, 716-724.
- Das, R., Panda, S., Sahoo, A. S., & Panigrahi, S. K. (2024).** Effect of superplasticizer types and dosage on the flow characteristics of GGBFS based self-compacting geopolymer concrete. *Materials today: proceedings*, 103, 11-21.
- Davidovits, J. (1991a).** Geopolymers: inorganic polymeric new materials. *Journal of Thermal Analysis and calorimetry*, 37(8), 1633-1656.
- Davidovits, J. (1991b).** Geopolymers: inorganic polymeric new materials. *Journal of Thermal Analysis and calorimetry*, 37(8), 1633-1656.
- Davidovits, J. (2015).** False values on CO2 emission for geopolymer cement/concrete published in scientific papers. *Technical paper*, 24, 1-9.
- Desnerck, P., De Schutter, G., & Taerwe, L. (2010).** Bond behaviour of reinforcing bars in self-compacting concrete: experimental determination by using beam tests. *Materials and Structures*, 43, 53-62.
- Donmez, I., Katlav, M., & Turk, K. (2023).** Improvement of fresh and hardened properties of a sustainable HFRSCC using various powders as multi-blended binders. *Construction and Building Materials*, 371, 130773.
- EFNARC (2005).** European Guidelines for Self-Compacting Concrete. Specification and Production and Use, Association House, UK.

- El-Diadamony, H., Amer, A. A., Sokkary, T. M., & El-Hoseny, S. (2018).** Hydration and characteristics of metakaolin pozzolanic cement pastes. *HBRC journal*, 14(2), 150-158.
- Elhag, A. B., Selmi, A., Ahmad, Z., & Ghazouani, N. (2025).** Enhancing mechanical properties and microstructural integrity of silica fume-based self-compacting geopolymer concrete through municipal solid waste incineration fly ash incorporation. *Materials Letters*, 392, 138541.
- Eltantawi, I., Sheikh, M. N., & Hadi, M. N. (2025).** Influence of stainless-steel fibres on the mechanical properties of self-compacting ultra-high performance geopolymer concrete. *Construction and Building Materials*, 463, 140092.
- Erdoğan, TY (2003).** Beton. Orta Doğu Teknik Üniversitesi Yayınları, Ankara, Türkiye.
- Gesoğlu, M., Güneyisi, E., & Özbay, E. (2009).** Properties of self-compacting concretes made with binary, ternary, and quaternary cementitious blends of fly ash, blast furnace slag, and silica fume. *Construction and building materials*, 23(5), 1847-1854.
- Gürdal, H., & Yüceer, Z. (2004).** Türkiye ve Dünyada Kendiliginden Yerlesen Beton Uygulamaları, Beton 2004 Kongresi Bildirileri, 244-254.
- Hassan, A., Arif, M., & Shariq, M. (2019).** Use of geopolymer concrete for a cleaner and sustainable environment—A review of mechanical properties and microstructure. *Journal of cleaner production*, 223, 704-728.
- Jeon, D., Jun, Y., Jeong, Y., & Oh, J. E. (2015).** Microstructural and strength improvements through the use of Na₂CO₃ in a cementless Ca (OH)₂-activated Class F fly ash system. *Cement and Concrete Research*, 67, 215-225.
- Kadum, N., al-Attar, T., & Al-Azzawi, Z. (2017).** Evaluation of pozzolime mixtures as a sustainable binder to replace portland cement in structural concrete. In *MATEC Web of Conferences* (Vol. 120, p. 02009). EDP Sciences.
- Kim, M. S., Jun, Y., Lee, C., & Oh, J. E. (2013).** Use of CaO as an activator for producing a price-competitive non-cement structural binder using ground granulated blast furnace slag. *Cement and concrete research*, 54, 208-214.
- Kina, C., & Turk, K. (2021(b)).** Bond strength of reinforcing bars in hybrid fiber-reinforced SCC with binary, ternary and quaternary blends of steel and PVA fibers. *Materials and Structures*, 54(4), 139.

- Kina, C., & Turk, K. (2021).** Bond strength of reinforcing bars in hybrid fiber-reinforced SCC with binary, ternary and quaternary blends of steel and PVA fibers. *Materials and Structures*, 54(4), 139.
- Kina, Ceren & Turk, Kazim (2021(a)).** Bond Performance of Hybrid Steel Fiber Reinforced Selfcompacting Concrete Beams, ACE 2021, Yıldız Technical University.
- Kishore, K. (2023).** Geopolymer concrete and its strength influencing variables. *Materials Today: Proceedings*, 80, 1434-1441.
- Kou, S. C., Poon, C. S., & Wan, H. W. (2012).** Properties of concrete prepared with low-grade recycled aggregates. *Construction and Building Materials*, 36, 881-889.
- Li, Y., Shen, J., Lin, H., Li, H., Lv, J., Feng, S., & Ci, J. (2022).** The data-driven research on bond strength between fly ash-based geopolymer concrete and reinforcing bars. *Construction and Building Materials*, 357, 129384.
- Liang, R., & Huang, Y. (2023).** Development length and bond behavior of lap-spliced reinforcement in Ultra-high performance concrete beams. *Engineering Structures*, 291, 116354.
- Lin, L., Xu, J., Ying, W., Yu, Y., & Zhou, L. (2025).** Post-fire compressive mechanical behaviors of concrete incorporating coarse and fine recycled aggregates. *Construction and Building Materials*, 461, 139948.
- Lin, M., Chen, G., Chen, Y., Han, D., Su, R., & Wu, J. (2025).** Mechanical properties and microstructure of fly ash and slag-based geopolymer prepared by silica fume-based activator. *Journal of Cleaner Production*, 498, 145214.
- Ling, Y., Wang, K., Li, W., Shi, G., & Lu, P. (2019).** Effect of slag on the mechanical properties and bond strength of fly ash-based engineered geopolymer composites. *Composites Part B: Engineering*, 164, 747-757.
- Liu, X., Liang, C., Zhang, Z., Zhang, Y., Xu, J., & Ma, Z. (2024).** Mechanical performance of low-carbon ultra-high performance engineered cementitious composites (UHP-ECC) with high-volume recycled concrete powder. *Journal of Building Engineering*, 88, 109153.

- Luo, Y., Zhang, Q., Wang, D., Yang, L., Gao, X., Liu, Y., & Xue, G. (2023).** Mechanical and microstructural properties of MK-FA-GGBFS-based self-compacting geopolymer concrete composites. *Journal of Building Engineering*, 77, 107452.
- Luukkonen, T., Abdollahnejad, Z., Yliniemi, J., Kinnunen, P., & Illikainen, M. (2018).** One-part alkali-activated materials: A review. *Cement and Concrete Research*, 103, 21-34.
- Lv, Q., Yu, J., Ji, F., Gu, L., Chen, Y., & Shan, X. (2021).** Mechanical property and microstructure of fly ash-based geopolymer activated by sodium silicate. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 25(5), 1765-1777.
- Lye, C. Q., Dhir, R. K., & Ghataora, G. S. (2016).** Elastic modulus of concrete made with recycled aggregates. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Structures and Buildings*, 169(5), 314-339.
- Ma, B., Ma, M., Shen, X., Li, X., & Wu, X. (2014).** Compatibility between a polycarboxylate superplasticizer and the belite-rich sulfoaluminate cement: Setting time and the hydration properties. *Construction and Building Materials*, 51, 47-54.
- Martinez, A., & Miller, S. A. (2025).** Life cycle assessment and production cost of geopolymer concrete: A meta-analysis. *Resources, Conservation and Recycling*, 215, 108018.
- Mathew, M., Girija, K., & Sreedevi, A. R. (2023).** Shear behaviour of reinforced concrete beams using treated recycled coarse aggregates and steel fibres. *Materials Today: Proceedings*.
- Memon, F. A., Nuruddin, M. F., & Shafiq, N. (2013).** Effect of silica fume on the fresh and hardened properties of fly ash-based self-compacting geopolymer concrete. *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*, 20(2), 205-213.
- Menegaki, M., & Damigos, D. (2018).** A review on current situation and challenges of construction and demolition waste management. *Current opinion in green and sustainable chemistry*, 13, 8-15.
- Mohammed, N., Sarsam, K., & Hussien, M. (2018).** The influence of recycled concrete aggregate on the properties of concrete. In *MATEC Web of Conferences* (Vol. 162, p. 02020). EDP Sciences.

- Nakum, A. V., & Arora, N. K. (2022).** The impact of alkaline solution to fly ash ratio with different molarities of sodium hydroxide on self-compacted geopolymer concrete. *Materials Today: Proceedings*, 62, 4168-4176.
- Nikmehr, B., Kafle, B., & Al-Ameri, R. (2024).** Developing a sustainable self-compacting geopolymer concrete with 100% geopolymer-coated recycled concrete aggregate replacement. *Smart and Sustainable Built Environment*, 13(2), 395-424.
- Nikmehr, B., Kafle, B., & Al-Ameri, R. (2024).** Developing a sustainable self-compacting geopolymer concrete with 100% geopolymer-coated recycled concrete aggregate replacement. *Smart and Sustainable Built Environment*, 13(2), 395-424.
- Okamura, H. (1997).** Self compacting high-performance concrete, *Concrete International*, 19(7), 50-54.
- Okamura, H., Ozawa, K. (1995).** Mix-design for self compacting concrete. *Concrete Library of JSCE*, No. 25, pp. 107-120.
- Orangun, C. O., Jirsa, J. O., & Breen, J. E. (1975).** The strength of anchor bars: a reevaluation of test data on development length and splices (No. FHWA-RD-75-S0422 Final Rpt.).
- Özdemir, M. H. S., Bayrak, B., & Aydın, A. C. (2025).** Bond performance of geopolymer concrete with basalt/glass fiber under elevated temperature. *Engineering Structures*, 324, 119368.
- Panda, S., Pradhan, J., & Panigrahi, S. K. (2025).** Sustainable production of self-compacting geopolymer concrete through GGBFS-based optimal blended precursor. *Construction and Building Materials*, 492, 142830.
- Parthiban, K., & Mohan, K. S. R. (2017).** Influence of recycled concrete aggregates on the engineering and durability properties of alkali activated slag concrete. *Construction and Building Materials*, 133, 65-72.
- Parthiban, K., & Mohan, K. S. R. (2017).** Influence of recycled concrete aggregates on the engineering and durability properties of alkali activated slag concrete. *Construction and Building Materials*, 133, 65-72.
- Patel, Y. J., & Shah, N. (2018).** Development of self-compacting geopolymer concrete as a sustainable construction material. *Sustainable Environment Research*, 28(6), 412-421.

- Petcherdchoo, A., Hongubon, T., Thanasisathit, N., Punthutaecha, K., & Jang, S. H. (2020).** Effect of curing time on bond strength between reinforcement and fly-ash geopolymer concrete. *Applied Science and Engineering Progress*, 13(2), 127-135.
- Philip, S., & Nidhi, M. (2023).** A review on the material performance of geopolymer concrete as green building materials. *Materials Today: Proceedings*.
- Pradhan, P., Panda, S., Parhi, S. K., & Panigrahi, S. K. (2022).** Variation in fresh and mechanical properties of GGBFS based self-compacting geopolymer concrete in the presence of NCA and RCA. *Materials Today: Proceedings*, 62, 6348-6358.
- Rihan, M. A. M., Onchiri, R. O., Gathimba, N., & Sabuni, B. (2024).** Mix design approaches of eco-friendly geopolymer concrete: A critical review. *Hybrid Advances*, 7, 100290.
- Sarker, P. K. (2011).** Bond strength of reinforcing steel embedded in fly ash-based geopolymer concrete. *Materials and structures*, 44(5), 1021-1030.
- Seara-Paz, S., González-Fontebo, B., Eiras-López, J., & Herrador, M. F. (2014).** Bond behavior between steel reinforcement and recycled concrete. *Materials and structures*, 47, 323-334.
- Shaikh, F. U. A. (2016).** Mechanical and durability properties of fly ash geopolymer concrete containing recycled coarse aggregates. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 5(2), 277-287.
- Shaikh, F. U. A. (2016).** Mechanical and durability properties of fly ash geopolymer concrete containing recycled coarse aggregates. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 5(2), 277-287.
- Shaikh, F. U. A. (2016).** Mechanical and durability properties of fly ash geopolymer concrete containing recycled coarse aggregates. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 5(2), 277-287.
- Shi, C., Wu, Z., Lv, K., & Wu, L. (2015).** A review on mixture design methods for self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 84, 387-398.
- Singh, B., Rahman, M. R., Paswan, R., & Bhattacharyya, S. K. (2016).** Effect of activator concentration on the strength, ITZ and drying shrinkage of fly ash/slag geopolymer concrete. *Construction and Building Materials*, 118, 171-179.

- Sona, S., & Sangeetha, S. P. (2025).** Eco-friendly alternative activators derived from industrial wastes for the sustainable production of two-part geopolymer concrete at low cost. *Construction and Building Materials*, 467, 140374.
- TD, G. R. (2025).** Application of cement slurry in developing self compacting geopolymer concrete. *Construction and Building Materials*, 481, 141502.
- Thakur, M., & Bawa, S. (2022).** Self-compacting geopolymer concrete: A review. *Materials Today: Proceedings*, 59, 1683-1693.
- Thomas, B. S., Yang, J., Bahurudeen, A., Chinnu, S. N., Abdalla, J. A., Hawileh, R. A., & Hamada, H. M. (2022).** Geopolymer concrete incorporating recycled aggregates: A comprehensive review. *Cleaner Materials*, 3, 100056.
- Topçu, İ. B., Bilir, T., & Baylavlı, H. (2008).** Kendiliğinden Yerleşen Betonun Özellikleri. *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 21(1), 1-22.
- TS 708 (2010).** Çelik, Betonarme için Donatı Çeliği. *Türk Standardı, Ankara*.
- TS EN 196-3 (2002).** Çimento Deney Metotları- Bölüm 3 : Priz Süresi ve Genleşme Tayini, TSE, 2002.
- Türk, K. (2002).** Bileşik eğilmeye maruz betonarme elemanlarda donatı aderansının beton özelliklerine bağlı olarak incelenmesi (Doctoral dissertation, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Turk, K. (2012).** Viscosity and hardened properties of self-compacting mortars with binary and ternary cementitious blends of fly ash and silica fume. *Construction and Building Materials*, 37, 326-334.
- Turk, K., Caliskan, S., & Yildirim, M. S. (2004).** Bond Strength of Spliced Reinforcement in Beam Elements.
- Ulugöl, H., Kul, A., Yıldırım, G., Şahmaran, M., Aldemir, A., Figueira, D., & Ashour, A. (2021).** Mechanical and microstructural characterization of geopolymers from assorted construction and demolition waste-based masonry and glass. *Journal of cleaner Production*, 280, 124358.

- Wan, S., Zong, Z., Lin, Y., Shi, H., Yuan, Y., Ding, B., & Cai, J. (2025).** Shear behavior of reinforced one-part geopolymer concrete beams. *Journal of Building Engineering*, 111, 113205.
- Wang, C., Zhang, Z., Liu, X., Zhang, Y., & Ma, Z. (2024).** Elucidating the role of recycled concrete aggregate in ductile engineered geopolymer composites: Effects of recycled concrete aggregate content and size. *Journal of Building Engineering*, 95, 110150.
- Wang, J., Wang, W., Lu, L., Luo, Q., Lai, J., Xie, X., ... & He, Y. (2024).** Strength development and polymerization reaction mechanism of sulfur-tailings-based geopolymer produced with CaO and Na₂SiO₃ composite activator. *Construction and Building Materials*, 421, 135692.
- Wang, W., Zhang, P., Dai, X., Zheng, Y., & Hu, S. (2025).** Workability of self-compacting geopolymer concrete: The effect of nano-SiO₂ and steel-polyvinyl alcohol hybrid fiber. *Construction and Building Materials*, 460, 139849.
- Wibowo, Y. N., Piscesa, B., Tajunnisa, Y., & Sutrisno, W. (2025).** Investigation on the mechanical behavior of high-calcium fly ash geopolymer concrete using one-part method. *Construction and Building Materials*, 490, 142436.
- Wu, H., Liu, X., Wang, C., Zhang, Y., & Ma, Z. (2024).** Micro-properties and mechanical behavior of high-ductility engineered geopolymer composites (EGC) with recycled concrete and paste powder as green precursor. *Cement and Concrete Composites*, 152, 105672.
- Wu, L., Sun, Z., & Cao, Y. (2024).** Modification of recycled aggregate and conservation and application of recycled aggregate concrete: A review. *Construction and Building Materials*, 431, 136567.
- Yang, K. H., Cho, A. R., Song, J. K., & Nam, S. H. (2012).** Hydration products and strength development of calcium hydroxide-based alkali-activated slag mortars. *Construction and Building Materials*, 29, 410-419.
- Yen, C. H., Dlamini, M. N., & Hung, C. C. (2025).** Bond demand and strength of spliced high-strength steel bars in HSC and UHPC beams under bending. *Engineering Structures*, 337, 120463.

- Zeyad, A. M., & Almalki, A. (2020).** Influence of mixing time and superplasticizer dosage on self-consolidating concrete properties. *Journal of materials research and technology*, 9(3), 6101-6115.
- Zhang, K., Qing, Y., Umer, Q., & Asmi, F. (2023).** How construction and demolition waste management has addressed sustainable development goals: exploring academic and industrial trends. *Journal of Environmental Management*, 345, 118823.
- Zhang, L. W., Sojobi, A. O., Kodur, V. K. R., & Liew, K. M. (2019).** Effective utilization and recycling of mixed recycled aggregates for a greener environment. *Journal of Cleaner Production*, 236, 117600.
- Zhang, S., Han, B., Xie, H., An, M., & Lyu, S. (2021).** Brittleness of concrete under different curing conditions. *Materials*, 14(24), 7865.
- Zhou, C., & Chen, Z. (2017).** Mechanical properties of recycled concrete made with different types of coarse aggregate. *Construction and Building Materials*, 134, 497-506.
- Zong, S., Chang, C., Rem, P., Gebremariam, A. T., Di Maio, F., & Lu, Y. (2025).** Research on the influence of particle size distribution of high-quality recycled coarse aggregates on the mechanical properties of recycled concrete. *Construction and Building Materials*, 465, 140253.
- Zuo, J., & Darwin, D. (2000).** Splice strength of conventional and high relative rib area bars in normal and high-strength concrete. *ACI structural Journal*, 97(4), 630-641

ÖZGEÇMİŞ

AD SOYAD : Rumeysa ÜTÜ

ÖĞRENİM DURUMU :

- **Lisans** : 2022, İnönü Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği
- **Yüksek Lisans** : 2025, İnönü Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği ABD

