

T.C.
GÜMÜŞHANE ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ALKALİ AKTİVASYON YÖNTEMİYLE DOĞAL VE ENDÜSTRİYEL
ATIK MİNERALLİ LİFLİ KOMPOZİT GELİŞTİRİLMESİ

DOKTORA

Yavuz Selim AKSÜT

TEMMUZ-2024
GÜMÜŞHANE



T.C.

**GÜMÜŞHANE ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**ALKALİ AKTİVASYON YÖNTEMİYLE DOĞAL VE ENDÜSTRİYEL
ATIK MİNERALLİ LİFLİ KOMPOZİT GELİŞTİRİLMESİ**

**DEVELOPMENT OF FIBER COMPOSITE OF NATURAL AND
INDUSTRIAL WASTE MINERAL BY ALKALINE ACTIVATION METHOD**

DOKTORA

Yavuz Selim AKSÜT

TEMMUZ-2024

GÜMÜŞHANE



T.C.

**GÜMÜŞHANE ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**ALKALİ AKTİVASYON YÖNTEMİYLE DOĞAL VE ENDÜSTRİYEL
ATIK MİNERALLİ LİFLİ KOMPOZİT GELİŞTİRİLMESİ**

**DEVELOPMENT OF NATURAL AND INDUSTRIAL WASTE MINERAL
FIBER COMPOSITES BY ALKALINE ACTIVATION METHOD**

DOKTORA

Yavuz Selim AKSÜT

Danışman: Prof. Dr. Şükrü YETGİN

TEMMUZ-2024

GÜMÜŞHANE

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK BEYANI

Doktora Tezi olarak hazırlamış olduğum “**Alkali Aktivasyon Yöntemiyle Doğal ve Endüstriyel Atık Mineralli Lifli Kompozit Geliştirilmesi**” isimli bu tezimin, tamamen kendi çalışmam olduğunu, her alıntıya kaynak gösterdiğimi, alıntı yaptığım tüm çalışmaları kaynakçada belirttiğimi ve Gümüşhane Üniversitesi’nin lisanslı kullanıcısı olduğum intihal yazılım programı ile Lisansüstü Eğitim Enstitüsü’nün belirlediği kıstaslara uygun olarak raporladığımı taahhüt ederim. Tezimin kâğıt ve elektronik kopyalarının Gümüşhane Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü arşivinde saklanmasına izin verdiğimi onaylarım.

Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği’nin ilgili maddeleri uyarınca gereğinin yapılmasını arz ederim.

03/07/2024

Yavuz Selim AKSÜT

TEŞEKKÜR

“Alkali Aktivasyon Yöntemiyle Doğal ve Endüstriyel Atık Mineralli Lifli Kompozit Geliştirilmesi” adlı bu çalışma, Gümüşhane Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Doktora Tezi olarak hazırlanmıştır.

Doğal ve endüstriyel atıkların beton üretiminde kullanılmasıyla geri dönüşümün teşvik edilmesi, çevre kirliliğinin azaltılması ve ekonomik olarak yerel veya ulusal ekonomiye katkı sağlanması fikrine inanıyorum. Kıymetli hocam sayın Prof. Dr. Şükrü YETGİN'in, bu çalışmanın planlamasından yazımına kadar her aşamada bana değerli bilgi ve deneyimlerini paylaşması, değerli vaktini ayırması ve çalışmalarımnda yönlendirme ve destek sağlaması beni cesaretlendirdi ve rehberlik etti. Kendisine içtenlikle teşekkür ederim.

Bu çalışma ve lisansüstü eğitimim boyunca katkılarını esirgemeyen ve her türlü desteği sağlayan değerli hocalarım Doç. Dr. Mustafa ÇULLU ve Doç. Dr. M. Ali GÜCER'e içten şükranlarımı sunarım.

Lisansüstü öğrenimim boyunca her konuda destek ve yardımlarını esirgemeyen değerli mesai arkadaşlarım Dr. Öğr. Üyesi Yusuf KAYA, Arş. Gör. R. Ali DEDECAN ve Arş. Gör. Dr. Murat ŞAN'a özellikle teşekkür etmek istiyorum. Ayrıca, çalışmada bağlayıcı olarak kullanılan atıkların fiziksel ve kimyasal analizlerinin gerçekleştirilmesinde vermiş olduğu katkılardan dolayı Gümüşhane Aşkale Çimento Fabrikası kalite kontrol şefi Sayın Neva ÖZ’e de şükranlarımı sunuyorum.

Ailem, hayatımın her anında beni yalnız bırakmadı ve maddi/manevi her türlü desteği sağladı. Onlara sonsuz teşekkürlerimi sunuyorum.

Yavuz Selim AKSÜT
GÜMÜŞHANE – 2024

ÖZET

Beton endüstrisinde kullanılan çimentoya alternatif olarak daha ekonomik ve çevreci bir bağlayıcı yapı malzemesi geliştirmek için pek çok araştırmacı çalışmaktadır. Bu amaç doğrultusunda çimentosuz olarak üretilen alkali aktivasyonlu beton (AAB) adı verilen daha çevreci ve ekonomik yeni bir yapı malzemesi geliştirilmeye yönelik çalışmalar her geçen gün artarak devam etmektedir.

Alkali aktivasyon yöntemi ile üretilen betonlar, yüksek mekanik üstünlük, düşük enerji giderleri, düşük kirletici gaz emisyonları (CO_2 , SO_2 , NO_3 vb.) ve çevrenin daha az tahribi (doğal kaynaklar yerine atıkların kullanımı) gibi kazanımlar sunmaktadır. Ayrıca, atık malzemelerin kullanımıyla, atıkların çevreye verdiği zararlar ve depolama problemleri de azalmaktadır. Bu bağlayıcılar, normal portland çimento ve bunlarla üretilen betonlara göre daha erken ve daha yüksek dayanım, daha düşük hidratasyon ısı ve saldırgan kimyasallara karşı daha yüksek dayanıklılık gibi birçok teknik üstünlüğe sahiptir. Tüm bu katkılar dikkate alındığında temel bir yapı malzemesi olan betonun geliştirilmesine yönelik çalışmaların sürdürüleceği açıkça görülmektedir.

Bu çalışmada temel bağlayıcı olarak çimento yerine öğütülmüş yüksek fırın cürufu (ÖYFC) ve buna ek olarak ince malzeme ise Erzincan yöresinde bulunan taş ocağı işletmesi atık malzemesi kullanılmıştır. Ayrıca, kullanılan bağlayıcının Sodyum Hidroksit (NaOH) ve Sıvı Sodyum Silikat (Na_2SiO_3) kullanılarak aktive edilmesi sonucunda üretilen alkali aktivasyonlu betonların (AAB) fiziksel ve mekanik özelliklerinin ortaya konulması ve farklı lif türlerinin ayrık ve katışık lif kullanımları sonucunda üretilen betonların dayanım ve dayanıklılık özelliklerine etkilerinin ortaya çıkarılmasına çalışılacaktır. Tüm bu çalışmalar neticesinde çimentoya alternatif olarak yerel kaynakların kullanılmasının yolu açılmış olacaktır. Elde edilen deneysel sonuçlara bağlı olarak numunelerin davranışları yorumlanıp, en iyi başarıyı gösteren numune bileşimi belirlenecektir.

Anahtar Kelimeler: Alkali aktivasyonlu beton, Atık malzeme, Bağlayıcı, Dayanım ve dayanıklılık özellikleri, Katışık lif kullanımı

SUMMARY

Many researchers are working to develop a more economical and environmentally friendly binding construction material as an alternative to cement used in the concrete industry. For this purpose, efforts to develop a new, more environmentally friendly and economical building material called alkali activated concrete (AAC) which is produced without cement, continue to increase day by day.

Concretes produced by alkaline activation offer high mechanical performance, low energy costs, low emissions (CO_2 , SO_2 , NO_3 , etc.), and less environmental impact by using waste materials. These binders provide early and higher strength, lower heat of hydration, and better chemical resistance than normal Portland cements. Therefore, efforts to improve concrete as a building material will continue.

In this study, ground granulated blast furnace slag (GGBFS) was used as the primary binder instead of cement and waste material from a quarry operation in Erzincan was used as the fine material. Additionally, the physical and mechanical properties of alkali-activated concretes (AAC) produced by activating the binder using Sodium Hydroxide (NaOH) and Liquid Sodium Silicate (Na_2SiO_3) will be investigated. The study will examine the effects of the separate and hybrid fiber use of different types of fibers on the strength and durability properties of the produced concretes. As a result of all these studies, the way will be paved for the use of local resources as an alternative to cement. Based on the experimental results obtained, the behaviors of the samples will be interpreted, and the sample composition that shows the best performance will be determined.

Keywords: Alkali activated concrete, Binder, Hybrid fiber use, Strength and durability properties, Waste materials

İÇİNDEKİLER

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK BEYANI.....	IV
TEŞEKKÜR.....	V
ÖZET.....	VI
SUMMARY	VII
İÇİNDEKİLER	VIII
TABLOLAR DİZİNİ	XI
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	XII
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	XVI
1. GENEL BİLGİLER	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Alkali Aktivasyon	3
1.2.1. Tanım	3
1.2.2. Alkali Aktivasyonun Tarihsel Süreci	3
1.2.3. Alkali Aktivasyon Yöntemi	5
1.2.4. Alkali Aktivasyon Yönteminde Kullanılan Aktivatörler	9
1.2.5. Alkali Aktivasyonlu Kompozitlerin Kazanımları	10
1.2.6. Alkali Aktivasyonlu Kompozitlerin Kullanım Alanları.....	11
1.2.7. Alkali Aktivasyonlu Kompozitler	14
1.2.8. Lifli Alkali Aktivasyonlu Kompozitler	15
2. ŞİMDİYE KADAR YAPILAN ÇALIŞMALAR	19
3. ÇALIŞMANIN AMACI, KAPSAMI, GEREKÇESİ VE ÖZGÜNLÜĞÜ	29
4. MATERYAL VE YÖNTEM	32
4.1. Giriş.....	32
4.2. Malzemeler.....	33
4.2.1. Öğütülmüş Granüle Yüksek Fırın Cürufu.....	33
4.2.2. İnce Malzeme (taş ocağı atık malzemesi)	34
4.2.3. Agrega	36
4.2.4. Kullanılan Lifler.....	37
4.2.5. Kullanılan Aktivatörler, Süper Akışkanlaştırıcı ve Su.....	38
4.3. Karışım Özellikleri.....	39
4.3.1. Kompozit Karışım Oranları.....	39
4.3.2. AAB Üretiminde Kullanılan Numune Kalıpları	40

4.3.3. Alkali Aktivatörlerin Hazırlanması.....	41
4.3.4. AAB'nin Üretilmesi, Kalıplara Yerleştirilmesi ve Kürü	42
4.4. Deney Yöntemleri	43
4.4.1. KT'nin Puzolanik Aktivitesinin Belirlenmesi.....	43
4.4.1.1. Eğilmede Çekme ve Basınç Dayanımlarının Belirlenmesi.....	44
4.4.2. Betonun Taze Hali ve Birim Hacim Kütle Deneyi	46
4.4.3. Sertleşmiş Betonun Fiziksel Özellikleri.....	47
4.4.4. Ultrases Geçiş Hızı, Schmidt Çekici ve Basınç Dayanımı Deneyleri.....	49
4.4.5. Elastisite Modülü Belirleme Deneyi	53
4.4.6. Aşınma Dayanımı Oranı Belirleme Deneyi	54
4.4.7. Yarmada Çekme Dayanımı Deneyi	55
4.4.8. Eğilmede Çekme Dayanımı Deneyi.....	56
4.4.9. Donma-Çözülme Dayanıklılık Deneyi.....	59
4.4.10. Sülfata Dayanıklılık Deneyi	63
4.4.11. Çok Amaçlı (Objektif) Optimizasyon.....	65
5. BULGULAR VE KARŞILAŞTIRMA	67
5.1. Kullanılan Bağlayıcı ve Liflere Ait Bulgular.....	67
5.2. KT'nin Puzolanik Aktivite Bulguları.....	69
5.2.1. Fiziksel ve Kimyasal Analiz	69
5.2.2. Eğilmede Çekme ve Basınç Dayanımları	70
5.3. Taze Beton Bulguları	72
5.4. Sertleşmiş Beton Bulguları	73
5.4.1. Sertleşmiş Betonun Fiziksel Bulguları.....	73
5.4.2. Ultrases Geçiş Hızı, Schmidt Çekici ve Basınç Dayanımı Deney Bulguları.....	77
5.4.3. Elastisite Modülü ve Poisson Oranı Belirleme Deneyi Bulguları.....	81
5.4.4. Aşınma Dayanımı Oranı Belirleme Deneyi Bulguları	83
5.4.5. Yarmada Çekme Dayanımı Belirleme Deneyi Bulguları.....	84
5.4.6. Eğilmede Çekme Dayanımı Deneyi Bulguları.....	85
5.4.6.1. Eğilmede Çekme Dayanımı Deneyi Sonrası Numunelerin İçyapısı	85
5.4.6.2. Eğilmede Çekme Dayanımı, Tokluk ve Kopma Modülü	90
5.4.6.3. Kırılma Enerjisi ve Süneklik İndeksi	96
5.4.7. Donma-Çözülme Dayanıklılık Deneyi Bulguları.....	96
5.4.7.1. Kütle Kaybı	97
5.4.7.2. Ultrasonik Geçiş Hızı ve Dinamik Elastisite Modülü.....	99
5.4.7.3. Basınç Dayanımı	100

5.4.8. Sodyum Sülfata Dayanıklılık Deneyi Bulguları	103
5.4.8.1. Kütle Değişimi	104
5.4.8.2. Sülfat Etkisindeki Numunelerin UPV Değerleri.....	105
5.4.8.3. Sülfat Etkisindeki Numunelerin Basınç Dayanımı Bulguları	107
5.4.9. Çok Amaçlı Optimizasyon ile AAB'lerin Mekanik Özellikleri ve Maliyet Analizi	110
6. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME.....	112
KAYNAKÇA.....	117
ÖZGEÇMİŞ	136



TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 1. Alkali aktivasyonu ve alkan bağlayıcıların tarihsel gelişimi (Roy, 1999).....	5
Tablo 2. Çalışmada kullanılan cürufun kimyasal özellikleri	33
Tablo 3. Çalışmada kullanılan cürufun fiziksel özellikleri.....	34
Tablo 4. Kullanılan liflere ait teknik özellikler.....	38
Tablo 5. Sodyum silikatın fiziksel ve kimyasal özellikleri.....	38
Tablo 6. Sodyum hidroksitin fiziksel ve kimyasal özellikleri	38
Tablo 7. Akışkanlaştırıcı katkıya ait teknik özellikler (BASF, 2020).....	39
Tablo 8. AAB ve LAAB üretiminde kullanılan malzeme miktarları (1 m ³).....	40
Tablo 9. Puzolanik aktivitenin belirlenmesi deney programı	44
Tablo 10. ASTM C 618 (2012) ve TS 25 (2008) standartlarındaki kimyasal içerik değerleri (% m).....	45
Tablo 11. Kayaç tozunun fiziksel özellikleri	70
Tablo 12. Kayaç tozuna ait kimyasal içerikler (%m)	70
Tablo 13. Taze beton özellikleri	73
Tablo 14. Sertleşmiş beton birim kütleleri.....	74
Tablo 15. Sertleşmiş betonun fiziksel özellikleri.....	74
Tablo 16. Sertleşmiş betonun tahribatsız test sonuçları.....	78
Tablo 17. Beton niteliği ses hızı ilişkisi (Şimşek, 2020).	78
Tablo 18. Tanık ve lifli numunelerin Basınç dayanımı, Elastisite modülü ve poisson oranları.....	82
Tablo 19. AAB ve LAAB'lerin birinci ve ikinci tepe noktaları arasındaki karşılaştırma.....	91
Tablo 20. İncelenen AAB ve LAAB'ler için ASTM C1609'a göre hesaplanan değerler	93
Tablo 21. Donma-çözülme çevrim sayısına göre AAB numunelerinin ultrasonik geçiş hızı bulguları.....	99
Tablo 22. Betonların Basınç Dayanımı ve Donma-Çözülme Deneyi Bulguları.....	100
Tablo 23. AAB'lerin erişilebilirlik fonksiyonları	111

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.	Alüminosilikatların çözünme-yeniden örgütlenmesi (a) oligomerlerin yoğunlaşması (b) ve polimerizasyon (c) (Sing & Middendorf, 2020).	6
Şekil 2.	Silikat ve alüminatların geopolimerleşme modeli (Khale ve Chaudhary, 2007; Balçıkanlı, 2016).	8
Şekil 3.	Alkali aktivasyon sürecinde geopolimer oluşum modeli (Uğurlu, 2020; Shi vd., 2012).	9
Şekil 4.	1994 yılında Benetton B194 modeli, termal koruma sağlayan AA-karbon kompozitini ekzos düzeyinde kullanmıştır (Davidovits, 2006; Kuranlı, 2020).	13
Şekil 5.	AV8B-Harrier uçakları, operasyonel dikey iniş ve kalkış sırasında yüzeyde yüksek sıcaklıklar üretmektedir (Vickers vd., 2015; Kuranlı, 2020).	14
Şekil 6.	Alkali aktivasyonlu betonların özelliklerini iyileştirmek için kullanılan liflerin sınıflandırılması (Amran vd., 2022).	17
Şekil 7.	Çeşitli LAAB uygulamaları (Charles, 2024; Amran vd., 2022).	18
Şekil 8.	Taş ocağının yer aldığı Tatoğlu tepe (3D uydu görüntüsü; URL-1).	34
Şekil 9.	Taş ocağının genel görüntüsü.	35
Şekil 10.	(a) Volkanik kayalar, (b) Kayaların işlenmesi, (c) Oluşan kayaç atığı, (d) KT'nin çökeltme havuzunda birikmesi.	35
Şekil 11.	(a) ince malzeme olarak kullanılan KT ile (b) bağlayıcı olarak kullanılan ÖYFC	35
Şekil 12.	Çalışmada kullanılan agregalar	36
Şekil 13.	Beton üretiminde kullanılan agreganın tane boyutu dağılımı (granülometri) eğrisi	37
Şekil 14.	(a) Polyester lif, (b) Çelik lif	37
Şekil 15.	Çalışmada kullanılan kalıplar ve kalıpların yağlanması.	41
Şekil 16.	Çalışmada kullanılan sodyum hidroksit (NaOH)'in hazırlanması	42
Şekil 17.	AAB'nin üretimi, numune kalıplarına dökümü ve kürü.	43
Şekil 18.	Puzolanik aktivitenin belirlenmesinde kullanılan numunelerin üretimi.	44
Şekil 19.	Prizmatik numune örnekleri üzerinde yapılan eğilmede çekme ve basınç dayanımı deneyleri	45
Şekil 20.	Serbest çökme (Slump) deney düzeneği-ölçümü ve taze beton birim kütlesinin belirlenmesi.	46
Şekil 21.	Beton numunelerinin fiziksel özelliklerinin belirlenmesi	48

Şekil 22. Numuneler üzerinde ultrases deneyinin yapılması.....	49
Şekil 23. Schmidt çekici deneyinin uygulanması	50
Şekil 24. Schmidt çekici için uygulama açısına göre geri sıçrama değerine karşılık gelen yaklaşık beton basınç dayanımları	51
Şekil 25. Tek eksenli tahribatlı yöntemle beton basınç dayanımının belirlenmesi	52
Şekil 26. TEBD deneyi ile ilgili açıklayıcı bilgiler (Çınar, 2007; Özdemir, 2014; Aksüt, 2015).	52
Şekil 27. Numune başlıklama cihazı ve yüzeyi düzeltilmiş numune	53
Şekil 28. Beton numunelerin elastisite modülü deneyinin yapılışı.....	54
Şekil 29. Aşındırma cihazı ve aşınan beton numune	55
Şekil 30. Yarmada çekme dayanımı deneyinin yapılışı.....	56
Şekil 31. Eğilmede çekme dayanımı deneyinin yapılışı	57
Şekil 32. Tipik yük-deplasman eğrisi ve tokluk parametreleri (Khamar ve Kumar, 2015; ASTM C 1609, 2019).	58
Şekil 33. Donma-çözülme döngüsüne maruz kalan alkali aktivasyonlu beton örnekleri.....	59
Şekil 34. Numunelerde oluşan içyapı hasarının tespitinin belirlenebilmesi için ultrasonik geçiş hızı deneyinin yapılışı	60
Şekil 35. Numunelerin %5 ve %10 Na ₂ SO ₄ çözeltisine maruz bırakılması ve her 5 çevrim sonunda verilerin alınması.....	64
Şekil 36. (a) KT, (b) ÖYFC, (c) ÇL ve (d) PYL'ye ait SEM morfolojik görüntüleri	68
Şekil 37. (a) KT ve (b) ÖYFC'nin XRD modelleri	69
Şekil 38. Kayaç tozunun farklı kütle oranlarındaki (%m; %0; %10; %20; %30 ve %40) 7 ve 28 günlük eğilmede çekme dayanımı bulguları	71
Şekil 39. Kayaç tozunun farklı kütle oranlarındaki (%m; %0; %10; %20; %30 ve %40) 7 ve 28 günlük basınç dayanımı bulguları	71
Şekil 40. Taze betonların yoğunluk ve serbest çökme (slump) bulguları.....	73
Şekil 41. Tanık ve lifli betonların gözeneklilik (porozite) bulguları	75
Şekil 42. Tanık ve lifli betonların su emme bulguları	75
Şekil 43. Tanık ve lifli betonların gözeneklilik (porozite) ve su emme bulguları arasındaki ilişki.....	76
Şekil 44. Kür süresine bağlı olarak farklı lif oranlarında ve katışık lif formlarında üretilen beton numunelerin basınç dayanımları.....	79
Şekil 45. Numunelerin 3 günlük kür süresine bağlı basınç dayanımı ile ultrases ve schmidt değerleri arasındaki anlamlılık seviyesi.....	80

Şekil 46. Numunelerin 7 günlük kür süresine bağlı basınç dayanımı ile ultrases ve schmidt değerleri arasındaki anlamlılık seviyesi.....	80
Şekil 47. Numunelerin 28 günlük kür süresine bağlı basınç dayanımı ile ultrases ve schmidt değerleri arasındaki anlamlılık seviyesi.....	80
Şekil 48. Lif oranlarına, türüne ve kullanım şekline göre elastisite modülü ve poisson oranlarının değişimi.....	83
Şekil 49. LAAB numunelerinin lif türüne, oranına ve kullanım şekline bağlı olarak tanık numuneye göre aşınma kaybı ilişkisi.....	84
Şekil 50. Lif oranlarına, türüne ve kullanım şekline göre yarmada çekme dayanımının tanık betona göre değişimi.....	85
Şekil 51. Eğilme tokluğu için test edilen prizmaların SEM görüntüleri.....	90
Şekil 52. AAB'lerin eğilmede çekme dayanımı ile yarmada çekme dayanımı arasındaki ilişki.....	90
Şekil 53. ÇLAAB'nin tanık betona göre yük-deplasman ilişkisi	92
Şekil 54. PYLAAB'nin tanık betona göre yük-deplasman ilişkisi.....	92
Şekil 55. HLAAB'nin tanık betona göre yük-deplasman ilişkisi	93
Şekil 56. AAB ve LAAB'lerin eğilme tokluğu ile eşdeğer eğilme dayanımı arasındaki ilişki.....	94
Şekil 57. AAB ve LAAB'lerin eğilme tokluğu ile kopma modülü (nihai dayanım) arasındaki ilişki.....	95
Şekil 58. Kırılma enerjisi ve süneklik indeksinin lif içeriği ile değişimi	96
Şekil 59. 120 donma-çözülme çevrimi sonrası numunelerin görünüşleri.....	97
Şekil 60. Çelik lifli AAB numunelerinin tanık betona göre kütle değişimi	97
Şekil 61. Polyester lifli AAB numunelerinin tanık betona göre kütle değişimi	98
Şekil 62. Katışık (Hibrit) lifli AAB numunelerinin tanık betona göre kütle değişimi	98
Şekil 63. Betonların lif türü ve oranına bağlı olarak basınç dayanımı ile dinamik elastisite modülleri arasındaki ilişki	101
Şekil 64. Betonların lif türü ve oranına bağlı olarak basınç dayanımı ile dayanım kaybı arasındaki ilişki.....	101
Şekil 65. Betonların lif türü ve oranına bağlı olarak dayanıklılık faktörü.....	102
Şekil 66. AAB numunelerinin %5 Na ₂ SO ₄ ve %10 Na ₂ SO ₄ çözeltilerine maruz kaldıktan sonraki görünüşleri.....	103
Şekil 67. %5 sodyum sülfat çözeltisine 15 çevrim boyunca maruz kalan tanık ve lifli AAB numunelerinin kütledeki değişim	104

Şekil 68. %10 sodyum sülfat çözeltisine 15 çevrim boyunca maruz kalan tanık ve lifli AAB numunelerinin kütledeki değişim	105
Şekil 69. %5 Sülfat etkisindeki (hafif ortam) numunelerin ultrases geçiş hızları	106
Şekil 70. %10 Sülfat etkisindeki (şiddetli ortam) numunelerin ultrases geçiş hızları	106
Şekil 71. Alkali aktivasyonlu betonların hafif sülfat (%5 Na ₂ SO ₄) döngüleri sonucunda tanık numuneye göre basınç dayanımında görülen değişim	107
Şekil 72. Alkali aktivasyonlu betonların şiddetli sülfat (% 10 Na ₂ SO ₄) döngüleri sonucunda tanık numuneye göre basınç dayanımında görülen değişim	108
Şekil 73. Alkali aktivasyonlu beton numunelerin hafif sülfat (%5) ortamındaki basınç dayanımı ile UPV değerleri arasındaki ilişki	109
Şekil 74. Alkali aktivasyonlu beton numunelerin şiddetli sülfat (%10) ortamındaki basınç dayanımı ile UPV değerleri arasındaki ilişki	109

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

AA	: Alkali aktivasyon
AAB	: Alkali aktivasyonlu beton
ABD	: Amerika Birleşik Devletleri
Al ₂ O ₃	: Alüminyum oksit
Al	: Alüminyum
ark.	: Arkadaşları
A-S-H	: Alümina silika hidrat
°C	: Santigrat derece
Ca	: Kalsiyum
CaO	: Kalsiyum oksit
CEM	: Cement
C ₁₂ A ₇	: Mayenit
CO ₂	: Karbondioksit
C-S-H	: Kalsiyum silika hidrat
ÇL	: Çelik lif
ÇLAAB	: Çelik lifli alkali aktivasyonlu beton
EM	: Elektromanyetik
GJ	: Gigajoule
GYFC	: Granüle yüksek fırın cürufu
HCl	: Hidroklorik asit
H ₂ O	: Hidrojen di oksit
HLAAB	: Hibrit lifli alkali aktivasyonlu beton
HSiO ₃	: Hidrosilikat
K	: Potasyum
KL	: Katışık lif
kg	: Kilogram
KLGB	: Karbon lifli geopolimer beton
KOH	: Potasyum hidroksit
K ₂ SiO ₃	: Potasyum silikat
KT	: Kayaç tozu
LAAB	: Lifli alkali aktivasyonlu beton
m ²	: Metrekare

m^3	: Metreküp
MBSAAM	: Magnesium Blast Slag Alkali-Activated Mortar
MgO	: Magnezyum oksit
MK	: Metakaolin
MPa	: Megapaskal
Na	: Sodyum
N-A-S-H	: Sodyum alümina silika hidrat
NaOH	: Sodyum hidroksit
Na_2SiO_3	: Sodyum silikat
Na_2SO_4	: Sodyum sülfat
Nm	: Newtonmetre
NO_3	: Nitrat
NO_x	: Nitrit oksit/nitrojen dioksit
O	: Oksijen
OH	: Hidroksit
ÖGYFC	: Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu
ÖYFC	: Öğütülmüş yüksek fırın cürufu
PA	: Poliamid
PÇ	: Portland çimentosu
pH	: Potansiyel hidrojen
PP	: Polipropilen
Prof.	: Profesör
PVA	: Polivinil alkol
PYL	: Polyester lif
PYLAAB	: Polyester lifli alkali aktivasyonlu beton
SD	: Silis dumanı
SEM	: Scanning electron microscope
SF	: Steel fiber
SIFCON	: Slurry infiltrated fiber concrete
Si	: Silisyum
SiO_2	: Silisyum dioksit
SiO_3	: Silikat
SO_2	: Kükürt dioksit
t	: Ton
TA	: Taş ocağı atığı

TEM	: Taramalı elektron mikroskopisi
UK	: Uçucu kül
UPV	: Ultrasonic Pulse Velocity
USH	: Ultrases hızı
vb.	: ve benzeri
vd.	: ve diğerleri
W	: Watt
XRD	: X-Ray Diffraction
XRF	: X-Ray Fluorescent
YFC	: Yüksek fırın cürufu



1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Beton hem ülkemizde hem de dünya çapında en sık tercih edilen yapı malzemesidir. Çok katlı binalar, barajlar, su kanalları, tüneller, köprüler, havaalanları ve limanlar gibi çeşitli yapı türlerinde yapı endüstrisinin temel malzemesi olarak yaygın şekilde kullanılmaktadır. Günümüzde yaygın bir şekilde kullanılan hazır beton ilk olarak Almanya’da üretilmiş sonraki yıllarda ise pek çok ülke tarafından kullanılmaya başlanmıştır (Baradan, 2015). Betonun inşaat malzemeleri arasında yaygın olarak kullanımında maliyetinin ucuz, kolay şekil verilebilir, yüksek dayanıklılık ve uzun ömürlü olması gibi kazanımlarının etkisi büyüktür (Shaikh, 2016). Betonun üstün özellikleri büyük bir tüketim alanı oluşturmuş ve sudan sonra en çok tüketilen ikinci madde olmasını sağlamıştır (Davidovits, 2006). Dünya genelinde yıllık kişi başına üretilen beton miktarının yaklaşık olarak bir ton civarında olduğu bilinmektedir (Alkan, 2004). Beton, bağlayıcı bir madde ve su ile birleştirilerek oluşturulan, taze ve sertleşmiş hallerinde farklı özelliklere sahip kompozit bir yapı malzemesidir (Aksüt, 2015). Portland çimentosu, beton üretiminde agregaları birbirine bağlayan temel bağlayıcı malzemedir. Portland çimentosu, beton endüstrisinin temel bağlayıcı malzemesi olarak 2019’da 4.2 milyar ton/yıl üretim kapasitesine ulaşmış ve talepteki artış göz önüne alındığında, 2050’de bu rakamın 6.1 milyar ton/yıl olması beklenmektedir (Kantarcı, 2021; Ganesh ve Muthukannan, 2021; Ranjbar ve Zhang, 2020; Scrivener vd., 2018). Beton üretimi sırasında bağlayıcı olarak kullanılan Portland çimentosunun üretimi için hem yüksek miktarda enerji (1400-1600 °C) harcanmakta hem de çevreye CO₂ salınımı olmaktadır. Çimento üretiminin küresel ısınmanın ana sebebi olan CO₂ salınımında % 5 oranında etkili olduğu ve bir ton çimento üretiminin atmosfere yaklaşık olarak bir ton CO₂ salınımı çıkardığı belirlenmiştir (Malhotra ve Mehta, 2002). Çimento endüstrisinin dünyadaki CO₂ salınımına etkisinin yaklaşık olarak %7 kadar olduğu yapılan araştırmalarda vurgulanmaktadır (Ali vd., 2011; Meyer, 2009; Shi vd., 2012). Çimento üretimi bu şekilde hızla devam ederse bu oranın önümüzdeki sadece birkaç yıl içerisinde %17 gibi ciddi bir seviyeye çıkacağı tahmin edilmektedir (Kantarcı, 2021; El-Gamal ve Selim, 2017; Damilola, 2013). Küresel sıcaklığın yükselmesine ve bunun sonucu olarak iklim değişikliklerine sebep olan sera gazının artmasında CO₂ salınımının çok büyük etkisi olmaktadır.

İklim değişikliği yeryüzündeki canlıları tehdit eden çok ciddi küresel sorunlardan biridir. Bunun yanı sıra çimento üretimi için yaklaşık 4.8 GJ/t gibi oldukça yüksek enerji gerekmekte ve enerji kaynaklarının hızla tükenmesi sonucu enerji fiyatlarındaki artış göz önünde bulundurulursa çimento üretim maliyetlerinin de yükselmeye devam edeceği görülmektedir (Kantarcı, 2021; Ranjbar ve Zhang, 2020; Worrell vd., 2001). Bunun yanında çimentonun üretilmesinin çevreye verdiği zararlar özetlenecek olursa, başta arazi kaybı ve dönüşümü olmak üzere, doğal kaynakların tüketilmesi, bunların çıkarılması, taşınması ile işlenmesinden kaynaklanan çevresel emisyonlar, çimento üretimi sürecindeki büyük miktarda enerji ve su tüketimini de saymak gerekir (Pellegrino vd., 2019). Hızla artan nüfus ve şehirleşme yapı endüstrisinde betonun kullanımını arttırmakta ve kaçınılmaz kılmaktadır. Tüm bu sorunlar göz önüne alındığında bağlayıcı olarak daha çevresel ve ekonomik bir malzemeye olan ihtiyaç gün geçtikçe artmaktadır. Beton üretiminde bağlayıcı olarak portland çimentosundan başka bir malzeme kullanımına yönelik çalışmalardan en ilgi çeken, yapısında alüminosilikat (CaO , Al_2O_3 , SiO_2) içeren puzolanik özellikli öğütölmüş yüksek fırın cürufu (ÖYFC), uçucu kül (UK), metakaolin (MK) ve silis dumanı (SD) gibi endüstriyel atıkların bir aktivatör ile aktive edilerek yeni bir yapı malzemesi elde edilmesi yöntemidir. Bu teknikle üretilen betonlar, yüksek mekanik özelliklerinin yanı sıra, enerji tasarrufu, düşük kirletici gaz emisyonları (CO_2 , SO_2 , NO_x vb.) ve çevresel tahribatın azalması gibi olumlu etkiler sağlar. Yapılan çalışmalara göre AAB üretimi, portland çimentosu üretiminden kaynaklanan sera gazı salınımını % 44-64 oranında azaltabilmektedir (McLellan vd., 2011). Bununla birlikte, alkali aktivasyon yöntemiyle beton üretiminde, portland çimentosu üretimine göre %60 oranında enerji tasarrufu sağlandığı ve yine çeşitli çalışmalarda alkali aktivasyon yöntemiyle beton üretiminin portland çimento üretimine göre %75 oranında daha ekonomik olduğu ifade edilmiştir (Comrie ve Davidovits, 1988; Davidovits vd., 1990; Kantarcı, 2021; Singh, 2018; Ganesh ve Muthukannan, 2021; Kantarcı, 2021). Alkalilerle aktive edilerek üretilen betonlar, normal portland çimentosu kullanılarak üretilen betonlara göre erken ve daha yüksek mekanik dayanım, daha düşük hidratasyon ısısı ve saldırgan kimyasallara karşı daha yüksek dayanıklılık gibi bazı üstün özellikler göstermesine rağmen geleneksel betonda olduğu gibi ani priz, mikro çatlak oluşumu ile yüksek büzölme ve çiçeklenme gibi bazı olumsuz özelliklere de sahiptir. Beton, bir kompozit malzeme olarak yorulma dayanımı, aşınma dayanımı, çatlak oluştuktan sonraki yük taşıma dayanımı ve enerji yutma kapasitesi açısından zayıf özellikler sergiler. Özellikle çekme dayanımı düşük olan betonlarda, dinamik yükler çatlak oluşumuna ve birçok çatlak yayılmasına neden

olabilmektedir. Ayrıca, betonun mekanik ve fiziksel özelliklerinin yapının davranışı üzerinde çok önemli etkileri olduğu düşünüldüğünde betonun zayıf yönlerinin (özellikle çekme dayanımı) iyileştirilmesi için de birtakım arayışlar içerisine girilmiştir. Özellikle gevrek bir malzeme olan betonun daha sünek bir malzemeye dönüştürülmesi için çeşitli lifler kullanılmaktadır. Farklı lifleri tek başına ya da çeşitli bileşimlerle belirli oranlarda kullanarak üretilen karma lifli betonlar, betonun çeşitli özelliklerini iyileştirmesine olanak tanımaktadır. Bu üstün malzemeyle ilgili deneyimler giderek artmakta ve bu sayede, amaca uygun, istenilen niteliklere sahip ürünler elde etmek için çalışmalar sürdürülmektedir.

1.2. Alkali Aktivasyon

1.2.1. Tanım

Portland çimentosunun üretimindeki ekonomik ve çevresel endişeler, beton üretiminde alternatif bağlayıcıların aranmasını 21. yüzyılda artırmıştır. Günümüzde, araştırmacılar alkali aktive edilmiş veya geopolimer bağlayıcılar olarak da bilinen yeni nesil bağlayıcıların beton üretiminde kullanımı üzerine çalışmalarını yoğunlaştırmışlardır. Fransız araştırmacı Davidovits, 1978'de alüminosilikat içeren inorganik polimerleri ilk kez "geopolimer" olarak adlandırmıştır. Geopolimerler, uçucu kül, yüksek fırın cürufu, tuf, pomza, perlit gibi doğal ve/veya yapay puzolanik özellikli malzemelerin bir alkali çözeltisiyle sentezlenmesi sonucunda oluşur. Portland çimentosuyla kıyaslandığında, geopolimer bağlayıcılar ekonomik, çevresel ve dayanıklılık açısından birçok üstünlüğe sahiptir. Ayrıca, çimentoya alternatif bağlayıcı olarak önerilen geopolimerler, çimento üretimi için oluşan karbondioksit emisyonlarının %80'ini azaltabilmektedirler (Duxson vd., 2007; Davidovits, 2011; Ganesh ve Muthukannan, 2021; Kantarcı, 2021).

1.2.2. Alkali Aktivasyonun Tarihsel Süreci

Alkali aktivasyon yöntemiyle beton benzeri bir yapı malzemesi üretilmesi ve geopolimer beton olarak adlandırılması geleneksel betonun tarihi kadar eski değildir. Fransız bilim insanı ve mühendis Prof. Joseph Davidovits tarafından ilk kez 'Geopolimer' terimi 1970'li yıllarda literatüre kazandırılmıştır. Davidovits, kaolin, kireçtaşı ve dolomitin yüksek basınç veya ısıya maruz kaldıktan sonra oluşan ürünlerini, alüminosilikat kaynağı olarak kullanarak alkalın bağlayıcılar üretmiş ve patent almıştır. Bu bağlayıcılar, "pyrament" ve diğer ticari isimlerle piyasada satılan "geopolimer"

olarak adlandırılmıştır. Finlandiya'da Forss'un "F-cement" ve Ukrayna'da Krivenko'nun "geocements" olarak adlandırdığı bağlayıcılar da bu kategoriye dahildir. Özellikle "geocements" adlı bağlayıcının hidrasyonu sonucu oluşan ürünler doğal minerallere oldukça benzerdir (Pacheco-Torgal, Castro-Gomes ve Jalali, 2008b; Roy, 1999).

Geopolimer teknolojisi temelde Avrupa'da ortaya çıkan yangın olaylarını takiben organik termoset polimerlere karşı yangına dayanıklı bir alternatif malzeme üretmek için geliştirilmiştir. Bu konudaki ürün esaslı ilk çalışma ve örnekler şu şekilde sıralanabilir; yolcu gemilerinde yangın koruması için kaplamalar, karbon fiber kompozitler için yüksek sıcaklığa dayanıklı reçine, ahşap yapılarda termal koruma, ısıya dayanıklı yapışkan, ısıya dayanıklı refraktörler. Ancak, geopolimer teknolojisindeki uygulamalar zamanla inşaat sektöründe yerini almış ve yapı dünyası geopolimer teknolojisinin birincil kullanım disiplini haline gelmiştir. Bu durumun gerçekleşmesinin temeli kömür yakımından elde edilen uçucu külden, alkali aktivasyon yöntemiyle geopolimer beton üretilebileceğinin gözlemlenmesi olarak ifade edilmektedir (Provis ve van Deventer, 2009). Victor Glukhovsky, Sovyet Sosyalist Cumhuriyetler Birliği İnşaat Mühendisliği Kiev Enstitüsünde çalışırken 1957 yılında alkali-aktive edilmiş cüruf bağlayıcısındaki sorunları araştırmıştır. Glukhovsky, 1960'lı ve 1970'li yıllarda yaptığı araştırmalarla hem kalsiyum-silikat hidrat, hem de kalsiyum ve sodyum alümino-silikat hidratın (zeolit) katılma ürünü olduğunu keşfederek literatüre önemli katkılarda bulunmuştur. Bu teknoloji kullanılarak yapılan betonlar Glukhovsky tarafından "toprak silikat beton" veya "zemin, toprak çimentosu" olarak adlandırılmıştır (Davidovits, 2011).

Alkali aktivasyon (AA) edilerek geopolimer beton üretiminde kullanılan bağlayıcıların geçmişten günümüze kadar olan gelişimindeki bazı önemli adımlar Tablo 1'de kronolojik olarak özetlenmektedir.

Tablo 1. Alkali aktivasyonu ve alkalin bağlayıcıların tarihsel gelişimi (Roy, 1999).

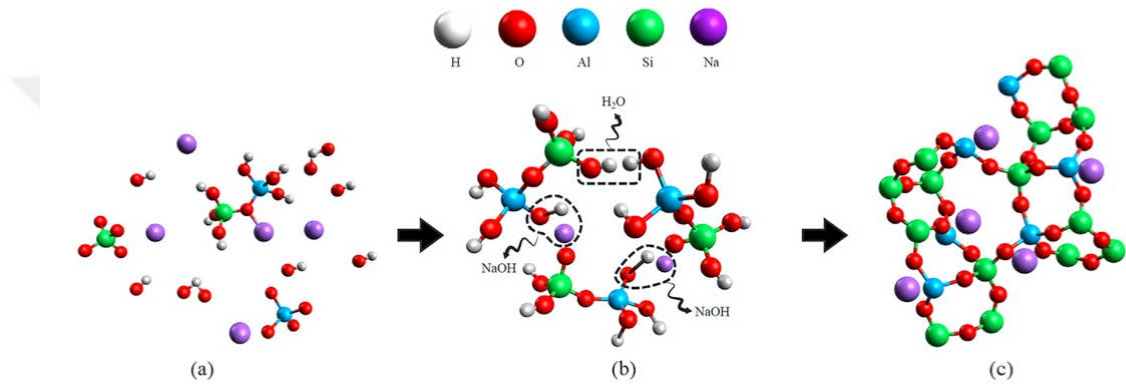
Yazarlar	Yıl	Önem
Feret	1939	Çimentoda cüruf kullanımı
Purdon	1940	Alkali-cüruf bileşimleri
Glukhovsky	1959	Alkalin çimentoların teorik esasları ve gelişimi
Glukhovsky	1965	Bileşen olarak doğal maddelerin kullanımı nedeniyle “alkalin çimentolar” adının ilk kullanımı
Davidovits	1979	“Geopolimer” terimi-daha fazla polymerizasyonu vurgular
Malinowski	1979	Antik kemerli suyuollarının karakterizasyonu
Fors	1983	F-çimentosu (cüruf-alkali-süper akışkanlaştırıcı)
Langton ve Roy	1984	Antik yapı malzemelerinin karakterizasyonu
Davidovits ve Sawyer	1985	“Pyrament” patent
Krivenko	1986	$R_2O-RO-R_2O_3-SiO_2-H_2O$
Malolepsy ve Petri	1986	Sentetik melit cüruflarının aktivasyonu
Malek vd.	1986	Cüruf çimentoları-düşük seviyede radyoaktif atık oluşturur
Davidovits	1987	Antik ve modern çimentoların kıyaslanması
Deja ve Malolepsy	1989	Klorürlere direnç görülmüştür
Kaushal vd.	1989	Zeolit oluşumunu içeren alkalin karışımlarından adiabatik
Roy ve Langton	1989	Antik beton ile benzerlikleri
Majumdar vd.	1989	$C_{12}A_7$ -cüruf aktivasyonu
Talling ve Brandstetr	1989	Alkalilerle aktive edilmiş cüruf
Wu vd.	1990	Cüruf çimentolarının aktivasyonu
Roy vd.	1991	Hızlı priz alan alkali-aktive bağlayıcılar
Roy ve Silsbee	1992	Alkali-aktive bağlayıcılar: genel bakış
Roy ve Malek	1993	Cüruf çimentosu
Glukhovsky	1994	Antik, modern ve gelecek betonları
Krivenko	1994	Alkalin bağlayıcılar
Wang ve Scrivener	1995	Cüruf ve alkalilerle aktive edilmiş cürufun mikroyapısı

Son 30 yılda ise bunlara ek olarak çok sayıda önemli araştırmalar yapılmıştır. Bu araştırmalardan elde edilen sonuçlar ilgili bölümlerde verilmektedir.

1.2.3. Alkali Aktivasyon Yöntemi

Alkali aktivasyon adı verilen yöntem, alüminosilikat içeren hammaddelerin örneğin, öğütülmüş yüksek fırın cürufu, uçucu kül, metakaolin gibi çeşitli alkali çözeltiler içinde (sodyum hidroksit, potasyum hidroksit, sodyum silikat gibi) çözündürülmesiyle alüminat ve silikat monomerlerinin oluştuğu, bağlayıcı özellikli yeni

bir malzemenin geliştirilmesidir. Bu monomerler önce polimerlere göre çok daha az monomer içeren küçük oligomerlere ve daha sonra da geopolimerlere dönüşmektedir (Sing ve Middendorf, 2020). Geopolimerizasyon işleminde çözünme-yeniden düzenlenme, yoğunlaşma ve polimerizasyon olmak üzere 3 temel süreç bulunmaktadır. Çözünme-yeniden düzenlenme aşamasında birçok oligomer formu oluşturmaktadır. Oligomerler daha sonra birbirleriyle bağlanarak büyük polimer zincirlerini oluştururlar. Oligomerlerin bağlanması sonucunda OH grupları ile bir oksijen atomunun paylaşılması sonucunda su serbest bırakılmaktadır. Geopolimerizasyon sürecinin oluşum şeması Şekil 1’de gösterilmektedir (Sing ve Middendorf, 2020).



Şekil 1. Alüminosilikatların çözünme-yeniden örgütlenmesi (a) oligomerlerin yoğunlaşması (b) ve polimerizasyon (c) (Sing & Middendorf, 2020).

Geopolimer betonda, kimyasal reaksiyon sonucu oluşan bileşenler geleneksel betonda oluşarlardan farklıdır. Bunun nedeni geopolimerlerin kalsiyum silika hidrat (C-S-H) jeli yerine geopolimerizasyon sonucu alüminosilikat hidrat (A-S-H) jelinden oluşmasıdır (Albitar vd., 2017). Alkali bir ortamda geopolimerizasyon süreci Si-O-Al ve Si-O-Si gibi kovalent bağların polimerleşmesi ile devam eder. Geopolimer beton üretiminde kaolin, feldispat ve endüstriyel katı atıklar (uçucu kül, yüksek fırın cürufu, madencilik atıkları vb.) gibi çeşitli alüminosilikat içerikli malzemeler katı hammaddeler olarak kullanılabilir. Bu hammaddelerin amorf olması ve yeterli reaktif camı içeriğe sahip olması geopolimerizasyon için temel kriterdir. Alüminosilikat özellikli hammaddelerin aktifleştirilmesinde sodyum hidroksit (NaOH), sodyum silikat (Na₂SiO₃), potasyum hidroksit (KOH) ve potasyum silikat (K₂SiO₃) gibi alkali aktivatörler kullanılmaktadır. Akalilik seviyesi bakımından KOH, NaOH’e göre daha yüksektir. Ancak, NaOH daha fazla silikat ve alüminat monomeri oluşturma kapasitesine sahiptir (Singh vd., 2015).

Geopolimerlerin ham maddeler ve alkali sıvılar olmak üzere iki temel bileşeni bulunmaktadır. Ham maddeler alüminyum ve silisyum açısından zengin alüminosilikat özellikli olmalıdır. Bunlar kaolin, kil vb. doğal mineraller olabildiği gibi uçucu kül, silis dumanı, yüksek fırın cürufu vb. yan ürün malzemeleri de olabilmektedir. Geopolimerler için hammadde seçiminde maliyet, uygunluk, uygulama türleri gibi birçok parametre bulunmaktadır. Alkali sıvılarda ise genellikle potasyum veya sodyum esaslı çözünebilir sıvı malzemeler tercih edilmektedir. Şu halde geopolimer beton üretiminde sodyum hidroksit ya da potasyum hidroksit, sodyum silikat ya da potasyum silikat yaygın olarak kullanılan sıvı alkalilerdir (Lloyd ve Rangan, 2010; Uğurlu, 2020). Kimyasal alkali aktivatörler, alümina ve silika atomlarıyla tepkimeye girerek, doğal kayalara benzer yapısal ve kimyasal özelliklere sahip moleküllerin oluşumunu tetiklerler. (Balçıklan, 2016).

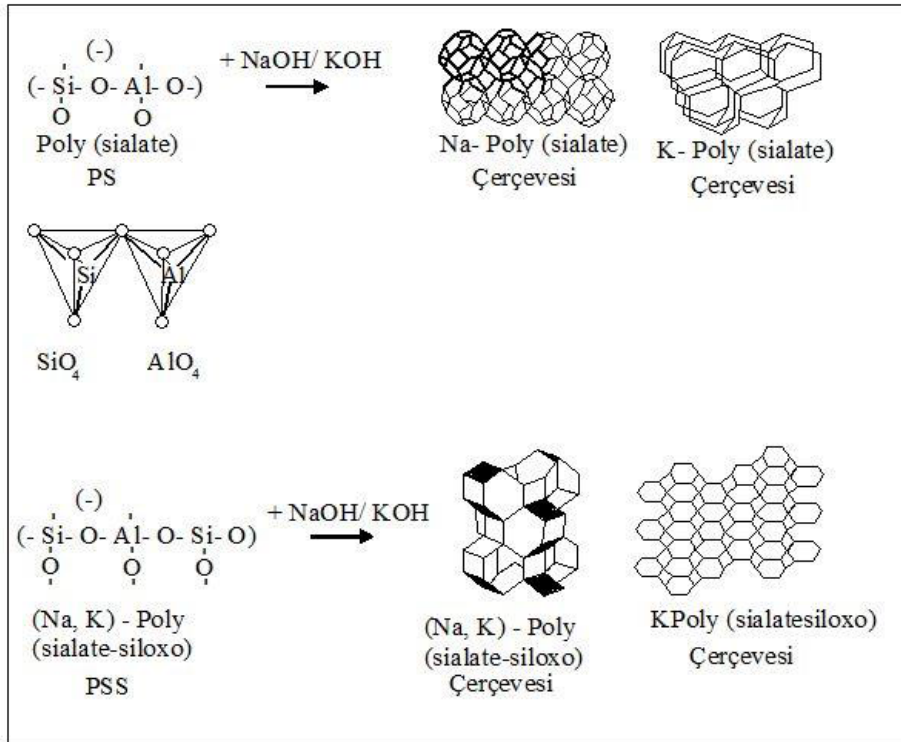
Geopolimer malzemeler üç grupta sınıflandırılırlar.

- Kalsiyum oranı düşük, ancak SiO_2 ve Al_2O_3 oranı yüksek olan hammadde malzemelerinden üretilen geopolimerler, örneğin uçucu kül ile üretilebilir. Bu tür hammadde malzemelerden, alkali çözeltilerle aktive edildiğinde ve az miktarda ısı kürü uygulandığında, yüksek mekanik dayanıma sahip geopolimer malzemeler elde edilebilir ve bunlar amorf yapıya sahip alümina silikatlara benzer davranış sergileyebilirler (Chowdhury, 2013).
- Kalsiyum açısından zengin malzemeler, örneğin yüksek fırın cürufu gibi, alkali çözeltilerle aktivasyonu ile sentezlenen ve C-S-H jeli bakımından yoğun bir iç yapıya sahip olan geopolimerlerdir (Palomo ve Palacios, 2003b).
- Aktivatörler ile sentezlenen ve Ca, Si ve Al içeriği bakımından zengin hammaddelerin karışımıyla geopolimerler oluşur (Palomo vd., 2004).

Hammaddelerin farklı kimyasal yapıda olması, alkali aktivatörün türü ve yoğunluğu, geopolimerizasyon sonucu oluşacak ürünün de değişik özellikler göstermesine sebep olmaktadır. Buradaki en önemli parametre kullanılan alüminosilikat kaynağında bulunan camsı silika ve alümin miktarıdır. Geopolimerizasyon sürecinde iki farklı model tanımlanmıştır. İlk model, kalsiyum içeriği zengin olan bağlayıcı, $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$ dördü sistemidir. Burada, $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ve $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ oranı yaklaşık 3'tür. İkinci modelde ise düşük CaO (<1%), yüksek SiO_2 ve Al_2O_3 içeriğe sahip bağlayıcıları ifade etmede kullanılır.

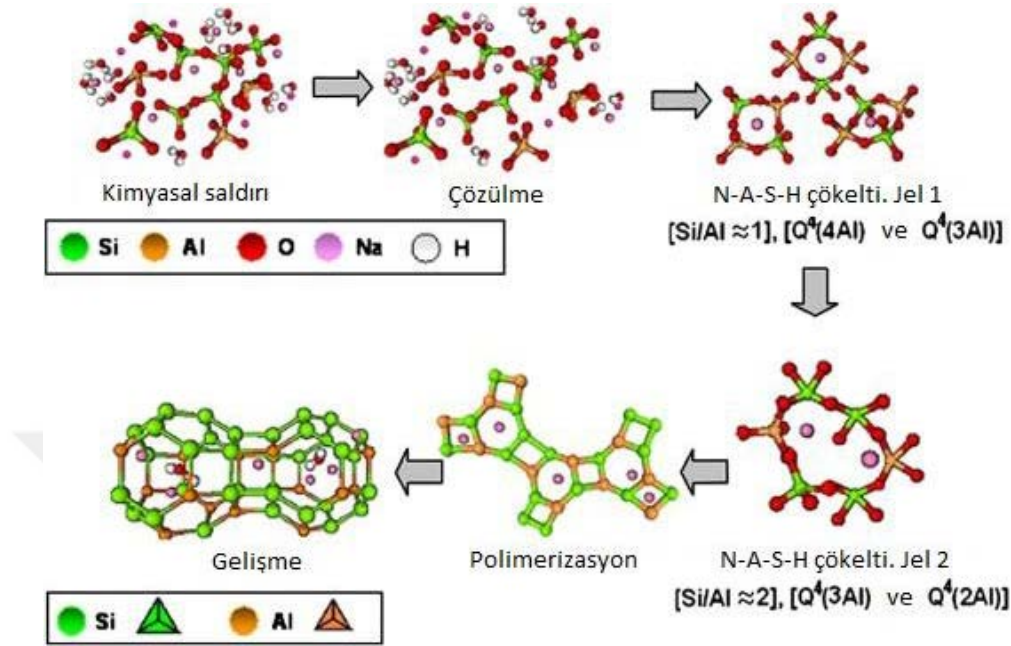
İlk modeller tipik olarak camsı ÖYFC'nin alkali aktivasyonunu göstermektedir. C-S-H jeline benzeyen hidrate kalsiyum silikat, reaksiyonun ana ürünüdür. Bu yapı, portland çimentosunun hidratasyonu nedeniyle ortaya çıkan C-S-H jelinden farklı olup,

Ca/Si oranı daha düşüktür. Diğer fazların veya hidrate bileşenlerin oluşumu başta kullanılan aktivatörün tipine ve miktarına, özellikle cürufun yapısına, kompozisyonuna, bununla beraber sertleşme sırasında kür koşullarına bağlıdır. İkinci modelde aktivasyona maruz kalacak malzeme alümina-silikat bakımından zengin uçucu küllerdir. Bu aktivasyonda reaksiyon sıcaklığı çok önemlidir. Kür işlemi, 40 ila 85 santigrat derece arasında gerçekleştirildiğinde, ortam sıcaklığında reaksiyon hızı düşük olsa da, iki saatte yaklaşık 20 MPa dayanım elde edilebilir. Bu durumda, hidrate alümina silikat zincirlerinin oluşturduğu amorf yapıdaki inorganik polimerler, negatif yükleri alkalın iyonlarınca dengelendiği amorf yapıya sahiptir (Jaarsveld vd., 1997; Palomo vd., 2004; Torgal vd., 2008; Balçıklı, 2016). Hammaddelerin alkali aktivatörler ile aktivasyonu sonucu meydana gelen geopolimerler, öncelikle alüminyum ve silisyum atomlarının içeriğinde Na ve K olan alkalilerle tetrahedral yapı oluşturarak bir araya gelmesi ve daha sonra ortamdaki oksijen atomlarını dönüşümlü olarak kullanması ile oluşmaktadırlar. Bu yapının temel taşlarını Al-O-Si formu oluşturmaktadır (Şekil 2). Alkali tuzlar veya hidroksit çözeltilerinin alüminat ve silikatları çözmesiyle geopolimerizasyon meydana gelmektedir. Şekil 2 alkali metallerin, kaynağında çözünen alüminat ve silikatları polimerleştirilmesi sonucu reaktifliği yüksek yapıların oluşmasını göstermektedir.



Şekil 2. Silikat ve alüminatların geopolimerleşme modeli (Khale ve Chaudhary, 2007; Balçıklı, 2016).

Fernandez-Jimenez ve Palomo tarafından 2005 yılında alüminosilikat bağlayıcıların alkaliler ile aktivasyonu sırasında oluşan mikroyapısal gelişimini tarif etmek için Şekil 3'teki grafik modeli gösterilmiştir (Shi vd., 2012).



Şekil 3. Alkali aktivasyon sürecinde geopolimer oluşum modeli (Uğurlu, 2020; Shi vd., 2012).

1.2.4. Alkali Aktivasyon Yönteminde Kullanılan Aktivatörler

Alkali aktivasyon yönteminde kullanılan bağlayıcıyı aktifleştirmek için pek çok aktivatör kullanılmaktadır. En yaygın aktivatörler arasında sodyum hidroksit (NaOH) ve sodyum silikat (Na_2SiO_3) karışımı ile potasyum hidroksit (KOH) ve potasyum silikat (K_2SiO_3) karışımı yer almaktadır (Palmo vd., 1999). Kullanılan bağlayıcı malzemelerin aktivasyonu sonucu oluşan hidrasyon ürünlerinin özellikleri üzerinde kullanılan aktivatörün doğrudan etkisi bulunmaktadır. Alkali çözelti bağlayıcı malzemeyi harekete geçirir. Alkali sıvı içinde çözünür silikat olduğunda, reaksiyon oranı artar. Bu nedenle, sodyum silikatın sodyum hidroksite ilavesi hem çözelti fiyatını düşürür hem de aktivasyonu hızlandırır. Düşük konsantrasyonlu bir aktivatör olarak sadece NaOH kullanıldığında, Si^{+4} ve Al^{+3} iyonları bağlayıcı malzemeden tamamen ayrılabilir ve ağır polimerizasyonu tamamlanamayabilir. Bu durum, OH^- iyonlarının miktarının azalmasıyla ilişkilendirilir. Sonuç olarak, bağlayıcı malzemenin reaksiyona girmemiş parçaları oluşabilir ve bu da dayanımın azalmasına yol açabilir (Yip vd., 2008). Aktivatörün yapısında bulunan anyonların oluşan kompozitin mikro yapısı üzerinde büyük bir etkisi vardır. Alkali aktivasyon reaksiyonlarında sıklıkla tercih edilen bazı

aktivatörlerin yapıları ve bunların geopolimerizasyon reaksiyonlarındaki etki süreçleri şu şekilde açıklanabilir.

- Sodyum Sülfat;

ÖYFC'yi aktive etmek için Na_2SO_4 , aktivatör olarak kullanılabilir ve böylece yüksek mekanik dayanım elde edilebilir. Na_2SO_4 , yüksek alkaliliği nedeniyle ince öğütülmüş cürufu çok etkili bir şekilde aktive edebilir (Pu, 1988; Krivenko, 1993).

- Sodyum Silikat;

Cam suyu çözeltisi, en yaygın ve etkili aktivatördür. $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ oranları bire bir ve bire iki olduğu için SiO_3^{2-} ve HSiO_3^- iyonları konsantre camsuyu çözeltilerindedir. $\text{SiO}_3^{2-}/\text{HSiO}_3^-$ oranı 50:1 ile 10:1 arasında değişen çözeltilerdeki Si oranı daha yüksek olduğundan, bu çözeltilerle aktive edilen cüruflarda çok küçük, sıkıştırılmış polimerler oluşur. ÖYFC'nin aktivasyonu ve silika jellerinde bulunan silika iyonları dayanım düzeyini artırmaktadır. Oluşan silika jelleri, Ca ile reaksiyona girerek C-S-H jellerini oluştururlar. Bu jellerde yüksek silika oranı bulunmaktadır. Alkali silikatların ürettiği ürünler daha dayanıklıdır, ancak daha fazla kuruma büzülmesine neden olur (Pu, 1988; Krivenko, 1993).

- Karışık Aktivatörler;

Cam suyu ve sodyum sülfat veya sodyum karbonat gibi aktivatörlerle aktive edilen ÖYFC içeren betonların özellikleri ve fiyatlarının iyileştirilmesi mümkündür.

Örnek verilecek olursa alkali aktivasyonu sodyum karbonat ile yapılırsa, diğer aktivatör olan sodyum silikata göre erken kür sürelerinde daha düşük dayanım elde edilir. Ancak, bu durum daha az kuruma büzülmesi meydana getirir (Ravikumar, 2012).

1.2.5. Alkali Aktivasyonlu Kompozitlerin Kazanımları

Geleneksel beton ile karşılaştırıldığında alalkali aktivasyon yöntemi ile üretilen geopolimer betonun kazanımları şu şekilde sırlanabilir (Li vd., 2004);

- Hammadde kaynağının bol olması: Geopolimer beton üretiminde herhangi bir puzolanik bileşik veya alkali çözeltilerle kolay çözünebilen silikatlar ya da alümino-silikat içeren malzemeler kaynak olarak yeterli olabilmektedir.
- Enerji tasarrufu sağlaması ve çevrenin korunması: Geopolimer beton üretimi için kullanılan hammaddelerin temin edilmesinde yüksek enerji tüketimine gerek duyulmamaktadır. Doğal alümino-silikat kaynaklarının görece düşük sıcaklıktaki (600 °C ile 800 °C) ısıtışları sonucu, geopolimer beton üretiminde kullanımı için uygun hammaddeler elde edilebilmektedir. Üstelik, PÇ ile karşılaştırıldığında, geopolimer

beton üretiminin %60 daha az enerji tüketimi gerektirdiği varsayılmaktadır. Ayrıca, geopolimer bağlayıcı PÇ üretiminden çok daha düşük miktarda CO₂ salınımına sahiptir.

- Hazırlama yönteminin kolaylığı: Alümino-silikat özellikli malzemeler ve güçlü alkali çözeltilerin kimyasal reaksiyonu sonucu oluşan geopolimer beton basit bir şekilde sentezlenebilir ve geleneksel betonda olduğu gibi oda sıcaklığında veya su içerisinde kür edilebilir. Yeterli dayanım kazanması için uzun kür süresi gerektirmez. Kısacası geopolimer betonların üretimi, geleneksel PÇ'li betonların üretimine benzese de daha çok kolaylık sağlamaktadır.
- Yüksek hacim sabitliği: Geopolimer betonlar, geleneksel betonlara göre %80 daha az büzülme gösterirler.
- Kısa süre içerisinde yeterli dayanım kazanımı: Geopolimer betonlar, özellikle ısı kürüne tabi tutulduklarında, katılaşmaya başladığı ilk 4 saat boyunca nihai basınç dayanımının %70'ine ulaşabilirler.
- Çevresel etkilere karşı üstün dayanıklılık: Geopolimer beton ya da geopolimer harç çok uzun süre sıcak/soğuk hava koşullarına karşı ciddi bir işlev kaybına uğramadan dayanabilmektedir.
- Yüksek sıcaklığa dayanıklılığı ve düşük ısı iletkenliği: Geopolimer beton 1200 °C'ye kadar herhangi bir iç yapı bozulması olmaksızın dayanabilir. Geopolimer betonun ısı iletkenlik katsayısı 0.24-0.30 W/m² arasındadır ve bu değer yapılarda duvar blok elemanı olarak kullanılan hafif tuğlaların ısı iletkenliğinden daha düşüktür.
- Tüm bu üstün özelliklerine ek olarak oldukça yüksek mekanik dayanıma ve yüksek derecede yoğunlaşma özelliğine sahip olan geopolimerler, Geopolimerizasyon, yoğunlaşmanın bir sonucu olarak açığa çıkan gazın ısı kaybetmesinin yanı sıra çevresine ısı verir. Bu, ortamın sıcaklığını artırır. Böylece gaz halindeki maddenin yapısındaki potansiyel enerji, yoğunlaşmanın bir sonucu olarak kinetik enerjiye dönüşür ve bu da geopolimerizasyon sürecinde meydana gelen reaksiyonları hızlandırmış olur.
- Geopolimer betonlar ve harçlar geleneksel betona kıyasla çok uzun yıllar işlevselliklerini kaybetmeden dayanabilmektedir. Ayrıca, üretimlerinde kullanılan hammaddelerin düşük enerji tüketimi ve oldukça düşük oranlarda zararlı gazların salınımından dolayı “yeşil malzemeler” olarak bilinmektedirler (Khale ve Chaudhary, 2007).

1.2.6. Alkali Aktivasyonlu Kompozitlerin Kullanım Alanları

Günümüzde pek çok kullanım alanı bulunan AAB'nin ilk uygulama örnekleri tarihte mısır piramitleri ve roma amfi tiyatrosu gibi yapıların mikro yapısı

incelendiğinde ortaya çıkmıştır (Li vd., 2004). Günümüzde, Avustralya'daki Queensland Üniversitesi'ndeki Küresel Değişim Enstitüsü binası, AAB kullanılan ilk yapıya örnektir (Erdoğan, 2014). Başka bir uygulamada, 1984 yılında Amerika Birleşik Devletleri'nde bir havaalanı için beton dökümünde AAB üretilerek uçakların inebileceği sertlik ve dayanıklılığa sadece 6 saatte ulaşabilen beton üretilmiştir. Aynı betonun 28 gün sonundaki dayanımı ise yaklaşık 80 MPa olarak ölçülmüştür (Xu ve Deventer, 1999). AAB'nun kullanım alanları şu şekilde özetlenebilir;

- Yüksek sıcaklığa dayanıklı ahşap paneller
- İzolasyonlu panel ve duvarlar
- Dekoratif taş eserleri
- Termal izolasyon için köpük geopolimer panel
- Teknolojik kolaylık gösteren inşaat malzemeleri
- Düşük enerjili seramik karolar
- Termal şok etkisine dayanıklı refraktör malzeme
- Alüminyum döküm uygulamaları
- Geopolimer çimento ve beton
- Altyapı tamiri ve güçlendirme için ısı dirençli ve yanmaz kompozitler
- Yanmaz yüksek teknoloji uygulamaları (Uçak kabin içi, motorporları)
- Yüksek teknoloji reçine sistemleri

şeklinde özet olarak sıralanmaktadır (Davidovits, 2011; Kuranlı, 2020).

Amerika Birleşik Devletleri Federal Havacılık Yönetimi, 1990 yılında AAB kompozitlerin uçaklarda kabin içi yangınlara karşı dayanıklı olup olmadığına dair bir değerlendirme çalışması başlatmıştır. Buna göre yanmaz AAB kompozitler, kabin ve kargo bölümünü kapsayan tüm önemli kazaları önleyebilecektir (Davidovits, 2011). Bu nedenle, Federal Havacılık Yönetimi tarafından desteklenen Uluslararası Uçak Yangın ve Kabin Güvenliği Araştırma Konferansı, 18 Kasım 1998'de Atlantic City, ABD'de uçak kabini ve kargo iç mekanları için ilk yanıcı olmayan kumaş olarak laminat AAB kompoziti tanıtmıştır (Davidovits, 2006).

Davidovits vd. (1994) ifade ettiği üzere yarış araçları için ısı kalkanı olarak hizmet eden bir alkali aktivasyonlu karbon kompoziti geliştirmişlerdir. AA-karbon kompozit, yarışta 600 derecede ısı gerilmelerine dayanabilecek şekilde tasarlanmıştır. Daha sonra 1999 yılında Amerika Birleşik Devletleri'nde düzenlenen Indy-Car organizasyonunda yarışan All American Racers takımı, buna benzer daha karmaşık bir dizaynla yarışmıştır. AA-karbon laminat sisteminin beklenilenden çok daha iyi başarımlar

gösterdiği ve sadece bir yarış için değil, bütün sezon boyunca her yarışta hasar almadan kullanılabileceği gösterilmiştir (Davidovits, 2011). Formula 1 takımları, yeni teknolojiyi şasilerine uyarlamış ve Benetton-Renault Formula 1 Sport Car takımı, 1994 ve 1995 yıllarında titanyum ekzos boru sistemi yerine termal korumalı karbon-AA kompozit kullanmıştır (Şekil 4). Bu teknoloji, Benetton-Renault ve Michael Schumacher'in iki dünya şampiyonluğu kazanmasına katkıda bulunmuştur (Davidovits, 2006).



Şekil 4. 1994 yılında Benetton B194 modeli, termal koruma sağlayan AA-karbon kompozitini ekzos düzeyinde kullanmıştır (Davidovits, 2006; Kuranlı, 2020).

1990'lı yıllarda, portland çimentosu olan Pyrament ile harmanlanmış AAB, Kuzey Amerika'da farklı varyasyonlarda kaldırım tamiri için başarılı bir şekilde kullanılmıştır (CPTP, 2010). Amerika Birleşik Devletleri, dikey iniş ve kalkışlarda (VTOL) uçakların ürettiği ısıya dayanacak kadar AAB kaplama kullanmaktadır (CPTP, 2010). Amerikan Ordusu envanterine yeni teknoloji AV8B (Harrier) dikey iniş ve kalkış (VTOL) yapabilme özellikli uçakların katılmasıyla birlikte, beton iniş rampalarında yüzey çatlaması, kavlanmalar ve asfalt rampalarda aşınmalar meydana gelmiştir. Çünkü, AV8B uçaklarının egzoz çıkış sıcaklığı yaklaşık 700 °C'ye ulaşmaktadır. AV8B uçaklarının yüzeyindeki bu egzoz çıkış sıcaklığı yaklaşık 450 °C'dir (Şekil 5). İç yangın direnci özellikleri, AAB'lerin yüksek sıcaklıklara dayanma yeteneklerinin bir sonucu olarak çok sayıda askeri pazarın açılmasına yol açmıştır (Vickers vd., 2015).



Şekil 5. AV8B-Harrier uçakları, operasyonel dikey iniş ve kalkış sırasında yüzeyde yüksek sıcaklıklar üretmektedir (Vickers vd., 2015; Kuranlı, 2020).

1.2.7. Alkali Aktivasyonlu Kompozitler

Yüksek başarılı beton üretiminde alkalilerle aktive edilmiş bağlayıcıların kullanılmasının ekonomiye katkısının yanı sıra çevresel pek çok kazanıma sahip olması nedeniyle geleneksel betondan üstün özellikler göstermektedir. Ayrıca, endüstriyel yan ürünlerin değerlendirilmesi açısından da AAB önem arz etmektedir. Pozolanik özellikli endüstriyel atıkların kullanılmasıyla, bu atıklar değerlendirilir ve depolama sorununa ekonomik bir çözüm sağlanmış olur. Yüksek dayanım ve dayanıklılığa sahip kompozitlerin alkali ile aktive edilmesi için, yüksek reaktifliğe sahip pozolanik malzemelerin kullanılması gerekmektedir (Jaarsveld vd., 1997). Aktivatörün konsantrasyonu, çözeltinin pH'ı, kür sıcaklığı, kür süresi, hidroksil iyonu oranı, alüminyum miktarı, bağıl nem ve betonun yaşı gibi faktörler, alkali ile aktive edilen betonların mekanik ve geçirimsizlik özelliklerini etkileyen önemli faktörlerdir. Al_2O_3/SiO_2 oranı, alkali konsantrasyonu, kür sıcaklığı ve kür süresinin geopolimer oluşumunda en önemli faktörler olduğu belirtilmiştir (Woolard vd., 2000). Çeşitli pozolanik malzemeler ve aktivatör türleri kullanılarak oluşturulan geopolimer hamurların (puzolan + su + aktivatör), mekanik ve dayanıklılık özellikleri üzerindeki etkilerinin incelendiği bir çalışmada, KOH ve Na_2SiO_3 çözeltileri kullanılarak çeşitli pozolanlar aktive edilmiştir. KOH ve Na_2SiO_3 çözeltilerinin aktivatör olarak birlikte kullanılmasının betonun özelliklerini geliştirdiğini keşfetmişlerdir. Bu çalışmada, çözeltilerin düşük bazikliği olan ve çözünebilen silikat miktarı yüksek pozolanlar ile daha düşük silikat modülünde daha yüksek dayanımlar sağladığı belirlenmiştir (Bondar vd., 2013). Geopolimerleşmenin, doğal olarak meydana gelen silika ve alüminatların birleşmesi olduğu, silikat ve alüminatların reaksiyona girerek benzer moleküler yapıları

oluşturabildikleri belirtilmiştir (Hermann vd., 1999). Xu ve Deventer (2000) tarafından belirtildiği üzere, her silika-alüminyum kaynağı malzemesi ve puzolanik bileşenin alkali çözeltilerde çözünmeye uygun olduğu bilinmektedir. Periyodik tablonun birinci grubundaki elementler, alkali aktivatör olarak kullanılabilir (Xiong vd., 2004). Geopolimerizasyon için oluşturulan çözeltinin alkali konsantrasyonu, kompozitin basınç dayanımını, priz süresini ve kıvamını etkiler. Alkali çözeltinin pH seviyesi, doğrudan alkalın miktarına bağlı olarak etkilenir ve Si-OH iyonlarının reaksiyonlarında kritik bir rol oynar. Bir çalışmada, aktivasyon çözeltisinin pH seviyesi arttıkça çimentonun katılma süresi azalmıştır. Ayrıca, geopolimerli karışımların düşük pH seviyelerinde viskozitesinin yükseldiği, yüksek pH seviyelerinde çimento gibi davrandığı ve karışımın daha akışkan bir kıvama ulaştığı ve işlenebilirliğinin arttığı gösterilmiştir (Phair ve Deventer, 2001).

Yüksek mekanik dayanım için ideal pH seviyesi 13-14'tür (Khale vd., 2007). Alkalilerle aktive edilmiş betonların yapılmasından sonra, ortam sıcaklığı Ca, Si, Na ve OH iyonlarının reaksiyonları üzerinde önemli bir etkiye sahiptir.

Alkali aktivasyon veya geopolimer üretiminden sonra betonun mekanik özellikleri, kür sıcaklığı ve kür süresinden önemli ölçüde etkilenir. Bağlayıcılık özelliğini geliştirmek için geopolimerler yüksek aktivasyon enerjisi gerektirir. Yeterli aktivasyon enerjisini üretmek için ısı kürü uygulanır.

Normal hava koşullarında 24 saat içinde yüksek sıcaklık kürü uygulanarak 1 ayda betonların dayanımındaki artışa ulaşılabilir (Bakharev, 2005). Kür sıcaklığının puzolanik reaksiyon hızını artırdığı ve betonun özelliklerini etkilediği gösterilmiştir (Hardjito vd., 2003; Swanepoel ve Syrtodom, 2002; Wang vd., 2004). Klima test kabini içinde sıcaklık kürüne maruz bırakılan numunelerin hızlı bir şekilde dayanım kazandığını gösteren bir çalışmada, numuneler normal ortam sıcaklığında uzun süre bekletildiğinde elde edilen dayanım değerleri, kısa süreyle sıcaklık kürüne maruz bırakılan numunelerin dayanım değerlerine ancak ulaşabilmektedir (Cheng ve Chiu, 2003).

1.2.8. Lifli Alkali Aktivasyonlu Kompozitler

Beton düşük çekme dayanımı nedeniyle çekme yükü altında gevrek davranış göstermektedir. Lifler, üstün özellikleri nedeniyle beton üretiminde son yıllarda çok tercih edilmektedir. Lif katkısının amacı, betonun zayıf çekme ve çatlak oluşumu direncini artırmaktır. Cam elyaf, bazalt, karbon, çelik, polipropilen (PP) ve diğer lifler

karışıma yüzde olarak dahil edilir (Dawood ve Ramli, 2011; Sabu ve Karthi, 2018; Reed ve diğerleri, 2014; Aswani ve Karthi, 2017).

Betona uzun veya kısa lif eklenmesi, betonun gevrek davranışından kurtulmasına ve sünek bir malzeme davranışı göstermesine izin verir. Bu, betonun çekme dayanımı, çekme uzaması, tokluk ve enerji absorpsiyon kapasitesinin artmasına neden olur (Shaikh, 2013). Bununla birlikte, lifli alkali aktivasyonlu betonlar (LAAB) oldukça yeni bir araştırma konusudur. Lifli alkali aktivasyonlu betonun özellikleri, kullanılan lifin tipi, çapı, boyu ve oranına göre doğrudan etkilenir (Rashad, 2020; Almeida vd., 2018; Ranjbar ve Zhang, 2020). LAAB nispeten yeni, devrim niteliğinde sürdürülebilir olup, yüksek yarmada çekme ve eğilmede çekme dayanımı dahil olmak üzere çeşitli üstünlüklere sahiptir. Ayrıca, çeşitli yük koşullarına maruz kalan, farklı yapısal biçimlendirme ve onarım işleri olmaksızın uzun süreler boyunca sağlam kalma kapasitesine sahiptir. AAB'lere tekli ve katışık lif bileşimlerinin eklenmesi, basınç dayanımı ve elastisite modülü üzerinde önemli bir etki göstermemektedir (Ranjbar ve Zhang, 2020; Ashby, 2013). Bununla birlikte, çekme ve eğilmede çekme dayanımları, süneklik ve tokluk üzerinde belirgin bir etkiye sahiptirler (Rashad, 2020; Rashad, 2014). AAB'lere lifler eklenerek kırılma dayanımı gibi mekanik özellikler iyileştirilebilir (Eren vd., 2021). AAB'lerdeki lifler, çatlakla ilgili sorunları azaltır, yani çatlakların sayıca en aza indirgenmesi, çatlak genişliklerinin azaltılması, mikro-çatlak yayılmasının önlenmesi ve sünekliğin artırılması sağlanmış olur (Korniejenko, 2020). Alkali aktivasyonlu betonların özelliklerini iyileştirmek için kullanılan çeşitli lifler Şekil 6'da gösterilmektedir. AAB'lerde yaygın olarak inorganik lifler, karbon veya cam lifleri bulunur (Hegarty vd., 2019). AAB'lerde takviye olarak doğal lif eklenmesi, birçok araştırmacının sürdürülebilir olarak gördüğü beton kompozitlerinde göreceli yeni bir ilerlemedir (Awang and Ahmad, 2014; Ali, 2016). Doğal lifler yeniden üretilebilir, hafif, güçlü ve uygun maliyetlidir; çevresel sorunlar olmaksızın AAB'lerde uygulanabilirler (Chen vd., 2014; Verma vd., 2012). Öte yandan, sentetik lifler, üretimlerindeki enerji tüketimi ve yüksek maliyet nedeniyle doğal liflerin yerini alamayabilir (Pakravan vd., 2017). AAB'lara lif eklenmesinin esası, matris güçlendirmesi ve çatlak köprüleme yoluyla tokluğu ve eğilmede çekme dayanımını artırmaktır. LAAB'lerin çatlama sonrası sünekliği monotonik ve döngüsel yüklemelerde uzatılabilir. LAAB'lerin kazanımları, konuyla ilgili araştırmaların genişletilmesini teşvik etmiştir (Amran vd., 2020).

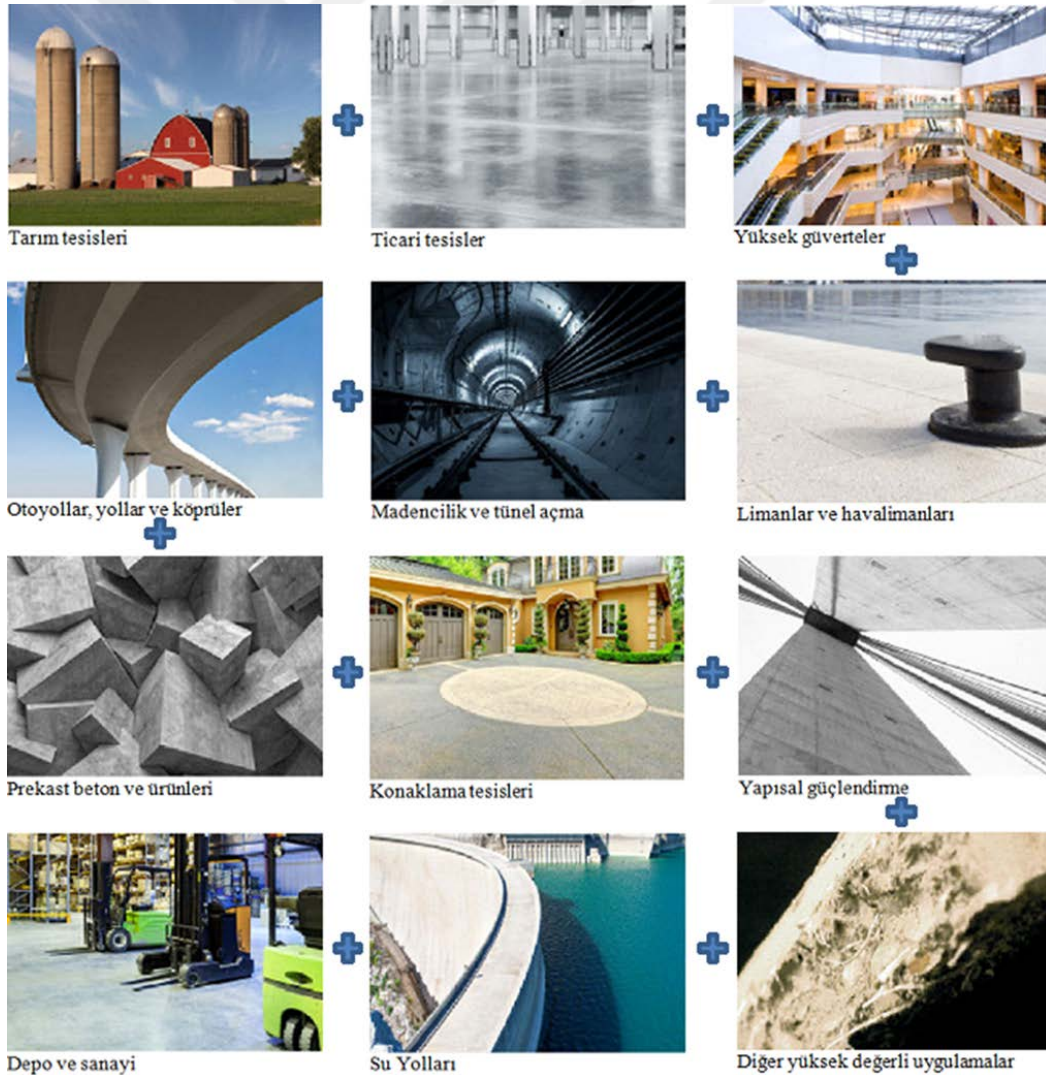
AAB'lerin özelliklerini iyileştirmek için kullanılan lifler



Şekil 6. Alkali aktivasyonlu betonların özelliklerini iyileştirmek için kullanılan liflerin sınıflandırılması (Amran vd., 2022).

LAAB'ler deniz mimarisinde, kara taşımacılığında ve otomotiv endüstrisinde uygulanmış ve geleneksel malzemelerle karşılaştırıldığında gözle görülür faydaları tespit edilmiştir (Shaikh, 2013; Amran vd., 2022). Şekil 7'de gösterildiği gibi, çeşitli malzeme uygulamaları teknoloji ve maliyetlendirme açısından bakıldığında, bunlar

üzerinde AAB üretiminde kullanılan bağlayıcı ve liflerin etkisinin büyük olduğu görülür (Fediuk vd., 2020). Her bir AAB'nin farklı uygulamalarda da olsa daha uzun süreli kullanım verimliliği esastır. Çelik lifler piyasada mevcuttur ve yapısal elemanlar için geleneksel beton yapımında yaygın maliyet etkinliği göstermektedir. Metal lifler, LAAB'nin çekme, eğilmede çekme dayanımını, enerji emilimini ve çatlak sonrası davranışını iyileştirebilir (Ranjbar vd., 2016). AAB'ler, paslanma tehlikesine karşı çelik donatıyı pasif bir durumda tutan yüksek alkali içerikleri nedeniyle, altyapı uygulamaları için uygunluk gösterirler (Dong vd., 2020). Yüksek dayanım, esneklik ve hidrofilik gibi üstün mekanik özelliklere sahip olan polivinil alkol ve polietilen lifler içeren LAAB'ler pahalıdır (Choi vd., 2016). Ancak, yüksek çarpma dayanımı ve süneklik gerektiren uygulama alanları için AAB'lerin geliştirilmesinde kullanılmışlardır (Onaizi vd., 2021). Polipropilen lifler, AAB'de çevre uyumluluğunu ve maliyeti etkin hale getirmek için ele alınması gereken başka bir seçenektir (Talebian vd., 2016; Ranjbar vd., 2016).



Şekil 7. Çeşitli LAAB uygulamaları (Charles, 2024; Amran vd., 2022).

2. ŞİMDİYE KADAR YAPILAN ÇALIŞMALAR

Beton endüstrisinde kullanılan temel bağlayıcı olan portland çimentosunun üretilmesinde harcanan yüksek enerji ve çevreye salınan yüksek CO₂ miktarı düşünüldüğünde alternatif bir bağlayıcı geliştirilmesi hem çevresel hem ekonomik açıdan pek çok kazanımı da beraberinde getireceği açıktır. Özellikle gevrek bir malzeme olan betonun daha sünek bir malzemeye dönüştürülmesi için çeşitli lifler kullanılmaktadır. Beton kompozit bir malzeme olarak yorulma dayanımı, aşınma dayanımı, çatlak oluşuktan sonraki yük taşıma yeteneği ve enerji yutma kapasitesi açısından zayıf özellikler gösterir. Çekme dayanımı düşük olan betonlarda, özellikle dinamik yükler, çatlak oluşumuna ve çok sayıda çatlağın yayılmasına neden olurlar. Bir yapı malzemesi olan çeliğe kıyasla daha ekonomik olan betonun zayıf yönlerinin geliştirilmesine yönelik çeşitli çalışmalar yapılmaktadır. Bu konudaki ilk çalışmalar, 1963 yıllarında betonda cam lifi kullanarak üretilen betonlar üzerinde yapılmıştır. Daha sonraki çalışmalar ise farklı lif tiplerinin kullanılması ve üretilen betonların özelliklerinin araştırılmasıyla devam etmiştir. Karilhaloo (1995) yaptığı çalışmada beton içerisinde süreksiz bir şekilde dağılmış olan çelik liflerin çatlak oluşumunu önemli ölçüde azalttığını, betonun şekil değiştirme kapasitesini, tokluğunu, çarpma ve çekme dayanımını artırdığını ve süneklik düzeyi yüksek betonlar elde etmeyi mümkün kıldığını ortaya koymuştur. Komlos ve diğerleri (1995), polipropilen ve çelik liflerini kullanarak toplam lif hacminin %1 olduğu üç farklı karışım hazırlamışlardır. Yapılan deneyler sonucunda, optimum lif içeriğinin kullanılan karışımın bileşiminden ve üretim süreçlerinden etkilendiği görülmüştür. Kim vd. (1999), 30 mm uzunluğundaki çelik liflerin yanı sıra 6 ve 12 mm uzunluğundaki çelik ve polipropilen liflerini ayrı ayrı eklemiştir. Deneyler, erken aşamalarda, yani 2; 3 ve 5 günlük numunelerde ısı genleşmeden kaynaklanan çatlakların varlığını belirlemek için yapılmıştır. Elde edilen katışık lifli betonlarda uygun tip ve hacim bileşimleriyle çatlak oluşumuna karşı daha yüksek direnç sağlanabileceği belirtilmiştir. Qian ve Stroeve (2000a), üç farklı tip çelik lif ile polipropilen lifini birlikte kullanmıştır. Çelik liflerden kancalı olanlar 0.3 mm çapında, 40 mm (SF1) ve 30 mm (SF2) uzunluklarında iki farklı uzunlukta bulunurken, düz olanlar ise 0.1 mm çapında ve 6 mm (SF3) uzunluğundadır. Polipropilen liflerin (PP) uzunluğu 12 mm, çapı ise 0.018 mm'dir. SF1 ve PP liflerin birlikte kullanıldığı karma lifli betonlarda küçük şekil değişimlerinde yük taşıma kapasitesinde önemli artışlar gözlenmiştir. SF3 liflerin bu artıştaki etkisinin daha az olduğu belirlenmiştir.

Küçük şekil değişimleri sırasında SF1 ve PP lifleri arasında yük taşıma kapasitesi ve kırılma tokluğu açısından olumlu bir etkileşimin varlığının, şekil değişimleri arttıkça kaybolduğu belirtilmiştir. Qian ve Stroeve (2000b) başka bir çalışmada, lif boyunun, lif içeriğinin ve uçucu kül içeriğinin karma lifli betonlar üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Yao ve diğerleri (2002) tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada, üç farklı tipte karma lifli betonun basınç, yarmada çekme ve eğilmede çekme özelliklerinin karşılaştırılması amaçlanmıştır. Kullanılan lif hacmi oranı %0.5 olarak sabitlenmiş, polipropilen ve karbon, karbon ve çelik, çelik ve polipropilen liflerini içeren üç farklı türde karma lifli beton üretilmiştir. Ayrıca, karşılaştırma yapılabilmesi için, her bir lif çeşidini tekil olarak içeren ve lif bulunmayan numuneler de üretilmiştir. Liflerin karma formda kullanılmasının, kompozitin başarımı lifsiz ve tekil lif kullanılan karışımlara göre iyileştirdiği belirtilmiştir. Ekincioglu (2003) tarafından üretilen karma lifli betonlarda dayanım, süneklik ve tokluğun artırılması amacıyla çelik ve polipropilen liflerin bir arada kullanıldığı çalışmada, polipropilen lif hacmi %0.05; çelik lif hacmi ise %3 olarak sabitlenmiştir. Farklı boyut ve çapları olan çelik liflerin kullanılmasının, betonun mekanik özelliklerinin iyileştirilmesinde farklı oranlarda katkı sağladığı belirtilmiştir. Banthia ve Nendakumar (2003) yaptıkları çalışmada lif tipinin ve bileşimlerinin çatlak genişlemesine karşı dayanıma etkilerini incelemişlerdir. Çelik lifler kıvrımlı ve sonları yassılaştırılmış liflerden oluşmakta iken, polipropilen lifler ise monofilament ve lif topluluğu şeklindedir. Çelik liflere düşük oranlarda dahi olsa polipropilen lif eklenmesi, dayanımı arttırmakta, çatlak oluşum ve gelişim sürecine karşı ise daha fazla direnç sağladığı tespit edilmiştir. Ünal (2003a) yaptığı çalışmada; polipropilen ve çelik lif içerikli beton yolların mekaniksel özelliklerini araştırmıştır. Su/çimento oranı 0.47 sabit tutularak betonlara 20 kg/m^3 ve 40 kg/m^3 oranlarında RC65/60 BN tipi iki ucu kancalı çelik lif ve 300 g/m^3 ve 600 g/m^3 oranlarında M13 tipi polipropilen lif katılmasıyla 5 grupta ayrı ve karma betonlar üretmiştir. Polipropilen lif içeren numunelerde tanık grubu gibi ani gevrek kırılma gözlenmiştir. Özcan (2003) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, çelik lif katkılı ve çelik lif katkısız betonarme kirişler üretilmiştir. Üç adet her bir tipte kiriş imal edilmiştir; çelik lif katkılı kirişler 2000 mm boyunda ve 250x350 mm kesit ölçülerine sahipken, çelik lif katkısız kirişler 2000 mm boyunda ve 250x300 mm kesit ölçülerine sahiptir. Betonarme kirişler, uygun kür koşullarında 28 gün boyunca bekletildikten sonra iki noktadan statik yükleme deneyine tabi tutulmuştur. Sonuçlar, çelik lif katkılı ve katkısız betonarme kirişlerin taşıma gücünü göstermektedir.

Tüm numunelerin basınç dayanımları, eğilmede çekme dayanımları ve enerji yutma kapasiteleri karşılaştırılmıştır. Yaprak vd. (2004) tarafından sunulan çalışmada, farklı türdeki liflerin betonda belirli oranlarda, birlikte kullanımının daha olumlu ve çok yönlü bir iyileştirmeyi amaçladığı belirtilmektedir. Uçucu kül ve çelik lifle üretilen betona 0.5; 0.75; 1.0; 1.25 kg/m³ cam lif katılarak, betonun basınç ve çekme dayanımındaki değişimler incelenmiştir. Araştırma sonuçları, cam liflerin basınç ve çekme dayanımına olumlu yönde etkide bulunduğunu göstermektedir. Li vd. (2005), ekstrüzyon yöntemiyle üretilen lifli alkali aktivasyon yöntemiyle takviye edilmiş kompozitleri araştırmışlar ve PVA liflerinin eklenmesinin, AAB matrisin sünekliğinde belirgin bir artışa neden olduğunu ve artan lif içeriği ile iyi bir eğilmede çekme dayanımı ve daha uygun tokluk sağlayabileceğini bildirmişlerdir. Karahan (2006) uçucu küllü katkılı betonlar ile polipropilen lif ve çelik lif ile güçlendirilmiş normal ve uçucu kül katkılı betonların özelliklerini araştırmıştır. 19 mm uzunluğundaki polipropilen lif hacimce %0.05; %0.10 ve %0.20 oranlarında ve 35 mm uzunluğunda ve 0.55 mm çapındaki çelik lif ise hacimce %0.25; %0.50; %1.00 ve %1.50 oranlarında normal ve %15 ve %30 uçucu kül katkılı betonlara ilave edilmiştir. Betonlar üzerinde işlenebilme, basınç dayanımı, elastisite modülü, eğilmede çekme dayanımı, tokluk, yarmada çekme dayanımı deneyleri yürütülmüştür. Polipropilen lifin ve artan lif oranlarında ve özellikle %0.05 oranından daha yüksek lif oranı içeren betonların dayanım ve dayanıklılık özelliklerine belirgin bir etkisi olmadığı görülmüştür. Çelik lifin, özellikle lif hacmi değişimine bağlı olarak betonun eğilmede çekme dayanımı, tokluk, yarmada çekme dayanımı, aşınma ve rötre gibi özelliklerini önemli ölçüde olumlu yönde etkilediği belirlenmiştir. Ünal vd. (2007) yaptıkları deneysel çalışmada; çelik lif katkılı betonlarda farklı lif tipi ve miktarının, basınç ve eğilme altındaki betonun mekanik özellikleri üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Karışımlarda narinlik oranları 60 ve 80 olan iki farklı lif tipinde ve 0 (tanık); 15; 30; 45 ve 60 kg/m³ olarak 5 farklı lif içeriğinde olmak üzere toplam 10 farklı numune dizisi üretmişlerdir. Sonuç olarak betona ilave edilen çelik liflerin, betonun basınç altındaki gerilme-şekil değiştirme yeteneğini ve eğilmede çekme dayanımını arttırdığını belirtmişlerdir. Zhang vd. (2008) araştırmasında, polivinil alkol (PVA) lifleri kullanılarak üretilen geopolimerlerin dayanıklılığının arttığı ve sülfat döngülerine karşı yüksek direnç gösterdiği ortaya konulmuştur. Başka bir çalışmada Sun vd. (2009), PVA lifleri ile takviye edilmiş geopolimerlerin mikroyapısal özelliklerini araştırmışlardır. Bu liflerin, geopolimer kompozitlerin darbe dayanımını artırdığı tespit edilmiştir. Diğer bir çalışmada ise Zhang vd. (2010), farklı oranlarda reçineler içeren metakaolin ve granüle yüksek fırın cürufu tabanlı geopolimerlerin

direncini ve hidrasyon mekanizmasını (%1; %5; %10 ve %15 oranlarında) incelemişlerdir. Geopolimer harçlar, %99 bağıl nemde ve 20 °C'de kür kutusunda işlem görmüştür. Reçinelerin %1 oranında eklenmesi, eğilmede çekme ve basınç dayanımı açısından en iyi sonuçları vermiştir. Bu sonuç, reçinelerin, su buharlaşmasını geciktirerek mikro çatlakları doldurma yeteneğine bağlanmıştır. Ayrıca, çatlakların büyümesini engelleyerek gevrek geopolimer matrisin kırılma tokluğunu artırmışlardır. Natali vd. (2011), metakaolin tabanlı ve farklı lifler içeren lif takviyeli geopolimerlerin eğilme davranışlarını araştırmışlardır. Çalışmada, tüm liflerin, geopolimerlerin eğilmede çekme dayanımını artırdığı gözlemlenmiştir. Özellikle PVA lif takviyeli geopolimerler, çatlama sonrası süneklikte belirgin bir iyileşme sağlayarak eğilmede çekme dayanımında yaklaşık %62 oranında bir artış göstermiştir. Han vd. (2012) yaptıkları çalışmada, silis dumanı içeren çimento esaslı kompozitlerde poliolefin liflerinin mühendislik özellikleri üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Çalışmada, eğilmede çekme dayanımında %13'lük bir artış ve çatlak yayılımında %70 oranında bir azalma gözlemlenmiştir. Ayrıca, poliolefin liflerle takviye edilmiş numunelerin darbe dayanımı, çelik liflerle takviye edilenlerden iki kat, tanık numunelerin anılan özelliğinden ise on dört kat daha yüksek bulunmuştur. Jeon vd. (2014), makro poliamid lif takviyeli betonun mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Poliamid lif içeriğinin artırılması, betonun sünekliğini ve eğilme davranışını belirgin şekilde artırmıştır. Başka bir çalışmada Alberti vd. (2014), düşük oranlarda çelik liflerle güçlendirilmiş poliolefin lif takviyeli betonun özelliklerini araştırmışlardır. Araştırma sonuçları, poliolefin liflerin kullanımının mekanik özelliklerin iyileştirilmesine, uygun süneklik ve eğilme tokluğunun sağlanmasına katkı sağladığını göstermiştir. Zhang vd. (2014) yaptıkları çalışmalarında, metakaolin yerine uçucu külün kısmen kullanıldığı geopolimerler üretmiş ve yüksek sıcaklık altında eğilmede çekme ve basınç dayanımını gözlemlemek için doğranmış karbon lif eklemişlerdir. Uçucu kül, beş farklı oranda (%0; %20; %50; %75 ve %100) kullanılmış ve dört farklı kütle içeriği (%0; %0.5; %1 ve %2) ile doğranmış karbon lif bağlayıcıya katılmıştır. Kür koşulu olarak, malzemeler 7 gün boyunca %95 nem ve 22 °C sıcaklıkta bir depoda tutulmuştur. Çalışma sonuçlarına göre, karbon liflerin sıcaklık aralığı boyunca, yüksek sıcaklık altında çatlak mekanizması üzerinde gözlem yapıldığında, metakaolin tabanlı geopolimerin eğilmede çekme dayanımını olumlu yönde etkilediği tespit edilmiştir. Ancak, 500 °C sınırına kadar yükselen sıcaklık etkisi altında eğilmede çekme dayanımı üzerinde iyileşmeler düşük oranda gerçekleşmiştir. %50 Metakaolin ve %50 uçucu kül ile yapılan geopolimer karışımı, %2 oranında karbon lifinin eklenmesiyle hem ortam sıcaklığında

hem de yükselen sıcaklıklar etkisinde karışım yangına karşı daha dayanıklı hale gelirken eğilmede çekme ve basınç dayanımı açısından olumlu sonuçlar göstermiştir. Çullu vd. (2014) yaptıkları çalışmada, farklı lif türleri kullanarak ürettikleri betonlar üzerinde çeşitli fiziksel ve mekanik deneyler gerçekleştirmişlerdir. Çelik, polyester, polipropilen ve tanık numune olmak üzere 4 tür beton üretmişlerdir. Tüm numunelerde beton hacminin %4.25'i kadar lif kullanmışlardır. Çelik ve polyester lifli olanların sırasıyla %12.4 ve %3.4 oranında daha yüksek, polipropilen olanların ise %4.3 daha düşük basınç dayanımına eriştiklerini belirlemişlerdir. Aşınma değerlerinde ise %0.5 ile en yüksek değer çelik liflilerde görülürken %0.18 ile en düşük değer polipropilen lifli olanlarda görülmüştür. En yüksek kılcal su emme derinliği tanık betonda görülürken en düşük derinlik polyester lifli olanlarda görülmüştür. Sonuç olarak, lif kullanımının betonun fiziksel ve mekaniksel özelliklerini değiştirdiğini belirlemişlerdir. Ghernouti vd. (2015), atık plastik poşet lifleri içeren kendiliğinden yerleşen betonun taze ve sertleşmiş haldeki özelliklerini incelemişlerdir. Çalışmalarında, lif uzunluğu ve lif miktarının bu özelliklere etkisini, üretilen kompozitin gerilme-şekil değiştirme ve yük-sehim davranışını araştırmışlardır. Su/çimento oranı 0.40 olan on dört adet kendiliğinden yerleşen beton karışımı üzerinde çalışmışlardır. Bu karışımların on iki adedi değişmekte olan lif uzunluğuna (2; 4; 6 cm) ve lif miktarına (1; 3; 5; 7 kg/m³) sahipken, bir adedi 1 kg/m³ polipropilen lif içermekte, bir adedi ise (tanık numune) lif içermemektedir. Uzunluğu 2 cm olan atık plastik poşet lif içeren numuneler, lif miktarından bağımsız olarak kendiliğinden yerleşme özelliğini sağlamış olup mikro çatlak gelişimini geciktirmiştir. Bununla birlikte bu liflerin basınç ve eğilmede çekme dayanımlarına belirgin bir katkısı olmamış, ancak 28 günlük betonun yarmada çekme dayanımı üzerinde önemli etkisi olduğu görülmüştür. Çekme dayanımındaki iyileşme %4 ile %74 arasında, lif miktarına bağlı olarak değişirken, lif uzunluğunun çekme dayanımı üzerinde bir etkisi görülmemiştir. Atık plastik poşet lifi kullanımı, geri dönüşüme katkısıyla çevresel fayda sağlamış olup kendiliğinden yerleşen betonda, taze ve sertleşmiş beton özelliklerini iyileştirmiştir. Spadea vd. (2015) çimento harcı takviyesi olarak poliamid lifleri incelemek için bir araştırma gerçekleştirmişlerdir. Süneklik davranışını geliştirmek ve betonun enerji emilimini artırmak için poliamid lifleri betona dâhil edilmiştir. Poliamid takviyeli harçların çekme dayanımının %35'e kadar arttığı ve tokluğunun ise takviye edilmemiş bir malzemeye kıyasla on üç kat daha fazla olduğunu çalışmalarda gösterilmiştir. Ranjbar ve ark. (2016), uçucu kül içeren hacimce %0.5; %1; %2; %3 ve %4 oranlarında çelik ve polipropilen (PP) lif kullanarak geopolimer kompozit ürettirler, 7 ve 56 günlük deneylerde her iki cinsteki lif oranının

basınç dayanımına etkisini incelemişlerdir. Çelik lif oranının artırılarak %3 düzeyine çıkarılıncaya kadar 7 günlük erken dayanımda gözle görülür bir yükseliş gösterirlerken, uzun süreli deney sonuçlarında lif oranı artışının basınç dayanımına belirgin bir katkı sağlamadığını ifade etmektedirler. Tam tersine, araştırmacılar erken dayanım deneylerinde polipropilen (PP) lif artışının basınç dayanımına herhangi bir etkisi olmadığını belirtirken, 56 günlük deneylerde lif oranındaki artışın ciddi bir azalmaya sebep olduğunu göstermektedirler. Tanyıldızı ve Yonar (2016) yaptıkları çalışmada, yüksek sıcaklığa maruz polivinil alkol lifi içeren geopolimer betonun mekanik özelliklerini araştırmışlardır. Geopolimer betonlar 20 °C; 400 °C; 600 °C ve 800 °C sıcaklığa maruz bırakılmışlardır. PVA lif, uçucu külün kütlelerinin %0; %1 ve %2 oranında kullanılmıştır; 20 °C'ye maruz bırakılan %1'lik bir lif oranıyla PVA katkılı numunenin eğilmede çekme dayanımı, tanık numunenin anılan dayanımından %28 daha fazla çıkmıştır. 400 °C'de, aynı lif oranındaki PVA katkılı numunelerin eğilmede çekme dayanımı, tanık numunesinin değerinden %4 daha fazla çıkmıştır. Tanık numuneye kıyasla eğilmede çekme dayanımı azalması %2 oranında PVA lif içeriğine sahip numune için 600 °C'de %48 gerçekleşirken, 800 °C'de %69'luk bir azalma olmuştur. Ekaputri vd. (2016) araştırmalarında, Polivinil alkol (PVA) lifinin ve kür sıcaklığının metakaolin tabanlı geopolimer üzerindeki etkisi incelenmiştir. Lifler, hamur hacminin belirli bir oranı olarak (%0.3; %0.6 ve %1) eklenmiş ve kür işlemi, 24 saat boyunca üç farklı sıcaklıkta (40°C; 60°C ve 80°C) gerçekleştirilmiştir. Araştırmaya göre, %1 lif ilavesi ve 80 °C'de kür edilen numuneler, geopolimerizasyon reaksiyonunun hızlanması nedeniyle en yüksek basınç dayanımını göstermiştir. Aynı numune, lifin eğilmede çekme dayanımını da en yüksek değere çıkarmıştır. PVA lifi, hamurun dayanımını artıran toplam gözeneklerin azaltılmasına katkıda bulunmuştur. Çalışma, geopolimerin sünekliliğini artırmak için hacimce %0.6'ya kadar lif kullanılmasını önermiştir, çünkü tavsiye edilen orandan daha fazla lif ilavesi, taze harcın sıkıştırılmasında soruna neden olmaktadır. Arunagiri vd. (2017) bazalt lif katkılı geopolimer betonun mekanik özellikleri ile ilgili bir çalışma yürütmüşlerdir. Bazalt lifin %2 oranında ilave edilmesiyle, geopolimer betonda en yüksek basınç dayanımını elde etmişlerdir. Bazalt liflerin çatlak durdurucu olarak işlev gördüklerini ve yapıların ani göçmelerini önlediklerini görmüşlerdir. Ayrıca, geopolimer beton içerisine optimum bir içeriğe sahip bazalt lifin katılmasıyla, çekme dayanımının geliştirebileceği bildirilmiştir. Bhutta vd. (2017) farklı türdeki makro çelik ve en-boy oranına sahip polipropilen lifler ile uçucu kül kullanılarak üretilen geopolimer kompozitlerin eğilme davranışlarını araştırdıkları çalışmalarında, ısı kürünün basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı ve

eğilme tokluğu üzerinde önemli ölçüde etkili olduğunu ve kancalı çelik liflerin hem ısı, hem de ortam kürüne bırakılan elyaf takviyeli geopolimer kompozitlerde, diğer çelik liflere kıyasla en sünek eğilme tepkisini sergilediğini göstermişlerdir. Rill vd. (2018) doğranmış bazalt lifin potasyum tabanlı geopolimerin mekanik özellikleri ve mikroyapısı üzerindeki etkisi üzerine bir çalışma yapmışlardır. Geopolimer farklı oranlarda bazalt lifiyle üretilmiş (%1; %3; %5; %7 ve %10) ve daha sonra harçlar 24 saat 50 °C'de fırında sabit bir sıcaklıkta kür edilmiştir. Doğranmış bazalt lifin, 1 saat boyunca 500 °C sıcaklığa maruz bırakılmasıyla dehidratasyona rağmen geopolimerin çatlamasının geciktirilmesine katkıda bulunduğu, ayrıca lifin kütlece %1'lik (düşük) oranında bile, göze çarpan bir iyileşme sağladığı bulunmuştur. Yadollahi ve Güneş (2018), polipropilen lifler kullanılarak perlit esaslı geopolimerlerin mekanik davranışını incelediler. Bu çalışmada, eğilmede çekme ve basınç dayanımı yüksek ve normal çimentoya alternatif bir yapısal bağlayıcı geliştirmek amacıyla, polipropilen liflerin, perlit tabanlı geopolimerlerin mekanik davranışı üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Behera vd. (2018) yüksek sıcaklıklar (200 °C; 400 °C ve 800 °C) etkisinde bazalt mikrofibril geopolimer kompozitlerin özelliklerini incelemişlerdir. Üç farklı bazalt mikrofibril oranı kütlece geopolimer karışıma ilave edilmiş (%5; %10 ve %15) ve 28 gün boyunca bağıl nem (%70±10) ile ortam sıcaklığında (20 °C) küre tabi tutulmuştur. Bazalt mikrofibrillerle takviye edilmiş geopolimerin basınç dayanımı, lifsiz geopolimere göre daha yüksek olmuştur. Lifli numunelerin dayanımındaki bazalt mikrofibrillerin etkisiyle dolgu macununda daha yoğun mikro yapı oluşmuş, bununla birlikte, 200 °C'de serbest suyun buharlaşmasından dolayı geopolimerin dehidratasyon büzülmesine bağlı olarak, dayanımı artmıştır. Çalışmada, bazalt mikrofibril katkılı geopolimerlerin, yüksek sıcaklık gerektiren termal kaplamalar uygulamaları için uygun olabileceği ileri sürülmüştür. Guo ve Pan (2018) tarafından liflerin geopolimer betonda mekanik etkisini araştırmak için yapılmış çalışmada, uçucu kül-çelik cüruf esaslı geopolimer beton numuneler üretilmiştir. Polipropilen lif, bazalt ve çelik liflerin kullanıldığı çalışmada her bir lif sınıfı için hacimce %0.1; %0.2; %0.3; %0.4 ve %0.5 oranlarında lif kullanılmıştır. 28 Günlük dayanım için polipropilen lif kullanımında en yüksek dayanım %0.2 oranında lif kullanımında elde edilirken, artan lif oranları için dayanımda dikkate değer bir değişim gözlenmemiştir. Yine 28 günlük dayanımda çelik lif için en yüksek dayanım %0.4 lif oranında elde edilirken, %0.5 lif oranında az bir düşüş gözlenmiştir. Yapılan araştırmada, polipropilen lif kullanım oranının artırılmasıyla lifsiz numunelere göre basınç dayanımında ciddi bir katkı sağlanmadığı, ancak çelik lifte lif kullanım oranının artışının lifsiz olanlara göre %22.9'luk bir artışla

çelik lifin üç lif arasında en iyi dayanım sonucu verdiği gösterilmiştir. Al-Mashhadani vd. (2018) uçucu kül esaslı olmak üzere farklı oranlarda (%0.4; %0.8 ve %1.2) çelik, polipropilen (PP) ve polivinil alkol (PVA) lifler kullanarak geopolimer harçların mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Araştırmacılar fiber artışının harçların basınç dayanımlarında kayda değer bir yükselişe sebep olmadığını belirtmektedirler. %1.2 Oranında 7 ve 28 günlük dayanımların her ikisinde de çelik ve polivinil alkol lif kullanımı en yüksek basınç dayanımını verirken, tanık harçlarına göre sadece %3.37 ve %4.26'lık basınç dayanımı artışı gözlemlenmiştir. Rasheed, 2019'da yürüttüğü çalışmada, farklı oranlarda nano silika (%0; %1 ve %2) ve çelik lifi (%0; %0.5 ve %1) içeren kendiliğinden yerleşen dokuz geopolimer beton karışımı oluşturdu. Kendiliğinden yerleşen geopolimer betonu hazırlamak için yüksek fırın cürufu kullanılarak %50 uçucu kül ve %50 öğütülmüş granül kullanıldı. Alkali aktivatör olarak sodyum silikat (Na_2SiO_3) ve sodyum hidroksit (NaOH) çözeltileri 2.5 oranında karıştırılmıştır. Çalışmada, çökme, akıcılık, işlenebilirlik, basınç dayanımı, kenetlenme dayanımı ve eğilmede çekme dayanımını ölçmek için taze ve sertleşmiş beton numuneler test edilmiştir. Deney sonuçları, geopolimer betonun mekanik başarımı üzerindeki etkilerini belirlemek için karşılaştırılmıştır. Deney sonuçları, nano silika ve çelik lifin bir arada kullanılmasının taze beton özelliklerini olumsuz yönde etkilediğini ancak kendiliğinden yerleşen geopolimer betonun kenetlenme dayanımını ve eğilme davranışını önemli ölçüde iyileştirdiğini göstermektedir. Ayrıca, nano silikanın etkisinin taze beton özellikleri ve basınç dayanımı açısından daha baskın olduğu, çelik lifin etkisinin ise eğilmede çekme dayanımı ve kenetlenme dayanımı açısından daha belirleyici olduğu belirtilmiştir. İpek ve Aksu (2019), farklı uzunluklardaki ve türdeki liflerle yaptıkları çalışmada, %6.66 oranında, 60 mm uzunluğundaki çelik lif kullanımıyla 172.9 Nm kırılma tokluğu elde etmişlerdir. Araştırmacılar, %10.44 oranında, 35 mm uzunluğundaki çelik lif kullanımıyla ise 155.7 Nm kırılma tokluğuna ulaşabilmiş; bu lifleri kullanarak lif miktarını %6.96'ya düşürdüklerinde 78.7 Nm, lif miktarını %3.48'e düşürdüklerinde ise 22.9 Nm kırılma tokluğu değerini elde etmişlerdir. Canbaz ve Çelikten (2020), kırılmış atık taşıt lastiklerinin SIFCON üretiminde farklı bağlayıcılarla değerlendirilmesi üzerine yaptıkları çalışmada, kırılmış taşıt lastiklerinin lif olarak kullanılmıştır ve CEM I çimentosu ile 12 MPa eğilme dayanımına sahip SIFCON kompozitler üretilbileceği sonucunu elde etmişlerdir. Kuranlı (2020) cüruf ve uçucu külü bağlayıcı olarak kullandığı çalışmada polipropilen (PP), çelik ve poliamid (PA) lifleri farklı oranlarda kullanarak geopolimer beton üretmiş ve betonların mekanik ve durabilite özelliklerini incelemiştir. Mekanik olarak basınç

dayanımında tanık deney dizisine kıyasla en yüksek dayanım kaybını PP lifli dizilerde görülmüştür. Yarmada çekme dayanımına ise PP ve PA lif takviyesinin katkısı olmamıştır. Ancak, lif takviyesi miktarındaki artışın genel olarak dayanım gelişimine olumlu etkisi olduğu görülmüştür. Bağlayıcı olarak ise %100 cüruf bağlayıcılı deney dizileri; ortalama olarak 6.5 MPa'lık eğilmede çekme dayanımı gösterirken %50 kül ikameli deney dizileri ortalama olarak 6 MPa'lık bir eğilmede çekme dayanımı sonucu ortaya koymuşlardır. %50 Uçucu kül ikameli tüm diziler tanık dizisine kıyasla eğilmede çekme dayanımını geliştirememişlerdir. Kantarcı (2021) yaptığı çalışmada, lif boyunun ve lif içeriğinin, ısıl kür işlemi uygulanmadan üretilmiş geopolimer betonların asit direncine etkisini araştırmıştır. Bu amaçla 6 ve 12 mm boylarında polipropilen (PP) lif, hacimce %0.5; %1.0 ve %1.5 oranlarında ilave edilmiştir. Alüminosilikat kaynağı olarak da yüksek fırın cürufu (YFC) kullanılmıştır. Laboratuar koşullarında 28 gün kür edilen geopolimer beton numuneleri daha sonra 14 ve 28 gün boyunca %5 HCl çözeltisine maruz bırakılmıştır. Asit etkisi sonrasında, geopolimer betonların basınç dayanımı, kütlesi, ultra ses hızı (USH), dış görünüş gibi fiziksel ve mekanik özelliklerindeki değişimler araştırılmıştır. Ayrıca, taramalı elektron mikroskopisi (TEM) analizleri ile mikro yapı incelenmeleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar neticesinde, PP lif katkısının köprüleme etkisiyle çatlak oluşumunu engellediği için geopolimer betonların asit direncini önemli ölçüde iyileştirdiği tespit edilmiştir. Wang vd. (2021) yaptıkları çalışmada farklı uzunluklarda (3 mm; 6 mm; 12 mm ve 18 mm) bazalt lif kullanarak uçucu küllü geopolimer betonlar üretmişlerdir. Betonlar üzerinde mekanik ve kırılma özellikleri olarak basınç dayanımı testi, yarmada çekme dayanımı testi ve üç nokta eğilme testi gerçekleştirmişlerdir. Sonuçlar, bazalt lif ilavesinin basınç dayanımını, yarmada çekme dayanımını, tepe yükünü, kırılma tokluğunu ve kırılma enerjisini iyileştirdiğini ve bunların hepsinin 6 mm'lik lif takviyeli uçucu küllü geopolimer beton için en yüksek değere eriştiğini ortaya koymuşlardır. Kumar vd. (2022) çalışmalarında, uçucu kül, öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu, silis dumanı ve metakaolin gibi dört tip mineral katkıyı bağlayıcı olarak kullanarak çelik ve cam lifleri içeren çeşitli geopolimer beton karışımları ayrı ayrı hazırlamışlardır. Tüm karışımlar için numuneler hazırlanmış ve bunlar 28 günlük ortam küründen sonra basınç, yarmada çekme ve eğilmede çekme gibi mekanik özellikler için test edilmiştir. Geopolimer betonun liflerle takviye edilmesiyle dayanım özelliklerinin iyileştirilebileceği ve yapısal amaçlı kullanılabileceği sonucuna varmışlardır. Yurt (2022) yaptığı çalışmada, farklı aktivasyon sıcaklığında (30 °C; 60 °C ve 90 °C) dayanım kazanan lifli alkali aktivasyonlu betonların (LAAB) kırılma özelliklerini

incelemiştir. Bu amaçla 50x100x480 mm boyutlarında 10 mm çentik uzunluğuna sahip kiriş örnekler üretilmiştir. İki parametrelili yöntem ile Yük-deplasman grafiğı altında kalan alanlar hesaplanarak kırılma enerjisi değeri elde edilmiştir. Hesaplanan değeri üzerinden kırılma enerjisine sıcaklık kürünün etkisi, basınç ve eğilmede çekme dayanımı değeri ile karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Sonuç olarak aktivasyon sıcaklığının artışı ile kırılma enerjisi değeriinde önemli bir artış olduğı görülmüştür. Laxmi vd. (2023) yaptıkları çalışmada, uçucu kül, öğütölmüş granüle yüksek fırın cürufu (GYFC), NaOH, Na₂SiO₃, standart kum ve doğal iri agregalar kullanılarak ortam küründe geopolimer beton hazırlamışlardır. Deneysel sonuçlar, %2 çelik lif içeren karışımlar için lif ilavesinin işlenebilirliğı en az 70 mm çökme ve en yüksek 8s Vee Bee süresi ile azalttığını göstermiş ve Lif ilavesi, jeopolimer betonun basınç dayanımını, yarmada çekme dayanımını ve eğilmede çekme dayanımını iyileştirmiş ve % 1'lik optimum lif dozunda sırasıyla 41.44 MPa; 4.28 MPa ve 5.23 MPa'lık en yüksek dayanım elde edilmiştir. Wang vd. (2023) kür süresi (3 gün; 7 gün ve 28 gün) ve lif içeriğinin karbon lifli geopolimer betonun (KLGB) dinamik ve mekanik özellikleri üzerindeki etkilerinin incelendiğı ve karbon liflerin geopolimer beton üzerindeki güçlendirme ve toklaştırma katkılarını analiz etmişlerdir. Çalışmalarında farklı yaşlardaki KLGB'nin başarımlı göstergelerinin darbe yükü altında gerinim hızını etkilediğı, dinamik basınç dayanımının ve özgül enerji emiliminin, gerinim ile yaklaşık doğrusal olarak arttırdığı sonucuna varmışlardır. Ayrıca, kür süresinin artmasıyla birlikte, KLGB'nin dinamik basınç dayanımının ve spesifik enerji absorpsiyonunun arttığı ve gerilme hızı duyarlılığının da yükseldiğı sonucuna ulaşmışlardır. Zhang vd. (2024) yaptıkları çalışmada, Polivinil alkol (PVA) lifli uçucu kül esaslı geopolimer kompozitlerin dayanım ve tokluğunu araştırmışlardır. Sonuçlar, belirli miktarda PVA lifinin eklenmesinin geopolimer kompozitlerin eğilme direncini etkili bir şekilde artırdığını göstermektedir. Özellikle, 28 günlük eğilme dayanımının kontrol grubuna kıyasla %150.95'lik bir artışla 13.16 MPa'ya ulaştığı ve tepe yükündeki sapmanın %308.00 oranında arttığı %2.0 hacminde 9 mm PVA liflerinin eklenmesiyle en iyi başarımlı elde edilmiştir. Liu vd. (2024), ultra yüksek moleküler kütleli polietilenin magnezyum cürufu, yüksek fırın cürufu ve silis dumanı bazlı alkali ile aktive edilmiş (MBS-AAM) kompozit harcın mekanik ve elektromanyetik (EM) kalkanlama özellikleri üzerindeki etkisi ve mekanizmasını araştırdıkları çalışmalarında kütlece %0.5 ultra yüksek moleküler kütleli polietilen ilavesinin MBS-AAM kompozitinin EM kalkanlama etkinliğini önemli ölçüde artırdığı sonucuna varmışlardır.

3. ÇALIŞMANIN AMACI, KAPSAMI, GEREKÇESİ VE ÖZGÜNLÜĞÜ

Beton endüstrisi, diğer tüm alanlarda olduğu gibi sürekli bir gelişim içerisinde. Beton üretiminin gerek ekonomik ve çevresel etkilerinin en uygun şartlarda yapılması ve gerekse de teknik özelliklerinin iyileştirilmesine yönelik yapılan çalışmalar sınırsız bir şekilde sürdürülmektedir. Beton üretiminde temel bağlayıcı olarak çimento kullanımı küresel ısınmanın sebep olduğu iklim değişikliğini doğrudan etkilemekle birlikte kaynakların kullanımı olarak da çevresel ve ekonomik birçok olumsuzluklara sebep olmaktadır. Bu yüzden çimentoya alternatif bağlayıcı arayışları önem kazanmakta ve böylelikle farklı malzeme ve yöntemler araştırılmaktadır. Çeşitli aktivatörler kullanılarak amorf karakterli malzemeler aktive edilerek bir bağlayıcıya dönüştürülebilmektedir. Uçucu kül, yüksek fırın cürufu gibi alüminosilikat kaynaklı malzemelerin aktivatörlerle reaksiyonu sonucunda “geopolimer” adı verilen amorf yapıdaki inorganik polimerler oluşurken, yüksek fırın cürufunun reaksiyonu sonucunda çimento esaslı bağlayıcılardaki C-S-H jeline benzer hidrate kalsiyum silikat (N-A-S-H) oluşmaktadır. Alkali aktivasyon yöntemi ile üretilen betonlar, yüksek mekanik dayanım, düşük enerji giderleri, düşük kirletici gaz emisyonları (CO_2 , SO_2 , NO_3 vb.) ve çevrenin daha az tahribi (doğal kaynaklar yerine atıkların kullanımı) gibi üstünlükler sunmaktadır. Ayrıca, atık malzemelerin kullanımıyla, atıkların çevreye verdiği zararlar ve depolama problemleri de azalmaktadır. Bu bağlayıcılar, normal portland çimentoları ve betonlarına göre erken ve daha yüksek dayanım, daha düşük hidratasyon ısısı ve saldırgan kimyasallara karşı daha iyi dayanıklılık gibi birçok önemli teknik üstünlüğe sahiptir. Ayrıca, betonun mekanik ve durabilite özelliklerinin de iyileştirilmesi gerekmektedir. Tüm bu ihtiyaçlar dikkate alındığında temel bir yapı malzemesi olan betonun geliştirilmesine yönelik çalışmaların sürdürüleceği açıkça görülmektedir.

Betonun gevreklik özelliğinden kurtarılıp sünek bir malzeme haline getirilmesi konusunda yapılan çalışmalardan biride liflerin kullanılmasıdır. Günümüzde farklı lifleri ayrı ayrı farklı oranlarda kullanarak veya çeşitli lifleri bir arada farklı oranlarda kullanarak elde ettiğimiz katışık lifli betonlar ile betonun değişik özelliklerini iyileştirebilmekteyiz. Bu mükemmel malzeme konusundaki deneyimlerimiz her geçen gün artarak istenilen özellikte, amaca uygun ürünler elde edilmeye çalışılmaktadır. Günümüze kadar yapılan birçok çalışma farklı liflerin bir arada kullanılması ile elde edilen katışık lifli beton, tek tip ve boyutta lif kullanımı yerine betonun değişik özelliklerini iyileştirebilmek amacıyla birden fazla tip ve boyutta lifin birlikte karışımında

yer aldığı yeni çimento esaslı kompozit malzemeler şeklinde yürütülmüştür. Kuramsal olarak, katışık bir sistem, bir lifli beton karışımında, iki veya daha fazla lif türünün bir bileşimidir ve bir lif türünün üstün özelliklerinin, diğerinin zayıflıklarını tamamlamak için uygulanmaktadır (Noushini vd., 2018; Sukontasukkul, 2004). Katışık lifli AAB'de lif değiştirme ve ekleme olmak üzere iki temel sistem vardır. Yer değiştirme sistemi, bir lif türünün başka bir lif türü ile değiştirilmesidir; Bu durumda lif hacmi sabit kalacaktır. Ekleme durumunda ise temel life başka bir lif eklenir. Bu durumda, lif hacmi ilave hacimle birlikte artacaktır (Sukontasukkul vd., 2018). Bu çalışmada, iki temel sistemden farklı olarak çelik ve polyester lifler ayrı ayrı hacimce %0.25; %0.50; %0.75 ve %1.00 oranlarında ve iki lifin hacimce eşit oranlarda katışık şekilde hacimce %0.25; %0.50; %0.75 ve %1.00 oranlarında kullanılması ile gerçekleştirilmiştir. Lifli beton çalışmalarında ise bağlayıcı olarak genellikle portland çimentosu kullanılmakta ve lif türünün ve boyutunun beton özellikleri üzerine etkileri araştırılmaktadır. Alkali aktivator kullanılarak yapılan çalışmalarda alternatif bağlayıcı çeşidi üzerinden çalışmalar yürütülmektedir. Bu kapsamda alternatif bağlayıcı olarak doğal ve yapay puzolan çeşitleri farklı oranlarda farklı aktivatörler ile tepkimeye sokularak çimento miktarının azaltılması ya da tamamen çimentosuz olarak üretilmesi yoluna gidilmektedir. Ancak, bağlayıcı türünün değiştirilmesi tek başına beton özelliklerinin iyileştirilmesinde yeterli olamamakta ve bağlayıcı türünün yanı sıra çeşitli endüstriyel atık malzemelerin de kullanılması ile geleneksel betonda kullanılanlarla kıyaslanması yoluna gidilmesi yöntemiyle de çeşitli çalışmalar yürütülmektedir. Bu çalışmada ise bağlayıcı olarak çimento yerine ÖYFC (Öğütülmüş Yüksek Fırın Cürufu) ve ince malzeme olarak ise Erzincan yöresinde bulunan taş ocağı atık malzemesi kullanılmıştır. Ayrıca, kullanılan bağlayıcı ve ince malzemenin Sodyum Hidroksit (NaOH) ve Sıvı Sodyum Silikat (Na_2SiO_3) kullanılarak aktive edilmesi sonucunda üretilen alkali aktivasyonlu betonların (AAB) fiziksel ve mekaniksel özelliklerinin ortaya konulması ve farklı lif türlerinin alkali aktivasyon yöntemiyle üretilen betonların dayanım ve dayanıklılık özelliklerine etkilerinin ortaya çıkarılması amaçlanmaktadır. Donma-çözülme ve sülfatlı ortam koşullarındaki fiziksel ve mekaniksel özelliklerinin donma-çözülme ve sülfat etkisine maruz kalmamış alkali aktivasyonlu betonlara göre üstün ve zayıf yönlerinin ortaya konulmasına, betonun özelliklerinin iyileştirilmesine yönelik verilerin elde edilmesine, tüm bu çalışmalar neticesinde çimentoya alternatif olarak yerel kaynakların kullanımına ve yöre ekonomisine kazandırılmasına çalışılacaktır. Elde edilen deneysel sonuçlara bağlı olarak numunelerin davranışları yorumlanıp, en iyi başarıyı gösteren numune grubu belirlenecektir.

Bu bağlamda, ifade edilen eksikliklerin azaltılmasına katkı sağlamaya yönelik olarak:

a. Erzincan yöresinde bulunan taş ocağı atık malzemesinin belirli oranlarda ince malzeme olarak değerlendirilmesi,

b. Taş ocağı atık malzemesinin çimento üretiminde puzolan katkı olarak veya doğrudan bağlayıcı olarak kullanılabilirliğinin araştırılması ile bu cürufun yöre ekonomisine kazandırılması,

c. Bolu Çimento Sanayi tarafından sağlanan Öğütülmüş Yüksek Fırın Cürufu (ÖYFC)'nin çimento boyutunda bağlayıcı olarak değerlendirilmesi,

d. Öğütülmüş Yüksek Fırın Cürufu (ÖYFC)'nin çimento üretiminde puzolan katkı olarak veya doğrudan bağlayıcı olarak kullanılabilirliğinin araştırılması ile bu cürufun yöre ekonomisine kazandırılması,

e. Alkali aktivasyon yönteminin donma-çözülme ve sülfatlı ortam koşullarına maruz kalan betonlar üzerindeki etkilerinin araştırılması,

f. Çimento ve beton endüstrisinde çimentoya alternatif olarak daha ekonomik ve çevreci bir beton üretimi ile beraber sürdürülebilir ve yenilikçi teknolojiler geliştirilmesi bu tez kapsamında amaçlanmaktadır.

Elde edilen bulguların yanı sıra, bu çalışmanın özgünlüğü ve geniş kapsamı, endüstriyel atıkların sürdürülebilir beton üretimindeki potansiyelini değerlendirmesi ve farklı lif türlerinin ve kullanım şeklinin etkilerini ayrıntılı bir şekilde araştırmasıdır. Bu nedenle, bu çalışma, beton endüstrisinde yenilikçi ve çevre dostu malzeme seçeneklerinin geliştirilmesi için önemli bir adımdır. Çalışmanın, bu alandaki araştırmalara yeni bir bakış açısı getirerek, endüstriyel atıkların değerlendirilmesi ve beton üretiminde kullanılmasının önemini vurgulaması, literatüre önemli bir katkıdır. Bu çalışmanın sonuçları, beton endüstrisinde sürdürülebilir malzeme seçeneklerinin değerlendirilmesi ve gelecekteki araştırmalara yön veren bir yol haritası sunması bakımından dikkate değerdir.

4. MATERYAL VE YÖNTEM

4.1. Giriş

Bu çalışma, endüstriyel atıkların sürdürülebilir beton üretimindeki potansiyelini ve farklı lif türlerinin ve katışık kullanımının beton özellikleri üzerindeki etkilerini incelemeyi amaçlamıştır. Özellikle, volkanik kayalardan atık olarak elde edilen kayaç tozu (KT) ve öğütülmüş yüksek fırın cürufu (ÖYFC) gibi endüstriyel atıkların geopolimer beton üretiminde kullanılabilirliği üzerinde durulmuş, aynı zamanda çelik ve polyester liflerin betonun başta mekaniksel ve fiziksel özellikleri olmak üzere dayanım ve dayanıklılık özellikleri üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Araştırmanın özgünlüğü, taş ocağı atığı olan volkanik kayaç tozunun puzolanik özelliklerinin belirlenmesi ile LAAB üretiminde ince malzeme olarak kullanımı ve öğütülmüş yüksek fırın cürufunun geopolimer beton üretiminde kullanılabilirliğinin değerlendirilmesinde yatmaktadır. Bu, beton endüstrisinde alternatif ve sürdürülebilir malzeme seçeneklerinin araştırılması ve değerlendirilmesi açısından önemli bir katkı sağlamaktadır.

Yapılan doktora tezi aşağıda belirtilen şekilde gerçekleştirilmiştir:

- a. Alkali aktivasyon yöntemiyle üretilmiş olan tanık ve lifli betonlarda ince malzeme olarak kullanılan taş ocağı atık malzemesinin puzolanik aktivitesinin belirlenmesi
- b. Üretilmiş olan AAB'ler üzerinde taze ve sertleşmiş beton deneyleri yapılmıştır. Taze beton deneyleri olarak birim hacim kütle başta olmak üzere taze betonların kıvamları serbest çökme deneyi ile belirlenmiştir.
- c. Çalışmada alkali ile aktive edilmiş beton üretiminde tanık betonlar da üretilmiş olup beton numunelerin fiziksel özelliklerinden başta geçirimsizliğini incelemek amacıyla su emme kapasitesi, toplam su emme miktarı, kuru yoğunluk, görünür yoğunluk, görünür boşluk oranı ve gözeneklilik deneyleri gerçekleştirilmiştir.
- d. Çalışmada üretilen numunelerin morfolojik yapılarını belirlemek için mikroyapı (SEM, XRD) analizleri, mekanik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla tahribatsız test yöntemlerinden ultrases ile schmidt çekici kullanılarak basınç dayanımlarının belirlenmesi, tek eksenli basınç dayanımı, elastisite modülü ile poisson oranı, yarmada çekme dayanımı, eğilmede çekme dayanımı ve tokluk (kiriş testleri) tahribatlı teknikler arasında yer almış ve üretilen numunelerin dayanıklılıklarını belirlemek için ise aşınma oranı, donma-çözülme, asit ve sülfatlara karşı dayanım

testleri gerçekleştirilmiştir. Tüm bu çalışma süreci kapsamında tez çalışmasının başlangıç aşamasından itibaren konunun geçmişi ve güncel literatür kapsamlı bir şekilde incelenmiş ve tez süresi boyunca bilimsel ilerlemelere paralel olarak güncel literatürün takibine devam edilmiştir.

e. Gerek kullanılacak olan lif tipine ait boyut ve diğer yapısal özellikler ve gerekse kullanılacak olan alkali aktivatörler ilgili kuruluşlarla ve/veya uygulayıcı firmalarla bağlantıya geçilerek tespit edilmiş ve optimizasyon çalışması sonucu en uygun karışım oranları ve bileşenler üzerinde yoğunlaşmıştır.

Yukarıda ifade edilen kapsam çerçevesinde alkali aktivasyonlu lifli beton üretiminde kullanılmış olan malzemeler aşağıda detaylı şekilde açıklanmaktadır.

4.2. Malzemeler

4.2.1. Öğütülmüş Granüle Yüksek Fırın Cürufu

Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu (ÖGYFC), demir cevherinin yüksek fırınlarda ergitilmesi sırasında eriyen silikat ve kalsiyum alümina silikatlardan oluşan bir yan üründür. Su göletleri veya güçlü su jetleri yardımıyla aniden soğutulan yüksek fırın cürufu ince taneli camsı bir yapı oluşturur (Palomo vd., 2004; Balçıkanlı, 2016). Elde edilen camsı yapılı granül, öğütülüp toz haline getirildiğinde ve alkalilerle aktive edildiğinde bağlayıcı olarak kullanılabilir. Çalışma boyunca kullanılan öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu Bolu Çimento Sanayi'nden alınmıştır. Cürufun özgül ağırlığı 2.91 g/cm^3 olup kimyasal özellikleri Tablo 2'de fiziksel özellikleri ise Tablo 3'te gösterilmektedir.

Tablo 2. Çalışmada kullanılan cürufun kimyasal özellikleri

Kimyasal Özellikler (%)	Elde Edilen Değerler	TS EN 197-1 Sınır Değerleri	Deney Metodları
MgO	6.73	Max. 18.0	TS EN 196-2
SO ₃	0.66	Max. 2.5	TS EN 196-2
Na ₂ O	1.15	-	TS EN 196-2
K ₂ O	0.84	-	TS EN 196-2
Na	1.70	-	TS EN 196-2
Klorür (Cl)	0.0130	Max. 0.1	TS EN 196-2
Düzeltilmiş Kızdırma Kaybı	2.42	Max. 3.0	TS EN 196-2

Tablo 3. Çalışmada kullanılan cürufun fiziksel özellikleri

Fiziksel Özellikler			
Özgül Kütle (g/cm ³)	2.91	-	TS EN 196-6
Özgül Yüzey (cm ² /g)	5384	Min. 2750	TS EN 196-6
Nem (%)	0.1	Max. 1.0	TS EN 15167-1

4.2.2. İnce Malzeme (taş ocağı atık malzemesi)

Lifli betonların üretiminde, kullanılan en büyük agrega tane çapına göre belirli miktarda ince malzeme (<0.25 mm) kullanılması standartlarda belirtilmektedir (TS 10514, 2015). Erzincan-Üzümlü yöresindeki Tatoğlu tepesinde bulunan taş ocağından çıkarılan volkanik kayalar çeşitli inşaat üretimlerinde kullanılması amacıyla işlenmekte, üretim süreci sonucu yüksek miktarda atık malzemesi oluşmaktadır. Kayaçların kesimi sırasında oluşan ince malzeme (kayaç tozu) su ile birlikte taşınarak çökeltme havuzunda birikmektedir. ÖYFC'nin çimento yerine bağlayıcı olarak kullanıldığı alkali aktivasyonlu betonların üretiminde taş ocağından atık olarak elde edilen kayaç tozu (KT) ince malzeme olarak kullanılmıştır. Taş ocağının bulunduğu Tatoğlu tepe'nin yer bulduru haritası Şekil 8'de, taş ocağının genel görüntüsü ise Şekil 9'da, taş ocağından elde edilen volkanik kayaçların işlenme süreci ve oluşan ince malzemenin çökeltme havuzunda birikmesi Şekil 10'da, ince malzeme olarak kullanılan KT ile bağlayıcı olarak kullanılan ÖYFC ise Şekil 11'de gösterilmektedir.



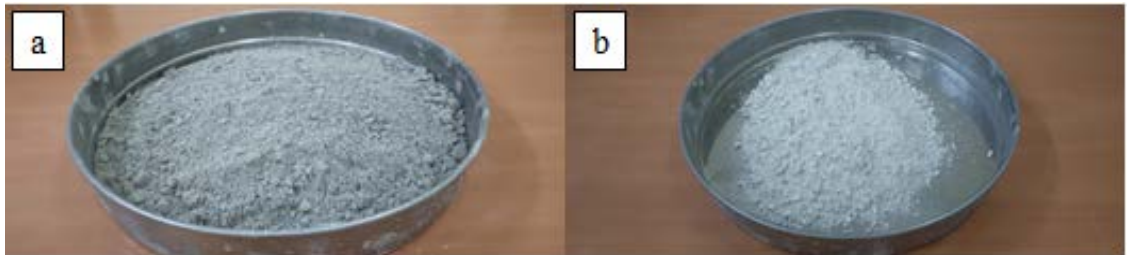
Şekil 8. Taş ocağının yer aldığı Tatoğlu tepe (3D uydu görüntüsü; URL-1).



Şekil 9. Taş ocağının genel görüntüsü



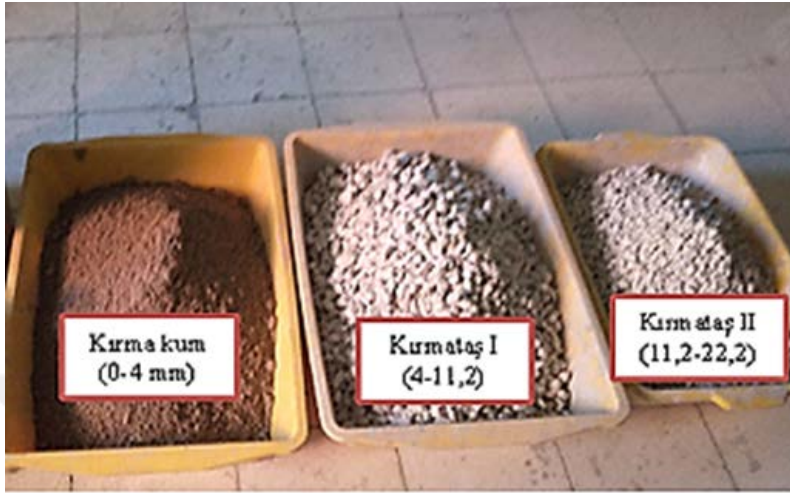
Şekil 10. (a) Volkanik kayalar, (b) Kayaçların işlenmesi, (c) Oluşan kayaç atığı, (d) KT'nin çökeltme havuzunda birikmesi



Şekil 11. (a) ince malzeme olarak kullanılan KT ile (b) bağlayıcı olarak kullanılan ÖYFC

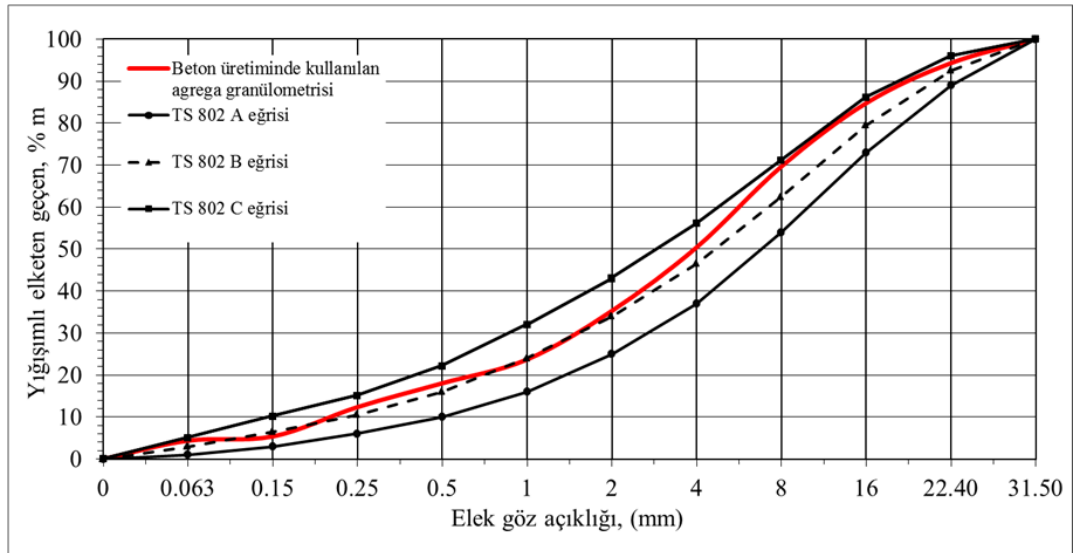
4.2.3. Agrega

Çalışmada ince agrega olarak 0-4 mm aralığında kırma kum, iri agrega olarak 4-11.2 mm aralığında kırmataş I (NO I) ve 11.2-22.4 mm aralığında kırmataş II (NO II) kullanılmıştır (Şekil 12). Tane boyutu olarak en büyük 22.4 mm genişlik kullanılmıştır.



Şekil 12. Çalışmada kullanılan agregalar

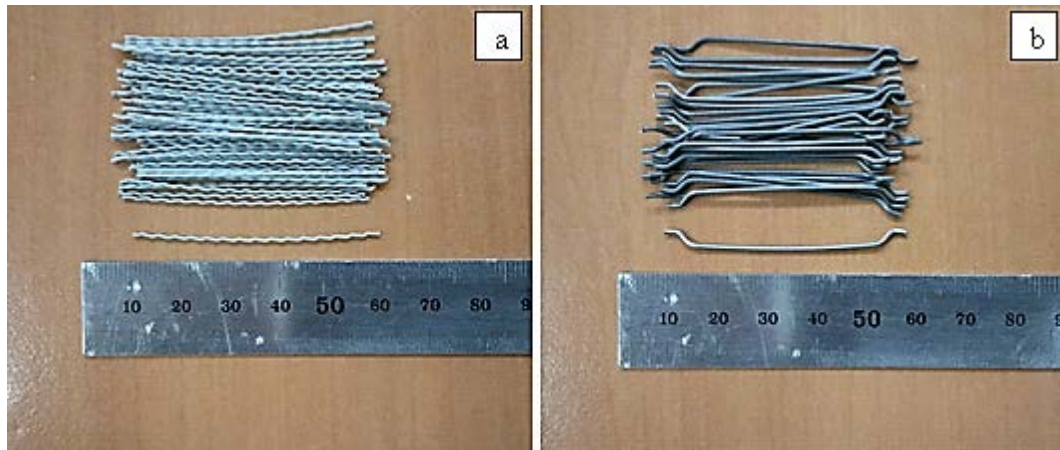
Granülometri eğrisi, agrega içinde boyutları belirli limitler içinde kalan tanelerin ne olduğunu açıklar. Bu amaçla, kullanılmadan önce agreganın granülometrik dağılımının elek analizi deneyi ile saptanıp, standartın belirlediği sınırlar içerisinde kalıp kalmadığı kontrol edilmelidir. Bir agrega tanesinin geçebileceği en küçük eleğin delik çapı ve kenar uzunluğu o tanenin çapı olarak adlandırılır. Karışımında kullanılacak agregaların granülometrisi, başka bir deyişle tane boyutu dağılımı, işlenebilir bir beton için gerekli olan bağlayıcı hamuru ihtiyacının belirlenmesi açısından önemli bir parametredir. Elek analizi sonuçları ile elde edilen granülometri eğrisinde numunelerin, TS 706 EN 12620+A1 (2003)'e göre standart orta izlem olan B32 eğrisine çok yakın bir dağılım göstermiştir (Şekil 13).



Şekil 13. Beton üretiminde kullanılan agreganın tane boyutu dağılımı (granülometri) eğrisi

4.2.4. Kullanılan Lifler

AAB ve LAAB üretimlerinde kullanılan liflerden uzun polimer lif (Polyester), 50 mm boyu ile kıvrımlı (burgulu) bir yapıya sahip ve dikdörtgen kesitli olup, kesit alanı ise yaklaşık 0.45 mm^2 'dir. Kancalı çelik lif ise 50 mm uzunluğunda olup çapı 0.9 mm ve daire kesitlidir (Şekil 14). Polyester lifler Atlas Bir Yapı adlı bir şirketten alınmıştır, çelik lifler ise Kemerli Metal Sanayi adlı bir şirketten sağlanmıştır.



Şekil 14. (a) Polyester lif, (b) Çelik lif

Yerel üreticilerden temin edilen liflere ait teknik özellikler Tablo 4'te verilmektedir.

Tablo 4. Kullanılan liflere ait teknik özellikler

Lif Özellikleri	Çelik Lif	Polyester Lif
Uzunluk (mm)	30-60	25-50
Genişlik (mm)	-	0.9
Kalınlık (mm)	-	0.5
Çap (mm)	0.9	-
Özgül kütle (g/cm ³)	7.87	1.36
Çekme dayanımı (MPa)	~1100	400-800
Elastisite modülü (MPa)	200000	17237
En son uzama (%)	< 2	> 8

4.2.5. Kullanılan Aktivatörler, Süper Akışkanlaştırıcı ve Su

Çalışmada kimyasal aktivatör olarak sodyum hidroksit (NaOH) ve sodyum silikat (Na₂SiO₃) kullanılmıştır. Sodyum silikat çözeltisi ve sodyum hidroksit Aklar Kimyasal Madde ve Lab. Ürn. Gıda İnş.İth.İhr.Ltd.Şti. firmasından tedarik edilmiştir. Sodyum silikat ve sodyum hidroksit çözeltisinin fiziksel ve kimyasal özellikleri Tablo 5 ve 6'da gösterilmektedir.

Tablo 5. Sodyum silikatın fiziksel ve kimyasal özellikleri

Sodyum Silikat	Su	Çözünürlük	pH	Yoğunluk (20 °C)	Kaynama Noktası (°C)
%35-40	%60-65	%100	11-12.4	1.3-1.5 g/cm ³	102

Tablo 6. Sodyum hidroksitin fiziksel ve kimyasal özellikleri

NaOH (%)	Na ₂ CO ₃ (%)	SO ₄ (%)	Cl (%)	Al (%)	Fe (%)	pH	Yoğunluk (g/cm ³)	Kaynama Noktası (°C)
99	0.3	≤0.01	≤0.01	≤0.002	≤0.002	14	2.13	1388

Beton numune üretiminde kullanılan akışkanlaştırıcı kimyasal katkı maddesi, modifiye edilmiş polikarboksilat polimer esaslıdır. Açık kahverengi sıvı görünümündedir. 1.10±0.02 kg/l yoğunluğunda, sıvı, erken ve nihai yüksek dayanım ve dayanıklılığa gereksinim duyulan, mükemmel yüzey görünümü elde etmek için, hazır beton ve prekast endüstrisi için geliştirilmiş, yüksek oranda su ihtiyacını azaltan TS EN 934-2 (2011)'e göre yüksek oranda su azaltıcı/süper akışkanlaştırıcı katkı ve sertleşmeyi hızlandırıcı katkı sınıfına uygun, süper akışkanlaştırıcı katkı maddesidir. Sika firmasından temin edilen ViscoCrete-SF 18 kodlu akışkanlaştırıcı katkıya dair teknik

özellikler Tablo 7’de verilmiştir. AAB ve LAAB üretiminde içme suyu kullanılmış olup içerisinde herhangi sıra dışı bir madde bulunmamaktadır.

Tablo 7. Akışkanlaştırıcı katkıya ait teknik özellikler (BASF, 2020).

Malzeme yapısı	Polikarboksilat polimer esaslı
Görünüm	Kahverengi-sıvı
Özgül kütle (20°C)	1.080-1.120 kg/lt
pH değeri	3-7
Donma noktası	-10°C
Alkali içeriği (%)	≤ 3.0 (kütlece)

4.3. Karışım Özellikleri

4.3.1. Kompozit Karışım Oranları

Üretilen AAB’lerin 28 günlük karakteristik küp basınç dayanımlarının 37 MPa’dan az olmaması hedeflenmiştir (silindirik basınç dayanımı 30 MPa). Lifli betonların üretiminde en büyük agrega tane boyutu 22.4 mm olarak seçilmiştir. Agregalar, karışım hesaplarında suya doymun kuru yüzey olarak kabul edilmiştir. Bütün beton bileşimlerinde bağlayıcı (ÖYFC) dozajı 350 kg/m³ olarak sabit alınmıştır. Karışıma lif katılması halinde, işlenebilmeyi kolaylaştırmak ve yerleştirme esnasındaki zorlukları en aza indirmek amacıyla %1-2 oranında katkı kullanılarak etkin su/çimento oranı 0.46 olarak belirlenmiştir. Aynı şekilde karışıma katılacak sentetik lif miktarı da işlenebilme özelliği dikkate alınarak hacimce %0.25; %0.50; %0.75 ve %1.0 olmak üzere dört farklı oranda seçilmiştir. Polyester lif miktarı da çelik lif miktarıyla aynı hacim oranlarında seçilmiştir. Ayrıca, her hacim grubunda, çelik liflerden ve polyester liflerden eşit hacimde kullanılarak katışık (hibrit) lifli alkali aktivasyonlu beton numuneler üretilmiştir. Tanık beton numune ile birlikte toplamda 13 farklı dizide küp, silindir ve kiriş numune üretilmiştir.

Homojen bir beton karışımı elde etmek için temel ilkelere TS 1247 (2005) ve TS 1248 (2012)’e dikkat edilmelidir:

- Kritik lif miktarı aşılmamalıdır,
- Lifli beton karışımını kolaylaştırmak ve gerekli olduğunda kullanılan lif miktarını arttırmak için ince agrega kullanılmalıdır,
- Taze betonda; homojen lif dağılımı, gözle kontrol edilmeli, birbirine yapışık çelik teller ve lifler halinde betona karıştırılan çelik tel demetler veya lifler beton içinde tamamen dağılıp, ayrılincaya kadar beton karışımı devam etmeli ve bağdaşık dağılım göz ile fark edilmelidir.

Alkali aktivasyonlu beton üretiminde belirli bir standart olmadığı için lifli betonlar için gerekli olan standartlara göre karışım hesapları yapılmış ve lifli beton üretim standartlarındaki aşağıda belirtilen kıstaslar esas alınmıştır.

Kabul edilen esaslar

- TS 10514 (2015)'e göre liflerin betona karıştırılma ve kontrol kuralları:
- Çimento miktarı en az 320 kg/m³ olmalıdır,
- Kum (0 mm-4 mm) miktarı, toplam agrega kütlelerinin %40-%45'i olmalıdır (750 kg/m³-850 kg/m³),
- En büyük agrega tane büyüklüğü, doğal agrega için, 28 mm, kırma taş için 32 mm olmalıdır. 14 mm'den büyük agrega oranı, %15-%20 ile sınırlanmalıdır,
- Betonun karakteristik basınç dayanımı en az 20 N/mm² olmalıdır,
- Su çimento oranı en çok 0.55 olmalıdır,
- Betona işlerlik sağlaması amacı ile akışkanlık verici katkıları kullanılabilir,
- Betona katılan çelik lifler TS 10514 (2015)'e uygun olmalıdır.

Üretilen AAB'lerin 1 m³ hacminde bulunan gerçek malzeme miktarları Tablo 8'de verilmektedir.

Tablo 8. AAB ve LAAB üretiminde kullanılan malzeme miktarları (1 m³)

Beton Türü	Bağlayıcı (ÖYFC) (kg)	Na ₂ SiO ₃ /NaOH	Lif miktarı (kg)		Katkı (kg)	İnce malzeme (KT, kg)	Agrega (kg)				Su (kg)
			ÇL	PYL			0-0.25 (mm)	0.25- 4 (mm)	4- 11.2 (mm)	11.2- 22.4 (mm)	
TANIK	350	117/58	-	-	6	400	384.8	523.2	436.1	106	
ÇLAAB/0.25	350	117/58	19.6	-	6	400	384.8	523.2	436.1	106	
ÇLAAB/0.50	350	117/58	39.2	-	6	400	384.8	523.2	436.1	106	
ÇLAAB/0.75	350	117/58	58.8	-	6	400	384.8	523.2	436.1	106	
ÇLAAB/1.0	350	117/58	78.4	-	6	400	384.8	523.2	436.1	106	
PYLAAB/0.25	350	117/58	-	3.4	6	400	384.8	523.2	436.1	106	
PYLAAB/0.50	350	117/58	-	6.8	6	400	384.8	523.2	436.1	106	
PYLAAB/0.75	350	117/58	-	10.2	6	400	384.8	523.2	436.1	106	
PYLAAB/1.0	350	117/58	-	13.6	6	400	384.8	523.2	436.1	106	
HLAAB/0.25	350	117/58	9.8	1.7	6	400	384.8	523.2	436.1	106	
HLAAB/0.50	350	117/58	19.6	3.4	6	400	384.8	523.2	436.1	106	
HLAAB/0.75	350	117/58	29.4	5.1	6	400	384.8	523.2	436.1	106	
HLAAB/1.0	350	117/58	39.2	6.8	6	400	384.8	523.2	436.1	106	

4.3.2. AAB Üretiminde Kullanılan Numune Kalıpları

Çalışma süresince 150x150x150 mm boyutlarında küp ile 100x200 mm boyutlarında silindir plastik kalıplar ve kiriş numunelerin üretimleri için ise 150x150x600 mm boyutlarında metal prizmatik kalıplar kullanılmıştır. Beton dökümü

öncesinde kalıpların iç yüzeyleri numuneleri rahat çıkarabilmek adına gres yağı ile yağlanmıştır (Şekil 15).



Şekil 15. Çalışmada kullanılan kalıplar ve kalıpların yağlanması

4.3.3. Alkali Aktivatörlerin Hazırlanması

Alkali aktivatörler beton dökümünden 24 saat önce hazırlanmıştır. Karışım oranlarından elde edilen miktarlara göre 10M çözelti derişimi olacak şekilde 800 gram katı sodyum hidroksit 1200 gram saf su ile karıştırılmıştır. Alkali çözeltinin hazırlanmasına, sodyum hidroksitin su içerisinde çözdürülmesi ile başlanmıştır. Çözelti, 800 gram katı sodyum hidroksit ile 10 M çözelti derişiminde 2 lt çözelti olacak şekilde su ile karıştırılmıştır. Sodyum silikat ve sodyum hidroksit oranı 2 olacak şekilde literatürdeki çalışmalara benzer şekilde alınmıştır (Patel ve Shah, 2018; Mehta ve Siddique, 2018). Karışım esnasında ortaya çıkan ısının hem azalması hem de daha yüksek çözünürlüklü bir çözelti elde etmek için çözelti bir yandan soğutularak hazırlanmış ve hazırlandıktan sonra bir gün soğuması için bekletilmiştir (Şekil 16). Bir diğer alkali aktivatör olan sodyum silikat (Na_2SiO_3) yine karışım oranlarından belirlenen miktara göre içinde bulunduğu ambalajından ayrı bir kaba aktarılmıştır. Sodyum silikat bekletilen sodyum hidroksit çözeltisi ile aynı kaba konularak alkali aktivatörler beton dökümüne hazır hale getirilmiştir.



Şekil 16. Çalışmada kullanılan sodyum hidroksit (NaOH)'in hazırlanması

4.3.4. AAB'nin Üretilmesi, Kalıplara Yerleştirilmesi ve Kürü

Alkali aktivasyonlu beton üretimi esnasında geleneksel portland çimentolu beton üretiminde uygulanan yöntem takip edilmiştir. Üretim öncesi beton mikseri karışımın suyunu çekmemesi adına nemlendirilmiştir. Kuru karışım beton mikserine agregalar doygun kuru yüzey olacak şekilde bağlayıcılar ile birlikte döküldükten sonra homojen bir karışım olması için yaklaşık iki dakika karıştırılmıştır. Hemen ardından bir gün öncesinden hazırlanan alkali aktivatörler (NaOH ve Na_2SiO_3) süperakışkanlaştırıcı ile beraber dökülmüştür. Alkali aktivatörler ve kuru karışım yine iki dakika karıştırıldıktan sonra mikser durdurulmuş, lifler (üretilmesi planlanan beton sınıfına göre) ve ilave su dökülerek yine iki dakika daha karıştırılmıştır. Karışım tamamlandıktan sonra alkali aktivasyonlu beton küp, silindir ve prizma kalıplara dökülmüştür. Döküm hava boşluklarını tahliye ve bağdaşık bir karışım elde etmek amacıyla vibrasyon sehpasında yapılmıştır. Yerleştirme sırasında kullanılan vibrasyon liflerin dönmesine ve belirli yönlerde dizilmelerine neden olmaktadır. Bu durum lifin narinlik oranıyla beraber vibrasyon tipi ve kalıp boyutuna bağlıdır. Bu sebeple lifli betonların yerleştirilmesinde dış vibrasyon tercih edilmelidir. Kalıplar düzgün yüzeyli plastik (silindir ve küp) ve metal (kiriş) kalıplar olmalarından dolayı betonun kalıba yapışmasını önlemek için kalıpların yüzeyleri yağlanmıştır. Taze beton kalıba tam doldurulduktan sonra boşluk kalmaması için elle şişleme çubuğuyla boşluklar doldurulmuş ve yüzeyi mala ve spatula ile düzeltilmiştir. Dökümden hemen sonrasında alkali uçuculuğunun önüne geçebilmek için kalıpların üstü plastik örtüler ile kaplanmıştır. 24 saat sonra beton numuneler kalıplardan çıkarılmıştır. Kalıplara yerleştirilen betonlar, sıcaklığı 23 ± 2 °C ve nispi (bağıl) rutubeti % 60 ± 5 arasında değişen laboratuvar ortamında 24 saat kalıp içinde bekletildikten sonra kalıptan çıkartılarak içerisinde 23 ± 2 °C su bulunan kür havuzuna yerleştirilmiştir. 3/7/28 gün kür havuzunda kalan numuneler çıkarılmış ve deneyler için hazır hale gelmiştir (Şekil 17).



Şekil 17. AAB'nin üretimi, numune kalıplarına dökümü ve kütü

4.4. Deney Yöntemleri

4.4.1. KT'nin Pozolanik Aktivitesinin Belirlenmesi

Puzolanik aktivite deneyi için kayaç tozundan farklı kütle oranlarında alınarak (% 0; %10; %20; %30 ve %40) kayaç tozu+çimento karışımları hazırlanmış ve 7/28 gün sonunda dayanım aktivite indeksleri ortaya konulmuştur. Her bir harç grubu için TS 25 (2008) tras standardında belirtildiği gibi, 40x40x160 mm boyutlarında 3'er adet kare prizma numune hazırlanmış (Şekil-18) ve deney programı Tablo-9'da belirtildiği gibi oluşturulmuştur. Ayrıca, kimyasal içeriğinin belirlenebilmesi için X-Işını Kırınımı (XRF) ve kristalografik yapısının belirlenmesi için ise XRD analizleri yapılmıştır.



Şekil 18. Pozzolanik aktivitenin belirlenmesinde kullanılan numunelerin üretimi

Tablo 9. Pozzolanik aktivitenin belirlenmesi deney programı

Deneyin amacı	Deneyin türü	Sıcaklık (°C)	Süre (gün)	Üretilen numune adedi
Pozzolanik aktivite deneyi	TS 25'te tanımlı harç karışımı	21	7/28	-
Harç bileşenleri oranlarının pozzolanik aktiviteye etkisinin incelenmesi	Kütlece % 0 KT	21	7/28	6
	Kütlece % 10 KT	21	7/28	6
	Kütlece % 20 KT	21	7/28	6
	Kütlece % 30 KT	21	7/28	6
	Kütlece % 40 KT	21	7/28	6
Toplam				30

4.4.1.1. Eğilmede Çekme ve Basınç Dayanımlarının Belirlenmesi

Eğilmede çekme ve Basınç dayanımı deneyleri 7 ve 28 günlük numunelere uygulanmıştır. Eğilmede çekme deneyi için kullanılan basınç düzeneği TS EN 12390-3 (2003)'e uygun olarak ayarlanmış ve deney otomatik olarak sonuçlanarak kırılma yükleri ve eğilmede çekme ve basınç dayanımları saptanmıştır. Basınç dayanımı deneyleri, MFL System marka deney cihazı kullanılarak TS EN 12390-3 (2003) ve TS EN 196-1 (2016)'ya göre, eğilmede çekme dayanımı deneyinde kırılan parçalar

kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 19). Cihazın yükleme hızı 0.05 kN/s olarak alınmış ve bütün deneylerde aynı yükleme hızı kullanılmıştır.



Şekil 19. Prizmatik numune örnekleri üzerinde yapılan eğilmede çekme ve basınç dayanımı deneyleri

Bir malzemenin puzolan olarak değerlendirilebilmesi için gerekli koşullar:

1. ASTM C618 (2012) standardına göre 45 μm göz açıklıklı elek üzerinde kalan miktarın mak. %34 olması ve TS 25 (2008) standardına göre özgül yüzey/blaine değerinin min. 3000 cm^2/g olması gerektiği belirtilmiştir.
2. Kimyasal içerik olarak (Tablo 10);

Tablo 10. ASTM C 618 (2012) ve TS 25 (2008) standartlarındaki kimyasal içerik değerleri (% m)

	TS 25	ASTM C618
SiO₂+ Al₂O₃+ Fe₂O₃	70	70
SO ₃ , maks.	5	4
Nemlilik, maks.	3	3
Kızdırma kaybı, maks.	10	10
MgO, maks.	5	-
Na ₂ O olarak alkaliler, maks.	1.5	1.5

3. Dayanım aktivite indeksi ASTM C618 (2012) standardına göre 7 ve 28 günlük min. %75, TS 25 (2008) standardına göre ise min. %70 olması ve su ihtiyacının yine aynı standarda göre maks. %115 olması gerektiği belirtilmiştir.

Puzolanik aktivite, puzolanik özellikli malzemeye yapılan deneyler sonucunda tayin edilmektedir. ASTM C 618 (2012) standardına göre kütlece (%0; %10; %20; %30 ve %40) oranında tanık çimento+kayaç tozu ile hazırlanmış karışımlar ile sadece tanık çimento bileşimi ile hazırlanan karışımlar üzerinde deneyler yapılarak kayaç tozunun farklı oranlardaki puzolanik aktivitesi belirlenmiştir. Puzolanik aktivite, “dayanım aktivite indeksi” olarak adlandırılan bir değer hesaplanmasıyla ifade edilmektedir (Eşitlik 1).

$$\text{Dayanım aktivite indeksi} = (A/B) \times 100$$

(Eşitlik 1)

Burada;

A : Puzolanlı harç numunelerinin ortalama basınç dayanımı (MPa)

B : Tanık harç numunelerinin ortalama basınç dayanımı (MPa)

4.4.2. Betonun Taze Hali ve Birim Hacim Kütle Deneyi

Taze betonun kıvamını belirlemek için çeşitli teknikler kullanılabilir. Bu çalışmada, alkali aktivasyonlu taze betonların kıvamları, TS EN 12350-2 (2019)'a uygun olarak farklı lif oranlarında serbest çökme deneyi (slump, Abrams hunisi) kullanılarak belirlenmiştir (Aksüt, 2015). Serbest çökme deneyinin başlangıcı, standart çökme hunisinin düz bir zemine yerleştirilmesiyle başlanmıştır. Daha sonra, slump hunisi üç kademedede ve her kademedede 25 kez standart bir şişleme çubuğuyla şişlenmiştir. En üst yüzeyde biriken fazla beton kalıntıları mala ile sıyrılarak yüzey düzlenmiştir. Taze betonun kendi ağırlığıyla çökmesi için yüzeyi düzlenen standart huni yavaşça yukarı doğru kaldırılmıştır. Bu standart huni ters çevrilerek çöken betonun yanına yerleştirilmiş ve şişleme çubuğu ters çevrilerek standart huninin üzerine yerleştirilmiştir. Betonun üst seviyesinden çubuğun alt seviyesine kadar olan mesafe, Şekil 20'de gösterildiği gibi üç farklı noktadan ölçülmüş ve bu ölçümlerin ortalaması alınarak çökme yüksekliği hesaplanmıştır (Aksüt, 2015).



Şekil 20. Serbest çökme (Slump) deney düzeneği-ölçümü ve taze beton birim kütlesinin belirlenmesi

Taze beton numunelerinin birim kütleleri TS EN 12350-6 (2019) standartlarına uygun olarak hesaplanmıştır. Bu amaçla, taze beton numunesi, standart silindir kalıba iki tabaka halinde yerleştirilmiştir. Her tabakada ayrışma olmadan tam sıkışma sağlanması için mekanik titreşim masasında 10 veya 12 saniye süresince titreşim

uygulanmıştır. Daha sonra, silindir kalıp üzerindeki beton kalıntıları nemli bir bezle silinerek temizlenmiştir. Daha sonra, taze betonun kütlesi hassas bir terazi ile tartılmıştır (Şekil 20). Taze betonun birim kütlesi, standart silindir numunenin en ve boy ölçülerinden bulunmuştur (Eşitlik 2).

$$D = (m_2 - m_1) / V \quad (\text{Eşitlik 2})$$

Bu eşitlikte;

D : Taze betonun birim kütlesi, kg/m³,

m₂ : Kabın, içerisindeki numune ile birlikte toplam kütlesi, kg,

m₁ : Kabın kütlesi, kg,

V : Kabın hacmi, m³ ifade etmektedir.

4.4.3. Sertleşmiş Betonun Fiziksel Özellikleri

Farklı lif oranlarıyla yapılan her bir beton grubundan üçer numune alınmış ve TS EN 12390-7 (2019) standardına uygun olarak fiziksel özellikleri değerlendirilmiştir. Öncelikle, numuneler 23±2 °C sıcaklıktaki su içinde tamamen doygun hale gelene kadar bekletilmiştir. Daha sonra numunelerin sudan çıkarılması, yüzeylerindeki serbest suyu temizlemek ve havadaki kütlelerini belirlemek için işlemler tamamlanmıştır. Sonraki adımda, numunelerin su içerisindeki kütleleri arşimet terazisi kullanılarak ölçülmüştür. En son, numuneler 105°C sıcaklıkta etüvde kurutulmuş ve oda sıcaklığına kadar soğumaya bırakılmıştır. Bu süreçte, numunelerin etüv kurusu durumundaki kütleleri belirlenmiştir (Şekil 21). Tüm elde edilen veriler kullanılarak numunelerin hacimleri Eşitlik 3 yardımıyla hesaplanmıştır.

$$V_N = [m_a - ((m_{st} + m_w) - m_{st})] / d_w \quad (\text{Eşitlik 3})$$

Bu eşitlikte;

V_N : Numunenin hacmi, m³,

m_a : Numunenin havadaki kütlesi, kg,

m_{st} : Kefenin su içerisindeki görünür kütlesi, kg,

m_w : Numunenin su içerisindeki görünür kütlesi, kg,

d_w : Suyun 998 kg/m³ olarak kabul edilen, 20 °C sıcaklıktaki yoğunluğudur.

Yoğunluk ise numunelerin tayin edilen hacmi ve kütlesi kullanılarak Eşitlik 4'te verilen ifade yardımıyla hesaplanmıştır.

$$D=m/v$$

(Eşitlik 4)

Bu eşitlikte;

D : Numunenin nem durumu ve hacim tayini metoduna bağlı olarak yoğunluğu (kg/m^3),

m : Numunenin, deney esnasındaki durumuna bağlı kütlesi (kg),

v : Numunenin özel yöntemle tayin edilen hacmidir (m^3).



Şekil 21. Beton numunelerinin fiziksel özelliklerinin belirlenmesi

Standartta bulunan ilgili formüller (Eşitlik 5 ve 6) kullanılarak, numunelerin su emme miktarları ve bu miktarlardan yararlanılarak hesaplanan porozite (gözeneklilik) değerleri hesaplanmıştır (Aksüt, 2015).

$$P=(W_{DA}-W_{KA})/V_N$$

(Eşitlik 5)

Bu eşitlikte;

P : Görünür boşluk oranı (% v),

W_{DA} : Doygun kuru yüzeyli malzemenin kütlesi (kg),

W_{KA} : Numunenin etüv kuru kütlesi (kg),

V_N : Numunenin hacmi (dm^3).

Su emme oranının hesaplanmasında;

$$w_a = ((W_{DA} - W_{KA}) / W_{KA}) \times 100 \quad (\text{Eşitlik 6})$$

Bu eşitlikte;

w_a : Kütlece su emme oranı (% m),

W_{KA} : Numunenin etüv kuru kütlesi (g),

W_{DA} : Doygun kuru yüzeyli malzemenin kütlesi (g).

4.4.4. Ultrases Geçiş Hızı, Schmidt Çekici ve Basınç Dayanımı Deneyleri

Alkali aktivasyonlu beton numunelerinin ultrases dalgalarının numune içerisindeki geçiş süresinin belirlenmesi için tahribatsız bir yöntem olan ultrases geçiş hızı deneyi uygulanmıştır (Şekil 22). Ultrases geçiş hızı deneyi basınç deneyi için yapılacak bütün karışım dizisindeki küp numunelerin 3.; 7. ve 28. günlerdeki kür süreleri için gerçekleştirilmiştir. Numunelerin geçiş hızı testi ASTM C597 (ASTM International, 2016) ve TS EN 12504-4 (2021) standartlarına bağlı kalınarak uygulanmıştır.



Şekil 22. Numuneler üzerinde ultrases deneyinin yapılması

Ultrasonik geçiş süresi test cihazında okunan değerler, sesin gönderici başlıktan alıcı başlığa ulaşma süresini mikrosaniye cinsinden göstermektedir (Şekil 22). Bu süre,

Eşitlik 7 kullanılarak metre/saniye cinsinden hız değeri olarak hesaplanmıştır. Bu hız değeri, betonun boşluk oranı hakkında fikir edinmemizi sağlar.

$$V = (S / t) 10^3 \quad (\text{Eşitlik 7})$$

Bu eşitlikte;

V : Sesüstü dalga hızını (km/s),

S : Alıcı ve verici başlık arasındaki mesafeyi (m),

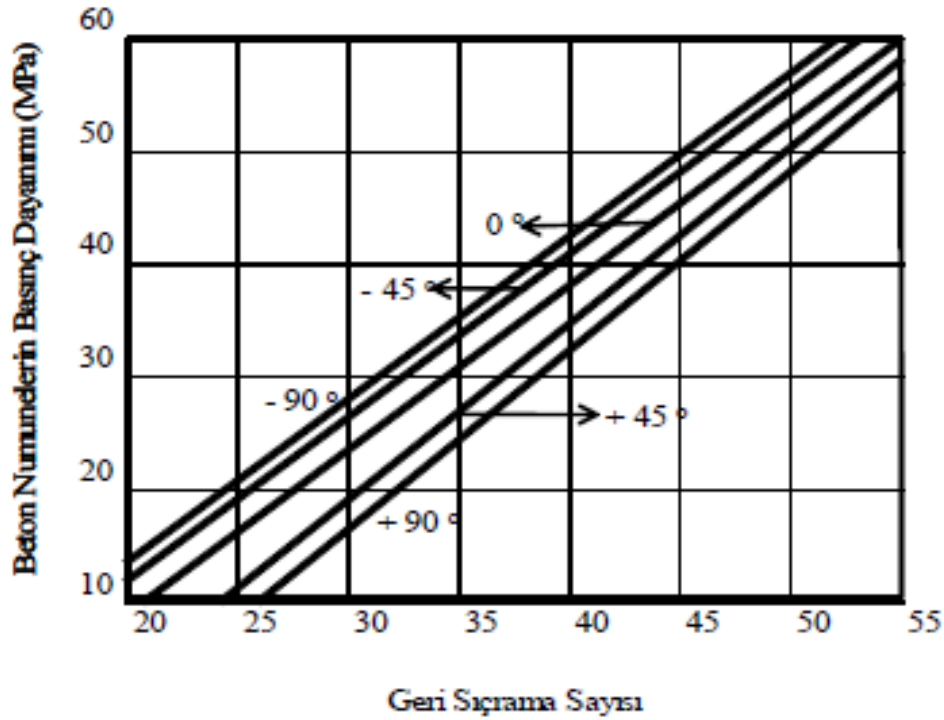
t : Ultrases aleti üzerinden okunan değer (μs) ifade etmektedir.

Schmidt çekici olarak bilinen ve TS EN 12504-2 (2021) standardına göre beton yüzey sertliğini kullanarak yaklaşık beton dayanımını belirleme yöntemi, 3.; 7. ve 28. günlerdeki kür süreleri dikkate alınarak uygulanmıştır. Bu yöntem, küp numuneler üzerinde test edilerek, tanık numuneleri ile lifli beton numuneleri karşılaştırılmıştır (Şekil 23). Schmidt çekici numunelere 0° ve 90°'lik açılarla uygulanmıştır. Silindir numuneleri için, Şekil 24'te gösterilen geri sıçrama sayılarına karşılık gelen betonun basınç dayanımını hesaplamak için bir algoritma kullanılmıştır. Deneylerde bir kenarı 15 cm olan küp numunelerin yüzey sertliği, $\sigma_{\text{Silindir}} \cong 0.80\sigma_{\text{küp}}$ ilişkisi kullanılarak tahmin edilmiştir. Numuneye uygulanan çekiç açısı değerleri aşağıda gösterilmektedir.

Çekiçten okunan geri sıçrama değeri, ilgili açısı değeriyle eşleştirilerek beton numunesinin basınç dayanımının tahmini yapılmıştır. Bununla birlikte, temel prensip beton numunelerinin yüzey sertliklerinin karşılaştırılmasıdır. Bu şekilde, kullanılan liflerin beton numunelerinin yüzeylerindeki etkisi hakkında bir anlayış geliştirilmesi hedeflenmektedir.



Şekil 23. Schmidt çekici deneyinin uygulanması



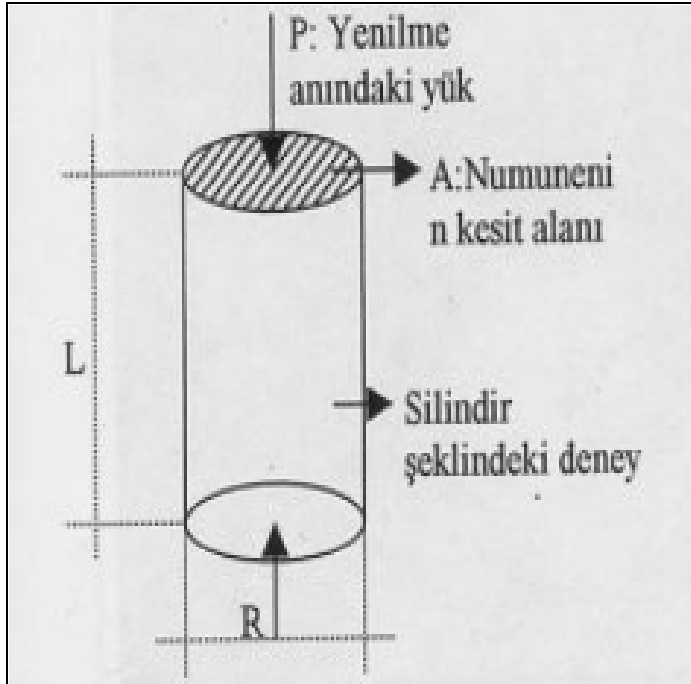
Şekil 24. Schmidt çekici için uygulama açısına göre geri sıçrama değerine karşılık gelen yaklaşık beton basınç dayanımları

Farklı lif türleri ve lif oranlarında alkali aktivasyonla üretilmiş olan beton numuneleri üzerinde TS EN 12390-3 (2014) standardına uygun olarak basınç dayanımı testi yapılmıştır. Basınç dayanımı testlerinde 150x150x150 mm ebatlarında küp numuneler kullanılmıştır (Şekil 25). Küp numunelerin basınç dayanımları 3.; 7. ve 28. günlerde gerçekleştirilmiştir. Beton numuneler, kür süresinin bitimini takiben basınç deneyine tabi tutulmuşlardır. Deney makinasına numunelerin yerleştirilmesinden önce, numunelerin yükleme başlıklarının yüzeylerinde bulunan kalıntı ve tozlar giderilmiştir. Deneye, tek eksenli basınç makinesinin yükleme başlığı ile deney numunesi arasındaki aralık ayar bloklarının TS EN 12390-4 (2002)'ye uygun olmasına dikkat edildikten sonra başlanmıştır. Beton numunesi, makinenin alt yükleme başlığı üzerine merkezlenerek yerleştirilmiştir. Yükleme hızı 0.2 N/mm²s'den 1.0 N/mm²s'ye kadar değişecek şekilde seçilmiştir. En büyük yüke ulaşıncaya kadar numuneye sabit hızda yükleme uygulanmıştır. Darbe tesiri olmaksızın, seçilen hızdan sapma $\pm\%10$ 'u geçmeyecek şekilde uygulanmıştır (Aksüt, 2015).



Şekil 25. Tek eksenli tahribatlı yöntemle beton basınç dayanımının belirlenmesi

Şekil 25'te gösterildiği gibi, numune, yükleme plakaları arasına merkezlenerek yerleştirilmiş ve sabit yükleme hızında basınç altında bir süre sonra yükü taşıyamayacak şekilde kırılmıştır. Numunenin kırılma anından itibaren deney tamamlanmış ve numune üzerindeki yük kaldırılmıştır. Bilgisayar, numunenin kırıldığı andaki en büyük yük (P) değerini hesaplamaktadır. Ardından, numunenin tek eksenli basınç dayanımı (TEBD; Şekil 26) değeri (f_c) formülde (Eşitlik 8) yerine yazılarak bulunmuştur (TS EN 1926, 2013).



Şekil 26. TEBD deneyi ile ilgili açıklayıcı bilgiler (Çınar, 2007; Özdemir, 2014; Aksüt, 2015).

Beton basınç dayanımının hesaplanmasında;

$$f_c = \frac{F_u}{A} \quad (\text{Eşitlik 8})$$

Bu eşitlikte;

f_c :Tek eksenli basınç dayanımı değeri (N/mm²),

F_u :Numune kırılma yükü (N),

A :Numunenin üzerine basınç uygulandığı en kesit alanı (mm²). Bu alan, numunenin belirtilen ölçüleri kullanılarak TS EN 12390-1 (2013)'e veya numune üzerinde ölçülen gerçek boyutlar kullanılarak hesaplanmaktadır.

4.4.5. Elastisite Modülü Belirleme Deneyi

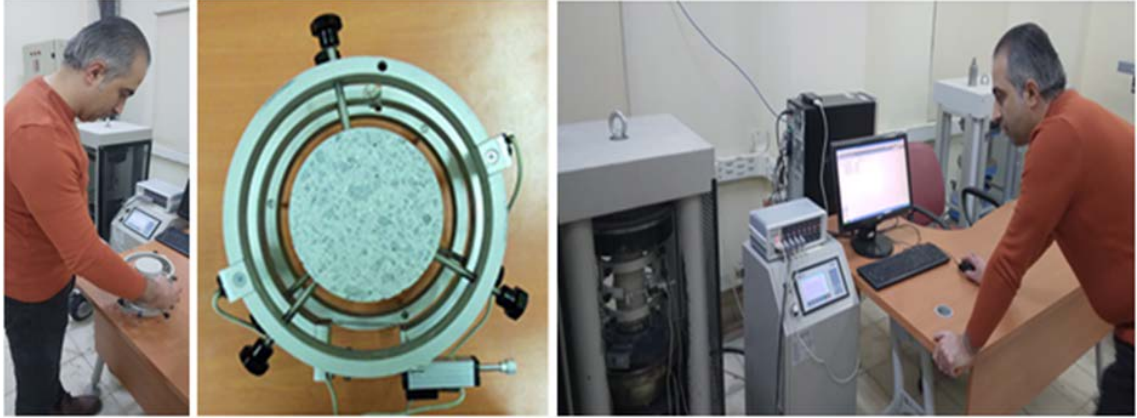
Betonda elastisite modülü, deney numunelerinde elastik bir bölgeye uygulanan kuvvetin oluşturduğu basınç gerilmelerinin numunelerin birim boylarının kısalmasına oranı ile tanımlanır. TS 3502 (1981) standartlarına uygun olarak, farklı lif türü ve farklı lif oranlarına sahip her bir beton grubu için gerilme-birim şekil değiştirme ilişkisi belirlenmiştir. Bu amaçla öncelikle 100x200 mm boyutlarında standart silindir numuneleri üretilmiş ve 28 gün kürde bekletilmiştir. Numunelerin boy değişimi ve çap değişimi ölçümleri, numunelerin başlıklanması yapıldıktan sonra gerçekleştirilmiştir (Şekil 27).



Şekil 27. Numune başlıklama cihazı ve yüzeyi düzeltilmiş numune

Deney aletinin iki ayağı üzerindeki boyunduruklar, ayar çubukları kullanılarak ayarlanarak deneye hazır hale getirilmiştir. Deney numunesi daha sonra aletin içine merkezlenerek yerleştirilmiş ve boyundurukların üzerindeki vidalar yardımıyla numune ekseninden kaçıklıkları ayarlandıktan sonra bu vidalar sıkılarak numunenin alete iyice bağlanması sağlanmıştır. Son olarak, ayar çubukları çıkarılarak sıkıştırılmış numune ile

birlikte boy değişimi ve çap değişimi ölçer aleti ile yk hücresi, beton basınc makinesine merkezlenerek yerleştirilmiştir (şekil 28).



şekil 28. Beton numunelerin elastisite modülü deneyinin yapılışı

Beton numunesi tek eksenli basınc cihazına yerleştirildikten sonra deneye başlanmıştır. Alet, beton numunenin giderek artan yüklere karşı gelişen deformasyonları otomatik olarak kaydetmiş ve bu işlem, numune kırılıncaya kadar devam etmiştir. Gerilme-birim deformasyon eğrisi, elde edilen veriler kullanılarak gerilme dikey eksene ve birim deformasyonlar ise yatay eksene yerleştirilmiştir. Beton numunelerinin σ - ϵ eğrisinin üzerinde herhangi bir nokta belirlenmiştir. Gerilme-birim deformasyon (σ - ϵ) eğrisinin başlangıç noktasından (0 noktası) ve bu noktadan geçen bir doğru çizilmiştir. Bu noktada, betonun en yüksek gerilme değerinin %40'ına karşılık gelen gerilme değeri genellikle temel alınmıştır. Bu çizilen doğru, betonun σ - ϵ eğrisi olarak kabul edilmiş ve bu doğrunun eğiminden sekant elastisite modülü hesaplanmıştır (Eşitlik 9).

$$E = \sigma / \epsilon$$

(Eşitlik 9)

Bu eşitlikte;

E : Elastisite modülü, N/mm^2 ,

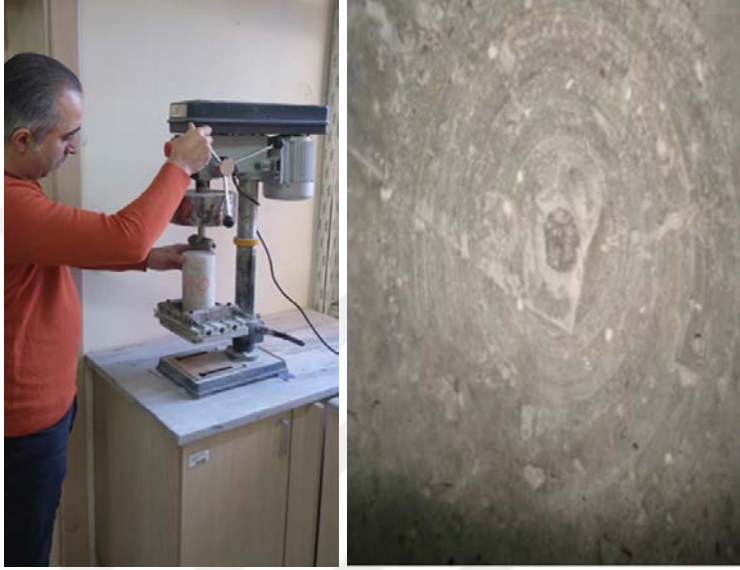
σ : Gerilme, N/mm^2 ,

ϵ : Birim deformasyonu ifade etmektedir.

4.4.6. Aşınma Dayanımı Oranı Belirleme Deneyi

ASTM C944 (1999) standardında belirtilen ilkelere uygun olarak, aşınma deneyinde her bir beton grubu için üç numune kullanılmıştır. Numuneler aşınma cihazına (şekil 29) yerleştirilmeden önce yüzeylerindeki toz ve çıkıntılar temizlenmiştir. Ardından, hassas bir terazi kullanılarak kütleleri hesaplanmıştır. Aşınma cihazında 200

dev/dk. hızla iki dakika boyunca aşınma etkisine bırakılmıştır. Bu sürenin sonunda, aşınan yüzey yumuşak bir kıllı fırça ile temizlenmiş ve üzerindeki serbest tozlar tamamen alınmıştır. Numune, iki dakikalık aralıklarla ve her seferinde yüzeyi temizlenerek üç kez aşınmaya maruz bırakılmıştır. 3. Döngüden sonra, yüzeyi temizlenen numunenin aşınma sonrası kütlesi hassas bir terazi kullanılarak ölçülmüştür. Kütle kaybı, ilgili formüle (Eşitlik 10) uygun şekilde kütle yüzdesi olarak hesaplanmıştır.



Şekil 29. Aşındırma cihazı ve aşınan beton numune

$$P = [(W_1 - W_2) / W_1] \times 100$$

(Eşitlik 10)

Bu eşitlikte;

P : Aşınma Kaybı, % m,

W_1 : Numunenin ilk kütlesi, g,

W_2 : Numunenin aşınma sonrası kütlesi, g olarak ifade edilmektedir.

4.4.7. Yarmada Çekme Dayanımı Deneyi

Çeşitli lif türleri ve lif oranları ile üretilen alkali aktivasyonlu beton numuneleri üzerinde yarmada çekme dayanımı deneyi yapılmıştır. Bu deney, TS EN 12390-6 (2010) ve ASTM C496 (2017) standartlarına uygun olarak 28 gün küre tabii tutulmuş 100x200 mm standart silindir numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Deneye başlanmadan önce, sabitleme cihazının sıkıştırma yüzeyleri temizlenmiştir. Bu amaç için deney numunesinin sıkıştırma yüzeyine temas edeceği yüzeylerdeki fazlalıklar ve kalıntılar giderilmiştir. Deney numunesi, yükleme başlığının ortasına yerleştirilerek

sıkıştırma makinasına tamamen merkezlenmiş ve gerilme hızı 0.04 N/mm².s'den 0.06 N/mm².s'ye kadar sabit tutulmuştur. Numune kırılıncaya kadar deney aleti üzerinde basınç yükü uygulanmış ve en büyük yük " F_u " olarak belirlenmiştir. Numunenin yarmada çekme dayanımı, kırılma anındaki " F_u " yükü kullanılarak Eşitlik 11'de yerine yazılmıştır.

Betonun yarmada çekme dayanımının hesaplanmasında;

$$f_{ct} = \frac{2 \times F_u}{\pi \times L \times d} \quad (\text{Eşitlik 11})$$

Bu eşitlikte;

f_{ct} : Yarmada çekme dayanımı, N/mm²,

F_u : En büyük yük, N,

L : Numunenin yükleme parçasına temas çizgisi uzunluğu, mm,

d : Numunenin seçilen en kesit boyutu, mm.

Böyle bir yükleme altında, silindir numunenin kırılma tarzı, numunenin ortadan yarılarak iki parçaya ayrılması şeklinde (Şekil 30) gerçekleşmiştir.



Şekil 30. Yarmada çekme dayanımı deneyinin yapılışı

4.4.8. Eğilmede Çekme Dayanımı Deneyi

Alkali aktivasyon yöntemiyle üretilen beton numunelerinin eğilmede çekme dayanımını test etmek için 150x150x600 mm boyutlarında prizmatik beton numuneler kullanılmıştır. Kiriş numunelerinin eğilmede çekme dayanımı ASTM C1609 (2019) standardına uygun olarak üç nokta yüklemeli eğilme deneyi ile belirlenmiştir. Eğilmede

çekme dayanımı için mesnet açıklığı 550 mm'dir ve cihaz yükleme başlığı AAB ve LAAB numunelerinin mesnet arası açıklığının ortasına yerleştirilmiştir. 28 günlük numunelerde eğilme dayanımları tespit edilmiş olup üçer numune için ortalama dayanım sonuçları belirlenmiştir. Şekil 31'de gösterilen standart eğilmede çekme dayanım testi cihazı kullanılmıştır. Tüm deney boyunca numunenin orta nokta sehimleri cihaz tarafından otomatik olarak 1 µm hassasiyetinde ölçülmüştür. Bu durum, deney sırasında ani enerji boşalmasını önlemek ve yük-sehim eğrilerini kaydetmek için prese geri beslemeli olarak yapılmıştır. Kapalı çevrimli olarak lifsiz diziler için deney 0.02 mm/dak hızında gerçekleştirilmiş ve numune tamamen kırılıp yük taşıyamaz hale gelinceye kadar devam edilmiştir. Lifli diziler için deney, 0.2 mm/dak. hızında gerçekleştirilmiş ve 3 mm orta nokta sehimine ulaşıncaya kadar yükleme yapılmıştır. Testlerde kullanılan yük hücresi 20 kN kapasiteli ve hassasiyeti ± % 0.5'tir.



Şekil 31. Eğilmede çekme dayanımı deneyinin yapılışı

Kiriş açıklığında yer değiştirme (sehim) miktarı cihaz tarafından otomatik olarak ölçülmektedir. Eğilme ilk dayanımı, f_i , ve nihai eğilme dayanımı, f_p , sırasıyla Eşitlik 12 ve Eşitlik 13'e göre elde edilmiştir.

$$f_i = \frac{P_i L}{bd^2}$$

(Eşitlik 12)

$$f_p = \frac{P_p L}{bd^2} \quad (\text{Eşitlik 13})$$

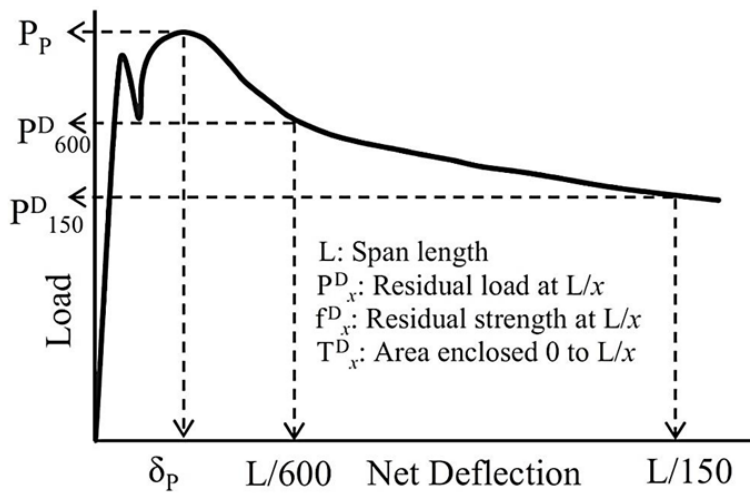
Burada P_1 ve P_p sırasıyla ilk tepe yükü ve nihai tepe yüküdür. L , numunenin açıklık mesafesi, b ortalama genişliği ve d ise ortalama derinliğidir. Eğilme tokluğu, standartta belirtilen yük-sehim eğrisinden hesaplanmıştır (ASTM C1609, 2019).

ASTM C1609'a göre Tokluk Değerlendirmesi

Tokluk endeksleri lif esaslı kompozit kirişlerin eğilmede çekme davranışını değerlendirmede bir parametre olarak kullanılmaktadır. Aynı zamanda kirişlerin enerji yutma kapasitesini de temsil etmektedir. Eğilme tokluğu, ASTM C1609 (2019) standardına göre kiriş açıklığının $L/150$ 'ye kadar olan bölümünün, yük-deplasman eğrisinin altında kalan alanı olarak tanımlanmış (Şekil 32) ve eşdeğer eğilmede çekme dayanımı oranı Eşitlik 14 yardımıyla hesaplanmıştır.

$$R_{T,150}^D = \frac{150T_{150}^D}{f_1 b h^2} \times 100\% \quad (\text{Eşitlik 14})$$

Burada T_{150}^D , kiriş açıklığının $L/150$ 'ye kadar olan bölümünde yük-deplasman eğrisinin altında kalan alanı, mm^2 ; L , mm cinsinden eğilme açıklığı uzunluğunu. f_1 , ilk tepe dayanımını (MPa); $f_1 = PL/bh^2$; P , ilk çatlak eğilme yükünü, b , numunenin mm cinsinden genişliğini ve h , numunenin mm cinsinden derinliğini ifade etmektedir.



Şekil 32. Tipik yük-deplasman eğrisi ve tokluk parametreleri (Khamar ve Kumar, 2015; ASTM C 1609, 2019).

Kopma modülü (MOR), Eşitlik 15 kullanılarak tepe yükünden hesaplanmıştır.

$$MOR = \frac{P_p L}{bd^2} \quad (\text{Eşitlik 15})$$

Burada P_p , Newton cinsinden tepe yüküdür. L , mm cinsinden mesnet açıklığı uzunluğudur. b , numunenin mm cinsinden genişliği ve d ise numunenin mm cinsinden derinliğidir.

4.4.9. Donma-Çözülme Dayanıklılık Deneyi

ASTM C666 (2004) Prosedür A'da belirtilen esaslara uygun olarak donma çözülme dayanıklılığını test etmek için 100x200 mm boyutlarında hazırlanan standart silindirik beton numuneleri kullanılmıştır. Numuneler, ısıyı iyi iletebilen ve suda korozyona uğramayan çelik malzemeden yapılmış 10.6 mm genişliğinde iç çapa sahip silindirik numune hücrelerine yerleştirilmiştir. A prosedürüne göre donma ve çözülme işlemi su içinde gerçekleşmektedir. Bu kapsamda en yüksek ve en düşük sıcaklıklar sırasıyla +4 °C ve -18 °C olup, bir çevrim süresi 2 ile 5 saat arasında olacak şekilde donma çözülme çevrimleri tamamlanmıştır. Alkali aktivasyonlu beton numuneleri kür havuzunda 28 gün bekletilip çıkarıldıktan sonra 120 çevrim olacak şekilde donma çözülme makinesine konulmuştur. Donma çözülmeye maruz bırakılan beton örnekleri Şekil 33'te görülmektedir. Numunelerin her 15 çevrimde bir en-boy değişimleri, kütle kayıpları ve ultrasonik geçiş hızı verileri alınarak ilgili eşitlikler yardımıyla gerekli hesaplamalar yapılmış ve içyapı hasarları belirlenmiştir.



Şekil 33. Donma-çözülme döngüsüne maruz kalan alkali aktivasyonlu beton örnekleri

Numunelerdeki kütle kaybı Eşitlik 16 yardımıyla belirlenmiştir.

$$W_{değişim} = \left(\frac{w_2 - w_1}{w_1} \right) \times 100 \quad (\text{Eşitlik 16})$$

Burada;

$W_{değişim}$: Kütle değişimi (%)

w_1 : Deney başlangıç kütlesi (g)

w_2 : Her 15 çevrimden sonraki kütle (g)

ASTM C 597 (2002) standardına uygun olarak, ultrasonik geçiş hızı deneyi, AAB numuneleri üzerinde yapılmıştır (Şekil 34). Her bir numunede birbirine paralel beş noktada beş farklı geçiş hızı değeri elde edilmiştir. Ardından değerlendirme, bu beş değer in ortalaması alınarak yapılmıştır. Ölçüm sırasında transedürlerin birbirine tam olarak denk gelmesi garanti edilerek transedürler ve numune arasında boşluk kalmamasını sağlamak için ultrason jeli kullanılmıştır.



Şekil 34. Numunelerde oluşan içyapı hasarının tespitinin belirlenebilmesi için ultrasonik geçiş hızı deneyinin yapılışı

Betonların donma-çözülme dayanıklılık deneyinde Postacıoğlu'nun (1987) öne sürdüğü esaslardan yararlanılmıştır. Bu deney yönteminin donma-çözülme dayanımında en güvenli sonuç veren yöntem olduğu bilinmektedir. Deneyin esası özetle ultrasonik

geçiş hızı (UPV) ile tayin edilen elastisite modülündeki donma-çözülme sonunda meydana gelen azalmanın belirlenmesidir. Bu yöntemin üstün yanı beton numunelerinin kırılmadan yapılabilir olmasıdır. Böylece aynı beton numunesinden elastisite modülünün ne oranda azaldığı belirlenirse donma-çözülme etkisinin gerçekleşip gerçekleşmediği anlaşılır. Betonların elastisite modülü değişik yöntemlerle saptanabilir. Bunlardan biri; kuvvet uygulanarak deformasyonlarının ölçülmesi ve daha sonra “Hooke Kanunu”nu uygulayarak elastisite modülünün (E) bulunmasıdır. E modülünün belirlenmesinde uygulanan diğer bir yöntem ise beton içindeki UPV değeri ile E modülü arasındaki bağıntının bulunmasıdır (Eşitlik 17).

$$E = 10^5 \times \text{UPV}^2 \times (\text{B.A.}/g) \quad (\text{Eşitlik 17})$$

Burada;

- UPV = Ultrasonic Pulse Velocity (Ses Geçiş Hızı, km/s)
- B.A. = Betonun Birim Ağırlığı (kg/dm^3)
- g = Yer Çekim Kuvveti (9.81 m/s^2)

Donma deneyine başlanmadan önce UPV_0 ise yukarıdaki bağıntıya göre başlangıçtaki E modülü şu değere eşit olacaktır (Eşitlik 18).

$$E_0 = 10^5 \times (\text{UPV}_0)^2 \times (\text{B.A.}/g) \quad (\text{Eşitlik 18})$$

Donma-çözülme olaylarının ardından betondaki boşlukların artması sonucunda, betonun ses hızı UPV_0 'dan küçük UPV_1 'e kadar düşecektir. Bu koşullarda betonun E modülünün E_1 büyüklüğü şuna eşit olacaktır (Eşitlik 19).

$$E_1 = 10^5 \times (\text{UPV}_1)^2 \times (\text{B.A.}/g) \quad (\text{Eşitlik 19})$$

E_0 ve E_1 bilindikten sonra donma-çözülme sonunda elastisite modülünde meydana gelen düşüş oranı ise;

$$\Delta E/E_0 = (1 - E_1/E_0) \quad (\text{Eşitlik 20})$$

Eşitlik 19 ile hesaplanır. E_1 ve E_0 yerine yukarıdaki Eşitlik 18 ve Eşitlik 19 ifadeleri konulursa,

$$AE/E_0=1-(UPV_1)^2/(UPV_0)^2 \quad (\text{Eşitlik 21})$$

olduğu hemen görülür. ASTM C 597 (2002) standartlarına göre, 300 donma-çözülme olayı sonunda AE/E_0 değerinin 0.40 veya %40'ın altında olması durumunda betonun donma etkilerine dayanıklı olması beklenir. Bu bulgunun Eşitlik 21'ye aktarılması;

$$UPV_1 > 0.77 UPV_0 \quad (\text{Eşitlik 22})$$

olduğunu gösterecektir. ASTM C597 (2002) standardına göre dinamik elastisite modülü (E_{dn}), AAB numunelerinin her 15 çevrimde bir belirlenen ultrasonik geçiş hızlarına göre Eşitlik 23 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$E_{dn} = \rho c^2 \left(\frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{1-\nu} \right) \times 100 \quad (\text{Eşitlik 23})$$

Burada;

E_{dn} : Dinamik elastisite modülü (GPa)

ρ : Betonun yoğunluğu (kg/m^3)

c : Ultrasonik geçiş hızı (km/s)

ν : Poisson oranı (Tüm karışımlarda 0.2 olarak kabul edilmiştir)

ASTM C666 (2004)'e göre bağıl dinamik elastisite modülü (P_n) Eşitlik 24'e ve buna bağlı olarak durabilite faktörü (D_f) Eşitlik 25'e göre hesaplanmıştır.

$$P_n = \left(\frac{f_n^2}{f_1^2} \right) \times 100 \quad (\text{Eşitlik 24})$$

$$D_f = P_n \times \left(\frac{N}{M} \right) \quad (\text{Eşitlik 25})$$

Burada;

P_n : Bağıl dinamik elastisite modülü

f_1 : Donma-çözülme deneyinin başlangıcındaki ultrasonik geçiş hızı değeri

f_n : Donma-çözülme deneyinin n çevrimindeki ultrasonik geçiş hızı değeri

D_f : Dayanıklılık faktörü

N : Bağlı dinamik modülünün 0.60'dan az olduğu çevrim sayısı veya maruz kalacağı çevrim sayısı (hangisi küçük ise)

M : Maruz kalmanın sonlandırılacağı çevrim sayısı (120)

4.4.10. Sülfata Dayanıklılık Deneyi

AAB ve LAAB numunelerinin saldırgan çevre şartlarına göre dayanıklılığının belirlenebilmesi için ASTM IC1012/C1012M-18b (2015) standardı esas alınarak tanık ve farklı lif türleri ve lif oranlarında üretilen numuneler %5 ve %10 Na₂SO₄ çözeltileri içerisinde bir ıslanma-kuruma çevrimine maruz bırakılmıştır. Deneylerde sodyum sülfat (Na₂SO₄) çözeltisi hazırlanırken 100 litre çözelti için 90 litre su ve 10 kilogram Na₂SO₄ kullanılarak kütlece %10 çözelti elde edilirken 95 litre çözelti için 5 kilogram Na₂SO₄ kullanılarak kütlece %5 çözelti elde edilmiştir. Tüm numuneler etüvde 105°C'de 2 gün bekletildikten sonra kütleleri, en-boy ölçüleri ve ultrasonik geçiş hızı verileri alındıktan sonra sodyum sülfat (Na₂SO₄) içeriği %5 ve %10 olan solüsyonlar içerisinde 2 gün süre ile bekletilmiş ve bir ıslanma-kuruma çevrimi tamamlanmıştır (Şekil 35). Bu şekilde toplam 15 ıslanma-kuruma döngüsü yapılmıştır. Her 5 döngüden sonra beton örneklerin ultrasonik dalga hızları, en-boy ölçüleri ve kütle kayıpları belirlenmiştir.



Şekil 35. Numunelerin %5 ve %10 Na_2SO_4 çözeltisine maruz bırakılması ve her 5 çevrim sonunda verilerin alınması

Üretilen AAB ve LAAB'ler 28 gün kür havuzunda bekletildikten sonra kürden çıkarılarak etüvde 105°C 'de kurutulmuş ve kuruyan numuneler ilk kütlesi alınarak not edilmiştir. Numuneler daha sonra Na_2SO_4 içeriği %5 ve %10 olan solüsyonlar içerisinde bekletilmiş ve 15 döngü sonrasında çevrim tamamlanmıştır. Yapılan her 5 döngüde bir numunelerin kütleleri ölçülmüş ve başlangıç kütlelerinden çıkarılarak değişim miktarı % olarak Eşitlik 26'da ifade edildiği şekilde belirlenmiştir.

$$\% \text{ K\u00fctle kayb\u0131} = \left[\frac{(\text{Son k\u00fctle} - \text{\u0130lk k\u00fctle})}{\text{\u0130lk k\u00fctle}} \right] \times 100 \quad (\text{E\u015fitlik 26})$$

Hazırlanan tanık ve lifli alkali aktivasyonlu beton numunelerinin ultrasonik dalga hızı ölçümü ASTM C 597 (2002)'ye göre belirlenmiştir. Numuneler üzerinden gönderilen ses dalgaları hızının ölçülmesi ile UPV değerleri elde edilmektedir. Beton örneğinin yatay tutulması sonrasında bir yüzeyinden içeriye gönderilen ses üstü dalgaların, numunenin diğer bir yüzeye kadar geçtiği değer ölçülmekte ve Eşitlik 27 kullanılarak belirlenmektedir.

$$V=(s/t) \times 10^3 \quad (\text{Eşitlik 27})$$

Burada;

V = P dalga hızı (km/s),

s = Numunenin ses üstü dalga gönderilen yüzeyi ile dalga alınıldığı yüzeyi arasındaki mesafe (metre),

t = Beton yüzeyinden P dalgasının gönderildiği ve alındığı yüzeye kadar geçen zamandır (mikro saniye).

Bütün çevrimlerin tamamlanmasından sonra numuneler, TS EN 12390-3 (2012) standardına göre basınç dayanımına tabi tutulmuştur. Basınç dayanım değerleri belirlenirken her bir lif türü ve farklı lif oranlarında üretilmiş olan numunelerden 3'er adet numune kırılmış ve üçünün ortalaması alınarak beton basınç dayanımı belirlenmiştir. Beton basınç dayanımının hesaplanması Eşitlik 28 kullanılarak yapılmıştır.

$$F_c = F/A_c \quad (\text{Eşitlik 28})$$

Burada;

F_c = Basınç dayanımı, MPa (N/mm²),

F = Kırılma anında ulaşılan en büyük yük, N,

A_c = Numunenin, üzerine basınç uygulandığı en kesit alanını, (mm²) ifade etmektedir.

4.4.11. Çok Amaçlı (Objektif) Optimizasyon

Çoklu objektifli optimizasyon, çeşitli parametrelerin aynı anda sayısal yöntemler kullanılarak değerlendirilmesini sağlar. Birden fazla tepkinin optimizasyonu genellikle mühendislik alanında erişilebilirlik fonksiyonu ile mümkündür (Eşitlik 29). Kontur

çizgisi, sınırlandırılmış optimizasyon problemleri ve erişilebilirlik yöntemi gibi birçok istatistiksel yöntem, çoklu objektifli problemleri çözmek için kullanılır. Her bir tepki için verilen etki ağırlığının belirlenmesi ve değiştirilmesi kolay olduğu için erişilebilirlik yöntemi tercih edilmektedir (Meng vd., 2016; El-Hassan ve Elkholy, 2021). Herhangi bir tepkinin çok amaçlı optimizasyon yöntemi kullanılarak en yüksek değerlendirilebilmesi için aşağıdaki bağıntı ve kriterler kullanılmaktadır (Aral, 2006).

$$d_j = \begin{cases} 0 & \left[\frac{Y_j - \min f_j}{\max f_j - \min f_j} \right]^t \\ 1 & \end{cases} \text{ ve } 0 < d_j < 1, \begin{cases} Y_j \leq \min f_j \\ \min f_j < Y_j < \max f_j \\ Y_j \geq \max f_j \end{cases} \quad (\text{Eşitlik 29})$$

Tekil arzu edilebilirlik fonksiyonu, herhangi bir tepkinin azaltılması için şu şekilde tanımlanabilir;

$$d_j = \begin{cases} 1 & \left[\frac{\max f_j - Y_j}{\max f_j - \min f_j} \right]^t \\ 0 & \end{cases} \text{ ve } 0 < d_j < 1, \begin{cases} Y_j \leq \min f_j \\ \min f_j < Y_j < \max f_j \\ Y_j \geq \max f_j \end{cases} \quad (\text{Eşitlik 30})$$

Bu bağıntılarda d_j : j tepkisine ait arzu edilebilirlik fonksiyonu, Y : j tepkisinin değeri, $\min. f_j$: j tepkisinin elde edilen en küçük değeri, $\max. f_j$: j tepkisinin elde edilen en büyük değeri, t : j tepkisinin kütle faktörüdür.

Yukarıda belirtildiği gibi, her bir tepki için tekil arzu edilebilirlik fonksiyonları bulunur. Ardından, amaç fonksiyonu (kompozit arzu edilebilirlik) (D) hesaplanır (Eşitlik 31). Aşağıda gösterildiği gibi, D , tekil arzu edilebilirlik fonksiyonlarının geometrik ortalamasıdır ve 0'dan 1'e kadar değer alır. D değerinin en büyük değeri, çok amaçlı optimizasyon probleminin ideal değeridir (Aral, 2006).

$$D = (d_1 \times d_2 \times d_3 \times \dots \times d_m)^{\frac{1}{m}} \quad (\text{Eşitlik 31})$$

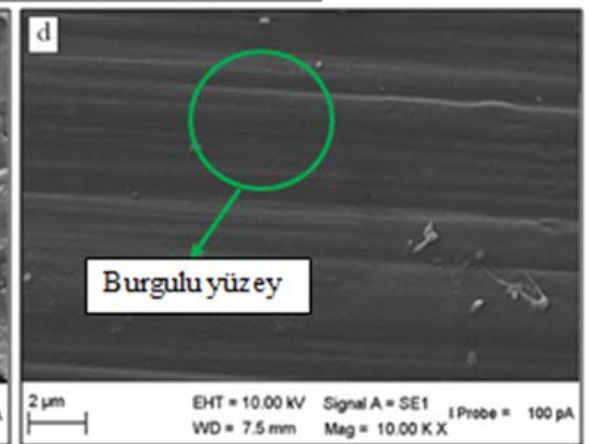
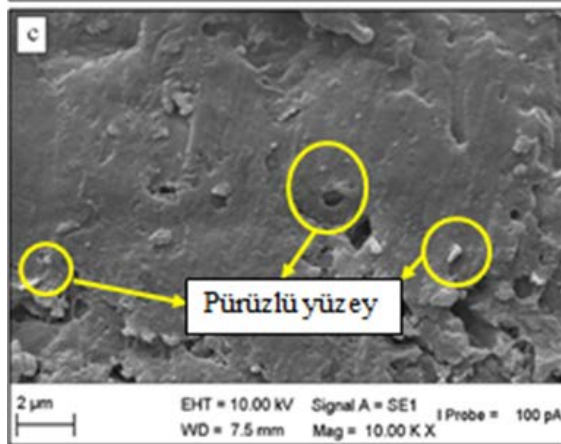
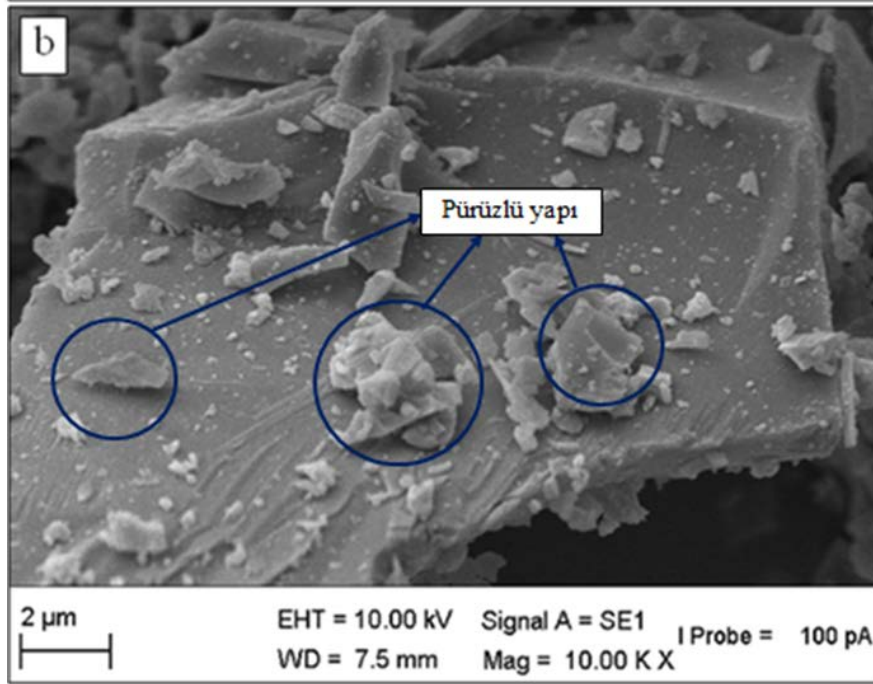
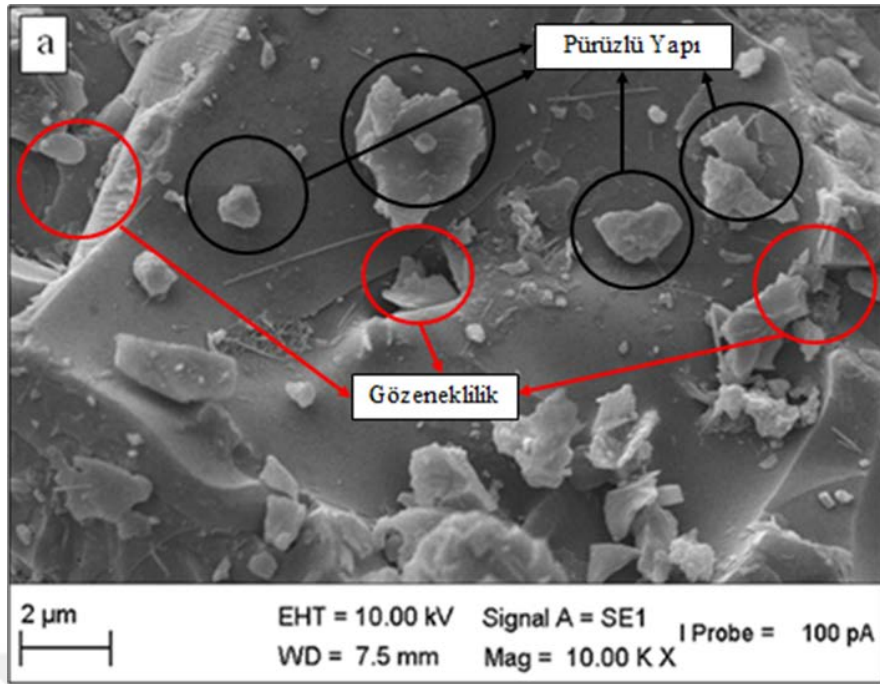
Bu bağıntıda, m , optimizasyon sürecinde göz önünde bulundurulmuş tepki sayısıdır.

D , arzu edilebilirlik sınırları dışında kalırsa sıfır olur. Tekil arzu edilebilirlik fonksiyonlarının hesaplanmasında tepkiler eşit kütlede ($t = 1$) kabul edilmiştir.

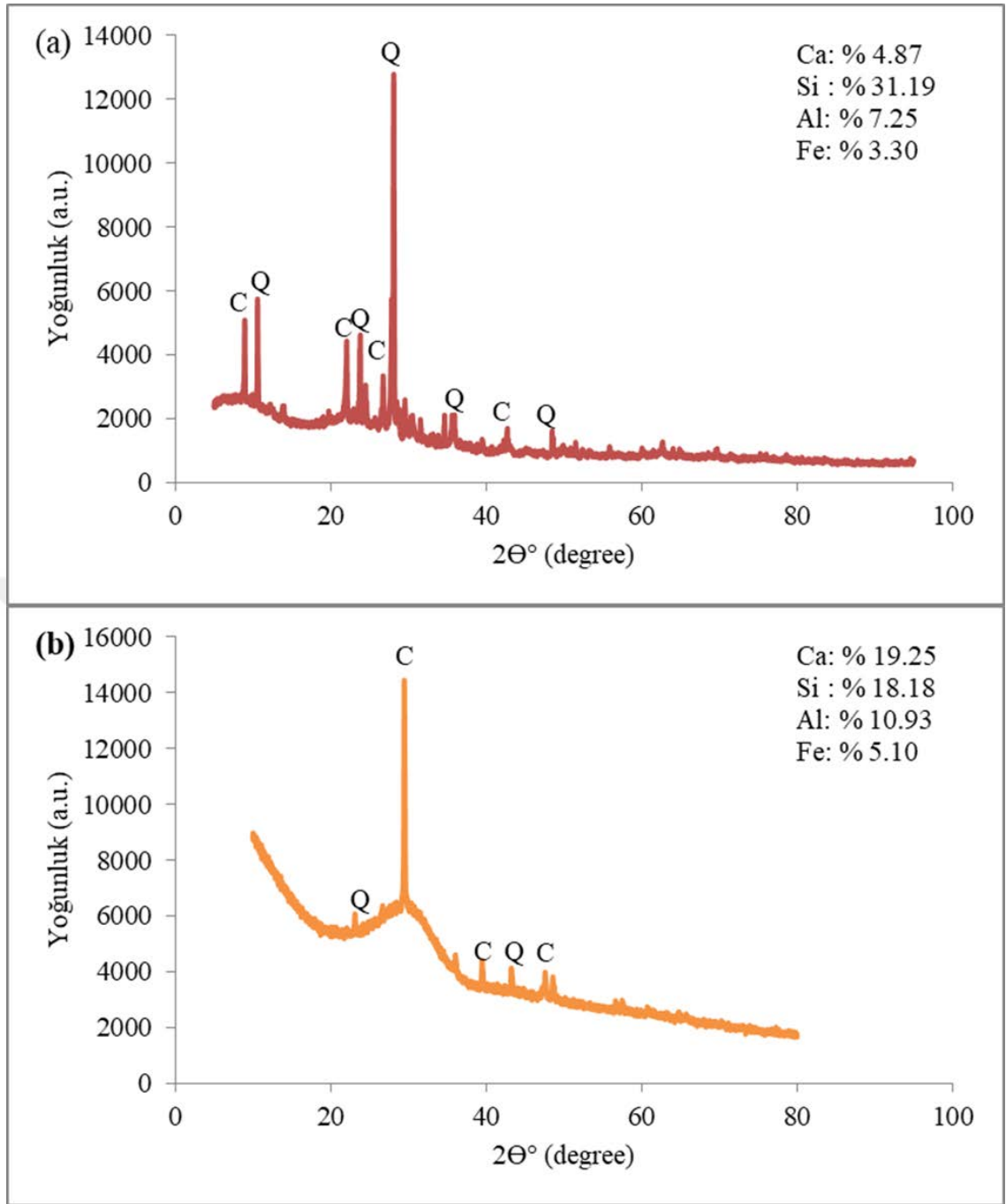
5. BULGULAR VE KARŞILAŞTIRMA

5.1. Kullanılan Bağlayıcı ve Liflere Ait Bulgular

Alkali aktivasyonlu betonun mekanik özelliklerinin artırılması için kullanılan volkanik kayaç tozu (KT), öğütülmüş yüksek fırın cürufu (ÖYFC) ve liflerin (ÇL, PYL) beton yapısına etkisini görebilmek için mikro yapıları SEM ile analiz edilmiştir (Şekil 36). KT malzemesi düzensiz yapılı (amorfe) hücreli gözenekli yüzeylere sahip parçacıklar şeklindedir. Bu yapılar yüzey alanını artırarak parçacıkların birbirine bağlanmasını sağlar. Pozolonik özelliğın artmasına ve AAB'nin mekanik özelliklerine olumlu etkisi vardır (Martina vd., 2023; Francisco vd., 2024). Volkanik kayaç tozundan daha az pozolonik olan ÖYFC ise her bir tanecik boyutunda pul pul kümelenmiş şekildedir. Boşluk oranının az olması gözenek yapısının azlığı kenetlenme derecesine etki edecektir. Bu etki mekanik davranışa da yansiyacaktır. Çelik lifin yüzeyinde bulunan yer yer girintiler pürüzlü bir yüzey oluştururken polyester lif pürüzsüz, burgulu bir yüzeye sahiptir (Şekil 37). Bu çalışmada AAB ve LAAB'lerde kullanılan lif yapısının mekanik özelliklere etkisinde ayrıca incelenecektir. Burgulu yapının çimento harcı ile etkileşimi ve pürüzlü yüzeyin kenetlenme etkisine bakılmıştır. Ayrıca, bağlayıcı olarak kullanılan ÖYFC ve ince malzeme olarak kullanılan KT'nin kristallografik özelliklerinin ve içerdikleri fazların belirlenebilmesi için 2 der./dak. hızda geniş açılı x-ışınları difraktometresi (XRD) analizi yapılmıştır (Şekil 38). Yapılan XRD analiz sonrası KT içeriğinde yüksek miktarda kuvars (Q) görünürken, ÖYFC içeriğinin büyük bir kısmını kalsiyum (Ca) oluşturmaktadır. Pozolonik aktivite ve alkalisyon için kullanılan endüstriyel atıklarda kuvars içeriği çok önemlidir (El-Hassan ve Elkholy, 2021; Noor Abbas vd., 2023). Kalsiyum oksit, aktivasyon sürecinde betonun katılaşmasına olumlu etki etmektedir. Öğütülmüş yüksek fırın cürufunda önemli miktarda bulunan bu bileşen, $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ (C-S-H) ve $\text{NaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ (N-A-S-H) jellerinin (fazlarının) oluşmasını sağlamaktadır (Das ve Shrivastava, 2021).



Şekil 36. (a) KT, (b) ÖYFC, (c) ÇL ve (d) PYL'ye ait SEM morfolojik görüntüleri



Şekil 37. (a) KT ve (b) ÖYFC'nin XRD modelleri

5.2. KT'nin Puzolanik Aktivite Bulguları

5.2.1. Fiziksel ve Kimyasal Analiz

KT malzemesi düzensiz yapılı (amorft) hücresel gözenekli yüzeylere sahip parçacıklar şeklinde ve yüksek miktarda kuvars (SiO_2) içermektedir. Standartların belirlediği sınır değerler şu şekilde açıklanmıştır;

1. maddede belirtilen ASTM C618 Standardına göre 45 μm göz açıklıklı elek üzerinde kalan miktarın kütlece mak. %34 olması koşulu;

Tablo 11. Kayaç tozunun fiziksel özellikleri

	Elek çapları			Özgöl kütle (g/cm ³)	Blaine (cm ² /g)
	32µ	45µ	90µ		
Kalan kütle oranları (%m)	40.30	29.60	9.30	2.53	2000

Elekte kalan kütle oranı %29.60 < %34 olduğundan koşulu sağlıyor.

1. maddede belirtilen özgöl yüzey/blaine değerinin min. 3000 cm²/g olması;

2000 cm²/g < 3000 cm²/g olduğundan koşulu sağlamıyor.

2. Kimyasal içerik olarak gerekli sınır koşulların sağlanması durumu;

Tablo 12. Kayaç tozuna ait kimyasal içerikler (%m)

Kayaç tozu	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O
	65.84	13.70	4.71	4.16	2.90	0.17	2.87	1.95

a. SiO₂+Al₂O₃+Fe₂O₃=65.84+13.70+4.71= %84.25 > %70 (Tablo 10) olduğundan koşulu sağlıyor.

b. SO₃= %0.17 < %4 (Tablo 10) olduğundan koşulu sağlıyor.

c. Kızdırma kaybı = %2.93 < %10 (Tablo 10) olduğundan koşulu sağlıyor.

d. MgO= %2.90 < %5 (Tablo 10) olduğundan koşulu sağlıyor.

e. Na₂O+K₂O= %4.82 > %1.5 (Tablo 10) olduğundan koşulu sağlamıyor.

5.2.2. Eğilmede Çekme ve Basınç Dayanımları

3. Maddede belirtilen dayanım aktivite indeksinin ASTM C618'e göre 7 ve 28 günlük min. %75, TS 25'e göre %70 olması koşulu;

Eğilmede çekme değeri için;

7 günlük; Dayanım aktivite indeksi = (9.32/10.58) x 100 = %88.1 > %75 & %70 olduğundan koşulu sağlıyor.

28 günlük; Dayanım aktivite indeksi = (11.36/12.63) x 100 = %89.9 > %75 & %70 olduğundan koşulu sağlıyor.

Basınç değeri için;

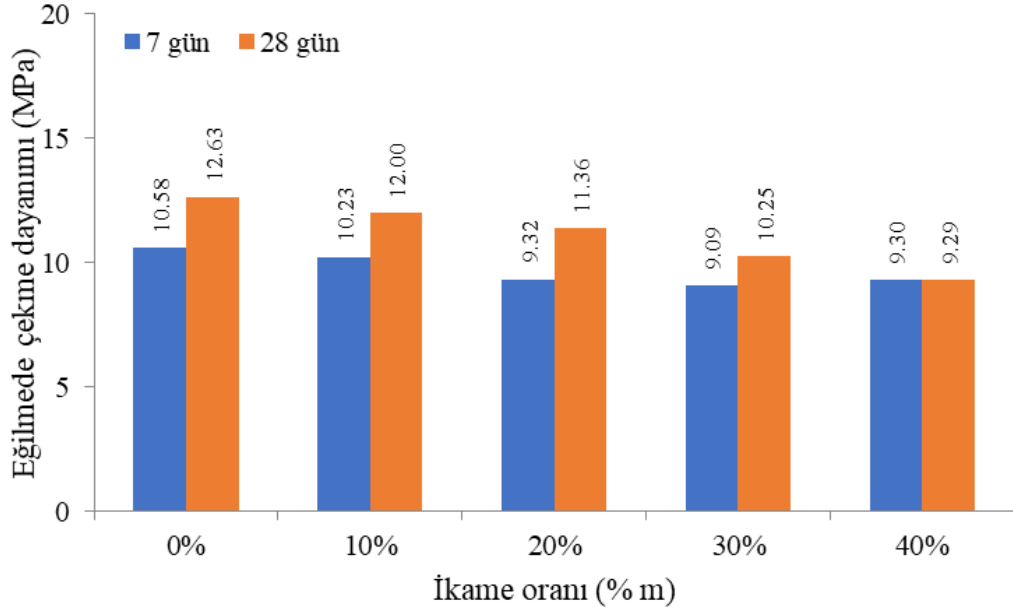
7 günlük; Dayanım aktivite indeksi = (26.04/34.81) x 100 = %74.8 ≈ %75 & > %70 olduğundan koşulu sağlıyor.

28 günlük; Dayanım aktivite indeksi = (33.31/41.98) x 100 = %79.3 > %75 & %70 olduğundan koşulu sağlıyor.

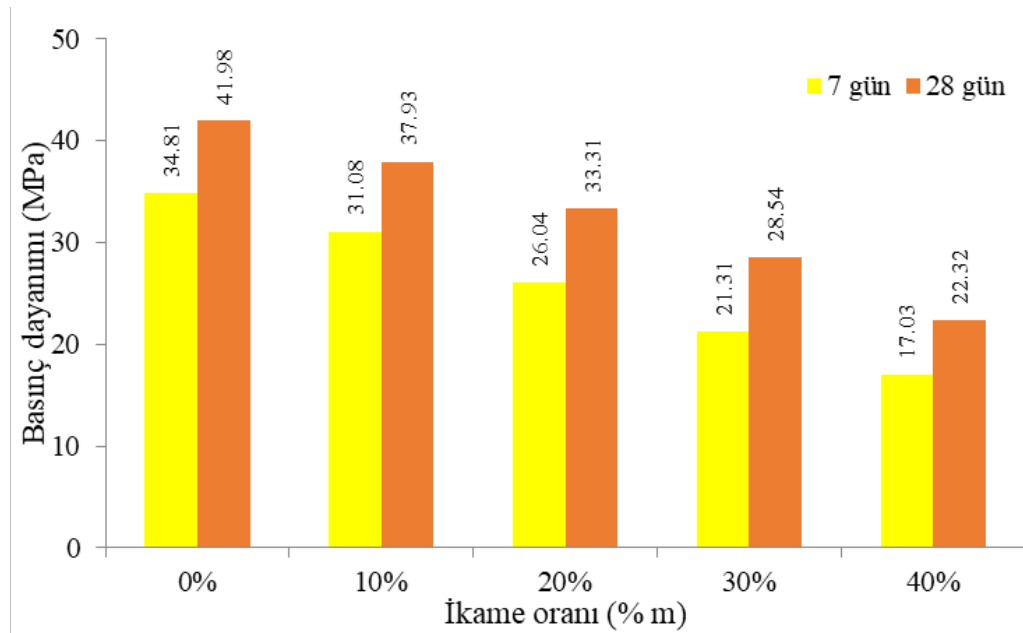
Su ihtiyacının yine aynı standarda belirtilen katkısız olarak dökülen numuneye göre en yüksek %115 olması koşulu;

Herhangi bir su ihtiyacı gözlenmemiştir.

Kayaç tozunun farklı oranlarda kullanılmasıyla dökülen prizmatik numunelere ait 7 ve 28 günlük eğilmede çekme ve basınç dayanım değerleri TS EN 196-1'e göre hesaplanarak sonuçlar elde edilmiştir (Şekil 38 ve Şekil 39).



Şekil 38. Kayaç tozunun farklı kütle oranlarındaki (%m; %0; %10; %20; %30 ve %40) 7 ve 28 günlük eğilmede çekme dayanımı bulguları



Şekil 39. Kayaç tozunun farklı kütle oranlarındaki (%m; %0; %10; %20; %30 ve %40) 7 ve 28 günlük basınç dayanımı bulguları

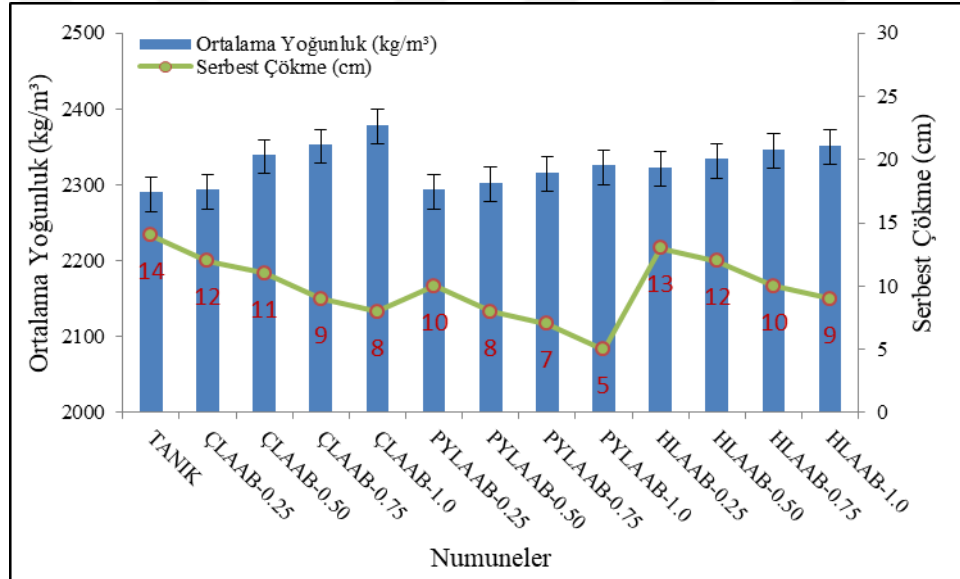
7 ve 28 günlük eğilmede çekme dayanımlarında tanık numunelerde eğilme sırasıyla 10.58 MPa ve 12.63 MPa iken KT ikame oranı arttıkça dayanım düşmüştür (Şekil 39). %40 ikameli numunelerde eğilmede çekme dayanımları sırasıyla 9.30 MPa ve 9.29 MPa olarak ölçülmüştür. Şekil 40'da verilen basınç dayanımlarına bakıldığında da beklendiği gibi çimento oranı dayanımı belirleyen ana etkidir. Kayaç tozu miktarı arttıkça dayanım düşmüştür.

5.3. Taze Beton Bulguları

Çelik ve polyester liflerin farklı oranlarda ve katışık kullanımının farklı lif oranlarında üretilen AAB numunelerinin lif türü grubu için iki farklı serbest çökme deneyi yapılmıştır. Bu, ortalama çökme değerlerini belirlemek için kullanılmıştır. Lif oranı arttıkça serbest çökme değerleri azalmaktadır. Bu nedenle, beton grupları arasında lif oranına bağlı olarak doğrusal bir serbest çökme ilişkisi vardır. Polyester (PY) lifli betonun birim ağırlığında önemli bir değişiklik olduğu söylenemez. Ancak, çelik lifli numunelerde birim kütle lif oranına bağlı olarak artmaktadır. Bu durumun çelik lifin yoğunluğunun yüksek olması ve beton numunelerinde birim hacimde daha çok miktarda yer almasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Çelik lifli numunelerde lif oranına bağlı olarak serbest çökme değerlerinde azalma görülmektedir. Ancak, bu azalma kayda değer bir ölçüde değildir. Çelik liflerin su tutma özelliğinin olmamasının bu durum üzerinde etkisi olduğu düşünülmektedir. PY betonlarda serbest çökme değerinin son derece düşük olmasının nedeni, PY liflerin kütlelerinin %0.4'ü kadar su tutma yeteneğidir. Üretilen beton grupları içerisinde işlenebilirliğin belirlenebilmesi için tanık (lifsiz) betonun çökme değeri 14 cm ve birim hacim kütlesi ise 2290.1 kg/m^3 olarak ölçülmüştür (Tablo 13). Farklı karışım oranına sahip diğer betonların serbest çökme ve birim kütle değerleri bu orana bağlı olarak değişiklik göstermektedir (Şekil 40). Daha önce yapılan çalışmalar, LAAB'nin serbest çökme yüksekliğinin kullanılan lif türüne ve oranına bağlı olarak değiştiğini göstermektedir (Ranjbar ve Zhang, 2020).

Tablo 13. Taze beton özellikleri

Beton türü	Lif oranı (%)	Birim hacim kütle (kg/m^3)	Serbest çökme yüksekliği (cm)
TANIK	0	2290.1	14
ÇLAAB	0.25	2293.5	12
ÇLAAB	0.50	2339.3	11
ÇLAAB	0.75	2353.2	9
ÇLAAB	1.00	2378.9	8
PYLAAB	0.25	2293.5	10
PYLAAB	0.50	2303.2	8
PYLAAB	0.75	2316.4	7
PYLAAB	1.00	2325.7	5
HLAAB	0.25	2323.5	13
HLAAB	0.50	2334.1	12
HLAAB	0.75	2347.2	10
HLAAB	1.00	2352.2	9



Şekil 40. Taze betonların yoğunluk ve serbest çökme (slump) bulguları

5.4. Sertleşmiş Beton Bulguları

5.4.1. Sertleşmiş Betonun Fiziksel Bulguları

Farklı lif oranlarında üretilen AAB numunelerin sertleşmiş beton birim kütleleri 100x200 mm standart silindir numuneleri kullanılarak belirlenmiş ve Tablo 14'te bir çizelge ile verilmiştir. Sertleşmiş beton numunelerinin birim kütlelerinin 2300.9–2383.7 kg/m^3 arasında olduğu tespit edilmiştir.

Tablo 14. Sertleşmiş beton birim kütleleri

NUMUNE	Numunenin çapı (mm)	Numunenin boyu (mm)	Numunenin kütlesi (gr)	Numune hacmi (cm ³)	Sertleşmiş Beton Birim kütlesi (kg/m ³)
TANIK	99.4	193.2	3449.3	1497.0	2304.1
ÇLAAB-0.25	99.3	200.7	3621.2	1554.8	2329.4
ÇLAAB-0.50	99.2	201.4	3650.3	1556.7	2345.3
ÇLAAB-0.75	99.3	200.4	3666.9	1550.8	2364.5
ÇLAAB-1.0	99.2	200.3	3673.2	1546.3	2375.5
PYLAAB-0.25	99.4	202.3	3613.2	1570.3	2300.9
PYLAAB-0.50	99.4	202.1	3614.8	1568.5	2304.7
PYLAAB-0.75	99.4	201.6	3618.5	1563.1	2315.0
PYLAAB-1.0	99.3	200.8	3626.6	1553.0	2335.3
HLAAB-0.25	99.1	199.1	3621.2	1534.9	2359.2
HLAAB-0.50	99.1	199.9	3643.6	1541.1	2364.3
HLAAB-0.75	99.2	199.3	3647.3	1539.6	2369.2
HLAAB-1.0	99.1	200.7	3688.2	1547.3	2383.7

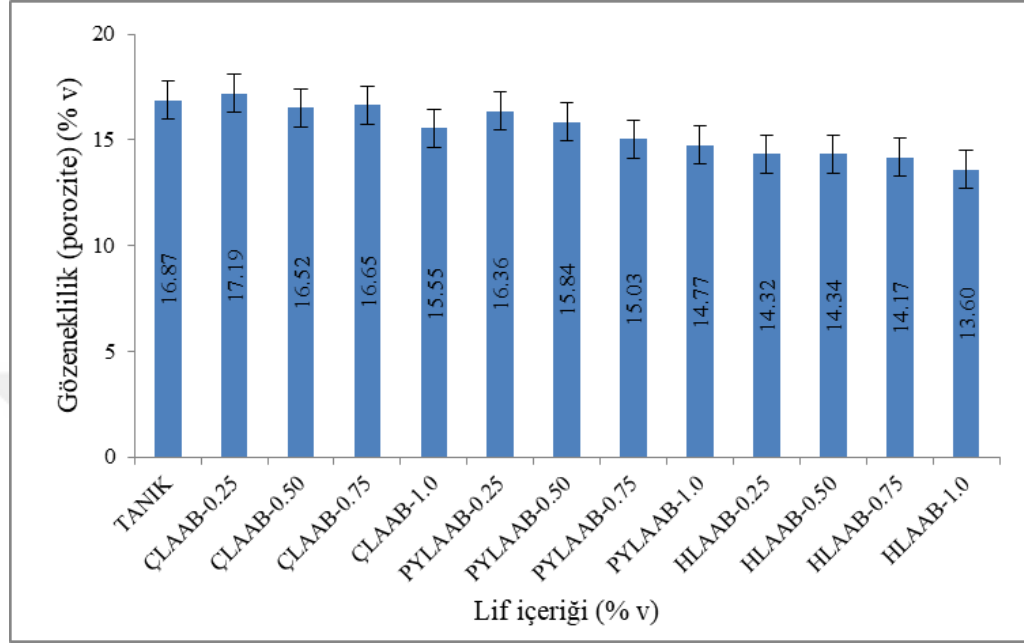
Bir çizelgede verilecek olursa, beton numunelerinin doygun ve kuru birim kütleleri, su emmesi ve gözeneklilik (porozite) değerleri şu şekilde verilebilir (Tablo 15). Hem polyester hem de çelik lifli numunelerde lif oranı arttıkça doygun ve kuru birim kütleleri artmakta, ancak su emme ve gözeneklilik değerleri azalmaktadır. Lif oranının artması nedeniyle betonun beklenenden daha az boşluklu bir yapıya sahip olduğu düşünülmektedir. Gözeneklilik veya porozite değerleri incelendiğinde, bu oranların su emme miktarları ile doğru orantılı olduğu da görülmektedir.

Tablo 15. Sertleşmiş betonun fiziksel özellikleri

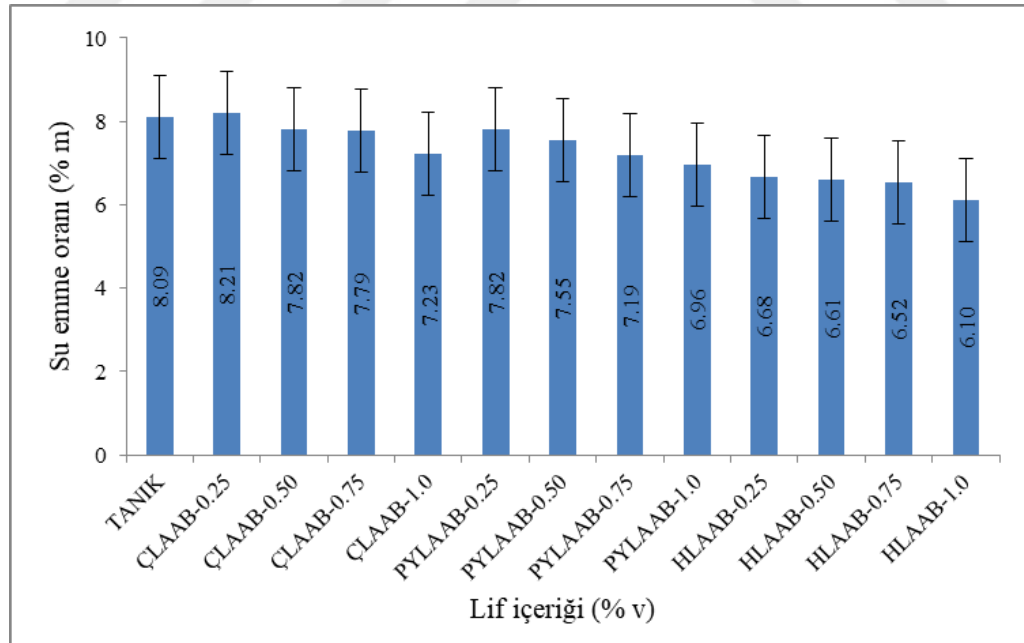
NUMUNE	Doygun birim hacim kütlesi (kg/m ³)	Kuru birim hacim kütlesi (kg/m ³)	Su emme oranı (%m)	Gözeneklilik (%v)
TANIK	2252.67	2084.00	8.09	16.87
ÇLAAB-0.25	2266.23	2094.38	8.21	17.19
ÇLAAB-0.50	2278.44	2113.28	7.82	16.52
ÇLAAB-0.75	2304.51	2138.03	7.79	16.65
ÇLAAB-1.0	2305.42	2149.90	7.23	15.55
PYLAAB-0.25	2255.63	2092.06	7.82	16.36
PYLAAB-0.50	2257.68	2099.29	7.55	15.84
PYLAAB-0.75	2240.17	2089.83	7.19	15.03
PYLAAB-1.0	2269.33	2121.65	6.96	14.77
HLAAB-0.25	2288.18	2144.94	6.68	14.32
HLAAB-0.50	2311.26	2167.90	6.61	14.34
HLAAB-0.75	2313.76	2172.04	6.52	14.17
HLAAB-1.0	2364.81	2228.81	6.10	13.60

AAB ve LAAB üretiminde kullanılan farklı türde puzolanik malzemeler, alkali aktivatörler ve akışkanlaştırıcı katkı maddeleri, betonun dayanıklılık özelliklerini etkilemektedir. Su emme ve gözeneklilik (porozite), birbiriyle ilişkili olduğundan

betonun dayanıklılığı ile doğrudan ilişkilidir. Lifsiz olarak üretilen tanık betonun su emme oranı ve gözeneklilik (porozite) değerleri sırasıyla %8.09 ve %16.87 olarak elde edilmiştir. Lif miktarı arttıkça su emme ve gözeneklilik değerleri, her bir lif türü ve katışık (hibrit) grubu içerisinde azalmaktadır (Şekil 41 ve 42).



Şekil 41. Tanık ve lifli betonların gözeneklilik (porozite) bulguları

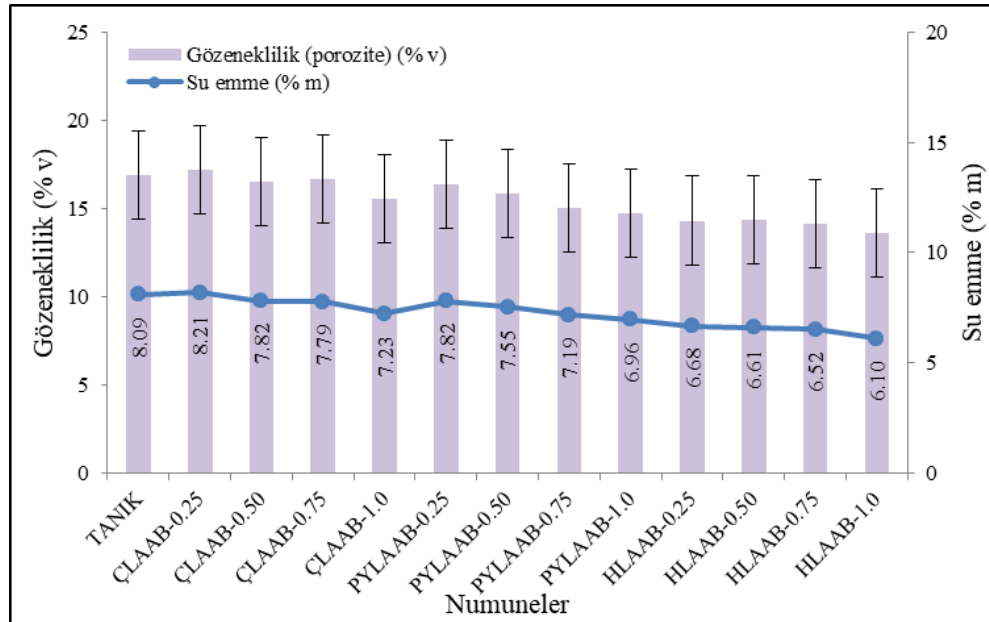


Şekil 42. Tanık ve lifli betonların su emme bulguları

Lifsiz tanık ve LAAB üretiminde kullandığımız volkanik kayaç tozunun ve öğütülmüş yüksek fırın cürufunun pozolonik özelliği vardır. Pozolanik malzemelerin kullanımı betonun dayanıklılığı üzerinde belirleyici bir rol oynar. Pozolanik

malzemeler, betonun su emme ve gözeneklilik gibi önemli özelliklerini etkiler. Literatürde yapılan araştırmalar, puzolanik malzemelerin betonun su emme oranını azalttığını ve gözenekliliği azaltarak betonun dayanıklılığını artırdığını göstermektedir (Caneda-Martínez vd., 2022; Nazanin vd., 2020). Beton karışımına eklenen alkali aktivatörler de betonun dayanıklılık özelliklerini etkilemektedir. Alkali aktivatörler, geopolimerizasyon reaksiyonlarını hızlandırarak betonun erken dayanıklılığını artırabilir. Ayrıca, belirli alkali aktivatörler betonun su emme oranını azaltabilir ve gözenekliliği kontrol altında tutabilir, bu da betonun dayanıklılığını artırır (Wanli vd., 2023).

Literatür araştırmaları lifli alkali aktivasyonlu betonun dayanıklılığı üzerinde lif miktarı ve lif çeşidinin önemli bir etkisi olduğunu göstermektedir (Rashad, 2020; Almeida vd., 2018; Ranjbar ve Zhang, 2020). Lif miktarı arttıkça, betonun su emme ve gözeneklilik değerlerinde azalma gözlemlenmektedir. Bu durum, liflerin betonun iç yapısını güçlendirdiğini ve çatlak oluşumunu azalttığına işaret etmektedir. Bu nedenle, LAAB üretiminde lif türü ve miktarının dikkatlice belirlenmesi, betonun dayanıklılığı açısından önemlidir. Lifsiz olarak üretilen tanık (kontrol) betonun su emme oranı ve gözeneklilik (porozite) değerleri sırasıyla %8.09 ve %16.87 olarak elde edilmiştir. Lif miktarı arttıkça su emme ve gözeneklilik değerleri, her bir lif türü ve katışık (hibrit) grubu içerisinde azalmaktadır (Şekil 43).



Şekil 43. Tanık ve lifli betonların gözeneklilik (porozite) ve su emme bulguları arasındaki ilişki

Lif miktarının artmasıyla su emme oranı ve gözeneklilik değerlerinin azalması, liflerin betonun içyapısını güçlendirmesi ve çatlak oluşumunu engellemesiyle ilişkilidir. Lifler beton içinde dağıldıklarında, beton matrisi içindeki boşlukları doldurarak suyun boşluklara nüfuz etme kapasitesini azaltır, böylece numunelerin gözenekliliğini azaltır (Hao ve Jun, 2023; Md Jihad vd., 2023; Junzhi vd., 2024). Bu nedenle, lif miktarının artmasıyla betonun su emme oranı ve gözeneklilik değerleri azalır. Ayrıca, lifler betonun çekme dayanımını artırır ve çatlak oluşumunu önler. Buda betonun dayanıklılığını artırır ve suyun beton içine nüfuz etme kapasitesini azaltır. Dolayısıyla, lif içeriğinin belirli bir miktara kadar artırılmasıyla betonun dayanıklılığı artar ve dolayısıyla su emme ve gözeneklilik değerleri azalır. Lif türü ve katışım grubunun da etkisi vardır. Farklı lif türleri ve katışım grupları, betonun içyapısını farklı şekillerde etkileyebilir. Ancak genel olarak, liflerin betonun dayanıklılığına olumlu katkı sağladığı ve betonun su emme ile gözenekliliğini azalttığı gözlemlenmiştir.

5.4.2. Ultrases Geçiş Hızı, Schmidt Çekici ve Basınç Dayanımı Deney Bulguları

Çalışmada kullanılan lif türünün ve lif oranlarının betonun boşluk oranına ve dolayısıyla yoğunluğuna etkisini incelemek için kullanılan ultrases geçiş süresi deneyinden elde edilen kilometre/saniye değerleri Tablo 16'da gösterilmektedir. Lif türüne bağlı olarak ultrases değerleri tüm kür sürelerinde tanık betona göre anlamlı olarak değişiklik göstermektedir. Çelik liflerde lif oranının %0.5'e kadar olan numunelerde doğrusal olarak arttığı, polyester lifli numunelerde ise lif oranı arttıkça tanık betona göre arttığı görülmüştür. Tablo 16 incelendiğinde, çelik lifli numunelerde lif oranının belirli bir seviyeden (%0.5) sonra beton içerisinde boşluk miktarı arttığından ses dalgalarının geçiş hızında bir azalma olduğu kolayca anlaşılabılır. Polyester lif içeren betonlarda ses geçiş hızı tanık numunelerine göre daha yüksektir. Bu nedenle betonun boşluk oranının azaldığı ve yoğunluğunun hafifçe arttığı söylenebilir. Polyester lifinin elyafımsı yapısı nedeniyle beton bileşenleri arasındaki mikro boşluklarda daha iyi tutunduğu düşünülmektedir. Bu durum, betonun boşluk oranını azaltmaktadır. Küp numuneler, ultrases geçiş süresi testi için kullanılmıştır. Numunenin karşılıklı her yüzeyinden beş farklı okuma yapıp kaydedilmiştir. Bu okumaların ortalamasını elde ederek boşluk oranı hakkında bir fikir edinmeye çalışılmıştır. Ayrıca, Tablo 17'ye göre betonların özellikle 28 günlük ultrases değerlerine bakıldığında mükemmel derecede beton özelliği gösterdiği görülmektedir.

Tablo 16. Sertleşmiş betonun tahribatsız test sonuçları

Numuneler	Lif oranı (% v)	Ultras ses hızı (km/s)			Geri sıçrama değeri		
		3	7	28	3	7	28
TANIK	0	2.66	3.78	4.53	30.6	30.7	38.5
ÇLAAB	0.25	2.46	3.59	4.54	29.8	30.2	38.9
ÇLAAB	0.50	2.89	3.78	4.66	28.9	30.6	39.9
ÇLAAB	0.75	2.26	2.86	4.47	29.2	31.2	37.8
ÇLAAB	1.00	2.28	2.94	4.46	27.9	31.5	37.1
PYLAAB	0.25	2.66	3.45	4.69	29.1	32.2	39.4
PYLAAB	0.50	3.06	4.00	4.73	28.6	30.5	42.9
PYLAAB	0.75	3.07	4.08	4.77	29.4	32.8	44.7
PYLAAB	1.00	3.24	4.00	4.75	31.2	31.6	43.2
HLAAB	0.25	2.92	3.81	4.64	28.6	31.0	40.5
HLAAB	0.50	3.31	4.20	4.80	28.8	31.7	41.2
HLAAB	0.75	3.42	4.24	4.77	29.9	33.2	41.7
HLAAB	1.00	3.11	4.16	4.64	30.5	32.3	40.9

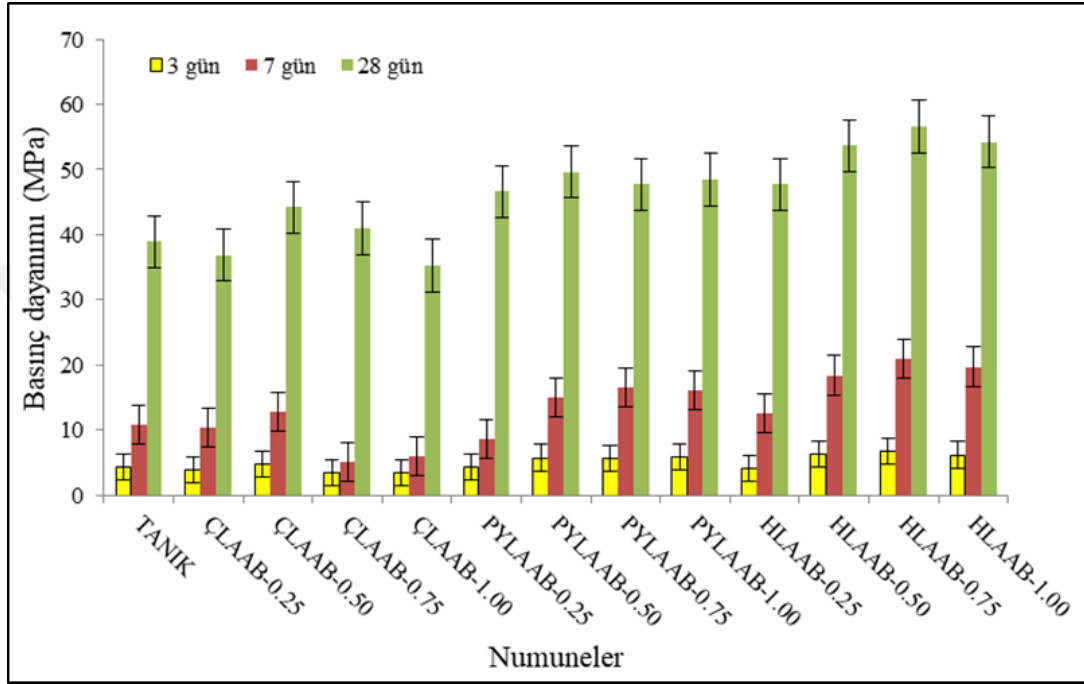
Tablo 17. Beton niteliği ses hızı ilişkisi (Şimşek, 2020).

Ses hızı (V) km/s	>4.5	3.5-4.5	3.0-3.5	2.0-3.0	<2.0
Beton niteliği	Mükemmel	İyi	Şüpheli	Zayıf	Çok zayıf

Schmidt çekici bu çalışmada sadece küp numuneler üzerine kullanılmıştır. Numunenin döküm yönü olmayan herhangi bir yüzeyine on iki kez uygulandıktan sonra, elde edilen değerlerin ortalaması schmidt çekici sonucu olarak kabul edilmiştir. Daha sonra kaydedilen bu değerler kendi lif grupları içerisinde incelenmiştir. Ardından, her birinin aritmetik ortalaması alınarak grubun yüzey sertliği belirlenmiştir. Elde edilen değerlerle yaklaşık basınç dayanımları bulunmuştur (Tablo 16). Her ne kadar erken yaş değerleri üç ile yedi gün arasında değişse de, yirmi sekiz günlük numunelerden alınan geri sıçrama sayısı değerleri kullanılarak bulunan beton basınç dayanımları ile gerçek beton basınç dayanımı değerleri arasında bir tutarlılık olduğu söylenebilir. Tablonun yorumlanması, çelik lifinin dayanıma katkısının az olduğunu göstermektedir. Ancak, betonun yüzey tabakasını birbirine daha iyi kenetleyerek daha dayanıklı hale getirir.

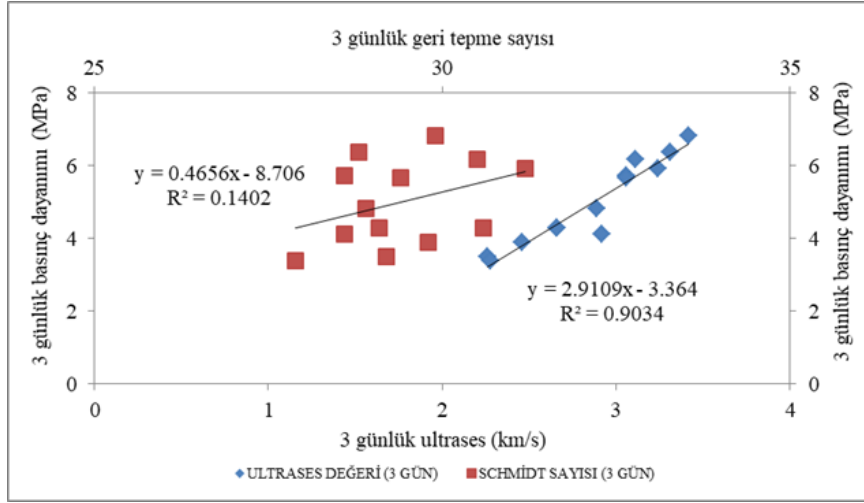
Makro sentetik ve çelik lifli betonlar ile tanık (kontrol) betonların 3; 7 ve 28 günlük basınç dayanımlarına (Şekil 44) bakıldığında, özellikle 28 günlük basınç dayanımı sonuçlarında, çelik lifin %0.5 oranında kullanımına kadar tanık betona göre %13.7 oranında iyileşme olduğu, buna karşın %1 lif kullanımında ise %9.4 oranında azalma olduğu görülmektedir. Polyester lifin %0.5 kullanımında ise dayanımda %27.7 oranında bir artış söz konusudur. Ancak, polyester lif oranının %0.75'i aşan örneklerde dayanım artışının düştüğü belirlenmiştir. Ayrıca, her iki lif türünün de 3 ve 7 günlük beton numunelerin basınç dayanımları üzerinde çok fazla etkisinin olmadığı da görülmüştür. Buna rağmen özellikle %0.75 katışık lif oranı kullanıldığında, 3 günlük

numunelerde %58.9; 7 günlüklerde %93.9 ve 28 günlük olanlarda ise %45.6 gibi oldukça yüksek oranlarda anlamlı artışlar görülmektedir. Lifli beton çalışmalarında basınç dayanımı lif oranına bağlı olarak sistematik bir azalma ya da artma göstermemektedir. Öte yandan bu konuda yapılan çalışmaların bir kısmında lif cinsi, boyutu ve katılım oranına bağlı olarak artmakta, bazılarında ise azalmaktadır (Şimşek, 2020; Şimşek, 2021; Tokyay vd., 1991).

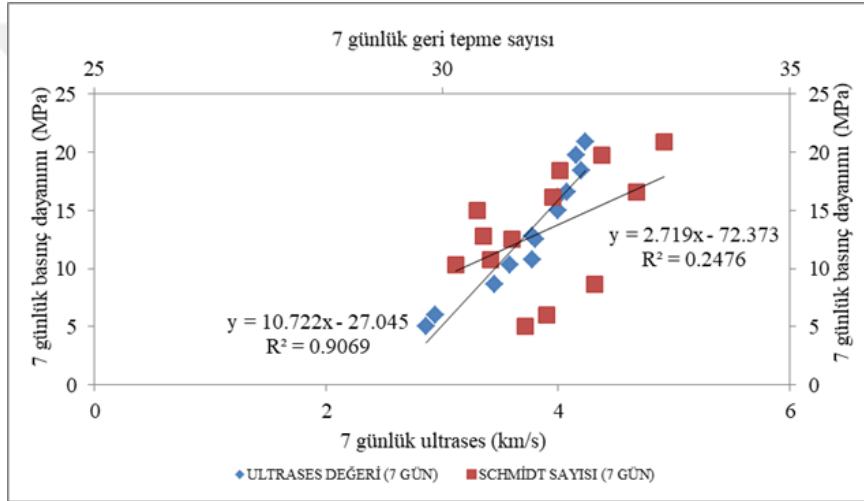


Şekil 44. Kür süresine bağlı olarak farklı lif oranlarında ve katışık lif formlarında üretilen beton numunelerin basınç dayanımları

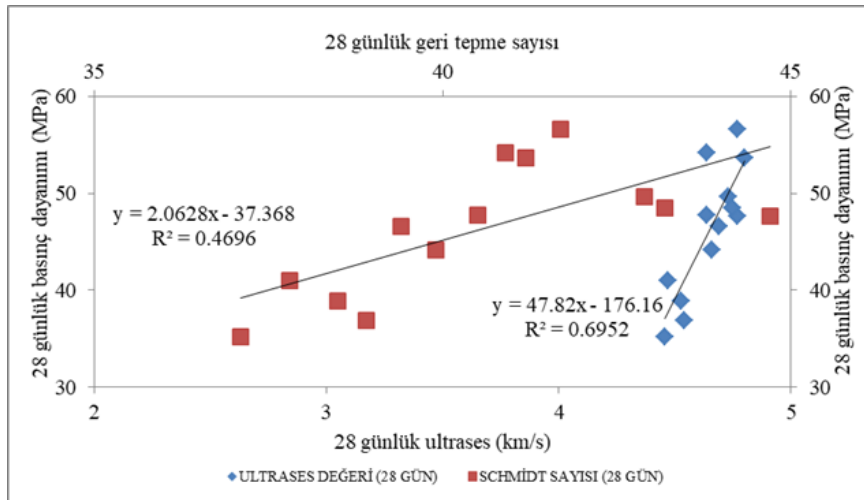
AAB ve LAAB numunelerinin 3; 7 ve 28 günlük kür sürelerine bağlı olarak basınç dayanımı-ultrases hızı ve basınç dayanımı-schmidt çekici ilişkisi Şekil 45; 46 ve 47’de verilmektedir. Basınç dayanımı ile ultrases arasında yüksek korelasyon varken basınç dayanımı ile schmidt değerleri arasında düşük korelasyon olması, numunelerin erken yaşlarda yüzey sertliğinin düşük olmasından kaynaklanmaktadır.



Şekil 45. Numunelerin 3 günlük kür süresine bağlı basınç dayanımı ile ultrases ve schmidt değerleri arasındaki anlamlılık seviyesi



Şekil 46. Numunelerin 7 günlük kür süresine bağlı basınç dayanımı ile ultrases ve schmidt değerleri arasındaki anlamlılık seviyesi



Şekil 47. Numunelerin 28 günlük kür süresine bağlı basınç dayanımı ile ultrases ve schmidt değerleri arasındaki anlamlılık seviyesi

Öncelikle, puzolanik malzemelerin kullanımı betonun dayanıklılığı üzerinde belirleyici bir rol oynar. Puzolanik malzemeler, betonun su emme ve gözeneklilik gibi önemli özelliklerini etkiler. Beton karışımına eklenen alkali aktivatörler de betonun dayanıklılık özelliklerini etkiler. Alkali aktivatörler, geopolimerizasyon reaksiyonlarını hızlandırarak betonun erken dayanıklılığını artırabilir. Ayrıca, belirli alkali aktivatörler betonun su emme oranını azaltabilir ve gözenekliliği kontrol altında tutabilir, bu da betonun dayanıklılığını artırır.

Akışkanlaştırıcı katkı maddeleri de betonun dayanıklılığı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Akışkanlaştırıcılar, beton karışımının işlenebilirliğini artırırken, aynı zamanda su/çimento oranını düşürerek betonun su emme oranını ve gözenekliliğini azaltabilir. Bu da betonun dayanıklılığını artırabilir. Yapılan literatür çalışmalarında da; Farhan vd. (2018) farklı tipte çelik lifleri bir arada kullanarak katışık (hibrit) çelik lif kullanımının pek çok olumlu katkısı olduğunu, kırılma durumunda daha fazla süneklik ve deformasyon sağladığını belirtmişlerdir. Aynı şekilde Vijai vd. (2014) yaptıkları çalışmada polipropilen lifli AAB'lerin dayanımı artırdığı, çatlak gelişimini de sınırlandığı sonucuna varmışlardır. Sonal Thakkar vd. (2014) yaptıkları çalışmada ise bağlayıcı olarak uçucu kül ve öğütülmüş yüksek fırın cürufu kullanmışlardır. AAB'nin, dayanım özelliğinin arttığı, bununla birlikte istenilen dayanım özelliklerine ulaşabilmesi için daha uzun süre hava kürüne ihtiyaç duyulabileceği sonucunu elde etmişlerdir.

5.4.3. Elastisite Modülü ve Poisson Oranı Belirleme Deneyi Bulguları

Lif ilavesi ve katışık kullanımının AAB'nin mekanik özelliklerindeki değişimini değerlendirmek için basınç dayanımı ile birlikte elastisite modülü (gerilme-şekil değiştirme) ve Poisson oranı değerleri de ölçülmüştür. Bu testlerin sonuçları Tablo 18'de sunulmuştur.

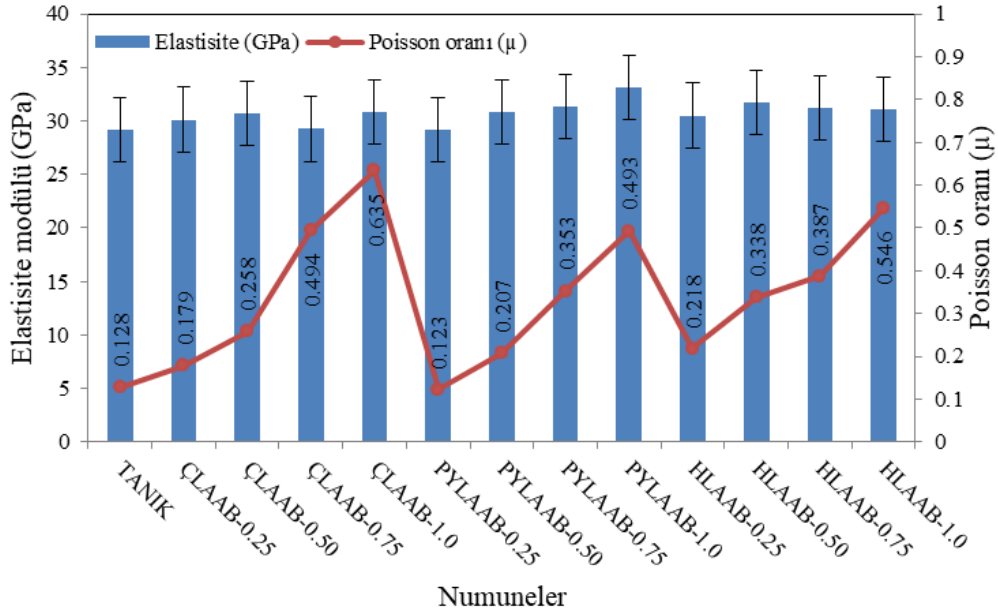
Tablo incelendiğinde lifli numunelerin genelinde tanık numunesine kıyasla dayanım artışı görülmüştür. Özellikle 28 günlük numunelerde çelik lifin %0.5 oranında kullanımına kadar tanık betona göre %13.7 oranında iyileşme olduğu, buna karşın %1 lif kullanımında ise %9.4 oranında azalma olduğu görülmektedir. Polyester lifin %0.5 kullanımında ise dayanımda %27.7 oranında bir artış söz konusudur. Ancak, polyester lif oranının %0.75'i aşan örneklerde dayanım artışının anlamlı derecede değişmediği belirlenmiştir. Bunun yanı sıra özellikle %0.75 katışık lif oranı kullanıldığında, 3 günlük numunelerde %58.9; 7 günlüklerde %93.9 ve 28 günlük olanlarda ise %45.6 gibi oldukça yüksek oranlarda anlamlı artışlar görülmektedir.

Tablo 18. Tanık ve lifli numunelerin Basınç dayanımı, Elastisite modülü ve poisson oranları

Numuneler	Basınç Dayanımı (MPa)			Elastisite modülü (GPa)	Poisson oranı
	3 gün	7 gün	28 gün	28 gün	28 gün
TANIK	4.29	10.77	38.87	29.20	0.128
ÇLAAB-0.25	3.9	10.31	36.88	30.12	0.179
ÇLAAB-0.50	4.82	12.78	44.18	30.70	0.258
ÇLAAB-0.75	3.49	5.04	40.98	29.23	0.494
ÇLAAB-1.00	3.37	5.96	35.22	30.76	0.635
PYLAAB-0.25	4.29	8.62	46.60	29.13	0.123
PYLAAB-0.50	5.73	14.97	49.64	30.82	0.207
PYLAAB-0.75	5.65	16.56	47.70	31.35	0.353
PYLAAB-1.00	5.92	16.09	48.45	33.12	0.493
HLAAB-0.25	4.11	12.53	47.73	30.50	0.218
HLAAB-0.50	6.37	18.38	53.63	31.74	0.338
HLAAB-0.75	6.82	20.88	56.58	31.27	0.387
HLAAB-1.00	6.17	19.71	54.22	31.06	0.546

Şekil 48’de verilen grafik incelendiğinde lif türü ve katışık lif kullanımının betonların elastisite değerlerine ve poisson oranlarına etkisi farklı olmuştur. Çelik lifli olanlarda, lif oranına bağlı olarak E değeri tanık betona göre %0.1 ile %3.15 arasında artış göstermektedir. Bu sonucun, çelik lif oranının özellikle %0.75’ten fazla kullanımında çeliğin yüksek çekme özelliği sayesinde betonun rijitliğinin azaltmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Polyester lifli olan örneklerde, lif oranı %0.25 olan numunede E değeri %0.24 azalış gösterirken, %1 lif oranı etkisinin, E değerini %13.4 oranında artırdığı görülmüştür. Katışık lifli olan numunelerde ise lif oranının E değerine anlamlı bir katkısı gözlenmezken bu oranın, E değerini ortalama %8.7 arttırarak liflerin katışık şekilde kullanımlarının numunelere tanık numuneye göre daha rijit bir özellik kazandırdığı görülmüştür. Elastik modül, bir malzemenin elastik davranışını tanımlayan bir ölçümdür ve bir gerilme uygulandığında malzemenin ne kadar deforme olduğunu ifade etmektedir. Çelik lifli betonlarda, lif oranı arttıkça elastik modülde bir artış gözlemlenmektedir. Bu, çelik liflerin beton matrisine eklenmesiyle birlikte, liflerin gerilme altında daha fazla direnç sağlaması ve bu da betonun elastik modülünün artmasına yol açmaktadır (Shuai vd., 2023; Xiaohua vd., 2024). Öte yandan, polyester lifli betonlarda, %0.25 lif oranına sahip numunede elastisite modülünde hafif bir azalma görülmektedir. Bu azalmanın sebebi, polyester liflerin çelik liflere kıyasla daha az dayanıklı olmaları ve beton matrisindeki bağlarla daha az etkileşime girmeleri olabilir (Nghia vd., 2022). Ancak, %1 lif oranına sahip numunede elastisite modülünde belirgin bir artış gözlemlenmiştir. Bu durum, polyester liflerin yüksek oranlarda eklenmesinin, beton matrisine daha fazla dayanım ve direnç kazandırmasıyla açıklanabilir. Sonuç

olarak, çelik liflerin betonun elastisite modülünü artırdığı ancak polyester liflerin düşük oranlarda kullanıldığında azalışa neden olabileceği görülmektedir. Bununla birlikte, polyester liflerin yüksek oranlarda kullanılması durumunda, elastisite modülünde belirgin bir artış sağlayabileceği gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar, lif türü ve oranının betonun mekanik özelliklerini önemli ölçüde etkilediğini göstermektedir.

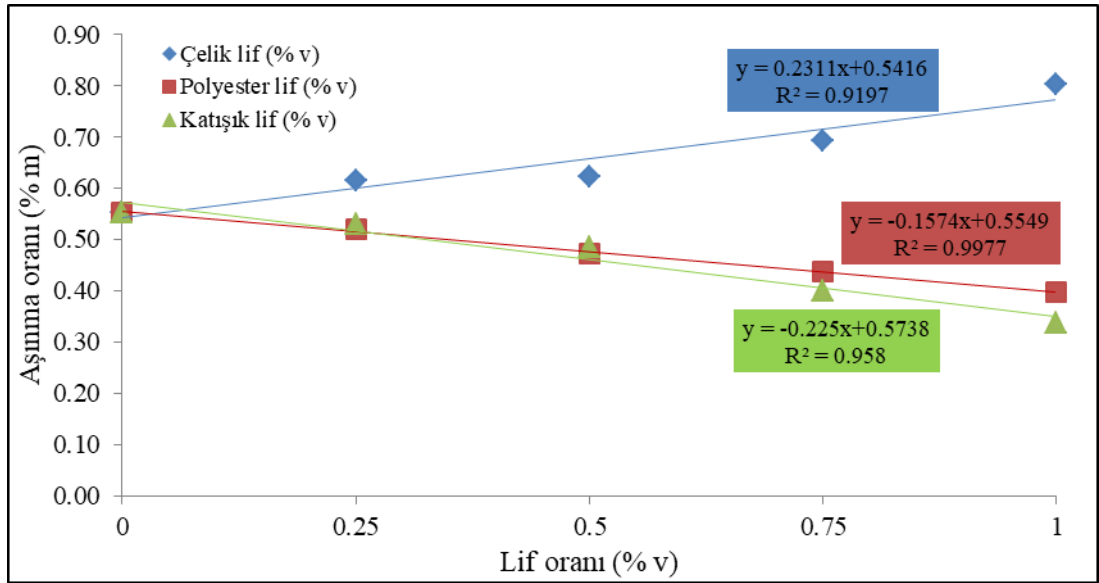


Şekil 48. Lif oranlarına, türüne ve kullanım şekline göre elastisite modülü ve Poisson oranlarının değişimi

Poisson oranları incelendiğinde ise çelik ve polyester liflerin kendi içerisinde lif oranı arttıkça Poisson değerleri artmaktadır. Çelik lifin %0.5 oranında kullanımı ile tanık betona göre Poisson değeri %101.6 artış göstermiştir. Polyester lif oranının %0.5 olduğu numunelerde %61.7'lik artış elde edilmiştir. Bu değerlerin elde edilmesinde çelik lifin yüksek çekme dayanımına sahip olmasının etkisi görülmektedir. Liflerin katışık kullanımları da benzer şekilde Poisson oranlarını arttırmaktadır (Şekil 48).

5.4.4. Aşınma Dayanımı Oranı Belirleme Deneyi Bulguları

Çelik lifli numunelerde lif oranı arttıkça aşınma miktarı artmıştır (Şekil 49). %1 çelik lifli numunenin aşınma oranı tanık betona göre %50 daha fazla olup numuneler arasında en yüksek seviyededir. Polyester lifli numunelerde ise aşınma oranı lif miktarı arttıkça azalmaktadır. %1 Polyester lifli olan numunenin aşınma oranı tanık betona göre %22.8 ile en düşük düzeydedir. Katışık lifli olan numunelerde de polyester lifli numunelerde olduğu gibi lif oranları arttıkça aşınma oranlarının azaldığı görülmüştür.



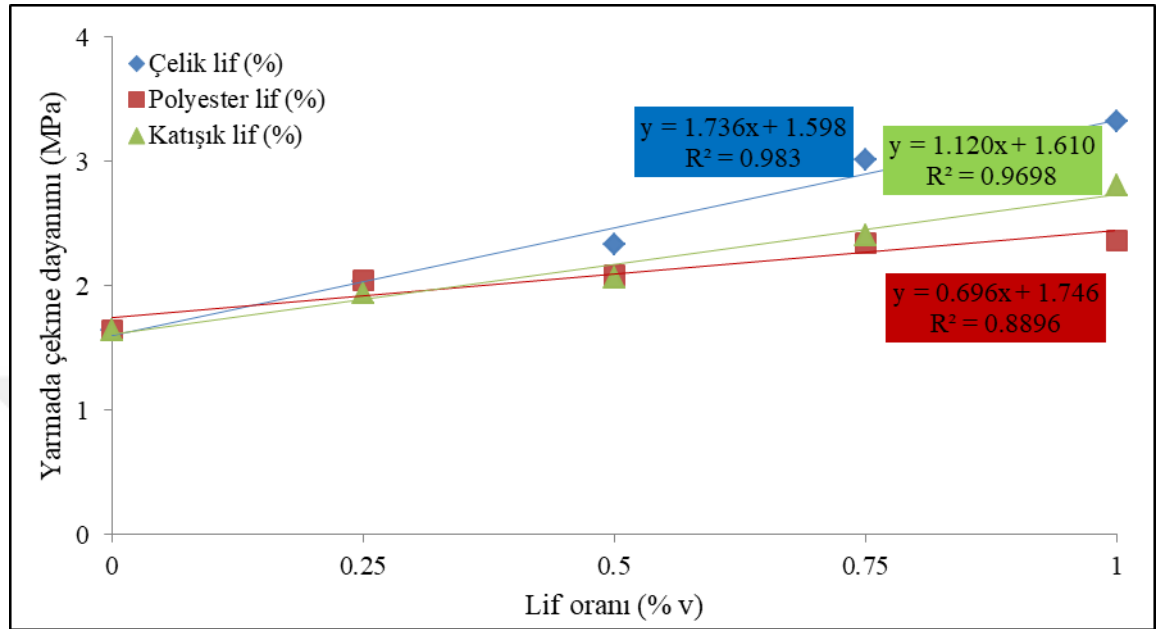
Şekil 49. LAAB numunelerinin lif türüne, oranına ve kullanım şekline bağlı olarak tanık numuneye göre aşınma kaybı ilişkisi

Çelik lifli numunelerde, %1 lif oranına sahip olanların aşınma oranının diğer numunelere göre daha yüksek olduğu görülmüştür. Bu durum, çelik liflerin beton yüzeyinde daha sert ve sertleşmiş bir matris oluşturarak aşınma direncini artırmasıyla açıklanabilir. Ancak, %1 polyester lifli numunelerde aşınma oranının daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum, polyester liflerin esnekliği ve beton yüzeyinde daha yumuşak bir etki oluşturmasıyla ilişkilendirilebilir. Katışık lifli numunelerde, polyester liflerin etkisi belirgindir. Lif oranları arttıkça aşınma oranlarının azaldığı görülmüştür. Bu sonuç, polyester liflerin beton yüzeyinde daha bağdaşık bir dağılım sağlayarak aşınma direncini artırmasıyla ilişkilendirilebilir. Katışık lifli betonlarda, çelik liflerin etkisi de hissedilmiştir, ancak polyester liflerin esnek ve bağdaşık yapısı, aşınma direncini artırmada daha etkili olmuştur. Sonuç olarak, çelik liflerin aşınma direncini artırdığı ancak aşınma oranının yüksek lif oranlarında arttığı, polyester liflerin ise daha düşük aşınma oranlarına ve daha iyi aşınma direncine sahip olduğu gözlemlenmiştir. Katışık lifli betonlarda ise, polyester liflerin betonun aşınma direncini artırmada daha etkili olduğu ve lif oranları arttıkça aşınma oranlarının azaldığı belirlenmiştir.

5.4.5. Yarmada Çekme Dayanımı Belirleme Deneyi Bulguları

Tüm karışım türlerinde yarmada çekme dayanımı tanık numuneye göre lif oranına bağlı olarak artış göstermiştir (Şekil 50). Yarma çekme dayanımı, çelik lifli numuneler için 2.03 ile 3.32 MPa arasında, polyester lifli numuneler için 2.04 ile 2.36 MPa arasında, katışık lifli numunelerde ise 1.94 ile 2.81 arasında değişmektedir. Genel olarak her bir lif türü içerisinde lif oranı arttıkça dayanımda artış görülmüştür. Çelik lifli

numunelerde %102.4'e, polyester lifli numunelerde %43.9'a ve katışık liflilerde ise %71.3'e varan oranlarda bir yarmada dayanımı artışı gözlemlenmektedir. Benzer çalışmalarda da lif oranına bağlı olarak yarmada çekme dayanımında artış görülmüştür (Bashar vd., 2016).

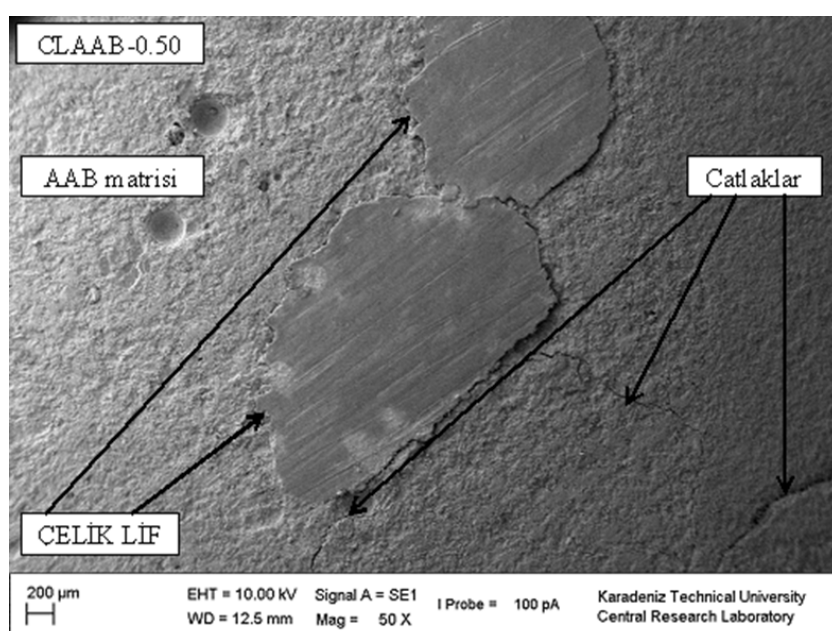
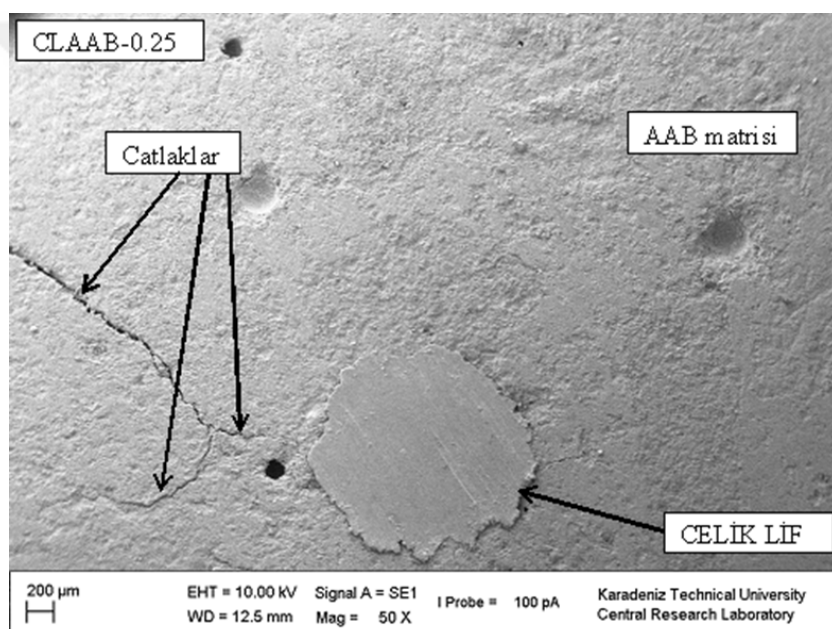
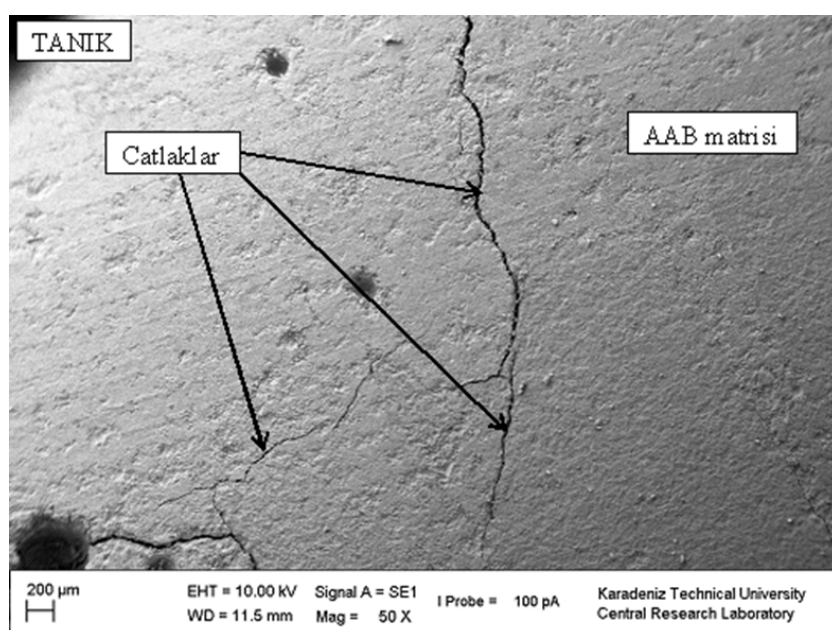


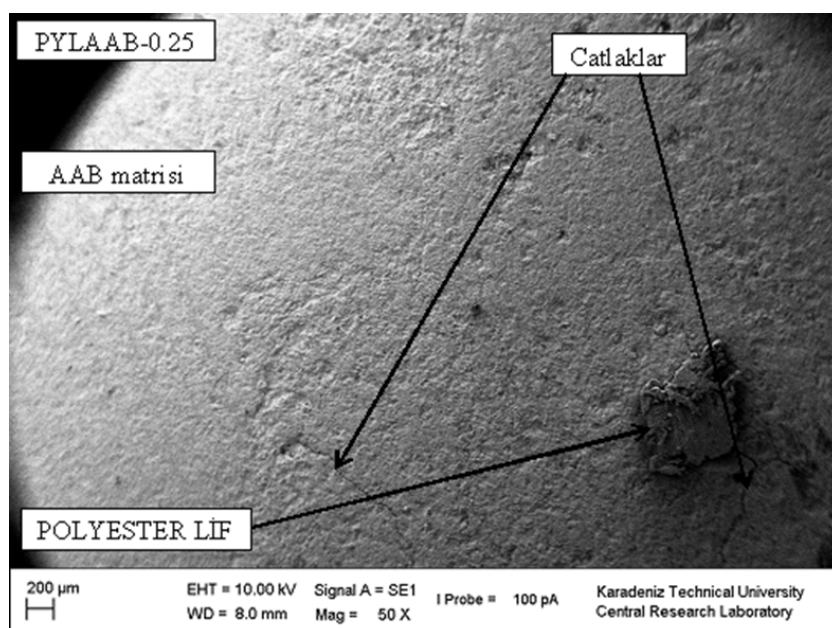
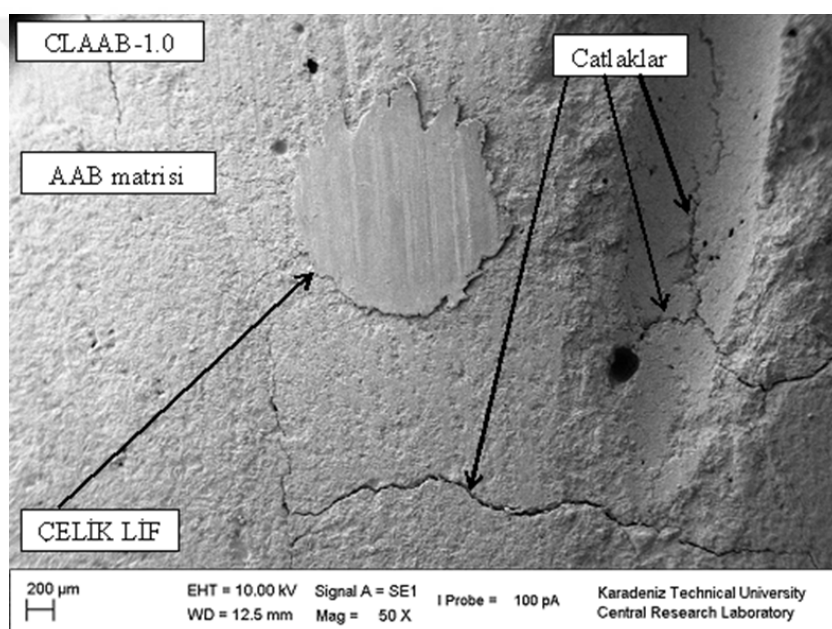
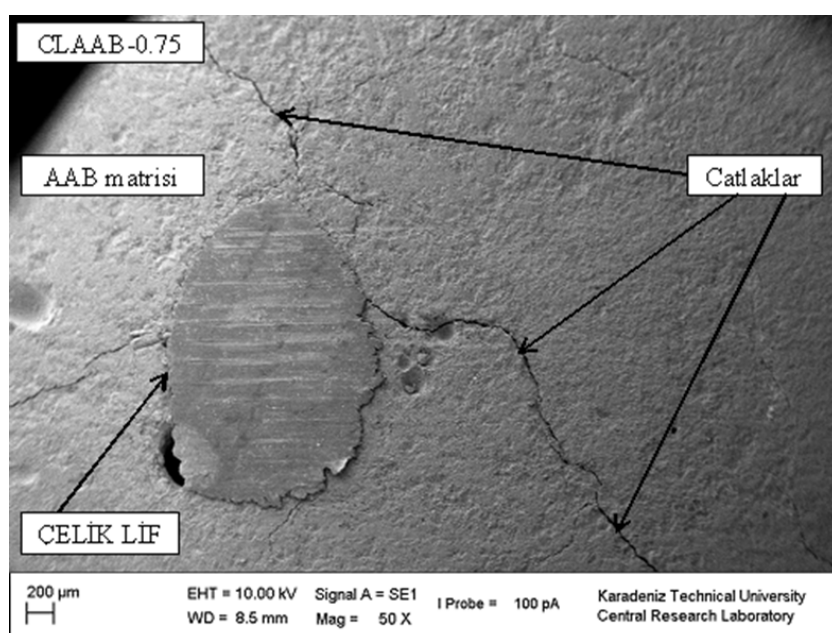
Şekil 50. Lif oranlarına, türüne ve kullanım şekline göre yarmada çekme dayanımının tank betona göre değişimi

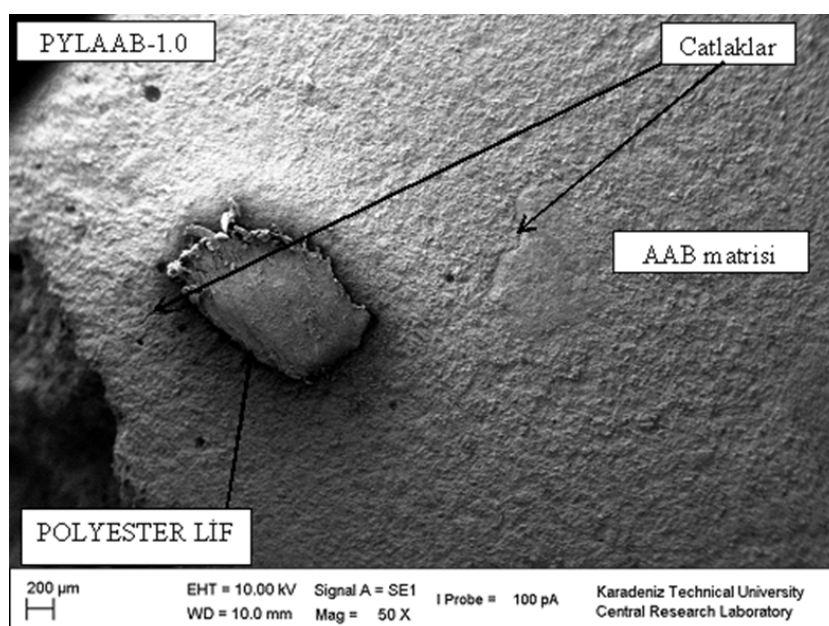
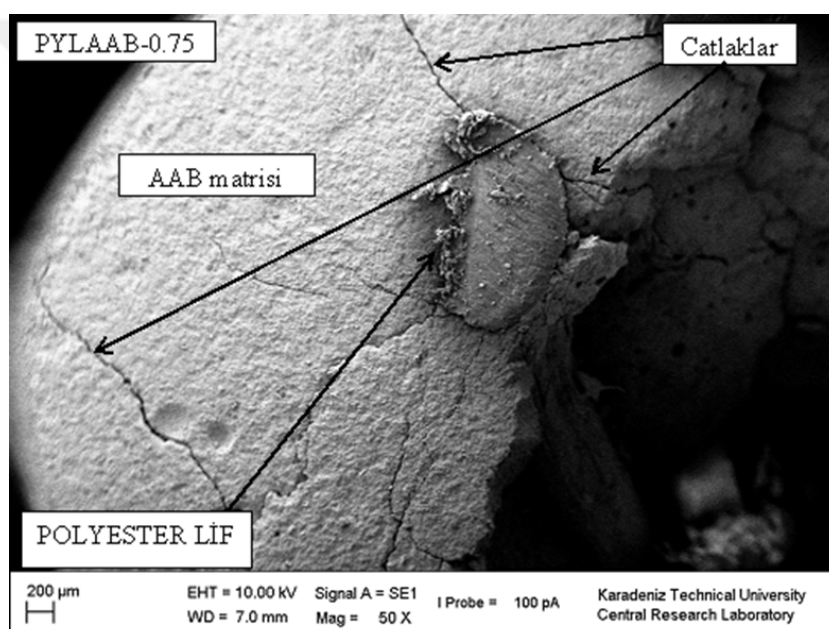
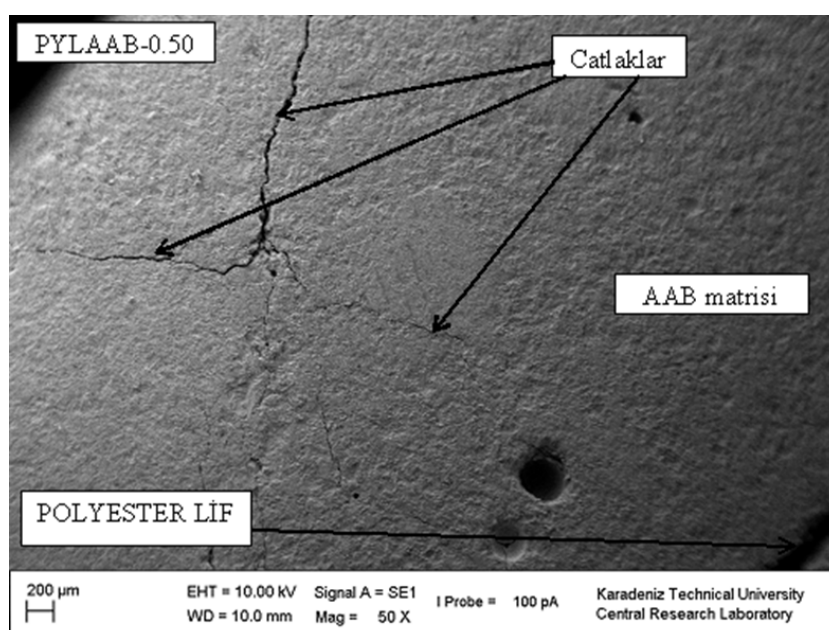
5.4.6. Eğilmede Çekme Dayanımı Deneyi Bulguları

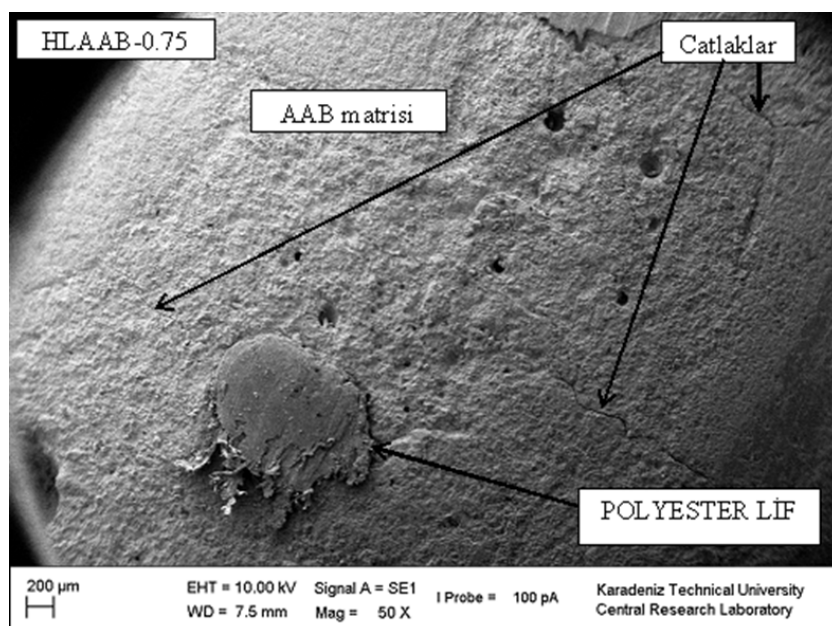
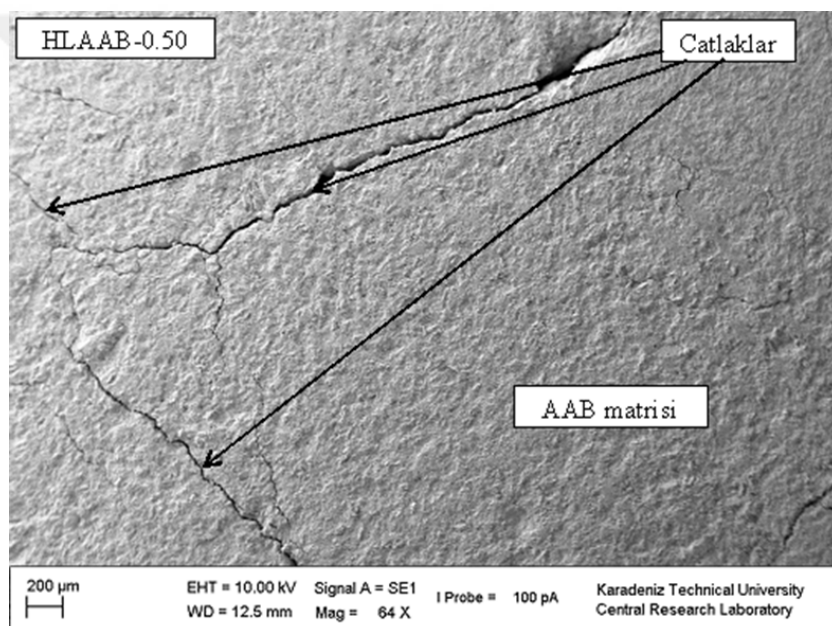
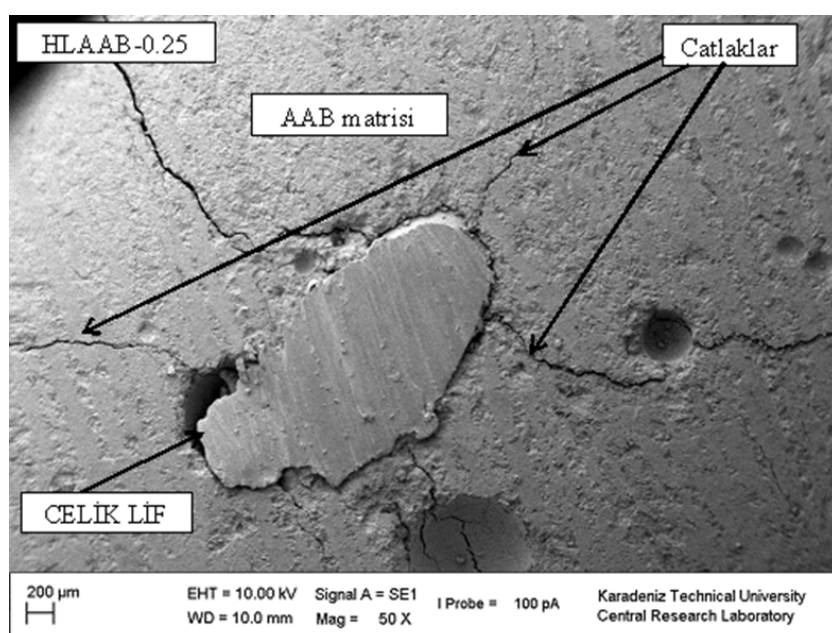
5.4.6.1. Eğilmede Çekme Dayanımı Deneyi Sonrası Numunelerin İyapısı

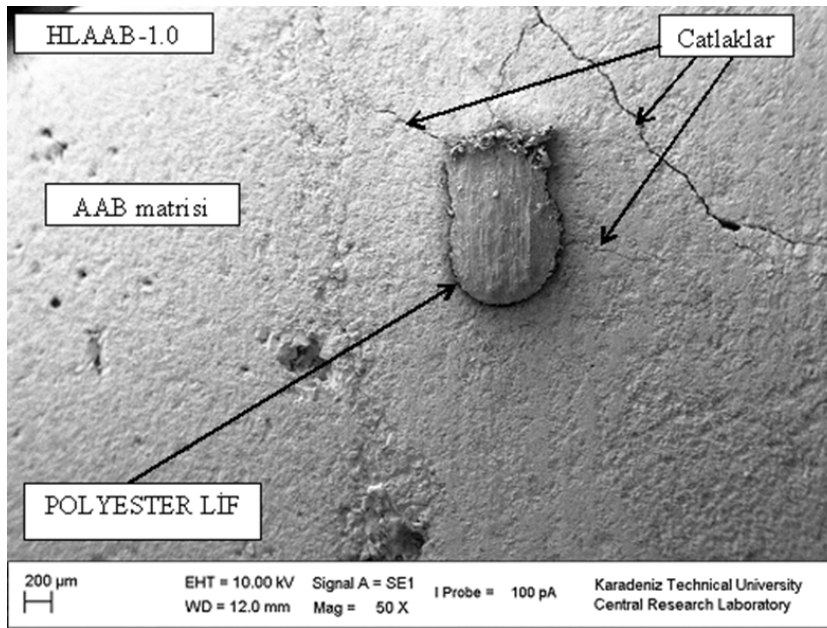
Kiriş eğilmede çekme deneyi sonrası her bir numunenin iyapısında oluşan çatlak ara yüzünün SEM görüntüleri Şekil 51'de gösterilmektedir. SEM görüntüleri incelenecek olursa liflerin inceler ve boyun vererek akması sonucu kopmuş ve uç kısımlarında hasar meydana gelmiştir. Özellikle polyester lifli numunelerde liflerin uç kısımlarında oluşan hasar daha belirgin olarak görülmektedir. Çelik lifli numunelerde lif oranı arttıkça, benzer oranlarda polyester numunelere göre çatlak miktarı ve uzunluğu artmaktadır. Katışık lifli numunelerde çatlak miktarı da polyester lifli örneklerde görüldüğü gibi benzer sonuçlar vermiştir. Sentetik liflerle yapılan çalışmalarda da benzer çatlak oluşumu gözlemlenmiştir (Xian vd., 2024; Bhutta vd., 2018).







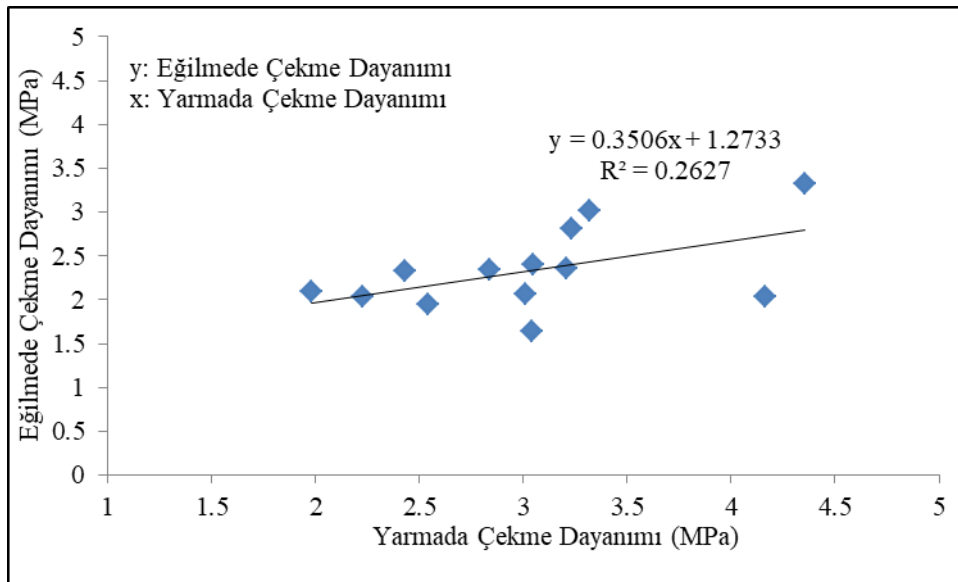




Şekil 51. Eğilme tokluğu için test edilen prizmaların SEM görüntüleri

5.4.6.2. Eğilmede Çekme Dayanımı, Tokluk ve Kopma Modülü

Kiriş numunelerinden elde edilen veriler eğilmede çekme dayanımı, tokluk ve nihai dayanım (numunenin göçmeden önce taşıyabileceği yük) açısından tartışılmıştır. Çelik ve polyester lif ilavesinin AAB'nin eğilmede çekme ve yarmada çekme özellikleri üzerindeki etkisi regresyon analizi kullanılarak değerlendirilmiştir (Şekil 52).



Şekil 52. AAB'lerin eğilmede çekme dayanımı ile yarmada çekme dayanımı arasındaki ilişki

Kuramsal olarak, lif esaslı kompozitler için, tokluk veya yük-sehim (deformasyon) eğrisi altında kalan alan, lif etkisinin değerlendirilebilmesi için basınç dayanımı, eğilmede çekme dayanımı veya kopma modülü gibi parametrelerden daha

uygun bir yöntem olarak kabul edilmektedir (Sukontasukkul, 2004). Üretilen her bir beton türü için ilk tepe yükü, ikinci tepe yükü ve yük düşüş yüzdesine ilişkin bilgiler Tablo 19’da verilmektedir.

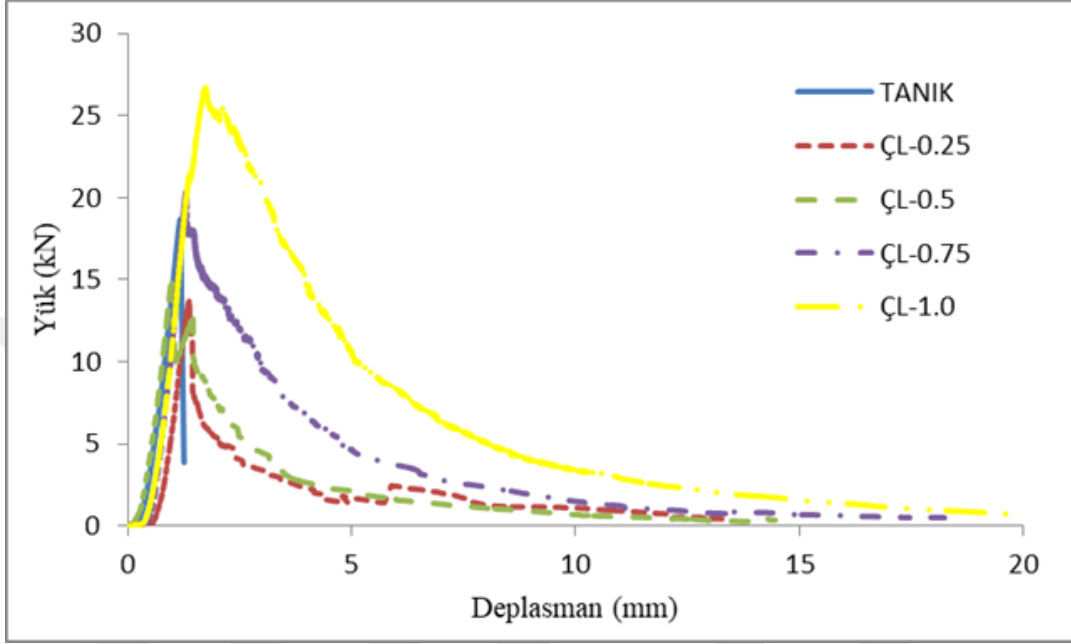
Tablo 19. AAB ve LAAB'lerin birinci ve ikinci tepe noktaları arasındaki karşılaştırma

Numuneler	İlk tepe noktası	Yük Kaybı		İkinci tepe noktası		Kopma modülü
	kN	kN	%	kN	%	MPa
TANIK	18.69	-		-		3.05
ÇLAAB-0.25	13.69	-		-		2.23
ÇLAAB-0.50	14.93	9.99	33.1	12.61	26.2	2.43
ÇLAAB-0.75	20.36	17.92	11.9	19.01	6.1	3.32
ÇLAAB-1.00	26.73	24.12	9.8	25.42	5.4	4.36
PYLAAB-0.25	12.15	7.82	35.6	9.57	22.4	4.17
PYLAAB-0.50	17.42	9.47	45.6	14.83	56.6	1.98
PYLAAB-0.75	19.71	12.20	38.1	20.03	64.2	2.84
PYLAAB-1.00	25.57	18.76	26.6	20.73	10.5	3.21
HLAAB-0.25	15.59	8.34	46.5	17.98	115.6	2.54
HLAAB-0.50	18.48	13.51	26.9	16.74	23.9	3.01
HLAAB-0.75	18.70	16.05	14.2	16.79	4.6	3.05
HLAAB-1.00	19.83	17.80	10.2	21.12	18.7	3.23

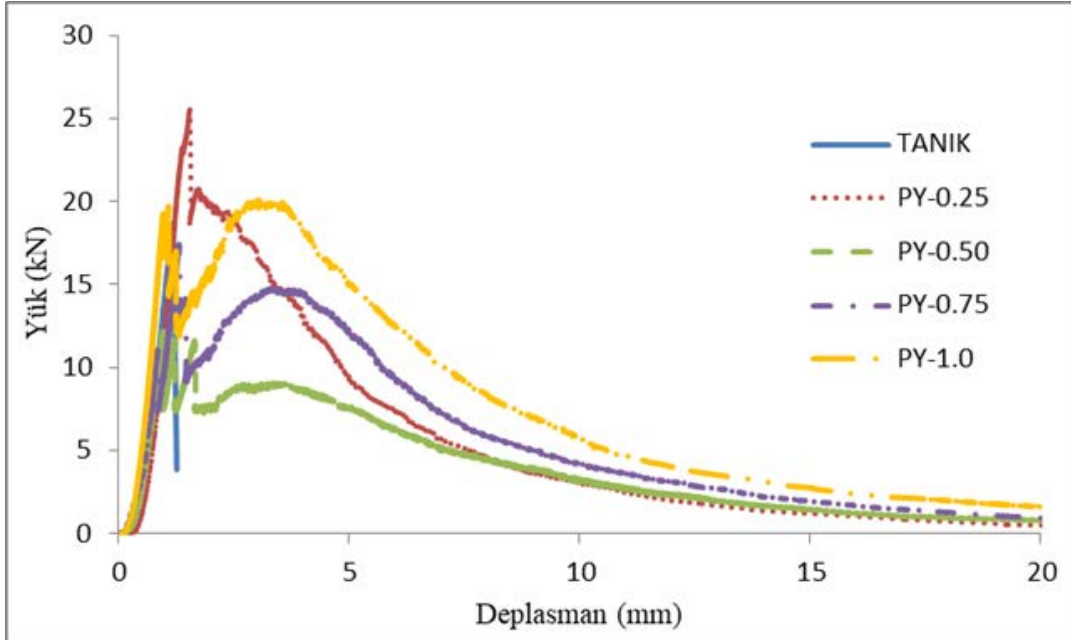
Çelik lifli örneklerin tepe yükü özellikle lif oranı %1 olduğunda tanık betona göre %39.21 oranında artış göstermektedir. Buna karşın polyester lifli ve katışık lifli numunelerde tanık betona göre tepe yükünde anlamlı bir fark gözlemlenememiştir. Ayrıca, LAAB türleri arasında bir karşılaştırma yapıldığında ÇLAAB'nin özellikle lif oranının %1 olduğu numunelerde, PYLAAB ve HLAAB'ye göre sırasıyla %35.62 ile %34.79 ve %26.91 ile %20.36 daha yüksek birinci ve ikinci tepe yüklerine ulaşıldığını göstermektedir. Çelik lifli ve katışık lifli numunelerde yük kaybı lif oranı arttıkça azalırken polyester lifli örneklerde lif oranı arttıkça artmaktadır. Çelik liflerin alkali aktivasyonlu betonların kullanımına ilişkin benzer bir bulgu daha önce yapılan bir çalışmada da rapor edilmiştir. Bu çalışmada alkali aktivasyonlu beton karışımlarına %1 çelik lif eklendiğinde basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı ve kopma modülünün sırasıyla yaklaşık %8.5; %61.6 ve %24.0 oranında arttığı belirlenmiştir (Ganesan vd., 2013a). Yapılan diğer çalışmalarda da ÇLAAB üzerinde eğilmede çekme deneyi gerçekleştirilmiş ve hem ilk tepe noktasında hem de nihai dayanımda çelik lif hacmindeki artışa bağlı olarak iyileşme olduğu belirlenmiştir (Ganesan vd., 2013b; Bashar vd., 2016).

Lifler öncelikle tokluğu artırmaya yönelik olsa da, bu çalışmada eğilmede çekme dayanımında bir artış gözlemlenmiştir. LAAB'nin eğilme yükü altındaki tanık betona

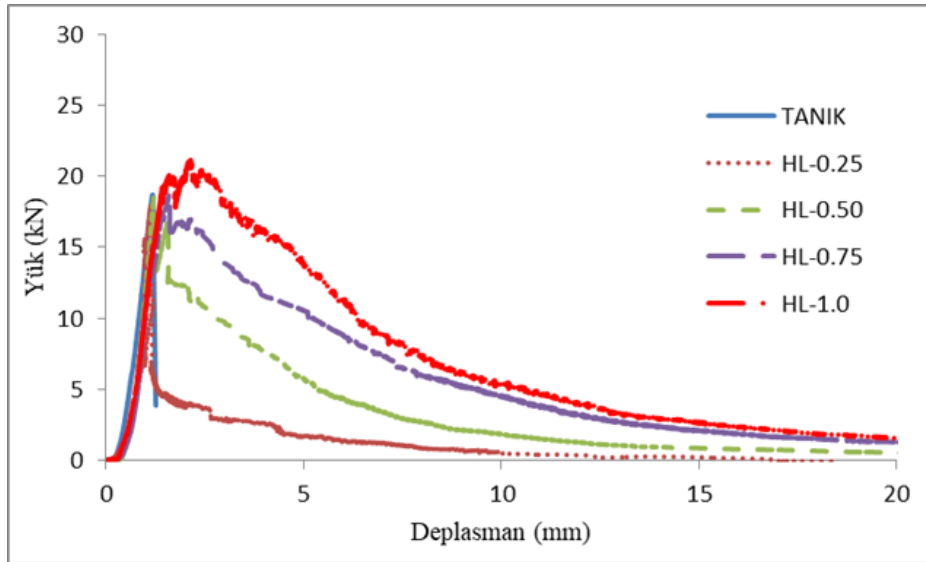
göre eğilme davranışı Şekil 53-55’de gösterilmiştir. Başlangıçta yük arttıkça deplasman doğru orantılı olarak artmakta, ilk çatlaktan hemen sonra ise yükte keskin bir düşüş meydana gelmektedir. Daha sonra, çatlak boyunca liflerin köprüleme etkisi nedeniyle yük tekrar artmaktadır. Bu bölge "tepe sonrası tepki" olarak adlandırılır ve liflerin başarımının gerçekten temsil edildiği bölge olduğuna inanılır (Bashar vd., 2016).



Şekil 53. ÇLAAB'nin tanık betona göre yük-deplasman ilişkisi



Şekil 54. PYLAAB'nin tanık betona göre yük-deplasman ilişkisi



Şekil 55. HLAAB'nin tanık betona göre yük-deplasman ilişkisi

Lif türü ve katışım miktarının yük kaybı üzerinde önemli bir etkisi olduğu görülmektedir. Lif içeriğinin %0.75 olduğu PLAAB'de yaklaşık %46'lık bir düşüş gözlemlenmiştir. Buna karşın, çelik lifli ve katışık lifli örneklerde ise lif miktarı arttıkça yük kayıp oranı azalmaktadır. Bu oran, %1 ÇLAAB'de yük kaybı %9.8 iken %1 HLAAB'de %10.2 olmuştur. Çelik liflerin tokluk üzerinde daha etkili davranış gösterdiği önceki çalışmalarda da görülmüştür (Ganesan vd., 2015).

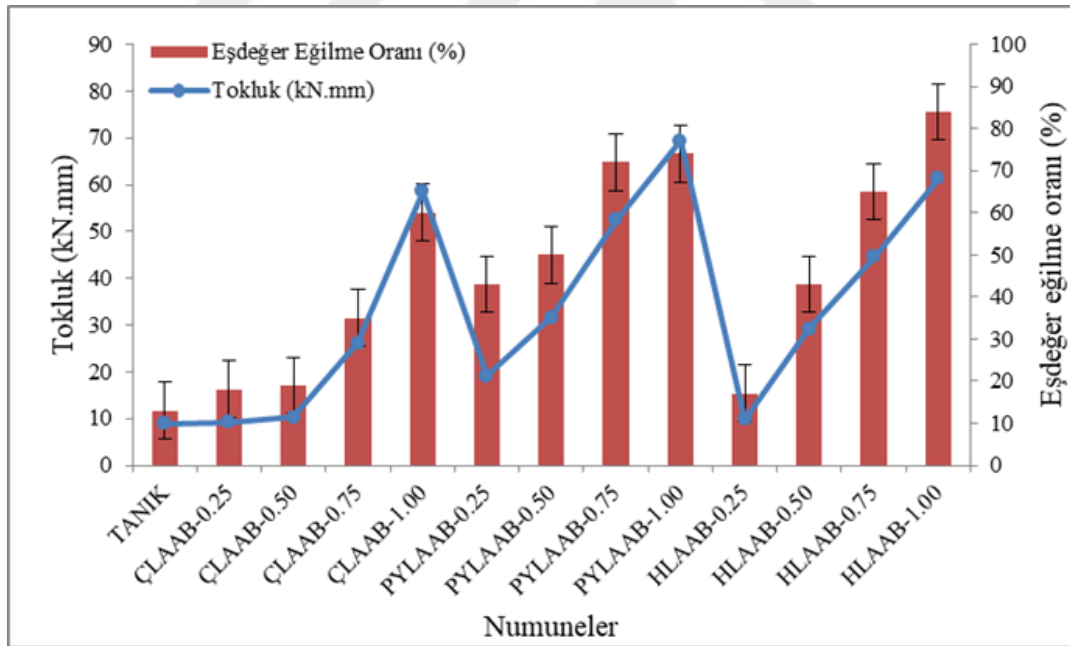
Çelik ve polyester liflerin çeşitli oranlarda ayrı ayrı ve katışık olarak kullanılarak üretildiği AAB ve LAAB'ler için ASTM C1609 standardına göre hesaplanan ve elde edilen bulgular Tablo 20'de verilmektedir.

Tablo 20. İncelenen AAB ve LAAB'ler için ASTM C1609'a göre hesaplanan değerler

C1609 STANDARDI	TANIĞ	ÇL-0.25	ÇL-0.50	ÇL-0.75	ÇL-1.0	PYL-0.25	PYL-0.50	PYL-0.75	PYL-1.0	HL-0.25	HL-0.50	HL-0.75	HL-1.0
$P_1(kN)$	18.6	13.6	14.9	20.3	26.7	12.1	17.4	19.7	25.5	15.5	18.4	18.7	19.8
$f_1(MPa)$	3.05	2.23	2.43	3.32	4.36	1.98	2.84	3.21	4.17	2.54	3.01	3.05	3.23
$\delta_1(mm)$	1.18	1.37	0.98	1.29	1.73	0.95	1.30	1.07	1.53	1.03	1.20	1.59	1.55
$P_p(kN)$	18.6	13.6	12.6	19.0	25.4	9.57	14.8	20.0	20.7	17.9	16.7	16.7	21.1
$f_p(MPa)$	3.05	2.23	2.05	3.10	4.14	1.56	2.42	3.26	3.38	2.93	2.73	2.74	3.44
$\delta_p(mm)$	3.05	1.37	1.00	1.31	2.13	1.09	1.45	3.01	1.70	1.13	1.55	2.19	2.12
$P_{600}^{100}(kN)$	12.1	4.41	13.6	9.15	8.96	11.1	8.60	17.5	9.90	6.71	9.35	7.84	8.61
$f_{600}^{100}(MPa)$	1.98	0.72	2.22	1.49	1.46	1.82	1.40	2.86	1.61	1.09	1.52	1.28	1.40
$P_{150}^{100}(kN)$	3.86	2.59	2.88	7.40	16.4	8.98	14.5	19.5	14.3	2.71	8.26	12.4	16.7
$f_{150}^{100}(MPa)$	0.63	0.42	0.47	1.21	2.68	1.46	2.38	3.18	2.34	0.44	1.35	2.03	2.73
$Tokluk_{150}^{100}(Joule)$	8.91	9.22	10.3	26.0	58.5	19.1	31.6	52.4	69.4	9.76	29.1	44.5	61.3
$R_{T,150}^{100}(\%)$	13	18	19	35	60	43	50	72	74	17	43	65	84
DI	0.03	0.10	0.10	0.12	0.19	0.09	0.30	0.31	0.33	0.11	0.17	0.26	0.31

P_1 = İlk tepe yükü; f_1 = İlk tepe dayanımı; δ_1 = İlk tepe deplasmanı; P_p = Nihai yük; f_p = Nihai dayanım ; δ_p = Nihai deplasman; $P_{600}^{100}(kN)$ = L/600'daki yük; $f_{600}^{100}(MPa)$ = L/600'daki dayanım; $P_{150}^{100}(kN)$ = L/150'deki yük; $f_{150}^{100}(MPa)$ = L/150'deki dayanım; $Tokluk_{150}^{100}(Joule)$ = 0 ile L/150 arasındaki mesafede yük deplasman eğrisi altında kalan alan; $R_{T,150}^{100}(\%)$ = Eşdeğer eğilme dayanımı oranı; DI= Süneklik indeksi.

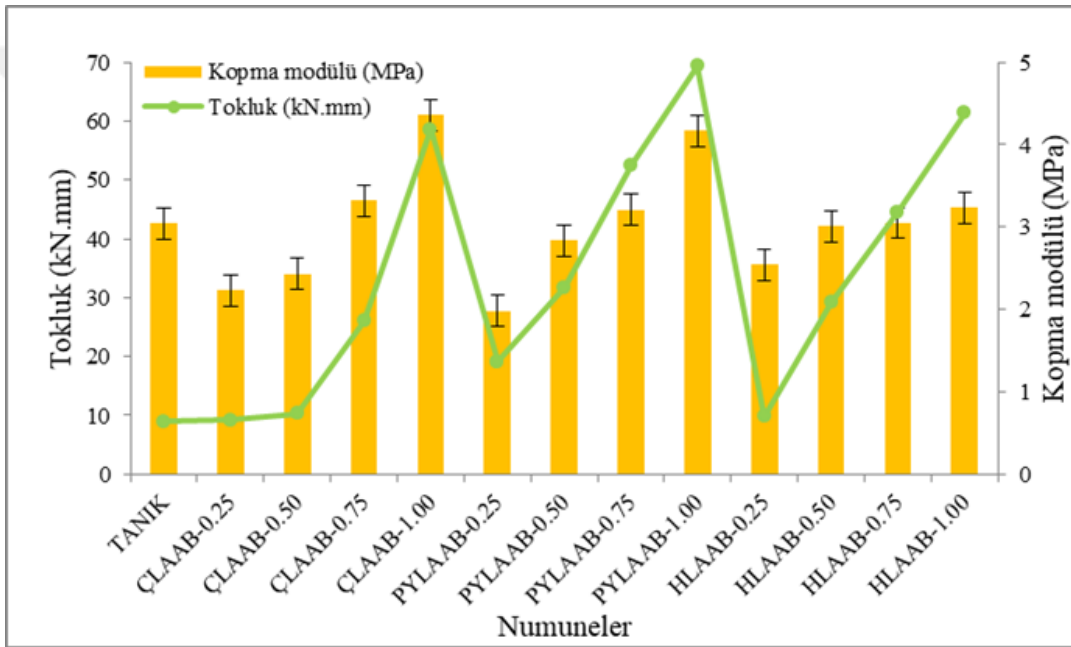
Tablo 20 incelendiğinde, numuneler arasında nihai tepe dayanımı lif oranına bağlı olarak artmaktadır. Nihai dayanım 4.14 MPa ile en yüksek %1 ÇL olan numunede görülürken, 3.38 MPa ile en düşük %1 PYL olan numunede görülmüştür. Böylece, tanık numuneye göre ÇL olan numunelerde %35.74 oranında artış olurken PYL olan numunelerde %10.82, katışık lifli numunelerde ise %12.79 oranında gerçekleşmiştir. Sonuç olarak, tüm karışımlarda düşük lif oranlarının numunelerde nihai tepe dayanımına katkısı olmazken, yüksek lif oranlarında anlamlı katkısı olduğu görülmüştür. Beklendiği gibi, lif türü ve oranı, çatlakları köprüleme ve ayrıca kırılma bölgesini artırma, liflerin yük taşıma dağılımını teşvik etme yeteneklerinin bir sonucu olarak eğilme tokluğu üzerinde en önemli etkiye sahiptir (Khan vd., 2018a; Nguyen vd., 2018). Nihai tokluk için ideal lif-matris bağı kayma davranışı, birkaç özelliğin optimize edilmiş bir bileşimini sağlayan bir davranıştır. Bu özellikler, lif-matris kenetlenme dayanımı ve taşıma direnci, matris kırılabilirliği ve lifin çekme dayanımıdır. Numunelerin eğilme tokluğunun eşdeğer eğilme dayanımı oranına ve eğilme tokluğunun kopma modülüne bağlı olarak değişimi Şekil 56 ve Şekil 57’de verilmektedir.



Şekil 56. AAB ve LAAB'lerin eğilme tokluğu ile eşdeğer eğilme dayanımı arasındaki ilişki

Şekil 56 incelendiğinde tanık numuneye göre tokluk %3.47 artış ile en düşük %0.25 ÇLAAB numunesinden elde edilirken %679.12 artış ile en yüksek %1 PYLAAB numunesinden elde edilmiştir. Genel olarak tüm numune gruplarında lif oranı arttıkça tanık numuneye göre numunelerin tokluk (enerji yutma) kapasiteleri anlamlı oranlarda artmıştır. Ancak, %1 PYLAAB’de %1 ÇLAAB’ye göre bu artış oranı %121.88 daha

fazla gerçekleşmiştir. Bununla birlikte %1 HLAAB’de bu artış oranı sadece %31.76 olarak gerçekleşmiştir. Ayrıca, eğilmede çekme dayanımı oranı tanık numuneye göre en düşük %17 ile %0.25 HLAAB’den elde edilirken, %84 ile en yüksek %1 HLAAB’den elde edilmiştir. Tüm numune gruplarında düşük lif oranlarında eğilmede çekme dayanım oranlarında görülen artış oranları düşük iken, lif miktarları arttıkça bu değerlerde de anlamlı artışlar görülmektedir. Bu durumun artan lif miktarı ile liflerin mikro ve makro çatlakları engelleme ve matriste stres köprüsü oluşturma yeteneği ile tokluğun artmasını sağlamasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Ayrıca, daha önce yapılan çalışmalarda elde edilen bulguları desteklemektedir (Shaikh, 2019; Rashad, 2020).

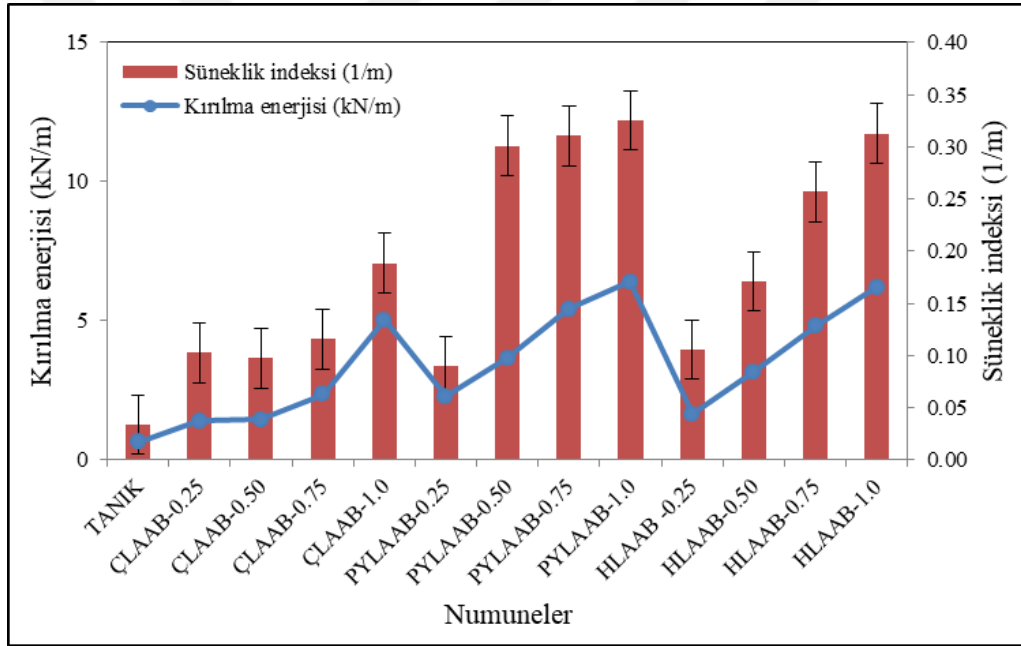


Şekil 57. AAB ve LAAB’lerin eğilme tokluğu ile kopma modülü (nihai dayanım) arasındaki ilişki

Şekil 57’den anlaşılacağı üzere kopma modülü (nihai dayanım) tüm numune gruplarında düşük lif oranlarında tanık numuneye göre değişmemiştir. Ancak lif miktarı arttıkça bu değerde anlamlı artışlar görülmüştür. %1 ÇLAAB’de %42.95 ile en yüksek artış görülürken, %5.9 ile en düşük artış %1 HLAAB’den elde edilmiştir. %1 lif oranı ile PYLAAB’de artış oranı ise %36.72 olarak gerçekleşmiştir. Lif-matris etkileşimi ve çelik lifin sertliği ve dağılımı numunelerin dayanımına daha çok katkıda bulunmuştur (Bhutta vd., 2017).

5.4.6.3. Kırılma Enerjisi ve Süneklik İndeksi

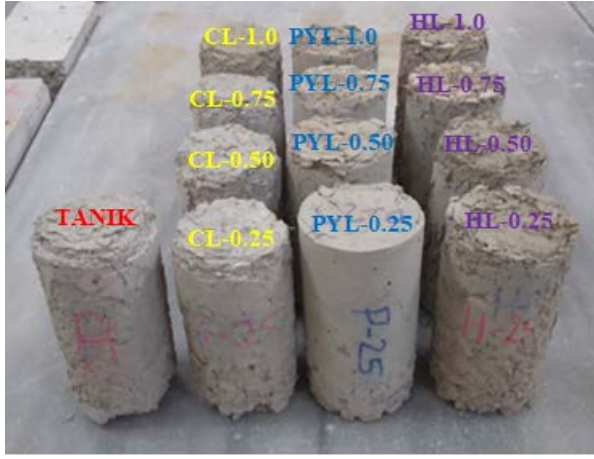
Lif içeriğine bağlı olarak kırılma enerjisi ve süneklik indeksindeki değişimler Şekil 58'de gösterilmiştir. Çelik lifli numunelerde, lif miktarı arttıkça kırılma enerjisi de artmaktadır, öyle ki %1 çelik lif içeriğinde kırılma enerjisi tanık betona kıyasla %700 oranında artmaktadır. Tanık betona kıyasla %1 polyester lif içeren numunede %917.5'lik bir artış olmuştur. Liflerin katışık (hibrit) kullanımında ise polyester liflerin beton davranışına hakim olduğu görülmektedir. Liflerin %1 katışık kullanımında numunenin kırılma enerjisi, tanık betona kıyasla %884.1 oranında artmıştır. Benzer davranış, lif türüne ve katışık kullanımına bağlı olarak süneklik indeksinde de gözlenmiştir. Süneklik indeksi, lif miktarına bağlı olarak artmıştır. En yüksek süneklik indeksi %1 polyester lif ile 0.33 olarak gözlemlenirken, en düşük %0.25 çelik lif kullanıldığı durumda 0.1 olarak elde edilmiştir.



Şekil 58. Kırılma enerjisi ve süneklik indeksinin lif içeriği ile değişimi

5.4.7. Donma-Çözülme Dayanıklılık Deneyi Bulguları

ASTM C666 (2004) A yöntemine göre 100x200 mm boyutundaki %0 (Tanık); %0.25; %0.50; %0.75 ve %1 lif oranlarına sahip LAAB numuneleri üzerinde hızlı donma-çözülme deneyi yapılmıştır. 28 gün kürde bekletildikten sonra çıkarılan numuneler donma-çözülme döngüsünde 120 çevrim olacak şekilde cihaza yerleştirilmiştir. Numunelerin 120 donma-çözülme çevrimleri sonucunda görünimleri Şekil 59'da verilmiştir.

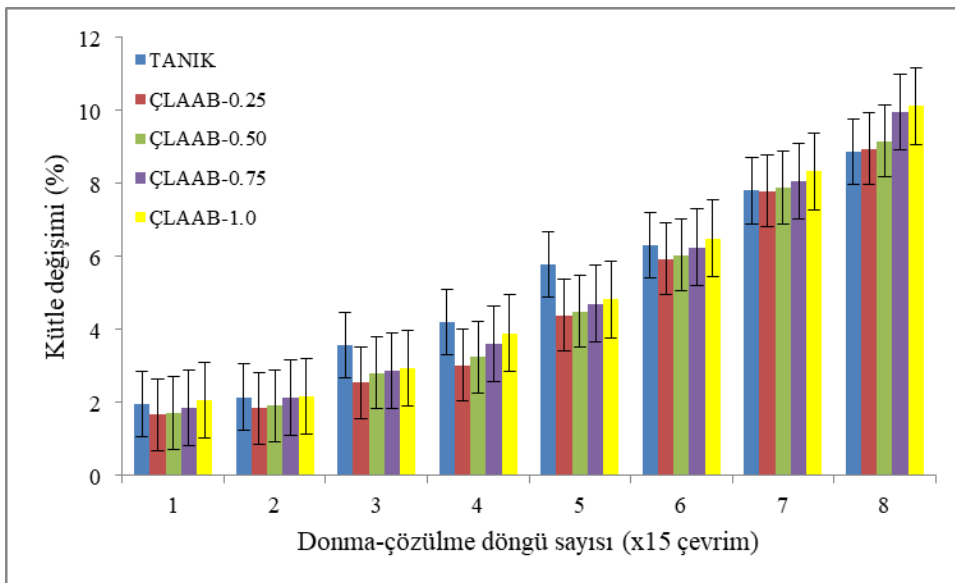


Şekil 59. 120 donma-çözülme çevrimi sonrası numunelerin görünüşleri

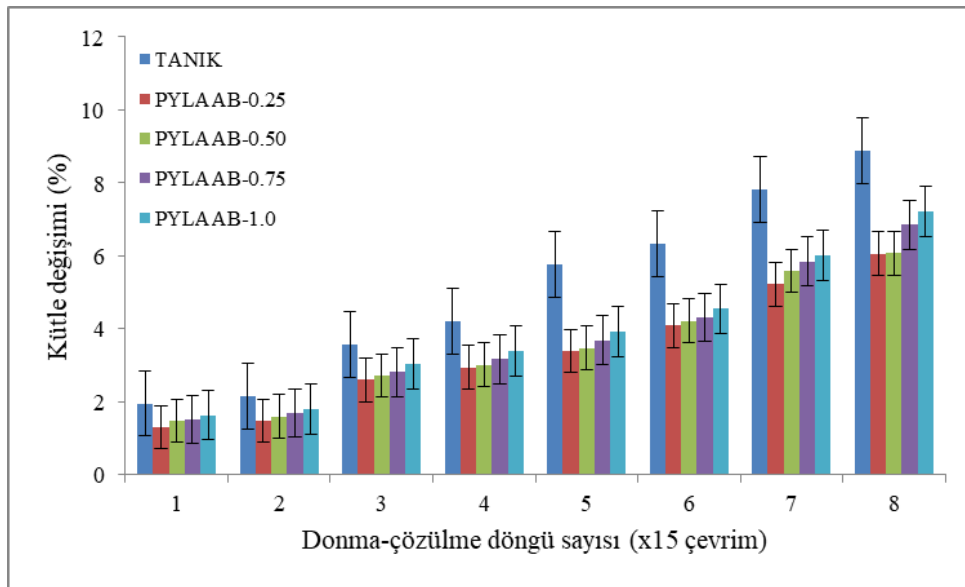
Şekilde görüldüğü gibi tanık betonu tamamen hasar görürken, lifli betonların yüzeylerindeki pullanma ve hasar kullanılan lif türüne ve oranına göre farklı etki ettiği belirlenmiştir. Donma-çözülme döngüsünden (120 çevrim) sonra numunelerde kütle değişimi, ultrasonik geçiş hızı, dinamik elastisite modülü ve tek eksenli basınç dayanımı deneyleri yapılmıştır. Bu araştırmaların sonuçları aşağıda başlıklar halinde verilmiştir.

5.4.7.1. Kütle Kaybı

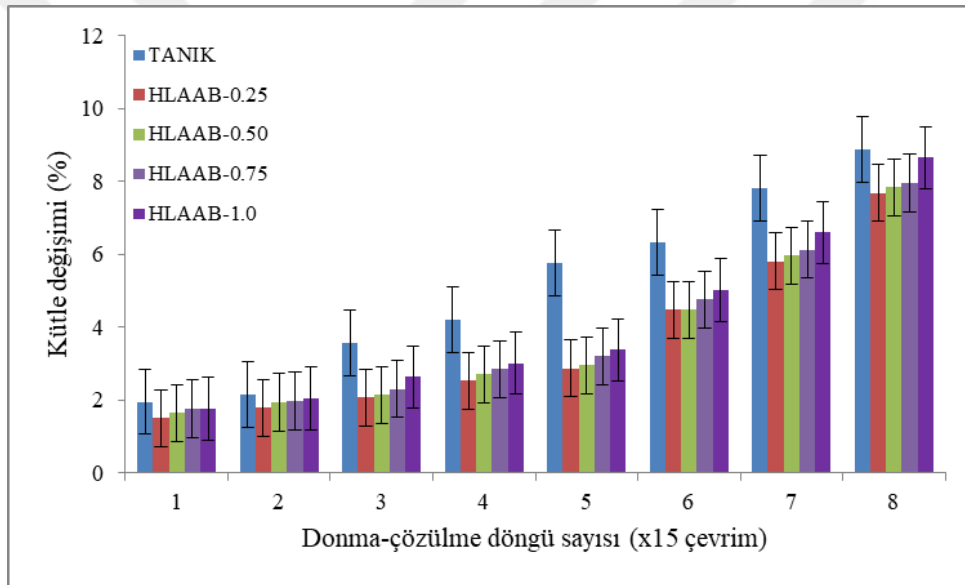
Tekrarlı donma-çözülme çevrimine maruz bırakılan AAB ve LAAB numunelerinin kütle değişimi 15 çevrimde bir Eşitlik 16 kullanılarak hesaplanmıştır (Bölüm 4.4.9.). Şekil 60-62, tanık betonun donma-çözülme çevrim sayısına bağlı olarak %0.25; %0.50; %0.75 ve %1.0 lif oranlarına sahip LAAB numunelerinin kütle kayıplarını göstermektedir. Her bir lif türüne ve katışık kullanım şekline göre kütle kayıpları ayrı ayrı verilmiştir.



Şekil 60. Çelik lifli AAB numunelerinin tanık betona göre kütle değişimi



Şekil 61. Polyester lifli AAB numunelerinin tanık betona göre kütle değişimi



Şekil 62. Katışık (Hibrit) lifli AAB numunelerinin tanık betona göre kütle değişimi

Şekil 60'ta gösterildiği gibi, tüm ÇLAAB numunelerinin kütle kaybı, lif oranına bağlı olarak tanık betona göre 120 donma-çözülme çevrimi sonunda artmıştır. Özellikle lif oranı %1 olan numunede %10.13 oranında en yüksek olmuştur. Donma-çözülme çevrimleri arttıkça tüm numunelerde kütle kaybı da artmıştır. Lif katkılı numunelerin kütle kaybı tanık numunesiyle karşılaştırıldığında daha düşük olmuştur. Kütle kaybı %7.23 ile %1 olan polyester lifli numuneler Şekil 61'de gösterilmektedir.

Şekil 61'de polyester lifli numunelerde kütle kaybının tanık numuneye göre azalarak arttığı görülmektedir. Tanık numuneye göre en düşük azalmanın %1 polyester lifli numunede %15.37 ile gerçekleştiği en fazla azalmanın ise %41.14 ile %0.25 polyester lifli olan numunede meydana geldiği görülmüştür. Liflerin katışık (hibrit) kullanımında ise Şekil 62'den anlaşılabacağı üzere polyester liflerin davranışa hakim

olduğu sonucuna varılmaktadır. Bu durumun sentetik liflerin alkali aktivasyonlu betonda bağlayıcı matris ile daha iyi bir kenetlenme sağladığı ve daha az birbirinden bağımsız boşluk yapısı oluşturmamasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Daha önce yapılan çalışmalarda da lif türünün ve kullanım şeklinin betonun donma-çözülme etkisi altındaki davranışının bu çalışmadakine benzer bulgular verdiği anlaşılmaktadır (Ünal vd., 2003b; Karahan ve Atış, 2011; Farhan vd., 2022).

5.4.7.2. Ultrasonik Geçiş Hızı ve Dinamik Elastite Modülü

Toplamda 120 donma-çözülme çevrimi yapılan tanık ve lif katkılı LAAB numunelerinin her 15 çevrimde bir ultrasonik geçiş hızları ölçülmüştür. Tablo 21, numunelerin belirlenen ölçüm değerlerini içermektedir.

Tablo 21. Donma-çözülme çevrim sayısına göre AAB numunelerinin ultrasonik geçiş hızı bulguları

Numuneler	Basınç dayanımı (MPa)	UPV (km/s) (15 çevrim)	UPV (km/s) (30 çevrim)	UPV (km/s) (45 çevrim)	UPV (km/s) (60 çevrim)	UPV (km/s) (75 çevrim)	UPV (km/s) (90 çevrim)	UPV (km/s) (105 çevrim)	UPV (km/s) (120 çevrim)
TANIK	21.68	3904	3897	3860	3745	3603	3497	3254	3020
ÇLAAB-0.25	27.38	3960	3876	3697	3501	3390	3306	3115	2860
ÇLAAB-0.50	28.24	3883	3774	3584	3540	3317	3279	3021	2732
ÇLAAB-0.75	29.32	3690	3610	3472	3333	2976	2817	2674	2433
ÇLAAB-1.0	33.41	3546	3378	3063	2933	2684	2415	2262	2057
PYLAAB-0.25	35.66	4444	4348	4318	4237	4198	3976	3846	3692
PYLAAB-0.50	37.82	4396	4255	4211	4193	4149	3979	3809	3537
PYLAAB-0.75	36.92	4175	4073	4032	4002	3883	3559	3421	3390
PYLAAB-1.0	38.07	4132	4095	3963	3884	3821	3496	3357	3225
HLAAB-0.25	36.37	4357	4232	4129	3891	3846	3634	3497	3392
HLAAB-0.50	40.08	4310	4198	4137	3881	3745	3610	3490	3377
HLAAB-0.75	41.67	4108	4000	3899	3621	3578	3448	3312	3198
HLAAB-1.0	43.69	4000	3868	3722	3576	3434	3217	3126	3048

Tablo 21'de gösterildiği gibi, tüm LAAB numunelerinin donma-çözülme çevrimlerine maruz kaldıktan sonra ultrasonik geçiş hızları düşmüştür. Bunun nedeni donma çözülme çevrim sayısının artması ile LAAB numuneleri içerisindeki boşlukların artmasıdır (Esen, 2003). Ancak, çelik lifli numunelerde UPV değerleri polyester ve katışık numunelere kıyasla daha düşük olmuştur. UPV hızına bağlı olarak hesaplanan elastisite modülü ve elastisite modülüne bağlı olarak elde edilen diğer parametrelere ait bulgular Tablo 22'de verilmiştir.

Tablo 22. Betonların Basınç Dayanımı ve Donma-Çözülme Deneyi Bulguları

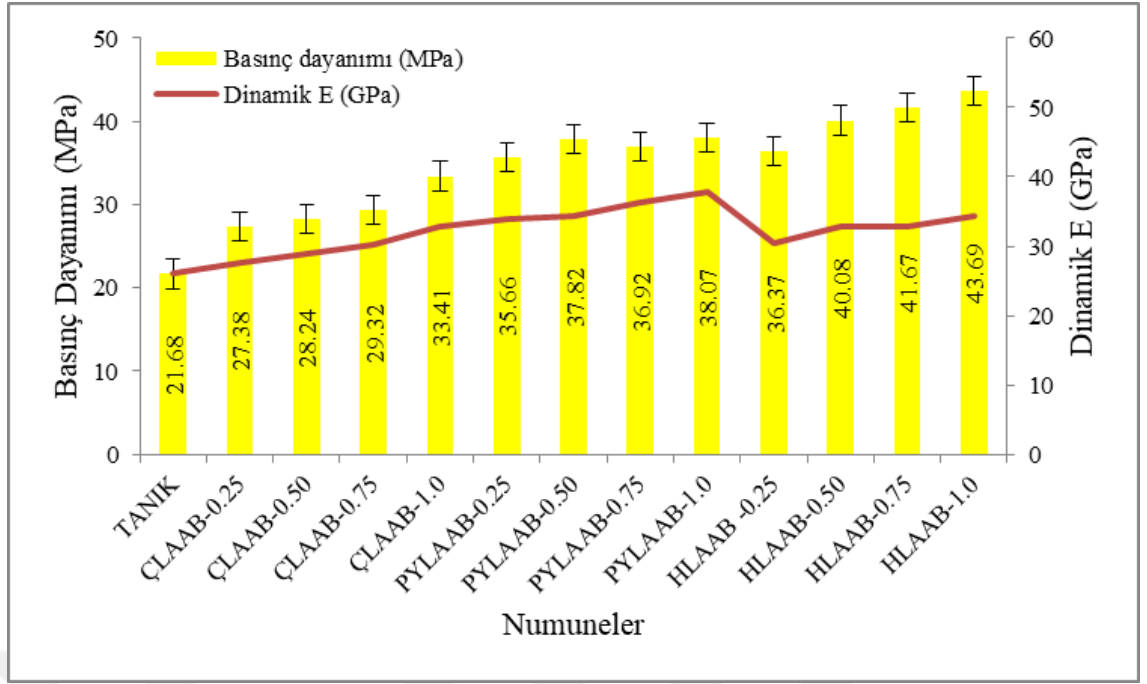
Numuneler	Basınç Dayanımı (MPa)	UPV ₀	UPV _n	E ₀	E _n	AE/E ₀	UPV _n > 0.77*UPV ₀
TANIK	24.65	3.55	1.28	29.53	3.82	0.87	2.73
ÇLAAB-0.25	26.18	3.64	1.82	31.40	7.88	0.75	2.80
ÇLAAB-0.50	27.21	3.70	2.21	32.67	11.73	0.64	2.85
ÇLAAB-0.75	29.92	3.77	2.55	34.32	15.73	0.54	2.91
ÇLAAB-1.00	32.69	3.92	2.67	37.24	17.22	0.54	3.02
PYLAAB-0.25	34.95	4.05	2.68	38.44	16.90	0.56	3.12
PYLAAB-0.50	35.78	4.07	2.79	38.98	18.28	0.53	3.14
PYLAAB-0.75	35.85	4.18	2.80	41.14	18.46	0.55	3.22
PYLAAB-1.00	37.73	4.24	2.95	42.74	20.71	0.52	3.26
HLAAB-0.25	35.79	3.78	2.97	34.38	21.24	0.38	2.91
HLAAB-0.50	39.68	3.92	3.06	37.06	22.61	0.39	3.02
HLAAB-0.75	40.12	3.93	3.31	37.29	26.39	0.29	3.03
HLAAB-1.00	42.44	4.00	3.32	38.88	26.73	0.31	3.08

UPV₀= İlk Ultrasonik geçiş hızı (km/s); UPV_n= Son Ultrasonik geçiş hızı (km/s); E₀= Başlangıç E modülü (GPa); E_n= Döngü sonrası E modülü (GPa); AE/E₀= Elastisitedeki azalma oranı.

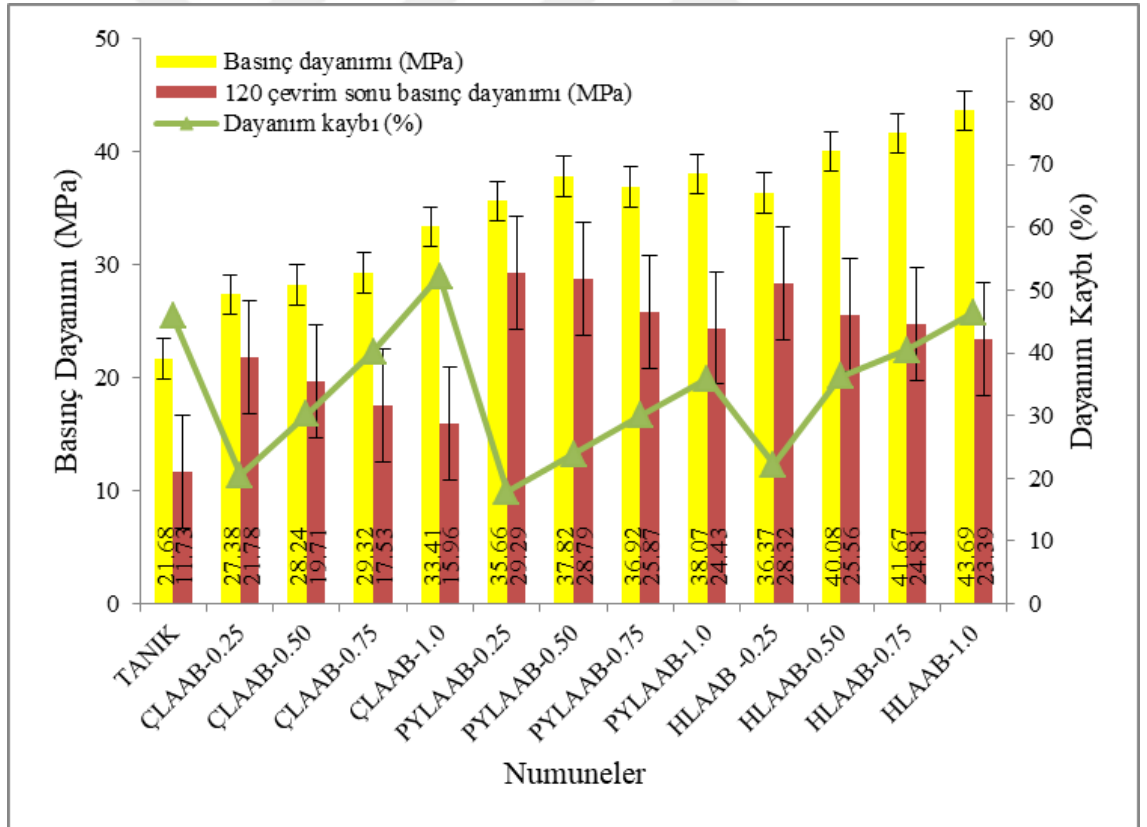
Tablo 22’den de anlaşılacağı üzere, tüm beton karışım gurubunda da lif ilavesi ile basınç dayanımı artmaktadır. Basınç dayanım gelişiminde polyester liflerin çelik liflerden daha etkin olduğu anlaşılmaktadır. Lif türüne göre basınç dayanımlarında çelik lifli olanlarda en fazla %32.62 artış gözlenirken polyester lif ile üretilen numunelerde %53.06 ve katışık lifli olanlarda ise en çok %72.17’lik bir basınç dayanımı artışı gözlenmiştir.

5.4.7.3. Basınç Dayanımı

Beton numunelerinin birim kütle ve ultrases geçiş hızlarından yararlanılarak hesaplanan dinamik elastisite modülleri ile basınç dayanımı arasındaki ilişki Şekil 63’de dayanım kaybı ile basınç dayanımı arasındaki değişim ise Şekil 64’te gösterilmektedir.



Şekil 63. Betonların lif türü ve oranına bağlı olarak basınç dayanımı ile dinamik elastisite modülleri arasındaki ilişki



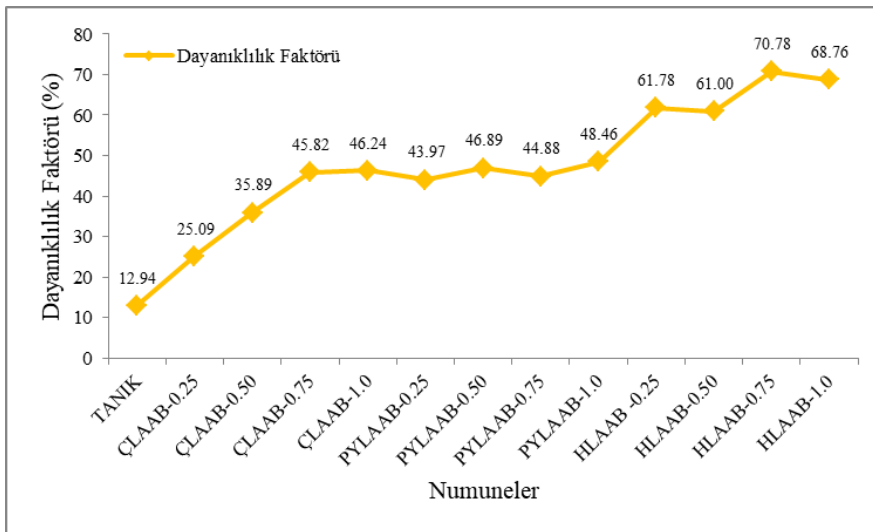
Şekil 64. Betonların lif türü ve oranına bağlı olarak basınç dayanımı ile dayanım kaybı arasındaki ilişki

Şekil 63'ten anlaşılacağı gibi donma-çözülme deneyine başlamadan önce tanık, %0.25; %0.50; %0.75 ve %1.0 lif oranlarına sahip LAAB numunelerinin dinamik E değerleri tanık betona göre çelik lifli olanlarda %26.07 daha fazla iken polyester lifli

olanlarda %44.71, katışık lifli olanlarda ise %31.63 daha fazla olmuştur. 120 çevrim sonunda %0.25 çelik lif katkılı numunenin dinamik elastisite modülü %6.29 oranında azalmış olup en çok etkilenen numune olmuştur. Elde edilen sonuçların daha önceki çalışmalarla uyumlu olduğu görülmektedir (Canbaz, 2001; Topçu ve Canbaz, 2002).

Donma-çözülme döngülerine (120 çevrim) maruz bırakılan farklı lif türü ve lif oranları içeren numunelerin basınç dayanımları ve dayanımlarındaki yüzde değişimler Şekil 64'te gösterilmektedir. 120 çevrimden sonra, Tanık (%0); %1 ÇL; %1 PYL ve %1 HL için dayanım kayıpları sırasıyla %45.89; %52.23; %35.83 ve %46.46'dır. Dayanım kayıpları 120 döngü sonunda %17.86 ile %52.23 arasında değişmiştir. Bu kayıp yüzdeleri numunelerin 28 günlük değerlerine göre belirlenmiştir. AAB numunelerinin basınç dayanımı kayıpları, donma-çözülme çevrimlerindeki artışla birlikte artmıştır. Numunelerdeki lif ikame oranı arttıkça, numunelerin dayanımlarındaki kayıplar artmıştır. Ancak, çelik lifli olan numunelerde dayanım kaybı en yüksek iken polyester lifli olanlarda dayanım kaybı daha düşük olmuştur. Bunun sebebi olarak liflerin, donma-çözülme nedeniyle numunede oluşan gerilmelerin bir kısmını sönmülemesi ve bu nedenle dayanım kayıplarının daha az olduğu düşünülmektedir. Benzer çalışmalarda da bu çalışmada elde edilen bulgular ile uyumlu sonuçlara rastlanmıştır (Azarsa ve Gupta, 2020; Pradhan vd., 2022; Arunkumar vd., 2022).

Dinamik elastisite modülü değeri belirlendikten sonra dayanıklılık faktörü hesaplanmış ve lif türüne ve kullanım şekline bağlı olarak dayanıklılık faktöründeki değişim Şekil 65'de verilmiştir.



Şekil 65. Betonların lif türü ve oranına bağlı olarak dayanıklılık faktörü

Literatürde %40–%60 aralığındaki dayanıklılık faktörü değeri şüpheli ve %40'ın altındaki ise tatmin edici değil olarak sınıflandırılır. Eğer, bu değer daha fazla ise beton

5.4.8. Sodyum Sülfata Dayanıklılık Deneyi Bulguları

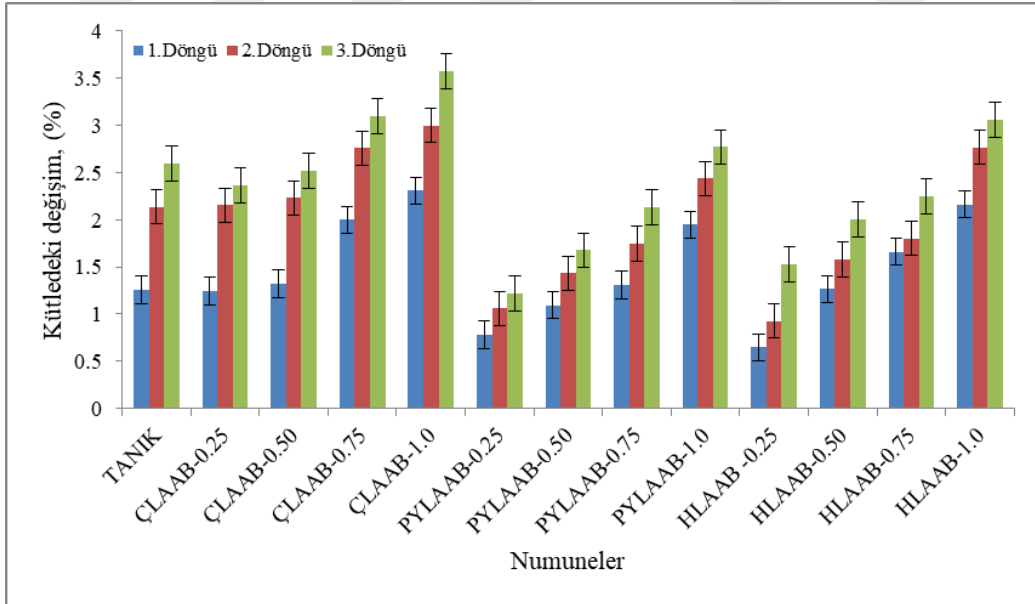
Figure 1 displays 18 concrete specimens arranged in a 3x2 grid. The top row shows 12 cylindrical specimens, 6 for 5% dissolution and 6 for 10% dissolution. The middle and bottom rows show pairs of rectangular specimens for 5% and 10% dissolution, with handwritten labels like 'G-1' and 'G-2'.

103

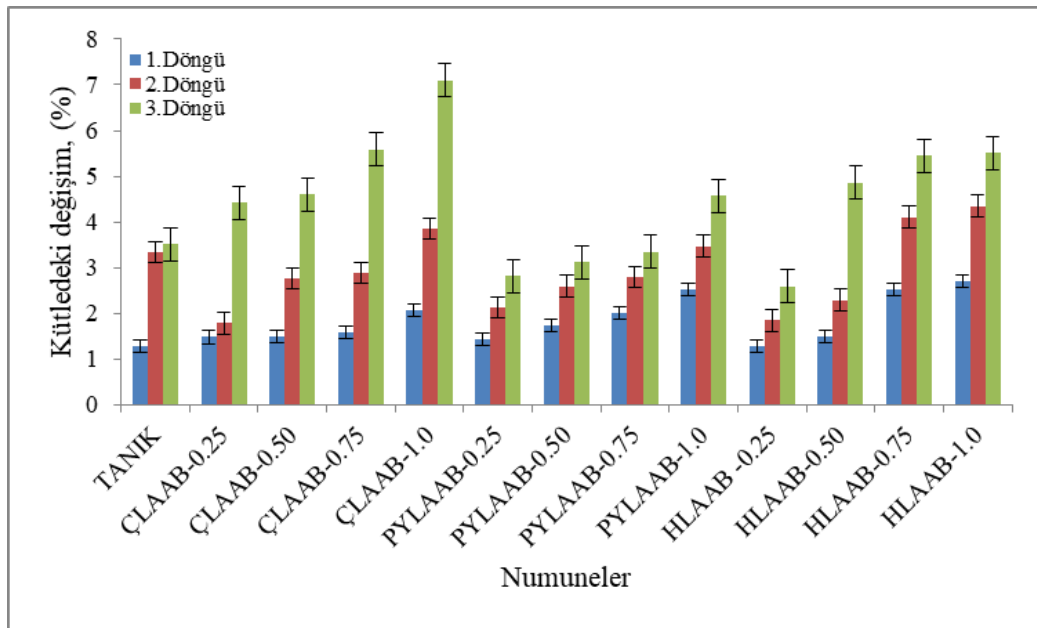
Şekil 66'dan da anlaşıldığı gibi asitli ortam LAAB numunelerinin yüzeylerinde aşınmalar ve köşelerde kırılmalar meydana getirmiştir. Şiddetli sülfat (%10 Na₂SO₄) ortamına maruz kalan LAAB'lerde, kütle kaybı ile birlikte daha fazla tahribat gözlemlenmiştir. Bununla birlikte numunelerin yüzeyinde beyaz renkli tabakalanmalar da gözlemlenmiştir. Bu, asit çözeltisi ile alkali aktivasyon (geopolimer) jel tabakası arasındaki çökeltme reaksiyonlarının bir sonucu olarak düşünülmektedir (Djubo vd., 2016). Bir çalışmada Saavedra ve ark. (2016), Na₂SO₄ çözeltisine maruz bırakılmış alkali aktivasyonlu betonlarda benzer oluşumlar gözlemlenmiştir.

5.4.8.1. Kütle Değişimi

Tanık ve lifli AAB numunelerinin hafif (%5) ve şiddetli (%10) Na₂SO₄ etkisi sonrası kütlelerinde görülen değişim Şekil 67 ve Şekil 68'de sırasıyla gösterilmiştir. Kütle artışının birincil nedeni sülfat partiküllerinin çözelti içinden kompozite nüfuz ederek boşluklar içerisinde alçıtaşı ve ettringit gibi reaksiyon ürünleri oluşturmalarıdır. Sülfat çözeltisine maruz kalmaya bağlı olarak kompozitteki kütle artışı sonuçlarının benzer eğilimi önceki çalışmalar tarafından da rapor edilmiştir (Özcan ve Karakoç, 2019; Jena vd., 2019; Farhan vd., 2022).



Şekil 67. %5 sodyum sülfat çözeltisine 15 çevrim boyunca maruz kalan tanık ve lifli AAB numunelerinin kütlelerindeki değişim



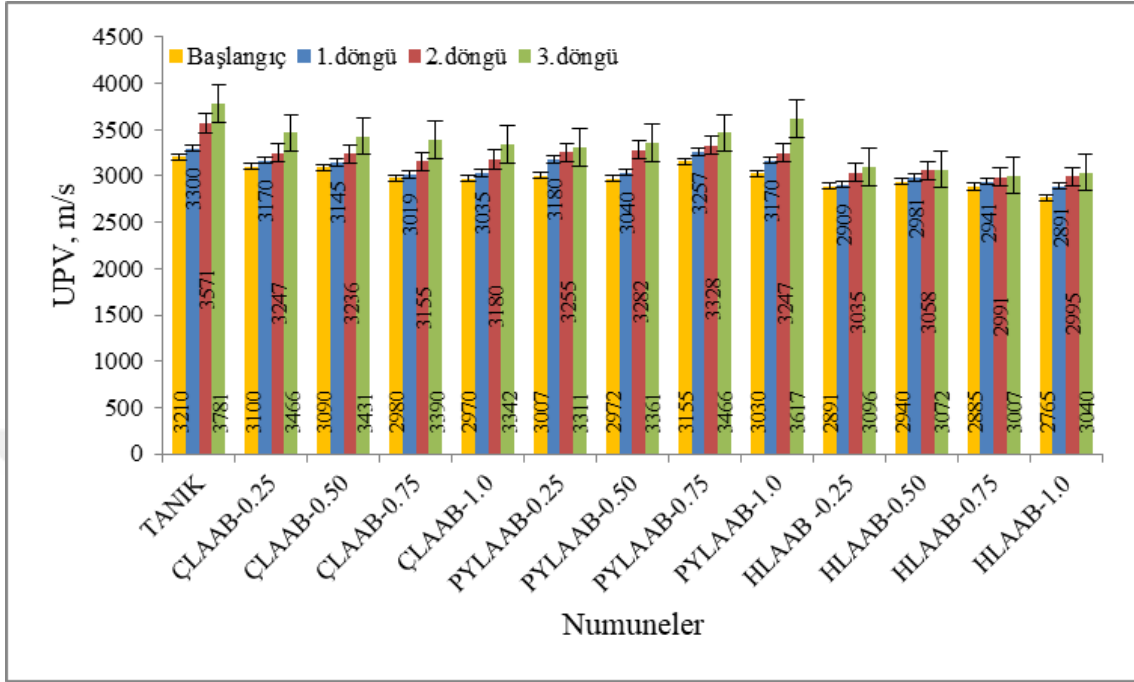
Şekil 68. %10 sodyum sülfat çözeltisine 15 çevrim boyunca maruz kalan tanık ve lifli AAB numunelerinin kütledeki değişim

Şiddetli sülfat etkisine maruz kalan numunelerin kütle kazanımları genellikle hafif sülfat etkisinde bulunan numunelerden daha yüksek olmuştur. Genel olarak lif oranına bağlı olarak kütle kazanımları artmıştır. Çelik lifli olanlarda %5 Na_2SO_4 çözeltisinde %37.31 ile en düşük %83.33 ile en yüksek kütle kazanımı gerçekleşmiştir. Polyester liflilerde ise %6.54 ile en düşük kütle kazanımı olurken %54.16 ile en yüksek gerçekleşmiştir. Katışık lif kullanımında ise kütle kazanımı en düşük %17.69 iken en yüksek ise %71.43 olarak gerçekleşmiştir (Şekil 67). Şiddetli sülfat (%10) etkisinde ise çelik lifli olanlarda en düşük %15.27, en yüksek ise %101.99 olmuştur. Polyester lifli olanlarda ise %3.89 ile en düşük, %59.69 ile en yüksek kütle kazanımı olmuştur. Katışık lifli olanların kütle kazanımı sırasıyla en düşük ve en yüksek, %30.24 ve %109.30 olarak gerçekleşmiştir (Şekil 68). Çelik lifli numunelerde daha fazla görülen kütle artışı eğilimi çelik liflerin kompozitlerin boşluk oranı üzerindeki etkisiyle ilgilidir. Polyester lifli olan numuneler nispeten daha yoğun olduğundan, daha az boşluk oranına ve dolayısıyla daha az penetrasyon/depozisyona sahiptir. Bir başka deyişle, yüksek miktarda uzun lif içeren matriste bulunan gözenekler ve hava kabarcıklarının bulunmasıdır. Bu da işlenebilirlik sorunlarına, homojen olmayan lif dağılımına ve lif topaklanmasına neden olmaktadır (Shah vd., 2020; Wang vd., 2019; Farhan vd., 2022).

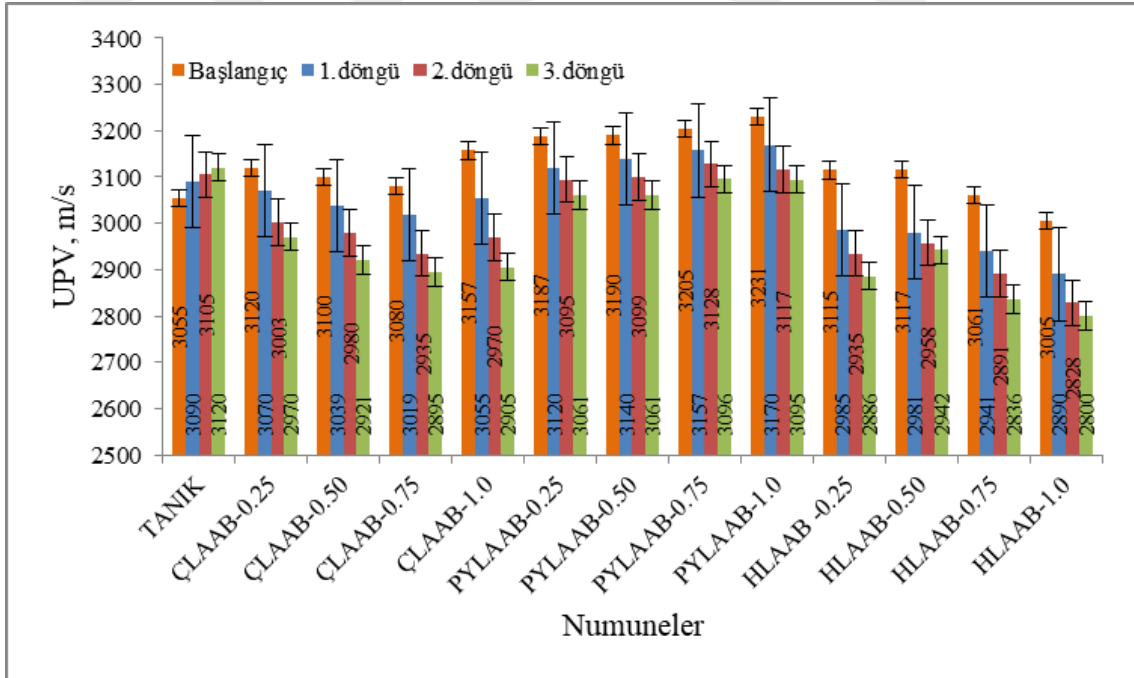
5.4.8.2. Sülfat Etkisindeki Numunelerin UPV Değerleri

Tanık ve LAAB numunelerinin sülfat etkisi (%5 Na_2SO_4 ve %10 Na_2SO_4) öncesi ve sonrası UPV değerleri Şekil 69 ve Şekil 70'te sırasıyla verilmiştir. Ultrases geçiş hızı

deneyinden elde edilen verilere bakıldığında hafif sülfat etkisinde (%5) tüm numunelerin UPV değerlerinde artış elde edildiği, şiddetli sülfat (%10) etkisinde ise numunelerin UPV değerlerinde düşüş olduğu görülmektedir.



Şekil 69. %5 Sülfat etkisindeki (hafif ortam) numunelerin ultrases geçiş hızları



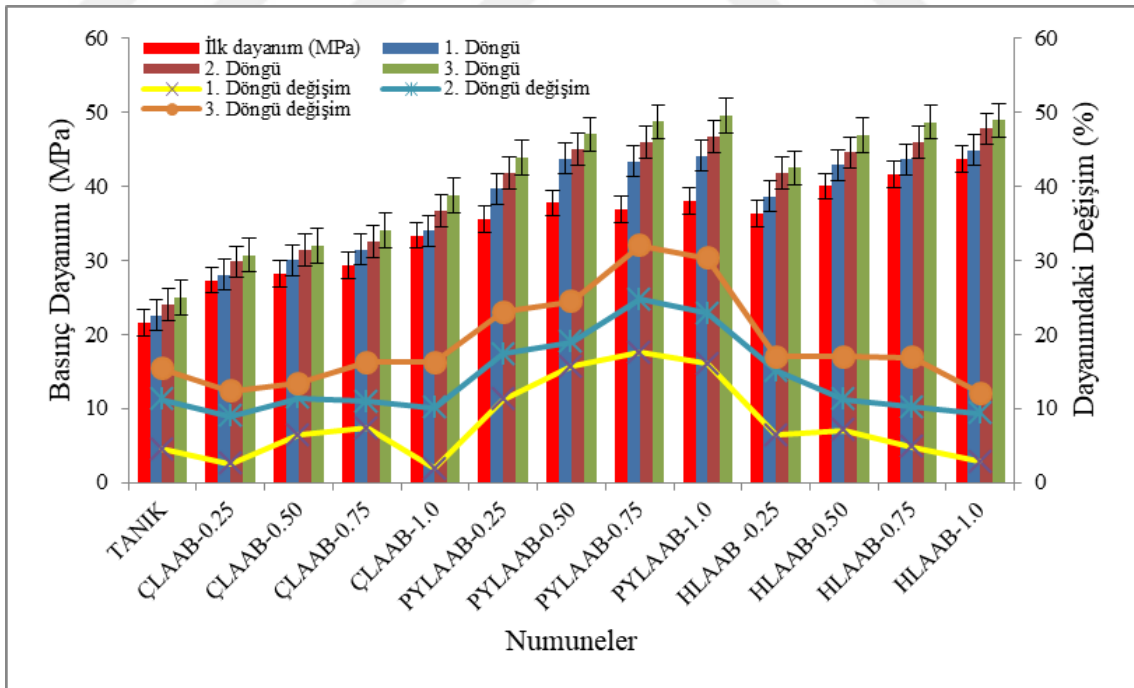
Şekil 70. %10 Sülfat etkisindeki (şiddetli ortam) numunelerin ultrases geçiş hızları

Şekil 69 incelendiğinde %5'lik hafif sülfat etkisine maruz kalan numunelerde her döngüde (x5 çevrim) UPV değerlerinde artış görülmektedir. Deney tamamlandığı anda en düşük UPV artış oranı %4.23 en yüksek ise %19.37 olmuştur. Bu durumun

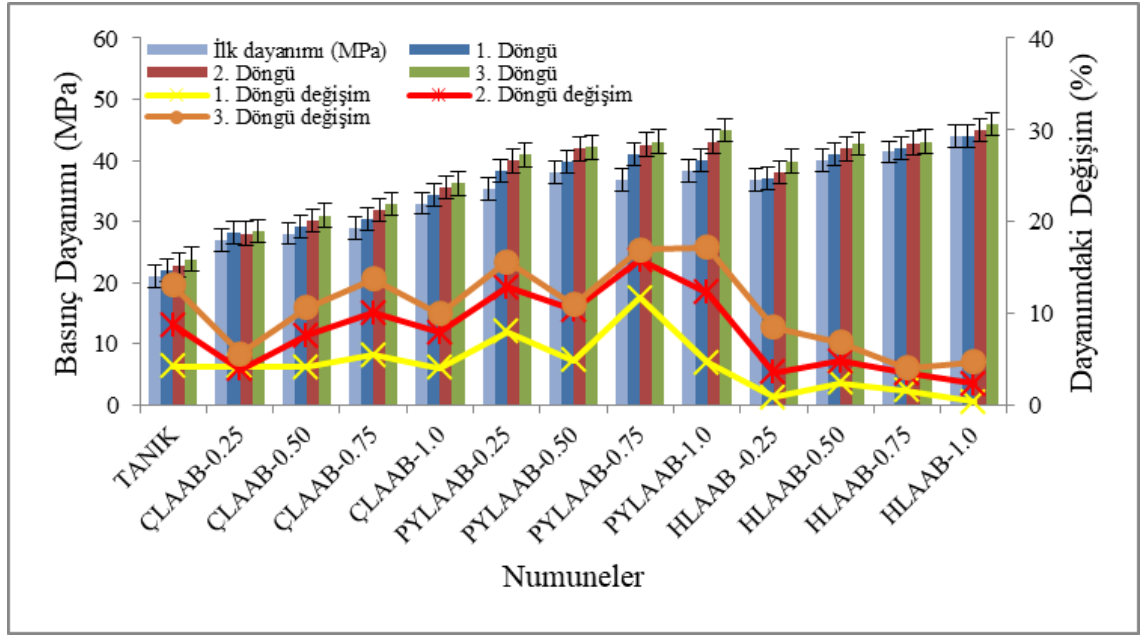
gerçekleşmesinde sülfat iyonlarının kompozit içerisinde doluluk oluşturmamasından kaynaklı olabileceği sonucuna varılmıştır. Ancak, şiddetli sülfat etkisinde (%10) ise Şekil 70'ten de görüleceği gibi UPV değerlerinde döngü sayısına bağlı olarak bir azalma söz konusudur. En fazla azalma %1 çelik lifli numunede %7.98, en düşük azalma ise %0.75 polyester lifli numunede %3.40 olarak gerçekleşmiştir. Şiddetli sülfat ortamında hafif ortam koşullarına göre UPV değerlerinde görülen bu azalma kompozitlerin içerisinde meydana gelen bozulmayı göstermektedir. Daha önce yapılan çalışmalarda da en uygun oranda lif kullanılan alkali aktivasyonlu beton numunelerinin sülfat etkisine karşı dirençlerinin daha yüksek çıktığı görülmüştür (Ranjbar ve Zhang, 2020; Ganesan vd., 2015; Yunsheng vd., 2008).

5.4.8.3. Sülfat Etkisindeki Numunelerin Basınç Dayanımı Bulguları

Alkali aktivasyon yöntemi ile tanık (lifsiz), farklı lif türünde ve çeşitli lif oranlarında üretilmiş olan beton numunelerinin 28 günlük ilk basınç dayanımları ile 15 ıslanma-kuruma (3 döngü) olacak şekilde %5 Na₂SO₄ ve %10 Na₂SO₄ çözeltisine maruz bırakıldıktan sonraki numunelerin basınç dayanımları ile dayanımlarındaki değişimler Şekil 71 ve Şekil 72'de grafiksel olarak gösterilmiştir.



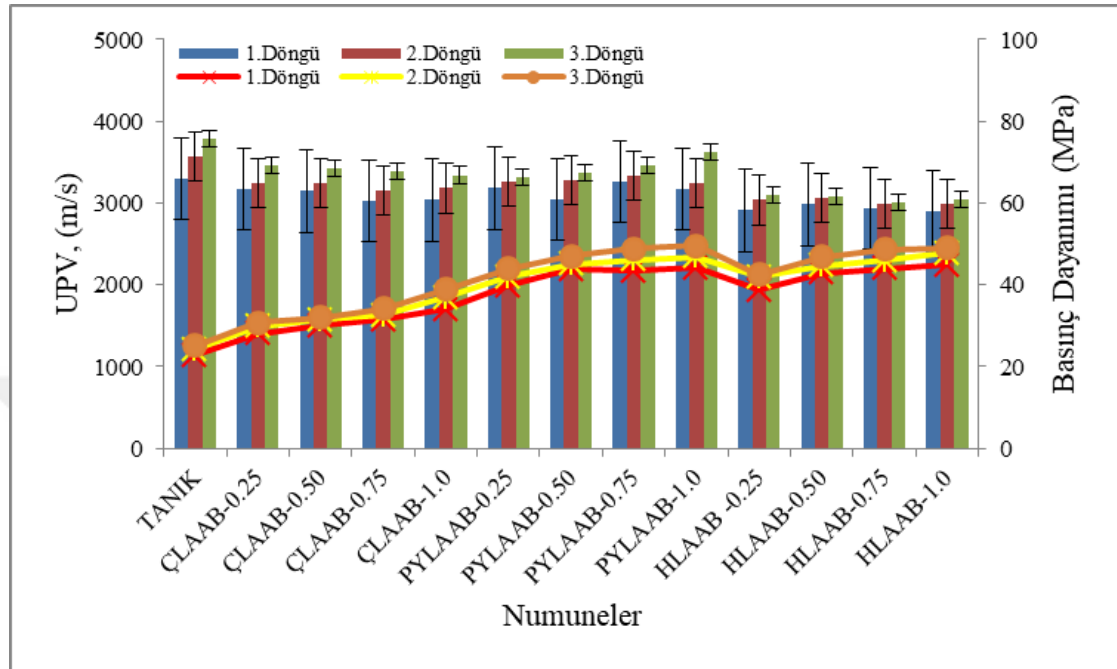
Şekil 71. Alkali aktivasyonlu betonların hafif sülfat (%5 Na₂SO₄) döngüleri sonucunda tanık numuneye göre basınç dayanımında görülen değişim



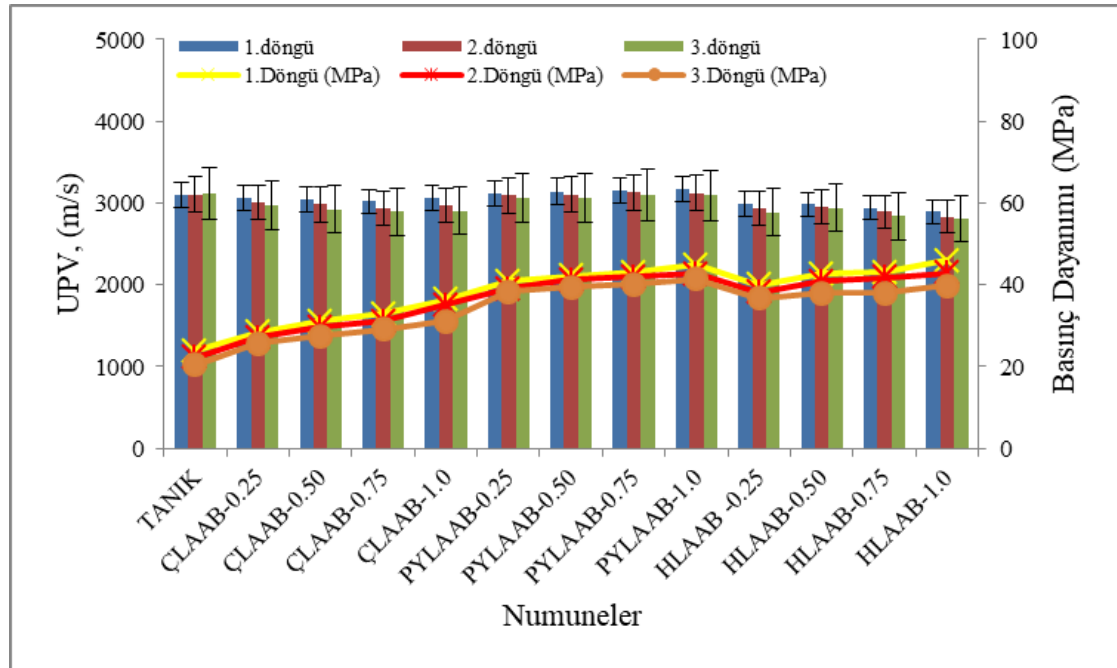
Şekil 72. Alkali aktivasyonlu betonların şiddetli sülfat (%10 Na₂SO₄) döngüleri sonucunda tanık numuneye göre basınç dayanımında görülen değişim

Şekil 71 ve Şekil 72 sırasıyla incelenecek olursa LAAB numunelerinin büyük bir kısmında basınç dayanımı değeri artmıştır. Bu artış LAAB numunelerinin sülfatlı ortam koşullarına karşı dirençli olmasıyla ilişkilendirilebilir. Bununla birlikte, hafif sülfat (%5) etkisinde numunelerde basınç dayanım değişimi daha yüksek iken şiddetli sülfat (%10) koşullarında basınç dayanım değişimi daha düşük olmaktadır. Hafif ortamda en düşük katışık numunelerde %12.11 ile gerçekleşirken en yüksek polyester lifli olan numunelerde %32.07 olarak gerçekleşmiştir. Şiddetli sülfat koşullarında ise en düşük %4.03 ile %1 katışık lifli numunede görülürken en yüksek %0.75 polyester lifli numunede %17.16 olarak gerçekleşmiştir. Daha önceki araştırmalarda, bu durumun oluşmasında lif katkısının köprü görevini yerine getirmesi ve bağlayıcı fazda daha yoğun bir mekanik bağ oluşumuna neden olması vurgulanmıştır (Dawood ve Ramli, 2011; Sabu ve Karthi, 2018). Ayrıca, hafif sülfat çözeltilerine bırakılan numunelerin basınç dayanımı artışının şiddetli sülfat çözeltisine bırakılan numunelerden daha fazla olması, LAAB numunelerinin iç yapısına nüfus eden sülfat iyonlarının alkali aktivasyon (geopolimerizasyon) reaksiyonuna daha hızlı katılarak kristalleşme göstermesiyle desteklenebilir. Alkali aktivasyon ile aktifleşebilen malzemelerin sülfatlı ortam koşullarına karşı yüksek direnç gösterebilmesi daha düşük bir Ca içeriğine sahip olan alüminosilikat polimer yapısında olan bağlayıcı malzemeye bağlı olmaktadır. Böylelikle, alkali aktivasyon yöntemi (geopolimerizasyon) ile meydana gelen ürünler, geleneksel portland çimentosunun hidrasyonu sonucu oluşan ürünlere göre sülfat saldırılarına karşı daha dirençli olmaktadır (Salami vd., 2017).

LAAB numunelerin hafif sülfat ortamındaki UPV değerleri, basınç dayanımı değerleri ile uyumlu olarak lif türüne ve oranına bağlı olarak artmaktadır. Buna karşın şiddetli sülfat koşullarında ise UPV değerleri azaldıkça basınç dayanımları azalmaktadır (Şekil 73, Şekil 74).



Şekil 73. Alkali aktivasyonlu beton numunelerinin hafif sülfat (%5) ortamındaki basınç dayanımı ile UPV değerleri arasındaki ilişki



Şekil 74. Alkali aktivasyonlu beton numunelerinin şiddetli sülfat (%10) ortamındaki basınç dayanımı ile UPV değerleri arasındaki ilişki

Şekil 73'te hafif sülfat şartlarında sülfat etki süresi (döngü sayısı) arttıkça UPV değerleri en düşük %2.24 en yüksek ise %14.58 artmıştır. Basınç dayanımında da en düşük %6.55 en yüksek ise %14.06'lık bir artış olmuştur. Ancak, sülfat yoğunluğu (%10 Na₂SO₄) ve etki süresi (döngü sayısı) arttıkça UPV ve basınç dayanım değerleri beklendiği gibi düşmüştür (Şekil 74). En yüksek UPV düşüşü %1 çelik lifli numunede %4.91 olurken en az UPV düşüşü %0.5 katışık lifli numunede %1.31 olarak gerçekleşmiştir. Benzer şekilde basınç dayanımındaki azalma en düşük %5.98 ile %0.25 polyester lifli numunede gerçekleşirken en yüksek %14.45 ile %1.0 çelik lifli numunede gerçekleşmiştir. Buradan %5 oranındaki sülfatlı ortamın matris yapıyı güçlendirdiği için UPV ve basınç dayanım değerlerinin artmış, buna karşılık %10 şiddetli sülfat ortamının ise boşluklu yapı oluşturması nedeniyle UPV ve basınç dayanımı değerlerini düşürdüğü anlaşılmaktadır. Bununla birlikte şiddetli sülfat ortamında (%10 Na₂SO₄) bağlayıcı jellerin tahrip olması sonucu boşluklu yapının artması ile UPV ve dayanım değerlerinin düşmesi gerçekleşmiştir. Deneysel çalışmalar sonucunda LAAB numunelerinin basınç dayanımı ile UPV değerleri arasında iyi bir ilişki elde edilmiştir. Deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen UPV ve basınç dayanımı değerleri daha önce yapılan çalışmalardan elde edilen veriler ile uyumludur (Kantarcı vd., 2019; Ghosh vd., 2018; Yadollahi vd., 2015; Noushini ve Castel, 2016).

5.4.9. Çok Amaçlı Optimizasyon ile AAB'lerin Mekanik Özellikleri ve Maliyet Analizi

Sayısal optimizasyon teknikleri kullanılarak birden fazla tepkinin aynı anda optimize edilebilmesi için her bir tepkiye göre hesaplanan arzu edilebilirlik fonksiyonu (d_j) kullanılmaktadır. Burada 0 ile 1 arasında ($0 \leq d_j \leq 1$) değerler alabilen arzu edilebilirlik fonksiyonu, amaç fonksiyonu olup optimizasyonda dikkate alınan her bir tepki için ayrı ayrı hesaplanmaktadır (Bhutta vd., 2017). Bu çalışmada göz önüne alınan tepkiler; basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı ve eğilmede çekme dayanımları ile elastisite modülü, kırılma enerjisi ve maliyettir. Üretilen betonlara ait altı farklı tepki için hesaplanmış tekil arzu edilebilirlik fonksiyonu değerleri ve bunlara bağlı olarak elde edilen kompozit arzu edilebilirlik fonksiyonu değerleri Tablo 23'te verilmiştir. Bu uygulamada mekanik özellikleri en üst düzeye çıkarmak ve aynı zamanda maliyetleri en aza indirmek esas alınmıştır.

Tablo 23. AAB'lerin erişilebilirlik fonksiyonları

Numuneler	Tekil arzu edilebilirlik fonksiyonları						Kompozit arzu edilebilirlik fonksiyonu (D)
	Basınç dayanımı (d ₁)	Elastisite modülü (d ₂)	Yarmada çekme dayanımı (d ₃)	Eğilmede çekme dayanımı (d ₄)	Kırılma enerjisi (d ₅)	Maliyet (d ₆)	
TANIK	0.135	0.117	0.000	0.000	0.000	0.085	0.000
ÇLAAB-0.25	0.167	0.141	0.153	0.033	0.078	0.112	0.138
ÇLAAB-0.50	0.179	0.227	0.198	0.125	0.197	0.248	0.191
ÇLAAB-0.75	0.374	0.351	0.276	0.294	0.204	0.389	0.307
ÇLAAB-1.00	0.407	0.502	0.359	0.346	0.554	0.412	0.424
PYLAAB-0.25	0.142	0.138	0.175	0.102	0.103	0.108	0.125
PYLAAB-0.50	0.240	0.247	0.208	0.199	0.159	0.189	0.205
PYLAAB-0.75	0.387	0.349	0.389	0.328	0.287	0.267	0.331
PYLAAB-1.00	0.498	0.654	0.406	0.402	0.600	0.354	0.474
HLAAB-0.25	0.182	0.244	0.190	0.119	0.165	0.190	0.178
HLAAB-0.50	0.271	0.378	0.284	0.150	0.265	0.282	0.262
HLAAB-0.75	0.384	0.391	0.457	0.338	0.306	0.379	0.373
HLAAB-1.00	0.505	0.478	0.594	0.494	0.680	0.450	0.528

Kompozit arzu edilebilirlik fonksiyonu (D) değerleri (Tablo 23) incelendiğinde, numuneler içerisinde 0.528 değeri ile HLAAB-1.0; D değeri en yüksek olup betonun mekanik özelliklerini en üst düzeye çıkarırken aynı zamanda en düşük maliyete sahip karışım olduğu görülür. Birim maliyeti hesaplamak için beton karışım bileşenleri dikkate alınmış, ancak nakliye maliyetleri hesaba katılmamıştır. Benzer bir yaklaşım daha önceki çalışmalarda da kullanılmıştır (Khan vd., 2018b; Aydın ve Baradan, 2013).

6. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Bağlayıcı olarak endüstriyel üretim sonucunda oluşan yapay bir atık olan ÖYFC ve yine endüstriyel üretim yapan taş ocağının atığı olan kayaç tozunun (KT) ise ince (filler) malzeme yerine kullanılarak, bunların çeşitli aktivatörler ile tepkimesi (aktivasyonu) sonucu çelik ve polyester liflerin ayrı ayrı ve katışık biçimde uygulamalarının, 4 farklı karışım oranında (%0.25; %0.50; %0.75 ve %1.0) kullanılması ile AAB ve LAAB'lerin üretilip taze ve sertleşmiş beton deneylerinin yanısıra dayanım ve dayanıklılık deneylerinin de yapıldığı bu çalışmadan elde edilen sonuçlar şu şekildedir:

- En yüksek tane boyutu 100µ olan kayaç tozu malzemesi, TS 25 standardı uyarınca, 90 µ'luk elek üzerinde en çok %10 kütle kalıntısı bırakacak incelikte doğal olarak bulunmaktadır. Kayaç tozunun ayrıca öğütülmesine gerek olmadığından, elde edilecek son ürünün oluşum enerjisini (embodied energy) artırmayacağından bir kazanım oluşturmaktadır. Puzolanik aktivite deneyleri ile belirlenen, KT+çimento karışımlarının 7 ve 28 günlük ortalama eğilmede çekme dayanımı ve basınç dayanımı değerleri incelendiğinde kayaç tozu miktarının arttırılmasının her iki dayanım değerini de düşürdüğünü göstermektedir. Kayaç tozunun içerdiği yüksek silis, KT'nin harç içerisinde kütlece %20 oranına kadar arttırılmasıyla dayanıma olumlu etki etmektedir.
- Puzolanik malzemenin yeterli aktiviteyi gösterebilmesi için, yeterince ince taneli olması, amorf yapıya sahip olması ve yeterli miktarda “silis + alumin + demir oksit” içermesi gerekmektedir. Malzeme yeterince ince taneli ve yeterli oranda amorf yapı göstermekte olup aynı zamanda oldukça yüksek “silis + alumin + demir oksit” (% m=84.25) toplam oranı içermektedir. Böylece, Erzincan yöresine ait malzeme Puzolan özellik göstermiş olmaktadır. Çalışma sonucunda elde edilen veriler, KT katkılı çimento üretiminin düşük maliyet, enerji etkinliği ve CO₂ emisyonlarındaki azalma ile çok yönlü yarar sağlayacağını göstermektedir.
- Beton grupları içerisinde lif oranı arttıkça tanık (lifsiz) betona göre serbets çökme (slump) değerlerinde azalma olduğu görülmüştür. Çelik lifli numunelerde lif oranına bağlı olarak %42.86 oranında bir azalma görülürken bu oran polyester lifli örneklerde %64.29 ve katışık lifli numunelerde ise %28.57 olarak gerçekleşmiştir. Polyester liflerin su tutmama özelliğinden dolayı çökme değerlerinde daha fazla düşüş olduğu düşünülmektedir. İşlenebilirlik bakımından polyester ve katışık lifli örneklerde olumsuz bir davranış görülmezken, çelik lifli örneklerde lif oranı %0.50'yi geçtiğinde lifler

topaklar oluşturarak bağdaşık olmayan bir şekilde dağılım göstermiştir. Ayrıca, kancalı çelik liflerin yüksek yüzey pürüzlülüğü LAAB'nin işlenebilirliğini azaltmıştır.

- Polyester (PY) lif kullanımının betonun birim kütlede kayda değer bir değişim yarattığı görülmemiştir. Ancak, çelik lifli numunelerde birim kütle lif oranına bağlı olarak artmaktadır. Çelik lif kullanımında birim kütle lif oranına bağlı olarak en fazla %3.9 artış gösterirken polyester lif kullanımında bu oran %1.6 ve katışık lif kullanımında ise %2.7 olarak gerçekleşmiştir. Bu durumun çelik lifin yoğunluğunun yüksek olması ve beton numunelerinde birim hacimde daha çok miktarda yer almasından kaynaklandığı düşünülmektedir.
- Çelik ve polyester lifli numunelerde lif oranı arttıkça hem doygun ve kuru birim hacim kütleleri artmakta hem de su emme ve gözeneklilik (porozite) değerleri düşmektedir. Bu durumun, ÖYFC ile kullanılan puzolanik özellikli ve alimünosilikat içeriği yüksek olan KT'nin alkali aktivasyon sonucu oluşan N-A-S-H jelinin daha yoğun gelişmesine neden olması ve liflerin üç boyutlu olarak boşlukları doldurma davranışı ile ilişkili olduğu düşünülmektedir. Ayrıca, göreceli düşük su emme oranının, az da olsa gözeneklilik (porozite) oranına bağlı olarak düşüş gösterdiği görülmektedir. Bu durumun beton numuneleri içerisinde birbiriyle bağlantılı boşluk miktarının az olması ve numunelerin hava sürüklenmiş beton özelliğine benzer bir davranış göstermesinden kaynaklandığı düşünülmektedir.
- Ultrases geçiş hızı deneylerinde çelik lifli örneklerin lif oranının %0.5'e kadar olanlarında değerlerin doğrusal olarak arttığı lif oranı %0.5 ten fazla olanlarda ise %1.5 oranında azaldığı görülmüştür. Polyester lifli numunelerde ise lif oranı arttıkça tanık betona göre %5.3 oranında bir artış sağladığı görülmüştür. Katışık lifli örneklerde de %5.9 oranında artış görülmüştür. Çelik lifli numunelerde lif oranının belirli bir seviyeden sonra (%0.5) beton içerisinde boşluk miktarını artırdığından ses dalgalarının geçiş hızında da bir azalma olduğu anlaşılmaktadır. Fakat polyester lif içeren betonlarda ses geçiş hızının tanık numunelerine oranla daha yüksek olduğu görülmektedir. Dolayısıyla bu sonucun betonun boşluk oranının az da olsa azalmasından ve betonun yoğunluğunun artmasından kaynaklandığı söylenebilir. Polyester lifin elyafımsı yapısı nedeniyle, beton bileşenleri arasında bulunan boşluklarda daha iyi yer aldığı düşünülmüyor. Bu, beton boşluk oranını azaltıyor. Schmidt değerlerine bakıldığında da benzer bir davranış görülmüştür. Çelik lifli numunelerin özellikle 28 günlük numunelerinin schmidt değerlerine bakıldığında, bu değerlerin tanık betona göre azaldığı görülürken polyester ve katışık lifli numunelerin lif oranına bağlı olarak sırasıyla %16.1 ve %8.3 oranlarında artış görülmüştür. Bu durumun da çelik lifin

özellikle ağırlığından dolayı kalıpta sıkıştırılırken beton yüzeyinde tutunamaması ve yüzeyinin polyester ve katışık numunelerin yüzeylerine göre daha boşluklu olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

- Özellikle 28 günlük basınç dayanımlarında çelik lifin %0.5 oranında uygulama sınırına kadar basınç dayanımında %13.7 oranında iyileşme olduğu, buna karşın polyester lif uygulamasında ise %27.7 daha yüksek oranlarda artış kaydedildiği görülmüştür. Liflerin katışık kullanımında ise bu oran %37.9 olmaktadır. Polyester liflerin betonun basınç dayanımında sağladığı iyileşme, işlenebilirlik açısından polyester liflerin su tutmaması ve ekstra suya ihtiyaç olmadığını, böylelikle w/c oranında herhangi bir artış olmamasının basınç dayanımını olumlu etkilemesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Liflerin katışık kullanımlarında da polyester lifin özelliğinin numune davranışına hakim olduğu sonucuna varılmıştır.
- Çelik lifli numunelerde lif oranının E (elastisite modülü) değerleri üzerinde tanık betona göre anlamlı bir etkisinin olmadığı ve %1.0 lif kullanımında sadece %5.3 oranında artış olduğu belirlenmiştir. Polyester lifli numunelerde lif oranı arttıkça %13.4 oranında en yüksek E değeri artışı görülmektedir. Katışık lifli örneklerde ise lif oranı arttıkça E değerlerinde anlamlı bir değişiklik olmadığı, buna karşın liflerin %0.5 oranında katışık kullanımının E değerini tanık betona göre %8.7 oranında arttırdığı görülmüştür. Bu durumun her iki lifin çekme özelliğinin bir arada kullanımının numuneleri daha sünek yaptığından kaynaklandığı düşünülmektedir.
- Numunelerin poisson oranlarına bakıldığında, çelik lifli örneklerde lif oranının %0.5 olduğu örnekte tanık betona göre %101.6 oranında artış gösterdiği, polyester lifli olanlarda, lif oranının %0.5 olduğu örnekte tanık betona göre %61.7 oranında artış sağladığı görülmüştür. Katışık lif kullanımında ise lif oranının %0.5 olduğu durumda tanık betona göre %164.1 oranında artış elde edilmiştir. Geleneksel betonun poisson oranının 0.1 ile 0.3 arasında olduğu düşünüldüğünde liflerin katışık kullanımında daha düşük lif oranlarında bu değerlerin sağlandığı görülmüştür. Bu durumun da elastisite değerinde olduğu gibi her iki lifin çekme özelliğinin bir arada kullanımının numuneleri daha sünek yaptığından kaynaklandığı düşünülmektedir.
- Çelik lifli numuneler tanık betona göre aşınma oranını %50 arttırırken, polyester lifli numuneler bu oranı %22.8 azaltmaktadır. Katışık lifli numunelerde ise aşınma miktarı tanık betona göre %33.7 daha az görülmüştür. Çelik lifli betonlarda tellerin aşınma sırasında küçük parçalar yerine büyük parçaların kopmasına neden olmasının bu betonlarda lif oranına bağlı olarak aşınma miktarını arttırdığı düşünülmektedir. Diğer deneylerde gösterildiği gibi, polyester liflerin betonla daha iyi bağlanması ve karışım

işleminde sonra titreşim sırasında daha bağdaşık bir dağılım sergilemesi nedeniyle aşınma sırasında betonun direncini artırdığı söylenebilir. Aynı zamanda, çelik teller gibi davranmayarak, betondan daha büyük parçalar kopmasını önlediği düşünülmektedir. Katışık lifli numunelerde ise numuneler kalıplara yerleştirilirken, uygulanan titreşimden dolayı polyester liflerin, daha hafif olması nedeniyle çelik liflere oranla numune içerisinde daha eşit konumlanmasından kaynaklı aşınmaya karşı olumlu davranış gösterdiği düşünülmektedir.

- Yarmada çekme dayanımlarında çelik lifli olanlarda tanık numuneye göre dayanım artış oranı, lif oranı %1 olduğunda %102.4 iken, polyester lifli olanlarda lif oranı %1 iken %43.9 ve katışık lifli olanlarda ise lif oranı %1 iken artış oranı %71.3 olmuştur. Bu durum çelik liflerin yüksek çekme dayanımının numunelerde yük altında meydana gelen çekme gerilmelerine karşı daha etkili olduğunu göstermektedir.
- Numunelerin ilk tepe yükünden sonraki yük kayıpları tanık numuneye göre ortalama %36.5 ile en yüksek polyester liflilerde görülürken, en düşük yük kaybı ortalama %18.3 ile çelik liflilerde görülmüş, katışık liflilerde ise yük azalması ortalama %24.5 olarak gerçekleşmiştir. Bu durumun, polyester liflerin düşük sertlikte son derece esnek özelliğinden dolayı polyester lifli numunelerde ilk tepe yükünden sonra önemli bir düşüş olduğunu, çelik liflerin ise yüksek dayanım ve sertlik özelliği nedeniyle lif miktarına bağlı olarak çelik lifli numunelerde yük kaybının çok daha az olarak ortaya çıktığını göstermektedir. Liflerin katışık kullanımında da hem birinci tepe yükünde hem de ikinci tepe yükünde çelik liflerin özelliklerinin numune davranışı üzerinde etkisi olmuş ve lif miktarı arttıkça yük kayıp miktarı azalmıştır.
- Beton örnekleri tokluk açısından değerlendirildiğinde genel olarak lif miktarı arttıkça numunelerin tokluk miktarları artmıştır. Polyester liflilerde tanık numuneye göre %69.4 ile en yüksek, çelik liflilerde %58.5 ile en düşük, katışık liflilerde ise %61.4 olarak gerçekleşmiştir. Böylece, hem polyester liflerin hem de çelik liflerin matris çatlamasının ötesinde bir yük taşıma kabiliyetinin, lifsiz tanık alkali aktivasyonlu beton matrisinden daha yüksek olduğu anlaşılmaktadır.
- Kullanılan liflerin maliyeti hesaba katıldığında, optimizasyon yaparak hem ekonomik hem de yüksek üstünlüklü çözümler bulunabilir. Günümüzde, paket programlarının sunduğu çok amaçlı optimizasyon, regresyon analizi ve tepki yüzey yöntemi gibi başarımlar ve maliyet oranı göz önünde bulundurularak uygulamaya yönelik çeşitli çözümler sunulabilir. Bu çalışmada, kullanılan lif içeriği 46.15 kg/m^3 ve kullanım şekli katışık olup en uygun değer olarak elde edilmiştir.

- Donma-çözölme döngülerinden elde edilen sonuçlara bakıldığında çelik lifli numunelerin donma-çözölme döngülerinde en çok hasar alan numuneler olduğu görülmüştür. %1 çelik lifli numunede kütle kaybı %10.13 ile en yüksek iken %1 polyester lifli olan numunede %7.23 ile en düşüktür. Liflerin %1 katışık kullanımında ise %8.66 oranında bir kütle kaybı olmuştur. Dayanım kayıpları 120 döngü sonunda %17.86 ile %52.23 arasında değişmiştir. Dayanıklılık faktörü ise özellikle düşük oranlardaki çelik lifli numuneler %40'ın altında iken polyester lifli numuneler %40-%60 aralığında katışık lifli olan numunelerin dayanıklılık faktörünün ise %60'ı aştığı görülmüştür. Bu durumun sentetik liflerin alkali aktivasyonlu betonda bağlayıcı matris ile daha iyi kenetlenme yaptığı ve daha az birbirinden bağımsız boşluk yapısı oluşturmamasından kaynaklandığı düşünülmektedir.
- Sülfat etkisinde numune davranışlarına bakacak olursak tanık numuneye göre çelik lifli olanlarda %5 Na₂SO₄ çözeltisinde %37.31 ile en düşük %83.33 ile en yüksek kütle kazanımı gerçekleşmiştir. Polyester liflilerde ise %6.54 ile en düşük kütle kazanımı olurken %54.16 ile en yüksek gerçekleşmiştir. Katışık lif kullanımında ise kütle kazanımı en düşük %17.69 iken en yüksek ise %71.43 olarak gerçekleşmiştir. Şiddetli sülfat (%10) etkisinde ise çelik lifli olanlarda en düşük %15.27, en yüksek ise %101.99 olmuştur. Polyester lifli olanlarda ise %3.89 ile en düşük, %59.69 ile en yüksek kütle kazanımı olmuştur. Katışık lifli olanların kütle kazanımı sırasıyla en düşük ve en yüksek, %30.24 ve %109.30 olarak gerçekleşmiştir. Çelik lifli numunelerde daha fazla görülen kütle artışı eğilimi çelik liflerin kompozitlerin boşluk oranı üzerindeki etkisiyle ilgili olduğu düşünülmektedir. Polyester lifli olan numuneler nispeten daha yoğun olduğundan, daha az boşluk oranına ve dolayısıyla daha az penetrasyon/depozisyona sahip olabileceği sonucuna varılmıştır.

Bu çalışmaya göre, çelik ve polyester liflerin hacimce %0.5 oranında katışık şekilde kullanımının liflerin ayrı ayrı kullanımlarına göre, betonun taze ve sertleşmiş özelliklerine katkısının daha yüksek olduğu ve lifsiz olarak üretilen tanık betona göre dayanım ve dayanıklılık özellikleri bakımından daha üstün özellikler gösterdiği elde edilen deneysel bulgulardan anlaşılmaktadır. Ayrıca, endüstriyel bir atık olan kayaç tozunun alkali aktivasyonlu beton üretiminde alternatif bir filler malzeme (uçucu kül, silis dumanı, metakaolin, kırmızı çamur vb.) olarak kullanılabileceği, atıkların depolanma ve bertaraf edilme sorununa bir çözüm üreterek çevre kirliliğini azaltabileceği gibi bölge ekonomisine de katkıda bulunacağı sonucuna varılmıştır.

KAYNAKÇA

- ACI 116R (2000). Cement and Concrete Terminology. Technical Documents. notation and terminology, USA.
- Aksüt, Y. S. (2015). Erzincan-üzümlü yöresi volkanik kayaçlarının beton agregası olarak kullanılabilirliği, Yüksek Lisans Tezi, Gümüşhane Üniversitesi, Gümüşhane.
- Alberti, M. G., Enfedaque, A., Galvez, J. C., Canovas, M. F. ve Osorio, I. R. (2014). Polyolefin fiber-reinforced concrete enhanced with steel-hooked fibers in low proportions. *Materials and Design*, 60: 57–65.
- Albitar, M., Mohamed Ali, M. S., Visintin, P. ve Drechsler, M. (2017). Durability evaluation of geopolymer and conventional concretes. *Construction and Building Materials*, 136, 374-385.
- Ali, M. B., Saidur, R. ve Hossain, M. S. (2011). A review on emission analysis in cement industries, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 31 January, Volume 15, pp. 2252-2261.
- Ali, M. (2016). Use of coconut fibre reinforced concrete and coconut-fibre ropes for seismic-resistant construction, *Mater. Construction*. <https://doi.org/10.3989/mc.2016.01015>.
- Alkan, G. (2004). Polipropilen Lifli Betonların Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Al-mashhadani, M. M. M., Canpolat, O., Aygörmez, Y. ve Uysal, M. (2018). Mechanical and microstructural characterization of fiber reinforced fly ash based geopolymer composites. *Construction and Building Materials*, Cilt 167, pp. 505-513. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.061>
- Almeida, F., Cunha, V. M. C. F., Miranda, T. ve Cristelo, N. (2018). Indirect tensile behaviour of fibre reinforced alkali-activated composites, *Fibers*. <https://doi.org/10.3390/fib6020030>.
- Amran, M., Fediuk, R., Vatin, N., Lee, Y. H., Murali, G. ve Ozbakkaloglu, T. (2020). Fibre-reinforced foamed concretes: a review, *Materials* 13, <https://doi.org/10.3390/ma13194323>.
- Amran, M., Fediuk, R., Abdelgader, H. S., Murali, G., Ozbakkaloglu, T., Lee, Y. H. ve Lee, Y. Y. (2022). Fiber-reinforced alkali-activated concrete: A review, *Journal of*

- Aral, M. (2006). Karma Lif İçeren Çimento Esaslı Kompozitlerin Mekanik Davranışı Bir Optimum Tasarım, İstanbul Teknik Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- Arunagiri, K., Elanchezhian, P., Marimuthu, V., Arunkumar, G. ve Rajeswaran, P. (2017). Mechanical properties of basalt fiber based geopolymer concrete. International Journal of Science, Engineering and Technology Research (IJSETR), 6: 551-556.
- Arunkumar, K., Sureshkumar, A., Ganesh, A.C. ve Parthiban, L. (2022). Optimization of hybrid fibre reinforced geopolymer concrete using hardened and durability properties, Res. Eng. Struct. Mater.
- Ashby, M.F. (2013). Chapter 11 - sustainability: living within our means, in: Mater. Environ, second ed. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385971-6.00011-7>.
- ASTM C 1609 (2019). “Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam with Third-Point Loading) ”.
- ASTM C496 (2017). “Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens”.
- ASTM C597 (2016). Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete. West Conshohocken: ASTM International.
- ASTM IC1012/C1012M–18b (2015). Standard test method for length change of hydraulic-cement mortars exposed to a sulfate solution. In: ASTM International, 11, pp 5–9. <https://doi.org/10.1520/ C1012>.
- ASTM C 618 (2012). Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete, American Society for Testing and Materials.
- ASTM C 666-97 (2004). Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing, Concrete and Mineral Aggregates, Annual Book of ASTM Standards, Philadelphia, USA, 4 (2): 1-6.
- ASTM C 597 (2002). Standard test method for pulse velocity through concrete. Annual Book of ASTM Standards. Philadelphia, PA, USA.
- ASTM C 944 (1999). Standard Test Method for Abrasion Resistance of Concrete or Mortar Surfaces by the Rotating-Cutter Method, 1-4.

- Aswani, E. ve Karthi, L. (2017). A literature review on fiber reinforced geopolymer concrete. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 8(2), 408-411.
- Awang, H. ve Ahmad, M. H. (2014). Durability properties of foamed concrete with fiber inclusion, *Int. J. Civ. Struct. Construct. Archit. Eng.* 8.
- Aydin, S. ve Baradan, B. (2013). The effect of fiber properties on high performance alkali-activated slag/silica fume mortars, *Compos. B Eng.*, <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.09.080>.
- Azarsa, P. ve Gupta, R. (2020). Durability and leach-ability evaluation of K-based geopolymer concrete in real environmental conditions, *Case Studies Constr.* 13. e00366.
- Bakharev T. (2005). Geopolymeric materials prepared using Class F fly ash and elevated temperature curing. *Cement and Concrete Research*, 35: 1224- 1232.
- Balçıkanlı, M. (2016). Alkalilerle aktive edilmiş çimentosuz cüruflu betonların mekanik ve geçirimsizlik özellikleri ve üretim optimizasyonu, İskenderun Teknik Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Hatay.
- Banthia, N. ve Nandakumar, N. (2003). Crack Growth Resistance of Hybrid Fiber Reinforced Cement Composites, *Cement and Concrete Composites*, 25, 3-9.
- Baradan, B. (2015). *Beton*, İzmir: Dokuz Eylül Üniversitesi.
- Bashar, I.I., Alengaram, U.J., Jumaat, M.Z., Islam, A., Santhi, H. ve Sharmin, A. (2016). Engineering properties and fracture behaviour of high volume palm oil fuel ash based fibre reinforced geopolymer concrete, *Construct. Build. Mater.* <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.022>.
- Behera, P., Baheti, V., Militky, J. ve Louda, P. (2018). Elevated temperature properties of basalt microfibril filled geopolymer composites. *Construction and Building Materials*.
- Bhutta, A., Farooq, M. ve Banthia, N. (2018). Matrix hybridization using waste fuel ash and slag in alkali-activated composites and its influence on maturity of fiber-matrix bond, *Journal of Cleaner Production*, Volume 177, Pages 857-867, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.001>.
- Bhutta, A., Borges, P. H. R., Zanotti, C., Farooq, M. ve Banthia, N. (2017). Flexural behavior of geopolymer composites reinforced with steel and polypropylene macro fibers. *Cement and concrete composites*, 80: pp. 31-40.
- Bondar D., Lynsdale C. J. ve Milestone N. B. (2013). Alkali- activated natural pozzolan concrete as new construction material. *ACI Materials Journal*, 110: 3.

- Canbaz, M. ve Çelikten, S. (2020). Kırılmış Atık Taşıt Lastiklerinin SIFCON Üretiminde Farklı Bağlayıcılarla Değerlendirilmesi, ESOĞÜ Müh. Mim. Fak. Derg., 28 (1), 9–15.
- Canbaz, M. (2001). Silis Dumanlı Betonların Mikro Yapısının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir, s. 85, 2001.
- Caneda-Martínez, L., Moisés, F., Javier, S., Nuria, R., Elena, F. ve César, M. (2022). Durability of eco-efficient binary cement mortars based on ichu ash: Effect on carbonation and chloride resistance, Cement and Concrete Composites, (131), 104608, <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2022.104608>.
- Charles, N. (2024). Fiber Reinforced Concrete Applications. FRCA Fiber Reinf. Concr. Assoc. n.d.:1. <https://fiberreinforcedconcrete.org/fiber-reinforced-concrete/applications/>
- Chen, R., Ahmari, S. ve Zhang, L. (2014). Utilization of sweet sorghum fiber to reinforce fly ash-based geopolymer, J. Mater. Sci. 49, 2548–2558, <https://doi.org/10.1007/s10853-013-7950-0>.
- Cheng T. W. ve Chin J. P. (2003). Fire-resistant geopolymer produced by granulated blast furnace slag. Mineral Engineering, 16: 205- 210.
- Choi, J. Il., Song, K. Il., Song, J. K. ve Lee, B. Y. (2016). Composite properties of high-strength polyethylene fiber-reinforced cement and cementless composites, Compos. Struct., <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.11.046>.
- Chowdhury, U. (2013). Alkali activated systems understanding the influence of curing conditions and activator type/chemistry on the mechanical strength and chemical structure of fly ash/slag systems. Arizona State University, Master of science.
- Comrie, D. C. ve Davidovits, J. (1988). Long Term Durability of Hazardous Toxic and Nuclear Waste Disposals, Proceedings of Geopolymer88; First European Conference on Soft Mineralurgy, Compiègne.
- CPTP (2010). Geopolymer Concrete. *Techbrief*, 10(14).
- Çınar, B. (2007). Osmaniye Çağsak Amanos Kırmızı Mermerlerinin Fizikomekanik Özelliklerinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Adana, 57s.
- Çullu, M., Bolat, H., Şimşek, O., Durmuş, G. ve Can, Ö. (2014). The effects of macro synthetic fiber reinforcement use on physical and mechanical properties of concrete. Composites part B:Engineering, Cilt 61, pp. 191-198.

- Damilola, O. M. (2013). Syntheses, characterization and binding strength of geopolymers: a review. *International Journal of Materials Science and Applications*, 2(6), 185–193.
- Das, S. K. ve Shrivastava, S. (2021). Siliceous fly ash and blast furnace slag based geopolymer concrete under ambient temperature curing condition, *Struct. Concr.* 22, E341–E351. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.130228>.
- Davidovits, J., Comrie, D. C., Paterson, J. H. ve Ritcey, D. J. (1990). Geopolymeric concretes for environmental protection, *Concrete International*, 12(7), 30–40.
- Davidovits, J. (2006). *Fire proof, heat resistant composites*, [Çevrimiçi] Available at: <https://www.geopolymer.org/applications/fire-proof-heat-resistant-composites/> [Erişildi: 21 12 2019].
- Davidovits, J. (2011). *Geopolymer Chemistry and Applications*, third ed. Institute of Geopolymers.
- Dawood, E. T. ve Ramli, M. (2011). Contribution of hybrid fibers on the properties of high strength concrete having high workability. *Procedia Engineering*, 14, 814–820. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.07.103>
- Djobo, J. N. Y., Elimbi, A., Tchakouté, H. K. ve Kumar, S. (2016). Mechanical properties and durability of volcanic ash based geopolymer mortars. *Construction and Building Materials*, 124, 606–614. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.141>
- Dong, M., Elchalakani, M., Karrech, A. ve Yang, B. (2020). Long-term strength of alkali-activated mortars with steel fibres cured in various conditions, *J. Mar. Sci. Eng.*, <https://doi.org/10.3390/JMSE8040278>.
- Duxson, P., Provis, J. L., Lukey, G. C. ve Van Deventer, J. S. (2007). The role of inorganic polymer technology in the development of ‘green concrete’. *Cement and Concrete Research*, 37(12), 1590–1597.
- Ekaputri, J. J., Junaedi, S. ve Wijaya, Y. P. (2016). Effect of curing temperature and fiber on metakaolin-based geopolymer. *Sustainable civil engineering structures and construction materials*.
- Ekincioglu, Ö. (2003). Karma Lif İçeren Çimento Esaslı Kompozitlerin Mekanik Davranışı-Bir Optimum Tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- El-Gamal, S. M. A. ve Selim, F. A. (2017). Utilization of some industrial wastes for eco-friendly cement production. *Sustainable Materials and Technologies*, 12, 9–17.

- El-Hassan, H. ve Elkholy S. (2021). Enhancing the performance of Alkali-Activated Slag-Fly ash blended concrete through hybrid steel fiber reinforcement, *Construction and Building Materials*, (311), 125313.
- Erdoğan S. T. (2014). Jeopolimerler Çevre Dostumudur? *Çimento ve Beton Dünyası*,107,50-55.
- Eren, N. A., Alzebaree, R., Çevik, A., Nis, A., Mohammedameen, A. ve Gülsan, M. E. (2021). The effects of recycled tire rubbers and steel fibers on the performance of self-compacting alkali activated concrete, *Period. Polytech. Civ. Eng.* 65, 890–900, <https://doi.org/10.3311/PPci.17601>.
- Esen, Y. (2003). Poliakrilonitril lifli betonların donma-çözülme dayanımlarının deneysel olarak incelenmesi. *Doğu Anadolu Bölgesi Araştırmaları* 3, Muş, 82- 86.
- Farhan, K. Z., Johari, M. A. M. ve Demirboğa, R. (2022). Evaluation of properties of steel fiber reinforced GGBFS-based geopolymer composites in aggressive environments, *Construction and Building Materials*, Volume 345. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128339>.
- Farhan, N. A., Sheikh, M. N. ve Hadi, M. N. S. (2018). Behaviour of Ambient Cured Steel Fibre Reinforced Geopolymer Concrete Columns Under Axial and Flexural Loads Structures. 15, 184–195, <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2018.07.001>.
- Fediuk, R., Mosaberpanah, M. A. ve Lesovik, V. (2020). Development of fiber reinforced self-compacting concrete (FRSCC): towards an efficient utilization of quaternary composite binders and fibers, *Adv. Concr. Construct.* 9, 387–395.
- Francisco J. J. P., Elena J. V., Raquel R. O., Ryumán D. M., Celso H. D., Judith R. D. ve Eduardo G. D. (2024). Pozzolanic activity of volcanic ashes produced by the eruption of the Tajogaite Volcano in La Palma, Canary Islands, *Construction and Building Materials*, (419), 135498. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135498>.
- Ganesh, A. C. ve Muthukannan, M. (2021). Development of high performance sustainable optimized fiber reinforced geopolymer concrete and prediction of compressive strength, *Journal of Cleaner Production*, 282, 124543.
- Ganesan, N., Indira, P. V. ve Santhakumar, A. (2013a). Engineering properties of steel fibre reinforced geopolymer concrete, *Adv. Concr. Constr.* 1 (4), 305–318.
- Ganesan, N., Deepa Raj, S., Abraham, R. ve Sasi, D. (2013b). Fracture properties of fibre reinforced geopolymer concrete, *Int. J. Sci. Eng. Res.* 4 (5), 75–80.

- Ganesan N., Abraham R. ve Deepa Raj, S. (2015). Durability characteristics of steel fibre reinforced geopolymer concrete, *Construct. Build. Mater.*,93, pp. 471-476. [https://doi.org/ 10.1016/j.conbuildmat.2015.06.014](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.06.014).
- Ghernouti, Y., Rabehi, B., Bouziani, T., Ghezraoui, H. ve Makhlouifi, A. (2015). Fresh and hardened properties of self-compacting concrete containing plastic bag waste fibers (WFSCC), *Construction and Building Materials*, 82, 89–100.
- Ghosh, R., Sagar, S. P., Kumar, A., Gupta, S. K. ve Kumar, S. (2018). Estimation of geopolymer concrete strength from ultrasonic pulse velocity (UPV) using high power pulser. *Journal of building engineering*, 16, 39-44. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2017.12.009>
- Guo, X. ve Pan, X. (2018). Mechanical properties and mechanisms of fiber reinforced fly ash–steel slag based geopolymer mortar. *Construction and Building Materials*, Cilt 179, pp. 633-641.
- Han, T. Y., Lin, W. T., Cheng, A., Huang, R. ve Huang, C. C. (2012), Influence of polyolefin fibers on the engineering properties of cement-based composites containing silica fume. *Materials and Design*, 37: 569–576.
- Hao, D. ve Jun, W. (2023). Carbon nanofibers and polyvinyl-alcohol fiber hybrid-reinforced high-performance concrete: Mechanical property, chloride penetration resistance, and material characterization, *Construction and Building Materials*, (399), 131891, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131891>.
- Hardjito D., Wallah S. E., Sumajouw D. M. J. ve Rangan B. V. (2003). Properties of geopolymer concrete with fly ash as source material: effect of mixture composition. 7th Canmet/ ACI International Conference on Recent Advances in Concrete Technology, Las Vegas USA.
- Hegarty, R. O', West, R., Reilly, A. ve Kinnane, O. (2019). Composite behaviour of fibre-reinforced concrete sandwich panels with FRP shear connectors, *Eng. Struct.* <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109475>.
- Hwang C. L. ve Lin C. Y. (1986). Strength development of blended blast furnace slag cement mortars. *Proceedings of the 2nd International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete*, Madrid, Spain, 2., American Concrete Institute, Detroit, MI, USA, 1986, 1323-1340.
- İpek, M. ve Aksu, M. (2019). The effect of different types of fiber on flexure strength and fracture toughness in SIFCON, *Construction and Building Materials*, 214, 207–218.

- Jaarsveld J. G. S., Deventer J. S. J. ve Lorenzen L. (1997). "The potential use of geopolymeric materials to immobilise toxic metals: Part I. Theory and applications. Minerals Engineering, 10(7): 659-669.
- Jena, S., Panigrahi, R. ve Sahu, P. (2019). Mechanical and durability properties of fly ash geopolymer concrete with silica fume, Journal of The Institution of Engineers (India): Series A 100 (4), pp. 697–705, <https://doi.org/10.1007/s40030-019-00400->.
- Jeon, J. K., Kim, W. S., Jeon, C. K. ve Kim, J. C. (2014). Processing and mechanical properties of macro polyamide fiber reinforced concrete. Materials, 7: 7634-7652.
- Junzhi, Z., Libin, Z., Qingkang, N., Hengye, W. ve Lingjie, W. (2024). Effects of calcium sulfate whiskers and basalt fiber on gas permeability and microstructure of concrete, Construction and Building Material, (411), 134369. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134369>.
- Kantarıcı, F. (2021). Lif boyunun ve içeriğinin geopolimer betonların asit direncine etkisi, GÜFBED/GUSTIJ (2021) 11 (2): 424-437.
- Kantarıcı, F., Türkmen, İ. ve Ekinci, E. (2019). Optimization of production parameters of geopolymer mortar and concrete: A comprehensive experimental study. Construction and Building Materials, 228, 116770. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116770>
- Karahan, O. ve Atiş, C. D. (2011). The Durability Properties of Polypropylene Fiber Reinforced Fly Ash Concrete, Materials and Design, 32:1044–49.
- Karahan O. (2006). Liflerle Güçlendirilmiş Uçucu Küllü Betonların Özellikleri, Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi, Adana.
- Karilhaloo, B. L. (1995). Fracture Mechanics and Structural Concrete , Longman Group Ltd., Essex England
- Khale, D. ve Chaudhary R. (2007). Mechanism of geopolimerization and factors influencing its development: a review. Materials Science, 42: 729- 746.
- Khan, M. Z. N., Hao, Y., Hao, H. ve Shaikh, F. U. A. (2018a). Mechanical properties of ambient cured high strength hybrid steel and synthetic fibers reinforced geopolymer composites, Cement Concr. Compos. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.10.011>.
- Khan, M. Z. N., Hao, Y., Hao, H. ve Shaikh, F. U. A. (2018b). Experimental evaluation of quasi-static and dynamic compressive properties of ambient-cured high-strength plain and fiber reinforced geopolymer composites, Construct. Build. Mater. (2018), <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.166>.

- Kim, N. W., Saeki, N. ve Horiguchi, T. (1999). "Crack and Strength Properties of Hybrid Fiber Reinforced Concrete at Early Ages", Transactions of the Japan Concrete Institute, 21.
- Komlos, K., Babal, B. ve Nürnbergerova, T. (1995). Hybrid Fiber-Reinforced Concrete Under Repeated Loading, Nuclear Engineering and Design, 156, 195-200.
- Korniejenko, K., Mucsi, G., Papn'e Halyag, N., Szab'o, R., Mierzwiński, D. ve Louda, P. (2020). Mechanical properties of basalt fiber reinforced fly ash-based geopolymer composites, KnE Eng. <https://doi.org/10.18502/keg.v5i4.6800>.
- Krivenko P. V. (1993). Sodium sulphate-based slag alkaline cements. Proc. 3rd Beijing Int. Symp. Cement and Concrete, Beijing, 2: 1032- 1037.
- Kumar, N. Y., Kumar, B. D. ve Swami, B. L. P. (2022). "Mechanical properties of geopolymer concrete reinforced with steel and glass fibers with various mineral admixtures", Materials Today: Proceedings 52 (2022) 632–641.
- Kuranlı, Ö. F. (2020). Farklı bağlayıcı ve lif içeren geopolimer betonların mekanik ve durabilite özelliklerinin incelenmesi, İstanbul Üniversitesi, Cerrahpaşa Lisanüstü Eğitim Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- Laxmi, G., Patil, S., Hossiney, N. ve Thejas, H. K. (2023). Effect of hooked end steel fibers on strength and durability properties of ambient cured geopolymer concrete, Case Studies in Construction Materials 18, e02122.
- Li, Z., Zhang, Y. ve Zhou, X. (2005). Short fiber reinforced geopolymer composites manufactured by extrusion. J. Mater. Civ. Eng., 17(6): 624-631.
- Li Z., Ding Z. ve Zhang, Y. (2004). Development of sustainable cementitious materials (pp: 55-76). Proceedings of the International Workshop on Sustainable Development and Concrete Technology, May 20-21, Beijing, China.
- Liu, H., Yang, Q., Xiao, H., Zhang, J., Zhang, Y., Lu, P. ve Zhang, N. (2024). Influence and mechanism of ultra-high molecular weight polyethylene on mechanical and electromagnetic shielding properties of alkali-activated composite mortar based on magnesium slag, blast-furnace slag and silica fume. Journal of Environmental Chemical Engineering, Volume 12, Issue 2. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.112437>.
- Lloyd, N. A. ve Rangan, B. V. (2010). Geopolymer concrete with fly ash. Second International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies, Università Politecnica delle Marche, June 28-30, Ancona, Italy.

- Malhotra, V. M. ve Mehta, P. (2002). High-Performance, High-Volume Fly Ash Concrete: Materials, Mixture Proportioning, Properties, Construction Practice, and Case Histories. basım yeri bilinmiyor: yazarı bilinmiyor
- Martina, Š., Rostislav, Š., František, Š., Klára, P., Petr, F. ve Roman, S. (2023). Pozzolanic activity of stockpile ash: Comparison of test methods. Case studies in construction materials, (19), e02396.
- McLellan, G., Benjamin, W., Ross, L., Janine, V. R. ve Arie, C. (2011). Costs and carbon emissions for geopolymer pastes in comparison to ordinary portland cement, J. Clean. Prod. 19 (2011) 1080–1090.
- Md Jihad, M., Junjie, P., Hyeju, K. ve Jeong, G. J. (2023). Flexural behavior, porosity, and water absorption of CO₂-cured amorphous metallic-fiber-reinforced belite-rich cement composites, Construction and Building Materials, (387), 131668. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131668>.
- Mehta, A. ve Siddique, R. (2018). Sustainable geopolymer concrete using ground granulated blast furnace slag and rice husk ash: Strength and permeability properties, J. Clean. Prod 205 (2018) 49–57. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.313>.
- Meng, W., Valipour, M. ve Khayat, K. H. (2016). Optimization and performance of cost-effective ultra-high performance concrete, Mater. Struct. 50 (1), 29.
- Meyer, C. (2009). The greening of the concrete industry. Cement and Concrete Composites, 31(8), 601-605.
- Natali, A., Manzi, S. ve Bignozzi, M. C. (2011). Novel fibre reinforced composite materials based on sustainable geopolymer matrix. Proc. Eng., 21: 1124–31.
- Nazanin, A., Sajjad, M. ve Ali Akbar, S. J. (2020). Durability of self-consolidating concrete and mortar mixtures containing ternary and quaternary cement blends exposed to simulated marine environment, Construction and Building Materials, (259), 119767.
- Neville, A. (2010). Concrete technology, second ed. Longman, UK.
- Nghia, P. T., Chamila, G., David, W. L., Shadi, H. ve Sujeeva, S. (2022). Microstructural characterisation of cementitious composite incorporating polymeric fibre: A comprehensive review, Construction and Building Materials, Volume 335, 127497. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127497>.
- Nguyen, H., Carvelli, V., Adesanya, E., Kinnunen, P. ve Illikainen, M. (2018). High performance cementitious composite from alkali-activated ladle slag reinforced

- with polypropylene fibers, *Cement Concr. Compos.*
<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.03.024>.
- Noor Abbas, A. G., Abdul Aziz, F. N. A., Abdan, K., Mohd Nasir, N. A. ve Huseien, G. F. (2023). Experimental evaluation and statistical modeling of kenaf fiber-reinforced geopolymer concrete, *Construction and Building Materials*, Volume 367, 130228.
- Noushini, A., Hastings, M., Castel, A. ve Aslani, F. (2018). Mechanical and flexural performance of synthetic fibre reinforced geopolymer concrete, *Construction and Building Materials* 186, pp. 454–475.
- Noushini, A. ve Castel, A. (2016). The effect of heat curing on transport properties of low-calcium fly ash-based geopolymer concrete. *Construction and Building Materials*, 112, 464-477. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.210>
- Onaizi, A. M., Huseien, G. F., Lim, N. H. A. S., Amran, M. ve Samadi, M. (2021). Effect of nanomaterials inclusion on sustainability of cement-based concretes: a comprehensive review, *Construct. Build. Mater.* 306. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124850>.
- Özcan, A. ve Karakoç, M. B. (2019). Evaluation of sulfate and salt resistance of ferrochrome slag and blast furnace slag-based geopolymer concretes, *Structural Concrete* 20 (5) (2019) 1607–1621, <https://doi.org/10.1002/suco.v20.510.1002/suco.201900061>.
- Özcan, D. M. (2003). Betonarme Kiriş Elemanlarda Çelik Lif Katkısının Taşıma Gücüne Etkisinin Deneysel İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi, Kayseri.
- Özdemir, Ü. M. (2014). Gümüşhane Yöresi Magmatik Kayaçların Beton Agregası Olarak Kullanılabilirliğinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Gümüşhane Üniversitesi, Gümüşhane, 77s.
- Pacheco-Torgal, F., Castro-Gomes, J. ve Jalali, S. (2008b). Alkali-activated binders: A review. Part 2. About materials and binders manufacture. *Construction and Building Materials*, 22 (7), 1315–1322.
- Pakravan, H. R., Latifi, M. ve Jamshidi, M. (2017). Hybrid short fiber reinforcement system in concrete: a review, *Construct. Build. Mater.*, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.059>.
- Palmo, A., Grutzeck, M. W. ve Blanco, M. T. (1999). Alkali-activated fly ashes A cement for the future. *Cement and Concrete Research*, Spain.

- Palomo, A. ve Palacios, A. (2003b). Alkali-activated cementitious materials: alternative matrices for the immobilisation of hazardous wastes: part II. stabilisation of chromium and lead. *Cement and Concrete Research*, 33: 289- 295.
- Palomo, A., Alonso, S., Fernandez-Jiménez, A., Sobrados, I. ve Sanz, J. (2004). Alkaline activation of fly ashes: NMR study of the reaction products. *Journal of the American Ceramic Society*, 87: 1141- 1145.
- Patel, Y. J. ve Shah, N. (2018). Enhancement of the properties of Ground Granulated Blast Furnace Slag based Self Compacting Geopolymer Concrete by incorporating Rice Husk Ash, *Construction and Building Materials* 171: 654–662. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.166>.
- Pellegrino, C., Faleschini, F. ve Meyer, C. (2019). Recycled materials in concrete, *Developments in the Formulation and Reinforcement of Concrete*, 19-54.
- Phair J. W. ve Deventer J. S. J. (2001). Effect of silicate activator pH on the leaching and material characteristics of waste-based inorganic polymers. *Mineral Engineering*, 14: 289- 304.
- Postacıoğlu, B., (1987). Beton: Agregalar, Beton (Cilt: II). İstanbul: Matbaa Teknisyenleri Basımevi.
- Pradhan, P., Dwibedy, S., Pradhan, M., Panda, S. ve Panigrahi, S. K. (2022). Durability characteristics of geopolymer concrete - progress and perspectives, *J. Build. Eng.* 59, 105100, <https://doi.org/10.1016/j.job.2022.105100>.
- Provis, J. L. ve van Deventer, J. S. J. (2009). *Geopolymers: Structures, Processing, Properties and Industrial Applications*. Cambridge: Woodhead Publishing Limited.
- Pu, X. C. (1988). Summary reports of research on alkali-activated slag cement and concrete. *Chongqing Institute of Architecture and Engineering*, 6.
- Qian, C. ve Stroven, P. (2000a). Fracture properties of concrete reinforced with steelpolypropylene hybrid fibers, *Cement and Concrete Composites*, 22, 343-351.
- Qian, C. ve Stroven, P. (2000b). Development of Hybrid Polypropylene-Steel Fibre-Reinforced Concrete, *Cement and Concrete Research*, 30, 63-69.
- Ranjbar, N., Mehrali, M., Alengaram, U. J. ve Jumaat, M. Z. (2016a). High tensile strength fly ash based geopolymer composite using copper coated micro steel fiber, *Construct. Build. Mater.*, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.228>.
- Ranjbar, N., Mehrali, M., Behnia, A., Pordsari, A. J. ve Alengaram, U. J. (2016b), A comprehensive study of the polypropylene fiber reinforced fly ash based geopolymer, *PLoS One*, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0147546>.

- Ranjbar, N., Talebian, S., Mehrli, M. ve K nzel, C. (2016c). Mechanisms of interfacial bond in steel and polypropylene fiber reinforced geopolymer composites. *Composites Science and Technology*, Cilt 122, pp. 73-81.
- Ranjbar, N. ve Zhang, M. (2020). Fiber-reinforced geopolymer composites: A review. *Cement and Concrete Composites*, 107, 103498.
- Rashad, A. M. (2020). Effect of steel fibers on geopolymer properties – the best synopsis for civil engineer, *Construct. Build. Mater.* <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118534>.
- Rashad, A. M. (2014). A comprehensive overview about the influence of different admixtures and additives on the properties of alkali-activated fly ash, *Mater. Des.* <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.07.074>.
- Rasheed, A. A. (2019). Nano silika ve  elik lifin kendiliğinden yerleşen geopolimer betonun taze hal ve mekanik özellikleri üzerindeki etkisi’’, Yüksek Lisans Tezi, Gaziantep Üniversitesi, Gaziantep.
- Ravikumar, D. (2012). Property development, microstructure, and performance of alkali activated fly ash and slag systems. Clarkson University, Department of Civil and Environmental Engineering, Doctor of philosophy.
- Reed, M., Lokuge, W. ve Karunasena, W. (2014). Fibre-reinforced geopolymer concrete with ambient curing for in situ applications. *Journal of materials science*, 49(12), 4297-4304. <https://doi.org/10.1007/s10853-014-8125-3>.
- Rill, E., Lowry, D. R. ve Kriven, W. M. (2018). Properties of Basalt Fiber Reinforced Geopolymer Composites. Departement of Material Science and Endineering, University of Illinois at Urban-Champaign, Urbana, USA.
- Roy, D. M. (1999). Alkali-activated cements: Opportunities and challenges. *Cement and Concrete Research*, 29 (2), 249–254.
- Sabu, A. ve Karthi, L. (2018). A review on strength properties of fibre and hybrid fibre reinforced geopolymer concrete. *International Research Journal of Engineering and Technology*, 5, 1686-1690.
- Saavedra, W. G. V., Angulo, E. ve Gutiérrez, R. M. (2016). Fly ash slag geopolymer concrete: resistance to sodium and magnesium sulfate attack, *J. Mater. Civ. Eng.* 28 (12), 04016148, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001618](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001618).
- Salami, B. A., Johari, M. A. M., Ahmad, Z. A. ve Maslehuddin, M. (2017). "Durability performance of palm oil fuel ash-based engineered alkaline-activated cementitious composite (POFA-EACC) mortar in sulfate environment." *Construction and Building Materials* 131, pp: 229-244.

- Scrivener, K. L., John, V. M. ve Gartner, E. M. (2018). Eco-efficient cements: potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry. *Cement and Concrete Research*, 114, 2–26.
- Shah, S. F. A., Chen, B., Oderji, S. Y., Haque, M. A. ve Ahmad, M. R. (2020). Comparative study on the effect of fiber type and content on the performance of one-part alkaliactivated mortar, *Constr. Build. Mater.* 243, 118221.
- Shaikh, F. U. A. (2013). Review of mechanical properties of short fibre reinforced geopolymer composites. *Construction and Building Materials*, Cilt 43, pp. 37-49.
- Shaikh, F. U. A. (2016). Mechanical and durability properties of fly ash geopolymer concrete containing recycled coarse aggregates, *International Journal of Sustainable Built Environment*, 2016(5), pp. 277-287.
- Shaikh, F. U. A. (2019). Pullout behavior of hook end steel fibers in geopolymers, *J. Mater. Civ. Eng.*, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002722](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002722).
- Shi, X. S., Wang, Q. Y., Zhao, X. L. ve Collins, F. (2012). Discussion on properties and microstructure of geopolymer concrete containing fly ash and recycled aggregate. *Advanced Materials Research*, 450-451, 1577-1583.
- Shuai, P., Bo, W., Xiaoqing, D., Yanfei, Z. ve Zhenpeng, Y. (2023). Study on dynamic splitting tensile mechanical properties and microscopic mechanism analysis of steel fiber reinforced concrete, *Structures*, Volume 58, 105502, <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.105502>.
- Singh, B., Ishwarya, G., Gupta, M. ve Bhattacharyya, S. K. (2015). Geopolymer concrete: A review of some recent developments. *Construction and Building Materials*, 85, 78-90.
- Singh, N. B. (2018). Fly ash-based geopolymer binder: A future construction material. *Minerals*, 8(7), 299. <https://doi.org/10.3390/min8070299>
- Sing, N. S. ve Middendorf, B. (2020). Geopolymers as an alternative to Portland cement: An overview. *Construction and Building Materials*, 20 Mart.Issue 237.
- Sonal Thakkar, P., Darpan, J., Bhorwani, R. ve Ambaliya (2014). Geopolymer concrete using different source materials, *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering* 4 (4), 10–15.
- Spadea, S., Farina, I., Carrafiello, A. ve Fraternali, F. (2015). Recycled nylon fibers as cement mortar reinforcement. *Construction and Building Materials*, 80: 200–209.
- Sukontasukkul, P., Pongsopha, P., Chindaprasirt, P. ve Songpiriyakij, S. (2018). Flexural performance and toughness of hybrid steel and polypropylene fibre reinforced geopolymer, *Construction and Building Materials* 161, pp. 37–44.

- Sukontasukkul, P. (2004). Tensile behaviour of hybrid fibre reinforced concrete, Adv. Cem. Res. (ACR) 16 (3), pp. 115–122.
- Sun, W., Zhang, Y., Li, Z. ve Zhou, X. (2009). Geopolymer extruded composites with incorporated fly ash and polyvinyl alcohol short fibre. ACI Mater J., 106(1): 3–10.
- Swanepoel J. C. ve Syrtdom C. A. (2002). Utilisation of fly ash in a geopolymeric material. Applied Geochemistry Journal, 17: 1143-1148.
- Şimşek, O. (2020) “Beton ve Beton Teknolojisi”. 6. Baskı, Seçkin Yayınevi, Ankara.
- Şimşek, O., Toklu, K. ve Ünal, M. T. (2021) “Çelik liflerin geometrik şeklinin ve oranının beton özelliklerine etkisinin araştırılması”, *Politeknik Dergisi*, (24), 409-415.
- Talebian, S., Ranjbar, N., Mehrali, M., Kuenzel, C., Cornelis Metselaar, H. S. ve Jumaat, M. Z. (2016). Mechanisms of interfacial bond in steel and polypropylene fiber reinforced geopolymer composites, Compos. Sci. Technol. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2015.11.009>.
- Tanyildizi, H. ve Yonar, Y. (2016). Mechanical properties of geopolymer concrete containing polyvinyl alcohol fiber exposed to high temperature. Construction and Building Materials, 126: 381–387.
- Taşdemir, M. A., Taşdemir, C. ve Şengül, O. (2005). Mechanical Properties and Rapid Chloride Permeability of Concretes with Ground Fly Ash, ACI Materials Journal; Farmington Hills, Vol. 102, Iss. 6, pp: 414-421.
- Toktay, M., Ramyar, K. ve Turanlı, L. (1991) “Polipropilen ve çelik lifli yüksek dayanımlı betonların basınç ve çekme yükleri altındaki davranışları, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası 2. Ulusal Beton Kongresi Bildireler Kitabı, 303 – 311.
- Topçu, İ. B. ve Canbaz, M. (2002). “Silis Dumanlı Betonların Ara Yüzeylerinin İncelenmesi”, ECAS2002 Uluslararası Yapı ve Deprem Mühendisliği Sempozyumu, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara, Türkiye, ss. 469-476.
- Torgal, F. P. , Gomes, J. C. ve Jalali, S. (2008). Alkali-activated binders: a review part 1. historical background, terminology, reaction mechanisms and hydration products. Construction and Building Materials, 22: 1305–1314.
- TS EN 12390-4 (2002). Beton- Sertleşmiş Beton Deneyleri- Bölüm 4: Basınç dayanımı- Deney makinelerinin özellikleri, TSE, Ankara.
- TS 706 EN 12620 (2003). Beton Agregaları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 12390-6 (2010). Beton- Sertleşmiş Beton Deneyleri- Bölüm 6: Deney numunelerinin yarmada çekme dayanımının tayini, TSE, Ankara.

- TS EN 934-2 (2011). Kimyasal Katkılar- Beton, Harç ve Şerbet İçin- Bölüm 2: Beton Kimyasal Katkıları- Tarifler, Gerekler, Uygunluk, İşaretleme ve Etiketleme.
- TS EN 12390-3 (2012). Beton- Sertleşmiş Beton Deneyleri- Bölüm 3: Deney Numunelerinde Basınç Dayanımının Tayini, TSE, Ankara, 5-16.
- TS EN 12390-1 (2013). Beton- Sertleşmiş Beton Deneyleri- Bölüm 1: Deney Numunesi ve kalıplarının şekil, boyut ve diğer özellikleri, TSE, Ankara.
- TS EN 1926 (2013). Doğal taşlar- Deney yöntemleri- Tek eksenli basınç dayanımı tayini, TSE, Ankara.
- TS EN 196-1 (2016). Türk standartları, “çimento deney metotları - bölüm 1: dayanım tayini”, birinci baskı, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 12350 – 2 (2019). “Beton - Taze beton deneyleri - Bölüm 2: Çökme (slump) deneyi”.
- TS EN 12350 – 6 (2019). “Beton - Taze beton deneyleri - Bölüm 6: Birim hacim kütlesi”.
- TS EN 12390 – 7 (2019). “Beton - Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 7: Sertleşmiş betonun birim hacim kütlesinin tayini”.
- TS EN 12504-4 (2021). “Yapılarda Beton deneyleri - Bölüm 4: Ultrasonik atımlı dalga hızının tayini”.
- TS EN 12504-2 (2021). “Yapılarda beton deneyleri - Bölüm 2: Tahribatsız muayene - Geri sıçrama sayısının belirlenmesi”.
- TS 3502 (1981). Betonda statik elastisite modülü ve poisson oranı tayini, TSE, Ankara.
- TS 1247 (2005). Beton Yapım, Döküm ve Bakım Kuralları (Normal Hava Koşullarında).
- TS 25 (2008). Doğal puzolan (tras) - Çimento ve betonda kullanılan - tarifler, gerekler ve uygunluk kriterleri. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS 1248 (2012). Betonun Hazırlanması, Dökümü ve Bakım Kuralları- Anormal Hava Koşullarında.
- TS 10514 (2015). Lif takviyeli betonun karışım oranları ve imalatı için kurallar, TSE, Ankara.
- Uğurlu, A. İ. (2020). Yüksek fırın cürufu kullanılarak üretilen geopolimer betonların donma çözülme ve sülfat direncine geri dönüştürülmüş agreganın etkisi, İnönü Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Malatya.
- URL-1, www.googleearth.com, uydu görüntüleri, 03 Mart 2024.

- Ünal, O., Uygunoğlu, T. ve Gençel, O. (2007). Çelik Liflerin Beton Basınç ve Eğilme Özelliklerine Etkisi, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, Cilt 13, Sayı 1, Sayfa 25-30, Denizli.
- Ünal, B. (2003a). Çelik Tel ve Polipropilen Lif İçerikli Beton Yolların Mekaniksel Özelliklerinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi, 71s., Kayseri.
- Ünal, B., Köksal, F. ve Eyyubov, C. (2003b). Polipropilen ve Çelik Liflerin Betonun Donma Çözülme ve Aşınma Direncine Ortak Etkisi, 5. Ulusal Beton Kongresi, İstanbul, s. 345-54
- Verma, D., Gope, P. C., Maheshwari, M. K. ve Sharma, R. K. (2012). Bagasse fiber composites-A review, J. Mater. Environ. Sci.
- Vickers, L., van Riessen, A. ve Rickard, W. D. (2015). Geopolymer Applications. %1 içinde Fire-Resistant Geopolymers: Role of Fibres and Fillers to Enhance Thermal. London: Springer, pp. 10-16.
- Vijai, K., Kumutha, R. ve Vishnu Ram, B. G. (2014). Experimental investigations on properties of polypropylene fibre reinforced geopolymer concrete composites, Journal of Structural Engineering 40 (6) (2014) 597–599.
- Wang K., Shah S. P. ve Mishulovich A. (2004). Effects of curing temperature and NaOH addition on hydration and strength development of clinker-free CKD- fly ash binders. Cement and Concrete Research, 34(2): 299-309.
- Wang, Y., Hu, S. ve He, Z. (2021). Mechanical and fracture properties of geopolymer concrete with basalt fiber using digital image correlation, Theoretical and Applied Fracture Mechanics 112, 102909.
- Wang, Z., Bai, E., Huang, H., Liu, C. ve Wang, T. (2023). Dynamic mechanical properties of carbon fiber reinforced geopolymer concrete at different ages, Ceramics International 49, pp. 834–846.
- Wang, J., Dai, Q., Si, R. ve Guo, S. (2019). Mechanical, durability, and microstructural properties of macro synthetic Polypropylene (PP) fiber-reinforced rubber concrete, J. Clean. Prod. 234, pp. 1351–1364, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.272>.
- Wanli, W., Chengcheng, F., Baomin, W., Xiong, Z. ve Ze, L. (2023). Workability, rheology, and geopolymerization of fly ash geopolymer: Role of alkali content, modulus, and water–binder ratio, Construction and Building Materials, (367), 130357. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130357>.
- Woolard, C. D., Petrus, K. ve Horst, V. D. (2000). ISSN 0378- 4738-Water, SA 26:531.

- Worrell, E., Price, L., Martin, N., Hendriks, C. ve Meida, L. O. (2001). Carbon dioxide emissions from the global cement industry. *Annual Review of Energy and the Environment*, 26(1), 303-329.
- Xian, G., Bai, Y., Zhou, P., Wang, J., Li, C., Dong, S., Guo, R., Tian, J., Li, J., Zhong, J., He, T. ve Zhang, Z. (2024). Long-term properties evolution and life prediction of glass fiber reinforced thermoplastic bending bars exposed in concrete alkaline environment. *Journal of Building Engineering*, Volume 91. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.109641>.
- Xiaohua, B., Yingpeng, L., Xiangsheng, C., Haoyu, Y. ve Hongzhi, C. (2024). Investigation on the flexural behaviour and crack propagation of hybrid steel fibre reinforced concrete with a low fibre content for tunnel structures, *Construction and Building Materials*, Volume 417, 135253. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135253>.
- Xiong, C. J., Ban, C. H., Pei, X. ve Fang, Z. (2004). International workshop on sustainable development and concrete technology, Beijing, pp. 299.
- Xu, H. ve Van Deventer, J. S. J. (2000). *International Journal of Mineral Processing*, 59- 247.
- Yadollahi, M. M. ve Varolgüneş, S. (2018). Polipropilen Liflerin Perlit Esaslı Geopolimerlerin Mekanik Davranışına Etkisi, *Türk Doğa ve Fen Dergisi*, 7(2), 36-41.
- Yadollahi, M. M., Benli, A. ve Demirboğa, R. (2015). The effects of silica modulus and aging on compressive strength of pumice-based geopolymer composites. *Construction and Building Materials*, 94, 767-774. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.052>
- Yao, W., Li, J. ve Wu, K. (2002). Mechanical Properties of Hybrid Fiber- Reinforced Concrete at Low Fiber Volume Fraction, *Cement and Concrete Research*, 2157, 1-4.
- Yaprak, H., Şimşek, O. ve Öneş, A. (2004). Cam ve Çelik Liflerin Bazı Beton Özelliklerine Etkisi, *Politeknik Dergisi*, 7(4), 353-358.
- Yip, C. K., Lukey, G. C., Provis, J. L. ve Van Deventer, J. S. J. (2008). *Cement and Concrete Research*, 38: 554.
- Yunsheng, Z., Wei, S., Zongjin, L., Xiangming, Z. ve Chungkong, C. (2008). Impact properties of geopolymer based extrudates incorporated with fly ash and PVA short fiber. *Construction and Building Materials*, 22(3), 370-383. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.08.006>

- Yurt, Ü. (2022). Kür sıcaklığının alkali aktivasyonlu lifli betonun Kırılma özelliklerine etkisi, OKU Dergisi 5(1):176-188.
- Zhang, Y., Sun, W., Li, Z. ve Zhou, X. (2008). Impact properties of geopolymer based extrudates incorporated with fly ash and PVA short fiber. Constr. Build. Mater., 22: 370–83.
- Zhang, Y. J., Wang, Y. C., Xu, D. L. ve Li, S. (2010). Mechanical performance and hydration mechanism of geopolymer composite reinforced by resin. Material science and engineering a journal, 6574-6580.
- Zhang, H., Kodur, V., Cao, L. ve Qi, S. (2014). Fiber reinforced geopolymers for fire resistance applications. Procedia engineerg journal, 153-158.
- Zhang, S., Liu, J., Duan, S., Du, L., Zhang, Z., Zhang, M., Jiang, D. ve Wu, X. (2024). Investigation into the strength and toughness of polyvinyl alcohol fiber-reinforced fly ash-based geopolymer composites. Journal of Building Engineering, Volume 90, <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.109371>.

ÖZGEÇMİŞ

Yavuz Selim AKSÜT, 2003 yılında Erzincan Anadolu Lisesi'nden mezun olmuştur. 2005 yılında girdiği ÖSS sınavı sonucu Gaziantep Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümünü kazanmıştır. 2011 yılında lisans öğrenimini tamamlamıştır. 2012 yılında Gümüşhane Üniversitesi'nde yüksek lisans programına başlamış ve 2015 yılında yüksek lisans öğrenimini tamamlamıştır. Doktora öğrenimine 2018 yılında Gümüşhane Üniversitesi'nde başlamıştır. AKSÜT, 2012 yılında Gümüşhane Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde Araştırma Görevlisi olarak çalışmaya başlamıştır. Halen bu görevini devam ettirmekte olan AKSÜT, İngilizce bilmektedir.

Yayınlar:

- Yetgin, Ş., Aksüt, Y. S. ve Çavdar, A. (2015). Erzincan üzümlü yöresi volkanik kayaçlarının kırmataş agrega özellikleri, mühendislikte yeni teknolojiler sempozyumu, 22-24 Ekim 2015, Bayburt, Türkiye.
- Yetgin, Ş., Aksüt, Y. S. ve Çavdar, A. (2016). The crushed rock aggregate characteristics of üzümlü erzincan region volcanics, presented at the 12th International Congress on Advances in Civil Engineering (ACE2016), 21-23 September, İstanbul, Türkiye.
- Aksüt, Y. S., Külekçi, G., Çullu, M. ve Vural, A. (2022). Maden cüruflarının puzolanik aktivitesinin incelenmesi, presented at the 7th International congress on innovative scientific approaches, Samsun.
- Aksüt, Y. S. ve Külekçi, G. (2022). Demir-kurşun-çinko içerikli maden cüruflarının öğütme süresi ile boyut analizi, presented at the 7th International congress on innovative scientific approaches, Samsun.
- Aksüt, Y. S., Yetgin, Ş. ve Çullu, M. (2023). Doğal mineral içerikli endüstriyel atığın (volkanik tras) puzolanik aktivitesinin araştırılması, 12. uluslararası mühendislik, mimarlık ve tasarım kongresi, 23-25 Aralık 2023, Türkiye.
- Yetgin, Ş. ve Aksüt, Y. S. (2016). "Erzincan Üzümlü Yöresi Volkanik Kayaçlarının Beton Agregası Olarak Kullanabilirliği," *Yapı Dünyası*, vol. 20, pp. 44–56.
- Yetgin, Ş., Aksüt, Y. S. ve Bökü, A. (2016). "Kırmataş Agrega İçerisine Dere Kumu Karıştırılarak Beton Dayanımının Yükseltilmesi Deneyi," *Yapı Dünyası*, vol. 20, pp. 43–52.

- Yetgin, Ş., Aksüt, Y. S. ve Köse, M. D. (2017). “Gümüşhane Yöresinden Elde Edilen İki Farklı İncelikteki Kireçtaşı Tozunun Agrega Katkısı Olarak Taze Betonun Kıvamına ve Serleşmiş Betonun Dayanımına Etkisi,” *Yapı Dünyası*, pp. 46–51.
- Aksüt, Y. S. ve Yetgin, Ş. (2017). The usability of volcanic rocks from upper euphrates part in the eastern anatolia region as concrete aggregate,” *Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences*, vol. 35, no. 4, pp. 593–608.
- Pekdemir, N. R., Çullu, M., Aksüt, Y. S. ve Yetgin, Ş. (2022). Polipropilen Lif Oranının Betonun Eğilmede Çekme Ve Basınç Dayanımına Etkisi, *Yapı Dünyası*, pp. 3–20.
- Külekçi, G., Vural, A. ve Aksüt, Y. S. (2022). Investigation of the Pozzolanic Properties of Basic Mining Slages Exposed to Heat Treatment,” *Euroasia Journal of Mathematics, Engineering, Natural & Medical Sciences*, vol. 9, no. 25, pp. 71–87.
- Akduman, Ö., Aksüt, Y. S. ve Kaya, A. A. (2023). Afet Yönetiminde Zarar Görebilirliği Önleyici Yapılar Bina Yapısal Elemanlarında Poliüre Kaplama, *Gümüşhane Üniversitesi Sağlık Bilimleri Dergisi*, 12(4), pp. 1768 - 1781.
- Aksüt, Y. S. (2023). Effect of Curing Time on Fresh and Physical Properties of Alkaline Activated Fiber Concrete With Quarry Waste A Natural Pozzolan, *International Science and Engineering Reviews: Development, Analysis, and Research*, 1 (1), pp. 6–11.
- Akduman, Ö. ve Aksüt, Y. S. (2024). Analysis of Studies on 'Disaster Management' and 'Engineering' Concepts Using VOSviewer for Bibliometric Analysis, *International Science and Engineering Reviews: Development, Analysis, and Research*, 2 (1), pp. 1–10.
- Aksüt, Y. S., Külekçi, G., Çullu, M. ve Yetgin, Ş. (2024). Performance of different fibre types in alkaline-activated concrete produced with industrial wastes: volcanic rock powder and blast furnace slag. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 1-19.
- Aksüt, Y. S., Çullu, M. ve Yetgin, Ş. (2024). Optimal Ratio of Steel and Polyester Fibers on the Mechanical Behavior of Alkali-Activated Concrete Produced by Industrial Waste Minerals. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 1-15.