BAZALT LİF, NANO TiO_2 VE NANO Fe_2O_3 KATKILI BETON YOLUN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN TAGUCHİ YÖNTEMİYLE ANALİZİ

Şeyma SÜNBÜL

Danışman: Prof. Dr. Ahmet TORTUM

Doktora Tezi

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı

2025

(Her hakkı saklıdır.)

T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

BAZALT LİF, NANO TiO_2 VE NANO Fe_2O_3 KATKILI BETON YOLUN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN TAGUCHİ YÖNTEMİYLE ANALİZİ

(Analysis of Mechanical Properties of Concrete Road Containing Basalt Fiber, Nano TiO_2 and Nano Fe_2O_3 Using Taguchi Method)

DOKTORA TEZİ

Şeyma SÜNBÜL

Danışman: Prof. Dr. Ahmet TORTUM

Erzurum
Eylül, 2025

T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğü

TEZ KABUL VE ONAY TUTANAĞI

Bazalt Lif, Nano TiO2 ve Nano Fe2O3 Katkılı Beton Yolun Mekanik Özelliklerinin Taguchi Yöntemiyle Analizi

Prof. Dr. Ahmet TORTUM danışmanlığında, Şeyma SÜNBÜL tarafından hazırlanan bu çalışma, 16/09/2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Ulaştırma Bilim Dalı'nda doktora tezi olarak **oybirliği / oy çokluğu (.../...)** ile kabul edilmiştir.

Jüri Başkanı:	Prof. Dr. Erol İSKENDER *Karadeniz Teknik Üniversitesi*	Aslı Islak İmzalıdır
Danışman:	Prof. Dr. Ahmet TORTUM *Atatürk Üniversitesi*	Aslı Islak İmzalıdır
Jüri Üyesi:	Doç. Dr. Osman Ünsal BAYRAK *Atatürk Üniversitesi*	Aslı Islak İmzalıdır
Jüri Üyesi:	Doç. Dr. Halim Ferit BAYATA *Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi*	Aslı Islak İmzalıdır
Yedek Jüri Üyesi:	Doç. Dr. Ahmet ATALAY *Atatürk Üniversitesi*	Aslı Islak İmzalıdır

Bu tezin Atatürk Üniversitesi Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği'nin ilgili maddelerinde belirtilen şartları yerine getirdiğini onaylarım.

Prof.Dr. Alper NUHOĞLU
Enstitü Müdürü

Aslı Islak İmzalıdır

Bu çalışma BAP projesi kapsamında desteklenmiştir.
Proje No:11012

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildiriş, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Graduate School of Natural and Applied Sciences

T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ REKTÖRLÜĞÜ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜ

ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU

Doktora Tezi olarak Prof. Dr. Ahmet TORTUM danışmanlığında sunulan "Bazalt Lif, Nano TiO2 ve Nano Fe2O3 Katkılı Beton Yolun Mekanik Özelliklerinin Taguchi Yöntemiyle Analizi" başlıklı çalışmanın tarafımızdan bilimsel etik ilkelere uyularak yazıldığını, yararlanılan eserlerin kaynakçada gösterildiğini, Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından belirlenmiş olan Turnitin Programı benzerlik oranlarının aşılmadığını ve aşağıdaki oranlarda olduğunu beyan ederiz.

Tez Bölümleri	Tezin Benzerlik Oranı (%)	Maksimum Oran (%)
Giriş	*2*	**30**
Kuramsal Temeller	*22*	**30**
Materyal ve Metot	*27*	**35**
Araştırma Bulguları ve Tartışma	*4*	**20**
Sonuçlar ve Öneriler	*0*	**20**
Tezin Geneli	*15*	**25**

Not: *Yedi kelimeye kadar benzerlikler ile Başlık, Kaynakça, İçindekiler, Teşekkür, Dizin ve Ekler kısımları tarama dışı bırakılabilir. Yukarıdaki azami benzerlik oranları yanında tek bir kaynaktan olan benzerlik oranlarının* ***%5'den*** *büyük olmaması gerekir.*

Sunulan bilgilerin doğru olduğunu, aksi halde doğacak hukuki sorumlulukları kabul ettiğimizi beyan ederiz.

Tez Yazarı (Öğrenci)	Tez Danışmanı
Şeyma SÜNBÜL	Prof. Dr. Ahmet TORTUM
22.9.2025	**22.9.2025**
İmza: Aslı Islak İmzalıdır	İmza: Aslı Islak İmzalıdır

* Tez ile ilgili YÖKTEZ'de yayınlamasına ilişkin bir engelleme var ise aşağıdaki alanı doldurunuz.

☐ Tezle ilgili patent başvurusu yapılması / patent alma sürecinin devam etmesi sebebiyle Enstitü Yönetim Kurulunun …./…/…. tarih ve …… sayılı kararı ile teze erişim 2 (iki) yıl süreyle engellenmiştir.

☐ Enstitü Yönetim Kurulunun …./…/…. tarih ve …… sayılı kararı ile teze erişim 6 (altı) ay süreyle engellenmiştir.

Not: Bu form, Tezin son şekline uygun olarak bilgisayar ortamında doldurulmalı, çıktısı imzalanıp Tezin sonuna eklenmelidir.

TEŞEKKÜR

Tez çalışmamın her aşamasında kıymetli bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşan değerli hocam Sn. Prof. Dr. Ahmet TORTUM' a, tez komitesi üyesi olarak çalışmalarıma katkıda bulunan Sn. Prof. Dr. Osman Nuri ATA' ya, Sn. Doç. Dr. Osman Ünsal BAYRAK' a ve desteğini esirgemeyen Sn. Doç Dr. Ahmet ATALAY'a teşekkürü bir borç bilirim.

BAP 11012 no'lu "Bazalt Lif, Nano TiO_2 ve Nano Fe_2O_3 Katkılı Beton Yolun Mekanik Özelliklerinin Taguchi Yöntemiyle Analizi" projesini desteklemelerinden dolayı Atatürk Üniversitesi'ne teşekkürlerimi sunuyorum.

Bu çalışmayı, beni yetiştirip bugünlere getiren ve beni her zaman sevip destekleyen canım aileme, çalışmalarımı yakından takip ederek desteklerini esirgemeyen canım kardeşlerime, deney çalışmalarımda desteğini esirgemeyen eşime ve varlıklarıyla bana umut olan çocuklarım Mustafa Kaan ve Elif Duru'ya atfediyorum.

Şeyma SÜNBÜL

ÖZET

DOKTORA TEZİ

BAZALT LİF, NANO TiO_2 VE NANO Fe_2O_3 KATKILI BETON YOLUN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN TAGUCHİ YÖNTEMİYLE ANALİZİ

Şeyma SÜNBÜL

Danışman: Prof. Dr. Ahmet TORTUM

Amaç: Bu çalışmanın amacı, geleneksel beton yol kaplamalarına kıyasla mekanik özellikleri ve dayanıklılığı daha üstün, yüksek dayanımlı bir beton karışımı geliştirmektir. Bu doğrultuda, betonun basınç ve eğilme dayanımını artırmak ve aşınma direncini iyileştirmek için bazalt lif, nano Fe_2O_3, nano TiO_2 ve uçucu kül kullanımının etkileri incelenmiştir.

Yöntem: Deneysel tasarım ve optimizasyon süreci için Taguchi Metodu kullanılmıştır. Su/bağlayıcı oranı, uçucu kül, nano Fe_2O_3, nano TiO_2 ve bazalt lif parametre olarak belirlenmiştir. L16 ortogonal dizinine göre hazırlanan 16 grup numune üzerinde basınç, eğilme ve aşınma deneyleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar, Sinyal/Gürültü (S/N) oranı ve Varyans Analizi (ANOVA) ile analiz edilerek her bir performans hedefi için teorik optimum karışımlar belirlenmiştir. İkinci aşamada, bu üç optimum karışım (basınç dayanımı için optimize edilen karışım (BDO), eğilme dayanımı için optimize edilen karışım (EDO), aşınma direnci için optimize edilen karışım (ADO)) doğrulama numuneleri olarak üretilmiş, test edilmiş ve mikro yapısal özellikleri Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ve gaz adsorpsiyon yöntemi (BET) ile incelenmiştir.

Bulgular: Doğrulama deneylerinin bulguları, Taguchi metodolojisinin her bir performans hedefini başarılı bir şekilde optimize etme kabiliyetini ortaya koymuştur. Nitekim, BDO karışımı 61,20 MPa ile en yüksek basınca ulaşırken, EDO karışımı 10,58 MPa ile en yüksek eğilme dayanımını ve ADO karışımı ise 3,51 g ile en düşük kütle kaybını sergilemiştir. Her bir optimum karışımdan elde edilen bu üstün sonuçların S/N oranlarının, modelin öngördüğü istatistiksel güven aralıkları içinde kaldığı da teyit edilerek, optimizasyonun başarısı istatistiksel olarak da kanıtlanmıştır.

Sonuç: Çalışma, lif ve nanomalzeme katkılarıyla beton yol kaplamalarının özelliklerinin hedefe yönelik olarak iyileştirilebileceğini kanıtlamıştır. ANOVA sonuçlarına göre, basınç ve eğilme dayanımını en çok etkileyen parametre bazalt lif olmuştur. Aşınma direncini ise en çok nano Fe_2O_3, düşük su/bağlayıcı oranı ve yüksek uçucu kül miktarı iyileştirmiştir. SEM ve BET analizleri, üstün performans gösteren her bir karışımın kendine özgü, yoğun ve iyi kenetlenmiş bir mikro yapıya sahip olduğunu doğrulamıştır.

Anahtar Kelimeler: Yüksek Dayanımlı Beton, Beton Yol, Taguchi Metodu, Bazalt Lif, Nano tozlar.

Eylül 2025, 121 Sayfa

ABSTRACT

DOCTORAL DISSERTATION

ANALYSIS OF MECHANICAL PROPERTIES OF CONCRETE ROAD CONTAINING BASALT FIBER, NANO TiO_2 AND NANO Fe_2O_3 USING TAGUCHI METHOD

Şeyma SÜNBÜL

Supervisor: Prof. Dr. Ahmet TORTUM

Purpose: The aim of this study was to develop a high-strength concrete mixture with superior mechanical properties and durability compared to conventional concrete pavements. In order to this end, the effects of utilising basalt fibre, nano-Fe2O3, nano-TiO2, and fly ash to enhance the compressive and flexural strength of concrete, and to improve its abrasion resistance, were investigated.

Method: The Taguchi Method was utilised for the experimental design and optimization process. The parameters of water/binder ratio, fly ash, nano Fe2O3, nano TiO2 and basalt fibre were determined. A series of experiments were conducted on 16 groups of samples, meticulously prepared according to the L16 orthogonal array, to assess the material's resistance to compression, flexure, and abrasion. The obtained results were analysed using the Signal-to-Noise (S/N) ratio and Analysis of Variance (ANOVA) to determine the theoretical optimum mixtures for each performance target. In the second stage, these three optimum mixtures (mixture optimized for compressive strength (CSO), mix optimized for flexural strength (FSO), and mix optimized for abrasion resistance (ARO)) were produced and tested as validation samples, and their microstructural properties were investigated by Scanning Electron Microscopy (SEM) and Gas Adsorption Method (BET).

Findings: The findings of the validation experiments demonstrated the Taguchi methodology's ability to successfully optimize each performance target. As a consequence of the experimental process, it was established that the CSO mixture achieved the highest pressure at 61.20 MPa, the FSO mixture the highest flexural strength at 10.58 MPa, and the ARO mixture the lowest mass loss at 3.51 g. The superiority of the results obtained from each optimum mixture was confirmed by verifying that the S/N ratios fell within the statistical confidence intervals predicted by the model, thus statistically proving the success of the optimisation.

Results: The study demonstrated that the properties of concrete pavements can be targetedly improved with fibre and nanomaterial additives. As indicated by the results of the one-way analysis of variance (ANOVA), basalt fibre exhibited the most significant effect on compressive and flexural strength. The most significant enhancement in abrasion resistance was observed in samples with a nano-Fe_2O_3 composition, a low water-to-binder ratio, and a high fly ash content. Subsequent SEM and BET analyses confirmed that each superior-performing mixture had a unique, dense, and well-interlocked microstructure.

Keywords: High Strength Concrete, Concrete Road, Taguchi Method, Basalt Fiber, Nano powders.

September 2025, 121 pages

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY TUTANAĞI i
ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU ii
TEŞEKKÜR iii
ÖZET iv
ABSTRACT v
İÇİNDEKİLER vi
TABLOLAR DİZİNİ ix
ŞEKİLLER DİZİNİ xi
KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ xiii
GİRİŞ 1
KURAMSAL TEMELLER 4
Kaplama Türleri 4
Esnek yol kaplamaları 4
Rijit yol kaplamaları 6
Rijit Kaplama Türleri 7
Derzli Donatısız Beton Kaplamalar 7
Derzli Donatılı Beton Kaplamalar 8
Sürekli Donatılı Beton Kaplamalar 9
Beton Yollarda Aranan Performans Kriterleri 10
Bağlayıcılar 11
Agregalar 12
Su 14
Katkılar 14
Lifler 15
Çelik lif 17
Polimer lif 18
Cam lif 18
Karbon lif 19
Bazalt lif 19
Lif takviyeli beton kaplamalar 21
Nano Teknoloji ve Nano Malzemeler 24

Nano malzemelerin çimento ve beton sistemindeki kullanımı 26
Nano SiO_2 28
Nano Al_2O_3 28
Nano $CaCO_3$ 29
Nano TiO_2 29
Nano Fe_2O_3 30
Karbon nanotüpler 31
MATERYAL VE METOT 33
Materyal 33
Çimento 33
Karışım suyu 33
Agrega 34
Katkı malzemeleri 34
Metod 38
Taguchi yöntemi 38
Deneysel tasarım 41
Slump (çökme) deneyi 44
Aşınma (Böhme) deneyi 45
Basınç dayanımı deneyi 48
Eğilme dayanımı deneyi 49
Taramalı elektron mikroskobu yöntemi (SEM) 52
Gaz adsorpsiyon (Brunauer ve emmett) yöntemi 53
ARAŞTIRMA BULGULARI 55
İlk Aşama Numunelerin Deney Sonuçları 55
Basınç deneyi sonuçları 55
Basınç deneyi sonuçlarının analizi 58
Eğilme dayanım deneyi sonuçları 62
Eğilme deneyi sonuçlarının analizi 65
Aşınma deneyi sonuçları 69
Aşınma deneyi sonuçlarının analizi 73
İkinci Aşama Doğrulama Numuneleri Deneyleri 76
Doğrulama numunesi basınç dayanım deneyi analizi 77
Doğrulama numunesi eğilme dayanım deneyi analizi 79
Doğrulama numunesi aşınma (böhme) dayanım deneyi analizi 80
Doğrulama Numuneleri SEM-BET Analizleri 82

SEM-EDX analiz sonuçları 82
BET analiz sonuçları 88
TARTIŞMA VE SONUÇ 93
KAYNAKÇA 96
ÖZGEÇMİŞ 106

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo 1. Lif Çeşitleri 16
Tablo 2. Değişik Türdeki Liflerin Fiziksel Özellikleri 17
Tablo 3. Yapılarda Kullanılan Nano Malzemelerden Örnekler 27
Tablo 4. Çimento Kimyasal Özellikleri-1 33
Tablo 5. Çimento Kimyasal Özellikleri-2 33
Tablo 6. Çimento Fiziksel Özellikleri 33
Tablo 7. Çimento Mekanik Özellikleri 33
Tablo 8. Bazalt Lif Özellikleri 35
Tablo 9. Nano Fe_2O_3 Özellikleri 35
Tablo 10. Nano TiO_2 Özellikleri 36
Tablo 11. Uçucu Kül Kimyasal Özellikleri 37
Tablo 12. Uçucu Kül Fiziksel Özellikler 37
Tablo 13. Akışkanlaştırıcı Katkı Teknik Özellikleri 38
Tablo 14. S/N Oranları Karakteristik Tipleri 40
Tablo 15. Parametre ve Seviyeler 41
Tablo 16. Deney Planı 42
Tablo 17. Deneyde Kullanılan Malzemelerin Dozajları 42
Tablo 18. Numune Birim Ağırlıkları 55
Tablo 19. Numune Basınç Dayanımları 56
Tablo 20. Basınç Dayanımı Sinyal Gürültü Oranları 59
Tablo 21. Ortalama Sinyal Gürültü Oranları 59
Tablo 22. Parametrelerin Basınç Dayanımına Etki Oranları 60
Tablo 23. Varyans Analizi Sonuçları 61
Tablo 24. Uyum İstatistikleri 61
Tablo 25. Numune Birim Ağırlıkları 62
Tablo 26. Numune Eğilme Dayanımları 63
Tablo 27. Eğilme Dayanımı Sinyal Gürültü Oranları 66
Tablo 28. Ortalama Sinyal Gürültü Oranları 66
Tablo 29. Parametrelerin Eğilme Dayanımına Etki Oranları 67
Tablo 30. Varyans Analizi Sonuçları 68
Tablo 31. Uyum İstatistikleri 69

Tablo 32. Deney Öncesi ve Sonrası Birim Ağırlıklar 69
Tablo 33. Numune Kütle-Hacim Kayıpları 70
Tablo 34. Aşınma Kayıpları Sinyal Gürültü Oranları 73
Tablo 35. Ortalama Sinyal Gürültü Oranları 74
Tablo 36. Parametrelerin Aşınma Dayanımına Etki Oranları 74
Tablo 37. Varyans Analizi Sonuçları 75
Tablo 38. Uyum İstatistikleri 76
Tablo 39. Doğrulama Deneylerinde Kullanılan Malzeme Seviyeleri 77
Tablo 40. Doğrulama Deneylerinde Kullanılan Malzemelerin Dozajları 77
Tablo 41. Doğrulama Numuneleri Basınç Dayanımları 77
Tablo 42. Doğrulama Numunelerinin Basınç Dayanımı Performans Değerleri 78
Tablo 43. Doğrulama Numuneleri Eğilme Dayanımları 79
Tablo 44. Doğrulama Numunelerinin Eğilme Dayanımı Performans Değerleri 80
Tablo 45. Aşınma Deney Öncesi Sonrası Ağırlık Değerleri 80
Tablo 46. Aşınma Kayıpları 81
Tablo 47. Doğrulama Numunelerinin Aşınma Kaybı Performans Değerleri 81
Tablo 48. Malzeme Yüzey Alanları 89
Tablo 49. Malzeme Adsorpsiyon-Desorpsiyon Gözenek Boyutları 89

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Esnek ve rijit yol kaplaması yük dağılımı 4
Şekil 2. Esnek üstyapı enkesiti 5
Şekil 3. Rijit bir kaplamanın tipik kesiti. 6
Şekil 4. Derzli donatısız tipteki rijit üstyapılar 8
Şekil 5. Derzli donatılı tipteki rijit üstyapılar. 9
Şekil 6. Sürekli donatılı tipteki rijit üstyapılar. 10
Şekil 7. Agrega en büyük tane büyüklüğü 8,16 ve 32 mm durumlarına göre agrega granülometri eğrileri 13
Şekil 8. Sürekli karbon lif ve kırpılmış lif 19
Şekil 9. Nanoteknoloji' deki yaklaşımlar. 26
Şekil 10. Kullanılan granülometri eğrisi 34
Şekil 11. Kullanılan agregalar 34
Şekil 12. Kullanılan bazalt lif 35
Şekil 13. Kullanılan nano Fe_2O_3 36
Şekil 14. Kullanılan nano TiO_2 36
Şekil 15. Basınç ve Eğilme Deneyi Numuneleri (a), Aşınma Deneyi Numuneleri(b) 43
Şekil 16. Numunelerin kür havuzunda bekletilmesi 43
Şekil 17. Kür havuzundan çıkarılmış olan numuneler 44
Şekil 18. Slump (çökme) deneyi uygulaması 44
Şekil 19. Uygulanan slump (çökme) deneyi. 45
Şekil 20. Kullanılan böhme aşındırma deney düzeneği 45
Şekil 21. Aşınmaya maruz bırakılan numune örnekleri 46
Şekil 22. Böhme aşındırma cihazı 46
Şekil 23. Numuneye aşındırma uygulaması 47
Şekil 24. Numunenin aşınma öncesi, sonrası durumu 47
Şekil 25. Basınç dayanımı deney düzeneği 48
Şekil 26. Betona basınç deneyi uygulanması 49
Şekil 27. Eğilme halindeki çubuk üzerindeki gerilme dağılımı 49
Şekil 28. 3 nokta eğme deneyi düzeneği 50
Şekil 29. 3 nokta ve 4 nokta eğme deneyi serbest cisim diyagramı 51
Şekil 30. 3 noktalı eğilme deneyi uygulaması 52

Şekil 31. SEM bölümleri 53
Şekil 32. Gaz adsorpsiyonu sonucunda elde edilen grafik 54
Şekil 33. Basınç dayanımı renk grafikleri 57
Şekil 34. Basınç dayanımı S/N oranları için ana etkiler grafiği 59
Şekil 35. Eğilme dayanımı renk grafikleri 64
Şekil 36. Eğilme dayanımı S/N oranları için ana etkiler grafiği 66
Şekil 37.Aşınma kaybı renk grafikleri 71
Şekil 38. Aşınma kayıpları S/N oranları için ana etkiler grafiği. 74
Şekil 39. BDO optimum karışımı SEM görüntüsü 83
Şekil 40. EDO optimum karışımı SEM görüntüsü 84
Şekil 41. ADO optimum karışımı SEM görüntüsü 85
Şekil 42. BDO doğrulama numunesine ait EDX grafiği 86
Şekil 43. EDO doğrulama numunesine ait EDX grafiği 87
Şekil 44. ADO doğrulama numunesine ait EDX grafiği 87
Şekil 45. IUPAC histerezis döngü tabloları 90
Şekil 46. Histerezis döngü tabloları 91

KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ

%	**:** Yüzde
ACI	**:** Amerikan Beton Enstitüsü
BET	**:** Brunauer-Emmett-Teller
cm^3	**:** Santimetre Küp
C-S-H	**:** Kalsiyum Silika Hidrat
EDX	**:** Enerji Yayımlı X-Işını Analizi
Fe_2O_3	**:** Demir Oksit
g	**:** Gram
KGM	**:** Karayolları Genel Müdürlüğü
R2	**:** Korelasyon Katsayısı
SEM	**:** Scanning Electron Microscope
TiO_2	**:** Titanyum Dioksit
TSE	**:** Türk Standartları Enstitüsü
XRD	**:** X- Ray Diffraction

GİRİŞ

Beton kaplamalar, dünya çapında esnek kaplamalara önemli bir alternatif olarak kullanılmaktadır. Her ne kadar ilk yatırım maliyetleri daha yüksek olsa da uygun şekilde tasarlandığında ve inşa edildiğinde, beton kaplamalar uzun servis ömürleri ve düşük bakım gereksinimleri sayesinde yaşam döngüsü maliyeti açısından daha ekonomik bir çözüm sunabilmektedir. Bu avantaj, özellikle zayıf zemin koşullarına veya ağır trafik yüklerine maruz kalan güzergahlarda daha da belirgin hale gelmektedir. Bu çalışma, geleneksel betonun mekanik özelliklerini ve dayanıklılığını, lif ve nanomalzeme katkıları kullanarak iyileştirmeyi ve bu sayede daha uzun ömürlü ve ekonomik bir yüksek dayanımlı beton yol kaplaması tasarımı sunmayı amaçlamaktadır.

Beton bir yol kaplaması, servis ömrü boyunca üzerinden geçen ağır araç trafiği nedeniyle tekrarlı gerilmelere maruz kalır. Her bir tekerlek geçişi, plak içerisinde anlık olarak basınç, çekme ve eğilme gerilmeleri oluşturur. Bu sürekli ve sık gerilme değişimleri, zamanla yorulma olarak bilinen bir etkiyle malzemenin yük taşıma kapasitesinde azalmaya neden olur. Mekanik yüklerin yanı sıra, kar ve yağmur sularının betonun gözenekli yapısına nüfuz etmesi, özellikle donma-çözülme döngülerinin yaşandığı iklimlerde ciddi bozulmalara yol açabilmektedir. Yüzeyde ise, trafiğin aşındırıcı etkisi zamanla pürüzlülüğün kaybolmasına ve kayma direncinin azalmasına neden olur. Bu bağlamda yapılan bu çalışma, yüksek dayanımlı bir beton karışımı geliştirerek; basınç ve eğilme altındaki mekanik performansı iyileştirmeyi, aşınma direncini artırmayı ve daha yoğun bir mikro yapı oluşturarak su geçirgenliğini azaltmayı hedeflemektedir.

Beton, çimento, su ve agregadan oluşan kompozit bir malzemedir. Son yıllarda çimento esaslı kompozit malzemeler üzerine çok sayıda çalışma yapılmıştır. Literatürdeki çalışmalar gözden geçirilirken, çeşitli malzemelerin dahil edilerek betonun dayanımının artırılmasına yönelik girişimlerde bulunulduğu belirlenmiştir. Malzemenin mukavemetini arttırmak için farklı tipte agregaların (Kandemir 2005; Macit 2009; Ahn *et al.* 2021) çimento yerine alternatif bağlayıcıların (Qarluq 2017; Acıkök 2019) ve farklı katkı maddelerinin (Güner 2019) kullanılması dahil olmak üzere çeşitli yöntemler kullanılmıştır. Çalışmaların genelinde kullanılan atık agregalar, esas olarak agrega ikamesi olarak kullanılsa da çimento yerine kullanılabilecek çok çeşitli puzolanik malzemeler vardır. Yol betonunda kullanılan malzeme yelpazesi, geleneksel betonda kullanılanlar kadar çeşitlidir. Literatürdeki çalışmalarda, beton

yolların dayanım ve durabilite gibi temel performans özelliklerini iyileştirmek amacıyla lif ve nanomalzeme gibi yenilikçi katkıların kullanımının mekanik ve fiziksel sonuçları araştırılmıştır (Abut 2017; Yağtu 2019). Betonun boşluk hacmi azaldığında dayanıklılık özellikleri artmaktadır (Mardani-Aghabaglou and Ramyar 2013; Cao *et al.* 2000). Çimento esaslı malzemelere eklenen katkı malzemelerinden beklenen özellik düşük boşluk oranıdır. Katkı maddeleri mikro boyutlarından dolayı yeterli geçirimsizliği sağlayamamaktadır. Bu nedenle, nanomalzemelerin kullanımı gereklidir. Yol betonu tasarımında puzolan malzemelerin kullanımı literatür çalışmalarında oldukça yaygındır. Çimento esaslı kompozit malzemelerin özelliklerinin çeşitli nanomalzeme katkı maddeleri ile iyileştirilmesi sızdırmazlığı artırabilir. Bu çalışmada nanomalzeme olarak nano Fe_2O_3 ve nano TiO_2 kullanılarak daha yüksek mukavemet ve performansa sahip, daha düşük boşluk oranına sahip kompozit malzemeler üretilmesi amaçlanmıştır. Beton yolların dayanıklılığını ve uzun ömürlülüğünü artırma hedefi doğrultusunda, özellikle betonun matris yapısını iyileştiren yenilikçi malzemelerin kullanılması gibi çeşitli yöntemler önerilmiştir. Yol betonunun eğilme dayanımını arttırmak için çeşitli lifli malzeme türleri araştırılmıştır. Betonun mekanik ve fiziksel özelliklerinin, çimento esaslı kompozitlere liflerin dahil edilmesinden fayda sağladığı uzun zamandır bilinmektedir. Çeşitli çalışmalar, liflerin betona dahil edilmesinin eğilme mukavemetini arttırdığını göstermiştir (Öztürk 2018; Khan *et al.* 2020). Tek fark, lif türlerinin mukavemet üzerindeki etki oranlarında yatmaktadır (Kayhan vd. 2011). Beton kaplamalarda lif kullanımı sınırlı olsa da her biri kendine özgü yaklaşıma sahip çeşitli tasarım yöntemleri mevcuttur. Bu çalışmada, betonun eğilme ve aşınma direncini arttırmak için donatı olarak bazalt lifi seçilmiştir. Literatür, bazalt lifinin, istenen beton kalitesine bağlı olarak, metreküp beton başına 1-10 kg oranında dahil edildiğini göstermektedir (Kızılkanat vd. 2015). Çevik (2014), çalışmasında 2 kg/m³, 3 kg/m³ ve 4 kg/m³ oranlarında bazalt lifi kullanmıştır. Ayrı bir çalışmada (Faisal 2019), bazalt lifi çimentoya %0.25, %0,5, %0,75 ve %1 dozunda dahil edilmiştir. Bu oranlara karşılık gelen kullanım miktarları sırasıyla 6,75 kg/m^3, 13,5 kg/m^3, 20,25 kg/m^3, 27 kg/m^3'tür. Lopresto *et al.* (2011) yaptıkları çalışmada metreküp başına 2,8 kg yoğunluğa sahip bazalt lifi kullanmışlardır. Bilim (2019), sırasıyla %1, %2 ve %3 ilavesiyle betona hacimce bazalt lifi ilavesinin etkileri üzerine araştırmalar yapmıştır. Belirtilen tüm çalışmalar göz önünde bulundurularak, bazalt lif miktarı, literatürde bulunanlara yakın değerlere uygun olarak, toplam beton hacminin 1-10 kg/m^3'ü aralığında olacak şekilde seçilmiştir. Son zamanlarda, nano malzemeler de popülerlik kazanmıştır ve birincil seçenek olarak kabul edilmektedir (Bolat 2009). Fiber beton yollar ve nano malzeme beton yollar üzerine araştırmalar ayrı ayrı yapılmış olsa da bunları bir melez olarak birleştirme fikri de bulunmaktadır. Çeşitli liflerin ve nanomalzemelerin bir

kombinasyonunu kullanarak yüksek mukavemetli beton yollar tasarlamak için çalışmalar yapılmıştır (Toklu 2019).

Bu çalışmada, literatürdeki diğer araştırmalardan farklı olarak, beton yolun performansını artırmak amacıyla bazalt lifi, nano Fe_2O_3, nano TiO_2 ve uçucu kül bir arada kullanılarak özgün bir karışım tasarımı geliştirilmiştir. Çalışma kapsamında beton yol, dayanıklılığını artırmak amacıyla fiber ve nano malzemelerle güçlendirilmiştir. Deney tasarımı Taguchi yöntemi kullanılarak oluşturulmuş, örneklerin mekanik özellikleri deneylerle belirlenmiştir. Taguchi yöntemi, 1950 yılında Genichi Taguchi tarafından geliştirilen istatistiksel bir optimizasyon tekniğidir. Belirsizlik durumlarında bile sonuç üzerinde önemli etkisi olan faktörler için optimal değer kombinasyonunu belirlemeyi amaçlar (Keleştemur vd. 2014). Taguchi yöntemi tasarım, hazırlık, analiz ve doğrulama olmak üzere dört ana aşamadan oluşur. Bu yöntemin bir avantajı, sınırlı miktarda deneysel veri ile tam bir faktöriyel tasarım sağlayabilmesidir. Ayrıca, sonuçtaki farkı en aza indirmek için, kontrol edilebilir faktörlerin kontrol edilemeyen faktörlere oranı artırılarak sinyal-gürültü oranı (S/N) maksimize ya da minimize edilmektedir (Razmi *et al.* 2021; Arıcı ve Kelestemur 2019). Bu çalışmada, malzeme parametrelerinin betonun mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini sistematik bir şekilde incelemek ve en uygun karışım oranlarını belirlemek amacıyla, Taguchi metodolojisine dayalı çok aşamalı bir deneysel ve analitik yaklaşım izlenmiştir. İlk aşamada, Taguchi L16 ortogonal dizinine göre hazırlanan numuneler üzerinde basınç, eğilme ve aşınma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu deneylerden elde edilen sonuçlar, her bir performans özelliği için ayrı ayrı analiz edilmiştir. S/N oranı analizi ile her bir parametrenin optimum seviyesi belirlenmiş, ANOVA ile de parametrelerin istatistiksel anlamlılığı ve sonuçlar üzerindeki etki yüzdeleri hesaplanmıştır. Analitik aşamayı takiben, S/N analizine göre her bir hedef için belirlenen teorik optimum karışımlar, doğrulama numuneleri olarak yeniden üretilmiştir. Bu numunelerin deneysel sonuçlarının, modelin öngördüğü istatistiksel güven aralığı ile uyumlu olup olmadığı kontrol edilerek optimizasyon sürecinin başarısı teyit edilmiştir. Son olarak, doğrulama deneylerinde en üstün performansı gösteren optimum karışımların mikro yapısal özellikleri, SEM ve BET analizleri kullanılarak incelenmiş; malzemenin içyapısı ve gözenek özellikleri ile makroskopik performansı arasındaki ilişki ortaya konulmuştur.

KURAMSAL TEMELLER

Kaplama Türleri

Yol kaplamaları, yapısal davranışlarına göre rijit ve esnek olmak üzere iki ana grupta sınıflandırılır. Bu temel ayrım, kaplamaların trafik yüklerini alt tabakalara dağıtma biçimindeki farklılıktan kaynaklanır. Esnek kaplamalarda yükler, yapıdaki tüm tabakalar tarafından kademeli olarak taşınırken; rijit kaplamalarda beton döşeme, yükün büyük bir bölümünü tek başına karşılar ve alt katmanlara yalnızca düşük seviyede bir gerilme aktarır (Öztürk 2018). Esnek ve rijit yapıların yük dağılımı Şekil 1'de verilmiştir (Muench *et al.* 2003).

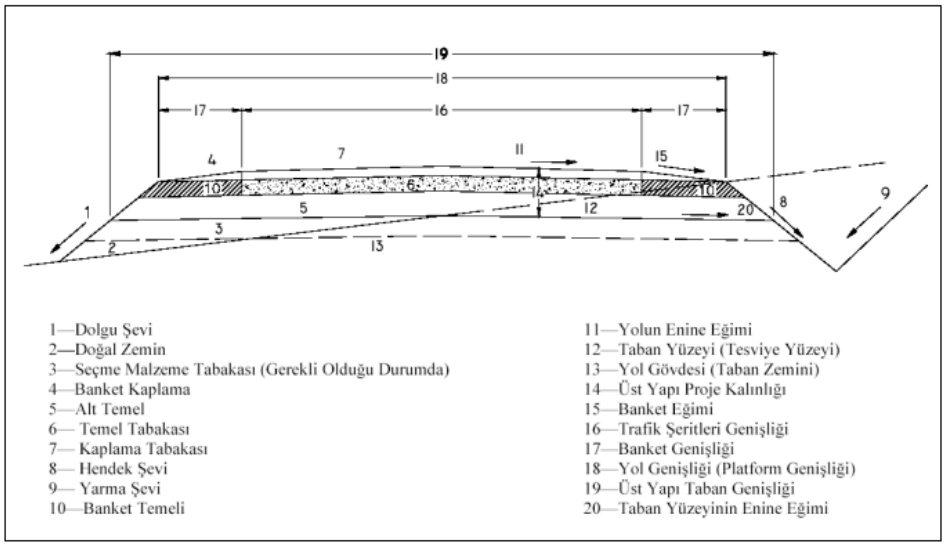


Şekil 1. Esnek ve rijit yol kaplaması yük dağılımı (Muench *et al.* 2003).

Esnek yol kaplamaları

Esnek üstyapı, tabakalı bir sistem olarak bilinmektedir ve bu sistemin yük taşıma kapasitesi, sistemi oluşturan tabakaların üstyapı direncine etkisi ve yük yayabilme özelliklerine dayanmaktadır. Tipik bir esnek üstyapı enkesiti Şekil 2'de verilmiştir (Umar ve Ağar 1985).

Esnek bir yol üstyapısını etkileyen faktörler; dingil kaynaklı yükler, yüklerin tekrarlanma sayısı, trafiğin hacmi, taban zemininin taşıma gücü, zeminin suya hassasiyeti, üstyapıdaki alt temel, temel ve kaplamada kullanılan malzemelerin mekanik özellikleri, yolun beklenen hizmet düzeyi, ekonomik hizmet ömrü ve yolun imal edileceği bölgenin iklimsel ve bölgesel koşullar olarak sınıflandırılabilmektedir.



Şekil 2. Esnek üstyapı enkesiti (Umar ve Ağar 1985).

Esnek üstyapıların avantajları;

- Asfalt beton kaplamaları, trafikte düzgün ve gürültüsüz bir yüzey sağlarlar,
- Yüzeyde meydana gelen aşınmalara ve dingil yüklerinden meydana gelen deformasyonlara karşı dirençlidirler,
- Özellikle kuru haldeyken yüksek sürtünme katsayısına sebep olurlar,
- Stabiliteleri ve rijitlikleri belirli sınırlarda olduğu için gelen trafik yükünü alt tabakalara yayarlar,
- Asfalt beton kaplama imal edildikten birkaç saat sonra trafiğe açılabilir,
- Asfalt beton kaplamanın uygulaması daha kolaydır,
- Asfalt betonun bakımı kolaydır. Ancak bakımın sık yapılması gerekmektedir.

Dezavantajları;

- Asfalt betonundaki bağlayıcı olan asfalt, termoplastik bir malzeme olduğundan yola uygulama yapılırken titizlikle davranmak gerekir. Sıcaklık değişimleri yolun kalitesini doğrudan etkiler.
- Esnek üstyapıların projelendirilmesi rijit üstyapılara göre karışık olarak değerlendirilmektedir.
- Bitümlü bağlayıcıların yapısı, bağlayıcı içerisindeki uçucu malzemelerin uçması ve okside olması ile kaplama imal edilmesinden birkaç sene sonra bozulur. Böylece yol kaplaması daha gevrek bir hal alır ve çabuk deformasyona uğrar.
- Bitümlü kaplamalar koyu renkte oldukları için gece görüşünü oldukça azaltmaktadır.

- Bitümlü kaplamanın uygulanacağı zeminin tamamen kuru ya da en fazla %2 oranında nemli olması gerekmektedir. Dolayısıyla yağış oranının yüksek olduğu bölgelerde bitümlü kaplama uygulama süresini kısaltır.
- Esnek üstyapıda kullanılan asfalt petrolün damıtılmasıyla elde edilmektedir. Ülkemize kullanılan petrolün çoğunluğunun ithal edilmesi sebebiyle döviz harcaması gerektirmektedir.
- Esnek üstyapıların yapımında genellikle rijit üstyapıdan daha fazla enerji tüketilmektedir (Umar ve Ağar 1985).

Rijit yol kaplamaları

Portland çimentosundan yapılan ve eğilme direncinin yüksek değerlerde solduğu tek tabakalı beton bir plak vasıtasıyla yükleri taban zeminine yayan üst yapı tipine rijit yol kaplaması denmektedir (Macit 2009). Rijit yol kaplamaları, genellikle nispeten zayıf olan zeminlerde ve yüksek trafik yüklü bölgelerde kullanılmaktadır. Bu kaplamalar, Şekil 3'te görüldüğü gibi granül halindeki bir temel veya alt temel tabakası üzerine portland çimentosu kullanılarak inşa edilmektedir (Deshmukh *et al.* 2017; Gill and Maharaj 2015; Huang 2004).



Şekil 3. Rijit bir kaplamanın tipik kesiti (Deshmukh *et al.* 2017).

Rijit kaplamalarda kullanılan betonun başlıca görevi, trafikten dolayı oluşan şiddetli yükleri tabana iletmek ve bunu yaparken de tabanın deforme olmasını engellemektir. Betonun çekme direncinin düşük olması, betondaki deformasyonlar ile gerilmeler arasındaki bağlantı lineer görülmemesine sebep olmaktadır. Uygulanan yük ortadan kalktıktan sonra betonda belirli bir miktarda deformasyon meydana gelir ve bir süre sonra beton eski haline döner (Umar ve Ağar 1985).

Rijit yol kaplamalarının avantajları;

- Kaymaya karşı dirençlidir,
- Harekete karşı dirençler düşük olduğundan araçların yıpranması azalır ve mekanik ömürleri artar. Bu yüzden ekonomiktir,
- Dayanıklılık bakımından her türlü etkiye karşı koyabilecek şekilde tasarlanabilir,

- Yüzey pürüzlülüğü düşük olduğundan yüksek hızda gürültü ve toz meydana getirmez,
- Açık renkli olmasından dolayı geceleri rahatlıkla görülebilir,
- Bakımları düzenli yapıldığında yüzey geçirimsizliğini tam olarak sağlar,
- Tedbir alındığında zayıf bir temel üzerine de inşa edilebilir,
- Bakım maliyetleri esnek kaplamalara göre daha düşüktür,
- Bitüm asfalt olmadan önce yakıldığı için zehirli gazlar şeklinde kirlilik üretir. Rijit kaplamalar bu tür yöntemleri içermez ve böylece kirlilik azalır (Umar ve Ağar 1985; Menekşe 2020).

Dezavantajları;

- Yol projelendirmesi ve uygulamasında yapılacak küçük bir hata yolun daha çabuk bozulmasına yol açan çatlaklar meydana getirebilmektedir,
- Yol yapımı ve kürlenmesi esnasında yolun trafiğe kapalı olması gerekmektedir. Bu da sürdürülebilirlik açısından olmuşuz bir durum oluşturmaktadır,
- Beton yol altyapı sisteminin yapılmasına zorluk çıkarabilir. Beton yolun inşası sonrasında altyapı inşası ya da tamirat işlemleri oldukça güçtür,
- Güneşte parlayarak göz kamaşmasına sebep olabilir,
- Derzler gürültüye sebep olabilir,
- Aşınma etkisi ile kayganlaşarak trafik güvenliğe olumsuz etki edebilmektedir (Umar ve Ağar 1985; Menekşe 2020).

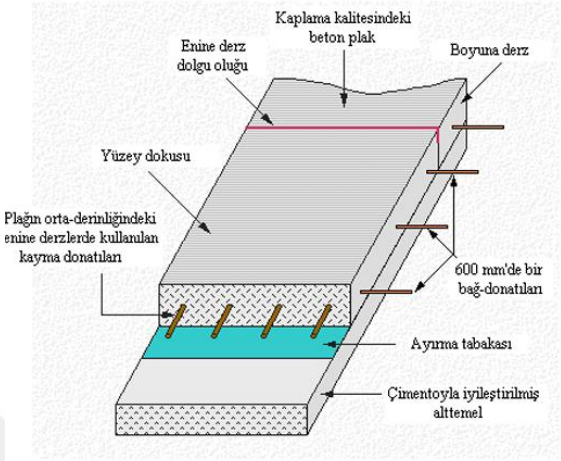
Rijit Kaplama Türleri

Rijit kaplamalar, derz ve donatı tasarımlarına göre temelde derzli donatısız, derzli donatılı ve sürekli donatılı üç ana gruba ayrılır.

Derzli Donatısız Beton Kaplamalar

Derzli donatısız beton kaplamalar, bünyesinde yapısal donatı çeliği bulundurmayan ve tipik olarak 3,60 ila 6,00 metre arasında değişen nispeten kısa plaklardan teşkil edilen bir rijit üstyapı sistemidir. Plak kalınlıkları genellikle 125 mm ile 350 mm aralığındadır. Bu sistemde plaklar arasındaki yük aktarımı, derz tasarımına bağlı olarak iki temel mekanizma ile sağlanır. Düşük hacimli trafik altında agregaların kenetlenme etkisi yeterli olabilirken, ağır trafik yükleri altında derzlerde faylanmayı önlemek ve yük transfer verimliliğini artırmak amacıyla kayma demirleri kullanılır. Beton plaklar, homojen bir yataklama sağlamak amacıyla, genellikle kalınlığı 200 mm'ye ulaşabilen stabilize edilmiş granüler veya bitümlü malzemelerden oluşan alt temel tabakaları üzerine inşa edilir (TCK 2019). Bu sistemde, betonun sıcaklık ve nem

değişimleri nedeniyle maruz kaldığı çekme gerilmelerini kontrol altında tutmak esastır. Bu amaçla, kaplama yüzeyine belirli aralıklarla enine ve boyuna derzler teşkil edilir. Böylece, oluşması kaçınılmaz olan çatlakların bu zayıflatılmış kesitlerde, yani derzlerde, kontrollü bir şekilde meydana gelmesi sağlanır. Derzli donatısız bir beton kaplamaya ait plan ve kesit detayları Şekil'4 de sunulmaktadır (The British In-situ Concrete Paving Association 2002).



Şekil 4. Derzli donatısız tipteki rijit üstyapılar (The British In-situ Concrete Paving Association, 2002).

Derzler arasındaki yük aktarımı, ağır trafik altında olmayan yollarda agrega kenetlenmesi ile sağlanır. Ancak ağır trafikli yollarda, derzlerde oluşabilecek düşey ötelenmeleri önlemek ve yük aktarım verimliliğini artırmak amacıyla enine derzlere kayma demirleri, boyuna derzlere ise şeritlerin birbirinden ayrılmasını önlemek için bağ demirleri yerleştirilir (Tanyıldızı 2022). Derzli donatısız tipteki rijit üstyapılar genellikle, Amerika Birleşik Devletlerin tüm iklim alanlarında, hava alanı döşemelerinde, otoyollarda ve şehir içi caddelerde kullanılmaktadır (The British In-situ Concrete Paving Association 2002).

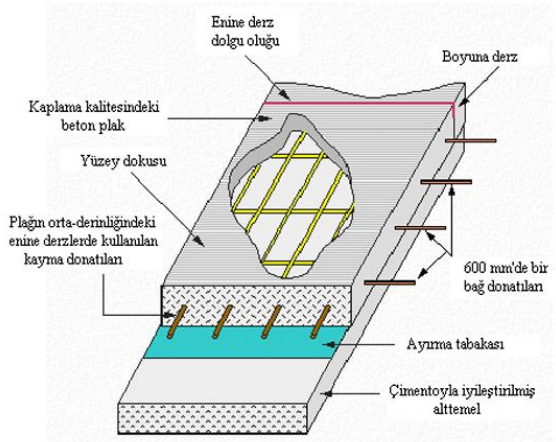
Derzli Donatılı Beton Kaplamalar

Derzli donatılı beton kaplamalar, yapısal olarak derzli donatısız kaplamalara benzemektedir. Fakat derzli donatısız kaplamalardan farkı her bir beton plağın içerisinde donatı çeliği ağı içermesidir. Bu sistemde plak boyutları, derzli donatısız kaplamalara kıyasla daha uzun olup tipik olarak 8 ila 30 metre arasında değişir ve plak kalınlıkları ortalama 150-350 mm'dir (Tanyıldızı 2010).

Bu donatının temel amacı, yaygın bir yanılgının aksine, plağın eğilme kapasitesini veya yapısal dayanımını artırmak değildir. Asıl işlevi, uzun plaklarda sıcaklık değişimleri ve kuruma büzülmesi nedeniyle oluşması muhtemel enine çatlakları kontrol altında tutmaktır. Çelik donatı, oluşan çatlakların iki yüzünü birbirine yakın ve sıkı bir şekilde tutarak çatlak genişliğinin

minimum seviyede kalmasını ve ilerlemesini engeller. Bu sayede, çatlak yüzeyleri arasındaki agrega kenetlenmesi korunur ve yük transferinin kesintisiz bir şekilde devam etmesi sağlanır (Ecevit 2007; Tanyıldızı 2010).

Daha uzun derz aralıkları, derzlerde daha büyük hareketlere ve açıklıklara neden olur. Bu nedenle, plaklar arasındaki yük transferinin etkin bir şekilde sağlanabilmesi için derzlerde kayma demirlerinin kullanılması bir zorunluluktur. Bu özellikleri nedeniyle derzli donatılı beton kaplamalar, özellikle sıcaklık farklarının fazla olduğu bölgelerdeki ağır trafikli şehirlerarası yollarda tercih edilmektedir (Tunç 2007). Derzli donatılı bir beton kaplamaya ait plan ve kesit detayları Şekil 5' de sunulmaktadır.

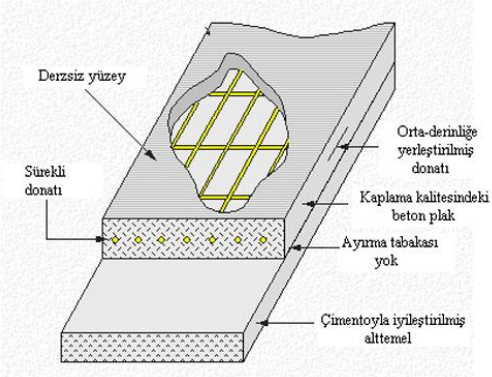


Şekil 5. Derzli donatılı tipteki rijit üstyapılar (The British In-situ Concrete Paving Association, 2002).

Sürekli Donatılı Beton Kaplamalar

Sürekli donatılı beton kaplamalar, enine derzlerin tamamen ortadan kaldırıldığı ve yapısal bütünlüğün plak boyunca kesintisiz devam eden çelik donatı ile sağlandığı ileri bir rijit kaplama sistemidir. Bu tasarımda, derzli kaplamalara kıyasla çok daha yüksek oranda (tipik olarak kesit alanının %0,6-%0,8'i kadar) boyuna donatı kullanılır ve plak kalınlıkları genellikle 150-250 mm aralığındadır (Boztepe 2011; TCK 2019).

Bu sistemin temel çalışma prensibi, çatlakları önlemek yerine onları kontrol altında tutmaktır. Yüksek donatı oranı, betonun büzülmesini kısıtlayarak kaplamanın servis ömrünün ilk birkaç yılında, genellikle 0,6 ila 2,4 metre aralıklarla çok sayıda enine çatlağın kontrollü bir şekilde oluşmasına neden olur (The British In-situ Concrete Paving Association 2002). Bu çatlakların oluşumu, tasarımın istenen ve beklenen bir parçasıdır. Sürekli donatı, bu çatlakları sıkıca bir arada tutarak hem su sızıntısını engeller hem de agrega kenetlenmesi yoluyla yüksek bir yük transfer verimliliği sağlar. Sürekli donatılı bir beton kaplamaya ait plan ve kesit detayları Şekil 6'da sunulmaktadır.



Şekil 6. Sürekli donatılı tipteki rijit üstyapılar (The British In-situ Concrete Paving Association, 2002).

Sürekli donatılı beton kaplamaların istenen çatlak modelini oluşturabilmesi için, beton plak ile arasında yüksek sürtünme sağlayan stabilize bir alt temel tabakası üzerine inşa edilmesi tercih edilir. Bu destek, üstyapı sonundaki hareketleri azaltarak çatlak deseninin korunmasına yardımcı olur (Tanyıldızı 2022). Donatının yetersiz kaldığı veya alttaki desteğin zayıfladığı durumlarda, bu enine çatlaklar genişleyebilir ve boyuna çatlaklarla birleşerek zımbalama etkisi olarak bilinen ciddi yapısal bozulmalara yol açabilir.

Beton Yollarda Aranan Performans Kriterleri

Bir beton yolun mühendislik başarısı, yalnızca döküldüğü gündeki kusursuzluğunda değil, on yıllar boyunca toplumun ulaşım ihtiyaçlarına verdiği yanıtta gizlidir. Bu yanıtın kalitesini tanımlayan performans kavramı, çok katmanlı ve insan odaklı bir değerlendirmeyi zorunlu kılar. Bu değerlendirmenin temelinde, yolun fiziksel omurgası olarak tanımlanabilecek yapısal performans yer alır. Bu performans, kaplamanın bir mühendislik yapısı olarak varoluşsal vaadini, yani trafik ve çevre yükleri altında hizmet verme kabiliyetini temsil eder. Teknik olarak bu durum genellikle beton plağın yeterli eğilme dayanımına sahip olmasıyla ölçülür. Eğilme dayanımının kaplama kalınlığı tasarımının birincil parametresi olduğu söylenebilir. Ayrıca, tekrarlı yükler altında çatlak oluşumuna ve ilerlemesine karşı gösterilen yorulma direnci, yapısal ömrü doğrudan belirler (LaHucik *et al.* 2017). Derzli kaplamalarda ise, plaklar arasındaki yük transfer verimliliği ve bunun sonucunda ortaya çıkan faylanma gibi düşey ötelenmelerin kontrolü, yapısal performansın kritik göstergeleridir. Plak altından su ve ince malzeme pompalanması olarak bilinen pompaj olayına karşı direnç de bu bütünlüğün bir parçasıdır (Bilim 2019). Ancak bu omurga, asıl amacına ancak kullanıcı deneyimini mükemmelleştirdiğinde ulaşır. Mühendislik tasarımının insanla buluştuğu bu arakesitte fonksiyonel performans devreye girer. Sürücünün hissettiği yüzey düzgünlüğü, uluslararası

kabul görmüş Uluslararası Düzgünsüzlük İndeksi (IRI) ile sayısal olarak ölçülür ve doğrudan sürüş konforunu tanımlar (Sayers *et al.* 1986). Islak zeminde güvenli bir fren mesafesi sunan yüzey dokusu ise, lastik ile kaplama arasındaki sürtünmeyi ifade eden kayma direnci ile ölçülür. Bu özellik hem malzemenin mikro dokusuna hem de yüzeydeki suyun drenajını sağlayan makro dokuya bağlıdır. Son olarak, yol kenarındaki yaşam kalitesini etkileyen trafik gürültüsü, yüzey dokusunun akustik özellikleri ile belirlenir ve standart ses ölçüm yöntemleriyle değerlendirilir. Yapısal olarak kusursuz fakat konforsuz veya güvensiz bir yol, nihai hedefine ulaşamamış bir tasarımdır. Bu yapısal ve fonksiyonel niteliklerin zamana karşı direncini ise durabilite, yani kalıcılık performansı tanımlar (Mutuk 2013). Durabilite, betonun bir malzeme olarak çevresel saldırılara karşı koyarak, ilk günkü performans vaadini yıllar sonrasına ne kadar başarıyla taşıyabildiğinin bir ölçüsüdür. Bu, özellikle donma-çözülme döngülerine karşı, betona kontrollü olarak sürüklenmiş hava boşlukları ile kazandırılan dirençle ölçülür (Abut 2017). Aynı zamanda, buz çözücü tuzlardan kaynaklanan klorür iyonu nüfuzuna ve zemin suyundan gelebilecek sülfat ataklarına karşı kimyasal direnci de kapsar. Trafiğin tekerlekleri altında yüzeyin fiziksel aşınmasına karşı gösterilen aşınma direnci de durabilitenin bir diğer önemli bileşenidir. Dolayısıyla durabilite, yalnızca bir malzeme özelliği değil, aynı zamanda projenin ekonomik ve ekolojik sürdürülebilirliğinin de bir teminatıdır. Tanımlanan bu çok yönlü performans hedeflerine ulaşılabilmesi, doğrudan betonu oluşturan bileşenlerin seçimine, kalitesine ve aralarındaki uyuma bağlıdır. Betonun matrisini oluşturan bağlayıcı malzemelerin türü, iskelet yapıyı teşkil eden agregaların nitelikleri, hidratasyon ve işlenebilirliği yöneten karma suyu ve betonun performansını hassas bir şekilde ayarlamak için kullanılan katkılar, nihai ürünün başarısını belirleyen temel unsurlardır.

Bağlayıcılar

Yüksek dayanımlı beton yol kaplamalarının tasarımındaki temel ilke, bağlayıcı sistemini optimize ederek mekanik dayanımı yüksek, yoğun ve geçirimsiz bir mikro yapı oluşturmaktır. Bu sistemin temelini Portland çimentosu oluşturur ve karışımdaki miktarı, betonun temel mukavemet parametrelerini doğrudan etkiler. Literatürdeki çalışmalar, çimento içeriğinin artırılmasının hem basınç hem de eğilme dayanımını artırdığını tutarlı bir şekilde göstermektedir. Örneğin, Rooholamini *et al.* (2018), çimento miktarını 300'den 350 kg/m³'e çıkardıklarında betonun eğilme dayanımında belirgin bir artış olduğunu raporlamışlardır. Bununla birlikte, optimum bir bağlayıcı içeriğinin belirlenmesi kritik öneme sahiptir. Hazaree, Ceylan and Wang (2011), basınç dayanımı, yoğunluk ve su emme gibi özellikler dikkate alındığında, optimum çimento miktarının 225 ± 25 kg/m³ aralığında olduğunu belirtmiştir. Bu bulgu, aşırı çimento kullanımının maliyeti ve büzülme riskini artırırken mukavemete orantılı

bir katkı sağlamayabileceğini göstermektedir. Çimento tipi olarak genellikle Tip I Portland çimentosu kullanılsa da özellikle kalın kesitli kaplamalarda hidratasyon ısısını kontrol etmek amacıyla düşük C_3S içeriğine sahip düşük hidratasyon ısılı çimentoların kullanımı da mümkündür (LaHucik and Roesler, 2015).

Günümüz beton teknolojisinde, bağlayıcı sistemi yalnızca çimentodan oluşmaz; çimentonun bir kısmının endüstriyel yan ürünlerle ikame edilmesi hem performansı artıran hem de önemli ekonomik ve çevresel avantajlar sunan temel bir yaklaşımdır. Bu yardımcı çimentolu malzemeler arasında en yaygınları şunlardır:

- **Uçucu Kül:** En yaygın kullanılan puzolanlardan biri olan uçucu kül, genellikle betonun işlenebilirliğini artırır ve puzolanik reaksiyon yoluyla uzun vadeli dayanımına katkı sağlar. Ancak durabilite üzerindeki etkileri, özellikle soğuk iklimlerde dikkatle incelenmelidir. Bazı araştırmalar, uçucu kül kullanımının donma-çözülme direncini düşürebileceğini rapor etmiştir (Mardani-Aghabaglou *et al.* 2013). Bu nedenle, kış mevsiminin sert geçtiği bölgelerde kullanımının sınırlandırılması önerilmektedir.
- **Yüksek Fırın Cürufu ve Silis Dumanı:** Granül halde öğütülmüş yüksek fırın cürufu, betonun dayanıklılığı üzerinde olumlu etkileri olan bir diğer önemli ikame malzemesidir. Aghaeipour and Madhkhan (2017), bağlayıcı malzemenin %40'ına varan oranlarda cüruf ikamesinin durabiliteyi iyileştirdiğini gözlemlemiştir. Özellikle kışın sert olduğu ve yüksek dayanıklılık gerektiren bölgelerde ise, çimento ağırlığının %10'unun üzerinde silis dumanı kullanıldığında hem dayanımın hem de donma-çözülme gibi durabilite özelliklerinin önemli ölçüde arttığı tespit edilmiştir.

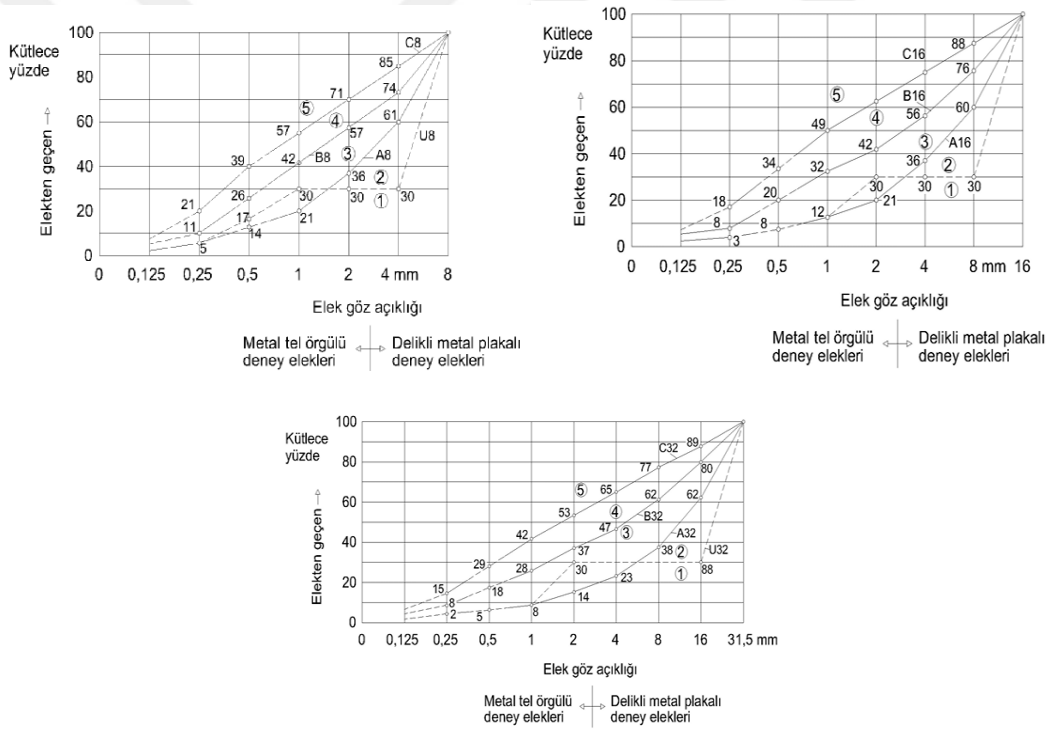
Tüm bu gelişmiş bağlayıcı sistemlerinin etkin bir şekilde kullanılabilmesi, düşük su/bağlayıcı oranını ve işlenebilirliği bir arada sağlamaya bağlıdır. Bu dengeyi kurmak için, karışımın akıcılığını sağlayan süperakışkanlaştırıcı kimyasal katkıların kullanılması, modern yüksek performanslı beton üretiminin ayrılmaz bir parçasıdır.

Agregalar

Agregalar (kum, çakıl, kırmataş), beton hacminin yaklaşık %60-75'ini oluşturarak karışımın iskelet yapısını teşkil eder. Bu nedenle, betonun hem taze hem de sertleşmiş haldeki performansı, kullanılan agregaların özelliklerine doğrudan bağlıdır. Agregalar yalnızca birer dolgu malzemesi değil, aynı zamanda betonun dayanımını ve ekonomikliğini belirleyen aktif bileşenlerdir.

Beton karışım tasarımında agreganın en kritik özelliği granülometrisidir. İyi tasarlanmış bir gradasyona sahip agrega karışımı, taneler arasındaki boşluk hacmini minimize eder. Bu

durum, bu boşlukları doldurmak için gereken çimentolu bağlayıcı hamuru miktarını azalttığı için çok önemlidir. Daha az bağlayıcı hamuru ihtiyacı; daha düşük maliyet, daha az büzülme riski ve daha yüksek boyutsal kararlılık anlamına gelir. Uygun bir agrega gradasyonunun seçimi, aynı zamanda taze betonda ayrışma potansiyelini azaltır ve yerleşmiş betonun homojenliğini artırır. Beton yol kaplamalarında kullanılan ince agrega granülometrisi için, özellikle 2 mm ve daha küçük çapa sahip tanelerin (D≤2 mm) oranını kontrol altında tutmaya yönelik belirli sınırlamalar bulunmaktadır. Bu kapsamda, 1 mm'lik elekten geçen malzeme miktarının toplam agreganın %27'sini, 2 mm'lik elekten geçen miktarın ise %30'u aşmaması gerekmektedir. Ancak, karışımda kullanılan maksimum agrega boyutunun 8 mm olduğu daha ince gradasyonlu tasarımlarda, 2 mm'lik elekten geçen malzeme oranı için üst limit %35'e kadar artırılabilmektedir (KGM 2016). Agrega en büyük tane büyüklüğüne göre olması gereken agrega granülometri eğrileri Şekil 7'de verilmiştir.



Şekil 7. Agrega en büyük tane büyüklüğü 8,16 ve 32 mm durumlarına göre agrega granülometri eğrileri (KGM 2016).

Granülometrinin yanı sıra, agregaların diğer fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri de beton performansı için büyük önem taşır. İnşaat süresi boyunca agrega kaynağının kalite ve tutarlılık açısından sürekli test edilmesi gerekir. Bu testler; tane şekli ve yüzey dokusu, aşınma direnci, donma-çözülme dayanıklılığı ve potansiyel alkali-silika reaktivitesi gibi kimyasal reaktiflik durumunu doğrulamalıdır. Sonuç olarak, agrega seçimi ve optimizasyonu hem su ihtiyacını hem de gereken bağlayıcı miktarını doğrudan etkileyerek bir bütün olarak kaplamanın dayanımını, dayanıklılığını ve servis ömrünü şekillendirir (Harrington *et al.* 2010).

Su

Beton karışımındaki su, iki temel ve kritik role hizmet eder: Birincisi, çimento ve diğer bağlayıcı malzemelerle kimyasal reaksiyona girerek hidratasyonu başlatmak ve bu sayede betonun sertleşerek mukavemet kazanmasını sağlamaktır. İkincisi ise, taze beton karışımına karıştırılma, taşınma ve yerleştirilme işlemleri için gerekli olan akıcılığı, yani işlenebilirliği kazandırmaktır. Modern yüksek dayanımlı beton tasarımında, su miktarının kontrolü en önemli hususdur ve bu, su/bağlayıcı oranı ile ifade edilir. Betonun basınç dayanımı, donma-çözülme direnci ve geçirimsizlik gibi temel performans özellikleri, su/bağlayıcı oranıyla ters orantılıdır; yani bu oran ne kadar düşük olursa, betonun nihai kalitesi o kadar yüksek olur. Bu nedenle, beton tasarımındaki temel hedeflerden biri, işlenebilirliği kaybetmeden mümkün olan en düşük su/bağlayıcı oranını elde etmektir. Karışım suyu hesaplanırken, agregalarda bulunan serbest suyun da dikkate alınarak toplam su miktarının hassasiyetle ayarlanması gerekir.

Kullanılan suyun kalitesi de en az miktarı kadar önemlidir. Suyun içerisinde, çimento prizine veya donatı korozyonuna etki edebilecek yağ, asit, alkali, tuz ve organik maddeler gibi zararlı maddeler bulunmamalıdır. Genellikle, içilebilir nitelikteki sular beton üretimi için uygun kabul edilir ve su kalitesi için ASTM C1602 gibi standartların gereklilikleri esas alınır. Çalışmanın başlangıcında su kaynağının test edilmesi ve karışım tasarımlarında mümkünse sahada kullanılacak suyun tercih edilmesi, tutarlı ve yüksek kalitede beton üretimi için önemlidir (Harrington *et al.* 2010).

Katkılar

Modern yüksek dayanımlı betonun istenen özelliklere ulaşabilmesi için, çimento, su ve agrega gibi ana bileşenlerin oranlarını ayarlamanın ötesinde, taze ve sertleşmiş betonun özelliklerini hassas bir şekilde modifiye eden kimyasal katkıların kullanılması bir zorunluluktur. Bu katkılar, karışımın performansını optimize etmek ve geleneksel yöntemlerle üstesinden gelinemeyecek zorlukları aşmak için kullanılır. Yapılan araştırmalar, uygun kimyaya sahip katkılar kullanılarak betonun hem taze hem de sertleşmiş haldeki özelliklerinin önemli ölçüde geliştirilebileceğini göstermektedir (Hazaree *et al.* 2013). Beton yol kaplamalarında en sık kullanılan katkılar şunlardır:

- **Su Azaltıcılar ve Süperakışkanlaştırıcılar:** Yüksek dayanımlı betonun temelini oluşturan düşük su/bağlayıcı oranının en büyük dezavantajı, işlenebilirliği ciddi ölçüde azaltmasıdır. Süperakışkanlaştırıcılar, çimento taneciklerini dağıtarak çok daha az su ile çok daha akışkan bir beton elde edilmesini sağlar. Bu sayede, hem yerleştirme ve

sıkıştırma işlemleri kolaylaşır hem de betonun dayanım ve durabilitesi en üst seviyeye çıkarılır (Harrington *et al.* 2010).

- **Priz Ayarlayıcı Katkılar:** Betonun priz süresini kontrol etmek, özellikle yol gibi büyük ölçekli ve anlık hava koşullarına açık uygulamalarda hayati önem taşır. Priz geciktiriciler, özellikle sıcak havalarda veya uzun taşıma mesafelerinde betonun erken priz almasını önleyerek işlenebilirlik süresini uzatır. Bu gecikme, bitişik şeritlerin dökümü arasında soğuk derz oluşumunu engelleyerek daha iyi bir bağ mukavemeti sağlar. Bunun aksine, priz hızlandırıcılar ise soğuk hava koşullarında prizi hızlandırmak ve yolun trafiğe erken açılmasını gerektiren projelerde erken yaş dayanımını artırmak için kullanılır (The British In-situ Concrete Paving Association 2002).
- **Hava Sürükleyici Katkılar:** Özellikle donma-çözülme döngülerinin yaşandığı soğuk iklimlerdeki beton yollar için en kritik katkılardan biridir. Bu katkılar, betonun içinde kasıtlı olarak milyonlarca mikroskobik ve stabil hava kabarcığı oluşturur. Bu kabarcıklar, donan suyun genleşmesi için birer genleşme odacığı görevi görerek, betonun içsel gerilmelerden dolayı çatlamasını ve bozulmasını engeller, böylece kaplamanın servis ömrünü önemli ölçüde uzatır (Öztürk 2018).

Lifler

Lifler doğal kaynaklardan yararlanılarak ya da insan eliyle üretilen, bükülebilirliği, dayanıklılığı, uzunluğu ve esnekliği olan hammaddelerdir. Betonun tekrarlı yüklerle zorlanması, en zayıf noktasından başlayıp taşıma kapasitesinin aşılmasına ve bunun sonucunda da çatlakların oluşmaya başlamasına sebep olmaktadır. Betonlarda kullanılan lifler ise, sahip olduğu yüksek çekme dayanımından dolayı, betonda çatlak oluşumunu ve yayılmasını engelleyebilmektedir. Beton içerisinde kullanılan lifin miktarı doğru şekilde ayarlandığında, lifler betona uygulanan yükleri beklenildiği gibi karşılayarak çatlakların oluşmasını önlemektedirler. Çatlak sonlarına bitişik olarak bulunan lifler, matriste oluşan gerilmeleri kendi üzerlerine çekerler. Sonuçta çatlamayan bir beton kesiti oluşumunu ve dolayısıyla da dayanımda artışı sağlarlar. (Bilim 2019). Özellikleri ve kullanım alanları bakımından birçok lif türü bulunmaktadır. Bu lifleri değişik biçimlerde sınıflandırmak mümkündür. Lifler genel olarak Tablo 1'deki gibi sınıflandırılabilirler (Aral 2006).

Tablo 1. Lif Çeşitleri

Doğal Lifler			Yapay Lifler
Bitkisel Lifler	**Hayvansal Lifler**	**Madensel Lifler**	
Akwara	Yün	Asbest	Cam Lifleri
Bambu	İpek	Bazalt	Kevlar
Hindistan Cevizi Kabuğu	Kıl	Metal Lifler	Akrilik
Keten, Kenevir		Karbon	Aramid
Jüt			Naylon
Sisal			Polyester
Şeker Kamışı Posası			Polietilen
Ahşap (Selüloz)			Polipropilen
			Poliüretan

Bir malzemenin ASTM standartlarına göre lif olarak sınıflandırılabilmesi için, en/boy oranının en az 1/10 olması gibi geometrik şartları sağlaması gerekir. Kesit boyutları için ise, en büyük genişliğin 0,25 mm'yi ve en büyük kesit alanının 0,05 mm²'yi aşmaması şart koşulmuştur (Aran 1990). Dairesel lifler için çap kriteri daha belirleyici olup, bu çaptaki bir lifin alanı yaklaşık 0,049 mm²'ye tekabül etmektedir. Liflerin ince çaplı olarak üretilmeleri, büyük kütlesel yapılara göre daha az yapısal hata içermelerine olanak sağlar. Böylece aynı malzemelerin lif formunun mekanik özelliklerinin de üstün olduğu söylenebilmektedir (Asi 2008). Lifler betonun eğilme dayanımını ve betondaki tokluğu ya da ikisini birden artırabilmektedirler. Örnek olarak polipropilen lif betonun tokluğunu dikkat çekecek şekilde artırırken çekme dayanımına etkisi çok azdır. Fakat bu polipropilen lif cam lif ile kullanıldığında yüksek tokluk ve çekme dayanımını olan betonlar üretilebilmektedir (Bilim 2019). Çekme dayanımı açısından bakıldığında en iyi performansı sergileyen lif türlerinin çelik ve cam lifler olduğu söylenebilmektedir. Ayrıca çelik lifler özgül ağırlıkları en fazla olan lif türüdür. Lif türlerinin bazı fiziksel özellikleri Tablo 2'de belirtilmiştir.

Tablo 2. Değişik Türdeki Liflerin Fiziksel Özellikleri

Lif Cinsi	Çekme Dayanımı (MPa)	Elastisite Modülü(10^3, MPa)	Maksimum Uzama (%)	Özgül (gr/m^3)	Ağırlık
Akrilik	207-414	2.1	25-45	1.1	
Abustle	552-966	83-138	0.6	3.2	
Pamuk	414-690	4.8	3-10	1.5	
Cam	1035-3795	69	1.5-3.5	2.5	
Naylon	759-828	4.1	16-20	1.1	
Polyester	724-863	8.3	11-13	1.4	
Polietilen	690	0.14-0.4	10	0.95	
Polipropilen	552-759	3.5	25	0.9	
Pamuk- Yün	414-621	6.9	10-25	1.5	
Mineral Yünü	483-759	69-117	0.6	2.7	
Çelik	276-2760	200	0.5-35	7.8	

Çelik lif

Çelik lifler, betona eklenen metalik liflerden en yaygın olarak kullanılan lif çeşididir. Çelik lifler, betonun eğilme direnci, yorulma direnci, çarpmaya ve çatlamaya karşı olan direncini fark edilecek düzeyde iyileştirdiği için yol betonu yapımında en yaygın kullanılan lifler arasındadır. Standartlara göre boyları 30-60 mm, çapları ise 0.5-1.0 mm arasında değişen çelik liflerin yük etkisiyle kopmadan, matristen sıyrılmalarına rağmen çekme dayanımlarının en az 345 N/mm olması istenmektedir (TSE 2511 1977).

Çelik liflerin özellikle karıştırma yapılırken bükülmeye karşı dirençlerinin yüksek olması ve sertliklerinden dolayı diğer liflere göre narinlik oranları daha çok dikkate alınmaktadır. Narinlik oranı lifin boyunun çapına oranıdır(L/d). Çelik liflerin narinlik oranı 20-250 arasındadır (Bartos 1992).

TS EN 14889-1'de çelik lifler şekillerine göre;

A: Düz, pürüzsüz yüzeyli,

B: Bütün uzunluğunca deforme olmuş ve

C: Sonu kancalı lifler olarak sınıflandırılabilmektedir.

Beton içerisine eklenen liflerin yapılan yüklemeleri kırılma ve kopma yapmadan taşımaları beklenmektedir. Çelik lifler 1100 N/mm^2 çekme dayanımı ile bu değerleri bulmaktadır. Çelik liflerin düşük elastik limitleri (%0,2), yüksek çekme gerilmesiyle birleştirilmiştir (Beksa 1998).

Polimer lif

Polimer lifler birçok alanda kullanılan lif türlerinden biridir. Bu lifler doğal ve sentetik olmak üzere iki ana grupta değerlendirilebilir. Doğal lifler; hint keneviri, sisal ve pamuk gibi bitkisel veya deri, yün gibi hayvansal olabilmektedir. Doğal lifler genellikle doğada polimer olarak bulunmaktadırlar. Ayrıca, bazı doğal lifler kaya formlarında bulunabilmektedirler ve bu lifler mineral halde bulunmaktadırlar. Dolayısıyla seramik olarak adlandırılabilmektedirler (Chawla 1998).

Liflerin fazla oranda kullanılması betonun işlenebilirliğini azaltırken içinde bulunan hava miktarını da artırırlar. İşlenebilirlik ile ilgili problemleri ve hava miktarı kontrolü su azaltıcı katkıların kullanım oranını artırmakla çözülebilmektedir. İşlenebilirlik, tekil lif formundaki liflere göre hamur formundaki liflerde daha azdır. Çünkü tekil lif formundaki lifler daha homojen dağılabilmektedir. Bu sayede işlenebilirlik artmaktadır (Shah 1995).

Cam lif

Cam lifler esasında silis kumundan meydana gelen, korozyona karşı dayanım, sertlik ve diğer malzemelerle çok az tepkimeye girme gibi tipik cam özellikleri gösteren bir lif türüdür. Cam lifleri ayrıca, hafif, esnek ve pahalı olmayan bir malzemedir. Dolayısıyla cam lifleri düşük maliyetli endüstriyel uygulamalarda en çok tercih edilen lif tipi olarak bilinmektedir. Cam lifler, camların elektrik fırınında yaklaşık 1200-1500 ^{o}C de ergitilmesi ve ergiyen camların platin alaşımlı bir potanın tabanındaki binlerce delikten hızlı bir şekilde çekilerek ve soğutma bölgesinden geçirilerek üretilmektedir. Sonrasında lifler üzerine kaplama yapılıp demetler halinde makaralara sarılarak depolanmaktadırlar (Şahin 2000).

Hemen hemen tüm cam liflerin elastisite modülleri birbirine benzemektedir. Fakat çevre etkilerine karşı dirençleri ve dayanım değerleri farklılık göstermektedir. Örneğin E tipi cam lifler, yüksek çekme dayanımı ve kimyasal dirence ihtiyaç olmayan uygulamalarda kullanılmaktadırlar. Ayrıca fiyatının düşük olmasına karşın mekanik özelliklerinin iyi olması ve korozyona karşı dirençli olmalarından dolayı yapısal takviyelerde sıklıkla tercih edilmektedirler. Buna karşın en yüksek dayanıma sahip olan S tipi ve S-2 tipi camlar E tipine göre 3-4 kat daha pahalı oldukları için kullanım alanları oldukça kısıtlıdır. Diğer cam lif tipleri ve uygulama alanları sıralandığında; A tipi ve AR tipi, yüksek alkalin dayanımı gerektiren uygulamalarda kullanılabilirken C tipi, korozyon dayanımı gerektiren uygulamalarda, D tipi; elektrik akımına karşı yüksek direnç göstermesinden dolayı seramik sigorta gibi elektriğe dirençli malzemelerin üretilmesinde kullanılabilmektedir (Barbero 1999).

Karbon lif

Cam lifi son zamanlarda sık kullanılan ve geçerli bir katkı malzemesi olmasına rağmen gelişmiş kompozitlerde saf karbonun lifi daha çok kullanılmaktadır. Karbon lifi cam lifine oranla daha güçlü ve hafiftir fakat üretim maliyeti cam liften yüksektir. Karbon lifler spor araçlarında metallerin yerine ve hava araçlarının iskeletlerinde kullanılmaktadır (Çevik 2014).

Karbon lifinin diğer bütün elyaflara kıyasla en önemli avantajı yüksek modül özelliğidir. Karbon lif, bilinen tüm malzemelerle eşit ağırlıklı olarak karşılaştırıldığında en sert malzeme olduğu söylenebilir (ITO 2006).

Karbon elyafları piyasada iki şekilde bulunabilmektedir. Bunlar sürekli karbon lifler ve kırpılmış karbon liflerdir. Sürekli karbon lifler, tek yönlü bantlarda, dokuma, örgü, tel bobin uygulamalarında ve önceden reçine emdirilmiş elyaflarda kullanılabilmektedir. Ve tüm reçinelerle kombine edilebilirler. Kırpılmış karbon lifler, basınçlı kalıplarda makine parçalarında, enjeksiyon kalıplamada ve kimyasal valf yapımında kullanılabilmektedirler. Elde edilen ürünlerin ise çok iyi korozyon ve yorgunluk dayanımının yanı sıra yüksek sağlamlık ve sertlik özelliklerine sahip olduğu söylenebilmektedir.



Şekil 8. Sürekli karbon lif ve kırpılmış lif (Anonim 2024).

Bazalt lif

Bazalt, kökeni volkanik olan, dayanımı ve dayanıklılığı yüksek olan bir kayaç türüdür (Di Ludovico *et al.* 2010). Bazalt, yoğun ve sert olduğu için basınca karşı mukavemeti oldukça yüksek olan granitten daha sert bir taştır. Dolayısıyla her yerde parke, inşaat taşı, kırmataş ve balast yapımı için faydalıdır ve Türkiye'de birçok yapı işinde kullanılan tek taştır. Gaziantep, Şanlıurfa, Diyarbakır civarında ve Trakya'da Çorlu dolaylarında bazaltlar kırmataş yapımında kullanılmaktadır. Gevşek ve gevrek olan bazalt tüfleri çok porozdur ve sünger gibi gözenekli

olmaktadır. Bundan dolayı hafif yapı malzemesi olarak kullanılırken 1300° C de eritilenler de asitlere dayanıklı gereç yapımında kullanılmaktadır (Kayhan vd. 2011). Aşınma ve iklim şartlarından en az etkilenmesi nedeniyle bazalt ilk sıralarda tercih edilen doğal taş olarak bilinmektedir. Yakın gelecekte vazgeçilmez olacağına kesin gözle bakılmaktadır. Bazaltın kullanım alanı her geçen gün genişleyerek sürmektedir. Bazalt alt ve üst yapıda, tretuvarlarda, değişik kalınlık ve ölçülerde mimari yapıların her safhasında, şehir içi yollarda, zemin ve cephe kaplamalarında, bahçe düzenlemesinde ve kaldırımlarda kullanılmaktadır (Çevik 2014).

Bazalt lif de bazalt kayacının eritilerek işlenmesi sonucunda elde edilen çapı 13-20 μm arasında olan bir lif türüdür. Bazalt liflerin ısı ve ses yalıtımları oldukça yüksektir (Brigante 2014). Ayrıca, bazalt lifinin üretildiği bazalt kayacının doğada çok fazla bulunmasından dolayı diğer liflere göre daha ucuzdur. Yapılan çalışmalar bazalt liflerin kopma uzamalarının karbon liflerden ve çekme dayanımlarının E-Sınıfı cam liflerden fazla olduğunu ortaya koymuştur (Sim *et al.* 2005). Bazı çalışmalar bazalt lifinin, çimento bağlayıcılı kompozitlerin kırılma enerjisinin yanında eğilme dayanımı ve tokluğu artırabildiğini ortaya koymuştur (Ralegaonkar *et al.* 2018).

Betonarme yapılarda kullanılan çeliğe benzer formda üretilen bazalt lifli donatılar, bazalt lifler ve epoksi reçine ile üretilerek Rusya, Amerika ve Ukrayna gibi ülkeler başta olmak üzere birçok ülkede, yapı elemanlarının bazılarında donatı çeliğine alternatif olarak kullanılmaktadırlar. Özellikle korozyon riskinin çok olduğu bazı yapı elemanlarında lifli donatı, donatı çeliği için önemli bir alternatif oluşturmaktadır. Bazalt lifli donatı, klasik donatı çeliğinden daha yüksek dayanıma sahiptir ve çelik donatıya oranla çok daha hafiftir. Ayrıca termal genleşme katsayısı da betonun genleşme katsayısına oldukça yakındır. Alkali reaksiyonlara karşı yüksek direnci de göz önünde bulundurulursa, birçok alanda donatı çeliğine alternatif olma potansiyeli yüksektir (Brik 2003; TU 2009; Klimov and Piskun 2010).

Bazalt lifin diğer avantajları ise yüksek kesme mukavemeti, kimyasal saldırılara karşı yüksek direnç, yüksek ısı direnci ve ticari olarak kolay elde edilebilirliği olarak söylenebilir (Iang *et al.* 2010).

Yapılan çalışmalarda bazalt lifin, topaklanma riskinden dolayı da taze beton içerisine sonradan ilave edilmemesi bunu yerine beton kuru karışımı hazırlandığı esnada karışıma ilave edilmesi ve normal betona göre karışım süresinin %20 oranında artırılması önerilmektedir. Betonun kalitesine bağlı olarak 1m^3 betona 1-10kg bazalt elyaf karıştırılması önerilmektedir. Bazalt lifli betonlar, avantajları sayesinde, temeller ve yer altı yapıları, tüneller, beton yollar, kıyı ve liman yapıları, su kanalları, su altında kalacak köprü ayakları, hava alanı pistleri, endüstri yapılarının döşemeleri vb. birçok alanda kullanılmaktadır (Kayhan vd. 2011).

Lif takviyeli beton kaplamalar

Lif takviyeli beton, geleneksel beton malzemelerine ek olarak liflerin karışım içerisine homojen olarak dağılmasıyla elde edilen ve zamanla sertleşip dayanım kazanan bir malzeme olarak tanımlanabilmektedir (Bekaert 2001). Bu beton türü betonun mekanik özelliklerini pozitif yönde etki ettiği için kullanılmaktadır. Beton yol uygulamalarında, çatlak kontrolü için geleneksel olarak kullanılan çelik hasırlar yerine lifli donatı kullanılabilir (Menekşe 2020). Geleneksel yollarda lif kullanılması çatlak kontrolü ve dolayısıyla yolun güçlenmesi sağlanabilir. Çelik hasır donatı ile fiber donatının temel farkı, kaplamanın kalınlığı ile konum, uzunluk ve kesit alanıdır. Beton yol uygulamalarında fiber donatıların kullanılması, çelik hasırın depolanması ve yerleştirilmesi ile ilgili maliyetleri ve zorlukları ortadan kaldırabilir ve ayrıca daha düşük döşeme kalınlığının kullanılmasına izin verir (ACI Committee 544 1996).

Altoubat *et al.* (2008), %30 eşdeğer eğilme dayanımı oranı ($R_{e,3}$) ile beton kaplamanın kalınlık ihtiyacının %15 azaltılabileceğini göstermiştir. Burada bahsedilen $R_{e,3}$ değeri, ASTM C1609'dan alınan denklem 1 'e göre belirlenmiştir.

$$R_{e,3} = \frac{100*T*L}{MOR*3*b*h^2} \quad (1)$$

Yukarıdaki denklemde,

L; mm cinsinden açıklık uzunluğu,

MOR; N / mm^2 cinsinden kopma modülü,

b; mm cinsinden kiriş numunesinin genişliği

h; mm cinsinden kiriş numunesinin yüksekliği,

T; N mm cinsinden L / 150 net sapmaya kadar yük- orta açıklık sapma eğrisinden hesaplanan numunenin eğilme tokluğudur.

Yapılan çalışmalarda betonun çatlak performansını ve izin verilen derz aralığını artırmak ve gerekli döşeme kalınlığını azaltmak için beton plakalarda lifli donatı kullanımının uzun yıllardır devam ettiğini belirtilmektedir (LaHucik *et al.* 2017). Yol uygulamalarında genellikle çelik ve sentetik lifler kullanılmaktadır. Kullanılan lifin türü ne olursa olsun, lif takviyeli betondan istenen performansı elde etmek için lifli betonun uygun şekilde tasarlanması gerekmektedir. Oldukça düşük miktarda lif kullanmak betonun mekanik performansını iyileştiremezken, yüksek miktarda lif kullanımı boşluk miktarını artırabilir ve böylece betonun mukavemetinde ve dayanıklılığında bir azalmaya yol açabilir. Dolayısıyla tasarım yapılırken bu özelliklerin göz önünde bulundurulması beton performansı açısından önem arz etmektedir.

Beton yol kaplamalarının kalınlığı ve çatlak davranışı üzerine yaptığı bir çalışmada Alam (2006), özellikle ince kesitli kaplamalarda karşılaşılan çatlak sorunlarına bir çözüm

önermiştir. Alam, bu tür durumlar için en etkili çözümün, yüksek dayanımlı lif takviyeli çimentolu kompozitlerin kullanılması olduğunu belirtmiştir. Araştırmacıya göre, bu kompozitlerin bir üst katman olarak kullanılması, altyapıdaki tabakadan kaynaklanan çatlakların yüzeye yansımasını önemli ölçüde azaltmaktadır. Çalışma kapsamında, bu tür kompozitlerden oluşan iki farklı karışımın yorulma yükleri altındaki performansı incelenmiştir. Sonuç olarak, içerdiği lif takviyesi ve özel matris tasarımı sayesinde bu kompozitlerin, geleneksel betona kıyasla yorulma davranışı açısından çok daha üstün bir performans sergilediği tespit edilmiştir.

Beton yol kaplamalarının performansını iyileştirmek amacıyla, beton içerisinde lif takviyesi kullanılması üzerine birçok çalışma yürütülmüştür. Bu alandaki kapsamlı araştırmalardan birinde Bolat (2009), farklı lif türlerinin etkisini karşılaştırmıştır. Çalışmasında, polyester ve polipropilen liflerle takviye edilmiş betonların taze ve sertleşmiş haldeki performansını, çelik tel takviyeli ve takviyesiz betonlarla kıyaslayarak bu kompozitlerin karayolu üstyapısı olarak kullanılabilirliğini değerlendirmiştir. Bu çalışmada betonlar üzerinde fiziksel deneylerin yanında plak, yarmada çekme dayanımı, yüzey sertliği yardımıyla yaklaşık basınç dayanımı, kiriş eğilme, basınç ve elastiklik modülü, ultrasonik ses geçiş hızı, aşınma, kapiler su emme ve karbonatlaşma derinliği deneyleri yapılmıştır. Sonuçta, tel takviyeli betonlar takviyesiz betonlara göre kıyaslandığında; çökmesi azalmış, çatlağa karşı direnci yükselmiş, eğilme dayanımının arttığı, yarmada çekme dayanımının arttığı, basınç dayanımının nispeten düşük olduğu tespit edilmiştir. Böylece üretilen tel takviyeli betonların karayolu üst yapısında kullanılabileceği öngörülmüştür. Farklı tip lif kullanılan diğer bir çalışmada yol üst yapısında kullanılmakta olan betonların çelik ve poliamid liflerle güçlendirilip mekanik özelliklerinin artırılması amaçlanmıştır. Çalışma sonucunda betonun eğilme ve basınç mukavemeti üzerinde en etkili parametrelerden birinin poliamid lif olduğu tespit edilmiştir. Araştırma bulguları, poliamid lifin karışımdaki oranı artırıldığında, basınç dayanımında bir miktar azalma meydana geldiğini göstermiştir. Buna karşın, liflerin eğilme davranışına olan katkısı daha farklı ve olumlu yönde olmuştur. Eğilme deneyi sonuçlarına göre, lifsiz numuneler yük altında aniden kırılarak gevrek bir davranış sergilerken, poliamid lifli numuneler, tepe yük dayanımı daha düşük olmasına rağmen, yük altında bütünlüğünü koruyarak en az çatlak oluşumuyla en sünek davranışı göstermiştir. Karşılaştırma yapılan çelik lifli numuneler ise daha yüksek bir tepe yüke ulaşmış ancak daha fazla sayıda çatlak oluşturmuştur. Tüm bu sonuçlara bakılarak, yol betonları tasarımında poliamid ve çelik liflerin kullanıldığı malzeme oranlarının büyük etkisi olduğu tespit edilmiş, optimum miktarı belirlemek için taguchi metodunun uygulanabilirliği öngörülmüştür (Asatekin 2019). Özellikle bazalt lif irdelenerek yapılan diğer bir çalışmada, bazalt liflerin beton yollarda kullanılabilirliğini araştırmış, beton karışımında

bazalt lif kullanımıyla betonun basınç ve eğilme dayanımını arttırmayı hedeflemiştir. Ayrıca farklı tür ve miktarlarda lifler kullanarak betonun mekanik özelliklerindeki iyileşmeler karşılaştırmalı olarak incelemiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda üretimi gerçekleştirilen beton numuneleri içinde lif katkılı olan betonların donatısız kontrol numunelere göre mekanik özellikleri artış yönünde davranış göstermiştir. Beton yollarda kullanılabilirlik bakımından karşılaştırılmış olup sırasıyla çelik lif, bazalt elyaf ve polipropilen lif katkısıyla en iyi sonuçlar elde edildiği gözlenmiştir (Çevik 2014).

Tek tip lif kullanmak yerine karma lif kullanımı yapılan başka bir çalışmada nano filler malzeme olarak TiO_2, agrega olarak bazalt, silis ve kuvars olmak üzere 3 farklı agrega, takviye malzemeler olarak da PVA lif, bazalt ve kırpılmış cam kullanarak yüksek performanslı nano beton üretimi yapmayı amaçlamıştır. Çalışma sonucunda basınç dayanımı üzerine liflerin beton önemli bir katkısı olmadığı belirlenmiştir. Üstelik tek tip lifli ve karma lifli beton numunelerinde lif hacminin artması ile beton basınç dayanımında azalmalar olduğu görülmüştür. TiO_2 kullanımı ile basınç dayanımı değerlerinde çok az artış olduğu görülmüştür (Bilim 2019). Kullanılan liflerin dışında doğal lif olarak sayılabilecek hindistan cevizi lifi kullanan Khan, Rehman and Ali (2020) çalışmalarında hindistan cevizi liflerinin betonda silika dumanı ile olası kullanımı, kompozit malzeme özelliklerinden beton yol tasarımına kadar araştırmışlardır. Sonuçta hindistan cevizi elyaf katkılı betonun geleneksel betondan daha iyi mekanik özellikler taşıdığı belirlenmiştir. Ayrıca beton yolun kalınlığının hindistan cevizi elyaf katkısı ile azaltılabileceği belirlenmiştir. Yine lifli malzeme yerine lif yerine geçebilecek şeker kamışı küspesiyle yapılan başka bir çalışmada şeker endüstrisinden bir atık malzeme olan şeker kasan torba külünün hem geleneksel beton hem de kendi kendini sıkıştıran beton üretiminde kullanımını incelenmiştir. Çalışma sonucunda ise şeker kamışı küspesinin düşük oranda kullanılması ile beton dayanımını artırdığı, oran yükseldikçe dayanımın düştüğü tespit edilmiştir. Şeker kamışı küspesi katkısı ile kaplama betonu yapılabileceği önerisinde bulunulmuştur (Kannur and Chore 2021). Atık malzemelerin kullanımıyla ilgili bir çalışmada taş mastik asfalt ve beton yol kaplama işlerinde bor atıklarının kullanılabilirliğini araştırmıştır. Çalışmada bor agregalı lifsiz referans betonu, bor agregalı lifli referans betonu, bor agregalı lifsiz pudra betonu ve bor agregalı lifli pudra betonu olmak üzere dört farklı karışım tasarımı yapılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda yalnızca pudralı betonlarda gerekli şartların sağlandığı tespit edilmiş olup beton yollarda uygulanması uygun görülmüştür (Kara 2021). Yine geri dönüştürülmüş agregalarla yapılan başka bir çalışmada, doğal agrega ile üretilen geleneksel betonda kullanılan agregayı, geri dönüşüm agregaları ile yer değiştirerek üretilen numuneler üzerinden, atıkların beton yollar üzerinde kullanılabilirliğini araştırmıştır. Çalışma sonucunda, polipropilen lif içeriği arttırıldığında taze betonun slump değerinin azaldığı, betonun

gözenekliliği ve su emme oranının arttığı, betonun basınç dayanımının düştüğü tespit edilmiştir. Kullanılan lif oranının yol yapımında kullanılması amaçlanan betonda dayanıma olumsuz etkiye neden olduğu görüldüğünden dolayı ağır trafik yükleri karşısında yetersiz kalacağı görüşü ileri sürülmüştür. Polipropilen lif katkısının aşınmaya ve yarmada çekme dayanımına çok olumlu katkı sağlamadığı belirtilmiştir. Lif içeriği arttıkça, aşınma etkisindeki ağırlık kayıpları arttığı, dolayısıyla bu durumun yol yüzeyinde de aşınma oluşturacağı ve esnek üst yapılarda oluşan tekerlek izlerinin oturması gibi durumları negatif yönde etkileyeceği sonucuna varılmıştır (Taher Eshtewi 2021). Çok düşük miktarda lif kullanmak betonun mekanik performansını iyileştiremez, ancak yüksek miktarda lif kullanımı boşluk miktarını artırabilir ve böylece betonun mukavemetinde ve dayanıklılığında bir azalmaya yol açabilir. Bu nedenle uygun miktarda lif kullanımı, lif takviyeli beton performansı açısından büyük önem taşımaktadır (Öztürk 2018).

Yapılan çalışmalarda lifin cinsi ne olursa olsun, son uygulamalarda ekonomiklik ve inşa edilebilirlik gibi nedenlerle hacimce %0,5'ten daha az lif kullanılmasının hedeflendiğini belirtilmektedir. Çalışmalarda, fiber eklendiğinde düz beton kaplamanın nihai yük taşıma kapasitesinin önemli ölçüde arttığını ve elyaf tipinin (elyaf en-boy oranı ve elyaf geometrisi) ve elyaf içeriğinin (miktarı) levhanın nihai yük kapasitesini etkileyen en önemli faktörler olduğu üzerine durulmuştur. Fiber-matris ara yüzünün performansı ve nihai beton performansı açısından, liflerle ilgili parametrelerin yanı sıra beton matrisin tasarımı da çok önemlidir (Roesler *et al.* 2008). Roesler and Gaedicke (2004), lifin cinsi ne olursa olsun, son uygulamalarda ekonomiklik ve inşa edilebilirlik gibi nedenlerle hacimce %0,5'ten daha az lif kullanılmasının hedeflendiğini belirtmektedir. Roesler and Gaedicke (2004) yaptıkları çalışmalarda, fiber eklendiğinde düz beton kaplamanın nihai yük taşıma kapasitesinin önemli ölçüde arttığını ve elyaf tipinin (elyaf en-boy oranı ve elyaf geometrisi) ve elyaf içeriğinin levhanın nihai yük kapasitesini etkileyen en önemli faktörler olduğunu göstermektedir. Angelakopoulos *et al.* (2011), mevcut çimento hamurunun eksikliğinden dolayı, betonun basınç dayanımının, yoğun boşluk oluşumuna yol açtığından, artan miktarda lif ilavesi ile azaldığını gözlemlemiştir.

Nano Teknoloji ve Nano Malzemeler

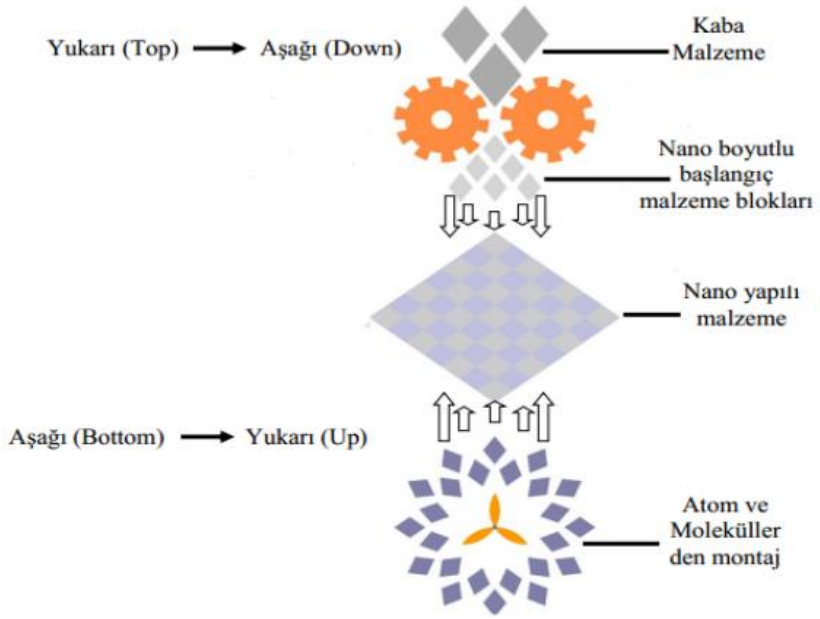
"Nano" kelimesi, cüce anlamına gelen Yunanca 'daki "nanos" sözcüğünden türetilmiştir (Qarluq 2017). Nanoteknoloji ilk olarak 1959'da Richard Feynman'ın ünlü dersinde nanoteknoloji fikrini önerdiğinde ortaya atılmıştır (Feynman 1960). Khan (2011), nanoteknolojinin moleküler ölçekte birimlere sahip cihaz veya malzeme geliştiren yöntem olduğunu belirtmiştir. Aynı doğrultuda, Grove *et al.* (2010) nanoteknolojiyi, maddeyi

moleküler düzeyde anlamak ve kontrol etmek için kurulan araştırma sektörü olarak tanımlamıştır. Bu teknikte malzemenin ana özelliklerini etkilemektedir.

Nanoteknoloji, minimum bir adet karakteristik boyutu nanometre ile ölçülebilen fonksiyonel yapıların tasarım, inşaat ve kullanılmasını kapsamaktadır. Nanoteknoloji çalışmasında boyut nanometre ölçeğine göre küçüldükçe, maddenin fiziksel davranışında da önemli değişiklikler göstereceği görüşüne dayanımaktadır (Brydson and Hammond 2005). Nanoteknoloji bilimi nano yapılı malzemelerin sentezi, tanımlanması, keşfi ve kullanılması ile ilgilenmektedir. Nanometre metrenin milyarda biri olarak tanımlanmaktadır. Nanomalzemelerin fiziksel ve kimyasal özellikleri aynı kimyasal bileşimde olduğu tek atom (molekül) veya kaba maddeye göre oldukça farklıdır. Bu farklılıklar, faz değişimleri, yapı ve şekil, kimyasal reaktivite ve elektronik yapı vb. nedenlerden kaynaklanmaktadır (Rao *et al.* 2006).

Nanomalzemeleri diğer malzemelerden ayıran başlıca iki faktör vardır. Bunlar; kuantum etkileri ve artan yüzey alanıdır. (Arivalagan *et al.* 2011).

Nanoteknolojide yukarıdan aşağı ve aşağıdan yukarı olmak üzere iki yaklaşım bulunmaktadır. Şekil 9' da (Özbora vd. 2013; Birgisson *et al.* 2012) görüldüğü üzere yukarıdan aşağı yaklaşımı büyük boyutlu maddelerin küçültülerek nano boyuta indirgenmesidir. Ayrıca yukarıdan aşağı yöntemi; bir malzeme bloğunu ele alıp bundan istenilen küçük yapıyı elde etmek için malzeme bloğunun parçalanması, bölünmesi, ya da şekillendirilmesi olarak da tanımlanabilmektedir. Aşağıdan yukarı yaklaşımında ise madde en küçük yapıtaşı olan atomik boyuttan nano boyuta çıkarılmak istenir. Aşağıdan yukarı yaklaşımı moleküler teknoloji olarak da adlandırılabilmektedir (Özbora vd. 2013; Birgisson *et al.* 2012). Çoğu çağdaş teknolojiler yukarıdan aşağı yaklaşımına dayanırken, tıp ve sağlık, moleküler nanoteknoloji ile malzeme üretimlerinde, enerji, elektronik, bilgi teknolojisi, biyoteknoloji ve ulusal güvenlikte inanılmaz imkanlar sunmaktadır (Sanchez *et al.* 2010).



Şekil 9. Nanoteknoloji' deki yaklaşımlar (Özbora vd. 2013).

Ayrıca nano malzeme üretim yöntemleri kimyasal veya fiziksel temelli olmak üzere iki ayrı şekilde sınıflandırılabilmektedir. Mekanik enerjini kullanıldığı gibi fiziksel özelliklerin de ön plana çıkarıldığı yöntemler fiziksel, kimyasal reaksiyonların gerçekleştiği yöntemler ise kimyasal temelli olarak kabul edilmektedir (Öcal *et al.* 2018).

Nano malzemelerin çimento ve beton sistemindeki kullanımı

Yapı malzemelerinde ve özellikle de çimento esaslı malzemelerde nano malzemelerin değişik birçok uygulamasıyla ilgili çok sayıda araştırma yapılmaktadır (Kawashima *et al.* 2013). Nanoteknoloji bilimin hemen hemen her alanında (bilgi ve teknoloji, enerji, savunma, çevre koruma, ziraat ve sağlık) geniş uygulama alanına sahip en aktif araştırma alanlarından biridir (Sanchez *et al.* 2010). Nanoteknolojinin çimento ve beton alanlarındaki uygulamaları dört başlık altında toplanabilir. Bunlar;

-Kalsiyum silikat-hidrat (C-S-H) jelinin nano-yapısının araştırılması ve değiştirilmesi,
-Beton karışımına kimyasal katkı malzemelerinin kontrollü bir şekilde eklenebilmesi,
-Karbon nano-tüp içeren çimento esaslı kompozit malzemeler,
-Nano tanecik içeren çimento sistemleridir (Raki *et al.* 2010).

Nanopartiküllerin özellikle yapı malzemelerinde kullanımı her geçen gün daha da ilgi odağı olmaktadır. Nanoteknolojinin inşaat alanında yaygın olan uygulama alanları; yüksek performanslı yapısal malzemeler, cihazlar ve kontrolleri, yakıt pilleri, yeni üretim teknikleri, enerji tasarruf yapan ışıklar, nanoyapılı düzenlenmiş malzemeler, özel kaplamalar, boyalar ve ince filmler, çok fonksiyonlu malzemeler ve bileşenler, akıllı yapılar ve mikro/nano sensörlerin kullanımı, iletişim ve bilgisayar cihazları olarak sınıflandırılabilir (Zhu *et al.* 2004). Ayrıca

nanoteknolojideki ilerlemeler; kendisi de bir nano malzeme olan betonun çevresel ve kimyasal etkilere karşı daha dayanıklı olmasını ve kendi kendine iyileşen akıllı betonların geliştirilmesini sağlamıştır (Öcal *et al.* 2018). Nanoteknolojinin yol mühendisliğinde uygulamalarına ilişkin problemli durumlar; mevcut teknolojiyi daha etkin bir şekilde kullanarak ele alınamayan mevcut ihtiyaçların belirlenmesi, yol mühendisliği alanında uygulanabilir nanoteknoloji çözümlerinin belirlenmesi, iki konseptin birleştirilip en yüksek fayda/maliyet oranları elde edilecek nanoteknoloji çözümlerinin belirlenmesi olarak üç maddede özetlenebilir (Steyn 2011).

Son yıllarda yapı malzemesi alanında özellikle çimento esaslı malzeme olarak kullanılan nano-SiO_2, nano-Al_2O_3, nano-TiO_2, nano-Fe_2O_3, nano-$CaCO_3$, nano-partiküller, karbon nanotüpler, nano-kil vb içeren malzemelerin nanoteknolojideki farklı uygulamalarıyla ilgili çok sayıda araştırma yapılmaktadır. Bu malzemelerin davranışı aslında arayüzeydeki kimyasal reaksiyonlardan etkilenmektedir. Dolayısıyla çimento esaslı malzemelerde nano parçacıkların kullanılması taze ve sertleşmiş koşullardaki davranışlarını değiştirerek daha iyi sonuçlar verebilmektedir (Sanchez *et al.* 2010; Senff *et al.* 2012). Yapılarda kullanılan nano malzemelerden örnekler Tablo 3'te verilmiştir (Demirdöven and Arditi 2012).

Tablo 3. Yapılarda Kullanılan Nano Malzemelerden Örnekler

Nano Malzemeler	**Yapı Malzemeleri**	**Beklenen Faydalar**
Karbon Nanotüpler (CNT)	Beton, Seramik Cihazlar (Nano Elektro mekanik/Mikro elektro mekanik) Güneş pili	- Geliştirilmiş mekanik ve termal özellikler - Sağlık izleme - Sağlamlık - Çatlamayı önleme - Etkili elektron iletimi
Silisyum Dioksit Nano Parçacılar (SiO_2)	Beton, Seramik, Cam	- Ateşe dayanıklılık - Mekanik mukavemete katkı - Yansıma önleme - Soğutma Işık iletimi
Titanyum Dioksit Nano Parçacıklar (TiO_2)	Beton, Cam Güneş pili	- Hidratasyon düzeyini artırma - Hızlı hidratasyon - Kendi kendini temizleme - Elektrik üretimi - Kirlenmeye direnç - Buğulanma önleme
Demir III Oksit Nano Parçacıklar (Fe_2O_3)	Beton	- Basınç dayanımını artırma - Aşınmaya dayanıklılık

Yapı malzemeleri içerisinde kullanılan bazı nano malzemelerin özellikleri ve kullanıldıkları çalışmalar aşağıda açıklanmıştır.

Nano SiO_2

Nano malzemelerin en önemlilerinden birisi olan nano SiO_2, ortalama çapı yaklaşık 100 nm olan küresel nanoparçacıklardan oluşmaktadır. Nano SiO_2, silis dumanı gibi endüstriyel yan ürünler değillerdir fakat genellikle sol-jel yöntemiyle oluşturulan ürünlerdir. Çimento hamurlarında katkı maddesi olarak nano dolgu maddesi olarak, hidrasyonu teşvik etmek için ve nano kaplama olarak kullanılırlar. Betonu iyileştirmedeki üstün özelliklerinden dolayı beton katkısı olarak en yaygın kullanılan nano malzeme olduğu söylenebilir. Yonekura and Miwa (1993), kum basınç dayanımını artırmak için silika nanopartikülleri kullanmışlardır. Ayrıca, Noll *et al* (1992), toprağın konsolidasyon ve geçirgenliğe karşı mukavemetini arttırmak için silika nanopartiküllerin kullanımını araştırmışlardır.

Araştırmacılar yaptıkları çalışmalarda beton üretiminde nano SiO_2 kullanımının betonların mekanik özelliklerini (Moradpour *et al.* 2013), mikroyapılarını (Oltulu ve Şahin 2014) dayanıklılık performansını (Du *et al.* 2014) ve fiziksel özelliklerini (Aly *et al.* 2012) önemli ölçüde iyileştirdiğini tespit etmişlerdir.

Nano Al_2O_3

Nano alüminyum oksit (Al_2O_3); doğada az oranda magnezyum, demir ve silis içeren doğal alüminyum oksit (korondum) olarak bulunan, alüminyumun oksijenle yakılması veya nitrat, hidroksit veya sülfatın ısıtılmasıyla elde edilen madde olarak bilinmektedir. Al_2O_3 suda hemen hemen hiç çözünmez. Yüksek sertlik, düşük yoğunluk, korozyon direnci ve ısıl kararlılık gibi üstün özelliklere sahiptir (Qarluq 2017).

Betonda nano alüminin (nano-Al_2O_3) kullanımı ile ilgili çok az çalışma bulunmaktadır. Yapılan çalışmalarda nano alüminin beton karışımında kısmi olarak çimento ile yer değiştirmesinden dolayı kalsiyum alüminyum silika jellerinin oluştuğu belirlenmiştir. Nano alümin, kalsiyum alüminlerin hidratasyonu sonucunda oluşan kalsiyum hidroksit ile reaksiyona girmektedir. Bu reaksiyon hızının ise reaksiyon için uygun yüzey alanı miktarı ile orantılı olduğu belirtilmiştir (Behfarnia and Salemi 2013). Dolayısıyla betonun karakteristiklerini iyileştirmek için beton karışımına yüksek saflıkta ve yüksek incelikte nano alümin eklenmesi gerekmektedir (Jo *et al.* 2007).

Yapılan bir çalışmada çimento harcının elastik modülünün artış ya da azalışını tespit edilmesi amacıyla nano Al_2O_3 kullanılmıştır. Çalışma sonunda tasarlanan çimento harcının elastik modülünün artırılmasında nano-Al_2O_3 etkili olduğu tespit edilmiştir. Ortalama tane

boyutu 150 nm olan nano Al_2O_3'ün %5 olarak kullanılması sonucunda elastik modülde 28 gün sonunda yaklaşık %143 oranında artış olduğu belirlenmiştir. Nano Al_2O_3'ün %5'ten daha fazla kullanılması durumunda ise nano Al_2O_3 taneciklerinde kümeleşme meydana geldiği ve sonuçta arayüzde etkili olmayan bir yoğunlaşma meydana gelmiş ve elastik modülde de azalma oluşmuştur (Li *et al.* 2006). Dolayısıyla kullanılan nano Al_2O_3 miktarının da doğru oranlarda kullanılması gerektiği ortaya çıkmıştır.

Yapılan diğer bir çalışmada da Al_2O_3 nanoparçacıklar, çimento esaslı malzemelerin çekme ve eğilme dayanımını güçlendirdiği, elastisite modülünü de artırdığı tespit edilmiştir. Ayrıca, seramikler ve kaplamalarda dayanımın ve yangına karışı direncin artırılması amacıyla da kullanılabileceği belirtilmiştir (Qarluq 2017).

Nano $CaCO_3$

Betonun fiziksel ve mekanik özelliklerini iyileştirmede kullanılan bir diğer malzeme de nano $CaCO_3$'tür. Bu malzeme betonun priz süresini ve hidratasyonunu uzatmasıyla bilinmektedir. Ayrıca uçucu kül içeren harçların erken yaştaki basınç dayanımları üzerinde de etkili olduğu tespit edilmiştir. (Kawashima *et al.* 2013; Shaikh *et al.* 2014). Eğilme dayanımı açısından da nano silisten daha iyi bir performans sergilediği çalışmalarla belirlenmiştir (Yeşilmen 2015).

Ayrıca nano katkısız bir beton ile nano $CaCO_3$ katkılı betonun kıyaslandığı başka bir çalışmada nano $CaCO_3$ parçacıklarının olduğu karışım için eğilme dayanımının, nanoparçacık içermeyen numuneye oranla %4-%21 arasındaki bir oranla, basınç dayanımını %22-%47 arasındaki bir oranla arttığı tespit edilmiştir (Chindaprasirt *et al.* 2012).

Literatürdeki diğer çalışmalara göre de karışımlara nano $CaCO_3$ ve nano SiO_2 eklenmesi ile oluşan ekstra kalsiyum alüminosilika hidrat, kalsiyum silika hidrat ve sodyum alüminosilika hidrat jellerinin malzemenin dayanımını arttırdığı tespit edilmiştir (Phoo-ngernkham *et al.* 2013).

Nano TiO_2

Titanyum dioksit (TiO_2), çeşitli farklı endüstriler için önemli bir kristal bileşiktir. Bu beyaz renkli malzeme, yüksek korozyon direnci, yüksek kırılma indisi, yüksek termal kararlılık, düşük iyon salınımı, toksik olmama, biyouyumluluk, hafiflik ve manyetik olmayan özellikler göstermektedir. TiO_2'nin önemli kullanım alanları;

- Beyaz pigment ve opaklık maddesi olarak (boyalar, diş macunu, plastikler, gıda renklendiricileri)
- Kozmetikler (merhemler ve güneş kremleri)

- Hidrojen üretimi için fotokatalizörler
- Fotoelektrotlar (foto yarma suyu ve güneş enerjisi dönüşümü)
- Sensör Anti-bakteriyel ajanlar
- Piller / süper kapasitörler olarak gösterilebilir. (Nanografi 2024).

Nano TiO_2 ise ortalama parçacık boyutu 50 nm olan nano malzemedir. Yapılan bir çalışmada, Nano-TiO_2'nin siltli kil üzerindeki etkisi incelenmiştir. Parçacık boyutu 15 nm olarak kullanılan çalışmada Nano-TiO_2'deki artışın sınır değerlerini yaklaşık %60 azalttığı sonucuna varılmıştır. Çalışma sonucunda, Nano-TiO_2 yüzdesindeki artışla maksimum kuru yoğunluğun %2,94 arttığı ve optimum nem içeriğinin %5,2 azaldığı tespit edilmiştir.

Meng *et al.* (2012) 'nin çalışmasında çimento kompozitine cüruf tozu, nano-TiO_2 ve süperakışkanlaştırıcı eklenerek değişimler gözlenmiştir. Nano-toz katkıları kompozitin erken dayanımını %45 oranında artırdığı tespit edilmiştir. Fakat nano tozun tek başına 28 günlük dayanımını düşürdüğü belirlenmiştir. Diğer bir karışıma eklenen nano toz, cüruf tozu ve süperakışkanlaştırıcı katkılarıyla 28 günlük dayanımlarda iyi derecede artışlar meydana gelmiştir. Bunun sebebinin de süperakışkanlaştırıcının iyi yayılması ve cüruf tozunun hidratasyonunu etkilemesi olduğu belirtilmiştir.

Nano TiO_2, beton ve çimento esaslı malzemelerde kullandığında, betonun basınç dayanımı, performans ve aşınmaya karşı direncini arttırdığı, portland çimentosunun erken yaş hidratasyonunu hızlandırdığı, eğilmede çekme dayanımlarını ve gözenek yapısını iyileştirdiği belirtilmiştir (Rong *et al.* 2015). Qarluq (2017)'a göre nano TiO_2 çimento esaslı malzemelerde kullanıldığında, hidratasyon hızlanıp, basınç dayanımı ve aşınmaya karşı direnç artmaktadır. Ayrıca nano TiO_2 katkılı çimento esaslı malzemelerin, kendi kendini temizleme özelliğe sahip dış cephe ürünleri, camlar ve çadırlar dahil olmak üzere, güneş ışığı ve yağmur suyunun etkisiyle bile temiz kalabilme özelliği gösterebileceği belirtilmiştir.

Literatür geneline bakıldığında bazı çalışmalarda nano TiO_2 nin birçok olumlu yönü olduğundan bahsedilirken bazılarında da bu nano malzemenin betona bir katkısı olmadığı belirtilmiştir. Nano TiO_2 ile ilgili çalışmaların genişletilmesi ile betondaki etkisi daha net şekilde belirlenebilir.

Nano Fe_2O_3

Fe_2O_3 nanotoz, ferrik oksit olarak da bilinen çok küçük demir (III) oksit parçacıklarından oluşan ince bir tozdur. Nanotoz formunda Fe_2O_3, diğer muadillerinden çok daha büyük bir yüzey alanı/hacim oranına sahiptir ve bu da Fe_2O_3'ün geniş yelpazede bir uygulama alanı sağlamaktadır. Nano-hematit olarak da bilinen Nano-Fe_2O_3, nano-doldurma

etkisi, daha iyi dağılma kabiliyeti, C-S-H oluşumunun hızlanması ve gözenekliliğin azaltılması nedeniyle çimento esaslı malzemelerin özelliklerini geliştirir (Abdalla 2022).

Yapılan bir çalışmada çimento esaslı kompozite, çimento ağırlığının %3, 5 ve 10'u oranında nano-SiO_2 ve nano-Fe_2O_3 eklenmiştir. Numunelere uygulanan mekanik testler sonucunda nano boyuttaki tozların 28 günlük basınç, eğilme dayanımlarının standartlara uygun ve hatta yüksek seviyede sonuçlar elde edilmiştir (Li *et al.* 2004). Ayrıca Nazari ve Riahi (2011) çalışmalarında, nano-Fe_2O_3 parçacıklarını dahil ederken yarmada çekme mukavemetinde artan bir eğilim gözlemlemişlerdir.

Nano Fe_2O_3'ün çimento esaslı kompozitlerde kullanılması, çimento hamurunun hidratasyonu hızlandırır, kapiler permeabilitesini, işlenebilirliğini ve priz süresini düşürür ve su emme oranını artırır ve böylece basınç dayanımı, eğilmede çekme dayanımını iyileştirir. (Oltulu vd. 2013).

Nano-Fe_2O_3 bir dolgu maddesi görevi görür ve çimento hidratasyonunu aktive ederek $Ca(OH)_2$ kristallerini azaltır. Yapılan çalışmadaki kontrol numunesinde gözlemlenen büyük gözenekler, nano-Fe_2O_3 ile modifiye edilmiş numunelerde doldurulmuş ve C-S-H jellerinin hızlı oluşumunu gösteren kompakt bir mikro yapı oluşturmuştur. (Madandoust *et al.* 2015).

Abdalla 2022 çalışmasında nano-Fe_2O_3 ilavesinin, gözenek yapısını iyileştirdiği ve çimento matrisinin viskozitesini arttırdığını, mikro çatlakları önemli ölçüde azalttığı ve kompakt bir mikro yapı sağladığını tespit etmiştir. Diğer nanomalzemelerle karşılaştırıldığında, nano Fe_2O_3'ün dahil edilmesi betonun işlenebilirliğini arttırdığını ayrıca mekanik özellikleri ve elektrik direncini iyileştirerek su emilimini, klorür penetrasyonunu ve sülfat saldırısını azalttığını gözlemlemiştir (Abdalla 2022).

Karbon nanotüpler

Nano karbon tüpler, çimento bazlı malzemelerde nano donatı olarak kullanılmak için oldukça ideal olan ürünlerdir. Karbon nanotüpler elektriksel özelliğe sahiptir ve kullanımı ile eğilme dayanımında üst düzeyde dayanımlar elde edilebileceği belirtilmektedir. Ayrıca kompozitin mikro mekanik ve durabilite özelliklerine olumlu etki etmektedir (Şahmaran *et al.* 2009, 2013).

Karbon nano tüpler, melez organik ve inorganik nano parçacıklar yanında inorganik, metalik nano parçacıklar ve nano tozlar olarak da bulunabilirler. Bu malzemeler boyutlarından dolayı manyetik, elektronik, yapısal, fotonik ve mekanik niteliklerinde, yüksek yüzey hacim oranları ve nano boyutlu yapılarda ortaya çıkan çeşitli etkileri yüzünden farklılık gösterebilmektedirler (Şahin 2006).

Beton, yapısı gereğince gevrek bir malzeme gibi davrandığı için düşük çekme dayanımına sahiptir ve çatlamaya eğilimlidir. Çekme dayanımını ve sünekliliği artırmak ve dayanıklılığı iyileştirmek için bağlayıcı malzemeler içine fiber liflerin eklenmesi alışılmış bir metottur. Karbon nano tüp ve çimento hidratasyon ürünleri arayüzünde yüksek bir bağ dayanımı oluşmaktadır. Karbon nano tüpler çekmede yüklerin aktarılması ile neticelenen çatlak ve boşluklar boyunca bir köprü gibi davranmaktadır (Li *et al.* 2004; Makar 2005).

MATERYAL VE METOT

Materyal

Çimento

Yapılan çalışmada Aşkale Çimento'ya ait TS EN 197-1 standardına göre üretilmiş olan CEM I 42,5R tipi çimento kullanılmıştır. Çimentonun kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri Aşkale Çimento Fabrikası tarafından belirlenmiş ve sonuçlar tablolarda verilmiştir.

Tablo 4. Çimento Kimyasal Özellikleri-1

Kimyasal Özellikler					
SiO_2	**Al_2O_3**	**Fe_2O_3**	**CaO**	**MgO**	**SO_3**
18,21	4,54	3,1	63,5	2,57	2,82

Tablo 5. Çimento Kimyasal Özellikleri-2

Kimyasal Özellikler						
Kızdırma Kaybı	**Na_2O**	**K_2O**	**Cl-**	**Ölçülemeyen**	**Toplam**	**Serbest CaO**
3,87	0,22	0,65	0,0144	0,51	100	0,49

Tablo 6. Çimento Fiziksel Özellikleri

Fiziksel Özellikler						
İncelik (45 nm elek üstü %)	**Özgül Ağırlık (g/cm^3)**	**Özgül Yüzey (cm^2/g)**	**Priz Başlangıcı (dakika)**	**Priz sonu(dakika)**	**Hacim Genleşmesi (mm)**	**Su İhtiyacı (%)**
7,17	3,12	3616	146	189	1	29,5

Tablo 7. Çimento Mekanik Özellikleri

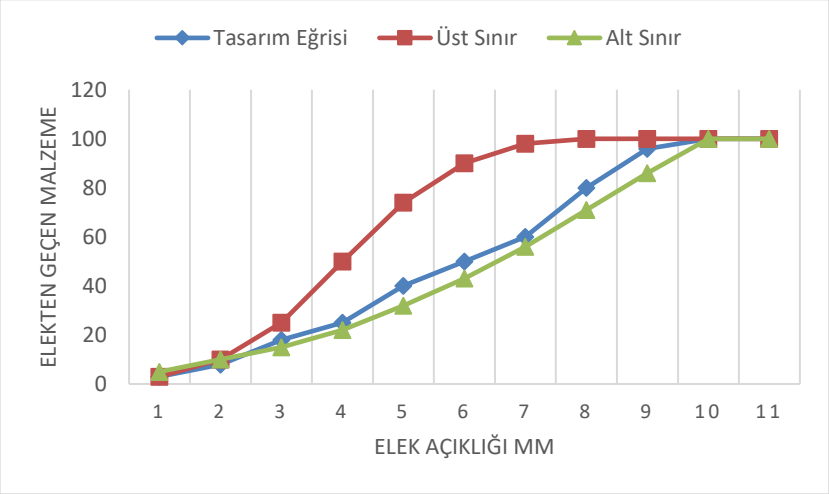
Basınç Dayanımı	**2 Günlük**	**28 Günlük**
N/mm^2	27,72	58,81

Karışım suyu

Çimento harçlarının hazırlanmasında içme suyu niteliğindeki şehir şebekesinden sağlanan TS EN 1008 standardına uygun su kullanılmıştır.

Agrega

Çalışmada Mazlumoğlu Yapı İnşaat Taahhüt İnşaat Malzemeleri Yalıtım Elektrik Taahhüt Temizlik Hizmetleri Sanayi ve Ticaret Limited Şirketi'ne ait TS 3530 EN 933-1 standardına uygun olan 0-5 mm, 5-12 mm ve 12-22 mm boyutlarında üç çeşit agrega kullanılmıştır. Agrega gradasyonunun alt ve üst sınır değerleri arasında olduğu deneysel olarak tespit edilmiştir. Deneylerde kullanılan agregalara ait granülometri eğrisi Şekil 10'da belirtilmiştir.



Şekil 10. Kullanılan granülometri eğrisi



Şekil 11. Kullanılan agregalar

Katkı malzemeleri

Bazalt lif

Dost Kimya Endüstriyel Hammaddeler San. Tic. Ltd. Şti.'den temin edilen ve Tablo 8' de belirtilen özelliklere sahip bazalt lif kullanılmıştır.

Tablo 8. Bazalt Lif Özellikleri

Özellik	Değerler
Çekme Dayanımı	4840 Mpa
Elastisite Modülü	89 Gpa
Uygulama Sıcaklık Limitleri	- +982°C
Özgül Ağırlık	2.60-2.80 gr/cc
Elyaf Çapı	9-23 mikron
Elyaf Uzunluğu	24 mm



Şekil 12. Kullanılan bazalt lif

Nano Fe_2O_3

Nanografi Nano Teknoloji AŞ'den temin edilen Tablo 9' da özellikleri belirtilmiş olan nano toz Fe_2O_3 kullanılmıştır.

Tablo 9. Nano Fe_2O_3 Özellikleri

Teknik Özellikleri	Değerler
Gama, Saflık	%99,55, Boyut: 18-38 nm
Saflık	%99,55
Renk	Kırmızı Kahverengi
Ortalama parçacık boyutu (nm)	18-38
Morfoloji	Küresel
Özgül Yüzey Alanı (m^2/g)	>55
Element analizi (%)	Ca:0,003, Cr:0,01, Mn: 0,14, Al:0,05, SiO_2: 0,091



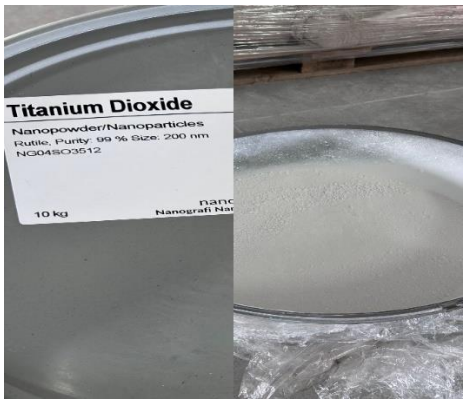
Şekil 13. Kullanılan nano Fe_2O_3

Nano TiO_2

Nanografi Nano Teknoloji AŞ'den temin edilen Tablo 10'da özellikleri belirtilmiş olan nano toz TiO_2 kullanılmıştır.

Tablo 10. Nano TiO_2 Özellikleri

Teknik Özellikleri	**Değerler**
Kristal Form	%99,5+, Boyut: 200 nm
Parçacık Boyutu	200 nm
Kristal Formun Saflığı	99,5+ %
Renk	Beyaz
Özgül Ağırlı: 4.1 g/cm^3	4,1 g/cm^3
Yığın Yoğunluğu	1,1 g/cm^3
105°C'de kayıp	0,6%
Yağ Absorpsiyonu	18/100 cm^3/g
Su İhtiyacı	25/100 cm^3/g
Özgül yüzey alanı	19 ^{3}/g



Şekil 14. Kullanılan nano TiO_2

Uçucu kül

Yatağan Termik Enerji Üretim A.Ş.' den temin edilen teknik özellikleri Tablo 11-12' de belirtilen TS EN 450-1'e uygun üretilmiş uçucu kül kullanılmıştır.

Tablo 11. Uçucu Kül Kimyasal Özellikleri

Kimyasal Özellikler	**Birim**	**Sonuçlar**
SiO_2	%	54,47
AL_2O_3	%	24,17
Fe_2O_3	%	6,415
CaO	%	5,342
MgO	%	2,509
SO_3	%	0,717
Na_2O	%	1,358
K_2O	%	3,309
CL-	%	0,099
Toplam Fosfat	%	0,145
Çözülebilir Fosfat	Mg/lt	3,2752
Serbest CaO	%	0,07
Reaktif SiO_2	%	39,77
Reaktif CaO	%	-
Toplam Alkali	%	3,54
Kızdırma Kaybı	%	1,32

Tablo 12. Uçucu Kül Fiziksel Özellikler

Fiziksel Özellikler	**Birim**	**Sonuçlar**
45 nm elek üzeri	%	29,54
Özgül Yüzey	Cm^2/g	2520
Özgül Ağırlık	g/cm^3	1,97
Hacim Genleşmesi	mm	1
Priz Başlangıcı	dk/min	160
Priz Bitişi	dk/min	220
Priz Başlangıcı	dk/min	245
Priz Bitişi	dk/min	315
Su İhtiyacı	%	103,1
Aktivite İndeksi 28 Günlük	%	77,1

Akışkanlaştırıcı katkı

Master Builders Solutions Yapı Kimyasalları Sanayi ve Ticaret Ltd. Şti.'den temin edilen TS EN 934-2+A1'e uygun olarak üretilen Master Pozzolith-515 isimli akışkanlaştırıcı beton katkısı kullanılmıştır. Teknik özellikleri Tablo 13' te belirtilmiştir.

Tablo 13. Akışkanlaştırıcı Katkı Teknik Özellikleri

Teknik Özellikler	
Malzemenin Yapısı	Modifiye Lignin Sülfonat Esaslı
Görünüm	Koyu Kahverengi- Sıvı
Özgül Ağırlık (20ºC'de)	1,146-1,206 kg/lt
pH Değeri	5-7
Alkali İçeriği (%)	≤10
Klor iyon içeriği (%)	≤0,10

Metod

Deney tasarımın oluşturulabilmesi ve sonrasındaki istatistiksel analizler için taguchi metodu kullanılmıştır.

Taguchi yöntemi

Taguchi metodu, yüksek kaliteli sistemler tasarlamak için Genichi Taguchi (1950) tarafından geliştirilen güçlü bir araçtır (Mohammed ve Najim 2020). Dr. Genichi Taguchi, ürün ve süreçleri geliştirilmesi açısından pek çok yöntem ve düşüncenin oluşmasını sağlamıştır. Bu yöntem ve düşüncelerden bazıları "Taguchi Kayıp Fonksiyonu" ve ürün ya da süreç tasarımında kullanılacak üç yaklaşım olan "Sistem, Parametre ve Tolerans Dizaynı" olarak sıralanabilmektedir. Ayrıca güvenli koşullardaki deneylerin sayısını azaltmak için alternatif bir deney metodolojisi olarak "Ortogonal Diziler" kullanmıştır (Schippers 2000). Taguchi' nin metoduna göre bir ürün veya sürecin performansı, çevre şartlarından ve üretimde kullanılan bileşenlerden etkilenmektedir. Ürün veya süreç faktörlerinin optimum değerleri; üretimde kullanılan bileşenlerin durumları ve ürünün veya sürecin kullanılacağı çevresel şartların dikkate alınarak belirlenmelidir. Taguchi deney metodunda, kontrol edilebilen faktörlerin optimum değerlerini belirlemek amacıyla ortogonal dizileri bulunduran yüksek kesirli deneyler kullanılmaktadır. Deneylerin sonunda ise elde edilen verilerin analizi ile belirlenmiş olan optimum şartlarda doğrulama deneyleri yapılıp, beklenen verilerin ortaya çıkıp çıkmayacağı kontrol edilmektedir (Alsaran 2001). Belirlenen ortogonal dizinlerde ortaya çıkan karakteristikleri sürekli olduğunda, performans istatistiği olarak bilinen bir ölçüt hesaplamak üzere tasarım parametreleri matrisinin her bir deneyinden ortaya çıkan çoklu gözlemler

kullanılmaktadır. Hesaplanan bu performans istatistiği, tasarım parametrelerinin değerleriyle ilgili daha iyi tahminlerin elde edilmesinde kullanılmaktadır. Ayrıca taguchi performans istatistiği olarak sinyal/gürültü (S/N) oranının kullanılmasının gerekliliğini de ileri sürülmüştür. Sinyal, ürünün kullanıcıya vermeye çalıştığı etkidir. Gürültü ise sinyali olumsuz etkileyen müdahaleler olarak tanımlanabilir (Saat 2000). S/N oranı, test sonuçlarının ortalama ve varyanslarını ele almaktadır.

Taguchi yöntemini bir ürün veya süreç için başarılı bir şekilde kullanmak, sistematik yaklaşım ile mümkün olmaktadır. Bu sistematik süreç, tasarım optimizasyonunu gerçekleştirmek amacıyla 13 adet operasyonel adımda sınıflandırılabilir (Tortum vd. 2005).

- Sorunu belirlemek ve takım organizasyonu yapmak,
- Sistemin değerlendirme ve yürütme özelliklerini belirlenmek,
- Yönetici karakteristiklerini etkileyen parametreleri belirlemek,
- Performans izlemeyi tasarlamak ve planlamak,
- Kontrol edilebilen ya da edilemeyen değişkenlerin sayı ve seviyelerini belirlemek,
- Test edilecek reaksiyonları belirlemek ve tanımlamak,
- Uygun ortogonal dizileri seçmek ve değişkenlerin uygun sütunlara tahsis etmek,
- Dağılım fonksiyonlarını ve yürütücü statikleri belirlemek,
- Testleri düzenlemek ve elde edilen sonuçları kaydetmek,
- Veri analizi ve kontrol edilebilir değişkenlerin optimal seviyelerini seçmek,
- Test sonuçlarını belirlemek,
- Dayanıklılık tasarımı ve bu tasarımı planlamak,
- Değerlendirme, uygulama ve gözlem.

Taguchi metodunda optimizasyon kriteri olarak performans istatistiği olan S/N oranı kullanılmaktadır. Performans istatistikleri, en büyük – en iyi, nominal – en iyi ve en küçük – en iyi olarak üç grupta değerlendirilebilmektedir. S/N oranı test sonuçlarının ortalamasını ve varyanslarını ele almaktadır. Taguchi'nin yaptığı bu sınıflandırmada hedefin türüne göre üçe ayrılan kalite kayıp fonksiyonlarının her biri için Tablo 14'te gösterilen farklı bir S/N tanımlanmıştır (Şirvancı 1997). Çalışmada yapılmış olan deney sonuçları kullanılarak S/N değerleri, en büyük en iyi ve en düşük en iyi performans istatistiklerine göre hesaplanmıştır.

Tablo 14. S/N Oranları Karakteristik Tipleri

Karakteristik Tipi	S/N
En Yüksek-En İyi	$-10\log\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{r}\frac{1}{y_i^2}\right)$
Nominal-En İyi	$-10log\left(\frac{y^{-2}}{s^2}\right)$ veya $10log\left(\frac{s^2}{y^{-2}}\right)$
En Düşük -En İyi	$-10log\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{r}y_i^2\right)$

(2)

Burada;

y_i= Performans karakteristiğinin i. gözlem değeri

n= Bir denklemdeki test sayısı

S^2= Gözlem değerlerinin varyansı 'dır.

S/N'yi maksimum yapan parametre seviyeleri optimum değer olarak kabul edilmektedir. Fakat taguchi metoduna optimum parametre seviyelerini veren deneyler bulunmayabilir. Bu durumda optimum şartlara karşılık gelen performans değeri aşağıdaki modelden yararlanılarak tahmin edilebilmektedir.

$$Y_t = \mu + X_i + e_i \quad (3)$$

Burada;

μ: Performans değerinin genel ortalaması,

X_i: Deneydeki parametre-seviye kombinasyonun sabit etkisi,

e_i: i. deneydeki rastsal hatadır.

Deneysel sonuçlara göre hesaplanan bu Y_t değeri bir nokta tahminidir. Yani yapılan doğrulama deneylerinin sonuçlarının anlamlı olup olmadıklarının belirlenebilmesi için belirli oranda bir hata seviyesinde güven aralığı oluşturulması gerekmektedir. Seçilen hata seviyesindeki güven aralığı da aşağıdaki bağıntıyla hesaplanmaktadır (Ross 1988).

$$\mu \pm \sqrt{F_{\alpha;1,DF_{MSe}} MS_e \left[\frac{1+m}{N} + \frac{1}{n_i}\right]} \quad (4)$$

Burada;

F: Tablo değeri,

α: Hata seviyesi,

DF_{MSe}: Hata kareler ortalamasının serbestlik derecesi toplamı,

m: Ortalama tahmininde kullanılan parametrelerin serbestlik dereceleri,

n_i: Yapılan doğrulama deneylerinin tekrar sayısı olarak belirlenmiştir.

Taguchi yönteminde katsayılar gereken minimum zaman ve maliyetlerdir. Çünkü klasik bir deneysel tasarım yöntemi uygulandığında zaman kaybı ve numune hazırlama maliyeti oldukça yüksek olacaktır. Taguchi'nin yönteminde harcanan zaman ve maliyet oldukça düşmektedir. Taguchinin kullanılmasıyla yaklaşık %98 oranında para ve zamandan tasarruf edilebilecektir. Aynı şekilde bu veriyi klasik yapısal tasarım yöntemlerinden %95' lik güven aralığında elde edilen küçük bir reaksiyon etkisini kaybetme yoluyla elde edebiliriz. Bu durum ise para ve zamandan tasarruf oranının %98' ine işaret etmektedir (Tortum vd. 2005).

Deneysel tasarım

Bu çalışmada, betonun dayanım özelliklerini etkileyen çok sayıda malzeme parametresinin etkilerini verimli bir şekilde incelemek ve en iyi karışım oranlarını belirlemek amacıyla Taguchi deneysel tasarım metodu temel alınmıştır. Tasarım kapsamında, beton performansı üzerinde etkili olduğu düşünülen beş farklı kontrol parametresi (Su/Bağlayıcı Oranı, Uçucu Kül, Nano Fe_2O_3, Nano TiO_2 ve Bazalt Lif) belirlenmiş ve her bir parametre dört farklı seviyede incelenmiştir (Tablo 15). Bu çok seviyeli ve çok parametreli sistemi, tüm kombinasyonları (4^5 = 1024 deney) denemeye gerek kalmadan etkin bir şekilde analiz edebilmek için, Taguchi metodolojisine uygun olarak L16 (4^5) ortogonal dizini seçilmiştir. Bu dizin, 16 adet özel olarak tasarlanmış beton karışımı ile parametrelerin ana etkilerinin dengeli bir şekilde incelenmesine olanak tanımıştır (Tablo 16). Deneysel çalışmalar iki ana aşamada yürütülmüştür. İlk aşamada, L16 dizinine göre üretilen 16 grup numune üzerinde mekanik testler (basınç, eğilme, aşınma) yapılmıştır. İkinci aşamada ise, ilk aşama sonuçlarının analiziyle belirlenen teorik optimum karışımlar, doğrulama numuneleri olarak yeniden üretilerek test edilmiştir. Elde edilen tüm sonuçların istatistiksel analizi ve optimizasyonu için S/N oranı analizi ve ANOVA yöntemleri kullanılmıştır.

Tablo 15. Parametre ve Seviyeler

Parametreler	**Seviyeler**			
	1	**2**	**3**	**4**
Su/Bağlayıcı Oranı	0,3	0,35	0,38	0,4
Uçucu Kül (%)	0	5	8	10
Nano Fe_2O_3 (%)	0	1	2	3
Nano TiO_2 (%)	0	3	4	5
Bazalt Lif (kg/m^3)	0	2	2,5	3

Tablo 16. Deney Planı

Grup No	Su/Bağlayıcı Oranı (%)	Uçucu Kül (%)	Nano Fe_2O_3 (%)	Nano TiO_2 (%)	Bazalt Lif (kg/m^3)
1	0,3	0	0	0	0
2	0,3	5	1	3	2
3	0,3	8	2	4	2,5
4	0,3	10	3	5	3
5	0,35	0	1	4	3
6	0,35	5	0	5	2,5
7	0,35	8	3	0	2
8	0,35	10	2	3	0
9	0,38	0	2	5	2
10	0,38	5	3	4	0
11	0,38	8	0	3	3
12	0,38	10	1	0	2,5
13	0,4	0	3	3	2,5
14	0,4	5	2	0	3
15	0,4	8	1	5	0
16	0,4	10	0	4	2

Karışımdaki çimento dozajı Karayolları Genel Müdürlüğü Beton Yollar Teknik Şartnamesi'ne göre 350 kg/m^3 olarak belirlenmiştir (KGM, 2016). Buna göre bağlayıcılar çimento dozajının yüzdesi olarak kullanılmıştır. Bazalt lifinin miktarı, toplam karışımın ağırlığına göre belirlenmiştir. Kullanılan malzemelerin uygun oranları literatürden derlenerek seçilmiştir. 1 m^3 karışımda kullanılan malzeme miktarları belirlenen seviyelere göre Tablo 17'de verilmiştir.

Tablo 17. Deneyde Kullanılan Malzemelerin Dozajları

Seviyeler	Su(lt)	Çimento (kg)	Agrega(kg)	Uçucu Kül (kg)	Nano Fe_2O_3 (kg)	Nano TiO_2 (kg)	Bazalt Fiber (kg)
1	105	350	545	0.0	0.0	0.0	0
2	123	318,5	526	17,5	3,5	10,5	2
3	133	301	515	28	7	14	2,5
4	140	287	507	35	10,5	17,5	3

Karışımdaki malzemeler belirtilen ölçülerde kullanılarak deney numuneleri oluşturulmuştur. Yapılacak olan basınç dayanımı deneyi, üç noktalı eğilme deneyi ve aşınma

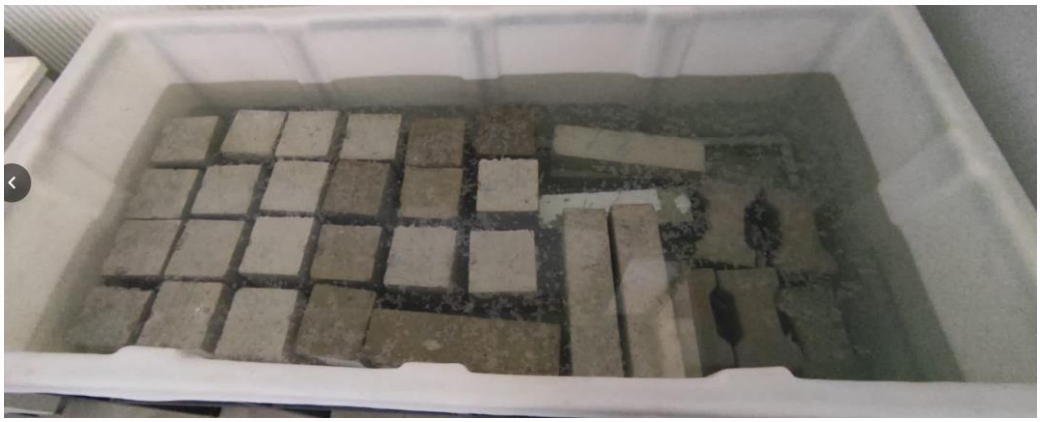
deneyi için her bir karışımdan üçer adet numune dökümü sağlanmıştır. Böylece toplamda 144 adet numune dökümü gerçekleştirilerek gerekli testler yapılmıştır (Şekil 15).



(a) (b)

Şekil 15. Basınç ve Eğilme Deneyi Numuneleri (a), Aşınma Deneyi Numuneleri(b)

Dökümü yapılan numuneler 28 gün boyunca kür havuzunda bekletilerek 28. günün sonunda basınç, eğilme ve aşınma deneyleri gerçekleştirilmiştir (Şekil 16,17).



Şekil 16. Numunelerin kür havuzunda bekletilmesi

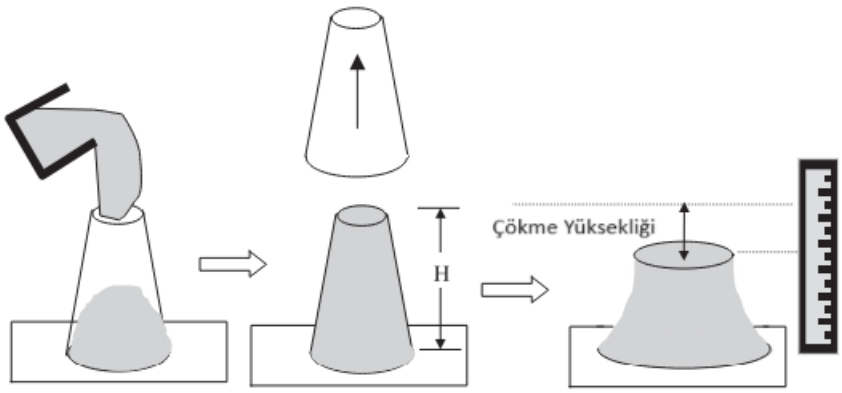


Şekil 17. Kür havuzundan çıkarılmış olan numuneler

Tasarlanan betonun fiziksel özelliklerini belirlemek amacıyla slump (çökme) ve böhme aşınma deneyi, mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla, basınç dayanımı ve üç noktalı eğilme deneyi uygulanmıştır. Kür havuzunda bekletilen 48 adet (150x150x150 mm) küp numuneye basınç dayanımı deneyi, 48 adet (40x100x100 mm) kiriş numuneye üç noktalı eğilme deneyi ve kalan 48 adet (70x70x70 mm) küp numuneye böhme aşınma deneyi uygulanmıştır.

Slump (çökme) deneyi

Genellikle çökme deneyi için, çökme konisi olarak adlandırılan Şekil 18'de gösterilen kesik bir koni kullanılır (Clayton *et al.* 2003; Roussel and Leroy 2005). Çökme deneyi beton veya çimento kompozitin kıvamını veya akma kabiliyetini belirlemek için uygulanan en yaygın yöntemdir. Çökme konisi ile çöken malzeme arasındaki yükseklik farkıdır.



Şekil 18. Slump (çökme) deneyi uygulaması (Boger 2009)

Çökme değerinin belirli sınırlarda olması beklenir. Çökmenin sınır değerden fazla olan betonlarda dayanım azalırken, sınır değerden az çökmesi olan betonların işlenebilirliği azalmaktadır. Bu çalışmada, lif ve nanomalzeme içeren yüksek performanslı beton karışımlarının hem liflerin homojen dağılımını sağlayacak hem de saha koşullarında kolayca

yerleştirilebilecek işlenebilir bir kıvamda olması hedeflenmiştir. Yapılan çökme deneyi, TS EN 12350-2 standardına göre 16 adet karışım için ayrı ayrı yapılmıştır. Çökme değerleri 0,3-0,5 mm aralığında bulunmuştur (Şekil 19).



Şekil 19. Uygulanan slump (çökme) deneyi.

Aşınma (Böhme) deneyi

Aşınma olayı agreganın aşınma direnciyle bağlantılıdır. Agregalar aşınmaya karşı en fazla direnci göstermektedir. Bu sayede beton içerisinde de aynı etkiyi gösterir ve basınç dayanımı da yüksek çıkmasına sebep olmaktadırlar (Bayar 2019).

Beton içine eklenen nano ya da lifli malzemeler, farklı oranlara göre aşınma direncinin artıp azalmasını sağlayabilmektedir. Dolayısıyla doğru oranda ve homojen dağılım sağlanabilen karışımlarda aşınma direncinin artması sağlanabilir (Seis *et al.* 2022).

Aşınmanın belirlenebilmesi amacıyla farklı deney yöntemleri bulunmaktadır. Çalışmaya konu olan lif ve nanomalzeme içeren yüksek performanslı betonun aşınmaya karşı direncini belirleyebilmek amacıyla aşınma deneyi olarak böhme aşındırma testi seçilmiştir. Aşındırma testi için hazırlanan numuneler, TS 2824 EN 1338 standardına göre Baz Makine marka böhme (aşınma) testi cihazı ile aşınma deneyine tabi tutulmuştur (Şekil 20,21).



Şekil 20. Kullanılan böhme aşındırma deney düzeneği



Şekil 21. Aşınmaya maruz bırakılan numune örnekleri

Sürtünme ile aşındırma deneyi (Böhme metodu) deney numunesinin döner bir disk üzerine bastırılarak aşındırılması sayesinde yapılmaktadır. Böhme cihazı, aşındırma diskinin dakikada 30±1 devir döndürerek her 22 dönüşte bir durmasını sağlar. Döner aşındırma diskinin üzerinde 20 cm genişlikte halka biçiminde sürtünme şeridi bulunmaktadır. Numunenin aşınmasını sağlamak amacıyla aşınma şeridine aşındırma tozu serpilmektedir. Bu sayede aşındırma şeridi deney numunesine sürtünür ve aşınma direncinin ölçümü sağlanır.

Aşındırma deneyi öncesinde numune bir tarafı açık bir dökme demir çerçeve içerisine yerleştirilir tutulur. Bu çerçeve dönen disk yüzeyine sürtünmeyecek şekilde yerleştirilmiştir. Bu çerçevenin amacı deney sırasında numuneyi kavrayarak titreşimi engellemektir. Deney numunesini dönen diske bastırılabilmesi için 30 kg'lık bir eksenel yük uygulanmaktadır. Bu eksenel yük Şekil 22'de gösterilen kaldıraç düzeneği ile deney numunesine uygulanmaktadır (Kaya 2008).



Şekil 22. Böhme aşındırma cihazı

Böhme deneyinde, 30 devir/dk. ± 1 devir/dk hızla dönme sağlayan, yaklaşık 750 mm çapında yatay olarak yerleştirilen döner bir aşındırma diski bulunan cihaz kullanılarak, kenar uzunlukları 70 mm olan küp numunelere uygulanır. 20gr ± 0,5 gr aşındırma tozu sürtünme

şeridi üzerine serpilerek, çelik manivela aracılığı ile 294 ± 3 N ile yüklenir. Deneyde kullanılan numunelere 16 çevrim uygulanmıştır.



Şekil 23. Numuneye aşındırma uygulaması

Deney numunesi iyice temizlendikten sonra numune boyutları hassas bir kumpas ile ölçülür ve hassas terazide tartılır. Böylece numunenin ilk ve son ağırlıkları ölçülerek hacim kayıpları hesaplanmaktadır.

Toplam hacim kaybı, aşağıdaki Denklem 5'e göre yapılmıştır:

$$\Delta v = \frac{\Delta m}{d} \tag{5}$$

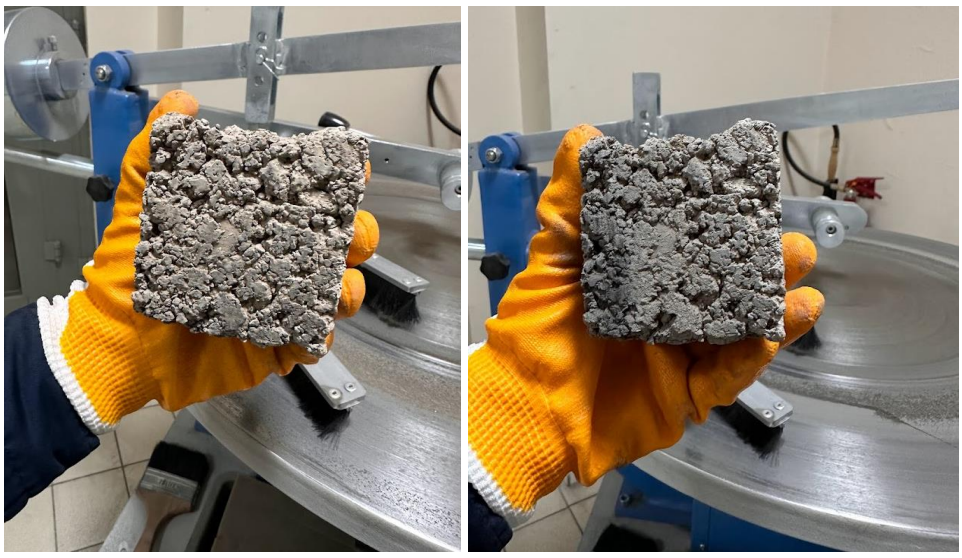
Burada;

Δv: 16 çevrim sonrası toplam hacim kaybı (mm^3)

Δm: 16 çevrim sonrası toplam kütle kaybı (g)

d: Numune yoğunluğu (g/mm^3)

Deney numunelerinin aşınma öncesi ve sonrası görünümleri Şekil 24' de verilmiştir.



(a) Aşınma öncesi numune (b) Aşınma sonrası numune

Şekil 24. Numunenin aşınma öncesi, sonrası durumu

Basınç dayanımı deneyi

Betonun basınç dayanımı "betonda oluşan maksimum gerilme veya eksenel basınç yükü etkisi altındaki betonun kırılmamak için gösterebileceği direnme kabiliyeti" olarak tanımlanmaktadır (Erdoğan 2010). Yüksek dayanımlı beton yol kaplamalarının temel hedeflerinden biri, üstün bir basınç dayanımına ulaşmaktır. Yolun trafik yüklerini minimum bozulmayla karşılayabilmesi ve uzun vadeli yapısal bütünlüğünü koruyabilmesi için yüksek basınç dayanımı kritik bir gerekliliktir. Literatürdeki araştırmalar, modern beton karışımlarının, standartlarda belirtilen 7 ve 28 günlük basınç dayanımı kriterlerini rahatlıkla sağladığını göstermektedir (Öztürk 2018; Abut 2017; Yağtu 2019). Ayrıca beton ve harçlarda nano malzemelerin kullanılmasıyla taze ve sertleştirilmiş koşullardaki mekanik, fiziksel ve mikroyapı özelliklerini önemli derecede iyileştirmektedir (Senff *et al.* 2012). Yapılan mikroyapısal analizler nano tozların, filler etkisi ile puzolanik reaktiviteyi artırmasından dolayı harçların fiziksel ve mekanik özellikleri üzerinde gösterdikleri olumlu etkileri ortaya çıkarmıştır (Oltulu 2011). Nano tozların tekli ve ikili kullanılarak üretilen çimento esaslı harçların özelliklerinin incelendiği bir çalışmada üretilen harç numuneler üzerinde yapılan basınç dayanımı deneyi sonucunda, nano malzeme kullanıldığında basınç dayanımının tüm karışım oranlarında arttığı gözlenmiştir. İkili kullanımlarda basınç dayanımlarındaki artış tekli kullanılan karışımlara göre daha az olduğu tespit edilmiştir (Qarluq 2017).

Basınç dayanımı deneyi TS EN 12390-3 standardına göre Besmak marka basınç dayanımı deney düzeneği ile gerçekleştirilmiştir (Şekil 25).



Şekil 25. Basınç dayanımı deney düzeneği

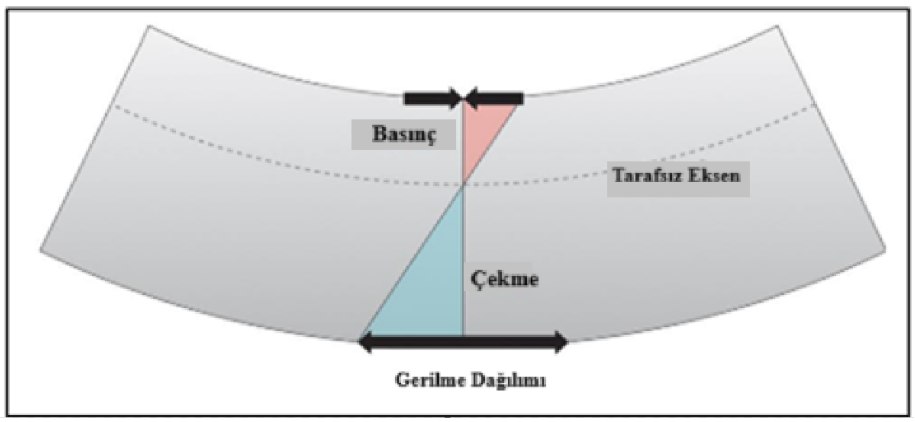
Deneyin uygulandığı numuneler 150x150x150 mm boyutlarındadır. Küp numuneler, yükün uygulama yönü betonun döküm yönüne dik olacak şekilde yerleştirilmiştir. 0,2 MPa/s ($N/mm^2.s$) sabit yükleme hızı ile, yük darbe tesiri olmadan numuneye aktarılmak suretiyle deney gerçekleştirilmiştir. Standarda göre, numuneye uygulanabilecek en büyük yüke ulaşılıncaya kadar sabit hızda yük uygulanarak göstergeden okunan yük kaydedilmiştir (Şekil 26).



Şekil 26. Betona basınç deneyi uygulanması

Eğilme dayanımı deneyi

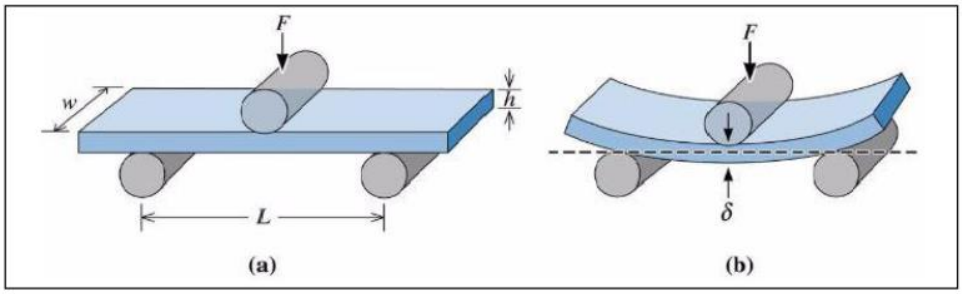
Deney numunesine bir kuvvet uygulandığında numune kesitinin bir kısmında basınç gerilmesi, diğer kısmında ise çekme gerilmesi meydana geliyorsa numune eğilme halindedir. Eğilme durumundaki numune kesitinde de iç yüzeye yakın kısımda basınç gerilmeleri, dış yüzeye yakın bölgede çekme gerilmeleri meydana gelmektedir (Şekil 27) (Anonim 2016; Luther-Davies 2014).



Şekil 27. Eğilme halindeki çubuk üzerindeki gerilme dağılımı (Anonim 2016)

Eğilme deneyinin temel prensibi, deneyde kullanılacak herhangi bir malzemeyi "basit kiriş" olarak kabul etmeye dayanmaktadır. Kiriş denkleminde ideal moment durumuna göre çıkarılır. Burada kirişte meydana gelen kayma gerilmesinin normal gerilmelere göre ihmal edilebilir düzeyde kalması beklenmektedir. Dolayısıyla malzemenin sabit kesit alanlı uzunluk değerinin en geniş değere oranla en az 16 katı büyük olması gerekmektedir. Yani deneyin sınır koşulları "basit kiriş" modellemesi ile aynı kullanılmaktadır (Anonim 2016).

Deney numunesi uzunlamasına ve yatay pozisyonda destekler üzerine konurken, numunenin tam ortasından kuvvet uygulanmaktadır (Şekil 28).



Şekil 28. 3 nokta eğme deneyi düzeneği (Anonim 2016)

Eğilme dayanımı, aşağıda verilen eşitlik kullanılarak hesaplanabilmektedir:

$$F = \frac{3}{2}\frac{PL}{bd^2} \quad (6)$$

Burada;

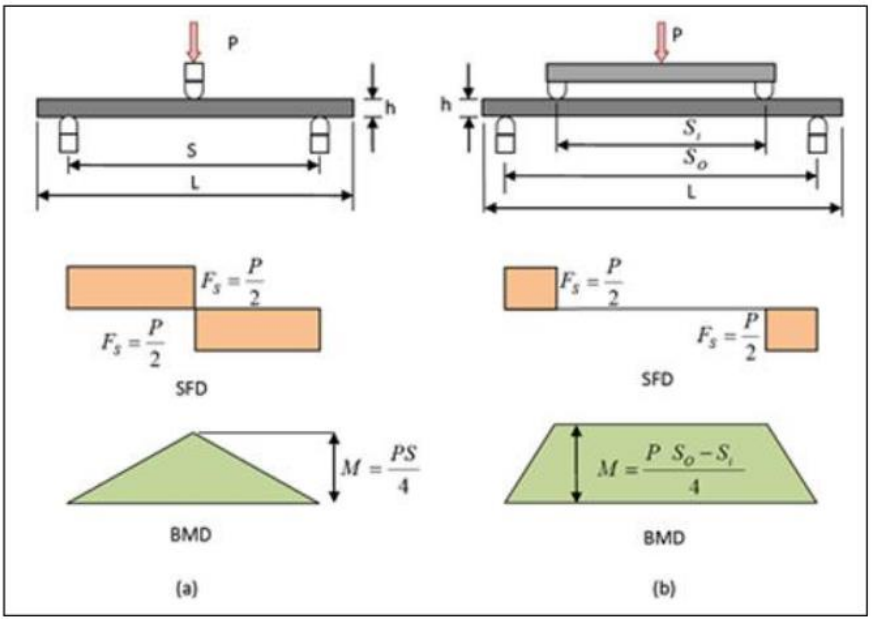
F: Eğilme dayanımı, MPa

P: En büyük yük, N

L: Mesnetler arası açıklık, mm

b,d: Numunenin en kesiti, mm

Deney boyunca, F kuvveti arttırıldığı sırada numunenin ortasında oluşan sehim değeri ölçülür. Ölçülen bu değer sonucunda kuvvete karşı gelen sehim grafiği elde edilir. Bu ölçümler, tüm numuneler için en yüksek sehim ve momentin oluştuğu orta noktadan yapılır. Mukavemet formülleri sayesinde, üç ve dört nokta eğilme deneyleri için gerekli hesaplamalar Şekil 29'da belirtilen parametreler kullanılarak elde edilir (Anonim 2016).



Şekil 29. 3 nokta ve 4 nokta eğme deneyi serbest cisim diyagramı (Anonim 2016)

Beton yol kaplamaları, servis ömürleri boyunca trafik yükleri ve termal gerilmeler nedeniyle önemli eğilme momentlerine maruz kalır. Bu nedenle, kaplamanın çatlamaya karşı direncini ve yük taşıma kapasitesini belirleyen eğilme dayanımı, en kritik performans göstergelerinden biridir. Betonun eğilme dayanımı, çimento dozajı ve agrega gradasyonu gibi geleneksel karışım parametrelerinin ayarlanmasıyla bir miktar iyileştirilebilmektedir (Şengün vd. 2021). Ancak, betonun doğası gereği gevrek bir malzeme olması, eğilme yükleri altında ani kırılmalara yatkın olmasına neden olur. Bu kırılganlığı azaltmak ve betona daha sünek bir davranış kazandırmak için donatı kullanılması gerekmektedir. Bu amaçla, geleneksel hasır donatıların yanı sıra, betonun içine homojen olarak dağılan lifli malzemeler de yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu doğrultuda, güncel araştırmalar betonun eğilme performansını artırmak için lif kullanımının yanı sıra, atık malzeme ve mineral katkıların entegrasyonu gibi yenilikçi yaklaşımların incelenmesini önermektedir (Mardanı-Aghabaglou *et al*. 2020).

Ayrıca nano boyuttaki mineral katkıların yüksek oranda ya da hacimde uçucu kül içeren çimento bağlayıcılı kompozitlerin çekme yükleri altında sünekliliği üzerindeki etkileri ve mekanik özellikleri farklı hidratasyon derecelerinde araştırıldığında kompozit karışımlarının eğilme deformasyon kapasitelerinin %35'e kadar iyileştiği tespit edilmiştir. Süneklilikteki bu iyileşmeyle birlikte eğilme dayanımında az bir iyileşme de elde edilebilmiştir (Balav 2016).

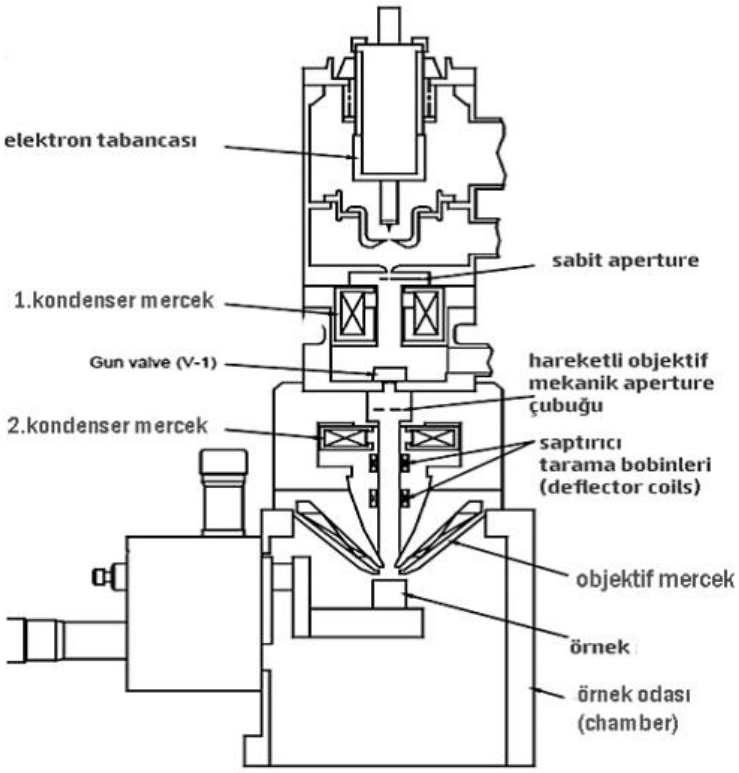
Eğilme dayanım testi için üretilen numuneler, TS EN 12390-5 standardına göre Besmak marka numune eğilme testi cihazı ile üç noktalı eğilme deneyine tabi tutulmuştur. Deney 40x100x100 mm'lik kiriş numunelere, açıklığın tam orta noktasından beton numunelerde basit kiriş metodu ile uygulanmıştır (Şekil 30).



Şekil 30. 3 noktalı eğilme deneyi uygulaması

Taramalı elektron mikroskobu yöntemi (SEM)

Tarihte geliştirilen ilk elektron mikroskobu, Geçirimli Elektron Mikroskobudur (TEM; Transmission Electron Microscope). Taramalı elektron mikroskobu (SEM; Scanning Electron Microscope) ise ilk kez 1960'lı yıllarda ticarileşmeye ve teknolojinin gelişimi sayesinde yayılmaya başlamıştır (Karaduman 2017). Son yıllarda nanomalzemelerin özelliklerinin belirlenmesi ve kullanımına yönelik ileri teknoloji ürünü olan, SEM ve TEM gibi aletlerin kullanımı araştırmacılara nano dünyanın kapılarını açmıştır (Arivalagan *et al.* 2011). SEM, odaklanmış bir elektron demeti sayesinde numune yüzeyinin taranmasını sağlayarak görüntü elde eden bir elektron mikroskobu türüdür. SEM numune ve yüzeyine dair morfolojik, topografik, bileşen yapılarını ve boyutlarını görebilmek amacıyla kullanılır. SEM sayesinde sıvı özellik taşımayan ve sıvı olmayan her türden iletken olan olmayan numune incelenebilir. Ayrıca her çeşit tekstiller, metaller, plastikler, fiberler, polimerler, parçacıklar (kum, çakıl, polen gibi) vs incelenebilmektedir. İletken olmayan numunelerde ise çok ince iletken bir malzemeyle kaplama yapılarak numune incelenebilir hale getirilebilmektedir. EDX (Energy Dispersive X-ray Spectrometer) (Enerji Dağılımlı x-ışınları spektrometresi) dedektörü sayesinde bileşik ve elementlerin göreceli miktarları yüzdelik oranlar şeklinde elde edilip haritalama yöntemiyle, SEM görüntüsü üzerindeki hedef bölgede hangi elementlerin yoğunlaştığı tespit edilebilmektedir. SEM düzeneğinde; elektron demetini toplayıp yönlendirmek için kullanılan kondenser mercekler, elektron tabancası, elektron demetinin çapını kontrol etmek amacıyla kullanılan mekanik açıklıklar, örnek yüzeyini taraması için elektron saptırıcı tarama bobinleri bulunmaktadır (Şekil 31). Vakum altındaki örnek odasında, dedektörler ve örneklerin yerleştiği tutucu bulunmaktadır (Karaduman 2017; Hafner 2015).



Şekil 31. SEM bölümleri (Karaduman 2017)

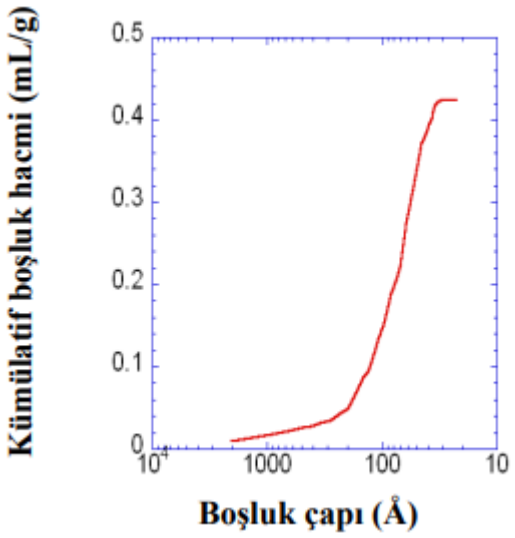
Gaz adsorpsiyon (Brunauer ve emmett) yöntemi

Uygulamada en çok, adsorpsiyon ve desorpsiyon işlemi ile yapılan Brunauer ve Emmett (BET) yöntemi kullanılmaktadır. BET yöntemine soyadlarını veren üç araştırmacı (Brunauer-Emmett-Teller), katı malzemelerin özel yüzey alanını belirlemede çok tabakalı adsorpsiyon teorisi sayesinde bu yöntemi geliştirmişlerdir. Bu yöntemde başlıca nitrojen ve su buharı olmak üzere iki adsorban kullanılmakta olup numunelerin hazırlanmasında kurutma işlemi gerekmektedir (Skalny and Hearn 2001; Beaudin and Marchand 2001; Odler 2003). Ancak, C-S-H (Kalsiyum Silikat Hidrat) fazı içeren numunelerde genelde BET_{N_2} değeri, BET_{H_2O} değerinden daha düşüktür. Bu durumun nedeni genel olarak su buharının boyut olarak daha küçük olmasından dolayı daha küçük boşluklara ve C-S-H (Kalsiyum Silikat Hidrat) tabakaları arasına girerek yüksek sonuçlar vermesi ile açıklanabilmektedir (Odler 2003).

BET analizi bir adsorpsiyon izoterm modeli olup, adsorplanmış her bir yeni moleküler tabakanın, bir altındaki tabakaya eklenmesiyle oluşmaktadır. BET gaz adsorpsiyon teorisi, yüksek spesifik yüzey alanına sahip malzemelerde yüzey alanı ölçümünün temelidir. BET yöntemi, ince taneli numune için kaba taneli numuneninkinden daha yüksek bir spesifik yüzey alanı vermektedir (Brunauer and Emmett 1938).

BET yönteminde N_2 gazının iç yüzeylere kadar ulaşamadığından, N_2 gazının sadece dış yüzeylerdeki adsorpsiyonu ölçülebilmektedir (Su 2019). Gaz adsorpsiyonundan elde edilen

tipik bir grafik genel olarak Şekil 32'deki gibidir. Grafik sayesinde numunedeki boşlukların çaplarına göre bulunma hacimleri elde edilebilmektedir (Lange and Grasley 2009).



Şekil 32. Gaz adsorpsiyonu sonucunda elde edilen grafik (Lange and Grasley 2009)

BET izotermi için geliştirilen eşitliğin düzenlenmiş şekli denklem 7'de verildiği gibidir (Noorimotlagh *et al.* 2014).

$$\frac{c_e}{(c_s - c_e)} = \frac{1}{BQ^0} + \left[\frac{B-1}{BQ^0}\right]\left(\frac{c_e}{c_s}\right) \quad (7)$$

Burada;

C_s: Adsorbatın doygunluk derişimi(mg/L)

Q_o: Adsorbentin yüzeyinde bütün tabakaların adsorplandığı adsorbat miktarı (mg/g)

B: BET sabitidir (adsorbent yüzeyi ile adsorbat arasındaki enerji bağıntısını verir).

ARAŞTIRMA BULGULARI

Bu bölümde sunulan deneysel çalışmalar ve elde edilen bulgular, iki ana aşamada yürütülmüştür. İlk aşama, Taguchi L16 ortogonal dizinine göre tasarlanan 16 farklı beton karışımının deneysel sonuçlarını ve bu sonuçların istatistiksel analizini kapsamaktadır. Basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve aşınma kaybı gibi performans özellikleri için elde edilen ham veriler sunulmuş ve hemen ardından Taguchi metodu kullanılarak her bir malzeme parametresinin etki düzeyleri analiz edilmiştir. Bu analizler sonucunda, her bir performans özelliği için optimum parametre seviyeleri teorik olarak saptanmıştır. İkinci aşama, ilk aşamadaki analizler sonucunda belirlenen teorik optimum karışımların deneysel olarak doğrulanmasına ayrılmıştır. Bu kapsamda, en iyi performansı göstermesi beklenen karışımlar için doğrulama numuneleri üretilmiş, aynı mekanik ve aşınma testlerine tabi tutulmuştur. Bu bölüm, doğrulama deneylerinden elde edilen nihai performans değerlerini içermekte ve en iyi karışım formülasyonunu ortaya koymaktadır.

Son olarak, doğrulaması yapılan optimum karışımların gösterdiği performansın mikro yapısal temellerini incelemek amacıyla SEM ve BET analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu analizler, numunelerin içyapısı hakkında detaylı bilgiler sunmaktadır.

İlk Aşama Numunelerin Deney Sonuçları

Basınç deneyi sonuçları

Basınç dayanım testi 150x150x150 mm boyutundaki küp numunelere uygulanmıştır. Deneyde kullanılan numunelerin birim ağırlıkları Tablo 18’ de basınç dayanımları ise Tablo 19’ da belirtilmiştir. Her bir grup için üçer adet numune üzerine test yapılarak bu üç numunenin basınç dayanımı ortalaması alınmıştır.

Tablo 18. Numune Birim Ağırlıkları

	Birim Ağırlık (g)			
Grup No	**1. Numune**	**2. Numune**	**3. Numune**	**Ortalama**
1	2429,6	2328,9	2417,8	2392,1
2	1890,4	2097,8	2056,3	2014,8
3	1777,8	2062,2	2003,0	1947,7
4	2245,9	2293,3	1854,8	2131,4
5	1931,9	1931,9	1653,3	1839,0
6	2358,5	2388,1	2358,5	2368,4

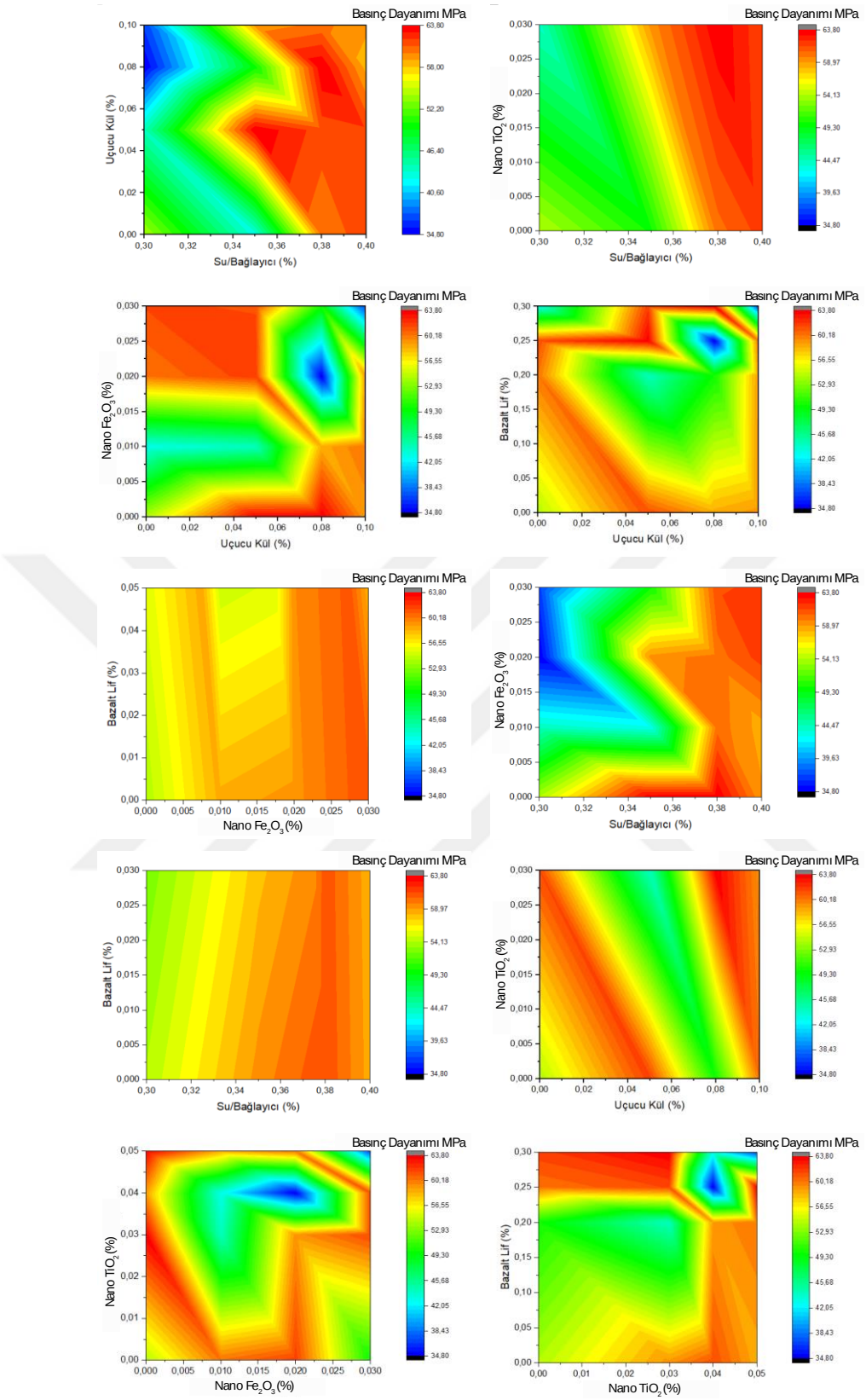
Tablo 18. (Devamı)

BİRİM AĞIRLIK (G)				
Grup No	**1. Numune**	**2. Numune**	**3. Numune**	**Ortalama**
7	1801,5	1925,9	1765,9	1831,1
8	2281,5	2269,6	2287,4	2279,5
9	2379,3	2382,2	2373,3	2378,3
10	2385,2	2382,2	2376,3	2381,2
11	2382,2	2352,6	2459,3	2398,0
12	2385,2	2376,3	2391,1	2384,2
13	2382,2	2367,4	2397,0	2382,2
14	2379,3	2370,4	2394,1	2381,2
15	2370,4	2376,3	2373,3	2373,3
16	2311,1	2394,1	2352,6	2352,6

Tablo 19. Numune Basınç Dayanımları

Basınç Dayanımı (MPa)				
Grup No	**1. Numune**	**2. Numune**	**3. Numune**	**Ortalama**
1	51,2	53,47	56,0	53,6
2	53,9	56,34	58,45	56,2
3	55,54	55,94	54,38	55,3
4	52,94	53,89	53,22	53,4
5	54,97	53,94	55,20	54,7
6	55,23	56,38	57,13	56,2
7	54,3	56,23	57,13	55,9
8	57,73	57,13	57,65	57,5
9	52,3	51,84	51,97	52,0
10	68,29	68,5	66,11	67,6
11	68,12	66,78	67,93	67,6
12	51,8	50,85	50,25	51,0
13	55,9	55,52	56,58	56,0
14	53,48	51,9	51,35	52,2
15	68,02	70,02	69,11	69,1
16	65,87	66,78	65,84	66,2

Elde edilen ortalama basınç dayanımı sonuçları (Tablo 19), Taguchi analizi kapsamında incelenen parametrelerin ikili etkileşimlerini görselleştirmek amacıyla renk grafikleri olarak çizilmiştir (Şekil 33). Bu grafikler, iki parametrenin eş zamanlı değişiminin basınç dayanımı üzerindeki etkisini, renk skalasıyla belirtilen sayısal dayanım değerleriyle birlikte göstermektedir.



Şekil 33. Basınç dayanımı renk grafikleri

Su/bağlayıcı oranının basınç dayanımı üzerindeki etkisi, incelenen parametreler arasında en belirgin olanıdır. Renk grafiklerinde, su/bağlayıcı oranı arttıkça (eksen üzerinde 0,30'dan 0,40'a doğru) basınç dayanımının da sistematik olarak arttığı gözlemlenmektedir. En yüksek dayanım bölgeleri (kırmızı ve sarı renkler), su/bağlayıcı oranının 0,38-0,40 aralığında

olduğu bölgelerde yoğunlaşmıştır. Bu bölgelerdeki dayanım değerleri, renk skalasına göre 67 MPa'ın üzerine çıkabilmektedir ki bu durum, Tablo 19'da görülen en yüksek deneysel sonuçlar olan 15. grup (69,1 MPa), 10. grup (67,6 MPa) ve 11. grup (67,6 MPa) ile tam bir uyum içindedir. Uçucu külün nano Fe_2O_3 ve nano TiO_2 ile etkileşimini gösteren renk grafikleri, bu malzemelerin bir arada kullanımında ters yönlü bir ilişki olduğunu ortaya koymaktadır. Her iki grafikte de en yüksek dayanım bölgeleri, parametrelerden birinin en yüksek seviyede iken diğerinin en düşük seviyede olduğu grafik köşelerinde yer almaktadır. Örneğin, %10 uçucu kül ve %0 nano Fe_2O_3 ile %0 uçucu kül ve %3 nano Fe_2O_3 kombinasyonlarının yüksek sonuçlar verdiği anlaşılmaktadır. Bu bölgelerdeki yüksek dayanım değerleri, deney sonuçlarına göre 66-69 MPa seviyelerine ulaşmaktadır. Buna karşın, iki malzemenin de orta seviyelerde kullanıldığı merkez bölgelerde dayanımın ~55 MPa aralığına düştüğü görülmektedir. Lif ve nanomalzemelerin etkileşimi incelendiğinde, bazalt lif ile nano Fe_2O_3 arasında güçlü bir pozitif ilişki olduğu açıkça görülmektedir. Renk grafiğinde, her iki malzemenin de en yüksek oranlarda kullanıldığı bölge, en yüksek dayanım alanlarından biri olarak öne çıkmakta ve bu bölgedeki dayanım değerlerinin 66 MPa'ı aştığı gözlemlenmektedir. Buna karşın, bazalt lif ile nano TiO_2 etkileşiminde benzer bir etki gözlemlenmemiştir. Deney sonuçları ışığında yapılan değerlendirmede, en yüksek basınç dayanımını sağlayan koşulların 0,38-0,40 aralığındaki yüksek su/bağlayıcı oranı olduğu tespit edilmiştir. Malzeme etkileşimleri açısından ise en güçlü pozitif etkileşimin yüksek oranlı bazalt lif ve nano Fe_2O_3 kombinasyonunda ortaya çıktığı, uçucu kül ve nanomalzemelerin ise birinin oranı yüksekken diğerinin düşük olduğu durumlarda en iyi performansı sergilediği anlaşılmıştır.

Basınç deneyi sonuçlarının analizi

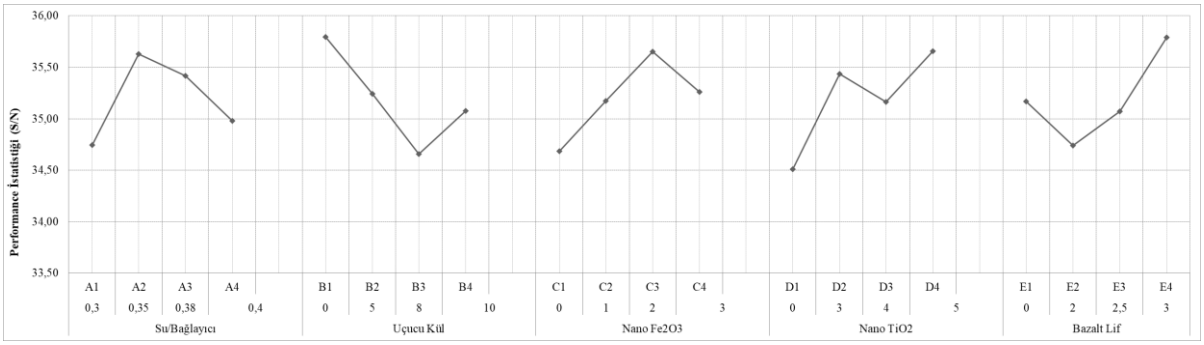
Taguchi L16 ortogonal dizinine göre elde edilen basınç dayanımı sonuçlarının istatistiksel analizi, S/N oranı ve ANOVA yöntemleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Basınç dayanımında hedeflenen performans daha büyük daha iyi karakteristiği olduğu için, S/N oranı hesaplamaları bu kritere göre yapılmıştır. Her bir deney grubu için hesaplanan S/N oranları Tablo 20' de, her bir kontrol parametresinin farklı seviyeleri için hesaplanan ortalama S/N oranları ise Tablo 21'de ana etkiler grafiği ise Şekil 34'te sunulmuştur. Grafikteki en yüksek S/N oranı değeri, o parametre için optimum seviyeyi göstermektedir.

Tablo 20. Basınç Dayanımı Sinyal Gürültü Oranları

Grup No	Basınç Dayanımı (MPa)	S/N
1	53,58	34,58
2	56,19	34,99
3	55,25	34,85
4	53,4	34,55
5	54,74	34,77
6	56,28	35,01
7	55,86	34,94
8	57,52	35,2
9	52,02	34,32
10	67,61	36,6
11	67,63	36,6
12	50,98	34,15
13	55,95	34,96
14	52,28	34,37
15	69,02	36,78
16	66,2	36,42
Ortalama S/N		35,19

Tablo 21. Ortalama Sinyal Gürültü Oranları

Ortalama S/N Değerleri					
Seviye	**Su/Bağlayıcı**	**Uçucu Kül**	**Nano Fe_2O_3**	**Nano TiO_2**	**Bazalt Lif**
1	34,743	35,793	34,683	34,509	35,169
2	35,630	35,242	35,172	35,437	34,740
3	35,419	34,656	35,652	35,165	35,072
4	34,978	35,078	35,262	35,658	35,789



Şekil 34. Basınç dayanımı S/N oranları için ana etkiler grafiği

S/N oranı analizi sonucunda, basınç dayanımını maksimize eden teorik optimum parametre seviyeleri belirlenmiştir. Buna göre ortaya çıkan karışım 2. Seviye Su/Bağlayıcı oranı (0,35), 1. Seviye Uçucu Kül (%0), 3. Seviye Nano Fe_2O_3 (%2), 4. Seviye Nano TiO_2 (%5) ve 4. Seviye Bazalt Lif (3 kg/m³) kombinasyonundan oluşmaktadır. ANOVA ile parametrelerin

etki oranları hesaplanmadan önce, öncül analizlerde etki düzeyi en düşük olduğu saptanan uçucu kül parametresi, modelin hassasiyetini ve güvenilirliğini artırmak amacıyla hata terimi ile birleştirilerek havuzlama yapılmıştır. Bu işlem sonrasında, kalan parametrelerin basınç dayanımı üzerindeki göreceli etkilerini belirlemek amacıyla hesaplanan etki oranları Tablo 22'de sunulmuştur. Bu analiz, hangi malzeme bileşeninin performansı ne ölçüde şekillendirdiğini net bir şekilde ortaya koymaktadır.

Tablo 22. Parametrelerin Basınç Dayanımına Etki Oranları

Parametreler	Kareler Toplamı	Etki Oranı (%)
Bazalt Lif (kg/m³)	0,083	70,64%
Nano Fe_2O_3 (%)	0,0162	13,79%
Nano TiO_2 (%)	0,0116	9,87%
Su/Bağlayıcı Oranı	0,0062	5,28%
Hata	0,0005	0,43%
Toplam	**0,1175**	**100,00%**

Analiz sonuçları, bu çalışmada tasarlanan beton karışımlarının basınç dayanımı üzerinde bazalt lif miktarının, diğerlerine kıyasla en yüksek etkiye sahip parametre olduğunu göstermektedir. Lif takviyesi, basınç dayanımı üzerindeki %70,64'lük etki payıyla en belirleyici parametre olarak öne çıkmaktadır. Bu yüksek etki, liflerin çatlak ilerlemesini engelleyen bir mikro donatı görevi görerek malzemenin genel tokluğunu artırmasından kaynaklanmaktadır. Bazalt lifin ardından, nanomalzemelerin de dayanım üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu görülmektedir. Nano Fe_2O_3 ve Nano TiO_2, sırasıyla ikinci ve üçüncü en etkili parametreler olarak belirlenmiştir. Bu nanokatkıların, puzolanik reaktivite ve boşluk doldurma etkileri sayesinde betonun mikro yapısını sıkılaştırarak ve hidratasyon için ek çekirdeklenme alanları oluşturarak dayanıma katkı sağladığı söylenebilir. Su/bağlayıcı oranı ise %5,28'lik etki oranıyla istatistiksel olarak anlamlı olmasına rağmen, diğer malzeme katkılarına kıyasla dayanım üzerindeki etkisinin daha sınırlı kaldığı dikkat çekmektedir. Modeldeki hata payının %0,43 gibi oldukça düşük bir seviyede olması, deney sonuçlarındaki değişkenliğin %99'dan fazlasının seçilen bu dört parametre tarafından başarıyla açıklandığını göstermektedir. Bu durum, kurulan deneysel modelin yüksek derecede güvenilir ve açıklayıcı olduğunu kanıtlamaktadır. Parametrelerin etki oranlarının yanı sıra, bu etkilerin rastlantısal olup olmadığını istatistiksel olarak test etmek ve anlamlılığını doğrulamak amacıyla yapılan ANOVA sonuçları Tablo 23'te sunulmuştur.

Tablo 23. Varyans Analizi Sonuçları

Varyans Analizi					
Kaynak	**Kareler Toplamı**	**Serbestlik Derecesi (SD)**	**Kareler Ortalaması**	**F-Değeri**	**p-Değeri**
Su/Bağlayıcı Oranı	0,0062	3	0,0021	12,84	0,0322
Nano Fe_2O_3 (%)	0,0162	3	0,0054	33,7	0,0082
Nano TiO_2 (%)	0,0116	3	0,0039	24,11	0,0133
Bazalt Lif (kg/m^3)	0,083	3	0,0277	172,38	0,0007
Hata	0,0005	3	0,0002		
Düzeltilmiş Toplam	0,1175	15			

İstatistiksel anlamlılık için referans değer, %95 güven düzeyi ($P < 0,05$) olarak alınmıştır. Bir parametrenin P-değerinin 0,05'ten küçük olması, o parametrenin deney sonuçları üzerinde tesadüfi olmayan, gerçek bir etkiye sahip olduğunu gösterir. Tablodaki P-değerleri incelendiğinde, modelde yer alan dört ana faktörün tamamının 0,05'ten küçük P-değerlerine sahip olduğu görülmektedir. Bu bulgu, bu dört parametrenin her birinin basınç dayanımı üzerindeki etkisinin istatistiksel olarak anlamlı olduğunu kanıtlamaktadır. Parametrelerin etki büyüklüklerini karşılaştıran F-değerleri ise bu anlamlılığı daha da detaylandırmaktadır. Özellikle Bazalt Lif için hesaplanan F-değeri, diğer faktörlere kıyasla yüksek bir seviyededir. Bu değer, bazalt lifin yarattığı etkinin, deneydeki rastgele hataya oranla ne kadar güçlü olduğunun bir göstergesidir ve etki oranı analizinde neden baskın faktör olarak ortaya çıktığını istatistiksel olarak da doğrulamaktadır. Yapılan varyans analizinin ardından, oluşturulan istatistiksel modelin genel uygunluğunu ve tahmin gücünü test etmek amacıyla uyum istatistikleri incelenmiştir. Bu istatistikler Tablo 24'te özetlenmektedir.

Tablo 24. Uyum İstatistikleri

Uyum İstatistikleri			
Kaynak	**Serbestlik Derecesi**	**Kareler Toplamı**	**F Değeri**
Standart Sapma	0,0127	R^2	0,9959
Ortalama	1,72	Düzeltilmiş R^2	0,9795
Varyasyon Katsayısı (%)	0,7345	Tahmin Edilmiş R^2	0,8834
		Yeterli Hassasiyet	23,0883

Modelin R-kare (R^2) değeri 0,9959 olarak hesaplanmıştır; bu, basınç dayanımı sonuçlarındaki toplam değişkenliğin %99,59'unun seçilen parametreler tarafından başarıyla açıklandığını göstermektedir. Modele dahil edilen terim sayısını dikkate alarak düzeltme yapan Düzeltilmiş R-kare değerinin de 0,9795 gibi çok yüksek bir seviyede olması, modelin açıklayıcılık gücünü teyit etmektedir. Modelin tahmin yeteneğini gösteren önemli bir kontrol ise düzeltilmiş ve tahmin edilmiş R-kare değerlerinin uyumudur. Bu çalışmada, düzeltilmiş R^2 (0,9795) ile tahmin edilmiş R^2 (0,8834) değerleri arasındaki farkın 0,2'den az olması, bu iki değerin makul bir uyum içinde olduğunu gösterir. Bu durum, modelin aşırı uyumlu olmadığını ve yeni gözlemler için de tutarlı tahminler yapabileceğini doğrulamaktadır. Son olarak, modelin S/N oranını ölçen yeterli hassasiyet değeri 4'ten büyük olması arzu edilirken, bu model için 23,088 gibi oldukça yüksek bir değer elde edilmiştir. Bu sonuç, modelin ayırt etme gücünün çok yüksek olduğunu ve farklı parametre kombinasyonları için güvenilir tahminler yapmak amacıyla kullanılabileceğini kanıtlamaktadır.

Eğilme dayanım deneyi sonuçları

Eğilme dayanım deneyi, 100x100x40 mm boyutlarındaki kiriş numunelere üç noktalı olarak uygulanmıştır. Deneyde kullanılan numunelerin birim ağırlıkları tablo 25' de eğilme dayanımı değerleri de tablo 26'da verilmiştir.

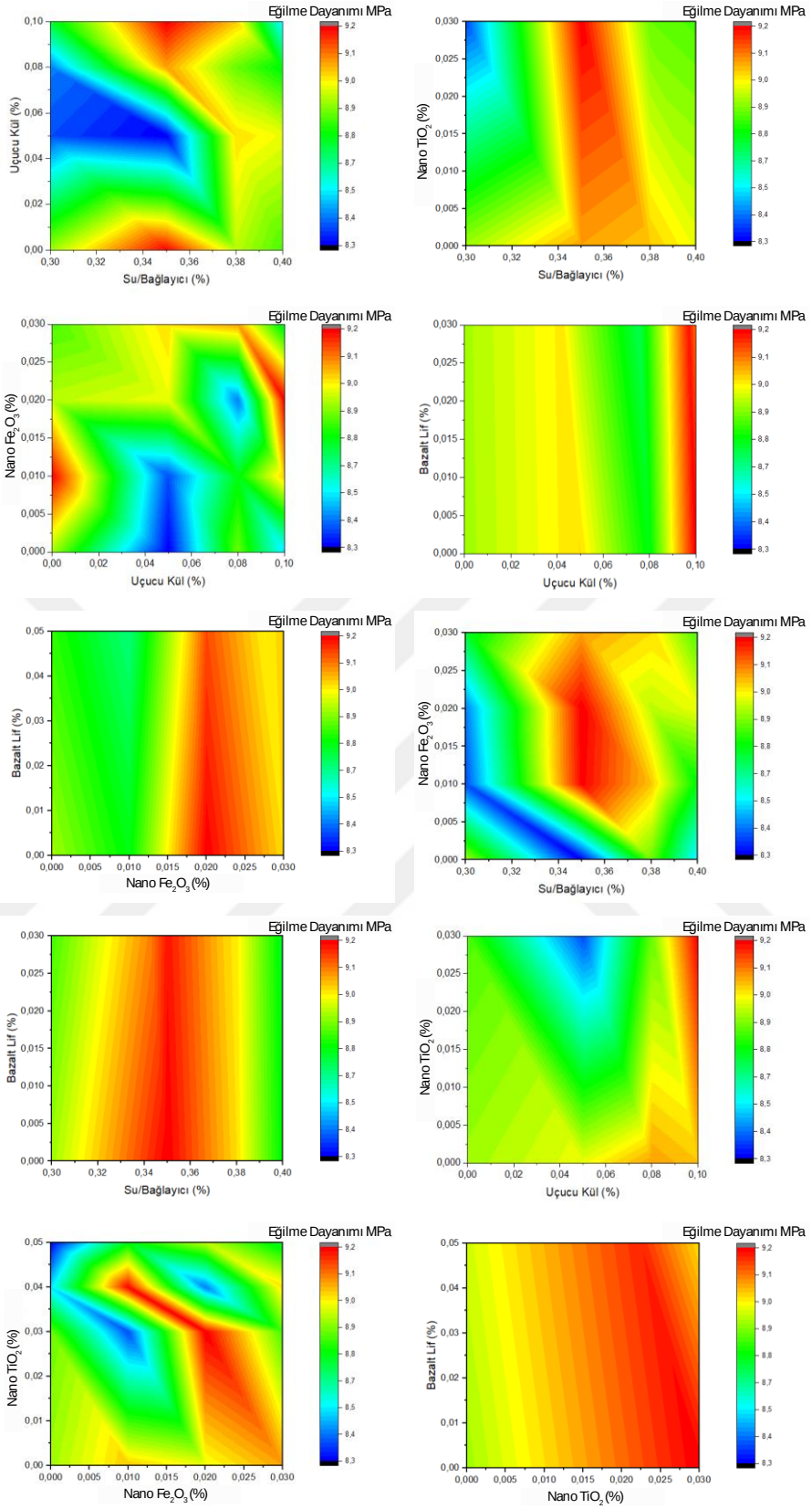
Tablo 25. Numune Birim Ağırlıkları

	Birim Ağırlık (g)			
Grup No	**1. Numune**	**2. Numune**	**3. Numune**	**Ortalama**
1	1980	2007,5	1937,5	1975,0
2	1960	1805	1992,5	1919,2
3	1765	1910	2050	1908,3
4	2210	2310	2120	2213,3
5	2060	2082,5	2030	2057,5
6	2020	2042,5	1997,5	2020,0
7	1855	1875	2000	1910,0
8	2205	2030	2012,5	2082,5
9	1977,5	2007,5	2005	1996,7
10	1962,5	1987,5	2070	2006,7
11	2000	2027,5	2017,5	2015,0
12	1977,5	2030	1992,5	2000,0
13	1980	2000	1995	1991,7
14	2000	2027,5	1992,5	2006,7
15	2037,5	2012,5	1990	2013,3
16	2005	1990	2067,5	2020,8

Tablo 26. Numune Eğilme Dayanımları

Grup No	Maks Eğilme (MPa)			
	1. Numune	2. Numune	3. Numune	Ortalama
1	5,57	5,69	5,53	5,6
2	8,5	8,08	7,73	8,1
3	11,78	10,98	11,43	11,4
4	11,38	8,55	9,47	9,8
5	9,27	7,72	8,52	8,5
6	5,05	5,25	5	5,1
7	9,79	9,45	9,85	9,7
8	11,73	10,85	11,32	11,3
9	12	10,95	11,52	11,49
10	10,62	9,54	9,83	10
11	5,62	5,57	5,6	5,6
12	8,68	7,99	8,23	8,3
13	10,24	9,21	9,65	9,7
14	11,35	10,65	11,01	11
15	8,38	8,25	8,26	8,3
16	6,58	5,73	5,39	5,9

Numunelerin ortalama eğilme dayanımı sonuçları, parametrelerin ikili etkileşimlerini görselleştirmek amacıyla renk grafikleri olarak çizilmiştir (Şekil 35).



Şekil 35. Eğilme dayanımı renk grafikleri

Renk grafikleri bir bütün olarak incelendiğinde, eğilme dayanımı üzerinde en belirgin ve tutarlı pozitif etkiyi gösteren parametrenin bazalt lif olduğu açıkça görülmektedir. Bazalt lif miktarını gösteren y eksenli tüm grafiklerde, lif miktarının düşük olduğu alt kısımlar düşük

dayanımlı yeşil ve mavi renklerdeyken (~5.0-6.5 MPa), lif miktarının 2,5 kg/m³ üzerine çıktığı üst kısımlar istisnasız bir şekilde yüksek dayanımlı kırmızı ve turuncu renklere (~7.5-9.0 MPa) sahiptir. Bu durum, eğilme dayanımını artırmada lif takviyesinin birincil faktör olduğunu göstermektedir. Basınç dayanımından farklı olarak, eğilme dayanımında düşük su/bağlayıcı oranının performansı artırdığı gözlemlenmiştir. Su/bağlayıcı oranı- Uçucu Kül grafiği incelendiğinde, en yüksek dayanım bölgesi (>9.0 MPa), su/bağlayıcı oranının en düşük olduğu 0.30 ve uçucu kül miktarının en düşük olduğu %0-2 aralığında yer almaktadır. Uçucu kül miktarının %10'a doğru artmasıyla birlikte, dayanımın belirgin bir şekilde 6.0-7.0 MPa seviyelerine düştüğü görülmektedir. Bu durum, bu çalışmada kullanılan malzeme kombinasyonları özelinde, uçucu külün puzolanik aktivitesinin eğilme performansına pozitif katkı sağlamadığını, aksine birim hacimdeki çimento miktarını azaltarak dayanımı düşürdüğünü göstermektedir. Nanomalzemelerin eğilme dayanımı üzerindeki etkileri, bazalt lif kadar belirgin değildir. Nano TiO_2- Su/bağlayıcı oranı grafiği incelendiğinde, en düşük dayanım değerlerinin (<6.5 MPa) hem düşük hem de yüksek su/bağlayıcı oranlarında yüksek nano TiO_2 miktarı (%2.5-3.0) ile elde edildiği görülmektedir. Optimum sonuçlar, su/bağlayıcı oranının 0.34-0.38 aralığında ve nano TiO_2 miktarının %2'nin altında olduğu bölgede yoğunlaşmıştır. Nano Fe_2O_3'nin etkisi ise grafiklerde daha az belirgindir ve genellikle diğer parametrelerin (özellikle bazalt lif ve su/bağlayıcı oranı) gölgesinde kalmaktadır. Bu durum, nanomalzemelerin bu çalışmadaki katkısının, eğilme dayanımını tek başına maksimize etmekten ziyade, diğer bileşenlerle birlikte mikro yapıyı iyileştirmekle sınırlı olabileceğini düşündürmektedir. Sonuç olarak, eğilme dayanımını en çok artıran parametrenin bazalt lif olduğu net bir şekilde tespit edilmiştir. İkinci en önemli faktör ise düşük su/bağlayıcı oranıdır. Uçucu kül kullanımının eğilme dayanımını genel olarak düşürdüğü, nanomalzemelerin etkisinin ise daha sınırlı ve diğer parametrelerin seviyesine bağlı olduğu gözlemlenmiştir. En yüksek eğilme performansı için, yüksek miktarda bazalt lif içeren ve düşük su/bağlayıcı oranı ile düşük oranda mineral katkı kullanılarak tasarlanan karışımların en uygun olduğu anlaşılmaktadır.

Eğilme deneyi sonuçlarının analizi

Taguchi L16 ortogonal dizinine göre elde edilen eğilme dayanımı sonuçlarının istatistiksel analizi, S/N oranı ve ANOVA yöntemleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Eğilme dayanımında hedeflenen performans daha büyük daha iyi karakteristiği olduğu için, S/N oranı hesaplamaları bu kritere göre yapılmıştır. Her bir deney grubu için hesaplanan S/N oranları Tablo 27'de, her bir kontrol parametresinin farklı seviyeleri için hesaplanan ortalama S/N

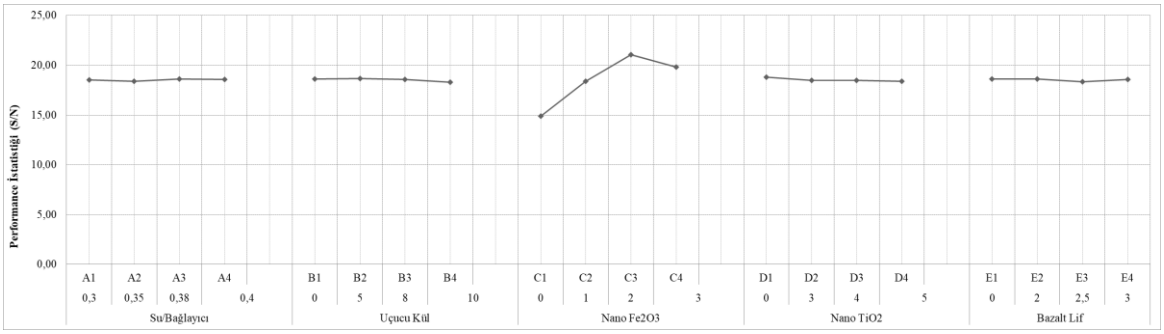
oranları Tablo 28'de ve ana etkiler grafiği Şekil 36'da sunulmuştur. Grafikteki en yüksek S/N oranı değeri, o parametre için optimum seviyeyi göstermektedir.

Tablo 27. Eğilme Dayanımı Sinyal Gürültü Oranları

Grup No	Eğilme Dayanımı	S/N
1	5,6	14,96
2	8,1	18,18
3	11,4	21,16
4	9,8	19,79
5	8,5	18,54
6	5,1	14,07
7	9,7	19,76
8	11,3	21,03
9	11,4	21,15
10	10,0	20,03
11	5,6	14,92
12	8,3	18,40
13	9,7	19,74
14	11,0	20,8
15	8,3	18,35
16	5,9	15,41
Ortalama S/N		18,5

Tablo 28. Ortalama Sinyal Gürültü Oranları

Ortalama S/N Değerleri					
Seviye	**Su/Bağlayıcı**	**Uçucu Kül**	**Nano Fe_2O_3**	**Nano TiO_2**	**Bazalt Lif**
1	18,524	18,606	14,874	18,786	18,602
2	18,384	18,672	18,381	18,483	18,615
3	18,621	18,555	21,042	18,477	18,352
4	18,591	18,287	19,824	18,374	18,551



Şekil 36. Eğilme dayanımı S/N oranları için ana etkiler grafiği

S/N oranı analizine göre, eğilme dayanımını maksimize eden teorik optimum karışım; 3. Seviye Su/Bağlayıcı oranı (0,38), 2. Seviye Uçucu Kül (%5), 3. Seviye Nano Fe_2O_3 (%2), 1. Seviye Nano TiO_2 (%0) ve 2. Seviye Bazalt Lif (2 kg/m³) kombinasyonundan oluşmaktadır. ANOVA ile parametrelerin etki oranları hesaplanmadan önce, öncül analizlerde etki düzeyi en düşük olduğu saptanan Nano TiO_2 parametresi, modelin hassasiyetini ve güvenilirliğini artırmak amacıyla hata terimi ile birleştirilerek havuzlama yapılmıştır. Bu işlem sonrasında, kalan parametrelerin eğilme dayanımı üzerindeki etkilerini belirlemek amacıyla hesaplanan etki oranları Tablo 29'da sunulmuştur.

Tablo 29. Parametrelerin Eğilme Dayanımına Etki Oranları

Kaynak (Faktör)	Kareler Toplamı	Etki Oranı (%)
Bazalt Lif (kg/m3)	0,1286	49,39%
Nano Fe_2O_3 (%)	0,059	22,66%
Su/Bağlayıcı Oranı	0,0451	17,32%
Uçucu Kül (%)	0,0231	8,87%
Hata	0,0046	1,77%
Toplam	**0,2604**	**100,00%**

Analiz sonuçları, eğilme dayanımı üzerinde en etkili parametrenin %49,39'luk etki payıyla Bazalt Lif olduğunu göstermektedir. Etki büyüklüğüne göre diğer parametreler sırasıyla Nano Fe_2O_3 (%22,66), Su/Bağlayıcı Oranı (%17,32) ve Uçucu Kül (%8,87) olarak sıralanmaktadır. Lif takviyesinin, eğilme gerilmeleri altında oluşan mikro çatlakları köprüleyerek çatlak ilerlemesini engellemesi, bu baskın etkinin temel nedenidir. Modeldeki hata payının %1,77 gibi düşük bir seviyede olması, kurulan deneysel modelin yüksek derecede güvenilir olduğunu göstermektedir.

Parametrelerin etki oranlarının yanı sıra, bu etkilerin istatistiksel olarak tesadüfi olup olmadığını test etmek ve anlamlılığını doğrulamak amacıyla yapılan ANOVA sonuçları Tablo 30'da sunulmuştur.

Tablo 30. Varyans Analizi Sonuçları

Varyans Analizi					
Kaynak	**Kareler Toplamı**	**Serbestlik Derecesi (SD)**	**Kareler Ortalaması**	**F-Değeri**	**p-Değeri**
Su/Bağlayıcı Oranı	0,0451	3	0,015	9,88	0,046
Uçucu Kül (%)	0,0231	3	0,0077	5,06	0,108
Nano Fe2O3 (%)	0,059	3	0,0197	12,93	0,0319
Bazalt Lif (kg/m3)	0,1286	3	0,0429	28,19	0,0107
Hata	0,0046	3	0,0015		
Düzeltilmiş Toplam	0,2604	15			

Çalışmada istatistiksel anlamlılık için referans, %95 güven düzeyine karşılık gelen P <0,05 kriterine göre Tablo 30'daki sonuçlar incelendiğinde Bazalt Lif (P=0,0107), Nano Fe_2O_3 (P=0,0319) ve Su/Bağlayıcı Oranı (P=0,046) parametrelerinin P-değerlerinin 0,05'ten küçük olduğu görülmektedir. Bu bulgu, bu üç parametrenin her birinin eğilme dayanımı üzerindeki etkisinin istatistiksel olarak anlamlı olduğunu kanıtlamaktadır. Buna karşın, Uçucu Kül parametresinin P-değeri 0,108 olarak hesaplanmıştır. Bu değer 0,05'ten büyük olduğu için, uçucu külün bu modeldeki eğilme dayanımı üzerindeki etkisinin istatistiksel olarak anlamlı olmadığı sonucuna varılır. Başka bir deyişle, uçucu külün farklı seviyeleri arasında gözlemlenen dayanım değişiklikleri, rastgele deneysel hatadan ayırt edilememektedir. Parametrelerin etki büyüklüklerini karşılaştıran F-değerleri ise bu anlamlılık durumunu daha da netleştirmektedir. Bazalt lif için hesaplanan 28,19'luk F-değeri, modeldeki en yüksek F-değeridir. Bu, bazalt lifin yarattığı etkinin, deneydeki rastgele gürültüye kıyasla daha güçlü olduğu anlamına gelir ve etki oranı analizinde neden baskın faktör olarak ortaya çıktığını istatistiksel olarak da doğrular. Benzer şekilde Nano Fe_2O_3 ve Su/Bağlayıcı Oranı da sırasıyla 12,93 ve 9,88'lik F-değerleri ile anlamlı birer etkiye sahip olduklarını göstermektedir.

Oluşturulan istatistiksel modelin genel uygunluğunu ve tahmin gücünü test etmek amacıyla uyum istatistikleri incelenmiştir. Bu istatistikler Tablo 31'de özetlenmektedir.

Tablo 31. Uyum İstatistikleri

Uyum İstatistikleri			
Kaynak	**Serbestlik Derecesi**	**Kareler Toplamı**	**F Değeri**
Standart Sapma	0,039	R^2	0,9825
Ortalama	0,9023	Düzeltilmiş R^2	0,9124
Varyasyon Katsayısı (%)	4,32	Tahmin Edilmiş R^2	0,5015
		Yeterli Hassasiyet	10,3601

Modelin R-kare (R^2) değerinin 0,9825 olması, eğilme dayanımı sonuçlarındaki değişkenliğin %98'inden fazlasının modeldeki anlamlı faktörler tarafından başarıyla açıklandığını göstermektedir. Benzer şekilde, Düzeltilmiş R-kare değerinin de 0,9124 gibi yüksek bir seviyede olması, modelin mevcut veriler için güçlü bir açıklayıcılığa sahip olduğunu teyit etmektedir. Ancak, modelin yeni gözlemleri tahmin etme kabiliyetini ölçen Tahmin Edilmiş R-kare değeri 0,5015 olarak daha düşük hesaplanmıştır. Düzeltilmiş R^2 (0,9124) ile Tahmin Edilmiş R^2 (0,5015) arasındaki farkın 0,2'den büyük olması, modelin mevcut verileri iyi açıklamakla birlikte, yeni karışımların sonuçlarını tahmin etme konusunda zayıf kalabileceğine işaret etmektedir. Buna rağmen, modelin S/N oranını ölçen Yeterli Hassasiyet değeri 4'ten büyük olması arzu edilirken, bu model için 10,36 değeri elde edilmiştir. Bu sonuç, modelin tahmin gücündeki zayıflığa rağmen, parametrelerin etkilerini ayırt etme gücünün yeterli olduğunu göstermektedir.

Aşınma deneyi sonuçları

Aşınma (böhme) deneyi için 70x70x70 mm boyutlarında her karışım için 3'er adet numune hazırlanmıştır. Numunelerin birim ağırlıkları ve kütle-hacim kayıpları deney öncesi ve sonrası hesaplanmıştır. Numunelerin deney öncesi birim ağırlıkları ile deney sonrası birim ağırlıkları tablo 32'de ve kütle-hacim kayıpları ise tablo 33' de verilmiştir.

Tablo 32. Deney Öncesi ve Sonrası Birim Ağırlıklar

Grup No	**Deney Öncesi Birim Ağırlık (g)**			**Deney Sonrası Birim Ağırlık (g)**		
	1. Numune	**2. Numune**	**3. Numune**	**1. Numune**	**2. Numune**	**3. Numune**
1	2323,91	2253,94	2242,86	2320,02	2250,92	2240,18
2	2433,53	2168,51	2342,57	2431,17	2166,79	2341,36
3	2216,03	2343,73	2144,9	2213,61	2340,78	2144,09
4	2209,33	2307	2216,03	2206,87	2303,17	2211,79
5	2055,1	2122,45	2276,68	2051,66	2120,89	2272,57
6	2130,9	2216,03	2244,31	2129,4	2214,33	2242,47

Tablo 32. (Devamı)

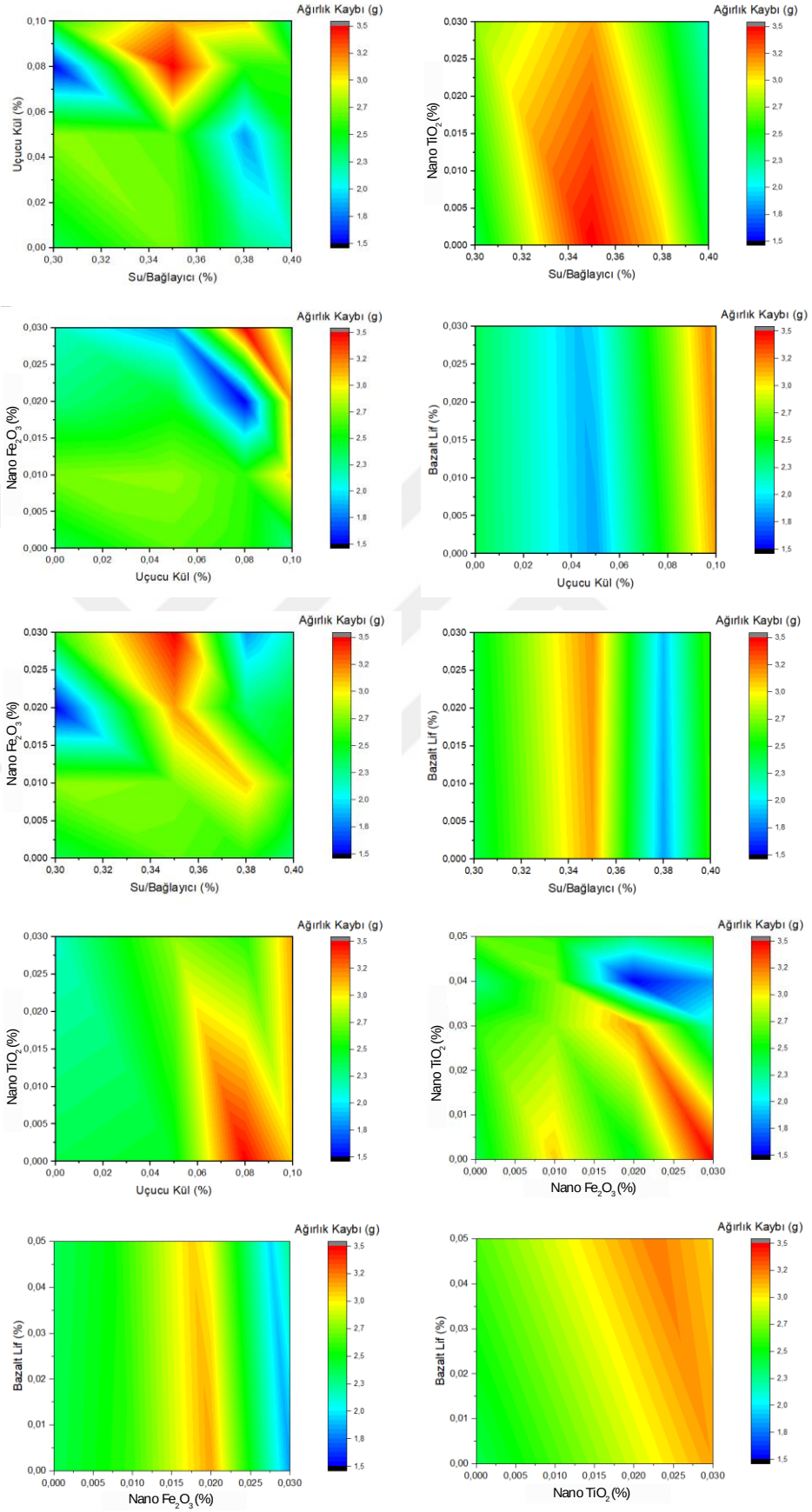
Grup No	Deney Öncesi Birim Ağırlık (G)			Deney Sonrası Birim Ağırlık (G)		
	1. Numune	2. Numune	3. Numune	1. Numune	2. Numune	3. Numune
7	2276,68	2159,18	2055,1	2274,12	2157,62	2053,43
8	2167,06	2187,46	2149,56	2163,23	2183,76	2146,13
9	2377,26	2211,08	2291,84	2373,8	2208,11	2289,77
10	2212,54	2325,07	2179,3	2211,13	2323,19	2178,14
11	2093	2168,8	2260,06	2090,75	2167,22	2257,46
12	2221,28	2172,59	2101,46	2217,17	2169,56	2098,53
13	2295,34	2267,93	2235,86	2291,97	2264,67	2233,58
14	2154,23	2170,55	2180,76	2152,9	2169,23	2179,03
15	2258,02	2220,41	2168,8	2255,7	2218,39	2167,08
16	2206,41	2195,92	2176,38	2202,19	2192,9	2173,99

Tablo 33. Numune Kütle-Hacim Kayıpları

Grup No	Fark (g)			Ortalama Kütle Kaybı (g)	Hacim Kaybı (cm^3)
	1. Numune	2. Numune	3. Numune		
1	3,89	3,02	2,68	3,23	1,43
2	2,36	1,72	1,21	1,72	0,75
3	2,42	2,95	0,81	2,10	0,94
4	2,46	3,83	4,24	3,54	1,58
5	3,44	1,56	4,11	3,08	1,44
6	1,50	1,70	1,84	1,65	0,75
7	2,56	1,56	1,67	1,91	0,89
8	3,83	3,70	3,43	3,62	1,68
9	3,46	2,97	2,07	2,88	1,26
10	1,41	1,88	1,16	1,44	0,64
11	2,25	1,58	2,60	2,10	0,97
12	4,11	3,03	2,93	3,36	1,56
13	3,37	3,26	2,28	2,99	1,32
14	1,33	1,32	1,73	1,42	0,66
15	2,32	2,02	1,72	1,98	0,9
16	4,22	3,02	2,39	3,22	1,47

Numunelerin aşınma direncini belirlemek amacıyla yapılan testler sonucunda elde edilen ortalama kütle kayıpları, parametrelerin ikili etkileşimlerini görselleştirmek amacıyla

renk grafikleri olarak çizilmiştir (Şekil 37). Beton yollarda hedeflenen, aşınma kaybının minimum olmasıdır.



Şekil 37.Aşınma kaybı renk grafikleri

Grafikler incelendiğinde, aşınma direncini artıran, yani kütle kaybını düşüren, iki temel faktörün düşük su/bağlayıcı oranı ve yüksek uçucu kül miktarı olduğu görülmektedir. Su/bağlayıcı oranı- Uçucu Kül etkileşim grafiğinde, en düşük aşınma kaybı bölgesi (mavi renk, < 1,7 g), su/bağlayıcı oranının 0,30-0,34 aralığında ve uçucu kül miktarının %8-%10 aralığında olduğu sol üst köşede yoğunlaşmıştır. Su/bağlayıcı oranı 0,40'a yaklaştıkça ve uçucu kül miktarı azaldıkça, kütle kaybının 3,0 g üzerine çıktığı (kırmızı bölgeler) gözlemlenmektedir. Bu durum, yoğun ve sıkı bir mikro yapı oluşturan düşük su/bağlayıcı oranı ile puzolanik aktivite ve boşluk doldurma etkisi sağlayan yüksek uçucu kül oranının bir araya gelerek aşınmaya karşı üstün bir direnç oluşturduğunu göstermektedir. Nanomalzemelerin aşınma kaybı üzerindeki etkileri birbirinden farklılık göstermektedir. Nano Fe_2O_3'nin genel olarak aşınma direncine olumlu katkı sağladığı, özellikle düşük su/bağlayıcı oranıyla birlikte kullanıldığında kütle kaybını 1,7 g'ın altına düşürebildiği görülmektedir. Buna karşın, nano TiO_2'nin aşınma direncini olumsuz etkilediği gözlemlenmiştir. Özellikle Nano TiO_2- su/bağlayıcı oranı grafiğinde, en yüksek kütle kayıplarının (>3.2 g) yaşandığı kırmızı bölge, su/bağlayıcı oranından bağımsız olarak, nano TiO_2 miktarının %2,5'in üzerinde olduğu alanda yer almaktadır. Bu durum, yüksek orandaki nano TiO_2'nin matris içinde topaklanarak zayıf bölgeler oluşturabileceğini ve yüzeyden daha kolay kopmalara neden olabileceğini düşündürmektedir. Bazalt lif kullanımının, aşınma kaybı üzerinde tek başına baskın bir etkisi olmamakla birlikte, genel olarak performansı istikrarlı ve kabul edilebilir seviyelerde tuttuğu görülmektedir. Bazalt lif içeren grafiklerin büyük bir kısmının, aşırı yüksek veya düşük kayıpların olmadığı yeşil bölgede (~2.0-2.7 g) yer alması, liflerin yüzeyde kopmaları ve malzeme kaybını sınırlayan bir tür mikro donatı görevi gördüğüne işaret etmektedir. Sonuç olarak, aşınma direncini maksimize etmek için en etkili stratejinin; düşük su/bağlayıcı oranı (%0,30-0,34) ile yüksek oranda uçucu kül (%8-%10) kullanımını birleştirmek olduğu tespit edilmiştir. Nano Fe_2O_3 ve bazalt lif de aşınma direncine olumlu katkı sağlarken, yüksek oranlarda nano TiO_2 kullanımının performansı belirgin şekilde düşürdüğü ve bu nedenle kaçınılması gerektiği anlaşılmaktadır. Aşınma kaybı testlerinde temel hedef, beton yolların dingil yükleri altındaki yüzey bozulmasını minimize edecek malzeme kombinasyonlarını belirlemektir. Renk grafiklerinin ve deney sonuçlarının bütüncül analizi, en yüksek aşınma direncini (en düşük kütle kaybını) sağlayan temel faktörleri net bir şekilde ortaya koymuştur. Bu ana faktörlere ek olarak, bazalt lif kullanımının genel olarak istikrarlı ve iyi bir performans sağladığı, nano Fe_2O_3'nin ise özellikle düşük su/bağlayıcı oranlarıyla birlikte aşınma kaybını azaltıcı yönde olumlu bir katkı yaptığı gözlemlenmiştir. Buna karşın, incelenen parametreler arasında aşınma performansını en olumsuz etkileyen malzemenin nano TiO_2 olduğu anlaşılmaktadır. Yüksek oranlarda (%2,5 üzeri) nano TiO_2 kullanımı, diğer parametrelerin olumlu etkilerini dahi gölgeleyerek kütle kaybını belirgin bir şekilde artırmıştır.

Buradan, su/çimento oranı, uçucu kül, bazalt lif ve nano Fe_2O_3 miktarının kullanıldıkları tüm malzemelerle aşınmayı azalttığı, nano TiO_2'nin ise yeterince pozitif etki göstermediği sonucuna varılmaktadır.

Aşınma deneyi sonuçlarının analizi

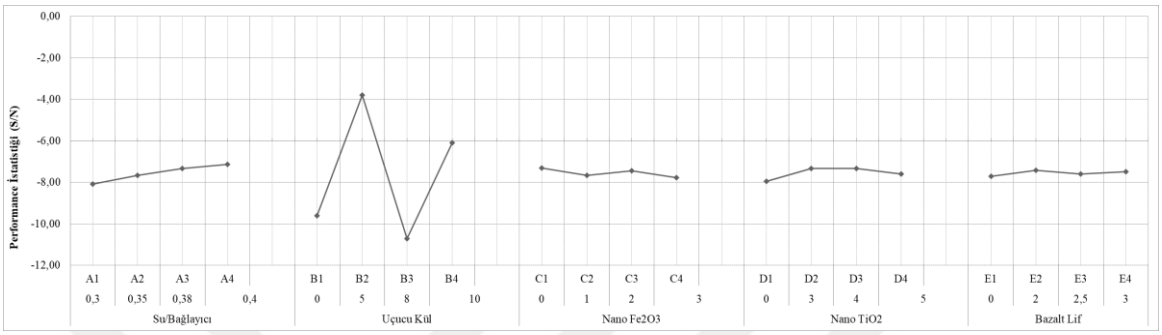
Taguchi L16 ortogonal dizinine göre elde edilen aşınma kaybı sonuçlarının istatistiksel analizi, S/N oranı ve ANOVA yöntemleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Aşınma kaybında hedeflenen performans daha küçük daha iyi karakteristiği olduğu için, S/N oranı hesaplamaları bu kritere göre yapılmıştır. Daha yüksek S/N oranı, daha düşük aşınma kaybı anlamına gelmektedir. Her bir deney grubu için hesaplanan S/N oranları Tablo 34'te, her bir kontrol parametresinin farklı seviyeleri için hesaplanan ortalama S/N oranları ise Tablo 35'te, ana etkiler grafiği ise Şekil 38'de sunulmuştur.

Tablo 34. Aşınma Kayıpları Sinyal Gürültü Oranları

Grup No	Aşınma Miktarı (g)	S/N
1	3,22	-10,16
2	1,72	-4,71
3	2,10	-6,44
4	3,54	-10,98
5	3,0	-9,74
6	1,65	-4,35
7	1,91	-5,62
8	3,62	-11,17
9	2,88	-9,19
10	1,44	-3,17
11	2,09	-6,4
12	3,36	-10,53
13	2,99	-9,51
14	1,41	-2,98
15	1,97	-5,89
16	3,22	-10,16
Ortalama S/N		-7,56

Tablo 35. Ortalama Sinyal Gürültü Oranları

Ortalama S/N Değerleri					
Seviye	**Su/Bağlayıcı**	**Uçucu Kül**	**Nano Fe_2O_3**	**Nano TiO_2**	**Bazalt Lif**
1	-8,073	-9,600	-7,320	-7,950	-7,709
2	-7,672	-3,803	-7,667	-7,322	-7,419
3	-7,321	-10,710	-7,448	-7,328	-7,597
4	-7,136	-6,089	-7,767	-7,602	-7,477



Şekil 38. Aşınma kayıpları S/N oranları için ana etkiler grafiği.

S/N oranı analizine göre, aşınma kaybını minimize eden (aşınma direncini maksimize eden) ve doğrulama deneyleri için seçilen optimum karışım; 1. Seviye Su/Bağlayıcı oranı (0,30), 3. Seviye Uçucu Kül (%8), 4. Seviye Nano Fe_2O_3 (%3), 1. Seviye Nano TiO_2 (%0) ve 1. Seviye Bazalt Lif (0 kg/m³) kombinasyonundan oluşmaktadır. ANOVA ile parametrelerin etki oranları hesaplanmadan önce, öncül analizlerde etki düzeyi en düşük olduğu saptanan bazalt lif parametresi, modelin hassasiyetini artırmak amacıyla hata terimi ile birleştirilerek havuzlama yapılmıştır. Bu işlem sonrasında, kalan parametrelerin aşınma kaybı üzerindeki göreceli etkilerini belirlemek amacıyla hesaplanan etki oranları Tablo 36'da sunulmuştur.

Tablo 36. Parametrelerin Aşınma Dayanımına Etki Oranları

Kaynak (Faktör)	**Kareler Toplamı**	**Etki Oranı (%)**
Nano Fe_2O_3 (%)	0,2581	37,16%
Su/Bağlayıcı Oranı	0,216	31,10%
Uçucu Kül (%)	0,1862	26,81%
Nano TiO_2 (%)	0,0304	4,38%
Hata	0,0039	0,56%
Toplam	**0,6946**	**100,00%**

Analiz sonuçları, aşınma direncini üç ana faktörün yüksek oranlarda etki ettiğini göstermektedir: Nano Fe_2O_3 (%37,16), Su/Bağlayıcı Oranı (%31,10) ve Uçucu Kül (%26,81). Bu üç parametre, toplam etkinin %95'ini oluşturarak aşınma performansı üzerindeki en

belirleyici faktörler olarak öne çıkmaktadır. En yüksek etki oranına sahip olan Nano Fe_2O_3, nano boyuttaki taneleriyle çimento hamurunun mikro yapısını sıkılaştırarak ve yüzey sertliğini artırarak aşınma direncine en büyük katkıyı sağlamaktadır. Benzer şekilde, betonun yüzey kalitesini ve yoğunluğunu doğrudan etkileyen su/bağlayıcı oranı da %31,10 ile ikinci en önemli faktördür. Uçucu kül ise puzolanik reaksiyon ile zamanla daha dayanıklı bir bağlayıcı jeli oluşturarak, %26,81'lik bir etkiyle aşınma performansını önemli ölçüde iyileştirmektedir. Nano TiO_2'nin etkisi ise (%4,38) diğerlerine kıyasla daha sınırlı kalmıştır. Modeldeki hata payının %0,56 gibi oldukça düşük bir seviyede olması, deney sonuçlarındaki değişkenliğin neredeyse tamamının seçilen bu dört parametre tarafından başarıyla açıklandığını göstermektedir. Bu durum, kurulan deneysel modelin aşınma kaybı davranışı için yüksek derecede güvenilir ve açıklayıcı olduğunu kanıtlamaktadır. Parametrelerin etki oranlarının yanı sıra, bu etkilerin istatistiksel olarak tesadüfi olup olmadığını test etmek ve anlamlılığını doğrulamak amacıyla yapılan ANOVA sonuçları Tablo 37'de sunulmuştur.

Tablo 37. Varyans Analizi Sonuçları

Varyans Analizi					
Kaynak	**Kareler Toplamı**	**Serbestlik Derecesi (SD)**	**Kareler Ortalaması**	**F-Değeri**	**p-Değeri**
Su/Bağlayıcı Oranı	0,216	3	0,072	55,36	0,004
Uçucu Kül (%)	0,1862	3	0,0621	47,72	0,005
Nano Fe2O3 (%)	0,2581	3	0,086	66,13	0,0031
Nano TiO2 (%)	0,0304	3	0,0101	7,79	0,0629
Hata	0,0039	3	0,0013		
Düzeltilmiş Toplam	0,6946	15			

Tablodaki P-değerleri incelendiğinde, Nano Fe_2O_3 (P=0,0031), Su/Bağlayıcı Oranı (P=0,004) ve Uçucu Kül (P=0,005) parametrelerinin P-değerlerinin 0,05 referans değerinden çok daha küçük olduğu görülmektedir. Bu bulgu, bu üç parametrenin her birinin aşınma kaybı üzerindeki etkisinin istatistiksel olarak oldukça anlamlı olduğunu ve tesadüfi bir sonuç olmadığını kanıtlamaktadır. Buna karşın, Nano TiO_2 parametresinin P-değeri 0,0629 olarak hesaplanmıştır. Bu değer 0,05'ten büyük olduğu için, nano TiO_2'nin bu modeldeki aşınma kaybı üzerindeki etkisinin istatistiksel olarak anlamlı olmadığı sonucuna varılır. Bu durum, etki oranı analizinde %4,38 gibi düşük bir katkı payına sahip olmasıyla da tutarlıdır. Parametrelerin etki büyüklüklerini gösteren F-değerleri, anlamlı bulunan faktörlerin önem sırasını teyit etmektedir.

En yüksek F-değerine sahip olan Nano Fe_2O_3 (F=66,13), aşınma direncini en güçlü şekilde etkileyen faktör olarak öne çıkmaktadır. Bunu sırasıyla Su/Bağlayıcı Oranı (F=55,36) ve Uçucu Kül (F=47,72) takip etmektedir. Bu yüksek F-değerleri, bu üç parametrenin yarattığı etkinin, deneydeki rastgele gürültüye kıyasla çok baskın ve güvenilir olduğunu göstermektedir. Oluşturulan istatistiksel modelin genel uygunluğunu ve tahmin gücünü test etmek amacıyla uyum istatistikleri incelenmiştir. Bu istatistikler Tablo 38'de özetlenmektedir.

Tablo 38. Uyum İstatistikleri

Uyum İstatistikleri			
Kaynak	**Serbestlik Derecesi**	**Kareler Toplamı**	**F Değeri**
Standart Sapma	0,0361	R^2	0,9944
Ortalama	0,2542	Düzeltilmiş R^2	0,9719
Varyasyon Katsayısı (%)	14,19	Tahmin Edilmiş R^2	0,8402
		Yeterli Hassasiyet	15,6369

Modelin R-kare (R^2) değeri 0,9944 olarak hesaplanmıştır; bu, aşınma kaybı sonuçlarındaki toplam değişkenliğin %99,4'ünün modeldeki anlamlı faktörler tarafından başarıyla açıklandığını göstermektedir. Benzer şekilde, Düzeltilmiş R-kare değerinin de 0,9719 gibi çok yüksek bir seviyede olması, modelin açıklayıcılık gücünün mükemmel olduğunu teyit etmektedir. Modelin güvenilirliğini gösteren önemli bir gösterge olan Düzeltilmiş R^2 (0,9719) ile modelin yeni verileri tahmin etme yeteneğini gösteren Tahmin Edilmiş R^2 (0,8402) değerleri makul bir uyum içindedir. Aralarındaki farkın 0,2'den küçük olması, modelin aşırı uyumlu olmadığını ve yeni karışımların aşınma performansını tahmin etme konusunda da güvenilir olduğunu göstermektedir. Son olarak, modelin sinyal-gürültü oranını ölçen Yeterli Hassasiyet değerinin 4'ten büyük olması arzu edilirken, bu model için 15,63 gibi yüksek bir değer elde edilmiştir. Bu sonuç, modelin ayırt etme gücünün yüksek olduğunu ve tasarım uzayında gezinmek, yani farklı parametre kombinasyonları için güvenilir tahminler yapmak amacıyla kullanılabileceğini kanıtlamaktadır.

İkinci Aşama Doğrulama Numuneleri Deneyleri

Deneysel çalışmanın ikinci aşaması, ilk aşamadaki istatistiksel analizler sonucunda belirlenen teorik optimum karışımların deneysel olarak doğrulanmasına ve birbirleriyle karşılaştırılmasına ayrılmıştır. Önceki bölümde yapılan S/N oranı analizleri her bir performans hedefi (basınç, eğilme, aşınma) için farklı bir optimum parametre kombinasyonu ortaya koymuştur. Bu doğrultuda, her bir hedefi en iyi duruma getiren üç farklı referans karışım (Basınç Dayanımı Optimizasyonu (BDO), Eğilme Dayanımı Optimizasyonu (EDO), Aşınma Direnci Optimizasyonu (ADO)), doğrulama deneyleri için yeniden üretilmiştir. Doğrulama

deneylerinde kullanılan malzemelerin seviyeleri tablo 39'da verilmiştir. Ayrıca bu üç referans karışımın 1 m³'teki üretim dozajları Tablo 40'ta detaylı olarak verilmiştir.

Tablo 39. Doğrulama Deneylerinde Kullanılan Malzeme Seviyeleri

Optimizasyon	Su/Bağlayıcı (kg)	Uçucu Kül (kg)	Nano Fe_2O_3 (kg)	Nano TiO_2 (kg)	Bazalt Fiber (kg/m^3)
BDO	0,35 (2. Seviye)	0 (1.Seviye)	0 (3. Seviye)	5 (4. Seviye)	3 (4. Seviye)
EDO	0,38 (3. Seviye)	5 (2. Seviye)	2 (3. Seviye)	0 (1. Seviye)	2 (2. Seviye)
ADO	0,3 (1. Seviye)	8 (3.Seviye)	3 (4. Seviye)	0 (1. Seviye)	0 (1. Seviye)

Tablo 40. Doğrulama Deneylerinde Kullanılan Malzemelerin Dozajları

Optimizasyon	Çimento (kg)	Uçucu Kül (kg)	Nano Fe_2O_3 (kg)	Nano TiO_2 (kg)	Su (kg)	Bazalt Lif (kg)
BDO	332,5	0	0	17,5	116,4	3
EDO	325,5	17,5	7	0	123,7	2
ADO	311,5	28	10,5	0	93,5	0

Her üç karışımdan üçer adet numuneler üretilmiş, 28 günlük kür sürecinin ardından tüm numuneler hem basınç hem eğilme hem de aşınma testlerine tabi tutulmuştur. Bu yaklaşımın amacı, tek bir özellikte en iyi olan bir karışımın diğer özelliklerde nasıl bir performans sergilediğini görmek ve böylece tüm hedefler açısından en ideal ve dengeli performansı sunan nihai karışımı belirlemektir.

Doğrulama numunesi basınç dayanım deneyi analizi

Doğrulama deneyleri kapsamında, her bir performans hedefi (basınç, eğilme ve aşınma) için teorik olarak belirlenen üç farklı optimum karışım üretilmiş ve basınç dayanımı testine tabi tutulmuştur. Her bir optimizasyon hedefi için elde edilen ortalama basınç dayanımı sonuçları Tablo 41'de sunulmuştur.

Tablo 41. Doğrulama Numuneleri Basınç Dayanımları

	Basınç Dayanımı (MPa)			
Optimizasyon	**1. Numune**	**2. Numune**	**3. Numune**	**Ortalama**
BDO	60,69	58,45	64,47	61,20
EDO	48,77	37,33	51,54	45,88
ADO	33,81	43,32	29,25	35,46

Ortaya çıkan sonuçlar, ilk aşamada yapılan Taguchi S/N analiziyle belirlenen teorik optimum karışımın, deneysel olarak da en iyi performansı sergilediğini başarılı bir şekilde

doğrulamaktadır. Doğrudan basınç dayanımı için optimize edilen karışım (BDO), ortalama 61,20 MPa ile en yüksek performansı göstermiştir. Buna karşın, eğilme dayanımı için optimize edilen karışım (EDO) 45,88 MPa ve aşınma direnci için optimize edilen karışım (ADO) ise 35,46 MPa ile daha düşük dayanım değerleri vermiştir.

Bu bulgu, S/N oranı analizinin, basınç dayanımını maksimize eden parametre seviyelerini doğru bir şekilde öngördüğünü kanıtlamaktadır. Bu deneysel sonucun istatistiksel modelle uyumu, Tablo 42'deki performans değerleriyle de teyit edilmiştir.

Tablo 42. Doğrulama Numunelerinin Basınç Dayanımı Performans Değerleri

Parametreler	**Seviye**	**S/N'e Olan Katkısı**
Su/Çimento	S2	0,438
Uçucu Kül	S1	0,000
Nano Fe_2O_3	S3	0,460
Nano TiO_2	S4	0,465
Bazalt Lif	S4	0,597
Tüm Faktörlerin Katkısı (S/N)		1,960
Ortalama Performans İstatistiği (S/N)		35,169
Optimum Şartlarda Beklenen Değer (MPa)		37,29
Doğrulama Deneyi Sonucu (S/N) /(MPa)		36,31 / 61,2
Güven Aralığı (S/N)		34,35- 38,2

Performans değerleri tablosu ilk aşamadaki analizlere dayalı olarak modelin öngördüğü teorik optimum performans ile doğrulama deneylerinde elde edilen en iyi pratik performansı karşılaştırarak, modelin genel geçerliliğini test etmektedir. Bu karşılaştırma için, doğrulama deneyleri sonucunda en yüksek performansı gösteren karışımın deneysel sonucu referans alınır. Tablo 42'de gösterildiği gibi, en yüksek basınç dayanımını (61,20 MPa) BDO karışımı verdiği için, bu karışımın S/N oranı olan 36,31 doğrulama sonucu olarak kullanılmıştır. Taguchi modeli, optimum şartlarda beklenen S/N oranını 37,29 olarak öngörmüştü. Deneysel olarak elde edilen 36,31'lik S/N oranının, model tarafından %95 güven düzeyinde hesaplanan 34,35-38,2 aralığındaki Güven Aralığı'nın içinde kalması, bu öngörünün başarıyla doğrulandığını göstermektedir. Bu durum, ilk aşamadaki analizlerin tutarlı olduğunu ve BDO karışımının elde ettiği üstün performansın istatistiksel olarak geçerli bir bulgu olduğunu teyit etmektedir.

Doğrulama numunesi eğilme dayanım deneyi analizi

Doğrulama deneyleri kapsamında, her bir performans hedefi (basınç, eğilme ve aşınma) için teorik olarak belirlenen üç farklı optimum karışım üretilmiş ve eğilme dayanımı testine tabi tutulmuştur. Her bir optimizasyon hedefi için elde edilen ortalama eğilme dayanımı sonuçları Tablo 43'te sunulmuştur.

Tablo 43. Doğrulama Numuneleri Eğilme Dayanımları

	Eğilme Dayanımı (MPa)			
Optimizasyon	**1. Numune**	**2. Numune**	**3. Numune**	**Ortalama**
BDO	8,58	8,92	8,81	8,58
EDO	10,58	10,78	10,59	10,58
ADO	8,07	8,77	8,38	8,07

Sonuçlar, eğilme dayanımı için yapılan Taguchi optimizasyonunun başarısını ortaya koymaktadır. Eğilme Dayanımı Optimizasyonu ile tasarlanan EDO karışımı, ortalama 10,58 MPa değeriyle en yüksek performansı sergilemiştir. EDO karışımının performansı, diğer optimizasyon hedeflerine sahip karışımlarla kıyaslandığında üstünlüğü daha da belirgin hale gelmektedir. EDO'nun eğilme dayanımı, basınç dayanımı için optimize edilen BDO karışımından yaklaşık %23, aşınma direnci için optimize edilen ADO karışımından ise yaklaşık %31 daha yüksektir. BDO (8,58 MPa) ve ADO (8,07 MPa) karışımları da dikkate değer eğilme dayanımları göstermiş olsalar da EDO karışımının ulaştığı seviyenin gerisinde kalmışlardır. Bu durum, eğilme dayanımını kontrol eden parametre etkileşimlerinin, basınç ve aşınma performansını kontrol edenlerden farklı olduğunu ve ilk aşamadaki S/N analizinin bu farkı doğru bir şekilde tespit ettiğini kanıtlamaktadır. Dolayısıyla, eğilme dayanımı açısından en üstün ve güvenilir karışımın EDO olduğu deneysel olarak teyit edilmiştir. Bu deneysel sonucun, istatistiksel modelin öngörüleriyle ne kadar uyumlu olduğu Tablo 44'teki performans değerleriyle doğrulanmıştır.

Tablo 44. Doğrulama Numunelerinin Eğilme Dayanımı Performans Değerleri

Parametreler	Seviye	S/N'e Olan Katkısı
Su/Çimento	S3	0,091
Uçucu Kül	S2	0,142
Nano Fe_2O_3	S3	2,512
Nano TiO_2	S1	0,000
Bazalt Lif	S2	0,085
Tüm Faktörlerin Katkısı (S/N)		1,12
Ortalama Performans İstatistiği (S/N)		18,91
Optimum Şartlarda Beklenen Değer (Mpa)		11,293
Doğrulama Deneyi Sonucu (S/N) /(Mpa)		20,49/10,58
Güven Aralığı (S/N)		20,3-21,75

Bu analizde, en iyi sonucu veren EDO karışımının deneysel S/N oranı 20,49 olarak hesaplanmıştır. Taguchi modelinin %95 güven düzeyinde öngördüğü Güven Aralığı ise 20,3-21,75'tir. En önemli bulgu, deneysel olarak elde edilen 20,49'lik S/N oranının, modelin öngördüğü bu güven aralığının içinde kalmasıdır. Bu başarılı doğrulama, ilk aşamadaki S/N analizinin eğilme dayanımını maksimize eden parametre seviyelerini doğru bir şekilde belirlediğini kanıtlamaktadır. Sonuç olarak hem deneysel hem de istatistiksel olarak eğilme dayanımı performansı açısından en ideal karışımın EDO olduğu teyit edilmiştir.

Doğrulama numunesi aşınma (böhme) dayanım deneyi analizi

Doğrulama deneylerinin bu aşamasında, her bir optimum karışımın (BDO, EDO, ADO) aşınma performansı, böhme aşındırma cihazı kullanılarak test edilmiştir. Numunelerin deney öncesi ve sonrası ağırlıkları Tablo 45'te, bu verilerden hesaplanan kütle ve hacim kayıpları ise Tablo 46'da karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Bu testte hedeflenen, en düşük kütle ve hacim kaybına ulaşmaktır.

Tablo 45. Aşınma Deney Öncesi Sonrası Ağırlık Değerleri

Optimizasyon	Deney Öncesi (g)			Deney Sonrası (g)		
	1. Numune	2. Numune	3. Numune	1. Numune	2. Numune	3. Numune
BDO	2435,57	2342,27	2392,71	2429,09	2337,38	2387,1
EDO	2278,43	2188,92	2060,35	2273,25	2184,75	2055,74
ADO	2213,12	2126,82	2148,1	2209,7	2122,83	2144,97

Tablo 46. Aşınma Kayıpları

Optimizasyon	Fark (g)			Ortalama Kütle Kaybı (g)	Hacim Kaybı (cm^3)
	1. Numune	2. Numune	3. Numune		
BDO	6,48	4,89	5,61	5,66	0,81
EDO	5,18	4,17	4,61	4,65	0,73
ADO	3,42	3,99	3,13	3,51	0,56

Aşınma kaybı sonuçları, aşınma direnci için yapılan Taguchi optimizasyonunun son derece başarılı olduğunu göstermektedir. Aşınma Direnci Optimizasyonu ile tasarlanan ADO karışımı, ortalama 3,51 g kütle kaybı ve 0,56 cm^3 hacim kaybı ile en iyi performansı sergilemiştir. ADO karışımının üstünlüğü, diğer karışımlarla kıyaslandığında daha da belirginleşmektedir. Basınç dayanımı için optimize edilen BDO karışımı, ADO'ya kıyasla yaklaşık %61 daha fazla kütle kaybına uğramıştır (5,66 g). Eğilme dayanımı için optimize edilen EDO karışımı ise ADO'ya göre yaklaşık %33 daha fazla kütle kaybı göstermiştir (4,65 g). Bu sonuçlar, aşınma direncini kontrol eden parametrelerin, ilk aşamadaki S/N analiziyle doğru bir şekilde belirlendiğini kanıtlamaktadır. ADO karışımını oluşturan parametre seviyelerinin, yüzeyde daha yoğun, sert ve dayanıklı bir matris yapısı oluşturduğu anlaşılmaktadır. Dolayısıyla, beton yol yüzeyinin uzun ömürlülüğü için kritik bir özellik olan aşınma direncini en üst düzeye çıkaran karışımın ADO olduğu deneysel olarak teyit edilmiştir. Aşınma kaybı analizinin son adımı olarak, Taguchi modelinin geçerliliğini test etmek amacıyla bir doğrulama analizi gerçekleştirilmiştir. Bu analizle, en iyi performansı gösteren ADO karışımının deneysel sonucunun, modelin istatistiksel olarak öngördüğü güven aralığına düşüp düşmediğini kontrol edilmiştir. Analiz sonuçları Tablo 47'de sunulmuştur.

Tablo 47. Doğrulama Numunelerinin Aşınma Kaybı Performans Değerleri

Parametreler	Seviye	S/N'e Olan Katkısı
Su/Çimento	2	**0,52**
Uçucu Kül	4	**3,16**
Nano Fe_2O_3	2	**0,22**
Nano TiO_2	1	**0,40**
Bazalt Lif	2	**0,00**
Tüm Faktörlerin Katkısı (S/N)		4,3
Ortalama Performans İstatistiği (S/N)		-7,92
Optimum Şartlarda Beklenen Değer (g)		-10,48
Doğrulama Deneyi Sonucu (S/N)/(g)		-10,91/3,51
Güven Aralığı (S/N)		-10,99/-9,97

Bu analizde, Tablo 46'da en düşük aşınma kaybını (3,51 g) göstererek en iyi performansı sergileyen ADO karışımının deneysel S/N oranı referans alınmıştır. Bu karışım için hesaplanan S/N oranı -10,91'dir. Taguchi modeli ise, bu deney için %95 güven düzeyinde bir performans aralığı öngörmüştür. Tablo 50'de belirtilen bu Güven Aralığı, -10,99 ile -9,97 arasındadır. Analizin en önemli bulgusu, deneysel olarak elde edilen -10,91'lik S/N oranının, modelin öngördüğü bu güven aralığının içinde kalmasıdır. Bu başarılı doğrulama, ilk aşamadaki deney tasarımının ve aşınma kaybı için yapılan istatistiksel analizin tutarlı ve güvenilir olduğunu kanıtlamaktadır. Ayrıca, ADO karışımının elde ettiği üstün aşınma direnci performansının tesadüfi bir sonuç olmadığını, seçilen parametrelerin kontrolüyle elde edilen istatistiksel olarak geçerli bir bulgu olduğunu teyit etmektedir.

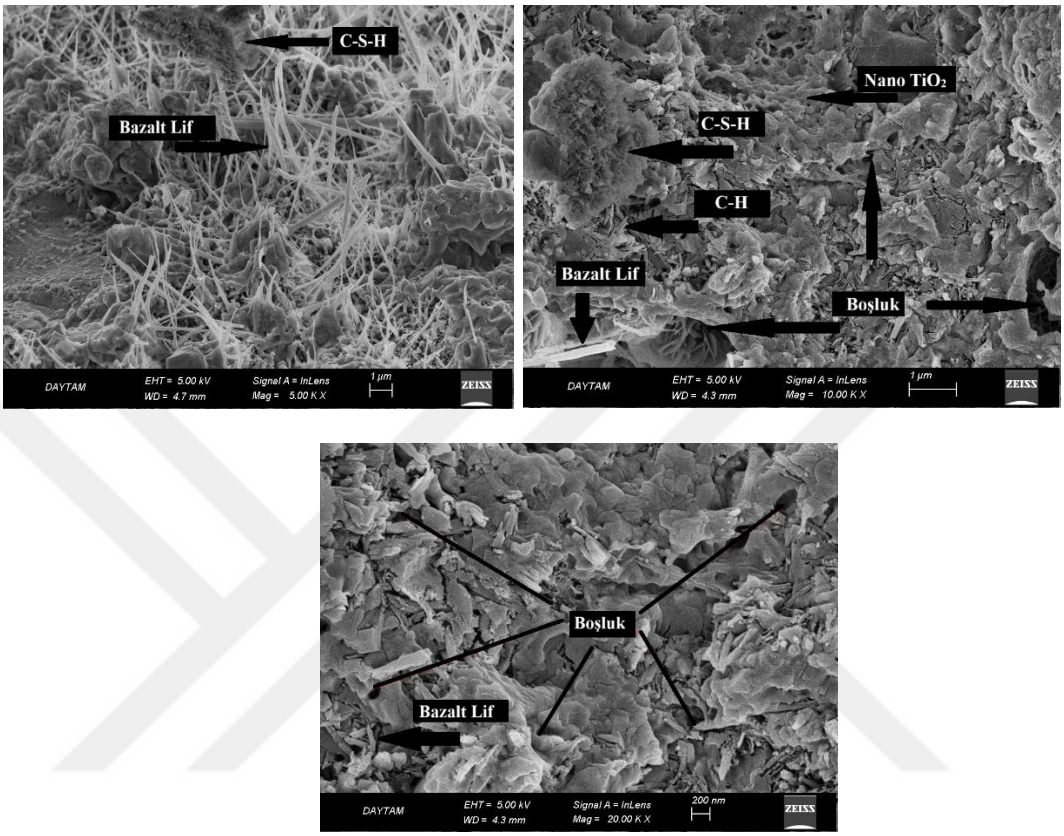
Doğrulama Numuneleri SEM-BET Analizleri

Deneysel çalışmanın bu son bölümünde, doğrulama deneyleri sonucunda her bir performans kategorisinde en üstün sonuçları veren karışımların mikro yapısal özellikleri incelenmiştir. Amaç, bu karışımların makroskopik düzeydeki üstün performanslarının, mikroskobik düzeydeki nedenlerini ortaya koymaktır. Önceki bölümde yapılan doğrulama deneyleri sonucunda: basınç dayanımında en yüksek performansı BDO karışımı, eğilme dayanımında en yüksek performansı EDO karışımı, aşınma direncinde ise en yüksek performansı ADO karışımı göstermişti. Bu doğrultuda, her bir hedefin en iyi temsilcisi olan bu üç farklı optimum karışımdan alınan numuneler üzerinde SEM, EDX ve BET analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu karşılaştırmalı mikro yapısal analizin amacı, her bir karışımın kendi alanında neden üstün performans sergilediğini, malzemelerin içyapısını, boşluk dağılımını ve elementel bileşimini inceleyerek bilimsel olarak açıklamaktır.

SEM-EDX analiz sonuçları

Doğrulama numunelerinin mikro yapısal özelliklerini ve elementel bileşimlerini incelemek amacıyla, SEM ve EDX analizleri gerçekleştirilmiştir. Numunelerin içyapı morfolojileri, 5k, 10k ve 20k olmak üzere üç farklı büyütme oranında incelenerek, yüksek çözünürlüklü görüntüler elde edilmiştir. Tüm numunelerde yapılan genel incelemeler, beklenen çimento hidratasyon ürünlerinin oluştuğunu göstermiştir. Görüntülerde, betonun dayanımından birincil derecede sorumlu olan, amorf ve ağ benzeri bir yapıya sahip Kalsiyum-Silikat-Hidrat (C-S-H) jelleri ile daha kristal ve keskin plaka görünümlü Kalsiyum Hidroksit (CH) fazları net bir şekilde ayırt edilmiştir. Farklı karışım tasarımlarına sahip olan BDO, EDO ve ADO numuneleri arasındaki temel farklar ise, bu ana fazların (C-S-H ve CH) yoğunluğu, dağılımı, morfolojisi ve lif-matris arayüzeyindeki aderans kalitesinde ortaya çıkmaktadır. Basınç

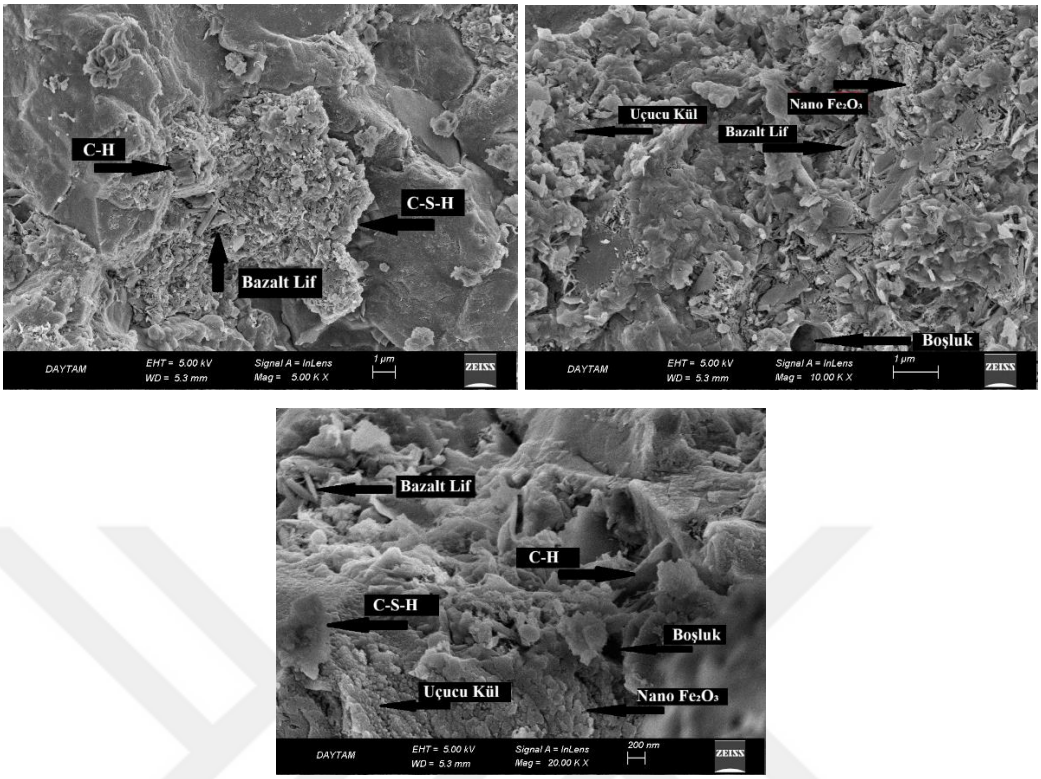
dayanımı doğrulama deneylerinde en yüksek performansı (61,20 MPa) gösteren BDO karışımının mikro yapısal özellikleri, bu üstün performansın ardındaki nedenleri anlamak amacıyla farklı büyütme oranlarında incelenmiştir (Şekil 39).



Şekil 39. BDO optimum karışımı SEM görüntüsü

Karışımın başarısı, optimize edilmiş üç temel unsurun birleşiminden kaynaklanmaktadır: bazalt lif takviyesi (3 kg/m³), nanomalzemelerin varlığı ve düşük su/bağlayıcı oranı (0,35). SEM görüntüleri, bu bileşenlerin yarattığı etkileşimi ortaya koymaktadır. 5k ve 20k gibi farklı büyütmelerde yapılan incelemeler, nanomalzemelerin ve düşük su/bağlayıcı oranının bir sonucu olarak oldukça yoğun, sıkı ve kompakt bir C-S-H jel yapısının oluştuğunu doğrulamaktadır. Bu yoğun matris, betonun içsel dayanımının temelini oluşturur. Ancak bu karışımın üstün basınç dayanımındaki asıl kilit rolü, bazalt lifler oynamaktadır. Lifler, bir mikro donatı ağı oluşturarak, yük altında matriste oluşabilecek mikro çatlakların başlamasını ve ilerlemesini engeller. 10k büyütmedeki görüntüde görülen lokal mikro boşluklar gibi potansiyel zayıflık noktaları, liflerin bu çatlak köprüleme mekanizması sayesinde kritik bir hasara dönüşmeden kontrol altında tutulur. Lifler, enerjiyi sönümleyerek ve gerilmeleri daha geniş bir alana yayarak malzemenin genel tokluğunu ve nihai yük taşıma kapasitesini önemli ölçüde artırır. Sonuç olarak, BDO karışımının 61,20 MPa gibi yüksek bir basınca ulaşmasının nedeni, sadece nanomalzemelerin oluşturduğu yoğun C-S-H matrisi değil,

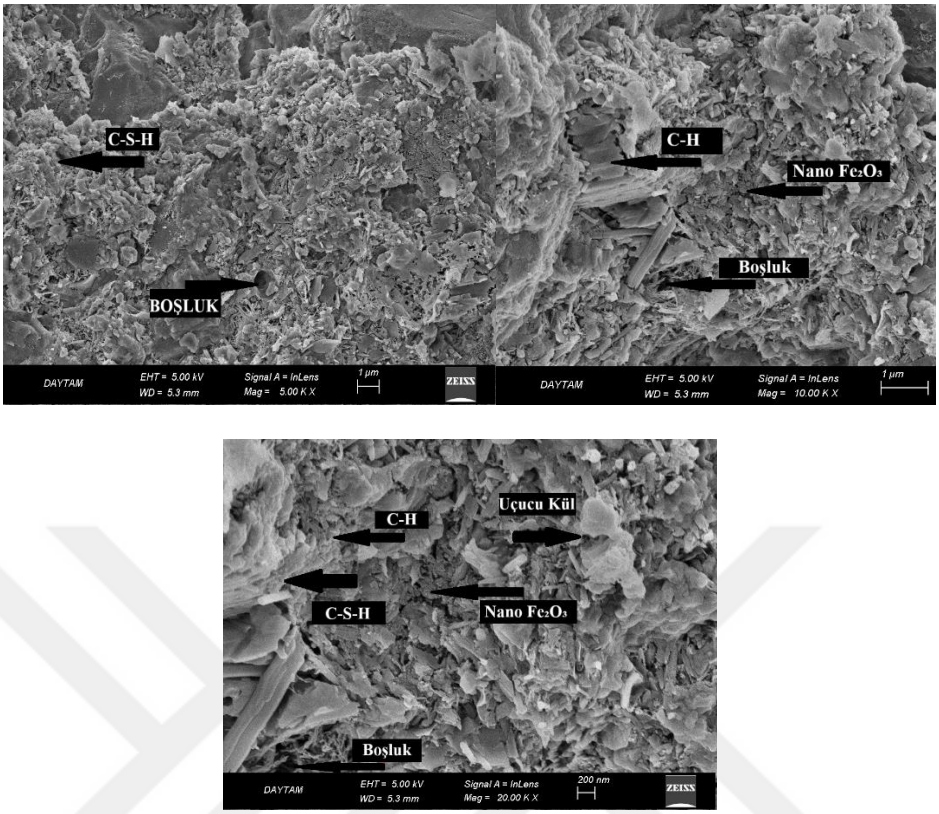
aynı zamanda bu matrisin içine gömülü olan bazalt lif ağının, çatlak gelişimini etkin bir şekilde engelleyerek yapısal bütünlüğü korumasıdır.



Şekil 40. EDO optimum karışımı SEM görüntüsü

Şekil 40' daki görüntülerde eğilme dayanımında en yüksek performansı sergileyen EDO karışımının mikro yapısal özellikleri, bu üstünlüğün nedenlerini açıklamak amacıyla incelenmiştir. Bu karışımın başarısı, özellikle bazalt lif ile hidratasyon ürünleri arasında oluşan özel bir morfolojiden kaynaklanmaktadır. 5k büyütmedeki görüntü, EDO karışımının en belirgin ve karakteristik özelliğini ortaya koymaktadır: matrisin, yoğun C-S-H jeli ile, belirgin bir şekilde iğnemsi ve birbiri içine geçmiş kristal bir ağ yapısından oluşması. Bu görüntüde, Bazalt Lifin bu ince kristal ağ yapısı tarafından tamamen sarıldığı ve matrisle bütünleştiği net bir şekilde görülmektedir. Bu tür birbiri içine kilitlenmiş bir yapı, yoğun olmasa bile, çekme gerilmeleri altında oluşan mikro çatlakların ilerlemesini engellemede ve enerjiyi sönümlemede son derece etkilidir. Bu durum, EDO karışımının neden üstün eğilme dayanımına sahip olduğunu açıklamaktadır. Daha yüksek büyütmelerdeki 10k ve20k görüntüler, bu karışımın diğer özelliklerini aydınlatmaktadır. Görüntülerde, dağılmış halde Nano Fe_2O_3 partikülleri ve liflerin yanı sıra, BDO karışımına kıyasla daha belirgin boşlukların varlığı da dikkat çekmektedir. Bu gözenekli yapı, EDO karışımında kullanılan daha yüksek su/bağlayıcı oranının (0,38) bir sonucudur. Bu durum, EDO karışımının basınç dayanımının ve aşınma direncinin neden BDO ve ADO karışımlarından daha düşük olduğunu açıklamaktadır. Sonuç olarak, EDO karışımının başarısı, yoğunluktan ziyade morfolojik kenetlenmeye dayanmaktadır. Yüksek

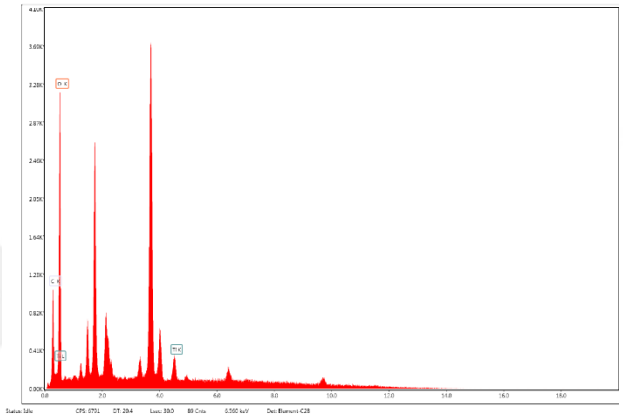
eğilme performansı, bazalt liflerin, matris içinde oluşan iğnemsi kristal ağ ile çalışarak oluşturduğu kompozit ve çatlak köprüleme mekanizması sayesinde elde edilmiştir.



Şekil 41. ADO optimum karışımı SEM görüntüsü

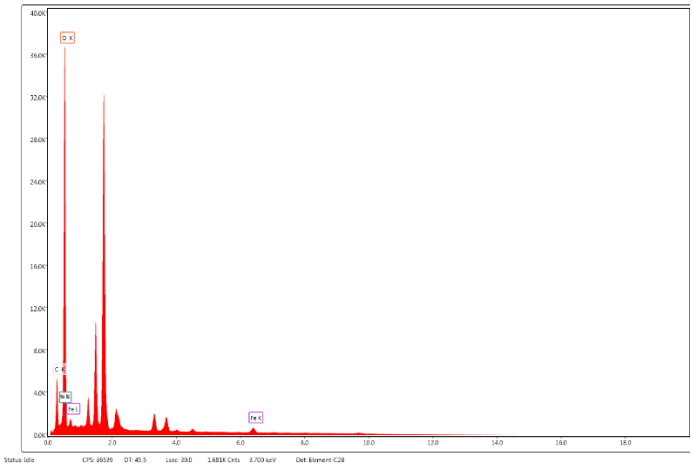
Aşınma direncinde en üstün performansı sergileyen ADO karışımının mikro yapısal özellikleri, bu başarısının nedenlerini ortaya koymak amacıyla incelenmiştir (Şekil 41). Bu karışımın performansı, onu oluşturan üç temel faktörün birleşimi ile açıklanabilir: çok düşük su/bağlayıcı oranı (0,30), yüksek oranda uçucu kül (%8) ve yüksek oranda nano Fe_2O_3 (%3). Farklı büyütmelerde (5k, 10k, 20k) çekilen SEM görüntüleri, bu karışımın en belirgin özelliğini istisnasız bir şekilde ortaya koymaktadır: yoğun, sıkı ve homojen bir çimento hamuru yapısı. 20k gibi yüksek bir büyütmede dahi, matrisin çok az boşluk içeren, kompakt bir C-S-H jeli ve nano Fe_2O_3 partiküllerinden oluştuğu görülmektedir. Bu yoğun yapı, düşük su/bağlayıcı oranının sağladığı az boşluklu temel üzerine, nano Fe_2O_3'nin nano-doldurucu etkisi ve uçucu külün puzolanik reaksiyonunun eklenmesiyle elde edilmiştir. Aşınma direnci, öncelikli olarak malzemenin yüzey sertliği ve yoğunluğuna bağlı bir özelliktir. ADO numunesinin sahip olduğu bu son derece yoğun ve homojen yüzey yapısı, aşınma kuvvetlerine karşı malzemenin parçacık kaybetmesini zorlaştırır. Bu durum, ADO karışımının Böhme aşınma testinde neden en iyi sonucu verdiğini bilimsel olarak açıklamaktadır. Ancak, bu karışımın basınç (35,46 MPa) ve eğilme (8,07 MPa) dayanımlarının neden diğer karışımlardan daha düşük olduğu sorusunun cevabı da yine mikro yapıda ve bileşimde yatmaktadır. ADO karışımı, BDO ve EDO'dan farklı

olarak hiç bazalt lif içermemektedir. Yüzey ne kadar sert ve yoğun olursa olsun, lif takviyesinin yokluğu, malzemenin genel olarak daha kırılgan olmasına neden olur. Yük altında oluşan mikro çatlakları köprüleyecek ve ilerlemesini engelleyecek bir lif ağı olmadığından, malzemenin nihai yük taşıma kapasitesi daha düşük kalmıştır. Sonuç olarak, ADO karışımının başarısı, çok yoğun bir yüzey pastası oluşturmaya odaklı tasarımından kaynaklanmaktadır. Bu, ona aşınma direncini kazandırırken, lif takviyesinin olmaması nedeniyle genel mekanik dayanımından ödün vermesine yol açmıştır. Benzer sonuçlar diğer araştırmacılar tarafından da tespit edilmiştir (Adak ve diğerleri 2014; Deb ve diğerleri 2015; Ramachandran ve Beaudoin 2000). Yapılan analizler sonucunda ortaya çıkan bulgular bu araştırmacıları destekler nitelikte ortaya çıkmıştır.



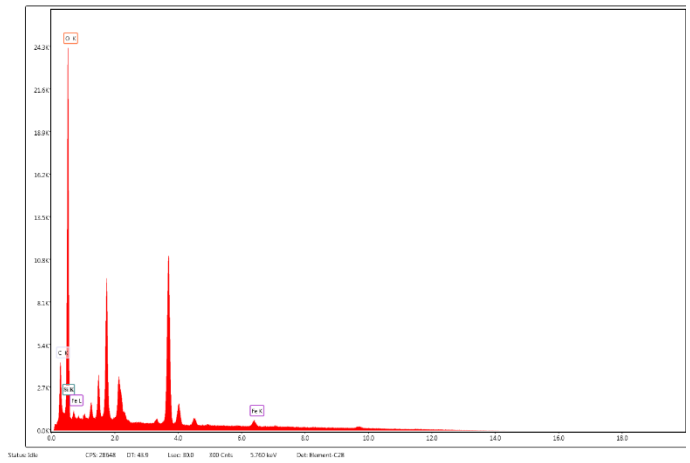
Şekil 42. BDO doğrulama numunesine ait EDX grafiği

EDX grafiği SEM görüntüsündeki elektron demetinin odaklandığı çok küçük bir noktanın elementel bileşimini, yani hangi elementlerin bulunduğunu ve göreceli miktarlarını gösteren grafiktir. Basınç dayanımında en yüksek performansı gösteren BDO karışımının elementel bileşimi, EDX analizi ile incelenmiştir (Şekil 42). Grafikte gözlemlenen en baskın pikler, beklendiği gibi Oksijen (O), Kalsiyum (Ca) ve Silisyum (Si) elementlerine aittir. Bu elementler, betonun dayanımını sağlayan C-S-H ve C-H gibi ana hidratasyon ürünlerinin temel kimyasal yapısını doğrulamaktadır. Bu ana bileşenlerin yanı sıra, grafikte Titanyum (Ti) elementine ait net ve belirgin pikinin varlığı da tespit edilmiştir. Titanyum piki nano TiO_2 katkısının varlığına işaret etmektedir. Bu sonuç, SEM görüntülerinde gözlemlenen mikro yapısal özelliklerin, tasarlanan kimyasal bileşimle tutarlı olduğunu ve nanokatkıların çimento matrisi içerisinde başarılı bir şekilde dağıldığını kanıtlamaktadır.Elde edilen veriler yapılan benzer çalışmaları desteklemektedir (Erdoğan 2011).



Şekil 43. EDO doğrulama numunesine ait EDX grafiği

Eğilme dayanımında en yüksek performansı gösteren EDO karışımının elementel bileşimi, Şekil 43'te sunulan EDX spektrumu ile incelenmiştir. Spektrumun genel karakteri, Oksijen (O), Kalsiyum (Ca) ve Silisyum (Si) elementlerine ait baskın piklerle, beklendiği gibi hidratize olmuş bir çimento matrisini göstermektedir. Bu elementel kompozisyon, EDO numunesinin SEM görüntülerinde gözlemlenen iğnemsi ve birbiri içine geçmiş özgün mikro yapının temelini oluşturmaktadır. Dağılmış haldeki Nano Fe_2O_3 partiküllerinin, bu yüksek eğilme dayanımı sağlayan kristal ağ yapısının oluşumunda çekirdeklenme noktaları olarak rol oynamış olabileceği düşünülmektedir. EDX analizi, EDO karışımının üstün eğilme performansının, bu özel kimyasal bileşimin teşvik ettiği benzersiz mikro yapısal morfolojiden kaynaklandığı fikrini desteklemektedir.



Şekil 44. ADO doğrulama numunesine ait EDX grafiği

Aşınma direncinde en üstün performansı gösteren ADO karışımının elementel bileşimi, Şekil 44' de sunulan EDX grafiği ile incelenmiştir. Grafik, diğer numunelerde olduğu gibi, Oksijen (O), Kalsiyum (Ca) ve Silisyum (Si) elementlerine ait baskın piklerle, yoğun bir çimento hidratasyon ürünü yapısını doğrulamaktadır. Bu grafikte de belirgin bir Demir (Fe)

piki bulunurken, Titanyum (Ti) pikinin bulunmamaktadır. Bu kimyasal parmak izi, ADO karışımının formülasyonuyla (%3 Nano Fe_2O_3 ve %0 Nano TiO_2) birebir örtüşmektedir. Grafikteki Demir pikinin, EDO karışımına kıyasla göreceli olarak daha yüksek olması da bu karışımın daha fazla Nano Fe_2O_3 içerdiği bilgisiyle tutarlıdır. Bu elementel analiz, ADO numunesinin SEM görüntülerinde gözlemlenen yoğun ve sıkı mikro yapının kimyasal temelini açıklamaktadır. Düşük su/bağlayıcı oranı ve yüksek oranda uçucu kül ile, yüksek miktardaki Nano Fe_2O_3 partiküllerinin varlığı, yüzeyde sert ve aşınmaya karşı dirençli bir matris oluşumunu teşvik etmiştir. EDX analizi, bu yoğun yapının, tasarlanan özel kimyasal bileşim sayesinde elde edildiğini ve numunenin üstün aşınma performansının bu mikro yapısal özelliklerden kaynaklandığını doğrulamaktadır.

Doğrulama numuneleri (BDO, EDO, ADO) üzerinde yapılan karşılaştırmalı SEM-EDX analizleri, her bir optimum karışımın kendi alanında sergilediği üstün performansın temelindeki mikro yapısal nedenleri başarılı bir şekilde ortaya koymuştur. Basınç dayanımında en iyi sonucu veren BDO karışımının, nanokatkılarla desteklenmiş yoğun bir C-S-H matrisi ile bu matris içindeki bazalt liflerin çatlak köprüleme mekanizmasının birleşimi sayesinde bu performansa ulaştığı anlaşılmıştır. Eğilme dayanımında en başarılı olan EDO karışımı ise, daha farklı bir morfoloji sergilemiş; bazalt liflerin, iğnemsi ve birbiri içine kilitlenmiş bir kristal ağ yapısıyla bütünleşerek, çekme gerilmelerine karşı kompozit bir direnç oluşturduğu gözlemlenmiştir. Son olarak, aşınma direncinde en iyi olan ADO karışımının başarısının, lif içermemesine rağmen, çok düşük su/bağlayıcı oranı ve yüksek orandaki nanokatkı/uçucu kül sayesinde elde edilen yoğun ve sert yüzey hamurundan kaynaklandığı tespit edilmiştir. Bu analizler, aynı temel bileşenlerin farklı oranlarda kullanılmasının, betonun mikro yapısını ve dolayısıyla ister mekanik dayanım ister süneklik, isterse yüzey dayanıklılığı olsun nihai mühendislik özelliklerini hedeflenen amaca yönelik olarak nasıl hassas bir şekilde şekillendirebildiğini kanıtlamaktadır (Ramachandran ve Beaudoin 2000).

BET analiz sonuçları

Doğrulama numunelerinin mikro yapısal özelliklerini daha nicel bir düzeyde karakterize etmek ve SEM analiziyle gözlemlenen gözenekli yapıları sayısal verilerle desteklemek amacıyla Azot (N_2) gazı adsorpsiyonu yöntemi kullanılmıştır. Analizler, SEM incelemelerinde de kullanılan BDO, EDO ve ADO doğrulama numuneleri üzerinde gerçekleştirilmiştir. Bu yöntemle, malzemelerin spesifik yüzey alanı ve gözenek boyutu dağılımı gibi temel özellikleri, Brunauer-Emmett-Teller (BET) ve Barrett-Joyner-Halenda (BJH) teorileri kullanılarak hesaplanmıştır. Barrett, Joyner ve Halenda tarafından 1951 yılında geliştirilen ve BJH yöntemi olarak bilinen hesaplama prosedürü, mezopor (çok gözenek) boyut dağılımının belirlenmesi

için en popüler yöntemdir (Rouquerol ve diğerleri 1999, 2002). BET yöntemi ile hesaplanan özgül yüzey alanı ve adsorpsiyon-desorpsiyon gözenek boyutları ve BJH yöntemi ile elde edilen kümülatif gözenek genişliği açısından Tablo 48 ve 49'da sunulmuştur.

Tablo 48. Malzeme Yüzey Alanları

Yüzey Alanı (m²/g)			
Karışım No	**Karışım-1**	**Karışım-2**	**Karışım-3**
Tek nokta yüzey alanı (p/p° = 0,35)	11,42	10,59	5,68
BET Yüzey Alanı	11,51	11,25	6,72
BJH Adsorpsiyon Gözeneklerin Kümülatif Yüzey Alanı	14,90	15,91	8,36
BJH Desorpsiyon Gözeneklerin Kümülatif Yüzey Alanı	18,18	19,08	9,91
D-H Adsorpsiyon Gözeneklerin Kümülatif Yüzey Alanı	19,59	20,34	12,44
D-H Desorpsiyon Gözeneklerin Kümülatif Yüzey Alanı	18,88	20,18	15,11

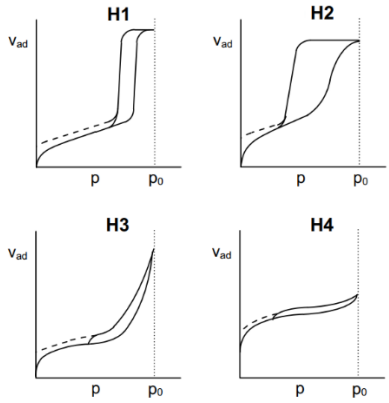
Tablo 49. Malzeme Adsorpsiyon-Desorpsiyon Gözenek Boyutları

Gözenek Boyutu (nm)			
Karışım No	**Karışım-1**	**Karışım-2**	**Karışım-3**
Adsorpsiyon Ortalama Gözenek Çapı	8,43	9,93	6,06
Desorpsiyon Ortalama Gözenek Çapı	11,47	13,60	7,83
BJH Adsorpsiyon Ortalama Gözenek Genişliği	8,75	10,34	4,51
BJH Desorpsiyon Ortalama Gözenek Genişliği	7,48	8,83	5,47
D-H Adsorpsiyon Ortalama Gözenek Genişliği	7,57	9,06	4,27
D-H Desorpsiyon Ortalama Gözenek Genişliği	7,67	8,97	4,74

BET analizi sonuçları, BDO, EDO ve ADO karışımlarının yüzey alanı ve gözenek yapısı özelliklerini sayısal olarak ortaya koymakta ve SEM analizlerinde gözlemlenen mikro yapısal farklılıkları sayısal olarak desteklemektedir. Aşınma direncinde en iyi performansı gösteren ADO karışımı, 6,72 m²/g ile üç karışım arasında açık ara en düşük BET yüzey alanına ve 6,06 nm ile en küçük ortalama gözenek çapına sahiptir. Bu veriler, bu karışımın son derece yoğun, sıkı ve rafine bir gözenek yapısına sahip olduğunu sayısal olarak kanıtlamaktadır. Bu yoğun ve düşük yüzey alanlı mikro yapı, malzemenin üstün yüzey sertliğinin ve aşınma direncinin temel nedenidir. Buna karşın, eğilme dayanımında en başarılı olan EDO karışımı, 11,25 m²/g gibi yüksek bir BET yüzey alanına ve 9,93 nm ile en büyük ortalama gözenek çapına sahiptir. Bu sonuçlar, SEM görüntülerinde gözlemlenen daha açık, iğnemsi ve gözenekli yapıyı teyit etmektedir. Bu yüksek yüzey alanlı ve birbirine kilitlenmiş yapı, malzemenin daha düşük yoğunluklu olmasına rağmen çatlak ilerlemesine karşı gösterdiği yüksek direncin ve dolayısıyla üstün eğilme performansının kaynağıdır. Basınç dayanımında en başarılı olan BDO karışımı ise, 11,51 m²/g'lik BET yüzey alanı ve 8,43 nm'lik gözenek çapı ile bu iki uç arasında bir profil

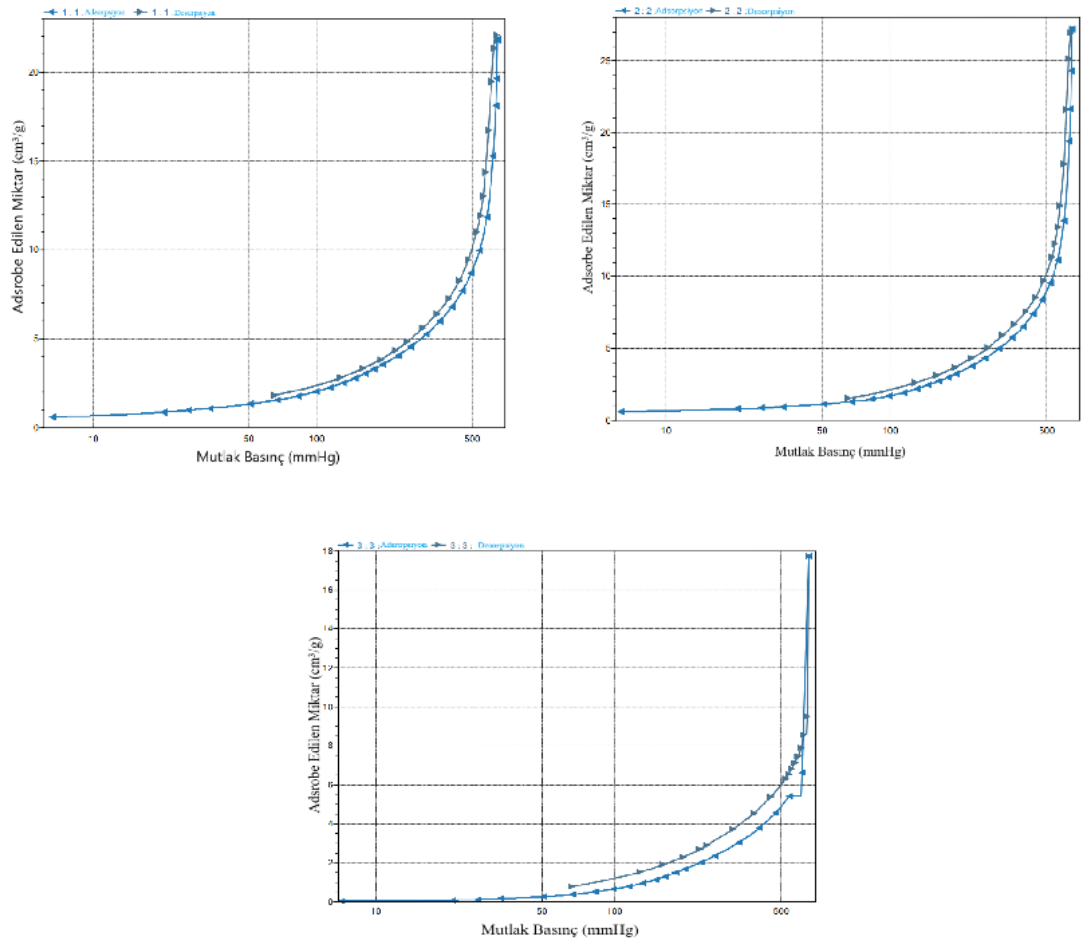
sergilemektedir. Bu durum, BDO'nun yoğun bir matrise sahip olmakla birlikte, lif takviyesinin de getirdiği karmaşık arayüzeyler nedeniyle EDO'ya yakın bir yüzey alanına sahip olduğunu göstermektedir. Sonuç olarak BET analizi, her bir optimum karışımın kendine özgü performansının, doğrudan kontrol edilen ve sayısal olarak ölçülebilen farklı mikro yapısal özelliklerden (yoğunluk, gözeneklilik ve yüzey alanı) kaynaklandığını bilimsel olarak doğrulamıştır.

Nano gözenekli malzemelerin karakterizasyonunu belirlemek amacıyla Histerezis Döngüleri kullanılmaktadır. Uluslararası Temel ve Uygulamalı Kimya Birliği (IUPAC) tarafından türleri belirlenen Histerezis Döngüleri, ilk olarak 1984 yılında ortaya çıkmıştır (Şekil 45) (Collet vd. 2008). Sonrasında IUPAC, histerezis döngülerini 4 türe ayırarak bunları gözenek yapılarıyla ilişkilendirmiştir (Sing ve Williams 2004).



Şekil 45. IUPAC histerezis döngü tabloları

Adsorpsiyon-desorpsiyon izotermleri arasındaki histerezise göre gözenek genişliklerinin dağılımını analiz etmek için deney sonuçlarına göre histerezis döngü tabloları kullanılmıştır (Şekil 46). Tüm numunelerin, IUPAC (Uluslararası Temel ve Uygulamalı Kimya Birliği) sınıflandırmasına göre Tip IV izoterm sergilediği görülmektedir. Bu izoterm tipi, malzemelerin mezo-gözenekli (2-50 nm arası gözenek boyutuna sahip) bir yapıya sahip olduğunun karakteristik bir göstergesidir. Adsorpsiyon (gaz alımı) ve desorpsiyon (gaz salımı) eğrileri arasındaki histerezis döngüsünün şekli ise gözeneklerin geometrisini tanımlar (Kruk ve Jaroniec 2001).



Şekil 46. Histerezis döngü tabloları

BDO karışımına ait histerezis döngüsüne bakıldığında adsorbe edilen gaz miktarı (yaklaşık 22 cm^3/g) ve histerezis döngüsünün genişliği açısından ADO ve EDO'nun arasında bir profil sergilediği görülmüştür. Bu, BDO'nun yoğun bir matrise sahip olmakla birlikte, EDO kadar açık ve gözenekli bir yapıya sahip olmadığını gösterir ve dengeli mekanik özellikleriyle tutarlıdır. EDO karışımına ait histerezis tablosuna bakıldığında en yüksek adsorbe edilen gaz miktarına (yaklaşık 27 cm^3/g) ve en geniş histerezis döngüsüne sahip olan karışım olduğu belirlenmiştir. Bu, EDO'nun en yüksek toplam gözenek hacmine ve en gözenekli yapıya sahip olduğunu göstermektedir. Bu açık ve gözenekli yapı, malzemenin neden daha düşük basınç dayanımına sahip olduğunu açıklarken, aynı zamanda SEM'de gözlemlenen iğnemsi ve birbirine kilitlenmiş kristal ağ yapısının bir sonucudur. Bu yapı, çatlak ilerlemesi için daha fazla yol sunarak enerjiyi sönümler ve malzemenin üstün eğilme performansına katkıda bulunur. ADO karışımına ait histerezis tablosuna bakıldığında üç karışım arasında en düşük adsorbe edilen gaz miktarına (yaklaşık 15 cm^3/g) ve en dar histerezis döngüsüne sahip olan karışım olduğu belirlenmiştir. Bu durum, ADO'nun en düşük gözenek hacmine ve en az gözenekliliğe sahip olduğunu sayısal olarak kanıtlar. Bu bulgu, önceki BET ve SEM analizlerinde

gözlemlenen yoğun ve sıkı mikro yapıyla mükemmel bir uyum içindedir ve malzemenin üstün aşınma direncinin temelini doğrular.

TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu çalışmada, beton yol kaplamalarının mekanik özelliklerini ve dayanıklılığını iyileştirmek amacıyla bazalt lif, uçucu kül ve nanomalzemelerin (Fe_2O_3, TiO_2) kullanımının etkileri, Taguchi deneysel tasarım metodu kullanılarak incelenmiş ve yüksek dayanımlı beton karışımları optimize edilmiştir. Çalışma, L16 ortogonal dizinine göre tasarlanan 16 ana deney grubu ve bu deneylerin analiziyle belirlenen üç adet optimum karışımın test edildiği doğrulama deneyleri olmak üzere iki aşamada yürütülmüştür. Doğrulama deneylerinin sonuçları, Taguchi metodolojisinin her bir performans hedefine yönelik olarak başarılı ve spesifik bir optimizasyon sağladığını net bir şekilde kanıtlamıştır. Bulgular, tek bir "en iyi" karışım olmadığını, bunun yerine her hedefin kendine özgü bir optimum formülasyonu olduğunu göstermiştir. Basınç dayanımı için optimize edilen BDO karışımı, 61,20 MPa ile en yüksek basınç dayanımını vermiştir. Eğilme dayanımı için optimize edilen EDO karışımı, 10,58 MPa ile en yüksek eğilme dayanımını sergilemiştir. Aşınma direnci için optimize edilen ADO karışımı ise 3,51 g ile en düşük kütle kaybını göstermiştir. Bu durum, bir özellikte en iyi olan bir karışımın, başka bir özellikte en iyi olmayabileceğini göstermektedir. Bu, malzeme tasarımında hedeflere göre "performans ödünleşimleri" olduğunu ortaya koyan önemli bir bulgudur. Elde edilen sonuçlar hem ulusal şartnameler hem de literatürdeki benzer çalışmalarla kıyaslandığında oldukça olumludur. Karayolları Genel Müdürlüğü'nün Beton Yol Üstyapıları Teknik Şartnamesi'nde (2016) belirtilen minimum basınç (37 MPa) ve eğilme (4,5 MPa) dayanımı değerleri, optimize edilen BDO (61,20 MPa) ve EDO (10,58 MPa) karışımları tarafından önemli ölçüde aşılmıştır. Benzer şekilde, Çevik'in (2014) çalışmasındaki bazalt lifli beton sonuçlarına (35,73 MPa basınç, 6,53 MPa eğilme) kıyasla, bu çalışmada geliştirilen karışımların çok daha üstün bir performans sergilediği görülmektedir. Bu durum, nanomalzemeler ve liflerin bir arada sinerjik bir etki yarattığını, Mutuk'un (2013) nanomalzemelerin olumlu etkilerini belirten çalışmasını da destekler niteliktedir. SEM ve BET analizleri, makroskopik düzeyde ölçülen performans farklılıklarının mikro yapısal nedenlerini açıklamıştır. BDO'nun yüksek basınç dayanımı, nanokatkılarla iyileştirilmiş yoğun bir C-S-H matrisi ile bu matris içindeki bazalt liflerin çatlak köprüleme mekanizmasının birleşiminden kaynaklanmaktadır. EDO'nun üstün eğilme performansı, bazalt liflerin, matris içinde oluşan iğnemsi ve birbiri içine kilitlenmiş bir kristal ağ yapısıyla bütünleşerek çekme gerilmelerine karşı kompozit bir direnç oluşturmasıyla açıklanmıştır. ADO'nun mükemmel aşınma direnci ise, lif içermemesine rağmen, çok düşük su/bağlayıcı oranı ve yüksek nano/puzolan içeriği sayesinde elde edilen yoğun ve sert yüzey

hamurundan kaynaklandığı tespit edilmiştir. Bu durum, ADO'nun neden daha kırılgan olduğunu ve mekanik dayanımlarının neden daha düşük kaldığını da açıklamaktadır.

Bu çalışma, Taguchi metodunun, lif ve nanomalzeme gibi çok sayıda bileşen içeren yüksek dayanımlı betonların optimizasyonu için etkili ve güvenilir bir araç olduğunu başarılı bir şekilde göstermiştir. Araştırma sonucunda, betonun mekanik dayanımını (basınç ve eğilme) en çok artıran baskın parametrenin bazalt lif olduğu, yüzey dayanıklılığını temsil eden aşınma direncini ise en çok Nano Fe_2O_3, düşük su/bağlayıcı oranı ve yüksek oranda uçucu kül kombinasyonunun iyileştirdiği tespit edilmiştir. Mikro yapısal analizler, her bir optimize edilmiş karışımın, hedeflenen performansa kendine özgü ve farklı bir morfoloji (yoğun matris, kristal ağ yapısı vb.) geliştirerek ulaştığını doğrulamıştır. Geliştirilen tüm optimize edilmiş karışımların, Karayolları Teknik Şartnamesi'nin gerekliliklerini fazlasıyla karşılaması, bu yeni nesil malzemelerin yol üstyapılarında kullanımı için önemli bir potansiyel sunduğunu ortaya koymaktadır. Bu çalışmanın en temel güçlü yanı, çok sayıda parametrenin beton performansı üzerindeki karmaşık etkilerini incelemek için Taguchi L16 ortogonal dizini gibi sistematik ve güçlü bir istatistiksel metodolojinin kullanılmasıdır. Bu yaklaşım, daha az deney sayısı ile parametrelerin ana etkileri hakkında güvenilir sonuçlar elde edilmesini sağlamıştır. Ayrıca, çalışmanın kapsamı, tek bir katkı malzemesinin etkisini incelemenin ötesine geçerek, bazalt lif, iki farklı nanomalzeme ve uçucu külün bir aradaki sinerjik ve zıt yönlü etkileşimlerini ortaya koyan yenilikçi bir yaklaşım sunmaktadır. Mekanik testlerin (basınç, eğilme, aşınma) yanı sıra, elde edilen makroskopik sonuçların nedenlerini açıklayan ileri düzey mikro yapısal analizlerin (SEM, BET, EDX) yapılması, çalışmaya çok ölçekli ve derin bir bilimsel temel kazandırmıştır. Son olarak, teorik optimizasyon sonuçlarının deneysel doğrulama aşamasıyla kanıtlanması, elde edilen bulguların güvenilirliğini ve geçerliliğini pekiştiren en önemli unsurdur. Her araştırmada olduğu gibi, bu çalışmanın da gelecekteki araştırmalara ışık tutacak bazı kısıtları bulunmaktadır. En önemli kısıt, çalışmanın laboratuvar ölçeğinde yürütülmüş olmasıdır. Kontrollü laboratuvar koşullarında elde edilen üstün performansın, saha uygulamalarındaki değişken koşullar (hava şartları, karıştırma ve yerleştirme farklılıkları vb.) altında ne ölçüde tekrarlanabileceğinin ayrıca araştırılması gerekmektedir. İkinci olarak, kullanılan nanomalzemelerin yüksek maliyeti, tasarlanan optimum karışımların günümüz ekonomik koşullarında geniş ölçekli uygulanabilirliğini sınırlandırmaktadır. Bu durum, çalışmanın bilimsel katkısını azaltmasa da pratik uygulanabilirliği için bir engel teşkil etmektedir. Son olarak, çalışma 28 günlük standart kür süresindeki performansa odaklanmış olup, karışımların uzun vadeli davranışları (yorulma, yıllara yayılan durabilite vb.) hakkında bilgi sunmamaktadır. Bu özelliklerin incelenmesi, malzemenin gerçek servis ömrü performansını anlamak için değerli olacaktır.

Çalışma kapsamında elde edilen bulgular ve ulaşılan sonuçlar, alanda yürütülecek gelecek araştırmalar için de çeşitli konulara ışık tutmaktadır. Öncelikli olarak, bu çalışmada laboratuvar ölçeğinde optimize edilen BDO, EDO ve ADO karışımlarının sahada uygulanarak gerçek yol performansı ve uzun vadeli dayanıklılık davranışlarının incelenmesi tavsiye edilmektedir. Ekonomik ve ekolojik sürdürülebilirlik açısından, nanomalzemelerin maliyetini düşürmek amacıyla daha düşük dozajların veya farklı endüstriyel atıkların mineral katkı olarak kullanımının araştırılması da önemli bir adım olacaktır. Son olarak, belirlenen optimum karışımların yorulma, sürtünme ve termal özellikleri gibi diğer önemli mühendislik davranışlarının da test edilmesi, bu malzemelerin pratik uygulamaları için kapsamlı bir veri seti oluşturacaktır.

KAYNAKÇA

Abdalla, J. A., Thomas, B. S., Hawileh, R. A., Yang, J., Jindal, B. B., & Ariyachandra, E. (2022). Influence of nano-TiO2, nano-Fe2O3, Nanoclay And Nano-Caco3 On The Properties Of Cement/Geopolymer Concrete. Cleaner Materials, 4, 100061.

ACI Committee 544, (1996), State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Concrete (ACI 544.1R-96) (R2002)

Acıkök, F., 2019.Mineral Katkılar İçeren Beton Yol Karışımlarının Mekanik ve Durabilite Özelliklerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Adak, D., Sarkar, M., Mandal, S., 2014. Effect of nano-silica on strength and durability of fly ash based geopolymer mortar, Construction and Building Materials, vol. 70, pp. 453–459.

Aghaeipour, A., & Madhkhan, M. (2017). Effect of ground granulated blast furnace slag (GGBFS) on RCCP durability. Construction and Building Materials, 141, 533–541.

Ahn, B. H., Lee, S. J., & Park, C. G. (2021). Chloride Ion Diffusion and Durability Characteristics of Rural-Road Concrete Pavement of South Korea Using Air-Cooled Slag Aggregates. Applied Sciences, 11(17), 8215.

Aleessa Alam, B., 2016.Fatıgue Performance Of Engıneered Cementıtıous Composıtes.Doktora Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü,Ankara.

Alsaran. A., "Dubleks Yüzey İşlemi Uygulanmış AISI 5140 Çeliğinin Yapısal, Mekanik ve Tribolojik Özelliklerinin Belirlenmesi", 2001.

Altoubat, S. A., Roesler, J. R., Lange, D. A., and Rieder, K. A. (2008). Simplified Method For Concrete Pavement Design With Discrete Structural Fibers, Construction and Building Materials, 22(3), 384-393.

Aly, M., Hashmi, M. S. J., Olabi, A. G., Messeiry, M., Abadir, E. F., and Hussain, A. I. (2012). Effect Of Colloidal Nano-Silica On The Mechanical And Physical Behaviour Of Waste-Glass Cement Mortar. Materials and Design, 33, 127-135.

Angelakopoulos, H., Neocleous, K., and Pilakoutas, K. (2011). Uniaxial Compressive Behaviour Of Steel Fibre Reinforced Roller Compacted Concrete, Proc. of 6th International Conference Fibre Concrete, Prague, Czech Republic.

Aral, M., Karma Lif İçeren Çimento Esaslı Kompozitlerin Mekanik Davranışı Bir Optimum Tasarım, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2006.

Aran, A., Elyaf Takviyeli Karma Malzemeler, İ.T.Ü. Yayını, İstanbul, 1990.

Arıcı, E., & Keleştemur, O. (2019). Optimization Of Mortars Containing Steel Scale Using Taguchi Based Grey Relational Analysis Method. Construction and Building Materials, 214, 232-241.

Arivalagan, K., Ravichandran, S., Rangasamy, K., & Karthikeyan, E. (2011). Nanomaterials and İts Potential Applications.

Asatekin, A., 2019.Poliamid ve Çelik Lif İle Üretilen Betonların Yol Üstyapısında Kullanılabilirliğinin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.

Asi, D., Cam Elyaf Katkılı Kompozit Malzemelerin Aşınma Performansının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon, 2008.

B. Razmi, R. Gahasemi-Fasaei, A. Ronaghi, R. Mostowfizadeh-Ghalamfarsa, Investigation Of Factors Affecting Phytoremediation Of Multi-Elements Polluted Calcareous Soil Using Taguchi Optimization, Ecotoxicol. Environ. Saf. 207 (2021).

Barbero, E.J., 1999. Introduction to Composite Materials Design, Edwards Brothers, Ann Arbor, MI, U.S.A. ITO Kompozit Raporu, 2006

Bartos, P., 1992. French Concrete-Properties and Tests, Elseiver Science Publishers B.V., Amsterdam.

Bayar, E. (2019). Baraj betonlarında aşınma problemlerinin incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bilecik.

Beaudoin, J.J., Marchand J., 2001. Pore Structure. Chapter 14, Handbook of Analytical Techniques in Concrete Science and Technology, Ed: V.S., Ramachandran, J.J., Beaudoin, Noyes.

Behfarnia, K., Salemi, N. (2013). The Effects Of Nano-Silica And Nano-Alumina On Frost Resistance Of Normal Concrete. Construction and Building Materials, 48, 580-584.

Bekaert, Çelik Teller Hakkında Genel Bilgiler Kılavuzu, Bekaert, Belgium, 2001

Beksa Firması, Çelik Takviyeli Betonların Özellikleri, Beksa Broşürleri Basım Evi, İzmit, 1998.

Biber, S. A. (2001). Karmaşık Çelik Tel Takviyeli Betonların Mekanik Davranışı. Bitirme Ödevi, İTÜ İnşaat Fakültesi, İstanbul.

Bilim, E., 2019.Karma Lif Kullanılan Yüksek Performanslı Nano Beton Üretimi. Yüksek Lisans Tezi, Düzce Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Düzce.

Bilim, E., 2019.Karma Lif Kullanılan Yüksek Performanslı Nano Beton Üretimi. Yüksek Lisans Tezi, Düzce Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Düzce.

Birgisson, B., Mukhopadhyay, A. K., Geary, G., Khan, M., Sobolev, K. (2012). Nanotechnology İn Concrete Materials: A Synopsis. Washington: Transportation Research Board, 1-3.

Boger, D. V., Rheology and the Resource İndustries. Chem. Eng. Sci., 2009, 64, 4525–4536.

Bolat, H., 2009.Polyester ve Polipropilen Telli Betonların Yol Kaplaması Olarak Kullanılabilirliğinin Araştırılması. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

Bolat, H., 2009.Polyester ve Polipropilen Telli Betonların Yol Kaplaması Olarak Kullanılabilirliğinin Araştırılması. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

Boztepe, M. (2011). Beton yollardaki farklı yüzey tiplerinin gürültü düzeyi üzerindeki etkisinin incelenmesi (Yüksek Lisans Tezi). İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Brigante D. New Composite Materials: Selection, Design, and Application. Switzerland, Springer International Publishing, 2014.

Brik, V.B., Performance Evaluation Basalt Fibers and Composite Rebars As Concrete Reinforcement, Tech Res Report submitted to NCHRPIDEA, Project 45., 1999.

Bruinsma, J. E., Peshkin, D. G., Wade, M. J., & Delatte, N. J. (2007). Accelerated Practices for Construction of Airfield Concrete Pavement: Lessons Learned from Planning Phase. Transportation research record, 2007(1), 97-103.

Brunauer, S., Emmett, P. H., Teller, E. 1938. Adsorption Of Gases in Multimolecular Layers. Journal of The American Chemical Society, 60(2), 309-319.

Brydson, R. M., & Hammond, C. (2005). Generic Methodologies For Nanotechnology: Classification And Fabrication. Nanoscale Science And Technology, 1-55.

Cao C., Sun W., Qin H. 2000. Analysis On Strength and Fly Ash Effect of Roller-Compacted Concrete with High Volume Fly Ash. Cement And Concrete Research, 30 (1): 71–75.

Chawla K.K., 1998. Fibrous Materials, Cambridge University Pres, Cambridge.

Chindaprasirt, P., De Silva, P., Sagoe-Crentsil, K., Hanjitsuwan, S., 2012. Effect of SiO2 and Al2O3 on the Setting And Hardening Of High Calcium Fly Ash-Based Geopolymer Systems, Journal Of Material Science, Vol. 47, no. 12, pp. 4876–4883.

Clayton, S., Grice, T. G. and Boger, D. V., Analysis Of The Slump Test For On-Site Yield Stress Measurement Of Mineral Suspensions. Int. J. Miner. Proc., 2003, 70, 3–21. 18.

Çevik, N., 2014.Bazalt Elyafların Beton Yollarda Kullanılabilirliği. Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli.

Deb, P.S., Sarker, P.K., Barbhuiya, S., 2015. Effects of Nano-Silica on the Strength Development of Geopolymer Cured at Room Temperature, Construction and Building Materials, vol. 101, pp. 675–683.

Demirdöven, J.B., Arditi, D., 2012, Yapılarda ve Yapım Yönetiminde Nanoteknoloji Uygulamaları, 2. Proje ve Yapım Yönetimi Kongresi, İzmir İleri Teknoloji Enstitüsü, Urla, İzmir.

Deshmukh, A., Rabbani, A., & Dhapekar, N. K., (2017), Study of rigid pavements- Review. International Journal of Civil Engineering and Technology, 8(6), 147–152.

Di Ludovico M, Prota A, Manfredi G. "Structural Upgrade Using Basalt Fibers For Concrete Confinement". Journal of Composites for Construction, 14(5), 541-552, 2010.

Du, H., Du, S., and Liu, X., (2014). Durability Performances of Concrete with Nanosilica. Construction and Building Materials, 73, 705-712.

Ecevit, O. (2007). Karayollarında rijit üst yapı uygulamaları ve tasarımı (Yüksek Lisans Tezi), İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul

Erdoğan D, 2011. Sodyum-Potasyum Silikat Esaslı Cam Frit İlaveli Beton Karışımlarının Üretilmesi ve Karakterizasyonu. Yüksek Lisans Tezi, Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.

Erdoğan, Y.T., 2010. Beton, ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayını, Ankara.

F. Collet, M. Bart, L. Serres, J. Miriel, Porous Structure And Water Vapour Sorption Of Hemp-Based Materials, Constr. Build. Mater. 22 (2008) 1271–1280.

Faisal, N., 2019.Çimentolu Kompozitlerde Mikro Ve Nano Mineral Katkıların Performasyonlarının Karşılaştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.

Feynman, R. (1960). Nanotechnology. Caltechs Eng. Sci, 23, 22-36.

Gill, S., & Maharaj,.D. K., (2015), Comparative Study of Design Charts for Flexible Pavement. American International Journal of Research in Science, Technology, Engineering & Mathematics, 11(1), 94–98.

Grove, J., Vanikar, S., and Crawford, G., (2010). Nanotechnology: New tools to address old problems. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, (2141), 47-51.

Güner, N., 2019.Öğütülmüş Kalsine Bor Minerallerinin Beton Yollardaki Etkinliğinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Rize.

Hafner, B. 2015. Energy Dispersive Spectroscopy on the SEM: A Primer. Characterization Facility, University of Minnesota-Twin Cities.

Harrington, D., Abdo, F., Adaska, W., Hazaree, C. V., Ceylan, H., and Bektas, F. (2010). Guide for roller-Compacted Concrete Pavements.

Hazaree, C. V., Ceylan, H., Taylor, P., Gopalakrishnan, K., Wang, K., and Bektas, F. (2013). Use of Chemical Admixtures in Roller-Compacted Concrete for Pavements, InTrans Project Reports. 57.

Hazaree, C., Ceylan, H., & Wang, K. (2011). Influences of Mixture Composition on Propertiesa and Freeze–Thaw Resistance of RCC. Construction and Building Materials, 25(1), 313–319.

http://mim.bilecik.edu.tr/Dosya/Arsiv/deney_foyleri/bahar_donemi/3%20NOKTA%20EGME.pdf (ET: 04.06.2024).

Http://nptel.ac.in/courses/101104010/lecture39/images/figure6.jpg (ET: 04.06.2024).

https://daytam.atauni.edu.tr/fei-inspect-taramali-elektron-mikroskobu-sem/ (ET: 04.06.2024).

https://www.kgm.gov.tr, (E.T. 07.11.2023).

Huang, Y. H., (2004), Pavement Analysis and Design, Pearson Education, Inc (Second Edi).

Iang CH, McCarthy TJ, Chen D, Dong QQ. "Influence of Basalt Fibre on Performance of Cement Mortar", Key Engineering Materials, 2010, 93(6):426–427.

Jo, B. W., Kim, C. H., Tae, G. H., Park, J. B. (2007). Characteristics of Cement Mortar With Nano SiO2 Particles. Construction and Building Materials, 21(6), 1351–1355.

K.S.W. Sing, R.T. Williams, Physisorption Hysteresis Loops And The Characterization Of Nanoporous Materials, Adsorpt. Sci. Technol. 22 (2004) 773–782.

Kandemir, A., 2005.Kendiliğinden Yerleşen Betonun Kalıcılık Özelliklerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.

Kara, H., 2021.Taş Mastik Asfalt ve Beton Yol Kaplama İnşasında Bor Atıklarının Kullanılabilirliği. Yüksek Lisans Tezi, Bitlis Eren Üniversitesi ve Dicle Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Bitlis.

Karaduman, B., 2017. Taramalı Elektron Mikroskobu ile Kriminolojik Saç Analizi. Yüksek Lisans Tezi, Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.

Kawashima, S., Hou, P., Corr, D. J., & Shah, S. P. (2013). Modification Of Cement-Based Materials with Nanoparticles. Cement and Concrete Composites, 36, 8-15.

Kaya AC. Midyat Taşının Kaplama ve Yapıda Kullanılabilirliğinin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Adana, Türkiye, 2008.

Kayhan, A.H., Haldenbilen, S., Aydın, Y., Uslu, A., Shved, O., Bazalt Lifli Donatı Çubuklarının Mekanik Özelliklerinin Betonarme Elemanların Davranışına Etkisi, İMO Denizli Dergisi, Sayı 66, s. 44-48, 2011.

Khan, M., Rehman, A., & Ali, M. (2020). Efficiency of Silica-Fume Content in Plain and Natural Fiber Reinforced Concrete for Concrete Road. Construction and Building Materials, 244, 118382.

Khan, M.S. (2011). Nanotechnology in Transportation: Evolution of A Revolutionary Technology, TR News, (277).

Kilic, I., & Gokce Gok, S. (2021). Strength and Durability of Roller Compacted Concrete with Different Types and Addition Rates of Polypropylene Fibers. Revista de la construcción, 20(2), 205-214.

Kizilkanat, A. B., Kabay, N., Akyüncü, V., Chowdhury, S., & Akça, A. H. (2015). Mechanical Properties and Fracture Behavior of Basalt and Glass Fiber Reinforced Concrete: An Experimental Study. Construction and Building Materials, 100, 218-224.

LaHucik, J., Dahal, S., Roesler, J., & Amirkhanian, A. N. (2017). Mechanical Properties of Roller-Compacted Concrete with Macro-Fibers. Construction and Building Materials, 135, 440-446.

LaHucik, J., Roesler, J. (2015). Low Fines Content Roller-Compacted Concrete. In Airfield and Highway Pavements, (441-452).

Lange D.A., Grasley Z.C., 2009. Pore Structure of Cement-Based Materials and A New Method to Measure Permeability.

Li H., Xiao H., Yuan J., Ou J., 2004. Microstructure Of Cement Mortar With Nanoparticles, Composites: Part B, 35, 185–189.

Li, H., Xiao, H. ve Ou, J. (2004). A Study on Mechanical and Pressure-Sensitive Properties of Cement Mortar with Nanophase Materials. Cement and Concrete Research, 34(3), 435-438.

Li, H., Zhang, M. H. ve Ou, J. P. (2006). Abrasion Resistance of Concrete Containing Nanoparticles For Pavement. Wear, 260(11), 1262-1266.

Lopresto, V., Leone, C., & De Iorio, I. (2011). Mechanical Characterisation of Basalt Fiber Reinforced Plastic. Composites Part B: Engineering, 42(4), 717-723.

Luther-Davies, B. (2014). Flexible Chalcogenide Photonics. Nature Photonics, 8(8), 591-593.

M. Kruk, M. Jaroniec, Gas Adsorption Characterization Of Ordered Organic İnorganic Nanocomposite Materials, Chem. Mater. 13 (2001) 3169–3183.

Macit, S., 2009. Beton Yol İnşaatında Kendiliğinden Yerleşen Breton'un Kullanılması Üzerine Bir Araştırma. Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.

Madandoust, R., Mohseni, E., Mousavi, S.Y., Namnevis, M., 2015. An Experimental İnvestigation on the Durability of Self-Compacting Mortar Containing nano-SiO2, nano-Fe2O3 and nano-CuO. Constr. Build. Mater. 1 (86), 44–50.

Makar, J. M., Margeson, J.ve Luh, J. (2005, January). Carbon Nanotube/Cment Composites – Early Results And Ptential Applications. Paper presented at the 3rd International Conference on Construction Materials: Performance, Innovations and Structural Implications, Vancouver, Canada.

Mardanı-Aghabaglou, A., Bayqra, S. H., Özen, S., Altun, M. G., Faqırı, Z. A., & Ramyar, K. (2020). Silindirle Sıkıştırılmış Beton Karışımlarının Tasarım Yöntemleri ve Yapılan Çalışmalar. Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 26(3), 419-431.

Mardani-Aghabaglou A., Andiç-Çakir, Ö., and Ramyar, K. (2013). Freeze-Thaw Resistance and Transport Properties of High-Volume Fly Ash Roller Compacted Concrete Designed By Maximum Density Method. Cement & Concrete Composite, 37, 259-266.

Mardani-Aghabaglou A., Ramyar K. 2013. Mechanical Properties of High-Volume Fly Ash Roller Compacted Concrete Designed by Maximum Density Method. Construction And Building Materials, 38: 356–364.

Menekşe, F., 2020.A Comparatıve Study on the Dıfferent Rıgıd Pavement Desıgn Methodologıes Used For Plaın and Fıber Reınforced Cement-Based Materıals. Yüksek Lisans Tezi, Boğaziçi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü,İstanbul.

Meng T., Yu Y., Qian X., 2012. Zhan S., Qian K., Effect of nano-TiO2 on the Mechanical Properties Of Cement Mortar, Construction and Building Materials 29, 241–245.

Mohammed, S. I., & Najim, K. B. (2020, February). Mechanical Strength, Flexural Behavior and Fracture Energy of Recycled Concrete Aggregate Self-Compacting Concrete. In Structures Vol. 23, pp. 34-43.

Moradpour, R., Taheri-Nassaj, E., Parhizkar, T., and Ghodsian, M., (2013). The Effects of Nanoscale Expansive Agents on the Mechanical Properties of Non-Shrink Cement-Based Composites: The İnfluence of Nano-Mgo Addition. Composites Part B: Engineering, 55, 193-202.

Muench, S.T., Mahoney, J.P. and Pierce, L.M. (2003). The WSDOT Pavement Guide Interactive. WSDOT, Olympia, WA. http://training.ce.washington.edu/WSDOT.

Mutuk, T. (2013). Nano boyutta toz katkılı çimentoların fiziksel-mekanik ve mikroyapı özelliklerinin incelenmesi (Master's thesis, Fen Bilimleri Enstitüsü).

Nazari, A., & Riahi, S., 2011. Al2O3 Nanoparticles in Concrete and Different Curing Media. Energy and Buildings, 43(6), 1480-1488.

Noll, M., Bartlett, C., & Dochat, T. (1192). In Situ Permeability Reduction and Chemical Fixation Using Colloidal Silica. In National Outdoor Action Conference (pp. 443–457). Las Vegas, NV.

Noorimotlagh, Z., Soltani, R. D. C., Khataee, A. R., Shahriyar, S., & Nourmoradi, H. (2014). Adsorption of A Textile Dye in Aqueous Phase Using Mesoporous Activated Carbon Prepared From Iranian Milk Vetch. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, 45(4), 1783-1791.

O. Keleştemur, E. Arıcı, S. Yıldız, B. Gökçer, Performance Evaluation of Cement Mortars Containing Marble Dust and Glass Fiber Exposed to High Temperature by Using Taguchi Method, Constr. Build. Mater. 60 (2014) 17–24.

Odler, I., 2003. The BET-Specific Surface Area Of Hydrated Portland Cement And Related Materials. Cement and Concrete Research, 33, 2049–2056.

Oltulu, M., and ġahin, R. (2014). Pore Structure Analysis of Hardened Cement Mortars Containing Silica Fume and Different Nano-Powders. Construction and Building Materials, 53, 658-664.

Öcal, A., Gürü, M., & Karacasu, M. (2018). Improvement of Bitumen Performance Properties With Nano Magnesium Spinel And Colemanite. Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 33(3).

Özbora, A. A., Tarhan, M., Engin, Y. (2013, Şubat). Nanoteknolojinin Betonun Geleceğindeki Rolü. Beton 2013 Hazır Beton Kongresi Çağrılı Bildirileri, İstanbul.

Öztürk, O., 2018.Mıxture Desıgn And Mechanıcal Propertıes of Synthetıc Fıber Reınforced Roller Compacted Concrete For Pavements. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Phoo-ngernkham, T., Chindaprasirt, P., Sata, V., Hanjitsuwan, S., Hatanaka, S., 2013. The Effect of Adding Nano-SiO2 and Nano-Al2O3 on Properties of High Calcium Fly Ash Geopolymer Cured at Ambient Temperature, Material Design, vol. 55, pp. 58–65.

Qarluq, A., 2017.Halloysit Nano-Kil, Nano-Sio2 Ve Nano-Cao'in Çimento Esaslı Harçlar Üzerindeki Etkilerinin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.

R.Yonekura, & Miwa, M. (1993). Fundamental Properties of Sodium Silicate Based Grout. In Geotechnical Conference (pp. 439–440). Singapore.

Raki, L., Beaudoin, J., Alizadeh, R., Makar, J., Sato, T., 2010. Cement and Concrete Nanoscience and Nanotechnology, Materials.

Ralegaonkar, R., Gavali, H., Aswath, P. ve Abolmaali, S., 2018. Application of Chopped Basalt Fibers in Reinforced Mortar: A review, Construction and Building Materials, 164, 589–602.

Ramachandran, V. S., & Beaudoin, J. J. (2000). Handbook of Analytical Techniques in Concrete Science and Technology: Principles, Techniques and Applications. Elsevier

Rao, C. N. R., Müller, A., & Cheetham, A. K. (Eds.). (2006). The Chemistry of Nanomaterials: Synthesis, Properties And Applications. John Wiley & Sons.

Roesler, J. R., & Gaedicke, M. C. (2004). Fiber Reinforced Concrete for Airfield Rigid Pavements. Department of Civil and Environmental Engineering, University of Illinois Urbana-Champaign, Champaign, IL.

Roesler, J., Bordelon, A., Ioannides, A., Beyer, M., & Wang, D., (2008), Design and Concrete Material Requirements for Ultra-Thin Whitetopping.

Rong, Z., Sun, W., Xiao, H., & Jiang, G., 2015. Effects of nano-SiO2 Particles on the Mechanical and Microstructural Properties of Ultra-High Performance Cementitious Composites. Cement and Concrete Composites, 56, 25-31.

Rooholamini, H., Hassani, A., and Aliha, M. R. M. (2018). Evaluating the Effect of Macro-Synthetic Fibre on the Mechanical Properties of Roller Compacted Concrete Pavement Using Response Surface Methodology. Construction and Building Materials, 159, 517-529.

Ross, P. J., 1988, The Role of Taguchi Methods and Design of Experiments in QFD. Quality Progress, 21 (6) 41-47.

Rouquerol, F., Rouquerol, J. and Sing, K. (1999) Adsorption by Powders and Porous Solids, Academic Press, London.

Rouquerol, F., Rouquerol, J. and Sing, K.S.W. (2002) Handbook of Porous Solids, Schuth, F., Sing, K.S.W., Weitkamp, J., Eds, Wiley–VCH, Weinheim, p. 236.

Roussel, N. S. and Leroy, R., From Mini Cone Test to Abrams Cone Test: Measurement of Cement Based Materials Yield Stress Using Slump Tests. Cem. Concr. Res., 2005, 35, 817–822.

Saat, M. "Kalite Denetiminde Taguchi Yaklaşımı", Gazi Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi, Cilt 2 Sayı 3, s.97-108, Ankara, 2000.

Sanchez, F., & Sobolev, K. (2010). Nanotechnology in Concrete–A Review. Construction and building materials, 24(11), 2060-2071.

Sayers, M. W., Gillespie, T. D., & Paterson, W. D. O. (1986). The International Road Roughness Experiment: Establishing Correlation and a Calibration Standard for Measurements. World Bank Technical Paper No. 45. The World Bank, Washington, D.C.

Schippers,W. A. J., "Structure and Applicability of Quality Tools", Eindhoven Teknik Üniversitesi Yay., Eindhoven, 2000.

Seis, M., Subaşı, S., Maraşlı, M., & Dehghanpour, H. (2022). Ultra Düşük Oranlarda SWCNT İlaveli UHPC'lerin Mekanik ve Elektriksel Özelliklerinin İncelenmesi. Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 38(1), 509-520.

Senff, L., Hotza, D., Lucas, S., Ferreira, V. M., & Labrincha, J. A., 2012. Effect of nano-SiO2 and nano-TiO2 Addition on the Rheological Behavior and the Hardened Properties of Cement Mortars. Materials Science and Engineering: A, 532, 354- 361.

Sengun, E. M. İ. N., Alam, B., Yaman, I. O., & Ceylan, H. (2021). A New Evaluation Of The Fatigue Design Criteria Of Roller Compacted Concrete (RCC) Pavements. Construction and Building Materials, 289, 123195.

Shah, B., Fiber Reinforced Composites, American Concrete Instıtute, Detroit, USA, 1995, pp. 142-149.

Sim J, Park C, Moon DY. "Characteristics of Basalt Fiber as A Strengthening Material for Concrete Structures". Composites Part B: Engineering, 36(6-7), 504-512, 2005.

Skalny, J. and Hearn N., 2001. Surface Area Measurements. Chapter 13, Handbook of Analytical Techniques in Concrete Science and Technology, Ed: V.S., Ramachandran, J.J., Beaudoin, Noyes.

Steyn, W.J., 2011, Applications of Nanotechnology in Road Pavement Engineering, Nanotechnology in Civil Infrastructure, K. Gopalakrishnan, B. Birgisson, P. Taylor, N.A. Okine(Eds.), Springer, 49-83.

Su, L. 2019. Research Progress in Organosilane Modification of Clay Minerals. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 39(1), 124-130.

Şahin Y., 2006. Kompozit Malzemelere Giriş, Seçkin Yayıncılık, Ankara.

Şahin, Y., Kompozit Malzemelere Giriş, Gazi Kitabevi Tic. Ltd. Şti., Ankara, 2000.

Şahmaran, M. ve Li, V. C. (2009). Durability Properties of Micro-Cracked ECC Containing High Volumes Fly Ash. Cement and Concrete Research, 39(11), 1033–1043.

Şahmaran, M., Al-Emam, M., Yıldırım, G., Şimsek, Y. E., Erdem, T. K. ve Lachemi, M. (2013). High-Early-Strength Ductile Cementitious Composites with Characteristics of Low Early Age Shrinkage for Repair of İnfrastructures. Materials and Structures, 48(5), 1389-1403.

Şirvancı, M., "Kalite İçin Deney Tasarımı- Taguçi Yaklaşımı, Literatür Yayıncılık, İstanbul, 1997.

Taher Eshtewı, S., 2021.Geridönüşüm Agregası Kullanılan Polipropilen Lif Takviyeli Beton Yolların Özellikleri. Yüksek Lisans Tezi, Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kastamonu.

Tanyıldızı, M. M. (2010). AASHTO metodunda rijit üstyapı beton kaplama kalınlığına etki eden parametrelerin irdelenmesi (Yüksek Lisans Tezi). Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.

Tanyıldızı, M., 2022.Beton Yol Kaplamalarında Yüksek Fırın Cürufu Tezi, İnönü Çelik Lif Kullanımının Araştırılması.Doktora Tezi,İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü,Malatya.

TCK Beton Yol Kaplamaları Teknik Şartnamesi (2019). Ankara.

TCK Beton Yol Üstyapılar Projelendirme Rehberi (2019). Ankara.

The British In-situ Concrete Paving Association, 2002. Cement&Concrete Association in Pavement Construction, BCA Crowthorne, Berkshire.

The Science and Engineering of Materials, 4 th ed Donald R. Askeland - Pradeep P. Phule Chapter 6 - Mechanical Properties and Behavior.

Toklu, K., 2019.Nano Boyutta Modifiye Edilmiş Yüksek Hacimde Uçucu Kül İçeren Çimento Esaslı Kompozitlerin Beton Onarım Malzemesi Olarak Kullanılması. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

Tortum, A., Çelik, C., & Cüneyt Aydin, A. (2005). Determination of the Optimum Conditions for Tire Rubber in Asphalt Concrete. Building and Environment, 40(11), 1492-1504.

TS 2824 EN 1338- Zemin Döşemesi İçin Beton Kaplama Blokları- Gerekli Şartlar ve Deney Metotları

TS 3530 EN 933-1, Agregaların Geometrik Özellikleri İçin Testler- Bölüm 1: Parçacık Boyutu Dağılımının Belirlenmesi- Eleme Yöntemi, 2012.

TS EN 1008, Beton İçin Karışım Suyu- Beton Endüstrisindeki İşlemlerden Geri Kazanılan Su Da Dahil Olmak Üzere, Beton İçin Karışım Suyu Olarak Suyun Numune Alınması, Test Edilmesi ve Uygunluğunun Değerlendirilmesi İçin Özellikler, 2003.

TS EN 12350-2-Beton- Taze beton deneyleri- Bölüm 2: Çökme (slump) Deneyi,2019.

TS EN 12390-5- Beton- Sertleşmiş Beton Deneyleri- Bölüm 5: Deney Numunelerinin Eğilme Dayanımının Tayini.

TS EN 14889-1 Lifler – Betonda kullanım için – Bölüm 1: Çelik Lifler – Tarifler, Özellikler ve Uygunluk.

TS EN 197-1, Çimento – Bölüm 1: Yaygın Çimentoların Bileşimi, Özellikleri ve Uygunluk Kriterleri, 2012.

TS EN 450-1, Beton İçin Uçucu Kül- Bölüm 1: Tanım, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri,2013.

TS EN 934-2+A1, Beton, Harç Ve Harç Katkıları- Bölüm 2: Beton Katkıları- Tanımlar, Gereksinimler, Uygunluk, İşaretleme Ve Etiketleme, 2013.

Tunç, A. (2007). Yol Malzemeleri ve Uygulamaları. Ankara.

Türk Standartları Enstitüsü, Taşıyıcı Hafif Betonların Karışım Hesap Esasları, TS 2511, Ankara, 1977.

Umar, F., & Ağar, E. (1985). Yol üstyapısı. İTÜ.

Yağtu, İ., 2019.Rijit Üstyapıların Köy Yollarında Uygulanabilirliği: Eskipazar Örneği. Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük.

Yaman, İ. Ö., & Ceylan, H. (2013). Silindirle Sıkıştırılmış Beton Yollar. Beton 2013 Hazır Beton Kongresi, 21-23.

Yeşilmen, S., Al-Najjar, Y., Balav, M.H., Şahmaran, M., Yildirim, G., Lachemi, M., 2015. Nano-Modification to İmprove the Ductility of Cementitious Composites, Cement and Concrete Research, vol. 76, pp. 170–179.

Zhu, W., Bartos, P. J., & Porro, A., 2004. Application of Nanotechnology in Construction. Materials and Structures, 37(9), 649-658.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı:	Şeyma SÜNBÜL
Doğum tarihi:	
Doğum Yeri:	
Uyruğu:	
Adres:	
Tel:	
E-mail:	
Eğitim	
Lise:	Erzurum Anadolu Lisesi
Lisans:	Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Müh.
Yüksek lisans:	Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnş. Müh. Anabilim Dalı (2019)
Doktora:	Atatürk Üniversitesi
Yabancı Dil Bilgisi	
İngilizce:	İyi
Tezden Üretilmiş Yayınlar	
Investigation of the Use of Nano Powder on Roller Compressible Fibrous Concrete Roads, Case Studies in Construction Materials.	