



**T.C.
DÜZCE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**KARMA PUZOLANLARIN KULLANILDIĞI YÜKSEK
PERFORMANSLI NANO BETON ÜRETİMİ**

VOLKAN ÖZDAL

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**DANIŞMAN
PROF. DR. SERKAN SUBAŞI**

DÜZCE, 2019

T.C.
DÜZCE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KARMA PUZOLANLARIN KULLANILDIĞI YÜKSEK
PERFORMANSLI NANO BETON ÜRETİMİ

Volkan ÖZDAL tarafından hazırlanan tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından Düzce Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Prof. Dr. Serkan SUBAŞI

Düzce Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Serkan SUBAŞI

Düzce Üniversitesi

Doç. Dr. Mehmet EMİROĞLU

Düzce Üniversitesi

Doç. Dr. Ahmet BEYÇİOĞLU

Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi

Tez Savunma Tarihi: 29/07/2019

BEYAN

Bu tez çalışmasının kendi çalışmam olduğunu, tezin planlanmasından yazımına kadar bütün aşamalarda etik dışı davranışımın olmadığını, bu tezdeki bütün bilgileri akademik ve etik kurallar içinde elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara kaynak gösterdiğimi ve bu kaynakları da kaynaklar listesine aldığımı, yine bu tezin çalışılması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını beyan ederim.

29 Temmuz 2019

Volkan ÖZDAL

TEŞEKKÜR

Yüksek Lisans öğrenimimde ve bu tezin hazırlanmasında gösterdiği her türlü destek ve yardımdan dolayı çok değerli hocam Prof. Dr. Serkan SUBAŞI'na en içten dileklerle teşekkür ederim.

Hayatımın her aşamasında beni yalnız bırakmayan aileme sonsuz saygılarımı, yardımlarını ve desteğini esirgemeyen değerli eşim Hale ÖZDAL'a, canım kızım Sare ÖZDAL'a sevgilerimi sunarım

Desteklerini hiçbir zaman esirgemeyerek, laboratuvarlarını ve hammadde kaynaklarını kullanmamız için kapılarını bize açan Fibrobeton A.Ş.' ye ve Sayın Muhammed MARAŞLI' ya teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca deneysel çalışmalarım ve verilerin yorumlanmasında bilgi ve tecrübelerinden istifade ettiğim Doç. Dr. Mehmet EMİROĞLU, Doç. Dr. Ahmet BEYÇİOĞLU ve Enis BİLİM'e teşekkür ederim.

Bu tez çalışması, Düzce Üniversitesi-Fibrobeton A.Ş. işbirliği ile hazırlanan 1346 numaralı San-Tez projesiyle desteklenmiştir.

29 Temmuz 2019

Volkan ÖZDAL

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ŞEKİL LİSTESİ	viii
ÇİZELGE LİSTESİ	x
KISALTMALAR.....	xii
SİMGELER	xiii
ÖZET	xiv
ABSTRACT	xv
1. GİRİŞ.....	1
2. KURUMSAL TEMELLER VE LİTERATÜR ARAŞTIRMASI..	3
2.1. BETON	3
2.1.1. Betonların Sınıflandırılması.....	3
2.1.1.1. Normal Dayanımlı Betonlar.....	4
2.1.1.2. Yüksek Performanslı Betonlar	4
2.2. NANO TEKNOLOJİK BETONLAR.....	4
2.2.1. Nano Teknoloji	4
2.2.2. Nano Teknolojinin Betonda Kullanımı	5
2.2.3. Beton Üretiminde Kullanılan Nano Malzemeler.....	6
2.2.3.1. Titanyumdioksit (TiO ₂).....	8
2.3. PUZZOLANLAR.....	8
2.3.1. Pozzolanın Tanımı	8
2.3.2. Pozzolanların Tarihçesi.....	9
2.3.3. Pozzolanların Kullanımı	9
2.3.4. Pozzolanların Sınıflandırılması ve Çeşitleri.....	10
2.3.5. Pozzolanik Reaksiyon	11
2.3.6. Pozzolanik Aktivite Deneyi	12
2.3.7. Pozzolanik Katkıların Beton Özelliklerine Etkileri.....	14
2.4. YÜKSEK FIRIN CÜRUFU	16
2.4.1. Yüksek Fırın Cürufunun Betondaki Kullanımı	17
2.5. METAKAOLİN	20
2.5.1. Metakaolinin Betondaki Kullanımı	21
2.6. ÇİMENTOLAR	23
2.6.1. Çimentonun Tanımı	23
2.6.2. Çimentonun Tarihçesi	23
2.6.3. Çimento Üretiminde Kullanılan Hammaddeler.....	23
2.6.4. Çimento Türleri.....	24
2.6.5. Beyaz Portland Çimentosu	24
2.7. AGREGALAR	25
2.7.1. Agregaların Sınıflandırılması	26
2.7.2. Agrega Granülometrisi.....	27
2.7.3. Bazalt Agregası Ve Genel Özellikleri	29

3. MATERYAL VE METOT	31
3.1. MATERYAL	31
3.1.1. Agrega	31
3.1.2. CEN Referans Kumu	32
3.1.3. Çimento	33
3.1.4. Metakaolin	36
3.1.5. Yüksek Fırın Cürufu.....	37
3.1.6. Titanyumdioksit (TiO ₂)	39
3.1.7. Kimyasal Katkı.....	40
3.1.8. Su	40
3.2. METOT	41
3.2.1. Puzolanik Aktivite Deneyleri	41
3.2.2. Birim Hacim Ağırlık Deneyi	41
3.2.2.1. Taze Beton BHA Deneyi.....	41
3.2.2.2. Sertleşmiş Beton BHA Deneyi.....	42
3.2.3. Slump Deneyi.....	42
3.2.4. Basınç Dayanımı Deneyi.....	43
3.2.5. Eğilme Dayanımı	43
3.2.6. Beton Karışım Hesapları ve Deney Numunelerinin Üretimi	44
3.2.6.1. Beton Karışımı	44
3.2.6.2. Beton Üretimi.....	46
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	48
4.1. AGREGA OPTİMİZASYONUNA İLİŞKİN SONUÇLAR.....	48
4.1.1. Slamp Deneyi Sonuçları.....	48
4.1.2. Su Emme Deneyi Sonuçları	48
4.1.3. Birim Hacim Ağırlık Sonuçları.....	49
4.1.4. Basınç Dayanımı Sonuçları	49
4.1.5. Eğilme Dayanımı Sonuçları.....	52
4.2. NANO-BETON NUMUNELERİNE AİT DENEY SONUÇLARI.....	55
4.2.1. Slump Deneyi Sonuçları	55
4.2.2. Su Emme Deneyi Sonuçları.....	55
4.2.3. Birim Hacim Ağırlık Sonuçları.....	56
4.2.4. Basınç Dayanım Sonuçları	56
4.2.5. Eğilme Dayanım Sonuçları.....	58
4.3. PUZOLAN KATKILI NUMUNELERE İLİŞKİN DENEY SONUÇLARI	60
4.3.1. Puzolanik Aktivite Sonuçları	60
4.3.2. Slump Deneyi Sonuçları	61
4.3.3. Birim Hacim Ağırlık Sonuçları.....	62
4.3.4. Basınç Dayanım Sonuçları	62
4.3.4.1. MTKL İkame Edilmiş Beton Numuneler	62
4.3.4.2. YFC İkame Edilmiş Beton Numuneler	66
4.3.4.3. Karma Puzolan İkame Edilmiş Beton Numuneler.....	70
4.3.5. Eğilme Dayanımı Sonuçları.....	75
4.3.5.1. MTKL İkame Edilmiş Beton Numuneler	75
4.3.5.2. YFC İkame Edilmiş Beton Numuneler	79
4.3.5.3. Karma Puzolan İkame Edilmiş Beton Numuneler.....	82
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	87
6. KAYNAKLAR.....	89

ÖZGEÇMİŞ.....	94
----------------------	-----------



ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1. Nano CaCO_3 kullanılması durumunda hidratasyon gelişimi.....	7
Şekil 2.2. Nano CaCO_3 kullanılması durumunda priz süreleri.....	7
Şekil 2.3. Puzolanların sınıflandırılması.....	11
Şekil 2.4. 1 hidrate Portland-puzolan çimentosundaki kalsiyum hidroksit içeriğinin	12
Şekil 2.5. YFC'nin yüksek fırındaki oluşumu.....	16
Şekil 2.6. Maksimum tane boyutu 8,00 mm olan agrega numunelerinin Türk Standardına göre gradasyon sınır değeri.....	27
Şekil 2.7. Maksimum tane boyutu 16,00 mm olan agrega numunelerinin Türk Standardına göre gradasyon sınır değeri.....	28
Şekil 2.8. Maksimum tane boyutu 31,5 mm olan agrega numunelerinin Türk Standardına göre gradasyon değerleri.....	28
Şekil 2.9. Maksimum tane boyutu 63,00 mm olan agrega numunelerinin Türk Standardına göre gradasyon sınır değerleri.....	29
Şekil 3.1. Kullanılan agregalar; (a) bazalt unu, (b) bazalt kumu.....	31
Şekil 3.2. Agregalar ait tane boyut analiz sonucu.....	32
Şekil 3.3. Kullanılan CEN kumuna ait görsel.....	33
Şekil 3.4. Kullanılan CEM I 52,5 R tipi çimento.....	34
Şekil 3.5. Tane boyut analiz sonucu.....	35
Şekil 3.6. Çimentoya ait SEM görüntüsü.....	35
Şekil 3.7. Kullanılan MTKL'ye ait görsel.....	36
Şekil 3.8. Metakaoline ait SEM görüntüleri.....	37
Şekil 3.9. Kullanılan YFC'ye ait görsel.....	38
Şekil 3.10. YFC mineralinin SEM görüntüleri.....	39
Şekil 3.11. Kullanılan TiO_2 'ye ait görsel.....	39
Şekil 3.12. TiO_2 'e ait SEM görüntüsü.....	39
Şekil 3.13. Kullanılan kimyasal katkıya ait görsel.....	40
Şekil 3.14. Slump deneyi yapılışı.....	42
Şekil 3.15. Basınç dayanımı ölçüm test cihazı ve deney yapılışına ait görseller.....	43
Şekil 3.16. Eğilme dayanımı ölçüm test cihazı ve deney yapılışına ait görsel.....	44
Şekil 3.17. Beton karışımı ve numune döküm işlemi.....	44
Şekil 3.18. Agrega gradasyonu.....	45
Şekil 3.19. Beton numunelerinin üretimleri.....	47
Şekil 4.1. Farklı agrega tane dağılımına sahip beton numunelerinin basınç dayanımı değerleri.....	50
Şekil 4.2. Farklı tane dağılımına sahip beton numunelerinin eğilme dayanımı değerleri.....	53
Şekil 4.3. F0,5 gradasyonlu numunelerde TiO_2 katkısının nano-beton numunelerindeki basınç dayanımları üzerine etkisi.....	57
Şekil 4.4. Optimizasyonlu numunelerde TiO_2 katkısının eğilme dayanımı sonuçları....	59
Şekil 4.5. MTKL ikameli beton numunelerine ait ortalama basınç dayanımı değerleri.....	63
Şekil 4.6. YFC ikameli beton numunelerine ait ortalama basınç dayanımı değerleri....	67
Şekil 4.7. Karma puzolan ikameli betonlar için ortalama basınç dayanımı değerleri....	72

Şekil 4.8. MTKL ikameli beton numunelerine ait ortalama eğilme dayanımı değerleri.	76
Şekil 4.9. YFC ikameli beton numunelerine ait ortalama eğilme dayanımı değerleri....	80
Şekil 4.10. Karma puzolan ikameli betonlar için ortalama eğilme dayanımı değerleri.	83



ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa No

Çizelge 2.1. TS 25'e göre trasta aranması gereken özellikler.	14
Çizelge 2.2. Puzolanların taze beton özellikleri üzerine etkileri.	15
Çizelge 2.3. Puzolanların sertleşmiş beton özellikleri üzerine etkileri.	15
Çizelge 3.1. Kullanılan agregaya ait kimyasal analiz sonuçları.	31
Çizelge 3.2. Agreganın fiziksel özellikleri.	32
Çizelge 3.3. CEN Referans Kumu'nun tane büyüklüğü dağılımı.....	33
Çizelge 3.4. Kullanılan çimentonun kimyasal özellikleri.	34
Çizelge 3.5. Kullanılan çimentoya ait fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikler.....	36
Çizelge 3.6. Kullanılan metakaolinin kimyasal özellikleri.....	37
Çizelge 3.7. Kullanılan YFC' nin kimyasal özellikleri tabloda verilmiştir..	38
Çizelge 3.8. Düzce ili şebeke suyunun kimyasal analizleri.....	40
Çizelge 3.9. Bazalt agregalı yüksek fırın cürufu ve metakaolin ikameli karışım tablosu (TiO ₂ ilaveli -T).	46
Çizelge 4.1. Farklı tane dağılımına sahip taze beton slump deneyi sonuçları.	48
Çizelge 4.2. Farklı tane dağılımına sahip sertleşmiş betonun su emme deneyi sonuçları.	48
Çizelge 4.3. Agreganın gradasyonu sertleşmiş beton birim ağırlık değerleri.....	49
Çizelge 4.4. Optimizasyonlu beton numunelerinin basınç dayanımı değerlerine ait açıklayıcı istatistikler.....	50
Çizelge 4.5. Optimizasyonlu beton numunelerine ait varyans analizi sonuçları.....	51
Çizelge 4.6. Optimizasyonlu beton numunelerine ait basınç verileri üzerinde gerçekleştirilen Duncan çoklu karşılaştırma testi sonuçları.....	52
Çizelge 4.7. Farklı tane dağılımına sahip eğilme dayanımı değerlerine ait açıklayıcı istatistikler.....	53
Çizelge 4.8. Farklı gradasyon türüne sahip beton numunelerine ait varyans analizi sonuçları.....	54
Çizelge 4.9. Referans ve TiO ₂ ilaveli nano-beton numunelerinin slump deneyi sonuçları.....	55
Çizelge 4.10. Optimizasyonlu ve TiO ₂ ilaveli numunelerin slump deneyi sonuçları.....	55
Çizelge 4.11. Optimizasyonlu ve TiO ₂ ilaveli numunelerin birim hacim ağırlık deneyi sonuçları.....	56
Çizelge 4.12. Nano betonlara ait basınç dayanımı değerleri için açıklayıcı istatistikler.....	56
Çizelge 4.13. Optimizasyonlu numunelerde TiO ₂ katkısının beton numunelerine ait varyans analizi sonuçları.....	58
Çizelge 4.14. Optimizasyonlu numunelerde TiO ₂ katkısının eğilme dayanımı değerlerine ait açıklayıcı istatistikler.....	58
Çizelge 4.15. TiO ₂ katkısının beton numunelerine ait varyans analizi sonuçları.....	60
Çizelge 4.16. Puzolanik aktivite test sonuçları.....	61
Çizelge 4.17. Bazalt agregalı karma puzolan ikameli TiO ₂ katkılı taze betonun yayılma değerleri.....	61
Çizelge 4.18. Bazalt agregalı karma puzolan ikameli sertleşmiş beton birim ağırlık değerleri.....	62

Çizelge 4.19. MTKL İkame edilmiş betonların basınç dayanımı değerlerine ait açıklayıcı istatistikler.....	63
Çizelge 4.20. MTKL ikameli beton numunelerine ait varyans analizi sonuçları.	64
Çizelge 4.21. MTKL ikameli betonların basınç dayanımı verileri üzerinde gerçekleştirilen Duncan çoklu karşılaştırma testi sonuçları.	65
Çizelge 4.22. YFC İkame edilmiş betonların basınç dayanımı değerlerine ait açıklayıcı istatistikler.....	66
Çizelge 4.23. YFC ikameli beton numunelerine ait varyans analizi sonuçları.	68
Çizelge 4.24. YFC ikameli betonların basınç dayanımı verileri üzerinde gerçekleştirilen Duncan çoklu karşılaştırma testi sonuçları.	69
Çizelge 4.25. Karma puzolan ikame edilen beton numunelerine ait açıklayıcı istatistikler.	71
Çizelge 4.26. Karma Puzolan ikameli beton numunelerine ait varyans analizi sonuçları.	73
Çizelge 4.27. Karma Puzolan ikameli betonların basınç dayanımı verileri üzerinde gerçekleştirilen Duncan çoklu karşılaştırma testi sonuçları.	74
Çizelge 4.28. MTKL İkame edilmiş betonların eğilme dayanımı değerlerine ait açıklayıcı istatistikler.....	75
Çizelge 4.29. MTKL ikameli beton numunelerine ait varyans analizi sonuçları.	77
Çizelge 4.30. MTKL ikameli betonların basınç dayanımı verileri üzerinde gerçekleştirilen Duncan çoklu karşılaştırma testi sonuçları.	78
Çizelge 4.31. YFC İkame edilmiş betonların eğilme dayanımı değerlerine ait açıklayıcı istatistikler.....	79
Çizelge 4.32. YFC ikameli beton numunelerine ait varyans analizi sonuçları.	81
Çizelge 4.33. YFC ikameli betonların eğilme dayanımı verileri üzerinde gerçekleştirilen Duncan çoklu karşılaştırma testi sonuçları.	81
Çizelge 4.34. Karma puzolan ikame edilen beton numunelerine ait açıklayıcı istatistikler.	82
Çizelge 4.35. Karma Puzolan ikameli beton numunelerine ait varyans analizi sonuçları.	84
Çizelge 4.36. Karma Puzolan ikameli betonların eğilme dayanımı verileri üzerinde gerçekleştirilen Duncan çoklu karşılaştırma testi sonuçları.	85

KISALTMALAR

ASTM	American Society for Testing and Materials
EN	Avrupa Standardı
FT-IR	Fourier Transformlı Kızılötesi Spektroskopisi
GYFC	Granüle Yüksek Fırın Cürufu
MTKL	Metakaolin
PÇ	Portland Çimentosu
SD	Silis Dumanı
TS	Türk Standardı
UV	Ultraviyole
XRD	X-Işınları Difraksiyonu
YFC	Yüksek Fırın Cürufu

SİMGELER

±	Artı-Eksi
‰	Binde
=	Eşittir
g	Gram
≤	Küçük eşit
l	Litre
mm	Milimetre
mm ²	Milimetre kare
π	Pi Sayısı
°C	Santigrat Derece
cm	Santimetre
cm ²	Santimetre kare
%	Yüzde

ÖZET

KARMA PUZOLAN KULLANILAN YÜKSEK PERFORMANSLI NANO BETON ÜRETİMİ

Volkan ÖZDAL

Düzce Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Prof. Dr. Serkan SUBAŞI

Temmuz 2019, 93 sayfa

Yapıların dış ortam etkilerine karşı daha dayanıklı ve daha uzun servis ömrüne sahip olması beklenmektedir. Bundan dolayı son yıllarda beton teknolojisinde meydana gelen gelişmelerle yüksek performanslı betonlar üretilebilmiştir. Yüksek performanslı beton, mekanik özelliklerinin yanında durabilite özellikleri bakımından da iyileştirilmiş bir betonu ifade etmektedir. Betonun durabilite özelliklerinin iyileştirilmesi için puzolan kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır. Beton üretiminde aynı zamanda tasarruf sağlayan uçucu kül, silis dumanı, metakaolin ve yüksek fırın cürufu gibi puzolanik malzemeler kullanılmaktadır. Puzolanların belirli oranda çimento ile yer değiştirilerek kullanılması her geçen gün daha çok araştırılan bir konu olmaktadır. Çünkü bu mineral katkıların kullanımı; ince taneli olmaları ve puzolanik reaksiyona girmeleri dolayısıyla betonun mekanik özelliklerini geliştirmekle birlikte, daha yeşil ve temiz bir doğa elde etmeyi mümkün kılan büyük bir adımdır. Aynı zamanda beton özelliklerinin iyileştirilmesi için nano materyallerin kullanımı da giderek artmaktadır. Bu çalışmanın amacı karma puzolan kullanılan yüksek performanslı nano beton üretimidir. Bu amaçla üretilen beton numunelerinde bazalt agregası ile nano filler malzeme olarak TiO_2 kullanılarak puzolanik malzeme olarak metakaolin ve yüksek fırın cürufu tekli veya karma olarak kullanılmıştır. Çalışmada ilk olarak bazalt agregası ile 3 farklı tane dağılımına sahip beton karışımları hazırlanmıştır. En yüksek dayanım veren tane dağılımına sahip betonlara tekli olarak %5, %10 ve %20 oranında metakaolin ve yüksek fırın cürufu katılmıştır. Ayrıca puzolanlar farklı oranlarda karıştırılarak beton karışımlarına katılmıştır. Üretilen beton örnekleri üzerinde basınç dayanımı, su emme ve eğilme dayanımı deneyleri gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak puzolanların karma olarak kullanılabilirliği denenmiş ancak tekil olarak kullanımlarda mekanik özelliklerde dayanım değerinin daha iyi olduğu görülmüştür. Nano materyal kullanımını ile dayanım değerlerinde artış sağlanmıştır.

Anahtar sözcükler: Puzolan, Nano materyal, Beton, Dayanım.

ABSTRACT

PRODUCTION OF HIGH PERFORMANCE NANO CONCRETE USING MIXED PUZZOLANS

Volkan ÖZDAL

Düzce University

Graduate School of Natural and Applied Sciences, Department of Civil Engineering

Master's Thesis

Assist: Prof. Dr. Serkan SUBAŞI

July 2019, 93 pages

Structures are required to be durable against external influences and have longer service life. Therefore, the importance of high performance concretes has increased with the recent improvements in concrete technology. High performance concrete refers to an improved concrete in terms of mechanical properties and as well as durability properties. The use of pozzolans has become widespread to improve the durability properties of concrete. In addition, pozzolanic materials as fly ash, silica fume, metakaolin and blast furnace slag are used for more economical concrete production. The use of pozzolans by replacing them with a certain rate of cement is becoming an increasingly researched topic. The usage of this kind of mineral admixtures is a big step to obtain more green and clean nature. Moreover, they improve the mechanical properties of concrete with their fine graded forms and pozzolanic reactions. At the same time, the use of nano materials to improve concrete properties is also increasing. The aim of this study is to produce a high performance nano concrete using mixed pozzolans. For this purpose, basalt aggregate and TiO₂ nano filler materials were used and metakaolin and blast furnace slag were added as single or mixed compositions. Firstly, concrete mixtures having 3 different grain distributions were prepared with basalt aggregate. 5%, 10% and 20% metakaolin and blast furnace slag were added to the concretes having the highest concrete compressive strength among prepared concretes with different grain distributions. In addition, pozzolans were added to concrete mixtures with different mix ratios. Compressive strength, water absorption and flexural tests were performed on the concrete samples. In this study, mixed usability of pozzolans has been investigated. As a result, it has been found that the single use of pozzolans yields better results in terms of compressive strength. Moreover compressive strength of concrete increases with the use of nano materials.

Keywords: Pozzolan, Nano material, Concrete, Strength.

1. GİRİŞ

Beton günümüzde en çok kullanılan yapı malzemesi olma özelliğine sahip olup, düşük çekme dayanımı ve düşük süneklik özelliği zayıf yönleri olarak bilinmektedir. Bilindiği üzere beton eğilme ve çekme etkilerine karşı düşük performans, basınç etkisi altında ise yüksek performans sergilemektedir. Araştırmacılar, betonun zayıf yönlerini iyileştirebilmek için uzun yıllardan beri kapsamlı çalışmalar yapmaktadır.

Beton üretiminde kullanılan en pahalı karışım bileşeni çimentodur. Betonun performansını ve kullanılabilirliğini çimentonun teknik özelliği ve oranı etkilemektedir. Pozolanik malzemeler, beton maliyetini düşürmek betonun bazı özelliklerini iyileştirmek amacıyla ya doğrudan ya da çimentonun bir kısmını ikame etmek üzere beton karışımına katılmaktadır [1].

Bahsi geçen nedenlerle beton karışımlarında çimento ağırlığının %50'sine kadar varan miktarlarda kullanılması sebebiyle, pozolanik malzemeler beton endüstrisinde kendisine çok önemli yer bulmuştur. Pozolan kullanımı ile betondaki hidratasyon ısı ve büzülme değerleri kullanılmayana oranla daha düşüktür.

Yüksek performanslı beton üretiminde pozolanik malzeme kullanımı yaygınlaşmıştır. Kullanılan pozolanik malzemelerin büyük bir kısmı endüstriyel atıklardır. Metakaolin (MTKL) bu amaç için üretilen bir ürün olup silis dumanı ise silis ve ferro silis endüstrisinin yan ürünüdür. 1960 yıllardan beri MTKL pozolanik malzeme olarak betonda kullanılmaktadır.

Demir-çelik üretimi sonucunda elde edilen Yüksek Fırın Cürufu (YFC) ise, diğer bir endüstriyel atık malzemedir. Türkiye'de demir-çelik üretimi esnasında elde edilen atık YFC miktarı ise, yaklaşık olarak 690.000 ton/yıldır [2].

YFC kullanımı ile ilgili çalışmalara bakıldığında fiziksel ve kimyasal özellikler bakımından erken yaş dayanımları 7-28. günler arası dayanımlarının düşük olduğu 28. günden sonraki yaş dayanımlarını ise yüksek olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, kullanımından kaynaklı olarak betonda priz süresini uzattığı, işlenebilirliği iyileştirdiği, terlemeyi, su geçirimsizliği, hidratasyon ısını düşürdüğü tespit edilmiştir [3].

Son yıllarda yapı malzemeleri alanında, titanyum dioksit (TiO_2) üzerinde, kendi kendini temizleme özelliğinden dolayı yoğun olarak çalışılmaktadır. TiO_2 , güneş ışığı altında kendi kendini temizleme özellik gösteren ve organik grupları parçalayabilen yarı iletken bir malzemedir. TiO_2 , ışığa maruz bırakıldığında, suyun arıtılmasında, kendi kendini temizleyebilen, buğulanmayan yüzeylerin elde edilmesinde, fotokimyasal olarak kanser tedavisi uygulamalarında, havanın arındırılmasında kullanılabilir [4].

Bu çalışmada agrega tane dağılımlarının, nano materyal kullanımının ve tekli veya karma puzolan kullanımının nano betonun mekanik ve fiziksel özellikleri üzerine etkileri araştırılmıştır.



2. KURUMSAL TEMELLER VE LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

2.1. BETON

İnşaat mühendisliği alanının en önemli malzemelerinden olan beton, kalıplama yöntemi sayesinde istenilen form verilebilen, temel bileşimleri çimento, kum, agrega ve su olan bir yapı malzemesidir [5]. Beton karışımlarında yer alan çakıl veya kırma taş betonun iskeletini oluştururken kum ise iri taneler arasındaki boşlukları doldurarak kompasitenin arttırılmasını sağlamaktadır. Bağlayıcı olarak kullanılan çimento, kum ve iri agrega tanelerini birbirine bağlar. Böylelikle beton maruz kaldığı iç ve dış etkilere dirençli hale gelir [6].

Betonun yaygın kullanım sebepleri aşağıdaki gibi özetlenebilir.

- Çelik yapılara göre daha düşük maliyetli olması,
- Kolay temin edilmesi
- Bilgisayar kontrollü santraller, transmikserler, pompalar vb. ile üretim, taşıma ve yerleştirme aşamalarında büyük gelişmelerin sağlanmış olması,
- İstenilen formun kolaylıkla elde edilmesi,
- Yeterli basınç dayanımlarına ulaşması,
- Fiziksel, kimyasal etkiler ve çevresel koşullara karşı dayanıklı olması,
- Servis ömrünün yeterli /uzun olması,
- Bakım ve onarımın kolay olması,

2.1.1. Betonların Sınıflandırılması

Betonları kendi içerisinde sınıflandırmak istediğimizde birim ağırlığına göre üç temel gruba ayrılırlar. Normal betonlar yaklaşık 2000-2400 kg/m³ ağırlığında olan betonlar olarak sınıflandırılır ve en çok kullanılan ve yaygın olan bir beton türüdür. Hafif betonlar, birim ağırlıkları 2000 kg/m³'den daha az olan beton türleridir. Hafiflik ve yalıtım istenilen durumlarda kullanılır. Ağır betonlar birim ağırlığı 2600 kg/m³'den yüksek olan beton türleridir. Bu betonlar Nükleer santraller gibi radyasyon etkisine maruz kalan yapılarda

kullanılır [7].

Birçok ülkede beton sınıflandırılmalarında farklılık görünse de, betonlar basınç dayanımlarına göre de üç ana gruba ayrılmaktadır.

- Basınç dayanımları 20–60 MPa olan normal dayanımlı betonlar
- Basınç dayanımları 60 MPa’nın üzerinde olan betonlara yüksek dayanımlı betonlar olarak isimlendirilirler [7].

2.1.1.1. Normal Dayanımlı Betonlar

Normal dayanımlı betonlar, basınç dayanımları 20 MPa ile 60 MPa arasında olan kırılma enerjileri 100 j/m^2 ile 120 j/m^2 arasında olan, çimento, agrega, su ve katkı maddeleri kullanılarak üretilen yapı malzemesidir [8].

2.1.1.2. Yüksek Performanslı Betonlar

Yüksek performanslı beton ABD de yer alan stratejik otoyol programına göre şu şekilde sınıflandırılır [9].

- Çok erken dayanımlı beton: 4 saatlik basınç dayanımı $> 17,5 \text{ MPa}$
- Çok yüksek erken dayanımlı beton: 24 saatlik basınç dayanımı $> 35 \text{ MPa}$
- Çok yüksek dayanımlı beton: 28 günlük basınç dayanımı $> 70 \text{ MPa}$,

Yüksek dayanımlı betonlarda, betonun içindeki boşluk yapısının normal betonlara göre oldukça az olması sayesinde çimento ve dolgu malzemelerinin aderansı çok iyidir.

1960’lı yıllarda en yüksek beton dayanımı 15-25 MPa arasında iken 1970’li yıllarda binalar çok katlı olduğundan dolayı 40-50 MPa’ya ulaşmıştır. Zamanla dayanımları artan beton, bugün 60 MPa ve üzeri seviyeleri yüksek performanslı beton adını almış, kullanım alanı olarak çoğunlukla yol, köprü, liman yapısı olarak kendine yer bulmuştur.

2.2. NANO TEKNOLOJİK BETONLAR

2.2.1. Nano Teknoloji

Nano teknoloji, nano boyuttaki maddelerin tanımlanmasını ve kontrol edilmesini inceleyen ve bu çerçevede ürün özelliklerinin gelişmesini hedefleyen bir bilim alanı olarak tanımlanabilir [4].

“Nano” bir şeyin bir milyarda birini ifade etmektedir. “Nano teknoloji”, “nano bilim”

gibi başında “nano” öneki bulunan terimler, “nanometre” teriminden gelmektedir. Temel olarak nanometre, diğer ölçüm skalaları gibi bir ölçüm skalasıdır. Nano ölçeği daha iyi anlamak için verilecek en iyi örneklerden birisi insan saçının kalınlığının yaklaşık 80 bin nanometre olmasıdır. Nano ölçekteki maddelere “nano malzeme” veya “nano partikül” denmektedir [4].

Nano teknoloji malzemenin yapıtaşları olan atomlarını düzenleyerek her alanda daha gelişmiş, daha hafif daha dayanıklı malzeme üretmeyi sağlar. Malzeme nano boyut ile makroskobik boyut arasında farklı özelliklere sahip olur ve nano boyuta geçtikçe birçok yeni özelliğe sahip olur [10].

2.2.2. Nano Teknolojinin Betonda Kullanımı

Nano teknoloji kavramı günümüzde oldukça geniş sektöre yayılmış ve aktif olarak kullanılmakta olup inşaat sektörü de burada kendine yer bulmuştur.

Beton, çağımızda yapısal bir malzeme olarak öngörülmektedir. Nano teknoloji ile çok amaçlı akıllı malzemelerin üretimi mümkündür. Genel olarak bakıldığında farklı nano ve makro malzemelerin uygulanmasıyla beton performansı dikkate değer biçimde artırılabilmiştir. Atomik kütle mikroskobu sayesinde nano-mikro özelliklere sahip malzemelerin nano görüntüleme teknikleriyle, nano ölçekteki özellikleri ortaya çıkarılarak malzemelerin daha gelişmiş bir performansa sahip olması sağlanmaktadır.

Yapı malzemeleri alanında nano bilimindeki gelişmeler önemli etkiler yapmış ve beton teknolojisini önemli derecede etkilemiştir. Yapı malzemesi alanındaki araştırmacılar ve uygulayıcılar bu zamana kadar betonu ve beton bileşenlerini mikro, mezo ve makro ölçekte incelemiş ancak hala bazı temel sorulara net cevaplar bulamamıştır. Çoğu bölümlerde olduğu gibi nano teknoloji beton ve beton bileşenleri alanında uygulanmaya başlanmış ve belirli bir seviyeye gelinmiştir. Beton karışımında nano partiküllerin kullanımıyla malzemelerin sadece mukavemet, durabilite gibi özellikleri iyileştirilmekle kalmamakta, aynı zamanda fotokatalitik [11], basınç algılama [12], gibi yeni fonksiyonlar kazanması mümkün olmaktadır [13].

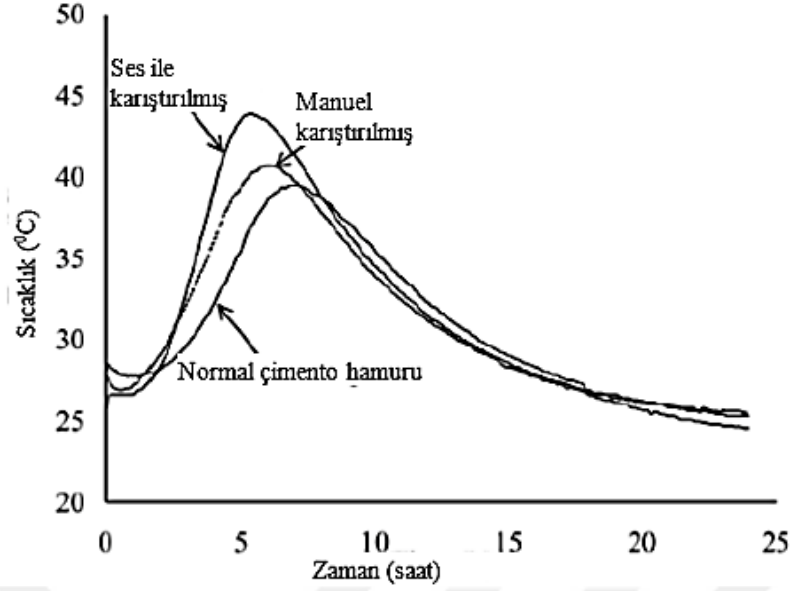
Özellikle beton karışımında çok ince tanecikler ultra yüksek dayanımlı beton üretmek için kullanılmaktadır. Çimento ve puzolan veya dolgu malzemesi arasındaki nano boşlukların doldurulması beton dayanımı için çok önemlidir. Mikro silikadan daha ince tanecikler gerek particle packing, gerekse puzolanik aktivite açısından ultra yüksek dayanımlı beton üretiminde kullanılabilir [14].

2.2.3. Beton Üretiminde Kullanılan Nano Malzemeler

Çimento ve betonda en yaygın kullanılan nano parçacıklar nano oksitler, özellikle SiO_2 ve Fe_2O_3 'tür. Nano- SiO_2 ilavesinin, yüksek oranda uçucu kül içeren betonun basınç dayanımını önemli ölçüde arttırabildiği ve uçucu kül ve çimento parçacıkları arasındaki gözenekleri doldurarak gözenek büyüklüğü dağılımını iyileştirebildiği bulunmuştur. Nano silika ayrıca kendi kendine yerleşen betonda ayrışma direncini arttırmak için kullanılır. Nano- Fe_2O_3 ve nano- SiO_2 , betonun kaldırımlara aşınma direncini arttırmak için de kullanılmıştır [15].

Nano silikanın olumsuz yönlerini de ele alırsak, taze beton işlenebilirliği üzerinde olumsuz etkisi vardır. Karışımda kullanıldığında kayma direnci ve plastik viskozite değerlerini arttırırken Marsh hunisi sürelerini uzatmaktadır. Ancak bahsedilen problem akışkanlaştırıcı katkı kullanımını ile üstesinden gelinebildiği belirtilmektedir [16].

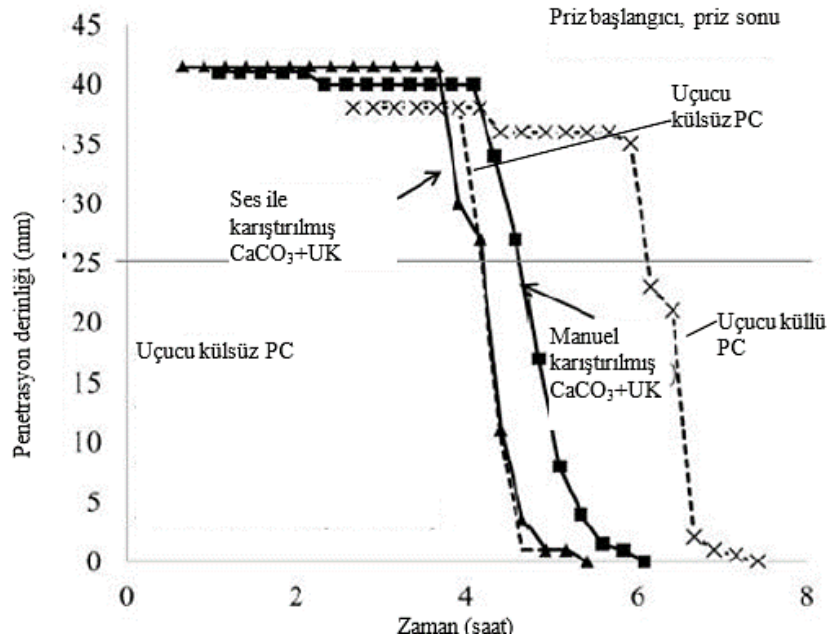
Nano CaCO_3 taneciklerinin hidrasyon miktarları, priz süreleri ve erken yaş basınç dayanım gelişimi üzerindeki etkilerinin araştırıldığı çalışmalara da rastlanmaktadır. Yapılan bir çalışmada nano CaCO_3 tanecikleri, daha iyi bir dağılım için 30 dakika süresince ultrasese bırakılmış ve %15'lik bir çözelti hazırlanmıştır. Bunun yanında sıradan bir karıştırıcıyla yapılan bir karışım da ayrı bir deney serisi olarak hazırlanmıştır. Hidrasyon oranlarını elde edebilmek için yarı adiabatik bir ortamda sıcaklık gelişimleri takip edilmiş ve elde edilen sonuçlar Şekil 2.1'de gösterilmiştir. Şekil 2.1'de nano CaCO_3 içeren numunelerin ulaştıkları en yüksek sıcaklık değerlerinin Portland çimentosu hamuruna göre daha yüksek olduğu, bu sıcaklıklara ulaşma sürelerinin ise nano CaCO_3 içeren numunelerde daha kısa olduğu anlaşılmaktadır. Grafikte ayrıca CaCO_3 ün dağıtılması için uygulanan ultrasonik yöntemin etkinliği de açıkça anlaşılmaktadır [17].



Şekil 2.1. Nano CaCO_3 kullanılması durumunda hidrasyon gelişimi [17].

Nano CaCO_3 , priz süreleri üzerinde de etkili olmuş ve uçucu küllü hamurların priz sürelerini kısaltmıştır (Şekil 2.2). Bunun yanında, Nano CaCO_3 'ün özellikle uçucu küllü harçların erken yaş basınç dayanımları üzerinde de etkili bir parametre olduğu belirtilmektedir [17].

Karbon nano fiberler ve nano tüpler, çimento esaslı kompozitlerde kullanılmaya başlanan nano donatılardır. Karbon nano fiberler donatı olarak kullanılmanın dışında bazı amaçlarla da kullanılabilirler.



Şekil 2.2. Nano CaCO_3 kullanılması durumunda priz süreleri [17].

Yapılan bir araştırmada Ali Nazari ve arkadaşları %2 oranına kadar nano TiO₂ ilave edilmiş betonlarda optimum oranın %1 olarak değerlendirilmesi gerektiği vurgulanmıştır. Eğilme ve çekme dayanım verileri karşılaştırıldığında Nano TiO₂ kullanılmayan karışıma göre daha yüksek değer elde edilmiştir.

2.2.3.1. *Titanyumdioksit (TiO₂)*

19. yüzyılın başlarında TiO₂'nin keşfiyle nanomateryaller için çeşitli alanlarda geniş yaklaşımlar geliştirilmiştir [18].

Titanyum dioksit beyaz, sentetik ve inorganik bir maddedir. Oda sıcaklığında katıdır. Titanyum dioksit aynı zamanda E171 gıda katkı maddesi koduyla bilinen bir gıda renklendiricisidir ve nem tutucu özelliğe de sahiptir. Diş macunu, sabun, tuz, un, şeker, sakız, beyaz leblebi, deterjanlar, vitaminler, şekerlemeler, karbonatlar, kimyasal ilaçlar, kabartma tozları gibi beyaz olan birçok üründe TiO₂'ye rastlanmaktadır [19], [20], [18], [21]. TiO₂ nano kristalleri, fotokataliz özelliği de taşırlar. Fotokataliz, ışık ile bazı reaksiyonların oluşmasıdır. Ultra Viyole (UV) ışığı ile TiO₂ uyarıldığı zaman kendi kendini temizleme özelliği göstererek, organik grupları parçalayan yarı iletken bir malzemeye dönüşür. TiO₂ endüstride kendine çeşitli kullanım alanları bulmuş olup, suyun arıtılma işleminde, boya sanayinde, kendi kendini temizleyen cephe ve camların üretilmesinde, fotokimyasal olarak kanser tedavilerinde ve hava temizleme işlemlerinde kullanılır. Fotokataliz belirli dalga boyundaki ışığın absorplanmasıyla elektriksel olarak uyarılan atom ya da moleküllerin kimyasal reaksiyonlarını kapsar [22], [23]. Fotokataliz uygulamasının bilinen en yaygın kullanımı çevre kirliliğinin temizlenmesidir. Böylece ışık ve uygun malzeme bir araya getirildiğinde temizleme işlemi kendiliğinden oluşmaktadır. Gündüzleri çevremizdeki UV ışık yayılımı 1 mW/cm² civarındadır. Bina içlerinde kullandığımız ışıktaki ise bu oran binde bire düşer. Bu oranda UV ışıınımları bile uygun yapıda titanyum dioksit ile bir araya geldiğinde temizleme süreci başlar.

2.3. PUZZOLANLAR

2.3.1. **Puzzolanın Tanımı**

American Society for Testing and Materials (ASTM) C 618'e göre, normalde kendi yapısı bakımından bağlayıcılık özelliği olmayan ya da çok az olan ancak uygun nem şartlarında ve normal ortam sıcaklığında kireç ile tepkimeye girip bağlayıcı özelliği olan ürünler açığa çıkaran, şekil bakımından ince toz halindeki silisli veya alüminli maddelere puzzolan

denir.

Puzolanlar içerik olarak reaktif silisyum dioksit (SiO_2) ve alüminyum oksit (Al_2O_3)’den meydana gelmiştir. Bunlardan kalan kısım demir oksit (Fe_2O_3) ve diğer oksitleri ihtiva eder [24].

Puzolan terimi, her ülkeye göre özel olarak adlandırılmış olup Almanya’da “Tras” ile anılmış, Yunanistan’da “Santorin toprağı” olarak anılmıştır. Ülkemizde ise bu tip volkanik tüf karakterli puzolanlara tras olarak adlandırılmaktadır. Son yıllarda traslı ve katkılı çimentolar önemli hale geldikten sonra puzolan ismini almıştır [24].

Puzolanları sınıflandırmak istersek doğal puzolanlar ve yapay puzolanlar olacak şekilde gruplandırabiliriz [25].

2.3.2. Puzolanların Tarihçesi

Çimentonun icadından önce, toplumlar su içinde priz alabilen suyun etkisiyle erimeyen bağlayıcı üretme çabaları eski çağlardan beri denenmiştir. SiO_2 ’li toprakların kireç ile karıştırılması durumunda bu özelliğin sağlandığı gözlemlenmiştir. Mısır’lılar tarafından eski dönemlerde pişmiş kil öğütülerek kirece katılması düşünüldükten horasan harcı yapılmıştır. Osmanlı döneminde de bu horasan harcı yaygın bir şekilde kullanılmıştır. Avrupa’da ise Romalılar, Puuzzuoli kasabasının toprağını bağlayıcı olarak kullanmışlardır. Puzolan sözcüğü bu kasabanın adından gelmektedir. Almanlar ise puzolana trans demektedir. Ülkemizde de bu deyim ile ifade edilmekte ve standartlarda yerini almaktadır [26].

2.3.3. Puzolanların Kullanımı

Beton teknolojisinde puzolanların kullanım yöntemleri, puzolanın türüne göre değişebilmektedir. Doğal puzolanlar genellikle katkılı çimento (CEM II/P, CEM II/Q, CEM II/M, CEM IV, CEM V) üretiminde kullanılmaktadırlar.

Yapay puzolan olan yüksek fırın cürufu ve uçucu külün iki türlü kullanımı mevcuttur. Birinci yöntem bu iki puzolanı katkılı çimento üretiminde kullanılması olup bu yöntem birlikte öğütme yöntemi adıyla adlandırılır. İkinci yöntem uçucu kül veya yüksek fırın cürufunun betona karıştırma sırasında ikame yâ da ilave edilmesidir ve ayrı öğütme tekniğı olarak adlandırılır.

Olabildiğince küçük boyutta öğütülmüş puzolan üç farklı yöntemle bağlayıcılık

özelliğinden yararlanılır.

1. Pozolanı doğrudan– Kalsiyum hidroksitle karıştırılarak
2. Katkılı çimento üretiminde değirmende klinker ile öğütülerek
3. Beton karışımına ilave ederek

Puzolanların kalsiyum hidroksitle direkt olarak karıştırılması yaygın bir uygulama değildir. Ancak çok eski zamanlarda bu yol yaygın olarak kullanılmıştır. Yol alt temeli ya da diğer bazı uygulamalarda kireç puzolan karışımı hala kullanılmaktadır [27].

Puzolanik malzeme aşağıdaki şartları sağlarsa yeterli bağlayıcılığı gösterebilmesi için şartları sağlamış olur [25].

Bileşiminde silika ve alümina miktarı yüksek olmalıdır. (Çimento ve beton endüstrisinde kullanılacak puzolanlardaki “ $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ ” miktarının en az %70 olması istenmektedir.)

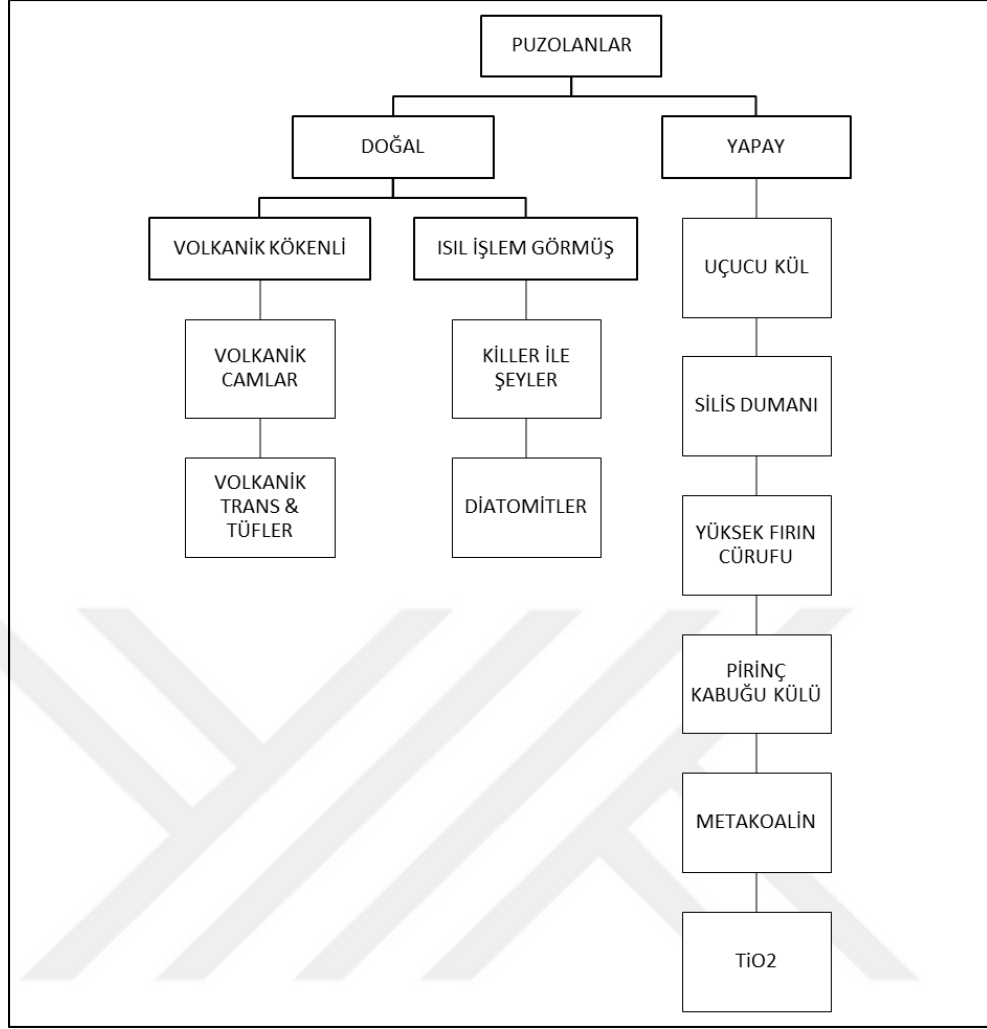
- Amorf yapıya sahip olmalıdır.
- Doğal haliyle çok ince taneli durumda veya öğütülerek en az çimento inceliği kadar ince taneli duruma getirilmiş olmalıdır.

2.3.4. Pozolanların Sınıflandırılması ve Çeşitleri

Puzolanlar doğal ve yapay olmak üzere ikiye ayrılırlar (Şekil 2.3). Doğal puzolanlar; temelde az çok değişikliklere uğratılmış, genellikle volkanik kaynaklı tortul kayalardan oluşmuş malzemelerdir. Yapay puzolanlara ise endüstriyel atık olan termik santrallerden çıkan uçucu küller, çelik üretiminde meydana gelen cüruf, silis dumanı ve pirinç kabuğu külü örnek verilebilir.

Doğal ya da yapay bütün puzolanlar, reaksiyon kapasiteleri açısından üç bileşenden meydana gelirler [24].

- Aktif tertip maddeleri: Az ya da çok değişmiş cam fazları, opal, silisli toprak, zeolitler.
- Atıl bileşenler: Zeolitlerden farklılık gösteren kristal fazları (augit, piroksen ve saf çini).
- Zararlı (istenmeyen) bileşenler: Organik maddeler, kalay ve karbon maddeleri [24], [28].



Şekil 2.3. Pozolanların sınıflandırılması.

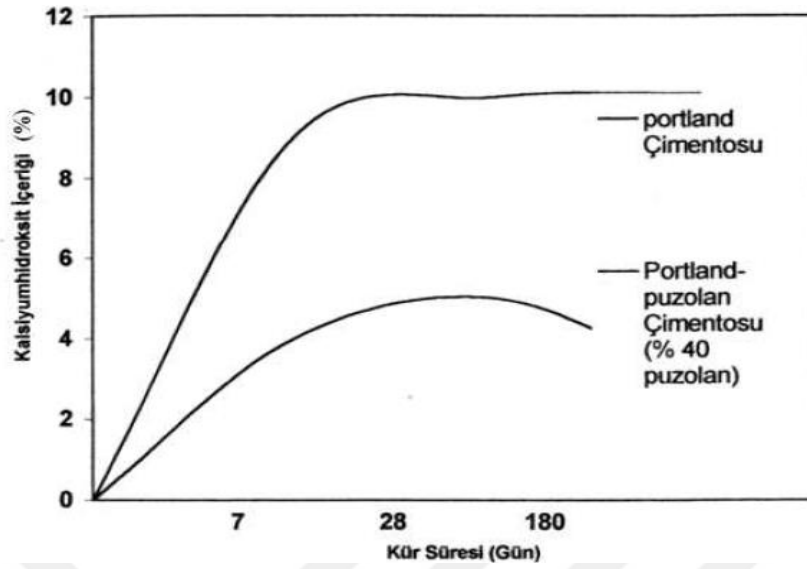
2.3.5. Pozolanik Reaksiyon

ASTM C 618 Portland çimentosu kullanımında doğal pozolanların kullanılabilmesi için içeriklerinde SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 yüzdelерinin toplamı minimum %70 ($S+F+A=0,70$) olması istenmektedir. Portland çimentosunun pozolan ve su ile karışımı sonucu, pozolanda SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 amorf ya da zayıf bir kristal yapıda mevcut olduğunda, bu oksitlerin kimyasal olarak normal sıcaklıkta, Portland çimentosundaki kalsiyum silikatların hidratasyonu neticesinde oluşan kalsiyum hidroksit ile bağlayıcılık özelliği olan bileşikler oluşturmak için tepkimeye gireceği kabulü yapılır. Sadece Portland çimentosu ve Portland-pozolan çimentosundaki kalsiyum hidroksit içeriğinin zamanla değişimi aşağıdaki Şekil 2.4’de verilmiştir [29].

$\text{C}_3\text{S} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CSH} + \text{CH}$ (Portland çimentosu hidratasyonu)

$\text{CH} + \text{S} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CHS}$ (Puzolonik reaksiyon)

CH kalsiyum hidroksit, S silikat (SiO_2), CSH kalsiyum silikat hidrat



Şekil 2.4. 1 hidrate Portland-puzolan çimentosundaki kalsiyum hidroksit içeriğinin değişimi [30].

Sıcaklık, alkaliler ve sülfatlar gibi dış etkenler puzolanik reaksiyonun hızlanmasına yardımcı olurlar [30].

2.3.6. Puzolanik Aktivite Deneyi

Puzolanik aktivite; puzolanik malzemelerin söndürülmüş kireçle ve su ile hangi ölçüde reaksiyona girebileceği, ne ölçüde bağlayıcılık sağlayabileceği olarak tanımlanmaktadır.

Puzolanik malzemenin istenilen aktiviteyi gösterebilmesi için, oldukça ince taneli olması, amorf yapıya sahip olması ve yeterli miktarda “silis + alümin + demir oksit” içermesi gerekmektedir. Puzolanik aktivite “dayanım aktivite indeksi” olarak adlandırılan bir değer hesaplanmasıyla ifade edilmektedir. Bu değer aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır [31].

$$\text{Dayanım aktivite indeksi} = \left(\frac{A}{B} \right) * 100 \quad (2.1)$$

Burada;

A= Puzolanlı harç numunelerin ortalama basınç dayanımı,

B= Kontrol harç numunelerinin ortalama basınç dayanımıdır.

Puzolanlı harç numuneler ile kontrol harç numunelerini oluşturan malzemelerin

miktarları ve deneylerin yapılma şekilleri ASTM C 311 (1994) ve TS EN 450 - 1 (2005) standartlarında belirtilmektedir [24].

Dayanım aktivite indeksinin belirli bir değerden daha az olmaması gerekmektedir. Bu değer ASTM C 618 (1994)'e göre en az 75 olmalıdır. TS 25 (1975)'te bu değer en az 70 olması gerektiği belirtilmektedir [24].

Yüksek aktiviteye sahip puzolanların aşağıdaki özelliklere sahip olduğu ampirik olarak belirlenmiştir:

- Yüksek SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 ve alkali miktarı,
- Yüksek camsı faz miktarı,
- Büyük özgül yüzey alanı.

Kullanılacak olan puzolanın kullanılabilmesi için öncelikle puzolanik aktivite testinin yapıp gerekli kriterleri sağlaması gerekir. Puzolanik aktivite deneyi mekanik ve kimyasal olarak ikiye ayrılır. Birinci yöntem mekanik deneyler için basınç ve eğilme numunesi üretilir ve teste tabi tutulur. İkinci yöntem ise kimyasal deney, burada puzolanlı çimentonun su ile yaptığı hidratasyon sonunda çözeltide oluşacak olan $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 'i saptamaya dayanır. Ayrıca puzolanların reaktivitesi spektrofotometrik ve kalorimetrik yöntemlerle de saptanabilir.

Puzolanik maddeleri değerlendirmenin bir başka kriteri, puzolan içeren çimento pastalarındaki özgül yüzeyin artış hızını ölçmekle gerçekleştirilir. Değişik kalsiyum hidroksit – emme hızlarına, benzer özgül yüzey artış hızları karşılık gelir [32].

İyi bir puzolan genelde görünüş olarak açık renklidir. Konsolide ve homojen bir yapıya sahip ve orta yoğunlukta ($2.00 - 2.30 \text{ g/cm}^3$) dır. TS 25'de puzolan – kireç reaksiyonu sonunda;

- Eğilme dayanımı 10 kg/cm^2 ,
- Basınç dayanımı 40 kg/cm^2 'den az olmamalıdır.

Kimyasal bileşimi:

- Yüksek $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$ miktarı %80 civarında
- Yüksek $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ miktarı %5 civarında
- Yüksek çözünmeyen kalıntı %80 civarında

- Kızdırma kaybı maksimum %8 civarında
- Düşük miktarda $MgO + Fe_2O_3$ %8'i geçmemeli
- Fe_2O_3 maksimum %6

Mineralojik bileşimi camsı faz miktarı yüksek (%8 ve daha fazla) alkali feldspat (ortoklas, sanidin, albit, oligoklas) miktarı yüksek, kil mineralleri (montmorillonit, kaolinit, halosit) düşük miktarda olmalıdır. Çizelge 2.1'de TS 25'e göre traslarda aranması gereken kimyasal özellikler verilmiştir [32].

Çizelge 2.1. TS 25'e göre trasta aranması gereken özellikler [32].

$SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$	En az %70
MgO	En çok %5
SO ₃	En çok %3
Rutubet	En çok %10

2.3.7. Pozolanik Katkıların Beton Özelliklerine Etkileri

Puzolanlar beton içinde çimento ağırlığının değişik oranlarında kullanılırlar. Bu oran %15'den %40'a kadar değişmektedir [24], [33]. Puzolanların taze ve sertleşmiş beton özelliklerine etkileri Çizelge 2.2 ve Çizelge 2.3'de görülmektedir.

Puzolanik aktivitesi yüksek puzolanlar ideal miktarlarda kullanılırsa betonda,

- Karışımın işlenebilirliğini uygun seviyeye getirirler.
- Hidratasyon ısını düşürürler.
- Alkali – agrega reaksiyonunun zararlı etkisini azaltırlar.
- Isıl büzülme azaltırlar.
- Kullanımı ekonomik olarak avantajlıdır.
- Puzolanlar fazla kullanıldıkları zaman zararlı da olabilirler:
- Beton karışımının su ihtiyacını artırır.
- Donma çözülme karşı direnci düşürürler.

- Priz süresi ile dayanım kazanma hızını azaltırlar.
- Kuruma büzülmesini arttırırlar [33].

Çizelge 2.2. Puzolanların taze beton özellikleri üzerine etkileri [24].

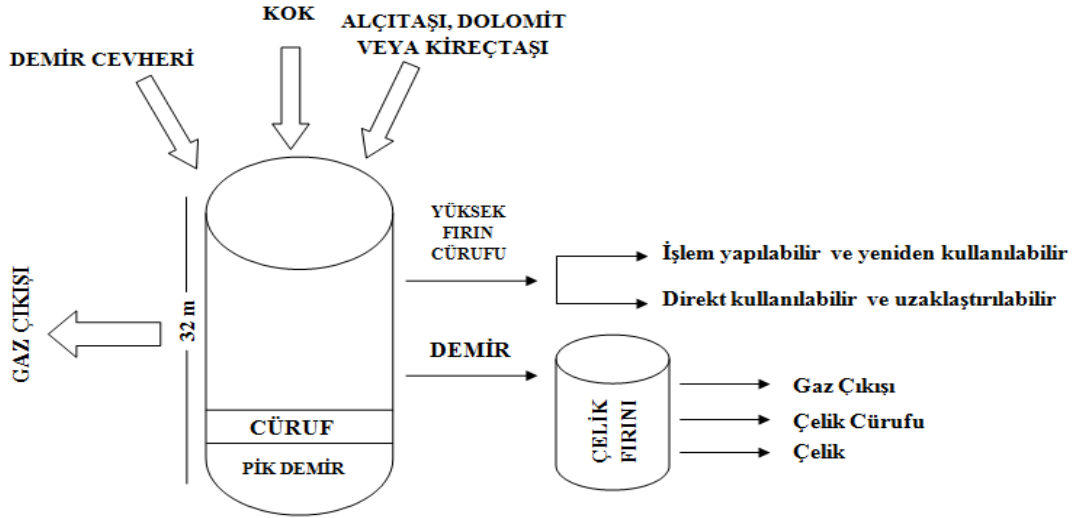
	Uçucu Kül	Cüruf	Silika Dumanı	Doğal Puzolan
Su ihtiyacı	Azalı	Azalı	Artar	Hiç-az etki
İşlenebilirlik	Artar	Artar	Azalı	Artar
Terleme, ayrışma	Azalı	Değişir	Azalı	Hiç-az etki
Hava miktarı	Azalı	Değişir	Azalı	Hiç-az etki
Hidratasyon ısı	Azalı	Azalı	Değişir	Azalı
Priz süresi	Artar	Artar	Hiç-az etki	Hiç-az etki
Mastarlanma	Artar	Artar	Değişir	Artar
Pompalanabilirlik	Artar	Artar	Artar	Artar
Plastik büzülme çatlağı	Hiç-az etki	Hiç-az etki	Artar	Hiç-az etki

Çizelge 2.3. Puzolanların sertleşmiş beton özellikleri üzerine etkileri [24].

	Uçucu Kül	Cüruf	Silika Dumanı	Doğal Puzolan
Dayanım kazanma hızı	Hiç-az etki	Hiç-az etki	Artar	Hiç-az etki
Sürtünme dayanımı	Hiç-az etki	Hiç-az etki	Hiç-az etki	Hiç-az etki
Donma-çözünme buz çözücü tuzlara karşı dayanım	Hiç-az etki	Hiç-az etki	Hiç-az etki	Hiç-az etki
Kuruma büzülmesi, sünme	Hiç-az etki	Hiç-az etki	Hiç-az etki	Hiç-az etki
Geçirimlilik	Azalı	Azalı	Azalı	Azalı
Alkali silika reaksiyonu	Azalı	Azalı	Azalı	Azalı
Kimyasal dayanıklılık	Artar	Artar	Artar	Artar
Karbonatlaşma	Hiç-az etki	Hiç-az etki	Hiç-az etki	Hiç-az etki
Beton rengi	Değişir	Değişir	Değişir	Değişir

2.4. YÜKSEK FIRIN CÜRUFU

Yüksek Fırın Cürufu (YFC) demir çelik üretim tesislerinde demir üretimi esnasında ortaya çıkan atık üründür. Demir filiz gangi, kok ve kireç taşının yanma sonrası atıkları YFC'yi meydana getirirler [34]. Şekil 2.5'de YFC'nin yüksek fırındaki oluşumu gösterilmiştir.



Şekil 2.5. YFC'nin yüksek fırındaki oluşumu [34].

Yüksek fırın cürufu, kalsiyum silikatlardan ve kalsiyum alüminatlardan oluşan metalik olmayan bir yan üründür. Pik demir üretimi sırasında; fırından çıktığında cüruf neredeyse 1400-1500°C arasındadır ve ürünün soğutma hızı özelliklerini ve gelecekteki yaşam döngüsünü belirler. Farklı soğutma hızları için ürünler aşağıdaki gibidir [35].

Agrega: Cüruf hava ile soğutulduğunda agrega oluşur. Bu ürün yol inşaatlarında veya beton agregalarda dolgu olarak kullanılabilir.

Yün: Bu ürün cüruf içerisine silisli materyallerin eklenmesiyle oluşur. Genel olarak ısı yalıtımı amaçlı kullanılır.

Granül Yüksek Fırın Cürufu: Cürufun hızlı soğutulması ile bu ürün elde edilir. Suya dökmek veya su püskürtmek işlemlerde tercih edilen iki temel yöntemdir.

Ereğli Demir Çelik fabrikasında yıllık ortalama üretilen YFC üretim miktarı 600,000 ton dur. Çelik üretimi esnasında %25 oranında cüruf atığı çıkmaktadır. İnşaat sektöründe kullanılması ile atık olan bir ürünü ekonomik değeri olan bir ürüne çevrilir aynı zamanda geri dönüşüm ile çevre kirliliği önlenmiş olmaktadır [36].

Çimento ve beton sektöründe yaygın şekilde kullanılmakta olan YFC beton üretiminde

çimentoya ikame etmek suretiyle kullanılmaktadır. YFC kullanımı ile ilgili çalışmalara bakıldığında fiziksel ve kimyasal özellikler bakımından erken yaş dayanımları yani 7 ile 28. gün arası yaş dayanımlarının düşük olduğu 28. günden sonraki yaş dayanımlarını ise yüksek olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, kullanımından kaynaklı olarak betonda priz süresini uzattığı, işlenebilirliği iyileştirdiği, terlemeyi, su geçirimsizliği, hidrasyon ısını düşürdüğü tespit edilmiştir [37], [38].

2.4.1. Yüksek Fırın Cürufunun Betondaki Kullanımı

Betonda YFC kullanılması hidrasyon esnasında ortaya çıkan ısıyı düşürmekte olup reaksiyonun agresif olmasının önüne geçerek kontrollü biçimde hidrasyon sürecini tamamlanmasına yardımcı olur. Ancak Portland çimentosu ile hazırlanan betona kıyasla erken yaşlarda daha düşük bir oranda mukavemet artışlarına yol açtığı bilinmektedir. Portland çimentosu ve su karışımı sırasında hidrasyon adı verilen kimyasal bir reaksiyon başlatılır ve kalsiyum hidroksit (CH) ile kalsiyum-silikat-hidrat (CSH) oluşumu oluşur. CSH, Portland çimentosu macunlarında kuvvet gelişimini sağlayan bir jel maddesi anlamına gelir. Öte yandan CH, sonuçta ortaya çıkan bir hidrasyon prosesi materyalidir. Cüruftaki silikatlar, ilave CSH oluşturmak için CH ile birleşir. Bu, % 100 Portland çimento sistemlerine kıyasla nihai mukavemeti artırabilen daha sert bağlayıcı ve yoğunluğa yol açabilir [35].

Üretilen taze betonlara ait çökme deney sonuçlarına bakıldığında, beton içerisindeki YFC ikame miktarı ile doğru orantılı olarak arttığı, beton karışımında yer alan YFC ikame miktarı yükseldikçe sertleşmiş betonun birim ağırlığın düştüğü, beton içerisinde YFC ikamesi ile doğru orantılı olarak betonun su emme miktarının arttığı, YFC ikame miktarına bağlı olarak beton numunelerin basınç dayanımı değerlerinde düştüğü literatürdeki çalışmalarda gözükmemektedir [39].

Yüksek fırın cürufunun karışımda kullanılması ve elde edilecek avantajların sağlanması (aşınma dayanımı –donma çözünme vs.) için öncelikle beton kütleme ve bakım şartlarının yerine getirilmesi gerekmektedir [40].

YFC malzemesinin geçirimsizliğe, yüksek mukavemete, ateşe dayanıklılığından dolayı tercih sebebidir. Beton karışımında yer aldığı işlenebilirliği artırmakta, terlemeyi azaltmaktadır ayrıca hidrasyon ısını düşürerek priz süresini uzatmaktadır.

Öğütülmüş yüksek fırın cürufunun diğer bir katkısı ise çimento-agrega ara yüzeyindeki boşlukları azalttığı, betonun durabilitesinin arttığı gözlemlenmiştir.

YFC ve UK katkılı betonların sülfata karşı dayanıklılığının irdelendiği çalışmalarda, en iyi performansı YFC kullanılan betonların gösterdiği ifade edilmiştir [36]. Sülfat dayanıklılığını yükseltmek için sülfata dayanıklı çimento ile beraber uçucu kül, YFC gibi puzolanik katkıları kullanılabilir. Puzolanlar, Ca(OH)_2 'i bağlayarak sülfatlarla reaksiyonu önlerler ve sadece Portland çimentosu kullanımı ile kıyaslandığında bağlayıcı içindeki Ca(OH)_2 ve C_3A oranının azaltılmasını sağlamaktadır [36].

Yapılan bir araştırmada mineral katkı olarak kullanılan uçucu kül, silis dumanı ve öğütülmüş YFC kullanılarak düşük ve normal dayanımlı mineral katkılı betonların rötre ve sünme değerlerini araştırmak amacı ile bir çalışma yapılmıştır. Modeller kullanılarak sünme ve rötre değerlerinin tahmin edilebilmesi üstünde çalışılmıştır. Referans numunelere göre mineral katkılı betonlar düşük dayanımlı betonlar üzerinde zamana bağlı deformasyon etkileri üzerinde belirgin bir artış olmadığı, bununla birlikte, normal dayanımlı betonların sünme ve rötre değerlerinde azalışa sebep olduğu görülmüştür [36].

Yapılan araştırmalara göre öğütülmüş YFC ve UK Portland çimentosunda farklı oranlarda ikame edilerek yüksek dayanımlı beton üretilmiştir. Bu numunelerin basınç dayanımı, H_2SO_4 direnci ve mikro yapısı araştırılmıştır. Öğütülmüş yüksek fırın cürufu numunelerinin basınç dayanım gelişimi uçucu küle göre daha hızlı olmuştur.

Uçucu kül ve yüksek fırın cürufunun süper akışkanlaştırıcı katkılı betonların özelliklerine etkileri incelendiğinde çeşitli oranlarda ikame yapılarak basınç dayanımına bakıldığında uçucu küllü numunelerde %10, yüksek fırın cürufunun kullanıldığı numunelerde %20 oranında ikamenin en yüksek basınç dayanımı verdiği görülmüştür.

YFC'nin parke ve bordür üretiminde agrega ile yer değiştirdiğinde basınç dayanımlarında bir miktar düşüş olsa da, donma-çözünme ve aşınma dayanımı gibi özelliklerini geliştirdiği görülmüştür.

Üretilen parkelerde basınç dayanımı, donma-çözünme, ağırlıkça su emme, yüzey aşınması, bordürlerde ise aşınma ve eğilme dayanımı deneyleri yapılmıştır. Deneyler sonucunda parke numunelerde YFC ile ince agreganın yer değiştirmesi sonucu basınç dayanımlarında bir miktar düşüş olsa da, donma-çözünme ve aşınma dayanımı gibi özelliklerini geliştirdiği görülmüştür. Aynı durum bordür numunelerde de görülmüştür.

Dayanım bakımından erken yaşlarda ve 28. günün sonunda YFC'nin, UK'ye göre daha iyi performansa sahip olduğu görülmüştür.

Yazıcı [41], yaptığı çalışmada PÇ 42,5 çimentosu kullanılarak hazırlanan ve değişik oranlarda yüksek fırın cürufu içeren harçların sodyum sülfat çözeltisinde farklı koşullarda bekletildiklerinde yaptıkları genleşmeler ve basınç dayanımındaki değişimler incelenmiştir. Numuneler ASTM C 1012'ye uygun olarak hazırlanmış ve bunlardan bir kısmı 6 ay boyunca 150 g/l Na₂SO₄ çözeltisinde bekletilmiş, bir kısmı ise aynı çözeltide ıslanma kuruma çevrimine tabi tutulmuştur. Buhar kürü geçirmiş (60 °C'de 9 saat) numuneler için de deney programı tekrarlanmış ve elde edilen sonuçlar suda kür edilen numuneler ile kıyaslamalı olarak verilmiştir. Çimento yerine YFC kullanımının erken dayanımı düşürdüğü tespit edilmiştir. Tüm karışımların sülfat etkisinde dayanımlarının düşmesine rağmen YFC kullanılan numunelerde bir miktar dayanım artışı görülmüştür.

Akperov ve Akyüz 2006 yılında yaptığı çalışmasında, normal ve düşük dayanımlı, katkısız ve mineral katkılı betonların sünme, temel sünme ve rötre deformasyonlarını incelemişlerdir. Rötre ve sünme tahmin modellerini kullanarak elde edilen sonuçların deneysel olarak elde edilenlere uygunluğunu belirlemiştir. Mineral katkılar olarak SD, YFC ve UK kullanmışlardır. Şahit betondan ve mineral katkılı betonlardan elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında, mineral katkıların düşük dayanımlı betonlarda zamana bağlı deformasyonu üzerinde bir etkisi olmadığını ancak normal dayanımlı betonlarda sünme ve rötre değerlerinde düşüşe neden olduğu belirlenmektedir. Rötre tahmin sonuçları ile deneysel sonuçlar arasındaki farkların kabul edilebilir sınırlar içerisinde olduğu ancak sünme değerlerinin kabul edilir sınırları aştığı tespit edilmiştir.

Şengül ve ark. [42], çalışmalarında UK ve YFC'nin beton özellikleri üzerinde ki etkisini incelemişlerdir. Bir grup betonda Portland çimentosu uçucu kül ile yer değiştirirken, diğer bir grup betonda da YFC ile yer değiştirilmiştir. Çalışmanın yüksek fırın cürufu kullanılan kısmında sabit su/çimento oranında % 40, %60 ve % 80 oranlarında ikame edilmiştir. Betonlara klor iyon geçirimsizliği ve elektriksel özdirenç deneyleri yapılmıştır. Sonuç olarak betonun klor iyon geçirimsizliği önemli oranda azalırken, elektriksel özdirençleri sadece Portland çimentosu kullanılan betonlara göre önemli oranda arttığı gözlenmiştir.

YFC'nin terleme ve hidratasyon hızını azalttığı, taze betonun işlenebilirliğini arttırdığı, bununla beraber sertleşmiş betonda ise durabilite değerlerini yükselttiği bilinmektedir. Literatüre bakıldığında gözüken şu ki özellikle soğuk hava koşullarında betonun priz alma süresinin uzamasına, erken yaş dayanımında dayanım kazanma hızının yavaşlamasına neden olduğu belirtilmiştir.

2.5. METAKAOLİN

Saflaştırılmış kaolin kilinin kalsine edilmesiyle üretilen MTKL, beyaz renkli, amorf yapılı bir alumina silikattır. 100–200 °C civarında kil mineralleri adsorbe sularını kaybederler. Kaolin kilinin dehidrolize olarak suyunu kaybettiği sıcaklık ise 500–800 °C (diğer bir kaynağa göre 700–900 °C) aralığındadır. Bu sıcaklıkta kaolin bağlı suyunun %14'ünü kaybeder ve metakaoline dönüşür. Dönüşüm sonucunda, alumina ve silika tabakaları, kristal yapılarındaki düzeni kaybeder, böylece kaolin, amorf ve kimyasal olarak reaktif bir yapı kazanır. Metakaolin oldukça amorf bir yapıya sahiptir. Kaolin kili aşırı miktarda sıcaklığa maruz kalırsa (900 °C üstünde) mullit fazı oluşur ve reaktif özelliğini kaybeder. Başarılı bir ısıtım işlem uygulanması halinde yüksek oranda puzolanik özelliğe sahip amorf fazlı metakaolin elde edilir [43].

MTKL, saf haldeki kaolinin veya kaolinit kilinin yakılması ve sonrasında öğütülmesi ile elde edilen reaktif alümino-silikat puzolandır. Kimyasal açıdan bakıldığında, MTKL'nin temel bileşenleri SiO_2 ve Al_2O_3 tür. Bununla birlikte Fe_2O_3 , TiO_2 , Na_2O ve K_2O de küçük miktarlarda bulunur. Fayda sağlayan en önemli bileşenler çoğunlukla MTKL'nin kimyasal bileşimindeki SiO_2 ve Al_2O_3 içeriği ile ilgilidir. MTKL, çok düşük geçirgenlik veya çok yüksek mukavemetin gerekli olduğu özel uygulamalarda kullanılır.

MTKL yüksek oranda reaktif bir puzolan olduğundan, uygulaması harç ve betonun dayanıklılığını artırır. MTKL, çimentolu bir malzeme değildir, normal sıcaklıkta ve suyun varlığında kireçle reaksiyona girerek, hidrolik özelliklere sahip kararlı çözünmeyen bir bileşik oluşturur. Dayanım, dayanıklılık, erken yaş davranışını iyileştirir ve çimento üretimine kıyasla düşük işlem sıcaklıkları nedeniyle sürdürülebilirliğe katkıda bulunur [44].

Beton ve harç dayanım özellikleri doğrudan malzemenin hidratasyon ürünlerinin tipine, şekline, boyutuna ve dağılımına bağlıdır. Ayrıca, bu malzemelerde Portland çimentosuna MTKL eklenmesinden kaynaklanan değişiklikler, birçok yayında incelenmiştir [44]. MTKL'nin kısmen Portland çimentosu yerine kullanılmasının ilk sonucu 1962'de Brezilya'daki Jupia barajının yapımında gösterildi. MTKL kullanımının amacı betonun dayanıklılığını arttırmaktı. O zamandan beri, çimento ve betonda MTKL kullanımında kayda değer bir artış olmuştur. Günümüzde Portland çimentosu, harç ve betona metakaolinin eklenmesi, yüksek performanslı beton ve harçların üretilmesine yardımcı olmaktadır [44].

2.5.1. Metakaolinin Betondaki Kullanımı

Metakaolinin, yapılabirlik ve işlenebilirlikte gelişme açısından büyük etkisi vardır, aynı zamanda uygun miktarda süper akışkanlaştırıcı ile birlikte kullanıldığında taze betonun bitiminde ve pompalanmasında enerji ve zaman tasarrufu sağlar. Brooks ve ark, betonda %15 MK kullanıldığında %30'luk bir düşüş ve %20'lik ayar sürelerinde gecikme gözlenmiştir. MK kullanımının betonun ilk ayar süresi için hızlandırıcı bir etkiye sahip olduğunu; ancak son ayarlanan zamanı etkilemeyecektir. Moulin ve diğ. [44], farklı MK tiplerinin %20'sinin kullanılmasının, başlangıçtaki ayar zamanında %0-95 aralığında ve son ayar süresi için %14-64 aralığında gecikmeye neden olduğunu gözlemlemiştir. Tutarsızlıklar farklı tip MK'lerin inceliği, kullanım yüzdeleri ve farklı testlerde kullanılan farklı akışkanlaştırıcıların performansından kaynaklanmaktadır.

Metakaolin (MTKL), son dönemde yüksek performanslı çimento bazlı malzemelerin imalatında kullanılmaya başlanan bir mineral katkıdır. Silis dumanıyla (SD) rekabet edebilecek özelliklere sahip olması, MTKL ile ilgili araştırmalara hız kazandırmıştır. MTKL'in çimento esaslı malzemelerin dayanım ve durabilite özellikleri üzerinde üç önemli etki mekanizması vardır. Bu etkiler; filler etkisi, Portland çimentosunun hidratasyonunu hızlandırması ve puzolanik reaksiyon yapması olarak sıralanabilir [45].

MTKL'nin çalışma prensibi diğer puzolanlarda olduğu gibi kalsiyum hidroksitle tepkimeye girerek çimentoya ilave bağlayıcı özellik kazandırır. Yapılan literatür taramasında MTKL'in çimento yerine uygun oranlarda kullanıldığında, mekanik özellikleri olumlu etkilediği [46], kılcal su emmeyi ve permeabiliteyi azalttığı [47], durabiliteyi arttırdığı [48], çiçeklenmeyi kontrol etmede etkili olduğu ve özellikle alkali silika reaksiyonu oluşumunu azalttığı rapor edilmiştir [49], [50]. Öte yandan MTKL kullanımı ile betonda kuruma rötresi ve sünmenin azaldığı tespit edilmiştir [51].

Metakaolin yapısında yüksek oranda SiO_2 ve Al_2O_3 bulunduran bir malzemedir. Metakaolinin yapısında bulunan silis ve alüminin çimentonun hidratasyonu sonucu oluşan Ca(OH)_2 ile reaksiyona girerek yeni kalsiyum silikat hidrat (CSH) yapılar ve alümina içeren fazlar (C_4AH_{13} , C_2ASH_8 , C_3AH_6) oluşturur. Bu oluşan ürünler sayesinde üretilen beton veya harçlarda mekanik özelliklerde ve dayanıklılıkta artışlar görülür [52]–[55].

Literatürde yapılan araştırmalar incelendiğinde MTKL'nin çimento ile belirli oranda yer değiştirmesi sonucu, mekanik özellikleri pozitif etkilediği, kılcal su emmeyi ve permeabiliteyi azalttığı, durabiliteyi arttırdığı, çiçeklenmeyi kontrol etmede etkili olduğu ve özellikle alkali silika reaksiyonu oluşumu riskini düşürmektedir [56].

MTKL'nin kullanımına yönelik çalışmaların geneli optimum miktarda kullanımına yönelik yapılan çalışmalardır. Çimento içerisine ikame oranları ile beton karışım içerisindeki ikame oranları ile yapılan çalışmalar günümüzde halen [57].

MTKL beton imalatında genel olarak çimento yerine ağırlıkça %10 ile 20 arasındaki değerlerde kullanılmaktadır. Beton veya harçlarda MTKL kullanımı avantajlarından bahsederek; harçların basınç, yarmada çekme ve eğilme dayanımlarını artırdığı, büzülmeyi azalttığı, donma-çözünme direncini yükselttiği, geçirgenliği düşürdüğü, kimyasal tepkimelere karşı dayanıklılığı artırdığı, alkali silis reaksiyonu (ASR) gelişimini azalttığı, daha yoğun bir beton elde edilmesine olanak tanıdığı, değişik araştırmacılarca rapor edilmiştir [47], [52]–[54], [58], [59]. Bununla beraber, yine bazı araştırmacıların, metakaolinin işlenebilmeyi artırdığını, daha düzgün bir yüzey elde edilmesine olanak sağladığını ve çiçeklenmeyi azalttığını da ifade ettikleri görülmektedir [54], [59]. Yine yapılan çalışmalarda çimento yerine %15 'e kadar değişen oranlarda metakaolin ikameli çimento harç ve hamurlarında, puzolanik reaksiyonun 14 güne kadar hızlı bir şekilde geliştiği, bunun sonucunda dayanımın yükseldiği ve çimento hamurundaki boşluk yapısında iyileşmeler görüldüğü belirtilmektedir. 14 günden sonraki kür sürelerinde ise; puzolanik reaksiyonun artış hızının kayda değer bir şekilde azaldığı, dolayısıyla buna bağlı olarak basınç dayanımındaki artışın da yavaşladığı değişik araştırmacılarca ifade edilmiştir [47], [60]–[62]. Metakaolinin mineralinin beton veya harçlarda dayanım ve durabiliteye faydasında üç mekanizmanın etkisinin olduğu bilinmektedir. Bunlar: çimentonun hidratasyonunu hızlandırması, puzolanik reaksiyon yapması ve filler etkisi ile boşlukları tıkayarak doluluğu artırmasıdır [47], [60], [63].

MTKL, dış cephelerde sızdırmazlık ve beyaz görünüm amaçlı amorf tanecikli nano alumino–slikat, silis dumanı özelliklerini gösteren bir malzemedir, ASTM -618 'e uygun olarak satılmaktadır.

Yüksek ve ultra yüksek dayanımlı betonlarda, nükleer atık depolama, darbeye dayanıklı askeri yapılar, yangına dayanıklı çok katlı yapılar ve betonarme köprüler için kullanılması önerilen ürünlerden biridir. Metakaolin ile üretilen betonlar normal dayanımlı betona göre

çok daha yoğun ve homojen malzemelerdir.

2.6. ÇİMENTOLAR

2.6.1. Çimentonun Tanımı

Çimento, yapı malzemesi alanında en yaygın olarak kullanılan hidrolik bir bağlayıcıdır. Ana oluşumuna bakarsak kil ve kirecin pişirilip birleştirilmesiyle oluşur. Agrega ile homojen bir şekilde karıştırıldığında ve su ile karışınca harç - betonun oluşmasını sağlayan bir malzemedir [25].

2.6.2. Çimentonun Tarihçesi

Çimentonun tarihine bakarsak ilk doğal çimento üretimi 18. yüzyılda yapıldığı bilinmektedir. 1756 yılında John Smeathon isminde bir İngiliz kireç ve bazı puzolanları kullanarak bağlayıcılığı iyi bir ürün elde etmiştir ancak bu yapılan icat duyulmamıştır. 1796 yılına kadar bu süreçte birçok kez deneme yapılmış ancak ilk çimento patentini Joseph Parker almıştır. İlk zamanlarda adı “Parker’ın Çimentosu” olsa da sonradan “Roma Çimentosu” olarak isimlendirilmiştir [25].

Josheph Aspdin adında bir İngiliz 1824 yılında Portland çimentosunun icadını gerçekleştirdi. Kendisi duvar ustası olan Aspdin, 1800’lü yılların başında yollardaki taş tozlarını toplayıp kil ile birleştirip pişirerek bağlayıcı üretmeye başladı. Ürettiği ürünün 1824 yılında patentini aldı ve ‘Portland Çimentosu’ adını verdi [64].

Ülkemizde çimentonun üretimi ve gelişimi diğer ülkelere göre geç olmuş olup ilk çimento fabrikası 1911 yılında Darıca’da kurulmuştur. Daha sonra Arslan çimento adı altında Eskişehir ikinci fabrika kurulmuştur [64].

2.6.3. Çimento Üretiminde Kullanılan Hammaddeler

Çimentonun ilkel maddeleri kalker (kireçtaşı) ve kildir. Kalkerli malzemeler olarak; kireçtaşı ve marn, killi malzemeler olarak bol silisli kil, şist gibi hammadde kaynakları kullanılır. Çimento yapımında bu maddeler belirli oranlarda karıştırılır ve döner fırınlarda yüksek sıcaklıklarda pişirilir. Yüksek sıcaklıkta kalkerin ayrışması sonunda (CaO), kilin ayrışması sonunda silis (SiO_2), alümina (Al_2O_3) ve demir oksit (Fe_2O_3) oluşur. Bu maddeler yüksek sıcaklıkta yine aralarında birleşerek çimentonun esas bileşenleri olan ve çimentoya bağlayıcı özelliğini kazandıran silikat ve alüminatları oluşturur [31], [65].

İnce bir şekilde öğütülerek uygun oranlarda bir araya getirilen kalkerli (kireçtaşı, marn) ve killi (içerisinde önemli miktarda silis bulunan kil, şist, kum gibi) hammadde karışımı, eksen etrafında yavaşça dönen (60-180 devir/saat) yaklaşık %3-4 eğimle yatay olarak yerleştirilmiş, boy çap oranı 15-30 civarında olan, silindir şeklindeki döner fırınlarda 1350-1450 °C civarında ısıtılma işleminden geçirilirler.

Fırın içerisinde pişirilen hammaddeler, uygulanan sıcaklığın etkisiyle, kimyasal olaylar sonucunda klinker denilen ürünün oluşmasını sağlarlar. Döner fırından çıkan klinker soğutulduktan sonra, öğütülerek ince bir forma sokulur. Klinkerin öğütülmesi esnasında bir miktar (%3-%6 mertebesinde) alçıtaşı eklenerek öğütme işlemi birlikte yapılır. Elde edilen ürüne Portland çimentosu adı verilir [66].

2.6.4. Çimento Türleri

Çimentoları sınıflandırmak istersek kullanılan hammadde miktarına ve üretim yöntemine sınıflandırabiliriz. Ülkemizdeki standartlardan yola çıkarak aşağıdaki gibi sınıflandırma yapabiliriz.

- Portland çimentoları
- Yüksek fırın cürufu çimentolar
- Beyaz Portland çimentosu
- Harç çimentosu
- Traslı çimento
- Uçucu küllü çimento
- Süper sülfat çimentosu
- Erken dayanımı yüksek çimento
- Katkılı çimento

2.6.5. Beyaz Portland Çimentosu

Beyaz Portland Çimentosu: "Kireçtaşı ile piştiğinde beyaz olan bir kil ve bir miktar alçı taşıyla birlikte öğütülmesi sonucu elde edilen ve ana hatlarıyla Portland çimentosunun bütün özelliklerine sahip olan bir hidrolik bağlayıcıdır. Süsleme amacı ile ve genellikle iç ve dış harçlarda kullanılan bu çimento, beyaz rengi sağlayan kimi özellikler dışında, Portland çimentosunun aynıdır. Portland çimentoya göre daha pahalı olan beyaz Portland

çimentosunun hammaddesinde, demir ve mangan oksitleri gibi boyar maddelerin bulunmamasına çalışılır veya bunlar, renk vermeyecek şekilde işlenirler. Diğer renkli çimentolarda, içinde genellikle % 5 - 10 arasında boyar madde bulunan beyaz çimentonun öğütülmesi ile elde edilirler.

Dekoratif amaçlı ve katkısız bir çimento olan beyaz Portland çimentosu üretim teknolojisi, Portland çimentosu klinker üretiminde olduğu gibidir. Fakat hammadde içinde demir ve mangan gibi renk verici bileşenlerin bulunmaması gerekir. Klinker içine kül karışmaması için fırında yakıt olarak kömür yerine fueloil veya doğal gaz kullanılır. Portland çimentosu üretiminde hammadde içinde demir oksit bulunması klinkerin pişirilmesi sırasında akıcılık sağlar. Beyaz çimento üretiminde bu görevi yerine getirmek için hammadde içine sodyum alümina florür katılır. Ayrıca beyaz çimento üretiminde bir diğer farklılık, renk bozulmasını önlemek için Beyaz Portland çimentosunun öğütme işlemi çelik bilyalı değirmenler yerine nikel-molibden bilyalı değirmenler kullanılır. Bu farklılık doğal olarak maliyeti arttırır. Maliyet Portland çimentonun yaklaşık iki katıdır. Üretim için hammadde olarak propillit ve/veya kaolen kullanılır.

2.7. AGREGALAR

Beton agregası beton veya harç yapımında çimento ve su karışımından oluşan bağlayıcı malzeme ile birlikte bir araya getirilen inorganik doğal veya yapay malzemenin çoğunlukla 100 mm'yi geçmeyen (yapı betonlarında genellikle 63 mm'yi aşmayan) büyüklüklerdeki kırılmış veya kırılmamış tanelerin oluşturduğu bir yığındır. Agregalar genel anlamda tane şekline, özgül ağırlığına ve tane büyüklüğüne göre sınıflandırılmaktadır (TS EN 196-1 2002).

Beton içerisinde hacimsel olarak %60-75 civarında yer kaplayan agregası, beton için önemli bir bileşendir. Tane çapı 4 mm'den küçük olan agregalara "ince agregası", tane çapı 4 mm'den büyük olan agregalara ise "iri agregası" adı verilir.

Betonun içerisindeki agregalarının kalitesi, tanelerin yüzeylerindeki durumu, tanelerin biçimi, granülometrisi ve fiziksel özellikleri ile ilgilidir. Üretilen betonda agregalar ile çimento hamuru arasında büyük bir bağ kuvvetinin bulunması yani kuvvetli bir aderansının olması betonun mekanik mukavemetin yüksek bir değer almasına yardımcı eder. Burada aderansa pozitif anlamda etki eden agregası yüzeyindeki pürüzlülüğüdür. Yüzeydeki girinti ve çıkıntılar çimento hamuru ile dolması sebebiyle ayrılmalar zorlaşır,

aynı zamanda da betonun mukavemetini arttırır. Agregatanelerinin biçimi olarak en uygun tip tanelerin küre veya küp şeklinde olmasıdır. Uzun ve yassı tip taneler agregaların ve dolayısıyla ortaya çıkan betonun doluluk oranını azaltıp, mukavemetinin düşmesine sebep olur [67].

Uygun kalite veya istenen kalitede beton elde etmek için betonda yapımında kullanılan agreganın fiziksel ve kimyasal özelliklerinin çok iyi bir şekilde bilinmesi gereklidir. Genel olarak kütlece ağır yani özgül ağırlığı fazla olan, agregaların mukavemeti ve dayanıklılığının da fazla olduğu görülmüştür. Agregada dayanımı çimentodan az olursa, üretilen betonun gücü, çimento dayanımına ulaşılmadan, agreganın parçalanması ile tükenecektir. Bu durumda kullanılan karışım oranlarında değişime gidilmesi veya çimento dozajını arttırarak dayanımı artırmak imkânsız olacaktır [68].

2.7.1. Agregaların Sınıflandırılması

Türk Standartları Enstitüsü tarafından agregalar aşağıda belirtildiği gibi sınıflandırılmaktadır (TSE, 2003):

- a) Agregat (kum-çakıl): Doğal, yapay veya her iki cins yoğun mineral malzemenin, çoğunlukla 100 mm'ye kadar farklı boyutlardaki kırılmamış ve/veya kırılmış tanelerin bir yığıdır.
- b) Doğal agregat: Nehirlerden, teraslardan, denizlerden, taşocaklarından ve göllerden elde edilen kırılmış veya kırılmamış yoğun yapıslı agregadır.
- c) Yapay agregat: İzabe cürufu, yüksek fırın cüruf taşı veya yüksek fırın cüruf kumu gibi sanayi ürünü olan kırılmış veya kırılmamış yoğun yapıslı agregadır.
- d) İri Agregat: 4 mm açıklıklı kare delikli elek üzerinde kalan agregat olup kendi içerisinde çakıl, kırma taş ve yapay taş olarak 3' e ayrılır.
- e) İnce Agregat: 4 mm açıklıklı kare delikli elekten geçen agregat olup kendi içerisinde kum, kırma kum ve yapay kum olarak 3' e ayrılmaktadır.
- f) Taş Unu: 0,25 mm açıklıklı kare delikli elekten geçen ince malzemedir.
- g) Karışık Agregat: İnce ve iri agreganın karışımıdır ve doğal karışık agregat, hazır karışık agregat ve yerinde karışık agregat olarak sınıflandırılır.

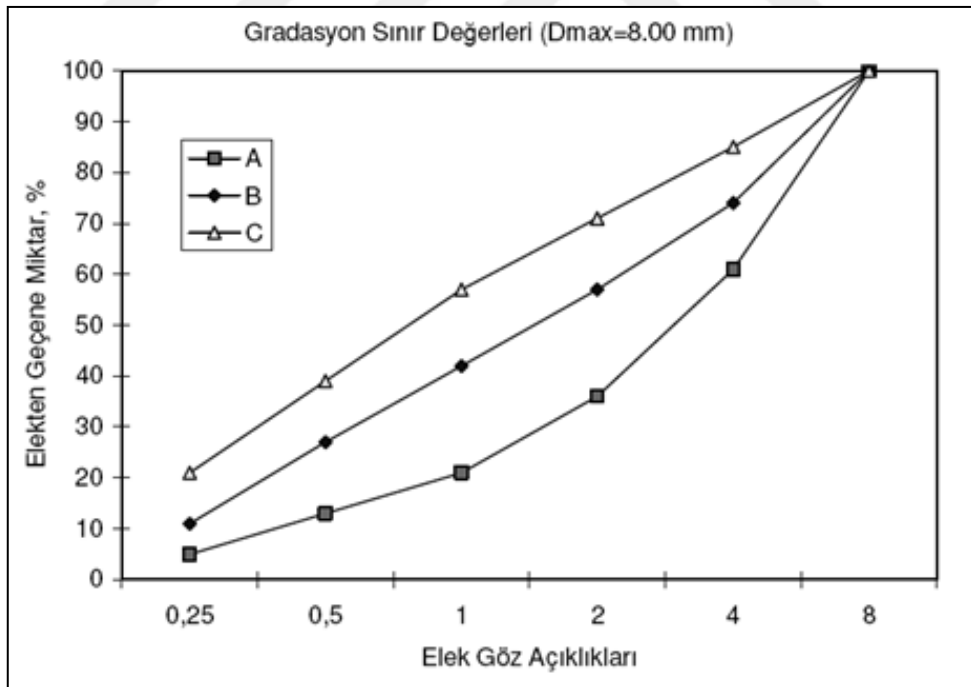
2.7.2. Agrega Granülometrisi

Agrega granülometrisi, agreganın tane dağılımını belirtir. Bir agregaya yığnında granülometri, tanımlarda belirtilen farklı elekler yardımıyla elde edilir. Elek analizi TS 3530'a göre yapılır.

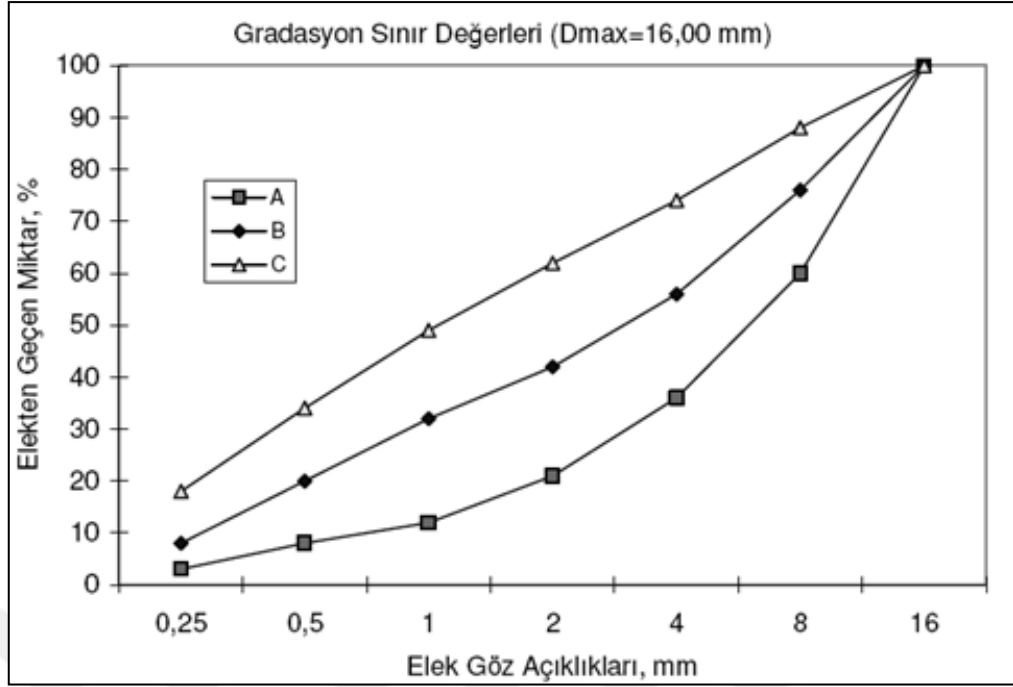
En büyük agrega tane boyutu,

- Betonarme yapılarda: 16 -32 mm
- Yol ve hava meydanlarında: 32 – 90 mm
- Barajlarda: 90 – 250 mm olarak seçilebilir.

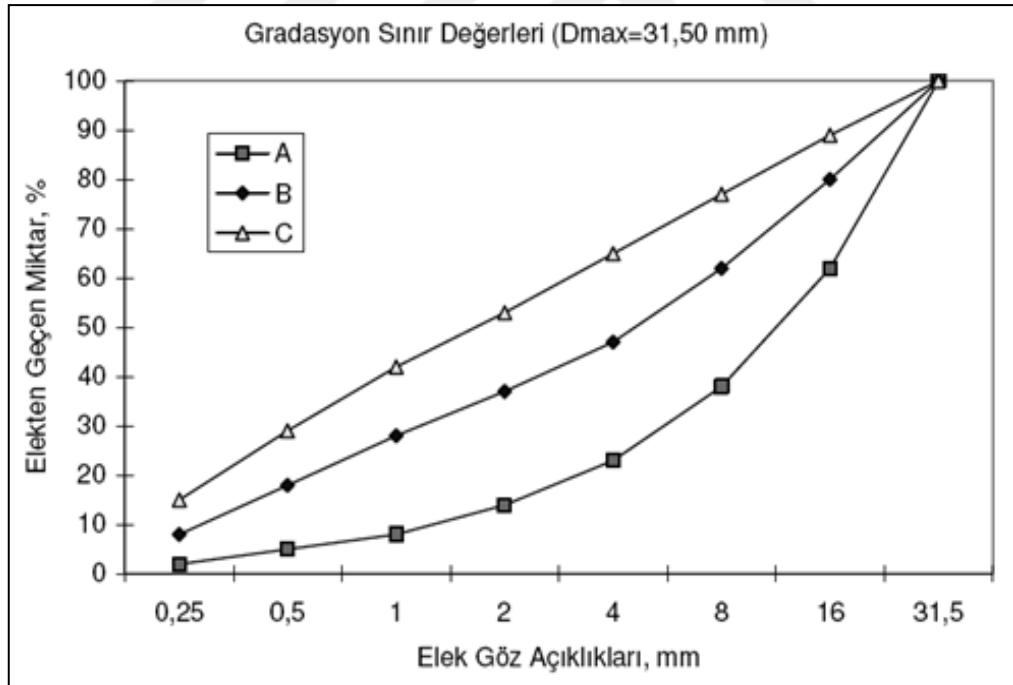
Beton üretiminde kullanılacak agregaların karışım granülometrisi “ideal granülometri” ile örtüşmeli veya ideal bölgeler olarak belirtilen bölgeler dışında kalmamalıdır. TS 706'ya göre en büyük agrega tane boyutuna bağlı olarak kabul gören referans eğrileri tanımlanır. A – B arası “En iyi”, B – C arası ise “Kullanılabilir” bölgelerdir. Diğer yandan, granülometrisi A ve C eğrileri dışında kalan agrega, beton üretiminde kullanılmamalıdır (Şekil 2.6, Şekil 2.7, Şekil 2.8 ve Şekil 2.9).



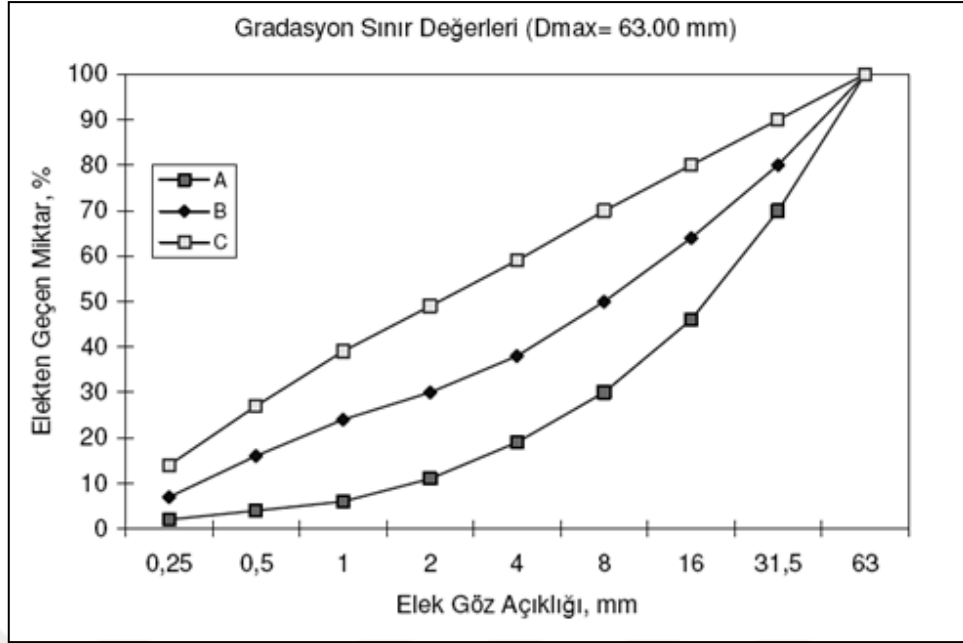
Şekil 2.6. Maksimum tane boyutu 8,00 mm olan agrega numunelerinin Türk Standardına göre gradasyon sınır değeri.



Şekil 2.7. Maksimum tane boyutu 16,00 mm olan agrega numunelerinin Türk Standardına göre gradasyon sınır değeri.



Şekil 2.8. Maksimum tane boyutu 31,5 mm olan agrega numunelerinin Türk Standardına göre gradasyon değerleri.



Şekil 2.9. Maksimum tane boyutu 63,00 mm olan agreganın Türk Standardına göre gradasyon sınır değerleri.

Granülometrinin ideal bölgede kalmasıyla, kompakte (doluluk) oranı yükselir, boşluklar azalır ve böylece boşlukları doldurmak için daha az miktarda bağlayıcı çimento kullanılarak ekonomik çözüm üretilir. Bunun yanında betonda agreganın yüzeylerini ıslatmak için ihtiyaç duyulan su da azalmış olur. Agreganın istenilen oranlardaki tane dağılımında olmaması durumunda, mevcut agreganın ile bir farklı agreganın uygun oranlarda karıştırılarak, yeni ve uygun gradasyona sahip tek bir numune elde edilmesi mümkündür. Bazen ikiden çok agreganın bir araya getirilerek uygun gradasyondaki agreganın üretilmesi sağlanabilmektedir. Gradasyon değerleri bilinen numunelerden uygun görülen agreganın elde edilmesi hesaplama ile veya grafiksel yaklaşım sonucuyla bulunabilmektedir.

2.7.3. Bazalt Agregası Ve Genel Özellikleri

Türkiye’de oldukça geniş alanlarda yüzeylenen bazaltlar, dünyada alternatif agreganın olarak çoğunlukla kullanılmaktadır. Bu konu kapsamında yapılan bazı araştırmalar, bazaltların dayanımlı olmaları sebebiyle betonun kalite ve dayanımını yükselttiğini ortaya koymuştur [69], [70].

Bazalt, petrografi bilim dalına göre makroskopik yönden ince taneli masif yapıda zor kırılabilir ve koyu gri-siyah renkli özelliğindedir. Mikroskop altında ise, piroksen, iri taneli olivin, plajiyoklas kristalleri ile bunların etrafını çevreleyen ince kristalli, mikrolitli girift

dokusu altında matriks yapı gözlenir. Kimyasal açıdan ise, %45-52 arasında SiO₂ (Silis), yüksek demir ve magnezyum içeren bazik bileşimli kayaç olarak tanımlanır [71].

Bazaltın siyah renkli olması, yapısındaki manyetitten ileri gelir. Yapısında, volkan camının daha yoğun bulunduğu bazaltlar, holokristalin bazaltlara göre koyu kahverengi ve siyah renktedir. Taze kırılmış yüzeyleri, mat bir görünüme sahiptir. Krolitleşme ve epidotlaşmaya bağlı olarak, yeşilimsi renkler de meydana çıkabilir. Demir içeren minerallerin oksidasyonu ile kahverengi, kırmızımsı kahverengi bir renk de alabilirler [72], [73].

Bazaltın içindeki silis miktarı arttıkça, sertlikleri de artmaktadır [73]. Bileşiminde bulunan demir, ona ağırlık kazandırmaktadır [74]. Basınca karşı direnci bazalt türlerine göre değişir, basınç dayanımı genellikle 1100-3500 kg/cm² arasında bulunsa da, bazen 5500 kg/cm² kadar yükselebilmektedir [74].

İnşaat sektöründeki büyüme ve gelişme, yol yapımının hızlanması ve benzeri nedenler agrega gereksiniminde büyük artışlara neden olmuştur. Günümüzde hammadde kaynaklarına yakınlık ve ulaşım kolaylığı, yapı sektörünün en önemli sorunlarından biridir. Bu gibi nedenlerin yanında, mekanik özellikleri nedeniyle bazaltlar, bina ve yol yapılarında kırma taş olarak kullanılmaktadır. Özellikle dayanım özelliklerinin yüksek olmasından dolayı, demiryolu balastında da kırma taş olarak bazalt kullanılmaktadır.

Bazaltların kırma taş olarak bina ve yol yapılarında kullanımının dayanımı artırdığı; örneğin, basınç dayanımını 2000-2500 kg/cm² daha yükselttiği yapılan çalışmalarda tespit edilmiştir [71].

Giaccio [75] bazalt, granit ve kireçtaşı kullanarak yüksek mukavemetli betonlar üzerinde yaptıkları çalışmada daha yüksek rijitliğe sahip agregaların daha düşük dayanıma yol açmadığını, agrega-çimento hamuru bağ dayanımının eğilme durumunda basınca göre daha önemli hale geldiğini, yüksek dayanımlı betonlarda agrega özelliklerini etkisinin arttığını savunmuşlardır. Araştırmacılar, ürettikleri numunelerde süreksizlik ve çözülme sınırlarını da incelemişlerdir. Deney sonuçlarına göre çözülme sınırının kullanılan agrega türünden etkilendiğini, süreksizlik sınırının ise agrega türünden bağımsız olarak neredeyse sabit olduğunu ileri sürmüşlerdir. Yüksek dayanımlı betonlarda matris dayanımının agrega dayanımına yakın olmasından dolayı çatlakların agrega içinden geçme olasılıklarının artacağı ve normal betona göre kırılma mekanizmasının değişeceğini belirtmişlerdir.

3. MATERİYAL VE METOT

3.1. MATERİYAL

Bu çalışmada, MTKL, YFC, TiO_2 , çimento, bazalt agregası, kullanılarak üretilen beton örnekleri araştırma materyalini oluşturmuştur.

3.1.1. Agregası

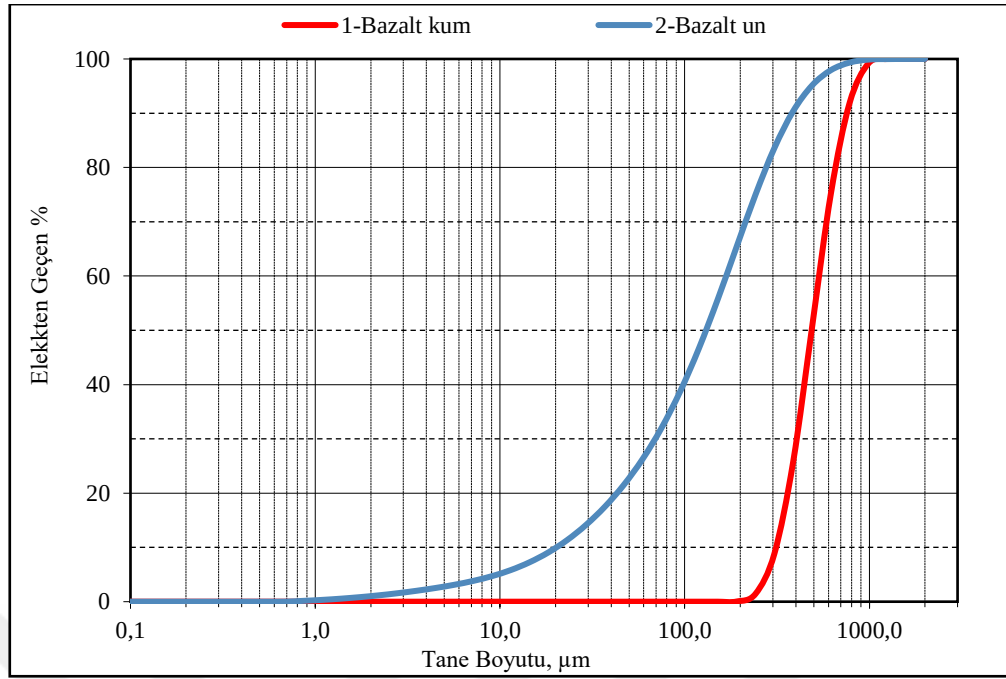
Beton numunelerin üretiminde Aldur madencilikten temin edilen bazalt kumu ve unu kullanılmıştır. Kullanılan agregaya ait görsel Şekil 3.1’de, kimyasal analiz sonuçları Çizelge 3.1’de ve tane boyut analizi ise Şekil 3.2’de verilmiştir.



Şekil 3.1. Kullanılan agregalar; (a) bazalt unu, (b) bazalt kumu.

Çizelge 3.1. Kullanılan agregaya ait kimyasal analiz sonuçları.

Bileşen	Ağırlıkça Yüzde
SiO_2	98,91
Al_2O_3	0,04
Fe_2O_3	0,14
CaO	0,13
SO_3	0,02
K_2O	0,08
P_2O_5	0,01
TiO_2	0,15
Cr_2O_3	0,0214
Mn_2O_3	0,0042
A.Z.	0,15
TOPLAM	99,66



Şekil 3.2. Agregalar ait tane boyut analiz sonucu.

Birim ağırlık deneyinde iki farklı yöntem kullanılmıştır. Bu yöntemler sıkışık ve gevşek birim ağırlık yöntemleridir. Birim ağırlık deneyinde her bir agregaya farklı birim ağırlık değerleri ve diğer fiziksel özellikler Çizelge 3.2’de verilmiştir.

Çizelge 3.2. Agregaya fiziksel özellikleri.

Agrega Türü	Deney Yöntemi	En Büyük Agregada Dane Çapı (mm)	Ortalama Birim Ağırlık (g/cm ³)	Kuru Özgöl Ağırlığı (g/cm ³)	Suya Doygun Özgöl Ağırlığı (g/cm ³)	Su emme oranı (%)
Bazalt 1-1,5 mm	Gevşek	1,5	1,537	2,74	2,82	2,73
	Sıkışık		1,723			

Özgöl ağırlık deneyleri esas olarak beton karışımları hesabında önemlidir. Yüksek özgül ağırlığa sahip agregalar genellikle don mukavemeti ve dayanıklılık bakımından etkilidir.

3.1.2. CEN Referans Kumu

Deneyisel çalışmalarda kullanılan CEN referans kumu, tercihen yuvarlak tanecikli ve silisyum dioksit miktarı en az % 98 olan doğal silis kumu özelliğinde olmalıdır. Çimento harç numunelerinin üretiminde kullanılmak üzere TS EN 196-1 standartlarına uygun CEN referans kumu kullanılmıştır. Kullanılan referans kum Limak Batı Çimento San. ve

Tic. A.Ş. ürünüdür. Kuma ait görsel Şekil 3.3'te ve elek analizi sonuçları Çizelge 3.3'de verilmektedir.



Şekil 3.3. Kullanılan CEN kumuna ait görsel.

Çizelge 3.3. CEN Referans Kumu'nun tane büyüklüğü dağılımı.

Kare Göz Açıklığı (mm)	Elekte Kalan Yığılımlı (%)
2,00	0
1,60	7±5
1,00	33±5
0,50	67±5
0,16	87±5
0,08	99±5

3.1.3. Çimento

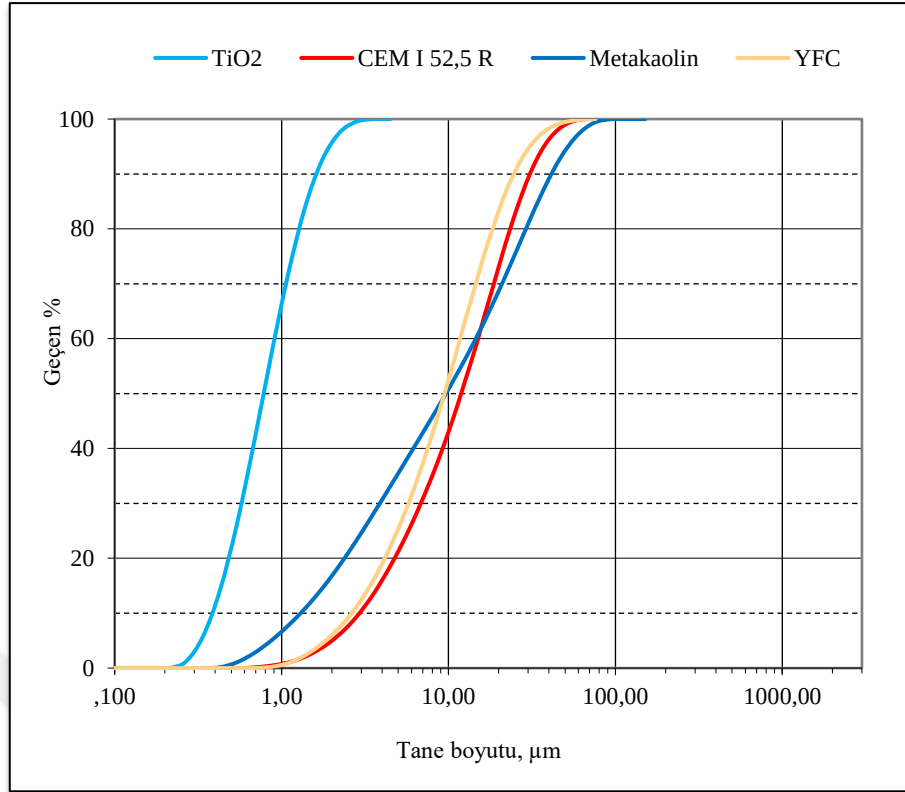
Çalışmada, bağlayıcı olarak TS 21 ve TS EN 197-1 standardına uygun Çimsa Mersin Çimento fabrikası tarafından üretilen CEM I 52,5 R tipi Beyaz Portland çimentosu (BPÇ) kullanılmıştır (TS 21, TS EN 197-1, 2012). Kullanılan çimentoya ait görsel Şekil 3.4'de, kimyasal özellikleri Çizelge 3.4'de tane boyut analizi Şekil 3.5'de ve SEM görüntüleri ise Şekil 3.6'de verilmiştir.



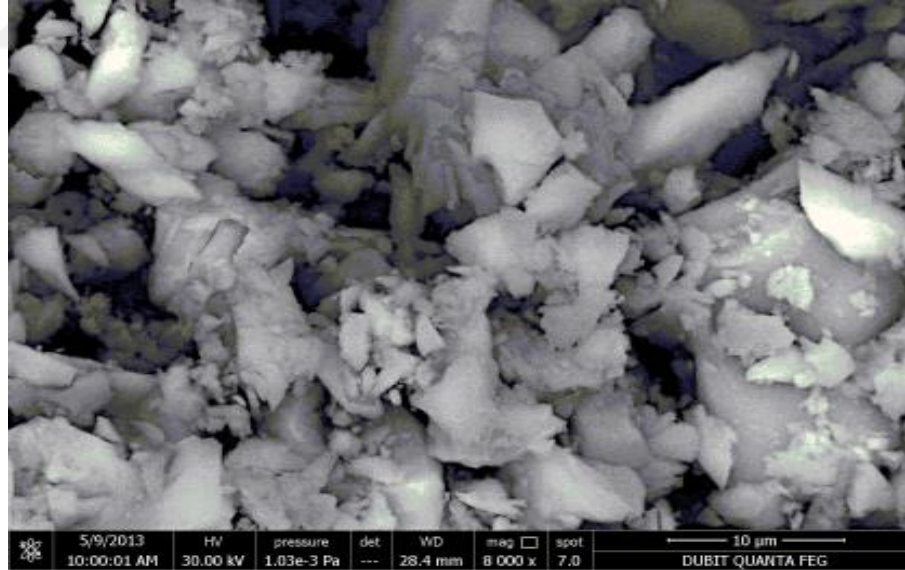
Şekil 3.4. Kullanılan CEM I 52,5 R tipi çimento.

Çizelge 3.4. Kullanılan çimentonun kimyasal özellikleri.

Bileşen	Birim	Cem I 52.5 R
SiO ₂	%	21,50
Al ₂ O ₃		4,10
Fe ₂ O ₃		0,30
CaO		65,70
MgO		1,05
SO ₃		3,35
Na ₂ O		0,21
K ₂ O		0,42
Cl		0,016
S.CaO		1,60
Çözünmeyen Kalıntı		0,01
Kızdırma Kaybı		3,25
45 mµ elek bakiyesi		1,5
Özgöl Ağırlık	gr/cm ³	3,06
Blaine	cm ² /g	4680



Şekil 3.5. Tane boyut analiz sonucu.



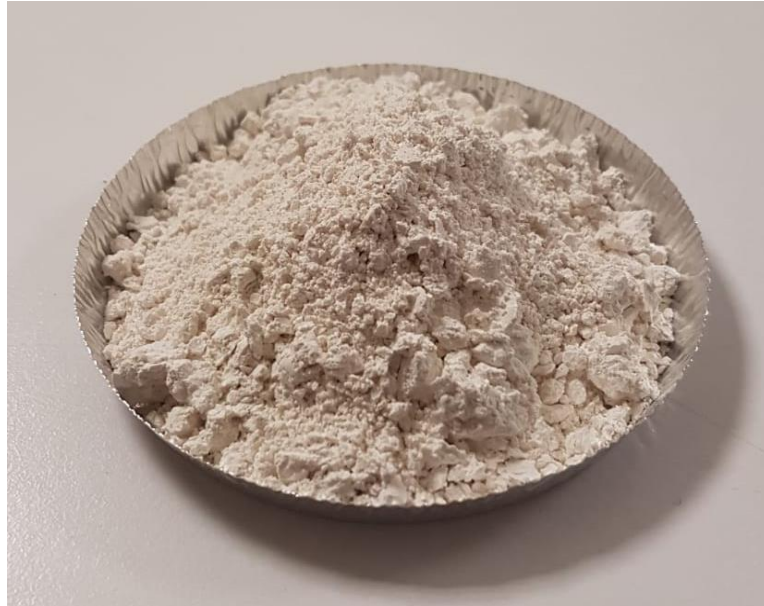
Şekil 3.6. Çimentoya ait SEM görüntüsü.

Çizelge 3.5. Kullanılan çimentoya ait fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikler.

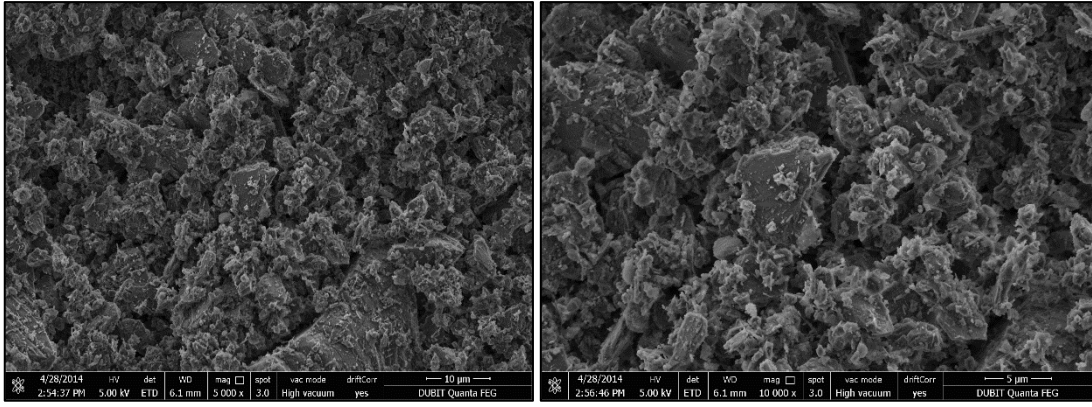
Kimyasal özellikler	Sonuçlar	Test metodu	Standart değerler	
			En az	En çok
Kızdırma kaybı (%)	3,3	EN-196-2	-	5
Çözünmeyen kalıntı (%)	0,18		-	5
SO ₃ (%)	3,23	XRF	-	4
Çözünen krom Cr-6 (ppm)	0,5	EN-196-10	-	-
Klorür (%)	0,009	EN-196-2	-	0,1
Fiziksel özellikler				
Beyazlık (%)	85,3		-	
Özgül yüzey (Blaine) (cm ² /g)	4470	EN-196-1,3,6	-	-
Priz başlangıç (dakika)	145		45	-
Hacim genleşmesi (mm)	1		-	10
Mekanik özellikler				
2 günlük basınç dayanımı (MPa)	39,1		30	-
28 günlük basınç dayanımı (MPa)	58,1		52,5	-

3.1.4. Metakaolin

Çalışmada kullanılan MTKL Sinpaş A.Ş. grubundan temin edilmiştir. Bu ürüne ait görsel Şekil 3.7’de, SEM görüntüleri Şekil 3.8’de ve kimyasal özelliklerine ilişkin tablo Çizelge 3.6’da görülmektedir.



Şekil 3.7. Kullanılan MTKL’ye ait görsel.



Şekil 3.8. Metakaoline ait SEM görüntüleri.

Çizelge 3.6. Kullanılan metakaolinin kimyasal özellikleri

Bileşen	Birim	Metekaolin
SiO ₂	%	47,27
Al ₂ O ₃		11,16
Fe ₂ O ₃		0,27
CaO		16,42
MgO		0,36
SO ₃		4,32
Na ₂ O		0,25
K ₂ O		0,89
Cl		0,013
S.CaO		-
Çözünmeyen kalıntı		53,45
Kızdırma kaybı		17,71
45 mµ elek bakiyesi		1
Özgül ağırlık	gr/cm ³	2,59
Blaine	cm ² /g	9180

3.1.5. Yüksek Fırın Cürufu

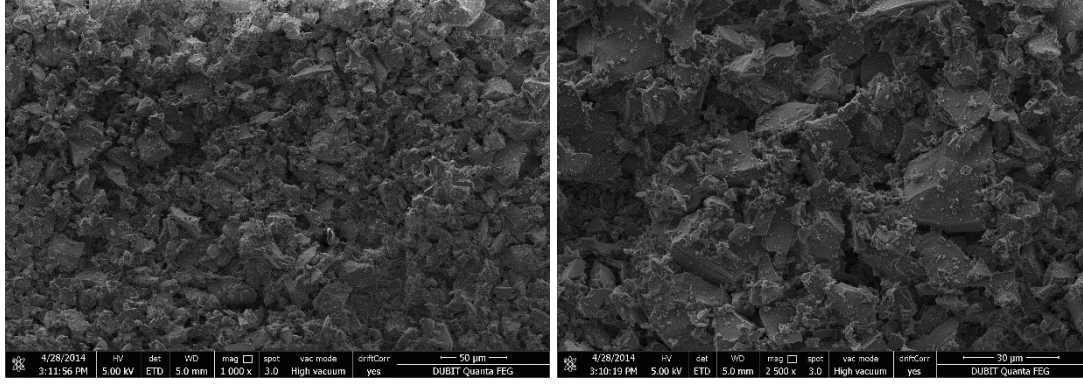
Çalışmada kullanılan YFC Ereğli Oyak fabrikasından temin edilmiştir. Bu ürüne ait görsel Şekil 3.9’da, kimyasal ve fiziksel özellikler Çizelge 3.7’de ve SEM görüntüleri ise Şekil 3.10’de görülmektedir.



Şekil 3.9. Kullanılan YFC'ye ait görsel.

Çizelge 3.7. Kullanılan YFC' nin kimyasal özellikleri tabloda verilmiştir.

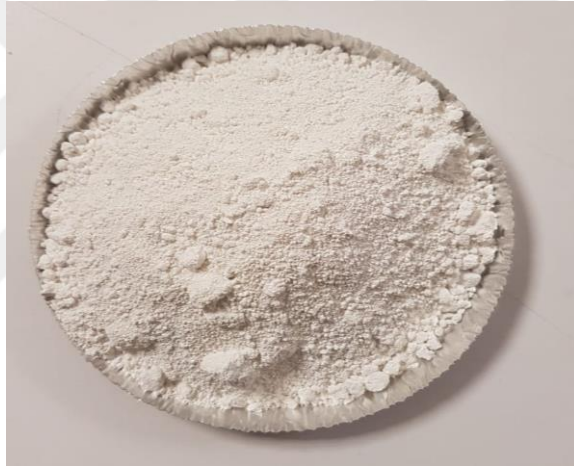
Bileşen	Birim	Yüksek Fırın Cürufu
SiO ₂	%	40,29
Al ₂ O ₃		11,3
Fe ₂ O ₃		2,34
CaO		33,99
MgO		5,76
SO ₃		0,26
Na ₂ O		0,37
K ₂ O		0,96
Cl		0,013
S.CaO		-
Çözünmeyen kalıntı		0,18
Kızdırma kaybı		0,27
45 mµ elek bakiyesi		1
Özgül ağırlık	gr/cm ³	2,9
Blaine	cm ² /g	5350



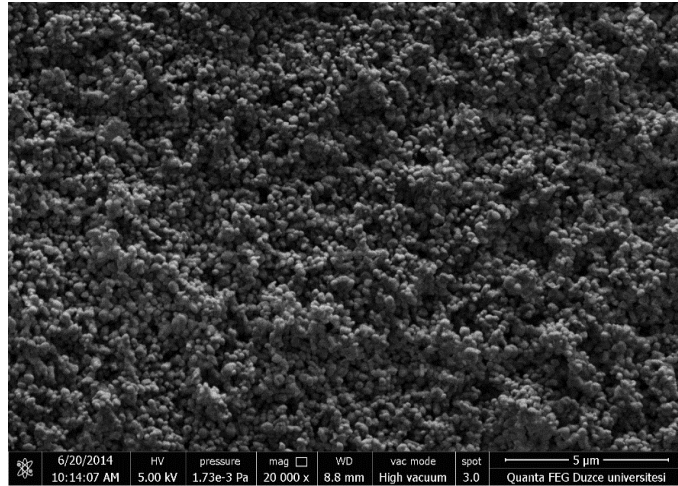
Şekil 3.10. YFC mineralinin SEM görüntüleri.

3.1.6. Titanyumdioksit (TiO_2)

Çalışmada kullanılan TiO_2 Hutsman firmasından temin edilmiştir. Bu ürüne görsel Şekil 3.11’de ve SEM görüntüleri ise Şekil 3.12’de gösterilmiştir.



Şekil 3.11. Kullanılan TiO_2 'ye ait görsel.



Şekil 3.12. TiO_2 ’e ait SEM görüntüsü.

3.1.7. Kimyasal Katkı

Kimyasal katkıları, betonun taze veya sertleşmiş durumundaki özelliklerini değiştirmek adına karıştırma işlemi sırasında çimentonun %5'ini geçmemek üzere eklenen maddeler olarak tanımlanmaktadırlar. Plus Techno firmasından temin edilen kimyasal katkı Şekil 3.13'de gösterilmiştir.



Şekil 3.13. Kullanılan kimyasal katkıya ait görsel.

Deney çalışmalarda yüksek oranlı su azaltıcı ve erken zamanda yüksek dayanım sağlayan WR-78 hiper akışkanlaştırıcı kullanılmıştır.

3.1.8. Su

Yapılan araştırmada kullanılan su Düzce ilinin şebeke suyudur ve malzemede ne kadar kullanılacağı hesaplanmıştır. Kontrol numunelerinde su/çimento oranı 0.30 olarak alınmıştır. Beton karışımlarında puzolan ve kimyasal katkıların kullanılması ile birlikte bu oran değiştirilmiştir. Düzce Üniversitesi Bilimsel Ve Teknolojik Araştırmalar Merkezi'nden alınan su analiz sonuçları aşağıdaki Çizelge 3.8'de verilmiştir.

Çizelge 3.8. Düzce ili şebeke suyunun kimyasal analizleri.

Karışım Suyu Kimyasal Analizi	
Sülfat (mg/l)	9,41
Klor (mg/l)	8,52
Nitrat (mg/l)	0,50
Fosfat (mg/l)	0,21
Organik madde (mg/l)	2,25
Ph (mg/l)	7,94
Askıda katı madde (mg/l)	0,064
Çinko (mg/l)	0,44
Kurşun (mg/l)	BDL

3.2. METOT

Deneyisel çalışmalar üç farklı aşamada gerçekleştirilmiştir. Birinci aşamada beton üretiminde kullanılan agregalarının tane dağılımlılarının gradasyonu gerçekleştirilerek en yüksek dayanım sağlayan agrega tane dağılımı elde edilmiştir. İkinci aşamada en yüksek dayanım değerini sağlayan tane dağılımına sahip karışımın içerisine nano materyal olarak TiO_2 katılmış, mekanik ve fiziksel üzerlerinde belirlenmiştir. Üçüncü aşamada ise gradasyon yapılan ve nano materyal ilave edilen beton karışımına %0, 5, 10 ve 20 oranlarında MTKL ve YFC ikame edilmiştir. Ayrıca, MTKL ve YFC'nin karma bir şekilde kullanımı ile betonun fiziksel ve mekanik özelliklerinde meydana gelen değişimler araştırılmıştır. Fibrobeton fabrikasının AR-GE laboratuvarında ve Düzce Üniversitesi İnşaat Mühendisliği beton teknolojisi laboratuvarında yapılmıştır.

3.2.1. Pozolanik Aktivite Deneyleri

Kullanılan metakaolinin ve yüksek fırın cürufunun pozolanik aktivitesini belirlemek amacıyla ASTM C311 “Standard Test Methods for Sampling and Testing Fly Ash or Natural Pozzolans for Use as a Mineral Admixture in Portland-Cement Concrete” standardında belirtilen esaslara uygun olarak pozolanik aktivite testi uygulanmıştır. %20 oranında MTKL ikameli ve %100 çimentolu 50*50*50 mm ebadındaki harç örnekleri 28. Günde basınç dayanımı deneyine tabi tutulmuş ve aşağıda belirtilen eşitlik kullanılarak aktivite indeksi hesaplanmıştır. Aktivite indeksi %70 in üzerinde ise pozolanik özelliğe sahip olduğu söylenebilir.

$$Aktivite\ indksi = \left(\frac{A}{B} \right) * 100 \quad (3.1)$$

Formülde; A= %20 MTKL ikameli örneğin 28. gündeki ortalama basınç dayanımını, MPa
B= %100 çimentolu örneğin 28. gündeki ortalama basınç dayanımını, MPa ifade etmektedir.

3.2.2. Birim Hacim Ağırlık Deneyi

3.2.2.1. Taze Beton BHA Deneyi

Üretilen karışım harcı kalıplara yerleştirilmeden önce, hacmi önceden belirli olan bir numune kabı içerisine vibrasyonla yerleştirildi ve taze betonun ağırlığı bulundu. Elde edilen bu ağırlık değerinin hacme bölünmesiyle TS EN 12350-6'ya göre birim ağırlıklar

elde edilmiştir.

3.2.2.2. Sertleşmiş Beton BHA Deneyi

Birim hacim ağırlık deneyi için numuneler etüv içerisinde 105 ± 5 °C sıcaklıkta değişmez ağırlığa ulaşmaya kadar etüvde kurutulmuşlardır. Ardından 0.1 g hassasiyetli terazide ağırlıkları ölçülerek kaydedilmiştir. Örneklerin birim hacim ağırlık değerleri formül (3.2) yardımı ile hesaplanmıştır.

$$\text{Birim Hacim Ağırlık} = W/V \quad (3.2)$$

Burada formülde;

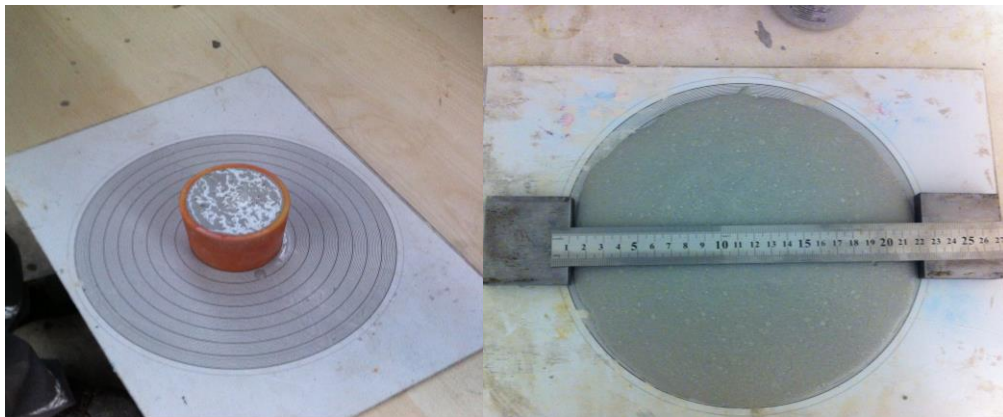
Δ : Birim Hacim Ağırlık (kg/m^3)

W: Etüv Kuru Ağırlığı (kg)

V: Numunenin Hacmi (m^3)' ifade etmektedir.

3.2.3. Slump Deneyi

Beton karışımının uygunluğunu ve işlenebilirliğini kontrol etmeyi mümkün kılan bir deney metodudur. İç yüzeyi pürüzsüz, $(55\pm0,5)$ mm yükseklik, $(57\pm0,5)$ mm iç çap ve 65 mm den daha az olmayacak dış çapa sahip plâstik veya metalik boru parçası içi harç ile doldurularak harcın yayılma değerlerine bakılır. TS EN 1170-1 Ön Yapımlı Beton Mamuller-Cam Elyaf Takviyeli Çimento Deney Metodu Bölüm 1 : Matriks Kıvamının Ölçülmesi “Slump Deneyi” Metodu’na göre deney yapılmıştır. Deneyin yapılışına ait görsel Şekil 3.14’de gösterilmiştir. Deney sonucunda yayılan beton üzerinden bir birine dik iki çap ölçümü alınarak ortalama yayılma çapı belirlenir.



Şekil 3.14. Slump deneyi yapılışı.

3.2.4. Basınç Dayanımı Deneyi

Basınç dayanım deneyi TS EN 196-1 standardına göre yapılmıştır. Beton numunelerinin kalıba yerleştirilmesi sarsma tablası kullanılarak yapılmıştır. Kalıptan çıkartılan beton numuneler kür havuzunda bekletilmiştir. Sertleşmiş beton örnekleri tek eksenli basınç aleti ile kırılmıştır.

Bu deney için Fibrobeton A.Ş şirketinde bulunan 20 ton kapasiteli ve Düzce Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Beton Teknolojisi Laboratuvarında bulunan 30 ton kapasiteye sahip tek eksenli basınç test cihazı kullanılmıştır. Kullanılan test cihazları ve kırılan numunelere ait görseller Şekil 3.15’de gösterilmiştir.



Şekil 3.15. Basınç dayanımı ölçüm test cihazı ve deney yapılışına ait görseller.

3.2.5. Eğilme Dayanımı

Eğilme deneyleri TS EN 196-1 üç nokta eğilme deneyi yöntemi ile yapılmıştır. Bu deney için Düzce Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Yapı Malzemeleri ve Beton Teknolojisi Laboratuvarında bulunan çimento presinin eğilme ünitesi kullanılmıştır. Kullanılan test cihazı ve deneyin uygulanması Şekil 3.16’da gösterilmiştir.



Şekil 3.16. Eğilme dayanımı ölçüm test cihazı ve deney yapılışına ait görsel.

3.2.6. Beton Karışım Hesapları ve Deney Numunelerinin Üretimi

3.2.6.1. Beton Karışımı

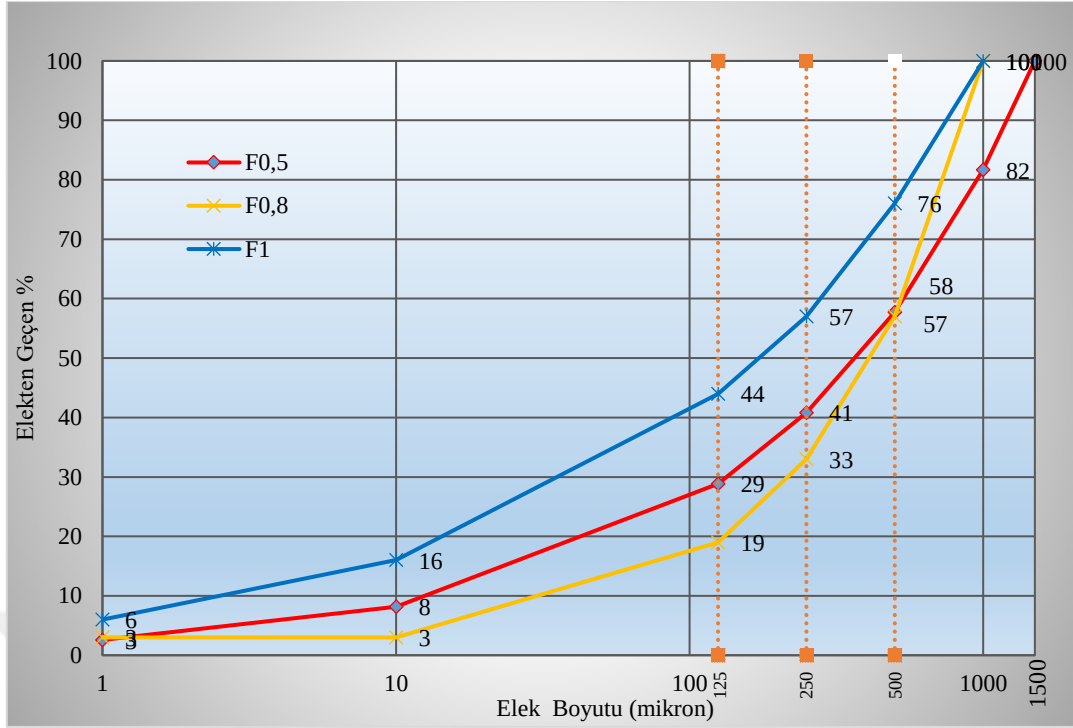
Beton karışımlarında agrega olarak bazalt agregası kullanılmıştır. Bazalt agregası kullanılarak üç farklı gradasyon yapılmıştır. Maksimum kompasiteye sahip olacak şekilde agrega tane dağılımını belirleyebilmek için;

Fuller parabolünden yararlanılmıştır. Fuller parabolünde belirtilen n katsayısı 0.5, 0.8, ve 1 alınarak 3 farklı tane dağılımı hesaplanmıştır. Bu şekilde farklı tane optimizasyonlarına sahip agregalar (F0,5 (n=0,5), F0,8 (n=0,8), F1 (n=1) her bir karışım dizaynı için 5x5x5 cm ölçülerinde 12 şer adet toplamda 36 adet küp numune dökülmüştür. Karışımın yapılması ve numune döküm işlemlerine dair görseller Şekil 3.17’de gösterilmiştir.

$$F = 100 * \left(\frac{d}{D_{max}} \right)^n \quad (3.3)$$



Şekil 3.17. Beton karışımı ve numune döküm işlemi.



Şekil 3.18. Agrega gradasyonu.

Bu aşamadan sonra karışımlardan en iyi dayanım sonucu veren F0,5 karışımına TiO_2 ilave edilerek çimento ile agrega arası nano boşlukları doldurularak maksimum komposite elde edilmiştir.

Mevcut karışıma %1 TiO_2 eklenerek nano materyal katkılı karışımlar hazırlanmıştır.

Metakaolin ve yüksek fırın cürufunun, fiziksel ve puzolanik özelliklerini belirlenerek uygun olduklarının tespitinden sonra F0,5-T referans karışımına puzolan malzemesi olarak da yüksek fırın cürufu ve metakaolin hammaddeleri çimento ikameli olarak birli ikili kombinasyonlar şeklinde karışım reçetesine eklenmiştir.

Sonraki işlem olarak %5 -%10 -%20 metakaolin ikameli, %5 -%10 -%20 Yüksek fırın cürufu ve %5MTKL+%5 YFC – - %10 MTKL+%10 YFC - %5 YFC+%10 MTKL -%5 MTKL+%10 YFC’li olmak üzere 10 adet karışım dizayn edilip basınç dayanımlarını test etmek için 50x50x50 mm küp numuneler yapılmıştır. Hazırlanan numunelere ait karışım özellikleri Çizelge 3.9’da verilmiştir. Karışımlarda su/çimento oranı 0,30 olarak belirlenmiştir.

Çizelge 3.9. Bazalt agregalı yüksek fırın cürufu ve metakaolin ikameli karışım tablosu (TiO₂ ilaveli -T).

Numune Adı	Çimento (kg)	Su (kg)	Akışkan (kg)	Agrega (kg)	TiO ₂ (kg)	MTKL (kg)	YFC (kg)
Referans	875,94	262,83	4,31	875,94	87,56	0	0
F0,5-T-M (%5)	832,14	262,83	5,18	875,94	87,56	43,79	0
F0,5-T-M (%10)	788,35	262,83	6,04	875,94	87,56	87,59	0
F0,5-T-M (20)	700,75	262,83	8,63	875,94	87,56	175,18	0
F0,5-T-Y (%5)	832,14	262,83	4,31	875,94	87,56	0	43,19
F0,5-T-Y (%10)	788,35	262,83	3,88	875,94	87,56	0	87,59
F0,5-T-Y (20)	700,75	262,83	3,45	875,94	87,56	0	175,18
F0,5-T-Y(%5)+M(%5)	788,35	262,83	5,54	875,94	87,56	43,79	43,797
F0,5-T-Y(%10)+M(%10)	700,75	262,83	5,61	875,94	87,56	87,59	87,595
F0,5-T-M(%5)+Y(%10)	744,55	262,83	5,61	875,94	87,56	43,79	87,595
F0,5-T-M(%10)+Y(%5)	744,55	262,83	6,04	875,94	87,56	87,59	43,797

3.2.6.2. Beton Üretimi

Beton karışımlarının üretimi 60 dm³ kapasiteli dikey mikserde yapılmıştır. Beton karışım hesapları yüksek performanslı nano betonlar hedeflenerek yapılmıştır. Çeşitli deneylerde kullanılmak üzere; 49 adet farklı seri beton için 25 serisi basınç deneylerinde kullanılmak üzere 300 adet, 50x50x50 mm ebatlarında kübik numune, 75 adet, 40x40x160 mm abatlarında çubuk numuneler üretilmiştir. Karışıma giren karışım ürünleri betonun koduna göre önceden tartılıp hazırlanmıştır. Önce agregalar miksere katılarak 30 saniye karıştırılmış, sonrasında çimento ilave edilerek 30 saniye daha bileşimdeki kuru maddeler karıştırılmıştır. Sonrasında mikserdeki karışıma gerekli su ve katkıları ilave edilerek karıştırma üç dakika daha sürdürülmüştür. Numunelerin kıvamını tayin etmek için slump tahtası ile yayılma miktarları bulunmuştur. Harç, kalıplara üç aşamada eklenmiş ve her aşamada 10 saniye sarsma tablası cihazı ile sarsılmıştır. Numuneler 24 saat kalıp içinde bırakılmış, bu sürenin sonunda lastik takozların yardımıyla kalıptan çıkarılmıştır. Numuneler deney gününe kadar, bağıl nemi % 65 ve sıcaklığı 22 °C olan kür odasında saklanmıştır. Numune üretimine dair görseller Şekil 3.19’da gösterilmiştir.



Şekil 3.19. Beton numunelerinin üretimleri.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. AGREGA OPTİMİZASYONUNA İLİŞKİN SONUÇLAR

4.1.1. Slamp Deneyi Sonuçları

Üç farklı agrega tane dağılımına sahip olacak şekilde üretilen beton örnekleri üzerinde gerçekleştirilen slamp deneylerinden elde edilen sonuçlar Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Farklı tane dağılımına sahip taze beton slump deneyi sonuçları.

Numune Kodu	Numune Bilgisi	S/Ç	D ₁ (mm)	D ₂ (mm)	D ₃ (mm)	Genel Ortalama (mm)
1	F0,5	0,3	214	221	220	218,45
2	F0,8	0,3	215	223	222	220
3	F1	0,3	208	210	209	209

Sonuçlar incelendiğinde; farklı tane dağılımlarına bağlı olarak slump değerlerinin değiştiği, en büyük yayılma çapının F0,8 tane dağılımına sahip karışımda olduğu, en küçük yayılma çapının ise F1 tane dağılımına sahip karışımda olduğu tespit edilmiştir.

4.1.2. Su Emme Deneyi Sonuçları

Üç farklı agrega tane dağılımına sahip olacak şekilde üretilen beton örnekleri üzerinde gerçekleştirilen su emme deneyinden elde edilen sonuçlar Çizelge 4.2’de verilmiştir.

Çizelge 4.2. Farklı tane dağılımına sahip sertleşmiş betonun su emme deneyi sonuçları.

Numune Adı	Su Emme Yüzdesi (%)
F0,5	2,85
F0,8	2,96
F1	3,05

Sonuçlar incelendiğinde; agrega tane dağılımına bağlı olarak su emme değerlerinin değiştiği, en büyük su emme oranının F1 tane dağılımına sahip karışımda olduğu, en küçük su emme oranının ise F0,5 tane dağılımına sahip karışımda olduğu görülmüştür.

4.1.3. Birim Hacim Ağırlık Sonuçları

Üç farklı agregatane dağılımına sahip olacak şekilde üretilen beton örnekleri üzerinde gerçekleştirilen birim hacim ağırlık deneylerinden elde edilen sonuçlar Çizelge 4.3’de verilmiştir.

Çizelge 4.3. Agregat gradasyonu sertleşmiş beton birim ağırlık değerleri.

Numune Adı	Taze Beton Birim Hacim Ağırlık (kg/m ³)	Sertleşmiş Beton Birim Hacim Ağırlık (kg/m ³)
F0,5	2240	2214
F0,8	2225	2190
F1	2226	2194

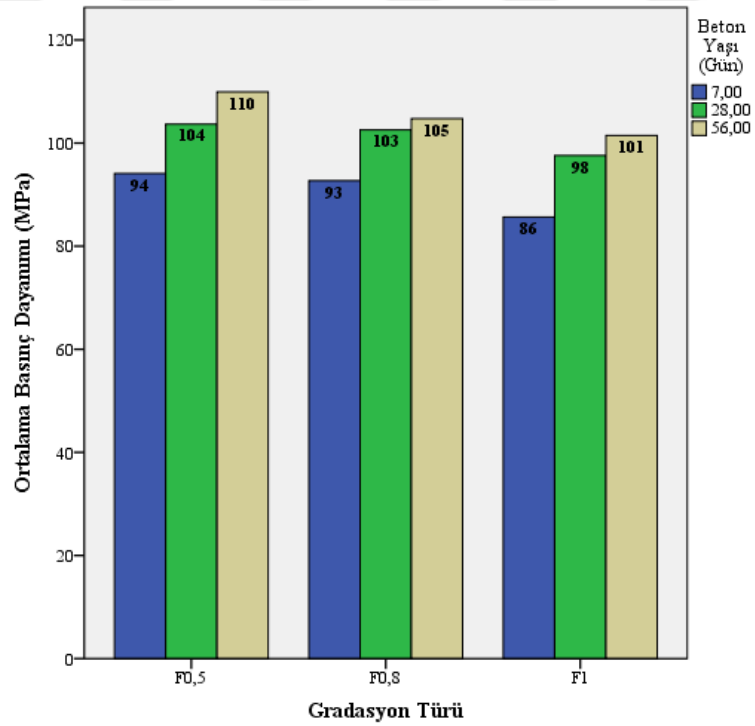
Sonuçlar incelendiğinde; agregatane dağılımına bağlı olarak birim hacim ağırlık değerlerinin değiştiği, en büyük sertleşmiş beton birim hacim ağırlık değerinin F0,5 tane dağılımına sahip karışımda olduğu, en küçük sertleşmiş beton birim hacim ağırlık değerinin F0,8 tane dağılımına sahip karışımda olduğu belirlenmiştir.

4.1.4. Basınç Dayanımı Sonuçları

Üç farklı agregatane dağılımına sahip olacak şekilde üretilen beton örnekleri üzerinde gerçekleştirilen basınç dayanım deneylerinden elde edilen açıklayıcı istatistikler Çizelge 4.4’de verilmiştir. Ayrıca ortalama basınç dayanımı değerlerini gösteren bar grafik Şekil 4.1’de belirtilmiştir.

Çizelge 4.4. Optimizasyonlu beton numunelerinin basınç dayanımı değerlerine ait açıklayıcı istatistikler.

Beton Yaşı (Gün)	Numune Kodu	N	Ortalama Basınç Dayanımı (MPa)	Std. Sapma	Std. Hata	Ortalamanın %95 güven aralığında		Minimum	Maksimum
						Alt sınırı	Üst Sınırı		
7	F0,5	3	94,0933	1,32081	0,76257	90,8123	97,3744	92,80	95,44
	F0,8	3	92,6967	10,73343	6,19695	66,0334	119,3600	80,92	101,93
	F1	3	85,6533	4,41880	2,55120	74,6764	96,6303	80,92	89,67
28	F0,5	3	103,6767	2,28172	1,31735	98,0086	109,3448	101,54	106,08
	F0,8	3	102,5467	3,04457	1,75779	94,9835	110,1098	99,19	105,13
	F1	3	97,6033	1,43647	0,82934	94,0350	101,1717	95,98	98,71
56	F0,5	3	109,9267	3,15769	1,82310	102,0825	117,7708	106,54	112,79
	F0,8	3	104,7600	2,47000	1,42606	98,6242	110,8958	102,73	107,51
	F1	3	101,4900	1,96929	1,13697	96,5980	106,3820	99,45	103,38



Şekil 4.1. Farklı agrega tane dağılımına sahip beton numunelerinin basınç dayanımı değerleri.

Farklı agrega tane dağılımına sahip beton numunelerinden elde edilen basınç dayanımı değerleri incelendiğinde tane dağılım türüne göre basınç dayanımı değerlerinde değişimlerin olduğu, en yüksek basınç dayanımı değerlerinin F0,5 tane dağılım karışımında elde edildiği görülmektedir. Ayrıca tüm gradasyon türlerinde beton yaşı ilerledikçe basınç dayanımı değerlerinde de bir artışın olduğu tespit edilmiştir.

Farklı tane dağılımlarında türleri ve beton yaşlarında basınç dayanımı değerlerinde meydana gelen değişimin istatistiksel anlamlı önemli olup olmadığını test etmek amacıyla elde edilen basınç dayanımı verileri üzerinde varyans analizi gerçekleştirilerek gruplar arasındaki farklar incelenmiştir. Basınç dayanımı verileri üzerinde gerçekleştirilen varyans analizi sonuçları Çizelge 4.5’de verilmiştir.

Çizelge 4.5. Optimizasyonlu beton numunelerine ait varyans analizi sonuçları.

Beton Yaşı (Gün)	Varyansın Kaynağı	Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi	Kareler Ortalaması	F-Testi	Anlamlılık Düzeyi $P \geq 0,05$
7.Gün	Gruplar arası	122,793	2	61,396	1,350	0,328
	Gruplar içi	272,954	6	45,492		
	Toplam	395,746	8			
28.gün	Gruplar arası	62,599	2	31,299	5,677	0,041
	Gruplar içi	33,078	6	5,513		
	Toplam	95,677	8			
56.Gün	Gruplar arası	108,565	2	54,282	8,163	0,019
	Gruplar içi	39,900	6	6,650		
	Toplam	148,465	8			

Varyans analizi sonuçlarına göre 28 ve 56 günlük basınç dayanımı değerlerinde gradasyon türüne bağlı olarak gruplar arasında istatistiki anlamda önemli farkların olduğu tespit edilmiştir. Bir diğer ifade tane dağılımına bağlı olarak basınç dayanımı değerleri önemli miktarda değişmektedir. Bu farklılıkların hangi gruplardan kaynaklandığını tespit etmek amacıyla gerçekleştirilen Duncan çoklu karşılaştırma testi sonuçları Çizelge 4.6’de verilmiştir.

Çizelge 4.6. Optimizasyonlu beton numunelerine ait basınç verileri üzerinde gerçekleştirilen Duncan çoklu karşılaştırma testi sonuçları.

Beton Yaşı	Gradasyon Türü	N	Farklı Olan Gruplar $P \geq 0,05$		
			1	2	3
7 Günlük	F1	3	85,6533		
	F0,8	3	92,6967		
	F0,5	3	94,0933		
28 Günlük	F1	3	97,6033		
	F0,8	3		102,5467	
	F0,5	3		103,6767	
56 Günlük	F1	3	101,4900		
	F0,8	3	104,7600		
	F0,5	3		109,9267	

Duncan çoklu karşılaştırma testi sonuçları incelendiğinde;

- Tüm yaş gruplarında F0,5 tane dağılımına sahip betonlarda en yüksek basınç dayanımı değerlerini verdiği,
- En düşük basınç dayanımı değerlerinin ise F1 tane dağılımına sahip betonlarda elde edildiği,
- 7 günlük numunelerde F0,5 tane dağılımına sahip betonlarda 94,09 MPa ile en büyük basınç dayanımı değerine sahip olduğu,
- 28 günlük numunelerde F0,5 tane dağılımına sahip betonlarda 103,67 MPa ile en büyük basınç dayanımı değerine sahip olduğu,
- 56 günlük numunelerde F0,5 tane dağılımına sahip betonlarda 109,92 MPa ile en büyük basınç dayanımı değerine sahip olduğu görülmüştür.

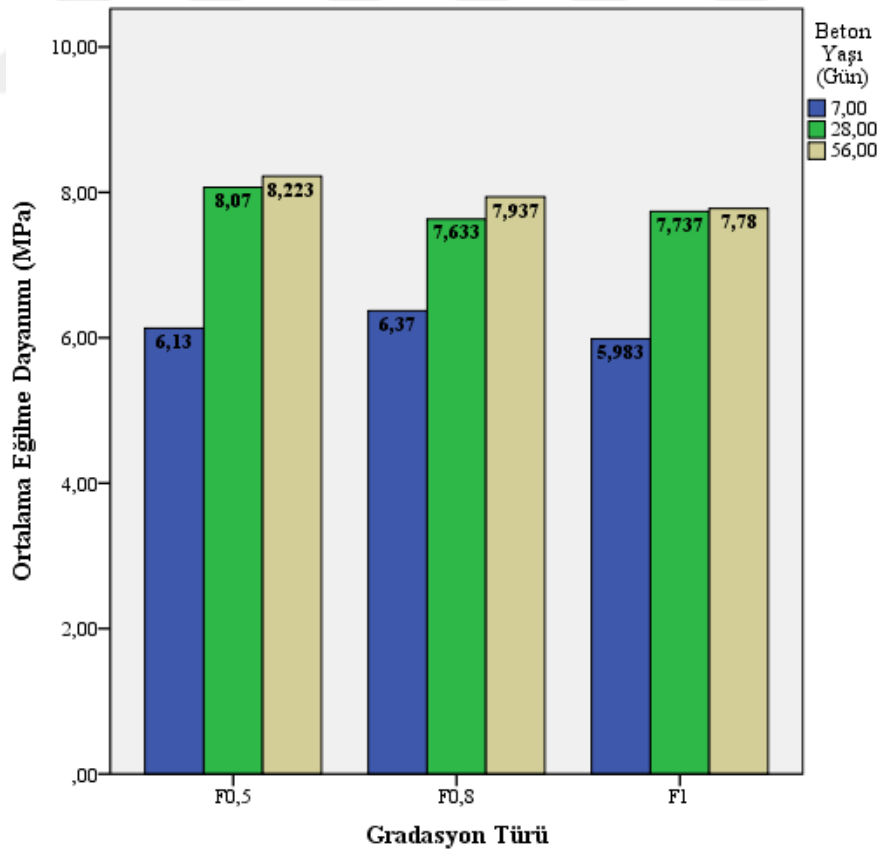
4.1.5. Eğilme Dayanımı Sonuçları

Üç farklı agrega tane dağılımına sahip olacak şekilde üretilen beton örnekleri üzerinde gerçekleştirilen eğilme dayanım deneylerinden elde edilen açıklayıcı istatistikler

Çizelge 4.7’de verilmiştir. Ayrıca ortalama eğilme dayanımı değerlerini gösteren bar grafik Şekil 4.2’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.7. Farklı tane dağılımına sahip eğilme dayanımı değerlerine ait açıklayıcı istatistikler.

Beton Yaşı (Gün)	Gradasyon Türü	N	Ortalama Eğilme Dayanımı (MPa)	Std. Sapma	Std. Hata	Ortalamanın %95 güven aralığında		Minimum	Maksimum
						Alt sınırı	Üst Sınırı		
7	F0,5	3	6,13	0,24062	0,13892	5,5323	6,7277	5,9	6,38
	F0,8	3	6,37	0,23643	0,1365	5,7827	6,9573	6,2	6,64
	F1	3	5,9833	0,23352	0,13482	5,4032	6,5634	5,73	6,19
28	F0,5	3	8,07	0,30512	0,17616	7,312	8,828	7,76	8,37
	F0,8	3	7,6333	0,45457	0,26245	6,5041	8,7625	7,11	7,93
	F1	3	7,7367	0,66275	0,38264	6,0903	9,383	7,14	8,45
56	F0,5	3	8,2233	0,14572	0,08413	7,8614	8,5853	8,06	8,34
	F0,8	3	7,9367	0,76794	0,44337	6,029	9,8443	7,05	8,39
	F1	3	7,78	0,34117	0,19698	6,9325	8,6275	7,4	8,06



Şekil 4.2. Farklı tane dağılımına sahip beton numunelerinin eğilme dayanımı değerleri.

Farklı tane dağılımına sahip beton numunelerinden elde edilen eğilme dayanımı değerleri incelendiğinde gradasyon türüne göre eğilme dayanımı değerlerinde değişimlerin olduğu, en yüksek eğilme dayanımı değerlerinin F0,5 tane dağılımına sahip karışımında elde edildiği görülmektedir. Ayrıca tüm gradasyon türlerinde beton yaşı ilerledikçe eğilme dayanımı değerlerinde de bir artışın olduğu tespit edilmiştir.

Farklı gradasyon türleri ve beton yaşlarında eğilme dayanımı değerlerinde meydana gelen değişimin istatistiksel anlamlı olup olmadığını test etmek amacıyla elde edilen eğilme dayanımı verileri üzerinde varyans analizi gerçekleştirilerek gruplar arasındaki farklar incelenmiştir. Eğilme dayanımı verileri üzerinde gerçekleştirilen varyans analizi sonuçları Çizelge 4.8’de verilmiştir.

Çizelge 4.8. Farklı gradasyon türüne sahip beton numunelerine ait varyans analizi sonuçları.

Beton Yaşı (Gün)	Varyansın Kaynağı	Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi	Kareler Ortalaması	F-Testi	Anlamlılık Düzeyi $P \geq 0,05$
7.Gün	Gruplar arası	0,229	2	0,114	2,037	0,211
	Gruplar içi	0,337	6	0,056		
	Toplam	0,565	8			
28.gün	Gruplar arası	0,312	2	0,156	0,634	0,562
	Gruplar içi	1,478	6	0,246		
	Toplam	1,79	8			
56.Gün	Gruplar arası	0,303	2	0,152	0,625	0,567
	Gruplar içi	1,455	6	0,242		
	Toplam	1,758	8			

Varyans analizi sonuçlarına göre 7, 28 ve 56 günlük eğilme dayanımı değerlerinde gradasyon türüne bağlı olarak gruplar arasında istatistiki anlamda anlamlı farkların oluşmadığı tespit edilmiştir. Bir diğer ifade farklı agrega tane dağılımına bağlı olarak eğilme dayanımı değerleri önemli miktarda değişmemektedir.

4.2. NANO-BETON NUMUNELERİNE AİT DENEY SONUÇLARI

Bu aşamadan sonra karışım reçetelerinde nano boyuttaki TiO_2 , çimento ile agrega arası nano boşlukları doldurmak ve nano-beton üretmek amacıyla standart karışıma eklenmiştir.

4.2.1. Slump Deneyi Sonuçları

Referans ve TiO_2 içeren nano-beton örnekleri üzerinde gerçekleştirilen slump deneylerinden elde edilen sonuçlar Çizelge 4.9’de verilmiştir.

Çizelge 4.9. Referans ve TiO_2 ilaveli nano-beton numunelerinin slump deneyi sonuçları.

Numune Adı	Optimizasyonlu harçlara ait slump deneyi sonuçları (mm)
Referans	218
Nano-beton	215

Sonuçlar incelendiğinde; TiO_2 ilavesine bağlı olarak slump değerlerinin değiştiği, en büyük slump yayılma değerinin referans tane dağılımına sahip karışımda olduğu, en küçük slump yayılma değerinin nano-beton tane dağılımına sahip karışımda olduğu görülmüştür.

4.2.2. Su Emme Deneyi Sonuçları

Referans ve TiO_2 ilaveli nano-beton örnekleri üzerinde gerçekleştirilen su emme deneylerinden elde edilen sonuçlar Çizelge 4.10’de verilmiştir.

Çizelge 4.10. Optimizasyonlu ve TiO_2 ilaveli numunelerin slump deneyi sonuçları.

Numune Adı	Su Emme Yüzdesi (%)
Referans	2,85
Nano-beton	2,78

Sonuçlar incelendiğinde; TiO_2 ilavesine bağlı olarak su emme yüzde değerlerinin değiştiği, en büyük su emme yüzde değerinin referans karışımda olduğu, en küçük su emme yüzde değerinin TiO_2 ilaveli nano-beton karışımda olduğu görülmüştür.

4.2.3. Birim Hacim Ağırlık Sonuçları

Referans ve nano-beton örnekleri üzerinde gerçekleştirilen birim hacim ağırlık deneylerinden elde edilen sonuçlar Çizelge 4.11’de verilmiştir.

Çizelge 4.11. Optimizasyonlu ve TiO₂ ilaveli numunelerin birim hacim ağırlık deneyi sonuçları.

Numune Adı	Taze Beton Birim Hacim Ağırlık (kg/m ³)	Sertleşmiş Beton Birim Hacim Ağırlık (kg/m ³)
Referans	2429	2214
Nano-beton	2431	2219

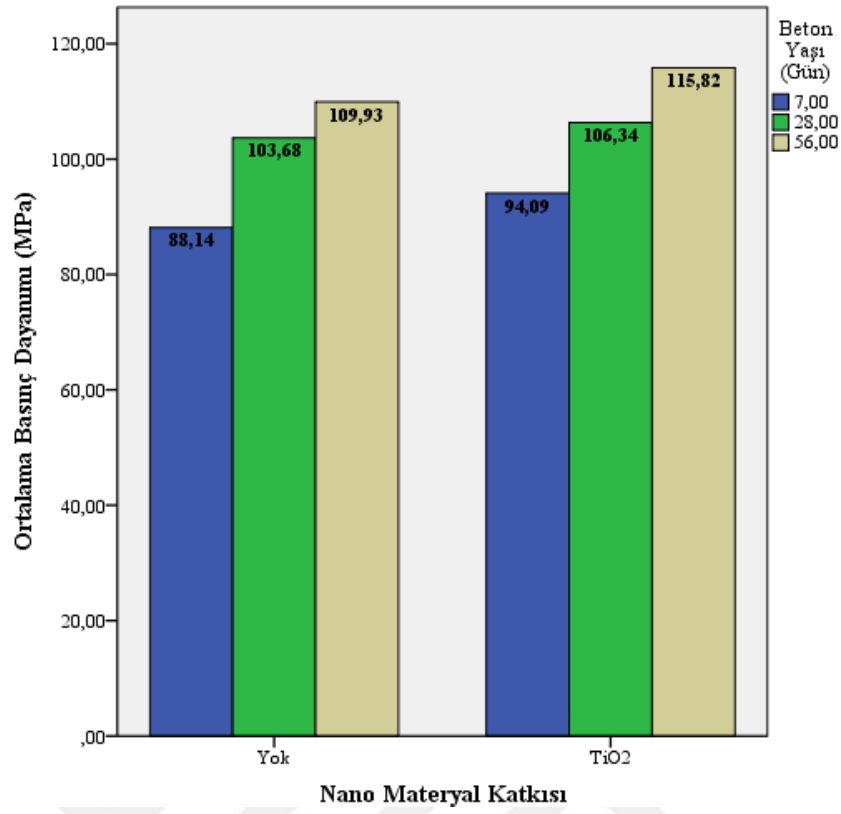
Sonuçlar incelendiğinde; TiO₂ ilavesine bağlı olarak birim hacim ağırlık değerlerinin değiştiği, en büyük sertleşmiş beton birim hacim ağırlık değerinin nano-beton karışımında olduğu, en küçük sertleşmiş beton birim hacim ağırlık değerinin referanskarışımında olduğu görülmüştür.

4.2.4. Basınç Dayanım Sonuçları

Referans ve TiO₂ ilaveli nano-beton örnekleri üzerinde gerçekleştirilen basınç dayanım deneylerinden elde edilen açıklayıcı istatistikler Çizelge 4.12’de verilmiştir. Ayrıca ortalama basınç dayanımı değerlerini gösteren bar grafik Şekil 4.3’de belirtilmiştir.

Çizelge 4.12. Nano betonlara ait basınç dayanımı değerleri için açıklayıcı istatistikler .

Beton Yaşı (Gün)	Gradasyon	N	Ortalama Eğilme Dayanımı (MPa)	Std. Sapma	Std. Hata	Ortalamanın %95 güven aralığında		Minimum	Maksimum
						Alt sınırı	Üst Sınırı		
7	Yok	3	88,1400	0,92677	0,53507	85,8378	90,4422	87,07	88,69
	TiO ₂	3	94,0933	1,32081	0,76257	90,8123	97,3744	92,80	95,44
28	Yok	3	103,6767	2,28172	1,31735	98,0086	109,3448	101,54	106,08
	TiO ₂	3	106,3433	3,18889	1,84111	98,4217	114,2650	104,33	110,02
56	Yok	3	109,9267	3,15769	1,82310	102,0825	117,7708	106,54	112,79
	TiO ₂	3	115,8167	6,72828	3,88457	99,1027	132,5306	108,05	119,87



Şekil 4.3. F0,5 gradasyonlu numunelerde TiO₂ katkısının nano-beton numunelerindeki basınç dayanımları üzerine etkisi.

Referans ve nano-beton numunelerinin basınç dayanımı değerleri incelendiğinde, basınç dayanımı değerlerinde değişimlerin olduğu, en yüksek basınç dayanımı değerlerinin TiO₂ ilaveli gradasyon karışımında elde edildiği görülmektedir. Ayrıca tüm numunelerde beton yaşı ilerledikçe basınç dayanımı değerlerinde de bir artışın olduğu tespit edilmiştir.

TiO₂ ilave durumu ve beton yaşlarında basınç dayanımı değerlerinde meydana gelen değişimin istatistiksel anlamda anlamlı olup olmadığını test etmek amacıyla elde edilen basınç dayanımı verileri üzerinde varyans analizi gerçekleştirilerek gruplar arasındaki farklar incelenmiştir. Basınç dayanımı verileri üzerinde gerçekleştirilen varyans analizi sonuçları Çizelge 4.13’de verilmiştir.

Çizelge 4.13. Optimizasyonlu numunelerde TiO₂ katkısının beton numunelerine ait varyans analizi sonuçları.

Beton Yaşı (Gün)	Varyansın Kaynağı	Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi	Kareler Ortalaması	F-Testi	Anlamlılık Düzeyi P≥0,05
7.Gün	Gruplar arası	53,163	1	53,163	40,841	0,003
	Gruplar içi	5,207	4	1,302		
	Toplam	58,370	5			
28.gün	Gruplar arası	10,667	1	10,667	1,388	0,304
	Gruplar içi	30,751	4	7,688		
	Toplam	41,417	5			
56.Gün	Gruplar arası	52,038	1	52,038	1,884	0,242
	Gruplar içi	110,482	4	27,620		
	Toplam	162,520	5			

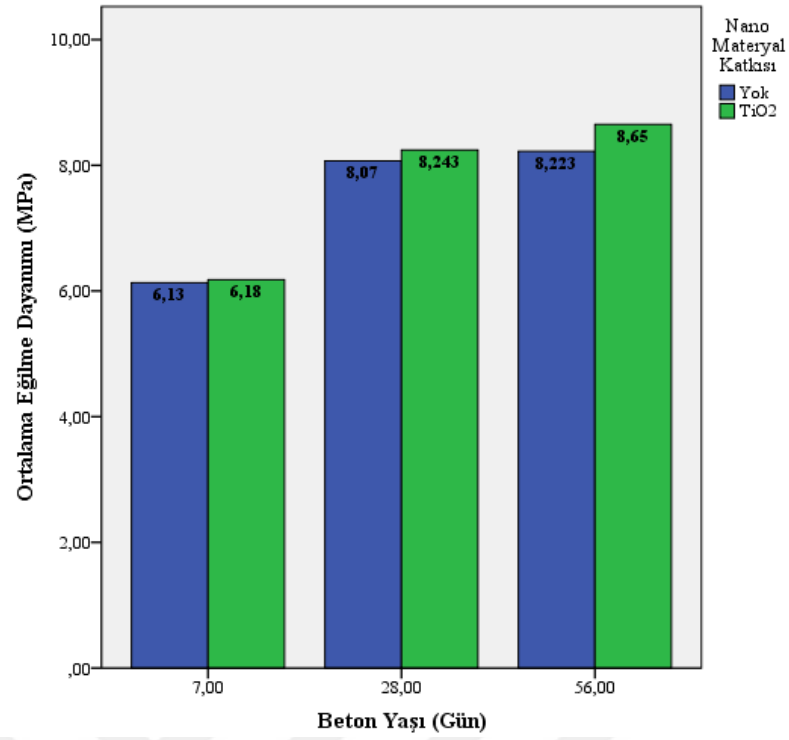
Varyans analizi sonuçlarına göre 28 ve 56 günlük basınç dayanımı değerlerinde TiO₂ ilavesi durumuna bağlı olarak gruplar arasında istatistiki anlamda önemli farkların oluşmadığı tespit edilmiştir. Bir diğer ifade TiO₂'ye bağlı olarak basınç dayanımı değerleri önemli miktarda değişmemektedir.

4.2.5. Eğilme Dayanım Sonuçları

Üretilen nano-beton örnekleri üzerinde gerçekleştirilen eğilme dayanım deneylerinden elde edilen açıklayıcı istatistikler Çizelge 4.14'de verilmiştir. Ayrıca ortalama eğilme dayanımı değerlerini gösteren bar grafik Şekil 4.4'de belirtilmiştir.

Çizelge 4.14. Optimizasyonlu numunelerde TiO₂ katkısının eğilme dayanımı değerlerine ait açıklayıcı istatistikler.

Beton Yaşı (Gün)	Gradasyon	N	Ortalama Eğilme Dayanımı (MPa)	Std. Sapma	Std. Hata	Ortalamanın %95 güven aralığında		Minimum	Maksimum
						Alt sınırı	Üst Sınırı		
7	Yok	3	6,1300	0,24062	0,13892	5,5323	6,7277	5,90	6,38
	TiO ₂	3	6,1800	0,39585	0,22855	5,1966	7,1634	5,80	6,59
28	Yok	3	8,0700	0,30512	0,17616	7,3120	8,8280	7,76	8,37
	TiO ₂	3	8,2433	0,08386	0,04842	8,0350	8,4517	8,19	8,34
56	Yok	3	8,2233	0,14572	0,08413	7,8614	8,5853	8,06	8,34
	TiO ₂	3	8,6500	0,42790	0,24705	7,5870	9,7130	8,35	9,14



Şekil 4.4. Optimizasyonlu numunelerde TiO₂ katkısının eğilme dayanımı sonuçları.

Referans ve nano-beton numunelerinden elde edilen eğilme dayanımı değerleri incelendiğinde, eğilme dayanımı değerlerinde değişimlerin olduğu, en yüksek eğilme dayanımı değerlerinin TiO₂ ilaveli gradasyon karışımında elde edildiği görülmektedir. Ayrıca tüm numunelerde beton yaşı ilerledikçe eğilme dayanımı değerlerinde de bir artışın olduğu tespit edilmiştir.

TiO₂ ilave durumu ve beton yaşlarında eğilme dayanımı değerlerinde meydana gelen değişimin istatistiksel anlamda önemli olup olmadığını test etmek amacıyla elde edilen eğilme dayanımı verileri üzerinde varyans analizi gerçekleştirilerek gruplar arasındaki farklar incelenmiştir. Eğilme dayanımı verileri üzerinde gerçekleştirilen varyans analizi sonuçları Çizelge 4.15’da verilmiştir.

Çizelge 4.15. TiO₂ katkısının beton numunelerine ait varyans analizi sonuçları.

Beton Yaşı (Gün)	Varyansın Kaynağı	Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi	Kareler Ortalaması	F-Testi	Anlamlılık Düzeyi P≥0,05
7.Gün	Gruplar arası	0,004	1	0,004	0,035	0,861
	Gruplar içi	0,429	4	0,107		
	Toplam	0,433	5			
28.gün	Gruplar arası	0,045	1	0,045	0,900	0,396
	Gruplar içi	0,200	4	0,050		
	Toplam	0,245	5			
56.Gün	Gruplar arası	0,273	1	0,273	2,673	0,177
	Gruplar içi	0,409	4	0,102		
	Toplam	0,682	5			

Varyans analizi sonuçlarına göre 7, 28 ve 56 günlük eğilme dayanımı değerlerinde TiO₂ durumuna bağlı olarak gruplar arasında istatistiki anlamda önemli farkların oluşmadığı tespit edilmiştir. Bir diğer ifade TiO₂'ye bağlı olarak eğilme dayanımı değerleri önemli miktarda değişmemektedir.

4.3. PUZOLAN KATKILI NUMUNELERE İLŞKİN DENEY SONUÇLARI

4.3.1. Puzolanik Aktivite Sonuçları

Tez çalışması kapsamında kullanılan MTKL ve YFC'nin puzolanik aktivitesini belirlemek amacıyla ASTM C311 standardına göre gerçekleştirilen puzolanik aktivite testi sonuçları Çizelge 4.16'da verilmiştir. Yapılan bu test sonucunda YFC'nin 7. gündeki aktivite indeksi %84, MTKL'nin %89'dur. 28. Gündeki indeksler ise YFC'nin %83, MTKL'nin ise %87'dir. Bu sonuçlara göre YFC ve MTKL puzolan olarak değerlendirilebilecek bir malzeme olduğu görülmektedir.

Çizelge 4.16. Puzolanik aktivite test sonuçları.

	7. Gün		28. Gün	
Örnek Bilgisi	Basınç Dayanımı (MPa)	Puzolanik Aktivite (%)	Basınç Dayanımı (MPa)	Puzolanik Aktivite (%)
Referans	34,44	100	48,55	100
YFC	29,01	84	40,66	83
MTKL	30,86	89	42,42	87

4.3.2. Slump Deneyi Sonuçları

Farklı oranlarda MTKL ve YFC ikame edilerek hazırlanan beton numuneleri ile karma puzolan kullanılarak üretilen nano-betonlar üzerinde gerçekleştirilen slump deneylerinden elde edilen sonuçlar Çizelge 4.17’de verilmiştir.

Çizelge 4.17. Bazalt agregalı karma puzolan ikameli TiO₂ katkılı taze betonun yayılma değerleri.

Numune Kodu	Numune Bilgisi	Su miktarı	S/Ç	En (mm)	Boy (mm)	Çapraz (mm)	Genel Ortalama
0	Referans Numune	225	0,30	235,00	242,50	242,50	240,00
1	F0,5-T-Y (%5)	225	0,30	238,50	242,00	239,50	240,00
2	F0,5-T Y (%10)	225	0,30	218,00	220,50	221,50	220,00
3	F0,5-T Y (%20)	225	0,30	215,00	216,50	213,50	215,00
4	F0,5-T M (%5)	225	0,30	219,00	222,50	218,50	220,00
5	F0,5-T M (%10)	225	0,30	222,00	218,50	174,50	220,00
6	F0,5-T M (%20)	225	0,30	241,00	240,50	238,50	240,00
7	F0,5-T -MY(%5)	225	0,30	239,00	237,50	236,00	237,50
8	F0,5-T -MY(%10)	225	0,30	217,50	221,00	227,50	220,00
9	F0,5-T -M(%5)+Y(%10)	225	0,30	238,00	236,00	231,00	235,00
10	F0,5-T -M(%10)+Y(%5)	225	0,30	226,50	224,00	224,50	225,00

4.3.3. Birim Hacim Ağırlık Sonuçları

Farklı oranlarda MTKL ve YFC ikame edilerek hazırlanan nano-beton numuneleri ile karma puzolan kullanılarak üretilen numuneler üzerinde gerçekleştirilen birim hacim ağırlık deneylerinden elde edilen sonuçlar Çizelge 4.18’da verilmiştir.

Çizelge 4.18. Bazalt agregalı karma puzolan ikameli sertleşmiş beton birim ağırlık değerleri.

Beton Türü	Taze Beton Birim Ağırlık (kg/m ³)	Sertleşmiş Beton Birim Ağırlık (kg/m ³)
Referans Numune	2431	2219
F0,5-T-Y (%5)	2398	2204
F0,5-T Y (%10)	2425	2188
F0,5-T Y (%20)	2365	2119
F0,5-T M (%5)	2409	2212
F0,5-T M (%10)	2403	2206
F0,5-T M (%20)	2219	2201
F0,5-T –M Y(%5)	2427	2213
F0,5-T –M Y(%10)	2414	2206
F0,5-T -M(%5)+Y(%10)	2418	2209
F0,5-T -M(%10)+Y(%5)	2421	2203

4.3.4. Basınç Dayanım Sonuçları

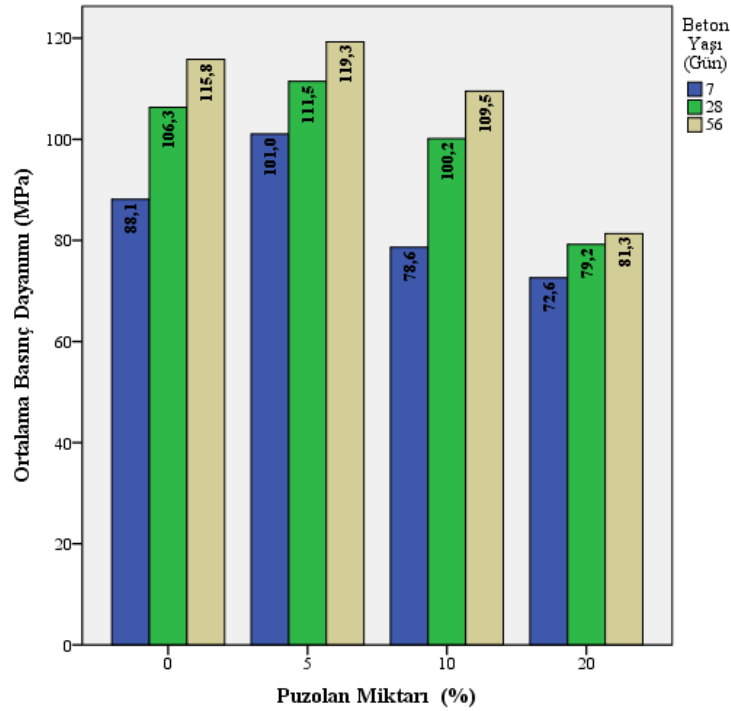
Farklı oranlarda MTKL ve YFC ikame edilerek hazırlanan beton numuneleri ile karma puzolan kullanılarak üretilen numuneler üzerinde 7, 28 ve 56 günlerde yapılan basınç dayanımı deneyleri sonucunda her bir gruba ait basınç dayanımı değerleri elde edilmiştir.

4.3.4.1. MTKL İkame Edilmiş Beton Numuneler

MTKL ikame edilen beton numunelerine ait açıklayıcı istatistikler Çizelge 4.19’de verilmiştir. Ayrıca MTKL ikameli betonlar için ortalama basınç dayanımı değerlerini gösteren bar grafik Şekil 4.5’da görülmektedir.

Çizelge 4.19. MTKL İkame edilmiş betonların basınç dayanımı değerlerine ait açıklayıcı istatistikler.

Beton Yaşı (Gün)	MTKL İkame Miktarı (%)	N	Ortalama Basınç Dayanımı (MPa)	Std. Sapma	Std. Hata	Ortalamanın %95 güven aralığında		Minimum	Maksimum
						Alt sınırı	Üst Sınırı		
7	0	3	88,14	0,92677	0,53507	85,8378	90,4422	87,07	88,69
	5	3	101,05	5,30826	3,06473	87,8602	114,2331	94,92	104,27
	10	3	78,63	5,14732	2,97181	65,8433	91,4167	74,51	84,40
	20	3	72,61	10,42461	6,01865	46,7138	98,5062	60,71	80,13
28	0	3	106,34	3,18889	1,84111	98,4217	114,2650	104,33	110,02
	5	3	111,48	0,14177	0,08185	111,1278	111,8322	111,32	111,59
	10	3	100,16	24,69261	14,25629	38,8202	161,4998	71,71	116,02
	20	3	79,21	15,82391	9,13594	39,9046	118,5221	61,10	90,35
56	0	3	115,82	6,72828	3,88457	99,1027	132,5306	108,05	119,87
	5	3	119,28	0,36692	0,21184	118,3652	120,1882	118,89	119,62
	10	3	109,52	10,29360	5,94302	83,9493	135,0907	97,81	117,14
	20	3	81,33	7,08565	4,09090	63,7249	98,9284	74,41	88,57



Şekil 4.5. MTKL ikameli beton numunelerine ait ortalama basınç dayanımı değerleri.

MTKL ikameli betonlardan elde edilen basınç dayanımı değerleri incelendiğinde puzolan ikame miktarına göre basınç dayanımı değerlerinde değişimlerin olduğu, en yüksek basınç dayanımı değerlerinin %5 MTKL ikameli karışımlarda elde edildiği görülmektedir. Ayrıca tüm MTKL ikame oranlarında beton yaşı ilerledikçe basınç dayanımı değerlerinde de bir artışın olduğu tespit edilmiştir.

MTKL ikame oranlarında ve beton yaşlarında basınç dayanımı değerlerinde meydana gelen değişimin istatistiksel anlamda önemli olup olmadığını test etmek amacıyla elde edilen basınç dayanımı verileri üzerinde varyans analizi gerçekleştirilerek gruplar arasındaki farklar incelenmiştir. Basınç dayanımı verileri üzerinde gerçekleştirilen varyans analizi sonuçları Çizelge 4.20’de verilmiştir.

Çizelge 4.20. MTKL ikameli beton numunelerine ait varyans analizi sonuçları.

Beton Yaşı (Gün)	Varyansın Kaynağı	Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi	Kareler Ortalaması	F-Testi	Anlamlılık Düzeyi $P \geq 0,05$
7.Gün	Gruplar arası	1384,196	3	461,399	11,240	0,003
	Gruplar içi	328,408	8	41,051		
	Toplam	1712,603	11			
28.gün	Gruplar arası	1806,524	3	602,175	2,768	0,111
	Gruplar içi	1740,621	8	217,578		
	Toplam	3547,145	11			
56.Gün	Gruplar arası	2678,579	3	892,860	17,718	0,001
	Gruplar içi	403,138	8	50,392		
	Toplam	3081,717	11			

Varyans analizi sonuçlarına göre 7 ve 28 günlük basınç dayanımı değerlerinde MTKL ikame oranlarına bağlı olarak gruplar arasında istatistiki anlamda önemli farkların olduğu tespit edilmiştir. Bir diğer ifade ile MTKL miktarına bağlı olarak basınç dayanımı değerleri önemli miktarda değişmektedir. Bu farklılıkların hangi gruplardan kaynaklandığını tespit etmek amacıyla gerçekleştirilen Duncan çoklu karşılaştırma testi sonuçları Çizelge 4.21’de verilmiştir.

Çizelge 4.21. MTKL ikameli betonların basınç dayanımı verileri üzerinde gerçekleştirilen Duncan çoklu karşılaştırma testi sonuçları.

Beton Yaşı	Puzolan Miktarı (%)	N	Farklı Olan Gruplar $P \geq 0,05$		
			1	2	3
7 Günlük	20	3	72,6100		
	10	3	78,6300	78,6300	
	0	3		88,1400	
	5	3			101,0467
28 Günlük	20	3	79,2133		
	10	3	100,1600	100,1600	
	0	3	106,3433	106,3433	
	5	3		111,4800	
56 Günlük	20	3	81,3267		
	10	3		109,5200	
	0	3		115,8167	
	5	3		119,2767	

Duncan çoklu karşılaştırma testi sonuçları incelendiğinde;

- Tüm yaş gruplarında %5 MTKL ikameli betonların en yüksek basınç dayanımı değerlerini verdiği,
- En düşük basınç dayanımı değerlerinin ise %20 MTKL ikameli betonlarda elde edildiği,
- 7 günlük numunelerde %5 MTKL ikameli numunelerin 101,04 MPa ile en büyük basınç dayanımı değerine sahip olduğu, referans numuneye göre %12 oranında basınç dayanımı değerinde bir artış meydana geldiği,
- 28 günlük numunelerde de %5 MTKL ikameli numunelerin 111,48 MPa ile en büyük basınç dayanımı değerine sahip olduğu, referans numuneye göre %5 oranında daha büyük basınç dayanımına sahip olduğu,
- 56 günlük numunelerde %5 MTKL ikameli numunelerin 119,27 MPa ile en büyük basınç dayanımı değerine sahip olduğu, referans numuneye göre %4 oranında daha büyük basınç dayanımına sahip olduğu,

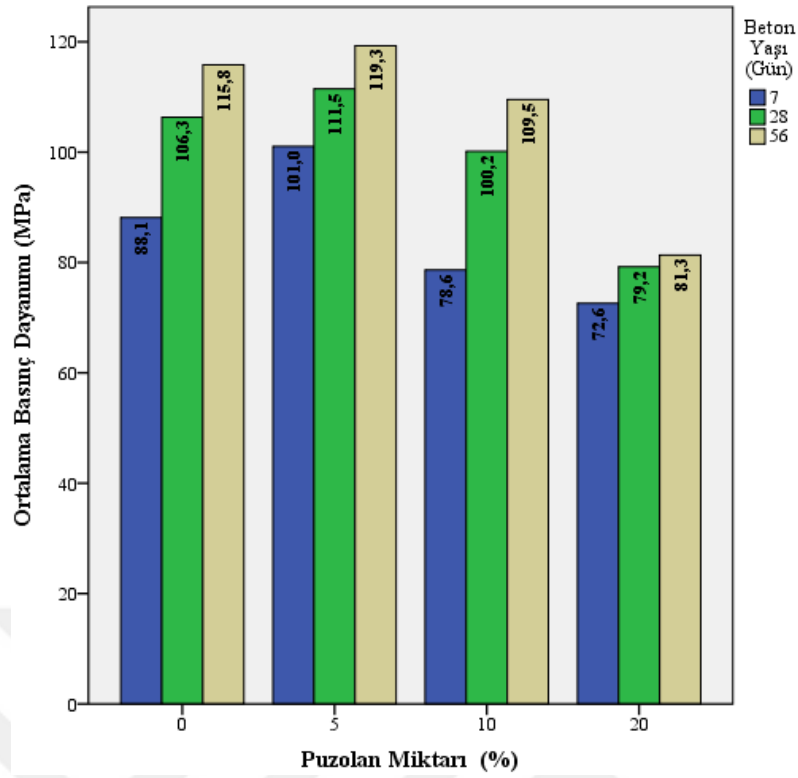
- %5 MTKL ikameli betonun 7, 28 ve 56. Günlerde basınç dayanımı değerlerinin artış eğilimi gösterdiği, bu durumun çimento hidratasyon ürünlerinin gelişmesi ve pozolanik reaksiyonların oluşumundan kaynaklı olduğu düşünülmektedir. %5 MTKL ikameli betonun basınç dayanımı değeri 7.gün dayanımı referans alındığında sırasıyla 28. Günde %10, 56. Günde ise %15 oranında artış olduğu görülmüştür.

4.3.4.2. YFC İkame Edilmiş Beton Numuneler

YFC ikame edilen beton numunelerine ait açıklayıcı istatistikler Çizelge 4.22’de verilmiştir. Ayrıca YFC ikameli betonlar için ortalama basınç dayanımı değerlerini gösteren bar grafik Şekil 4.6’de görülmektedir.

Çizelge 4.22. YFC İkame edilmiş betonların basınç dayanımı değerlerine ait açıklayıcı istatistikler.

Beton Yaşı (Gün)	YFC İkame Miktarı (%)	N	Ortalama Basınç Dayanımı (MPa)	Std. Sapma	Std. Hata	Ortalamanın %95 güven aralığında		Minimum	Maksimum
						Alt sınırı	Üst Sınırı		
7	0	3	88,1400	0,92677	0,53507	85,8378	90,4422	87,07	88,69
	5	3	86,9167	10,50967	6,06776	60,8092	113,0241	75,48	96,15
	10	3	89,0867	4,72991	2,73081	77,3369	100,8364	84,19	93,63
	20	3	73,3300	3,87325	2,23622	63,7083	82,9517	68,92	76,18
28	0	3	106,3433	3,18889	1,84111	98,4217	114,2650	104,33	110,02
	5	3	99,0500	1,78126	1,02841	94,6251	103,4749	97,00	100,22
	10	3	107,9533	0,43363	0,25036	106,8761	109,0305	107,65	108,45
	20	3	84,7867	4,44101	2,56402	73,7546	95,8187	79,96	88,70
56	0	3	109,1500	0,96768	0,55869	106,7462	111,5538	108,05	109,87
	5	3	110,2367	5,83430	3,36843	95,7435	124,7299	103,50	113,65
	10	3	117,5567	3,87727	2,23854	107,9250	127,1883	114,12	121,76
	20	3	104,4167	14,74941	8,51558	67,7771	141,0562	89,88	119,37



Şekil 4.6. YFC ikameli beton numunelerine ait ortalama basınç dayanımı değerleri.

YFC ikameli betonlardan elde edilen basınç dayanımı değerleri incelendiğinde pozolan ikame miktarına göre basınç dayanımı değerlerinde değişimlerin olduğu, en yüksek basınç dayanımı değerlerinin %10 YFC ikameli karışımlarda elde edildiği görülmektedir. Ayrıca tüm YFC ikame oranlarında beton yaşı ilerledikçe basınç dayanımı değerlerinde de bir artışın olduğu tespit edilmiştir.

YFC ikame oranlarında ve beton yaşlarında basınç dayanımı değerlerinde meydana gelen değişimin istatistiksel anlamda önemli olup olmadığını test etmek amacıyla elde edilen basınç dayanımı verileri üzerinde varyans analizi gerçekleştirilerek gruplar arasındaki farklar incelenmiştir. Basınç dayanımı verileri üzerinde gerçekleştirilen varyans analizi sonuçları Çizelge 4.23’de verilmiştir.

Çizelge 4.23. YFC ikameli beton numunelerine ait varyans analizi sonuçları.

Beton Yaşı (Gün)	Varyansın Kaynağı	Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi	Kareler Ortalaması	F-Testi	Anlamlılık Düzeyi $P \geq 0,05$
7.Gün	Gruplar arası	494,481	3	164,827	4,434	0,041
	Gruplar içi	297,373	8	37,172		
	Toplam	791,853	11			
28.gün	Gruplar arası	1004,911	3	334,970	40,294	0,000
	Gruplar içi	66,505	8	8,313		
	Toplam	1071,416	11			
56.Gün	Gruplar arası	265,779	3	88,593	1,324	0,332
	Gruplar içi	535,108	8	66,888		
	Toplam	800,887	11			

Varyans analizi sonuçlarına göre 7 ve 28 günlük basınç dayanımı değerlerinde YFC ikame oranlarına bağlı olarak gruplar arasında istatistiki anlamda önemli farkların olduğu tespit edilmiştir. Bir diğer ifade ile YFC miktarına bağlı olarak basınç dayanımı değerleri önemli miktarda değişmektedir. Bu farklılıkların hangi gruplardan kaynaklandığını tespit etmek amacıyla gerçekleştirilen Duncan çoklu karşılaştırma testi sonuçları Çizelge 4.24’de verilmiştir.

Çizelge 4.24. YFC ikameli betonların basınç dayanımı verileri üzerinde gerçekleştirilen Duncan çoklu karşılaştırma testi sonuçları.

Beton Yaşı	Puzolan Miktarı (%)	N	Farklı Olan Gruplar P $\geq$ 0,05		
			1	2	3
7 Günlük	20	3	73,3300		
	5	3		86,9167	
	0	3		88,1400	
	10	3		89,0867	
28 Günlük	20	3	84,7867		
	5	3		99,0500	
	0	3			106,3433
	10	3			107,9533
56 Günlük	20	3	104,4167		
	0	3	109,1500		
	5	3	110,2367		
	10	3	117,5567		

YFC ikameli betonlardan elde edilen basınç dayanım değerleri üzerinde farklı yaşlarda MTKL ikame grupları arasında gerçekleştirilen Duncan çoklu karşılaştırma testi sonuçları incelendiğinde;

- Tüm yaş gruplarında %10 YFC ikameli betonların en yüksek basınç dayanımı değerlerini verdiği,
- En düşük basınç dayanımı değerlerinin ise %20 YFC ikameli betonlarda elde edildiği,
- 7 günlük numunelerde %10 YFC ikameli numunelerin 89,08 MPa ile en büyük basınç dayanımı değerine sahip olduğu, referans numuneye göre %1 oranında basınç dayanımı değerinde bir artış meydana geldiği,
- 28 günlük numunelerde de %10 YFC ikameli numunelerin 107,95 MPa ile en büyük basınç dayanımı değerine sahip olduğu, referans numuneye göre %1,51 oranında daha büyük basınç dayanımına sahip olduğu,
- 56 günlük numunelerde %10 YFC ikameli numunelerin 117,55 MPa ile en büyük

basınç dayanımı değerine sahip olduğu, referans numuneye göre %7,69 oranında daha büyük basınç dayanımına sahip olduğu,

- %10 YFC ikameli betonun 7, 28 ve 56. günlerde basınç dayanımı değerlerinin artış eğilimi gösterdiği, bu durumun çimento hidratasyon ürünlerinin gelişmesi ve puzolanik reaksiyonların oluşumundan kaynaklı olduğu düşünülmektedir. %10 YFC ikameli betonun basınç dayanımı değeri 7.gün dayanımı referans alındığında sırasıyla 28. günde %21, 18 ve 56. günde ise %31,96 oranında artış olduğu görülmüştür.

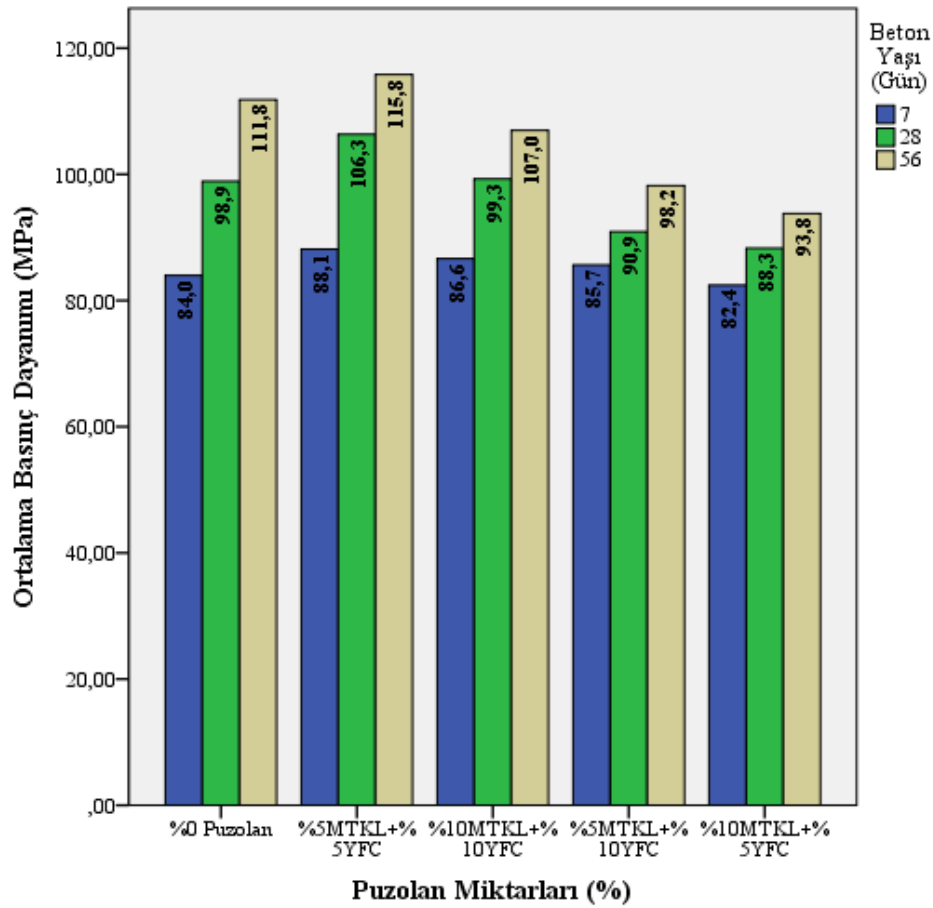
4.3.4.3. Karma Puzolan İkame Edilmiş Beton Numuneler

MTKL –YFC karma ikame edilen beton numunelerine ait açıklayıcı istatistikler Çizelge 4.25’de verilmiştir. Ayrıca karma MTKL-YFC ikameli betonlar için ortalama basınç dayanımı değerlerini gösteren bar grafik Şekil 4.7’de görülmektedir.



Çizelge 4.25. Karma puzolan ikame edilen beton numunelerine ait açıklayıcı istatistikler.

Beton Yaşı (Gün)	Puzolan İkame Miktarı (%)	N	Ortalama Basınç Dayanımı (MPa)	Std. Sapma	Std. Hata	Ortalamanın %95 güven aralığında		Minimum	Maksimum
						Alt sınırı	Üst Sınırı		
7	%0	3	83,9933	3,66302	2,11485	74,8939	93,0928	81,28	88,16
	%5MTKL+%5YFC	3	88,1400	0,92677	0,53507	85,8378	90,4422	87,07	88,69
	%10MTKL+%10YFC	3	86,6500	4,28865	2,47605	75,9964	97,3036	82,00	90,45
	%5MTKL+%10YFC	3	85,6533	1,27500	0,73612	82,4860	88,8206	84,38	86,93
	%10MTKL+%5YFC	3	82,4300	1,39453	0,80513	78,9658	85,8942	81,60	84,04
28	%0	3	98,9033	1,84289	1,06399	94,3253	103,481	97,54	101,00
	%5MTKL+%5YFC	3	106,3433	3,18889	1,84111	98,4217	114,265	104,33	110,02
	%10MTKL+%10YFC	3	99,2567	7,13342	4,11848	81,5363	116,977	91,09	104,27
	%5MTKL+%10YFC	3	90,9000	2,85963	1,65101	83,7963	98,0037	89,15	94,20
	%10MTKL+%5YFC	3	88,2833	9,50060	5,48517	64,6825	111,884	78,60	97,59
56	%0	3	111,8333	1,56312	,90247	107,950	115,716	110,40	113,50
	%5MTKL+%5YFC	3	115,8167	6,72828	3,88457	99,1027	132,530	108,05	119,87
	%10MTKL+%10YFC	3	106,9767	8,62668	4,98062	85,5468	128,406	98,45	115,70
	%5MTKL+%10YFC	3	98,2167	2,02505	1,16916	93,1862	103,247	96,20	100,25
	%10MTKL+%5YFC	3	93,7667	4,61988	2,66729	82,2902	105,243	88,60	97,50



Şekil 4.7. Karma puzolan ikameli betonlar için ortalama basınç dayanımı değerleri.

Karma puzolan ikameli betonlardan elde edilen basınç dayanımı değerleri incelendiğinde puzolan ikame miktarına göre basınç dayanımı değerlerinde değişimlerin olduğu, en yüksek basınç dayanımı değerlerinin %5 MTKL - %5 YFC ikameli karışımlarda elde edildiği görülmektedir. Ayrıca tüm karma puzolan ikame oranlarında beton yaşı ilerledikçe basınç dayanımı değerlerinde de bir artışın olduğu tespit edilmiştir.

Karma puzolan ikame oranlarında ve beton yaşlarında basınç dayanımı değerlerinde meydana gelen değişimin istatistiksel anlamda önemli olup olmadığını test etmek amacıyla elde edilen basınç dayanımı verileri üzerinde varyans analizi gerçekleştirilerek gruplar arasındaki farklar incelenmiştir. Basınç dayanımı verileri üzerinde gerçekleştirilen varyans analizi sonuçları Çizelge 4.20’de verilmiştir.

Çizelge 4.26. Karma Puzolan ikameli beton numunelerine ait varyans analizi sonuçları.

Beton Yaşı (Gün)	Varyansın Kaynağı	Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi	Kareler Ortalaması	F-Testi	Anlamlılık Düzeyi $P \geq 0,05$
7.Gün	Gruplar arası	59,791	4	14,948	2,062	0,161
	Gruplar içi	72,479	10	7,248		
	Toplam	132,270	14			
28.gün	Gruplar arası	626,575	4	156,644	4,808	0,020
	Gruplar içi	325,780	10	32,578		
	Toplam	952,355	14			
56.Gün	Gruplar arası	1017,855	4	254,464	8,621	0,003
	Gruplar içi	295,154	10	29,515		
	Toplam	1313,008	14			

Varyans analizi sonuçlarına göre 28 ve 56 günlük basınç dayanımı değerlerinde karma ikame oranlarına bağlı olarak gruplar arasında istatistiki anlamda önemli farkların olduğu tespit edilmiştir. Bir diğer ifade ile karma puzolan ikame miktarına bağlı olarak basınç dayanımı değerleri önemli miktarda değişmektedir. Bu farklılıkların hangi gruplardan kaynaklandığını tespit etmek amacıyla gerçekleştirilen Duncan çoklu karşılaştırma testi sonuçları Çizelge 4.27’de verilmiştir.

Çizelge 4.27. Karma Puzolan ikameli betonların basınç dayanımı verileri üzerinde gerçekleştirilen Duncan çoklu karşılaştırma testi sonuçları.

Beton Yaşı	Puzolan Miktarı (%)	N	Farklı Olan Gruplar P $\geq$ 0,05		
			1	2	3
7 Günlük	%10MTKL+%5YFC	3	82,4300		
	%0 Puzolan	3	83,9933	83,9933	
	%5MTKL+%10YFC	3	85,6533	85,6533	
	%10MTKL+%10YFC	3	86,6500	86,6500	
	%5MTKL+%5YFC	3		88,1400	
28 Günlük	%10MTKL+%5YFC	3	88,2833		
	%5MTKL+%10YFC	3	90,9000		
	%0 Puzolan	3	98,9033	98,9033	
	%10MTKL+%10YFC	3	99,2567	99,2567	
	%5MTKL+%5YFC	3		106,3433	
56 Günlük	%10MTKL+%5YFC	3	93,7667		
	%5MTKL+%10YFC	3	98,2167	98,2167	
	%10MTKL+%10YFC	3		106,9767	106,9767
	%0 Puzolan	3			111,8333
	%5MTKL+%5YFC	3			115,8167

Duncan çoklu karşılaştırma testi sonuçları incelendiğinde;

- Tüm yaş gruplarında %5 MTKL-5YFC ikameli betonların en yüksek basınç dayanımı değerlerini verdiği,
- En düşük basınç dayanımı değerlerinin ise %10 MTKL-%5 YFC ikameli betonlarda elde edildiği,
- 7 günlük numunelerde %5 MTKL-%5 YFC ikameli numunelerin 88,14 MPa ile en büyük basınç dayanımı değerine sahip olduğu, referans numuneye göre %4,94 oranında basınç dayanımı değerinde bir artış meydana geldiği,
- 28 günlük numunelerde de %5 MTKL-%5 YFC ikameli numunelerin 106,34 MPa ile en büyük basınç dayanımı değerine sahip olduğu, referans numuneye göre %7,52 oranında daha büyük basınç dayanımına sahip olduğu,

- 56 günlük numunelerde %5 MTKL-%5 YFC ikameli numunelerin 115,81 MPa ile en büyük basınç dayanımı değerine sahip olduğu, referans numuneye göre %3,5 oranında daha büyük basınç dayanımına sahip olduğu,
- %5 MTKL-%5 YFC ikameli betonun basınç dayanımı değeri 7.gün dayanımı referans alındığında sırasıyla 28. günde %20 ve %64, 56. günde ise %31,30 oranında artış olduğu görülmüştür.

4.3.5. Eğilme Dayanımı Sonuçları

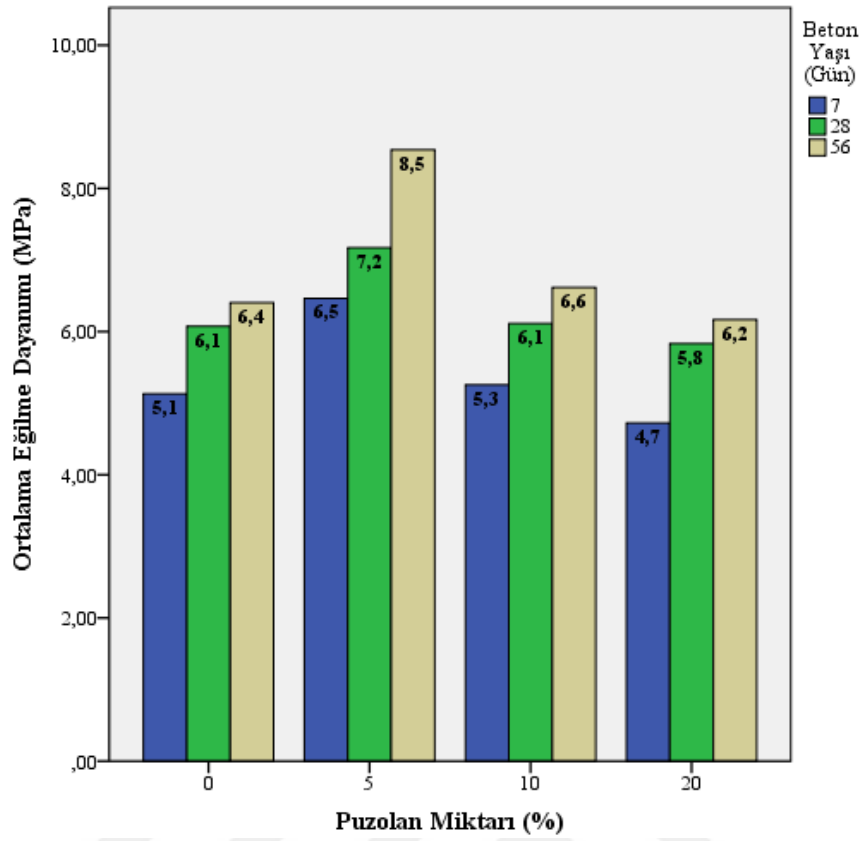
Farklı oranlarda MTKL ve YFC ikame edilerek hazırlanan beton numuneleri ile karma puzolan kullanılarak üretilen numuneler üzerinde 7, 28 ve 56. günlerde yapılan eğilme dayanımı deneyleri sonucunda her bir gruba ait eğilme dayanımı değerleri elde edilmiştir.

4.3.5.1. MTKL İkame Edilmiş Beton Numuneler

MTKL ikame edilen beton numunelerine ait açıklayıcı istatistikler Çizelge 4.28’de verilmiştir. Ayrıca MTKL ikameli betonlar için ortalama eğilme dayanımı değerlerini gösteren bar grafik Şekil 4.8’de görülmektedir.

Çizelge 4.28. MTKL İkame edilmiş betonların eğilme dayanımı değerlerine ait açıklayıcı istatistikler.

Beton Yaşı (Gün)	MTKL İkame Miktarı (%)	N	Ortalama Eğilme Dayanımı (MPa)	Std. Sapma	Std. Hata	Ortalamanın %95 güven aralığında		Minimum	Maksimum
						Alt sınırı	Üst Sınırı		
7	0	3	5,1300	0,24515	0,14154	4,5210	5,7390	4,89	5,38
	5	3	6,4633	0,51160	0,29537	5,1925	7,7342	6,11	7,05
	10	3	5,2567	0,18877	0,10899	4,7877	5,7256	5,05	5,42
	20	3	4,7233	0,58398	0,33716	3,2726	6,1740	4,06	5,16
28	0	3	6,0733	0,30567	0,17648	5,3140	6,8327	5,78	6,39
	5	3	7,1700	0,32604	0,18824	6,3601	7,9799	6,86	7,51
	10	3	6,1133	0,48604	0,28061	4,9059	7,3207	5,61	6,58
	20	3	5,8333	0,64470	0,37222	4,2318	7,4348	5,09	6,24
56	0	3	6,4033	0,31134	0,17975	5,6299	7,1767	6,11	6,73
	5	3	8,5400	0,70164	0,40509	6,7970	10,2830	8,12	9,35
	10	3	6,6167	0,58011	0,33493	5,1756	8,0578	6,03	7,19
	20	3	6,1667	0,21595	0,12468	5,6302	6,7031	5,94	6,37



Şekil 4.8. MTKL ikameli beton numunelerine ait ortalama eğilme dayanımı değerleri.

MTKL ikameli betonlardan elde edilen eğilme dayanımı değerleri incelendiğinde puzolan ikame miktarına göre eğilme dayanımı değerlerinde değişimlerin olduğu, en yüksek eğilme dayanımı değerlerinin %5 MTKL ikameli karışımlarda elde edildiği görülmektedir. Ayrıca tüm MTKL ikame oranlarında beton yaşı ilerledikçe eğilme dayanımı değerlerinde de bir artışın olduğu tespit edilmiştir.

MTKL ikame oranlarında ve beton yaşlarında eğilme dayanımı değerlerinde meydana gelen değişimin istatistiksel anlamda önemli olup olmadığını test etmek amacıyla elde edilen eğilme dayanımı verileri üzerinde varyans analizi gerçekleştirilerek gruplar arasındaki farklar incelenmiştir. Eğilme dayanımı verileri üzerinde gerçekleştirilen varyans analizi sonuçları Çizelge 4.29'da verilmiştir.

Çizelge 4.29. MTKL ikameli beton numunelerine ait varyans analizi sonuçları.

Beton Yaşı (Gün)	Varyansın Kaynağı	Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi	Kareler Ortalaması	F-Testi	Anlamlılık Düzeyi $P \geq 0,05$
7.Gün	Gruplar arası	5,045	3	1,682	9,631	0,005
	Gruplar içi	1,397	8	0,175		
	Toplam	6,442	11			
28.gün	Gruplar arası	3,183	3	1,061	4,983	0,031
	Gruplar içi	1,703	8	0,213		
	Toplam	4,886	11			
56.Gün	Gruplar arası	10,651	3	3,550	14,604	0,001
	Gruplar içi	1,945	8	0,243		
	Toplam	12,596	11			

Varyans analizi sonuçlarına göre 7, 28 ve 56. günlük basınç dayanımı değerlerinde karma ikame oranlarına bağlı olarak gruplar arasında istatistiki anlamda önemli farkların olduğu tespit edilmiştir. Bir diğer ifade ile MTKL ikame miktarına bağlı olarak eğilme dayanımı değerleri önemli miktarda değişmektedir. Bu farklılıkların hangi gruplardan kaynaklandığını tespit etmek amacıyla gerçekleştirilen Duncan çoklu karşılaştırma testi sonuçları Çizelge 4.30’de verilmiştir.

Çizelge 4.30. MTKL ikameli betonların basınç dayanımı verileri üzerinde gerçekleştirilen Duncan çoklu karşılaştırma testi sonuçları.

Beton Yaşı	Puzolan Miktarı (%)	N	Farklı Olan Gruplar $P \geq 0,05$	
			1	2
7 Günlük	20	3	4,7233	
	0	3	5,1300	
	10	3	5,2567	
	5	3		6,4633
28 Günlük	20	3	5,8333	
	0	3	6,0733	
	10	3	6,1133	
	5	3		7,1700
56 Günlük	20	3	6,1667	
	0	3	6,4033	
	10	3	6,6167	
	5	3		8,5400

Duncan çoklu karşılaştırma testi sonuçları incelendiğinde;

- Tüm yaş gruplarında %5 MTKL ikameli betonların en yüksek eğilme dayanımı değerlerini verdiği,
- En düşük eğilme dayanımı değerlerinin ise %20 MTKL ikameli betonlarda elde edildiği,
- 7 günlük numunelerde %5 MTKL ikameli numunelerin 6,46 MPa ile en büyük eğilme dayanımı değerine sahip olduğu, referans numuneye göre %25,92 oranında eğilme dayanımı değerinde bir artış meydana geldiği,
- 28 günlük numunelerde de %5 MTKL ikameli numunelerin 7,17 MPa ile en büyük eğilme dayanımı değerine sahip olduğu, referans numuneye göre %17,34 oranında daha büyük eğilme dayanımına sahip olduğu,
- 56 günlük numunelerde %5 MTKL ikameli numunelerin 8,54 MPa ile en büyük basınç dayanımı değerine sahip olduğu, referans numuneye göre %33,43 oranında daha büyük basınç dayanımına sahip olduğu,
- %5 MTKL ikameli betonun basınç dayanımı değeri 7.gün dayanımı referans

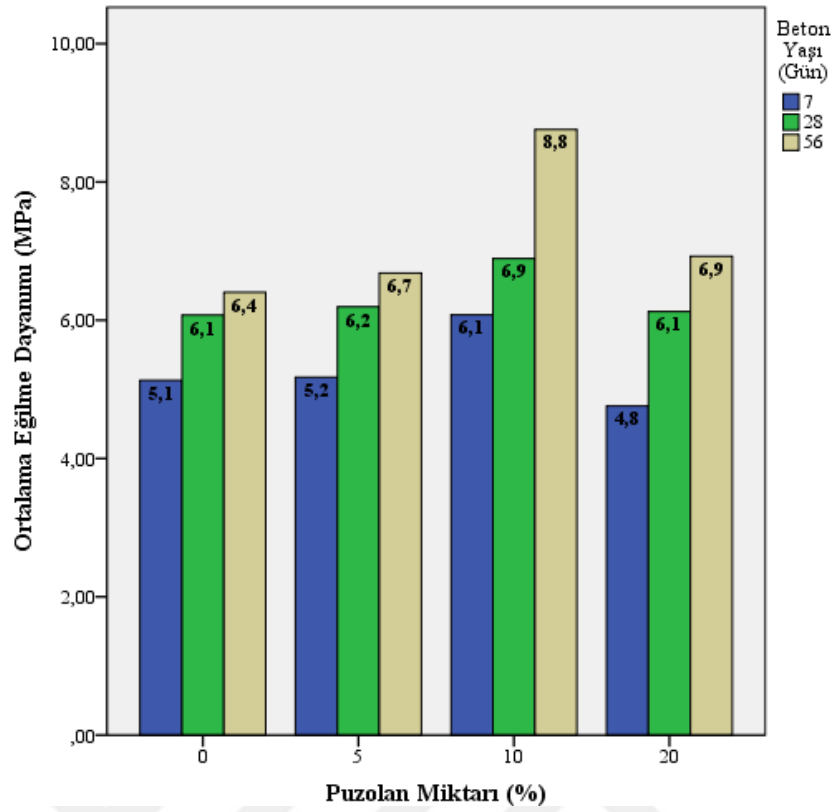
alındığında sırasıyla 28. günde %10,99, 56. günde ise %32,19 oranında artış olduğu görülmüştür.

4.3.5.2. YFC İkame Edilmiş Beton Numuneler

YFC ikame edilen beton numunelerine ait açıklayıcı istatistikler Çizelge 4.31’de verilmiştir. Ayrıca YFC ikameli betonlar için ortalama eğilme dayanımı değerlerini gösteren bar grafik Şekil 4.9’da görülmektedir

Çizelge 4.31. YFC İkame edilmiş betonların eğilme dayanımı değerlerine ait açıklayıcı istatistikler.

Beton Yaşı (Gün)	YFC İkame Miktarı (%)	N	Ortalama Eğilme Dayanımı (MPa)	Std. Sapma	Std. Hata	Ortalamanın %95 güven aralığında		Minimum	Maksimum
						Alt sınırı	Üst Sınırı		
7	0	3	5,1300	0,24515	0,14154	4,5210	5,7390	4,89	5,38
	5	3	5,1767	0,16862	0,09735	4,7578	5,5955	5,06	5,37
	10	3	6,0767	0,44467	0,25673	4,9720	7,1813	5,81	6,59
	20	3	4,7600	0,86712	0,50063	2,6060	6,9140	4,06	5,73
28	0	3	6,0733	0,30567	0,17648	5,3140	6,8327	5,78	6,39
	5	3	6,1933	0,57361	0,33118	4,7684	7,6183	5,79	6,85
	10	3	6,8933	0,32868	0,18977	6,0768	7,7098	6,54	7,19
	20	3	6,1267	0,77216	0,44581	4,2085	8,0448	5,39	6,93
56	0	3	6,4033	0,31134	0,17975	5,6299	7,1767	6,11	6,73
	5	3	6,6833	0,39501	0,22806	5,7021	7,6646	6,38	7,13
	10	3	8,7600	1,10177	0,63611	6,0230	11,4970	8,06	10,03
	20	3	6,9267	0,14640	0,08452	6,5630	7,2903	6,77	7,06



Şekil 4.9. YFC ikameli beton numunelerine ait ortalama eğilme dayanımı değerleri.

YFC ikameli betonlardan elde edilen eğilme dayanımı değerleri incelendiğinde puzolan ikame miktarına göre eğilme dayanımı değerlerinde değişimlerin olduğu, en yüksek eğilme dayanımı değerlerinin MTKL ikameli karışımlarda elde edildiği görülmektedir. Ayrıca tüm MTKL ikame oranlarında beton yaşı ilerledikçe eğilme dayanımı değerlerinde de bir artışın olduğu tespit edilmiştir.

MTKL ikame oranlarında ve beton yaşlarında eğilme dayanımı değerlerinde meydana gelen değişimin istatistiksel anlamda önemli olup olmadığını test etmek amacıyla elde edilen eğilme dayanımı verileri üzerinde varyans analizi gerçekleştirilerek gruplar arasındaki farklar incelenmiştir. Eğilme dayanımı verileri üzerinde gerçekleştirilen varyans analizi sonuçları Çizelge 4.32’de verilmiştir.

Çizelge 4.32. YFC ikameli beton numunelerine ait varyans analizi sonuçları.

Beton Yaşı (Gün)	Varyansın Kaynağı	Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi	Kareler Ortalaması	F-Testi	Anlamlılık Düzeyi $P \geq 0,05$
7.Gün	Gruplar arası	2,814	3	0,938	3,615	0,065
	Gruplar içi	2,076	8	0,260		
	Toplam	4,891	11			
28.gün	Gruplar arası	1,329	3	0,443	1,573	0,270
	Gruplar içi	2,253	8	0,282		
	Toplam	3,582	11			
56.Gün	Gruplar arası	10,229	3	3,410	9,164	0,006
	Gruplar içi	2,977	8	0,372		
	Toplam	13,206	11			

Çizelge 4.33. YFC ikameli betonların eğilme dayanımı verileri üzerinde gerçekleştirilen Duncan çoklu karşılaştırma testi sonuçları.

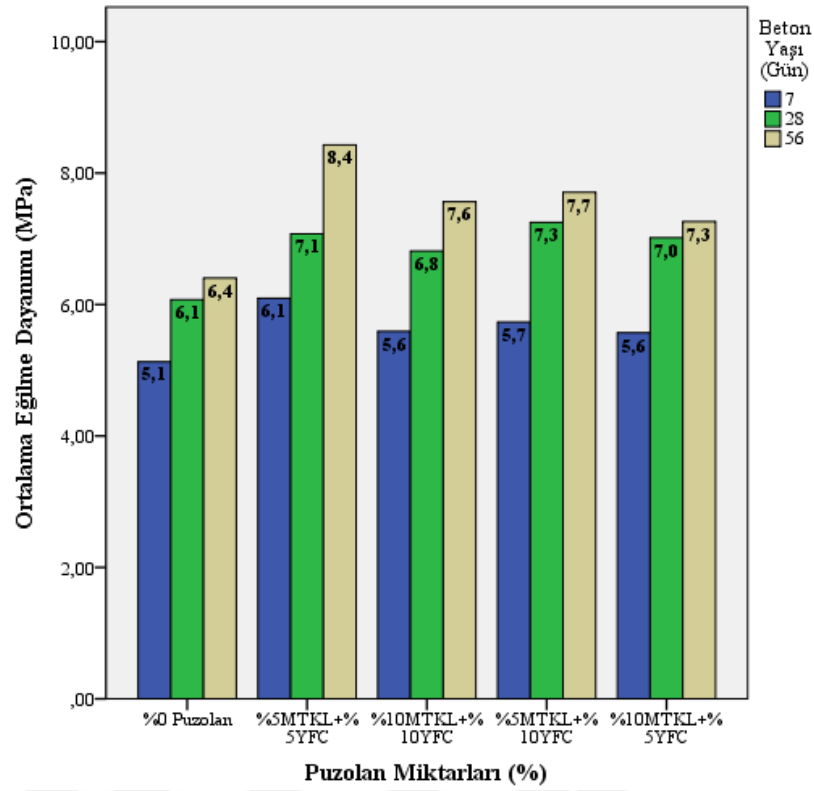
Beton Yaşı	Puzolan Miktarı (%)	N	Farklı Olan Gruplar $P \geq 0,05$	
			1	2
7 Günlük	20	3	4,7600	
	0	3	5,1300	5,1300
	5	3	5,1767	5,1767
	10	3		6,0767
28 Günlük	0	3	6,0733	
	20	3	6,1267	
	5	3	6,1933	
	10	3	6,8933	
56 Günlük	0	3	6,4033	
	5	3	6,6833	
	20	3	6,9267	
	10	3		8,7600

4.3.5.3. Karma Puzolan İkame Edilmiş Beton Numuneler

MTKL –YFC karma ikame edilen beton numunelerine ait açıklayıcı istatistikler Çizelge 4.34’de verilmiştir. Ayrıca karma MTKL-YFC ikameli betonlar için ortalama eğilme dayanımı değerlerini gösteren bar grafik Çizelge 4.34’de görülmektedir.

Çizelge 4.34. Karma puzolan ikame edilen beton numunelerine ait açıklayıcı istatistikler.

Beton Yaşı (Gün)	Puzolan İkame Miktarı (%)	N	Ortalama Eğilme Dayanımı (MPa)	Std. Sapma	Std. Hata	Ortalamanın %95 güven aralığında		Minimum	Maksimum
						Alt sınırı	Üst Sınırı		
7	%0 Puzolan	3	5,1300	0,2451	0,1415	4,5210	5,7390	4,89	5,38
	%5MTKL+%5YFC	3	6,0967	0,2653	0,1532	5,4374	6,7559	5,84	6,37
	%10MTKL+%10YFC	3	5,5933	0,5493	0,3171	4,2288	6,9579	4,96	5,94
	%5MTKL+%10YFC	3	5,7333	0,46264	0,26710	4,5841	6,8826	5,23	6,14
	%10MTKL+%5YFC	3	5,5700	0,55109	0,31817	4,2010	6,9390	5,04	6,14
28	%0 Puzolan	3	6,0733	0,30567	0,17648	5,3140	6,8327	5,78	6,39
	%5MTKL+%5YFC	3	7,0767	0,59936	0,34604	5,5878	8,5656	6,64	7,76
	%10MTKL+%10YFC	3	6,8133	0,86315	0,49834	4,6691	8,9575	6,05	7,75
	%5MTKL+%10YFC	3	7,2500	0,51643	0,29816	5,9671	8,5329	6,84	7,83
	%10MTKL+%5YFC	3	7,0167	0,67010	0,38688	5,3520	8,6813	6,34	7,68
56	%0 Puzolan	3	6,4033	0,31134	0,17975	5,6299	7,1767	6,11	6,73
	%5MTKL+%5YFC	3	8,4300	0,60803	0,35105	6,9196	9,9404	7,86	9,07
	%10MTKL+%10YFC	3	7,5633	0,55012	0,31761	6,1968	8,9299	7,16	8,19
	%5MTKL+%10YFC	3	7,7067	0,47606	0,27485	6,5241	8,8893	7,16	8,03
	%10MTKL+%5YFC	3	7,2633	0,29263	0,16895	6,5364	7,9903	6,94	7,51



Şekil 4.10. Karma pozolan ikameli betonlar için ortalama eğilme dayanımı değerleri.

Karma pozolan ikameli betonlardan elde edilen eğilme dayanımı değerleri incelendiğinde pozolan ikame miktarına göre eğilme dayanımı değerlerinde değişimlerin olduğu, en yüksek eğilme dayanımı değerlerinin %5 MTKL - %5 YFC ikameli karışımlarda elde edildiği görülmektedir. Ayrıca tüm karma pozolan ikame oranlarında beton yaşı ilerledikçe eğilme dayanımı değerlerinde de bir artış olduğu tespit edilmiştir.

Karma pozolan ikame oranlarında ve beton yaşlarında eğilme dayanımı değerlerinde meydana gelen değişimin istatistiksel anlamda önemli olup olmadığını test etmek amacıyla elde edilen eğilme dayanımı verileri üzerinde varyans analizi gerçekleştirilerek gruplar arasındaki farklar incelenmiştir. Eğilme dayanımı verileri üzerinde gerçekleştirilen varyans analizi sonuçları Çizelge 4.35’de verilmiştir.

Çizelge 4.35. Karma Puzolan ikameli beton numunelerine ait varyans analizi sonuçları.

Beton Yaşı (Gün)	Varyansın Kaynağı	Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi	Kareler Ortalaması	F-Testi	Anlamlılık Düzeyi $P \geq 0,05$
7.Gün	Gruplar arası	1,450	4	0,362	1,908	0,186
	Gruplar içi	1,900	10	0,190		
	Toplam	3,350	14			
28.gün	Gruplar arası	2,531	4	0,633	1,653	0,236
	Gruplar içi	3,827	10	0,383		
	Toplam	6,358	14			
56.Gün	Gruplar arası	6,500	4	1,625	7,513	0,005
	Gruplar içi	2,163	10	0,216		
	Toplam	8,663	14			

Varyans analizi sonuçlarına göre 56 günlük numunelerdeki eğilme dayanımı değerlerinde karma ikame oranlarına bağlı olarak gruplar arasında istatistiki anlamda önemli farkların olduğu tespit edilmiştir. Bir diğer ifade ile karma puzolan ikame miktarına bağlı olarak eğilme dayanımı değerleri önemli miktarda değişmektedir. Bu farklılıkların hangi gruplardan kaynaklandığını tespit etmek amacıyla gerçekleştirilen Duncan çoklu karşılaştırma testi sonuçları Çizelge 4.36’da verilmiştir.

Çizelge 4.36. Karma Puzolan ikameli betonların eğilme dayanımı verileri üzerinde gerçekleştirilen Duncan çoklu karşılaştırma testi sonuçları.

Beton Yaşı	Puzolan Miktarı (%)	N	Farklı Olan Gruplar $P \geq 0,05$		
			1	2	3
7 Günlük	%0 Puzolan	3	5,1300		
	%10MTKL+%5YFC	3	5,5700	5,5700	
	%10MTKL+%10YFC	3	5,5933	5,5933	
	%5MTKL+%10YFC	3	5,7333	5,7333	
	%5MTKL+%5YFC	3		6,0967	
28 Günlük	%0 Puzolan	3	6,0733		
	%10MTKL+%10YFC	3	6,8133		
	%10MTKL+%5YFC	3	7,0167		
	%5MTKL+%5YFC	3	7,0767		
	%5MTKL+%10YFC	3	7,2500		
56 Günlük	%0 Puzolan	3	6,4033		
	%10MTKL+%5YFC	3		7,2633	
	%10MTKL+%10YFC	3		7,5633	7,5633
	%5MTKL+%10YFC	3		7,7067	7,7067
	%5MTKL+%5YFC	3			8,4300

Duncan çoklu karşılaştırma testi sonuçları incelendiğinde;

- 7 ve 56 günlük yaş gruplarında %5 MTKL-%5YFC ikameli betonların en yüksek eğilme dayanımı değerlerini verdiği, 28 yaş grubunda ise %5MTKL-%10YFC en yüksek basınç dayanımı değerlerini verdiği,
- En düşük eğilme dayanımı değerlerinin ise %0 puzolan ikameli betonlarda elde edildiği,
- 7 günlük numunelerde %5 MTKL-%5 YFC ikameli numunelerin 6,09 MPa ile en büyük eğilme dayanımı değerine sahip olduğu, referans numuneye göre %18,71 oranında eğilme dayanımı değerinde bir artış meydana geldiği,
- 28 günlük numunelerde de %5 MTKL-%10 YFC ikameli numunelerin 7,25 MPa ile en büyük eğilme dayanımı değerine sahip olduğu, referans numuneye göre

%19,4 oranında daha büyük basınç dayanımına sahip olduğu,

- 56 günlük numunelerde %5 MTKL-%5 YFC ikameli numunelerin 8,43 MPa ile en büyük eğilme dayanımı değerine sahip olduğu, referans numuneye göre %31,7 oranında daha büyük eğilme dayanımına sahip olduğu,
- %5 MTKL-%5 YFC ikameli betonun eğilme dayanımı değeri 7.gün dayanımı referans alındığında sırasıyla 28. günde %16 ve %17, 56. günde ise %38,42 oranında artış olduğu görülmüştür.



5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Karma puzolan içeren yüksek performanslı nano beton üretimi gerçekleştirmek amacıyla tekil olarak %5, %10, %20 oranlarında ve karma olarak %10, %15, %20 oranında metakaolin ve yüksek fırın cürufu ikame edilerek numuneler üretilmiştir. Ayrıca TiO_2 nano materyali karışımların içerisine katılmıştır. Hazırlanan numuneler üzerinde gerçekleştirilen Basınç dayanım, Eğilme dayanımı, su emme birim hacim ağırlık deneylerinden elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

- Farklı agrega tane dağılımına sahip karışımına bağlı olarak slump değerlerinin değiştiği, en büyük yayılma çapının F0,8 tane dağılımına sahip karışımda olduğu, en küçük yayılma çapının ise F1 tane dağılımına sahip karışımda olduğu görülmüştür
- Farklı agrega tane dağılımına sahip beton numunelerinden elde edilen basınç ve eğilme dayanımı değerleri incelendiğinde gradasyon türüne göre basınç dayanımı değerlerinde değişimlerin olduğu, en yüksek basınç dayanımı değerlerinin F0,5 gradasyon karışımında elde edildiği görülmektedir
- Farklı agrega tane dağılımına sahip ve TiO_2 ilaveli nano-beton numunelerinden elde edilen basınç dayanımı değerleri TiO_2 'siz değerlere göre %5 oranında artış gözlenmiştir
- TiO_2 'ye bağlı olarak eğilme dayanımı değerleri önemli miktarda değişmediği görülmüştür.
- Puzolanik aktivite test sonucuna göre YFC'nin puzolanik aktivite indeksinin %84, MTKL'nin ise %87 olduğu ve buna göre MTKL'nin puzolanik aktivitesinin daha yüksek olduğu görülmüştür.
- MTKL ikameli nano-betonlardan elde edilen basınç dayanımı değerleri incelendiğinde puzolan ikame miktarına göre basınç dayanımı değerlerinde değişimlerin olduğu, en yüksek basınç dayanımı değerlerinin %5 MTKL ikameli karışımlarda elde edildiği görülmektedir. En düşük basınç dayanımı değerlerinin ise %20 MTKL ikameli betonlarda elde edildiği,
- YFC ikameli nano-betonlardan elde edilen basınç dayanımı değerleri

incelendiğinde puzolan ikame miktarına göre basınç dayanımı değerlerinde değişimlerin olduğu, en yüksek basınç dayanımı değerlerinin %10 YFC ikameli karışımlarda elde edildiği görülmektedir.

- Karma puzolan ikameli nano-betonlardan elde edilen basınç dayanımı değerleri incelendiğinde %5 MTKL-%5YFC ikameli betonların en yüksek basınç dayanımı değerlerini verdiği, en düşük basınç dayanımı değerlerinin ise %10 MTKL-%5 YFC ikameli betonlarda elde edilmiştir.
- MTKL ikameli nano-betonlarda en yüksek eğilme dayanımı %5 YFC ikameli betonlarda, en düşük eğilme dayanımı ise %20 MTKL ikameli betonlarda görülmüştür.
- YFC ikameli nano-betonlarda eğilme dayanımında %10 ikameli numune en yüksek dayanımı, %20 ikameli numune de ise en düşük eğilme dayanım sonucu elde edilmiştir.

Karma puzolanlı karışımlarda en yüksek eğilme dayanımı değerlerinin ise %5 MTKL-%5 YFC ikameli betonlarda, en düşük eğilme dayanımı ise %10 MTKL-%5 YFC karma puzolan ikameli betonlardan elde edilmiştir.

Sonuç olarak puzolanların karma olarak kullanılabilirliği denenmiş ancak tekil olarak kullanımlarda mekanik özelliklerde dayanım değerinin daha iyi olduğu görülmüştür. Nano materyal kullanımını ile dayanım değerlerinde artış sağlanmıştır. Özellikle nano teknoloji alanındaki gelişmeler göz önünde bulundurulduğunda beton üretiminde kullanılabilecek gerek puzolanik özellikle gerekse dolgu malzemesi olarak kullanılabilecek farklı nano materyallerin beton içerisinde kullanımı ve bunların betonun fiziksel mekanik özelliklerinin yanında durabilite özelliklerine olan etkilerinin de araştırılması yenilikçi ve yüksek performanslı betonların ortaya çıkmasına katkı sağlayacaktır.

6. KAYNAKLAR

- [1] H. Y. Aruntaş, “Diatomitlerin Çimentolu Sistemlerde Puzolanik Malzeme Olarak Kullanabilirliği”, Doktora tezi, Mimarlık Anabilim, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 1996.
- [2] C. A. J. Z.C. Grasley X. Li, E.J. Garboczi, and J.W. Bullard, “Elastic and Viscoelastic Properties of Calcium Silicate Hydrate”, in *NICOM 4 4th International symposium on nanotechnology in constructionnt*, Greece, 2012.
- [3] B. Y. Pekmezci, “Yüksek Performanslı Çimentolu Ürünlerin Otojen Rötire Özellikleri”, Doktora tezi, İnşaat Mühendisliği, Fen Bilimleri Enstitüsü, İTÜ, İstanbul, Türkiye, 2006.
- [4] B. Birgisson, A. K. Mukhopadhyay, G. Geary, M. Khan, ve K. Sobolev, “*Nanotechnology in Concrete Materials: A Synopsis*”, Transportation Research Circular (E-C170), ss. 1-44, 2012.
- [5] M. Akman, *Yapı Malzemeleri*. İstanbul, Türkiye: İnşaat Fakültesi Matbaası, 1990.
- [6] B. Postacıoğlu, *Beton*, Cilt 2, İstanbul, Türkiye: Matbaa Teknisyenleri Basımevi, 1987.
- [7] H. Özkul, M. A. Taşdemir, ve M. Tokyay, *Her Yönüyle Beton*. İstanbul, Türkiye: Türkiye Hazır Beton Birliği, 2004.
- [8] M. A. Taşdemir ve F. Bayramov, “Yüksek Performanslı Çimento Esaslı Kompozitlerin Mekanik Davranışı”, *İstanbul Teknik Üniversitesi Mühendislik Dergisi*, c. 1, sayı 2, ss 125-144, 2002.
- [9] M. A. Taşdemir, F. Bayramov, A. Ş. Ağar, ve M. Yerlikaya, “Çelik Tel Donatılı Betonların Performansa Dayalı Tasarımı”, *İstanbul Teknik Üniversitesi 6. Ulusal Beton Kongresi*, İstanbul, Türkiye, 2005.
- [10] E. Özdoğan, A. Demir, Ve N. Seventekin, “Nanoteknoloji Ve Tekstil Uygulamaları”, *Tekstil Ve Konfeksiyon*, c. 3, ss. 159-168, 2006.
- [11] M. Lackhoff, X. Prieto, N. Nestle, F. Dehn, ve R. Niessner, “Photocatalytic Activity Of Semiconductor-Modified Cement - Influence Of Semiconductor Type And Cement Ageing”, *Applied Catalysis B: Environ*, c. 43, sayı 3, ss. 205–216, 2003.
- [12] H. Li, H. gang Xiao, ve J. ping Ou, “A Study On Mechanical And Pressure-Sensitive Properties Of Cement Mortar With Nanophase Materials”, *Cement and Concrete Research*, c. 34, sayı 3, ss. 435–438, 2004.
- [13] A. R. Jayapalan, B. Y. Lee, ve K. E. Kurtis, “Can Nanotechnology Be ‘Green’? Comparing Efficacy Of Nano And Microparticles In Cementitious Materials”, *Cement and Concrete Composites*, c. 36, sayı 1, ss. 16–24, 2013.
- [14] A. Korpa, T. Kowald, R. Trettn, T. Kota, K. Khaxhiu, ve A. Mele, “Pyrogenic Tiny Particles For Large Contributions On The Properties Of Advanced Ultra High Performance Cement-Based Composites”, in *NICOM 4th International Symposium on Nanotechnology in Construction*, 2012.
- [15] A. Ślosarczyk, A. Kwiecińska, ve E. Pelszyk, “Influence of Selected Metal Oxides in Micro and Nanoscale on the Mechanical and Physical Properties of the Cement

- Mortars”, *Procedia Engineering*, c. 172, ss. 1031–1038, 2017.
- [16] M. Sonebi, P. Carr, ve Y. Ammar, “Effect of Nano-silica on Fresh Properties and Rheology of Grouts”, *Nanotechnology Construction*, ss. 187–192, 2015.
- [17] S. Kawashima, P. Hou, D. . Corr, ve S. Shah, “Modifications of Cement-based Materials with Nanoparticles”, in *4th International Symposium on Nanotechnology in Construction*, 2012.
- [18] R. H. Grubbs ve S. H. Pine, *In Comprehensive Organic Syhthesis*. New York, USA: Pergamon Press, 1991.
- [19] Anonim, (2018, 6 Temmuz). “Nano Teknoloji Nedir”. [Online]. Erişim: <http://www.biltek.tubitak.gov.tr/bdergi/yeniufuk/icerik/nanoteknoloji.pdf>.
- [20] Anonim, (2018, 5 Haziran). “Titanyum Dioksit”. [Online]. Erişim: <http://www.boyaturk.com>.
- [21] N. Monteiro-Riviere, K. Wiench, R. Landsiedel, S. Schulte, A. O. Inman, J. E Riviere, “Safety Evaluation Of Sunscreen Formulations Containing Titanium Dioxide And Zinc Oxide Nanoparticles in UVB Sunburned Skin: An In Vitro And in Vivo Study”, *Toxicological Sciences*, c. 123, sayı 1, ss. 264–280, 2011.
- [22] K. Jukk vd., “Electrochemical Oxygen Reduction Behaviour Of Platinum Nanoparticles Supported On Multi-Walled Carbon Nanotube/Titanium Dioxide Composites”, *Journal of Electroanalytical Chemistry*, c. 735, ss. 68–76, 2014.
- [23] A. Kambur ve G. S. Pozan Soylu, “Nana-TiO₂ Katalizörler ile UV-Işını Altında Fenol’ün Fotokatalitik Aktivitesinin İncelenmesi”, *11. Ulusal Kimya Mühendisliği Kongresi*, Eskişehir, Türkiye, 2011.
- [24] U. Gündeşli, “Uçucu Kül, Silis Dumanı ve Yüksek Fırın Cürufunun Beton ve Çimento Katkısı Olarak Kullanımı Üzerine Bir Kaynak Taraması”, Yüksek lisans tezi, İnşaat Mühendisliği, Fen Bilimleri Enstitüsü, Çukurova Üniversitesi, Adana, Türkiye, 2008.
- [25] S. T. Erdoğan ve T. Y. Erdoğan, “Puzolanik Mineral Katkılar ve Tarihi Geçmişleri”, *2. Yapılarda Kimyasal Katkılar Sempozyumu Bildiriler Kitabı*, ss. 263–275, 2007.
- [26] M. S. Akman, *Yapı Malzemeleri*. İstanbul, Türkiye: İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi Matbaası, 1990.
- [27] F. Özcan, “Silis Dumanı İçeren Harç ve Betonların Özellikleri ve Hızlandırılmış Kür ile Dayanım Tahmini”, Doktora tezi, İnşaat Mühendisliği, Fen Bilimleri Enstitüsü, Çukurova Üniversitesi, Adana, Türkiye, 2005.
- [28] M. Dayı, “Doğal Ve Yapay Puzolanların Kompoze Çimento Üretiminde Kullanılabilirliğinin Araştırılması”, Yüksek lisans tezi, İnşaat Mühendisliği, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2006.
- [29] S. Agar, “Farklı Özellikte Puzolan Katkılı Harçların Durabiliteye Etkileri”, Yüksek lisans tezi, İnşaat Mühendisliği, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniveristesi, İstanbul, Türkiye, 2009.
- [30] P. K. Mehtap, “Puzzolanik And Cementitious By-Pruducts in Concrete – Another Look, Third International Conference on The Use of Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Puzzolans in Concrete”, in *Third International Conference on The Use of Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Puzzolans in Concrete, USA*, 1989.

- [31] T. Y. Erdoğan, *Beton*. Baskı 3, Ankara, Türkiye: ODTÜ Geliştirme Vakfı ve Yayıncılık A.Ş., 2003.
- [32] F. Massazza, “Puzzolanlar, Puzolanlı Çimentolar ve Kullanım Alanları”, *Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği Semineri*, ss. 41–79, İstanbul, Türkiye, 1989.
- [33] O. Şimşek, *Beton ve Beton Teknolojileri*, 1.Baskı. Ankara, Türkiye: Seçkin Yayıncılık, 2004.
- [34] Tokyay ve Erdoğan, “Cüruflar ve Cürufllu Çimentolar”, *Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği Semineri /Araştırma ve Geliştirme*, Ankara, 2003.
- [35] T. Delibas, “Effects Of Granulated Blast Furnace Slag, Trass And Limestone Fineness On The Properties Of Blended Cements”, Master thesis, Middle East Technical University, Ankara, Turkey, 2012.
- [36] G. Bilgen, A. Kavak, S. T. Yıldırım, ve Ö. F. Çapar, “Yüksek Fırın Cürufunun İnşaat Sektöründeki Yeri ve Önemi”, 2. *Ulusal Katı Atık Yönetimi Kongresi Bildirileri*, Mersin, Türkiye, 2010, ss. 506–513.
- [37] D. N. Richardson, “Strength and Durability of a 70 % Ground Granulated Blast Furnace Slag Concrete Mix”, *State Research News*, sayı 5, 2006.
- [38] Y. S., G. T., ve Ö. C. Çobanoğlu, “Elazığ Ferrookrom Cürufunun Beton Basınç Dayanımı ve Çarpma Enerjisi Üzerine Etkisi”, *Fırat Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilgi Dergisi*, c. 17, sayı 4, ss. 681–685, 2005.
- [39] M. Emiroğlu, S. Subaşı, ve Y. Koçak, “Effects of Blast Furnace Slag on Physical and Mechanical Properties of Concrete”, in *6th International Advanced Technologies Symposium (IATS’11)*, Elazığ, Turkey, 2011.
- [40] C. Bilim, “Yüksek Fırın Cürufu Katkısının Çimento Tabanlı Malzemelerde Kullanılabilirliği”, Doktora tezi, İnşaat Mühendisliği, Fen Bilimleri Enstitüsü, Çukurova Üniversitesi, Adana, Türkiye, 2006.
- [41] Ş. Yazıcı, D. Anuk, ve H. Ş. Arel, “Metakaolin Kullanımının Harçların Mekanik Özelliklerin Etkisi”, *Ege Üniversitesi, Sakarya Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, sayı 25, s. 2, 2010.
- [42] C. Şengül ve M. A. Taşdemir, “Karma Lifli Kendiliğinden Yerleşen Betonların Mekanik Davranışına Agrega Oranlarının Etkisi”, *İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi Yayınları*, ss 373-382, 2007.
- [43] S. H. Sun, J. T. Ma, X. M. Pang, Y. T. Sun, ve S. L. Wang, “Sulfur Reduction Additive Prepared from Acid-Modified Kaolin”, *Bulletin of the Catalysis Society. India*, c. 4, ss. 72–78, 2005.
- [44] M. Mushurov, “Investigation Of Waste Products Of Boron And Metakaolin Utilizes In Portland Cement Mortar”, Master thesis, Civil Engineer, Yıldız Teknik University, İstanbul, Turkey, 2018.
- [45] K. Tosun, B. Felekoğlu, ve B. Baradan, “Metakaolin ve Silika Dumanı Kullanımının Çimento Harcının Mekanik ve Fiziksel Özelliklerine Etkileri”, *Dokuz Eylül Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü*, 2007.
- [46] C. S. Poon, S. C. Kou, ve L. Lam, “Compressive Strength, Chloride Diffusivity And Pore Structure Of High Performance Metakaolin And Silica Fume Concrete”, *Construction and Building Materials*, c. 20, sayı 10, ss. 858–865, 2006.

- [47] J. M. Khatib ve R. M. Clay, “Absorption Characteristics Of Metakaolin Concrete”, *Cement and Concrete Research*, c. 34, sayı 1, ss. 19–29, 2004.
- [48] N. M. Al-Akhras, “Durability Of Metakaolin Concrete To Sulfate Attack”, *Cement and Concrete Research*, c. 36, sayı 9, ss. 1727–1734, 2006.
- [49] T. Ramlochan ve M. Thomas, “The Effect Of Metakaolin On Alkali – Silica Reaction İn Concrete”, *Cement and Concrete Composites*, c. 30, sayı 3, ss. 339–344, 2016.
- [50] W. Aquino, D. A. Lange, ve J. Olek, “The İnfluence Of Metakaolin And Silica Fume On The Chemistry Of Alkali-Silica Reaction Products”, *Cement and Concrete Composites*, c. 23, sayı 6, ss. 485–493, 2001.
- [51] J. J. Brooks ve M. A. Megat Johari, “Effect Of Metakaolin On Creep And Shrinkage Of Concrete”, *Cement and Concrete Composites*, c. 23, sayı 6, ss. 495–502, 2001.
- [52] M. H. Zhang ve V. M. Malhotra, “Characteristics Of A Thermally Activated Alumino-Silicate Pozzolanic Material And İts Use İn Concrete”, *Cement and Concrete Research*, c. 25, sayı 8, ss. 1713–1725, 1995.
- [53] B. B. Sabir, S. Wild, ve J. Bai, “Metakaolin And Calsined Clays As Pozzolans For Concrete: A Review”, *Cement and Concrete Composites*, c. 24, ss. 441–454, 2001.
- [54] R. Siddique ve J. Klaus, “Influence Of Metakaolin On The Properties Of Mortar And Concrete: A Review”, *Applied Clay Science*, c. 43, sayı 3–4, ss. 392–400, 2009.
- [55] J. M. Khatib ve J. J. Hibbert, “Selected Engineering Properties Of Concrete İncorporating Slag And Metakaolin”, *Construction and Building Materials*, c. 19, sayı 6, ss. 460–472, 2005.
- [56] Z. Almaz, “Metakaolin Ve Silis Dumanı İçeren Harç Karışımlarının Özellikleri”, Yüksek lisans tezi, İnşaat Mühendisliği, Fen Bilimleri Enstitüsü, Niğde Üniversitesi, Niğde, Türkiye, 2010.
- [57] M. Nebioğulları, “Metakaolin, Yüksek Firin Cürufu Ve Uçucu Kül Katkisinin Beton Hidratasyon Sicaklığına Etkisi”, Yüksek lisans tezi, İnşaat Mühendisliği, Fen Bilimleri Enstitüsü, Niğde Üniversitesi, Niğde, Türkiye, 2010.
- [58] J. M. Khatib ve S. Wild, “Sulfate Resistance Of Metakaolin Mortar”, *Cement and Concrete Research*, ss. 120–132, 1998.
- [59] H. S. Kim, S. H. Lee, ve H. Y. Moon, “Strength Properties And Durability Aspects Of High Strength Concrete Using Korean Metakaolin”, *Construction and Building Materials*, c. 21, sayı 6, ss. 1229–1237, 2007.
- [60] J. Bai, B. B. Sabir, S. Wild, ve J. M. Kinuthia, “Strength Development İn Concrete İncorporating PFA And Metakaolin”, *Magazine of Concrete Research*, c. 52, sayı 3, ss. 153–162, 2000.
- [61] F. Curcio, B. A. DeAngelis, ve S. Pagliolico, “Metakaolin As A Pozzolanic Microfiller For High-Performance Mortars”, *Cement and Concrete Research*, c. 28, sayı 6, ss. 803–809, 1998.
- [62] S. Wild ve J. M. Khatib, “Portlandite Consumption İn Metakaolin Cement Pastes And Mortars”, *Cement and Concrete Research*, c. 27, sayı 1, ss. 137–146, 1997.

- [63] E. Badogiannis, V. G. Papadakis, E. Chaniotakis, ve S. Tsivilis, “Exploitation Of Poor Greek Kaolins: Strength Development Of Metakaolin Concrete And Evaluation By Means Of k-Value”, *Cement and Concrete Research*, c. 34, sayı 6, ss. 1035–1041, 2004.
- [64] F. Kocataskın, *Çimento ve Özellikleri Hakkında Ne Biliyoruz?*, İstanbul, Türkiye: İstanbul Teknik Üniversitesi Yayınları, 1965.
- [65] H. Yalçın ve M. Gürü, *Çimento ve Beton.*, 2. Baskı, Ankara, Türkiye: Palme Yayıncılık, 2000.
- [66] T. Y. Erdoğan, *Karışım Ve Bakım Suları*. İstanbul, Türkiye: Türkiye Hazır Beton Birliği, 1995.
- [67] Ö. L. Bayazıt, *Beton ve Deneyleri.*, 1. Baskı, Ankara, Türkiye: Devlet Su İşleri, 1975.
- [68] C. Taş, “Kaynar Su Metodu ve Beton Boru İmalatında Uygulanan Buhar Kürünün Karşılaştırılması ve İmalathanenin İşletme Prensipleri”, Yüksek lisans tezi, İnşaat Mühendisliği, Fen Bilimleri Enstitüsü, Çukurova Üniversitesi, Adana, Türkiye, 2004.
- [69] S. Yıldız, N. Işık, ve O. Keleştemur, “Diyarbakır-Karacadağ Bazalt Taşlarının Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi”, *Fırat Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilgi Dergisi*, c. 20, sayı 4, ss. 617–626, 2008.
- [70] B. Uz, F. Esenli, O. Yavuz, ve G. Bacak, “Sert Mermer Grubuna Bir Örnek; Karacadağ (Diyarbakır) Bazaltlarının Mermer Açısından İncelenmesi”, *Türkiye III. Mermer Sempozyumu Bildiriler Kitabı*, ss. 43–45, Diyarbakır, Türkiye, 2001.
- [71] B. Uz, “Bazaltların Kırmataş Yönünden Değerlendirilmesi Trakya Tekirdağ Bölgesi Bazaltları Örneği”, 2. *Ulusal Kırmataş Sempozyumu*, Tekirdağ, Türkiye, ss. 1–12, 1999.
- [72] İ. Ketin, *Genel Jeoloji Yer Bilimine Giriş*, Cilt 1. İstanbul, Türkiye: İstanbul Teknik Üniversitesi Vakfı, 1982.
- [73] S. Kulaksız, *Doğaltaş (Mermer) Maden İşletmeciliği ve İşleme Teknolojileri*. Ankara, Türkiye: TMMOB Maden Mühendisleri Odası, 2007.
- [74] A. Sür ve Ö. Sür, *Yiğitbaşıoğlu H.. Mineraller ve Kayaçlar*, Ankara, Türkiye: Bilim Yayıncılık, 2001.
- [75] C. R. G. Giaccio D. Violini, J. Zappitelli, and R. Zerbino, “High-Strength Concretes Incorporating Different Coarse Aggregates”, *Material Journal*, c. 89, sayı 3, 2006.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Volkan ÖZDAL
Doğum Tarihi ve Yeri : 20/07/1987 Bartın
Yabancı Dili : İngilizce
E-posta : volkan@fibrobeton.com.tr

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Y. Lisans	İnşaat Mühendisliği ABD	Düzce Üniversitesi	2019
Lisans	Yapı Eğitimi	Düzce Üniversitesi	2010
Lise		Köksal Toptan Lisesi	2005

YAYINLAR

E. Bilim, V. Özdal, M. Maraşlı, ve S. Subaşı, “Hibrit Lif Katkısının Betonun Basınç Ve Çekme Dayanımı Üzerindeki Etkileri”, II. Ulusal Ege Kompozit Malzemeler Sempozyumu, 2013.

V. Özdal, M. Maraşlı, ve S. Subaşı, “Karma Puzolan Kullanarak Üretilen GRC Betonun Mekanik Özellikleri”, KompEge, 2013.

V. Özdal, M. Emiroğlu, A. Beycioğlu, B. Çomak, E. Bilim, ve M. Maraşlı, “Farklı Agrega Mineralojisi ve Tane Dağılım Optimizasyonlarının Kendiliğinden Yerleşen GRC Betonların Mekanik Özelliklerine Etkisi”, içinde ISTEC 2014, 2014.