



**ATIK SERAMİK, ÇİNKO CÜRUFU VE
OBSİDİYEN KULLANILARAK ÜRETİLEN
BETONLARIN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN
İNCELENMESİ**

Metehan ARDAHANLI

Danışman: Doç. Dr. Meral OLTULU

Yüksek Lisans Tezi

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı

2020

(Her hakkı saklıdır.)

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

**ATIK SERAMİK, ÇİNKO CÜRUFU VE OBSİDİYEN KULLANILARAK ÜRETİLEN
BETONLARIN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

(Investigation of Mechanical Properties of Concrete Produced Using Waste
Ceramic, Zinc Slag and Obsidian)

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Metehan ARDAHANLI

Danışman: Doç. Dr. Meral OLTULU

Erzurum
Aralık, 2020

KABUL VE ONAY TUTANAĞI

Metehan ARDAHANLI tarafından hazırlanan “Atık Seramik, Çinko Cürufu ve Obsidiyen Kullanılarak Üretilen Betonların Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi” başlıklı çalışması 18/12/2020 tarihinde yapılan tez savunma sınavı sonucunda başarılı bulunarak jürimiz tarafından İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Yapı Malzemeleri Bilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Başkanı: Prof. Dr. Ahmet Ferhat BİNGÖL
Atatürk Üniversitesi

Danışman: Doç. Dr. Meral OLTULU
Atatürk Üniversitesi

Jüri Üyesi: Dr. Öğr. Üyesi Türkay KOTAN
Erzurum Teknik Üniversitesi

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

Prof. Dr. Mehmet KARAKAN
Enstitü Müdürü

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

ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU

Yüksek Lisans Tezi olarak Doç. Dr. Meral OLTULU danışmanlığında sunulan “**Atık Seramik, Çinko Cürufu ve Obsidiyen Kullanılarak Üretilen Betonların Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi**” başlıklı çalışmanın tarafımızdan bilimsel etik ilkelere uyularak yazıldığını, yararlanılan eserlerin kaynakçada gösterildiğini, Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından belirlenmiş olan Turnitin Programı benzerlik oranlarının aşılmadığını ve aşağıdaki oranlarda olduğunu beyan ederiz.

Tez Bölümleri	Tezin Benzerlik Oranı (%)	Maksimum Oran (%)
Giriş	2	30
Kuramsal Temeller	5	30
Materyal ve Yöntem	11	35
Bulgular	2	20
Tartışma	0	20
Tezin Geneli	5	25

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

Beyan edilen bilgilerin doğru olduğunu, aksi halde doğacak hukuki sorumlulukları kabul ve beyan ederiz.

Tez Yazarı (Öğrenci)	Tez Danışmanı
Metehan ARDAHANLI	Doç. Dr. Meral OLTULU
22.12.2020	22.12.2020
İmza:	İmza:

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

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

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

TEŞEKKÜR

Bu çalışmada bana her zaman yardımcı olan ve hiçbir zaman yalnızlık hissettirmeyen değerli hocam Sayın Doç. Dr. Meral OLTULU'ya,

Çalışmamın gerçekleşmesi için sağladığı tüm kolaylıklar için değerli hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Türkay KOTAN'a,

Çalışmamın gerçekleşmesi için gerekli tüm imkanları sağlayan Erzurum Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'ne,

Malzeme temininde sağladıkları kolaylıklar için Pasinler ilçe kaymakamı Sayın Kadir PERÇİ'ye, Doruklar İnşaat'a, Kayseri Çinkom AŞ.'ye, Erzurum Karayolları Bölge Müdürlüğüne, BASF yapı kimyasalları firmasına,

Agrega teminininde sağladığı kolaylıklar için ERÇİMSAN BETON AŞ.'ye,

SEM ve XRD analizlerinde göstermiş olduğu yardım ve destekleri için Sayın Öğr. Gör. Mustafa YAZICI'ya ve bu analizler için gerekli desteği sağlayan YÜTAM'a,

Çalışma boyunca bana destek veren değerli dostum Ali Kıvanç ŞAHİN'e ve benim her zaman yanımda olan değerli annem ve babama en samimi duygularıyla teşekkür ederim.

Metehan ARDAHANLI

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ATIK SERAMİK, ÇİNKO CÜRUFU VE OBSİDİYEN KULLANILARAK ÜRETİLEN BETONLARIN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Metehan ARDAHANLI

Danışman: Doç. Dr. Meral OLTULU

Amaç: Bu çalışmada agreganın ve çimentonun yerine atık malzeme olarak seramik atık ile çinko cürufu ve Pasinler obsidiyeninin kullanılmasıyla oluşturulan betonların mekanik özellikleri incelenmesi amaçlanmıştır.

Yöntem: Bu çalışma iki aşamadan oluşmaktadır. İlk aşamada literatürden hareketle çimento yerine ağırlıkça %2.5, 5, 7.5 ve 10 oranında çinko cürufu; %5, 10, 15, 20 ve 25 oranında ise toz haline getirilmiş olan obsidiyen kullanılarak harç grupları oluşturulmuş olup 7 ve 28 günlük kür sonunda pozolanik aktiviteleri belirlenmiştir. Çinko cürufu ve obsidiyen için elde edilen en ideal oranlar kullanılarak beton grupları oluşturulmuştur. Seramik atık, kullanıldığı gruplarda literatürden hareketle ince agreganın %60'ı oranında kullanılmıştır. İkinci aşamada taze beton deneyleriyle birlikte 28 günlük standart kür sonunda üretilen beton numuneleri üzerinde mekanik deneyler, geçirimsizlik deneyi, SEM-EDS ve XRD analizleri gerçekleştirilmiştir.

Bulgular: İlk aşamada gerçekleştirilen deney sonunda malzemelerin optimum pozolanik özellik gösterdiği oranın; çinko cürufu için %5, obsidiyen için %15 olduğu belirlenmiştir. İkinci aşamada elde edilen sonuçlar incelendiğinde; seramik atık agregasının beton basınç ve eğilme dayanımını artırdığı çinko cürufu ve obsidiyenin beton basınç dayanımını kısmen azalttığı ve seramik atık ile birlikte üçünün kullanılmasının ise kontrol betonu dayanımına yaklaşık eşdeğer dayanım gösterdiği görülmüştür. Beton test çekici ve ultrases darbe hızı deney sonuçlarının basınç dayanımı sonuçları ile neredeyse tamamen uyumlu olduğu belirlenmiştir. SA60ÇC5 beton grubu numunelerinde eğilmede çekme dayanımının en iyi ve kılcal su emme miktarının minimum seviyede olduğu belirlenmiştir.

Sonuç: Kullanılan atık malzemeler ve obsidiyen ile üretilen betonların performanslarının kontrol betonuna yaklaşık eş değer olduğu, atık malzemelerin betonda kullanılmasıyla çevre kirliliğinin azaltılacağı ve performansı yüksek betonların elde edilebileceği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: seramik atık, obsidiyen, çinko cürufu, pozolanik aktivite, mekanik özellikler, kılcal su emme.

Aralık 2020, 102 sayfa

ABSTRACT

MS THESIS

INVESTIGATION OF MECHANICAL PROPERTIES OF CONCRETE PRODUCED USING WASTE CERAMIC, ZINC SLAG AND OBSIDIAN

Metehan ARDAHANLI

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Meral OLTULU

Purpose: In this study, it aimed to investigate mechanical properties of concretes formed by using ceramic waste and zinc slag and Pasinler obsidian with high silica content instead of some aggregate and cement.

Method: This study consists of two stages. In the first stage, based on the literature, instead of cement, by weight 2.5%, 5, 7.5, 10 zinc slag; 5%, 10, 15, 20 and 25 powdered obsidian formed using, pozzolanic activities were determined after 7 and 28 days curing. Concrete groups formed using ideal activity rates obtained. In groups where ceramic waste is used, 60% of fine aggregate used based on the literature. In the second stage, mechanical, permeability tests, SEM-EDS and XRD analyzes carried out on concrete samples produced after 28 days of standard curing together with fresh concrete tests.

Findings: In the first stage, ratio of the materials showing optimum determined; 5% for zinc slag and 15% for obsidian. In the second stage examined; It observed that ceramic waste aggregate increases concrete compressive and flexural strength, zinc slag, obsidian decrease concrete compressive strength and use of three with ceramic shows approximately strength control concrete strength. It determined that concrete hammer and ultrasound impact velocity test results are almost completely compatible with compressive strength results. It was determined that flexural strength, absorption are minimum in SA60ÇC5 samples.

Results: It observed that performance of waste materials, concretes produced with obsidian are approximately equivalent control concrete, environmental pollution will be reduced by using waste materials sufficient performance concrete can be obtained.

Keywords: ceramic waste, obsidian, zinc slag, pozzolanic activity, mechanical properties, capillary water absorption.

December 2020, 102 pages

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY TUTANAĞI.....	i
ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU	ii
TEŞEKKÜR	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
TABLolar DİZİNİ.....	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xii
GİRİŞ.....	1
KURAMSAL TEMELLER.....	5
Beton	5
Beton Performansında Bileşenlerin Önemi.....	7
Agrega etkisi	7
Puzolan etkisi	9
Obsidiyen	12
Metalik Cüruflar.....	15
Seramik Atıklar	19
MATERYAL VE YÖNTEM	22
Materyal	22
Çimento	22
Agrega	23
Karışım suyu	23
Kimyasal katkı	23
Atık seramik	23
Çinko cürufu	24
Obsidiyen tozu	26
Yöntem.....	27
Agrega deneyleri	27
Beton basınç deneyi	28
Eğilmede çekme deneyi	29
Kılcal su emme deneyi	30
Puzolanik aktivite deneyi	31

Birim hacim ağırlık deneyi	31
Ultrases darbe hızı deneyi	32
Beton test çekici (Schmidt) deneyi	33
Tane Yoğunluğu ve Su Emme Oranı Tayini Deneyi	34
Seramik atık agregasının tane yoğunluğu ve su emme değeri	34
Obsidiyen tozunun tane yoğunluğunun belirlenmesi	36
Enstrümental Analiz Teknikleri	37
Görüntüleme analiz teknikleri	37
Kristalografik analiz teknikleri	37
Beton Karışım Oranları	38
Harç Numune Grupları	40
Puzolanik aktivite deneyi ile karışımların belirlenmesi	40
Beton Numune Grupları	43
ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA	44
Tane Yoğunluğu ve Su Emme Oranı Sonuçları	44
Seramik atık agregasının tane yoğunluğu ve su emme oranı sonuçları	44
Obsidiyen tozunun tane yoğunluğu	44
Birim Hacim Ağırlık Deneyi Sonuçları	44
Puzolanik Aktivite Deneyi Sonuçları	45
Beton Basınç Deneyi Sonuçları	51
Eğilmede Çekme Dayanımı Deney Sonuçları	52
Eğilmede çekme dayanımı ile basınç dayanımı sonuçlarının birlikte incelenmesi	54
Kılcal Su Emme Deneyi Sonuçları	56
Kılcal su emme ile basınç dayanımı sonuçlarının birlikte incelenmesi	57
Ultrases Darbe Hızı Deneyi Sonuçları	59
Ultrases darbe hızı ile basınç dayanımı sonuçlarının birlikte incelenmesi	61
Beton Test Çekici (Schmidt) Deneyi Sonuçları	63
Beton test çekici geri tepme sayısı ile basınç dayanımı sonuçlarının birlikte incelenmesi	65
Enstrümental Analiz Teknikleri İle İnceleme Sonuçları	66
Taramalı elektron mikroskobu (SEM) analizi	66
X Işını difraksiyonu (XRD) analizi	76
SONUÇ VE ÖNERİLER	80
KAYNAKLAR	82
ÖZGEÇMİŞ	88

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 1. CEM I 42,5 R tipi çimento kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri	22
Tablo 2. Çinko cürufunun fiziksel özellikleri	25
Tablo 3. Çinko cürufunun kimyasal içeriği ve elekten geçen yüzdesi	25
Tablo 4. Pasinler obsidiyeninin kimyasal içeriği ve elekten geçen yüzdesi	26
Tablo 5. Agregaların tane yoğunluğu, su emme oranı ve yüzey nemi değerleri	27
Tablo 6. Beton çevresel etki sınıfı	39
Tablo 7. Beton karışım oranları	39
Tablo 8. Pozolanik aktivite numune grupları.....	42
Tablo 9. Beton numune grupları	43
Tablo 10. Seramik atık agregasının tane yoğunluğu, su emme ve yüzey nemi değeri	44
Tablo 11. Obsidiyen tozunun tane yoğunluğu	44
Tablo 12. Taze beton birim hacim ağırlık sonuçları	45
Tablo 13. Harç numunelerinin pozolanik aktivite indeksleri.....	45
Tablo 14. 28 günlük betonun basınç dayanımı sonuçları	52
Tablo 15. 28 günlük eğilmede çekme dayanımı sonuçları	53
Tablo 16. 28 günlük betonun kılcal su emme sonuçları	57
Tablo 17. 28 günlük betonun ultrases darbe hızı deney sonuçları.....	60
Tablo 18. Betonun UPV sonuçlarına göre karşılaştırılması	60
Tablo 19. 28 günlük betonun test çekici deneyi sonuçları.....	64

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Anadoludaki obsidiyen yatakları	12
Şekil 2. Doğu Anadolu Bölgesi obsidiyen kaynakları	13
Şekil 3. Pasinler ilçesinin obsidiyen haritası	13
Şekil 4. Obsidiyen taşının genel görüntüsü	14
Şekil 5. Obsidiyenin kayaç halindeki görüntüsü	14
Şekil 6. Çinko madeni cürufu.....	18
Şekil 7. Türkiye çinko-kurşun yatakları haritası	18
Şekil 8. Atık seramik.....	19
Şekil 9. Seramik atık	23
Şekil 10. Los Angeles cihazı	24
Şekil 11. Elek analizi deneyi	24
Şekil 12. Agregada boyutunda temin edilen çinko cürufu	25
Şekil 13. Obsidiyen Taşı	26
Şekil 14. Kırıcı yardımıyla küçültülmüş obsidiyen.....	27
Şekil 15. Los Angeles cihazından çıkarılan obsidiyen tozu.....	27
Şekil 16. Agregada deneyleri	28
Şekil 17. Beton presi	29
Şekil 18. Tek noktalı eğilmede çekme deneyi.....	30
Şekil 19. Betonda kılcıl emilim deney düzeneği	30
Şekil 20. Ultrases deneyi cihazı	32
Şekil 21. Ultrases darbe hızının belirlenmesi.....	33
Şekil 22. Schmidt çekiç deneyi	33
Şekil 23. Test çekici ile geri tepme (Rebound) sayısının belirlenmesi	34
Şekil 24. Seramik atık agregasının ısıtıcı ile doymun kuru yüzey hale getirilmesi	35
Şekil 25. Koni kalıbın tokmak ile sıkıştırılması	36
Şekil 26. Koni kalıp kaldırıldığında oluşan çökme şekli.....	36
Şekil 27. Obsidiyen tozunun tane yoğunluğunun belirlenmesi.....	37
Şekil 28. Taramalı elektron mikroskobu (SEM)	37
Şekil 29. X ışını kırınım cihazı (XRD).....	38
Şekil 30. Beton basınç dayanımı-S/Ç oranı arasındaki ilişki	39
Şekil 31. Kür havuzundan çıkarılan beton numuneleri	40
Şekil 32. CEN standart kumu	40
Şekil 33. 50×50×50 mm boyutlu küp numune kalıpları.....	41

Şekil 34. Numunelerin üretiminde kullanılan mikser	41
Şekil 35. Harçların kalıplara yerleştirilmesi.....	41
Şekil 36. Deney için oluşturan küp numuneler	42
Şekil 37. Kürden çıkarılan harç numunelerinin basınç presinde kırılması	42
Şekil 38. Obsidiyen tozlu numunelerin 7 günlük puzolanik aktivite indeksi.....	46
Şekil 39. Obsidiyen tozlu numunelerin 28 günlük puzolanik aktivite indeksi.....	47
Şekil 40. Obsidiyen tozlu numunelerin 7 ve 28 günlük puzolanik aktivite indeksi.....	48
Şekil 41. Çinko cürufllu numunelerin 7 günlük puzolanik aktivite indeksi.....	49
Şekil 42. Çinko cürufllu numunelerin 28 günlük puzolanik aktivite indeksi.....	49
Şekil 43. Çinko cürufllu numunelerin 7 ve 28 günlük puzolanik aktivite indeksi	50
Şekil 44. 28 günlük betonun basınç dayanımı sonuçları	52
Şekil 45. 28 günlük betonun eğilmede çekme dayanımı sonuçları	54
Şekil 46. 28 günlük betonun eğilmede çekme ve basınç dayanımı arasındaki ilişki	55
Şekil 47. 28 günlük betonun eğilmede çekme ve basınç dayanımı arasındaki korelasyon ilişkisi	55
Şekil 48. 28 günlük betonun kılcal su emme sonuçları	57
Şekil 49. 28 günlük betonun kılcal su emme miktarı ile basınç dayanımı arasındaki ilişki	58
Şekil 50. 28 günlük betonun kılcal su emme miktarı ile basınç dayanımı arasındaki korelasyon ilişkisi.....	58
Şekil 51. 28 günlük betonun ultrases darbe hızı sonuçları	61
Şekil 52. 28 günlük betonun UPV ve beton basınç dayanımı arasındaki ilişki.....	62
Şekil 53. 28 günlük betonun UPV ve beton basınç dayanımı arasındaki korelasyon ilişkisi ..	62
Şekil 54. 28 günlük betonun test çekici deneyi sonuçları	64
Şekil 55. 28 günlük betonun test çekici ve basınç dayanımı arasındaki ilişki	65
Şekil 56. 28 günlük betonun test çekici ve basınç dayanımı arasındaki korelasyon ilişkisi	66
Şekil 57. Kontrol grubuna ait SEM/EDS görüntüleri	67
Şekil 58. SA60 grubuna ait SEM/EDS görüntüleri.....	68
Şekil 59. ÇC5 grubuna ait SEM görüntüleri	69
Şekil 60. ÇC5 grubunda oluşan etrenjit görüntüsü.....	70
Şekil 61. ÇC5 grubundaki çinko cürufunun SEM/EDS görüntüsü	71
Şekil 62. OT15 grubuna ait SEM görüntüleri	72
Şekil 63. OT15 grubundaki obsidiyenin SEM/EDS görüntüsü.....	73
Şekil 64. SA60OT15 grubuna ait SEM görüntüleri	74
Şekil 65. SA60ÇC5 grubuna ait SEM görüntüleri	75
Şekil 66. SA60OT15ÇC5 grubuna ait SEM görüntüleri.....	76

Şekil 67. Obsidiyenin XRD analizi	77
Şekil 68. Normal (ince) agrega ile atık seramik agreganın XRD analizi	77
Şekil 69. Beton gruplarına ait XRD grafikleri	79



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

A	Akışkanlaştırıcı
Al ₂ O ₃	Alümina
AlPO ₄	Alüminyum fosfat
AR-GE	Araştırma ve geliştirme
CEN	Avrupa Standartlar Komitesi
CaO	Sönmemiş Kireç
CaCO ₃	Kalker
Cl	Klor
CH	Portlandit
Cr ₂ O ₃	Kronyum
C-S-H	Kalsiyum silika hidrat
Ç	Çimento
ÇC	Çinko cürufu
Fe	Demir
Fe ₂ O ₃	Demiroksit
KB	Kontrol betonu
K ₂ O	Potasyumoksit
MgO	Magnezyumoksit
MPa	Megapaskal
N	Yüzey nemi
Na ₂ O	Sodyumoksit
OPT	Optimum
OT	Obsidiyen tozu
s	Saniye
SA	Seramik atık
S/B	Su/Bağlayıcı oranı
S/Ç	Su/Çimento oranı
SEM	Taramalı elektron mikroskobu
SiO ₂	Silika
SO ₃	Sülfür
PAI	Puzolanik aktivite indeksi
W _A	Su emme yüzdesi
XRD	X ışını difraksiyonu
%	Yüzde

GİRİŞ

İnsanoğlunun, yeryüzündeki yaşamını sürdürebilmesi için beslenme ihtiyacından hemen sonra karşılamak zorunda olduğu barınma ihtiyacı ve ortak yaşam alanları oluşturma gereksinimi, tarihteki en önemli gelişmelerin de itici gücü olmuştur. İnsanoğlu sürekli yenilenme ve gelişmeye açık bir şekilde yaşamıştır. Başlangıçta kireç ve alçı gibi bağlayıcılar kullanılarak yapılar inşa edilmişken nüfusun artması ve insanların daha rahat yaşama isteklerinden dolayı yapı sektöründe yüksek binalar inşa edilmiştir. İnsanların zamanla temel ihtiyaçları ve nüfusları artarken inşa edilen yapıların da üstün özelliklere sahip olması istenmektedir. Bu süreçte insanların taleplerinin karşılanması ve daha dayanıklı yapılar inşa edilebilmesini sağlayan iki temel buluştan söz etmek mümkündür: Çimento ve Beton.

Çimento birçok betonda hacimce en az yer kaplayan malzeme iken karışımın en önemli bileşenidir. Çimento, su ile reaksiyona girdiğinde sertleşerek dayanım kazanan bir bağlayıcıdır. 1824 yılında Joseph Aspdin'in portland çimentosunu keşfetmesiyle günümüz beton endüstrisinin temelleri atılırken 19. yüzyılda elde edilen betonların yeterli dayanım göstermediği belirlenmiştir. 20. yüzyılın başlarında betonun yüksek dayanımı için ilk yapılan iyileştirme çalışması çimento tane çaplarının 450 mikrondan 90 mikrona düşürülmesi olmuştur (Mindes *et al.* 1981). Bu çimentodaki ilk iyileştirme, beton performansının artırılması için günümüze kadar yapılacak çalışmaların öncüsü olmuştur.

Beton içerisinde maliyeti en fazla olan çimentonun zamanla betonda azaltılması ve yerine daha ekonomik ve en az çimento kadar bağlayıcılığı olan doğal ve yapay malzemelerin kullanılması için birçok çalışma yapılmıştır. Bu malzemeler puzolan olarak adlandırılmış olup en temel özellikleri, yüksek orandaki amorf silis miktarı içermeleridir. Yüksek silis içeriğine sahip olan malzemelerin zamanla beton dayanımında olumlu etkiler gösterdiği görülmüş ve bu durum yüksek silis içerikli yeni malzemelerin keşfedilmesi için fırsat sunmuştur.

Özellikle son yıllarda yapılan araştırmaların da gösterdiği gibi yapısında yüksek miktarda silisyum elementi bulunduran malzemelerin betonda mineral katkı malzemesi olarak kullanılmasının dayanımda olumlu sonuçlar gösterdiği belirlenmiştir. Bu katkılar genel olarak yapay puzolan olarak adlandırılan silis dumanı, yüksek fırın cürufu ve uçucu küldür. Mineral katkıların doğada volkanik kökenli olarak bulunan ve doğal puzolan olarak adlandırılan türleri de bulunmaktadır. Ayrıca içeriğinde amorf silis oranı yüksek olan çeşitli minerallerinde puzolanik özelliğe sahip olup olmadığı araştırılmaktadır. Bu amaçla ülkemizde rezervi bulunan

ve yüksek miktarda amorf silisyum elementine (>%50) sahip olan obsidiyen taşının yeterince ince öğütülerek çimento yerine ikame katkı olarak kullanılması araştırılmalıdır.

Çimentodan sonra ikinci temel buluş olan beton ise; agrega, çimento ve suyun karışımına ek olarak gerektiğinde de bazı kimyasal veya mineral katkıların ilave edilmesi ile elde edilen, başlangıçta plastik kıvamda iken, zamanla katılaşp sertleşerek dayanım kazanan bir yapı malzemesidir.

Betondan beklenen en önemli parametreler mukavemetinin yeterli olması, taze haldeyken işlenebilir olması ve dış etkilere karşı dayanıklı olmasıdır. Bu parametreleri karşılayan beton, yeterli performansa sahip ve kullanılabilir beton olmaktadır.

Beton ile istenilen şekil ve boyutta beton elemanlar kolaylıkla üretilebilir. Plastik kıvamdaki betonun pompa yardımı ile erişilmesi güç yerlere yerleştirilmesi, içindeki bileşenler ve oranlarının değiştirilebilmesi ile performans özelliklerinin iyileştirilebilmesi en önemli avantajlarından olup geliştirilmesi gereken özellikleri (gevreklik, hacim değişiklikleri geçirimsizlik özellikleri) de mevcuttur. Bu dezavantajları giderebilmek için kullanılacak yeni malzemelerin çeşitli özelliklerinden yararlanılmaktadır. Örneğin; üretilecek olan bir betonun basınç dayanımının yüksek olması istenirse yüksek basınç dayanımına sahip özel malzemelerle, geçirimsizliği düşük olması istenirse betonda geçirimsizliği azaltacak özellikteki malzemelerle üretilmesi gerekir.

Betonun performansını iyileştirmek için gerek bilim dünyasında gerekse özel sektör firmalarının kendi imkânlarıyla oluşturduğu AR-GE Laboratuvarları'nda çalışmalar devam etmektedir. Gerçekleştirilen deneysel çalışmalar ile beton kalitesi artırılarak, başlangıçtaki beton basınç dayanımı maksimum 20 MPa ile sınırlıyken günümüzde yüksek performanslı çok çeşitli özel beton türleri üretilebilmiştir. Farklı ihtiyaçları (yüksek basınç dayanımı, yüksek radyasyon direnci, düşük rötre ve yeterli süneklik) karşılamak için üretilen lifli betonlar, reaktif pudra betonları, ağır ve hafif betonlar gibi özel amaçlar için tasarlanan betonların üretilmesinde gelişen malzeme teknolojisinin kullanılması ile beton endüstrisine farklı bir yön verilmiştir.

Günümüzde de hızla gelişen bu teknolojilerin amacı betonda performansı artırmak için beton içeriğini oluşturan malzemeler ile üretim yöntemlerinde iyileştirme yapmak veya bu malzemeleri daha ekonomik ve daha yüksek performans gösterebilen malzemeler ile değiştirmektir. Örneğin; daha kaliteli beton üretmek için modern teknoloji ile betonun birleştirilmeye başlandığı 3D yazıcılarla beton üretimi en önemli gelişmelerdendir. 3D yazıcılar ile çeşitli yapılar inşa edilmeye başlanması bu teknolojinin ilerleyen zamanda da daha ileri teknolojiler ile birleşerek beton üretiminin vazgeçilmezi olacağı aşıkardır (Çerçevik vd 2018).

Bu gelişmeler içinde beton bileşenleri ve özellikleri de çok önemlidir. Örneğin beton agregalarının performansı yüksek olduğunda betonun dayanım ve dayanıklılığı da yüksek olmaktadır. Yine puzolan katkıları ile de performans artışı sağlanabilmektedir.

Gelişen beton teknolojisinde yeni malzemelerin kullanımının yanısıra daha ekonomik ve çevreye duyarlı malzemelerin de kullanılabilirliğinin önemi artmaktadır. Böylece hem çevredeki atık malzemeler azaltılarak çevre kirliliği önlenmekte, hem de betonda kullanımı ile beton maliyetleri düşürülmektedir. Bu atıklar çoğu zaman fabrikada üretim-taşıma gibi aşamalarda oluşabilirken birçok kez de herhangi bir endüstri sanayisinin malzeme üretimi sırasında ana malzemenin atığı olarak da ortaya çıkabilmektedir. Özellikle ülkemizde sanayi ve metal endüstrine ait birçok fabrika bulunmakta ve bu fabrikalarda üretim esnasında atık malzeme oluşabilmektedir. Atık miktarının fazla olması fabrikaların bu atıklara yüksek miktarlarda depolama ücreti ödemesini gerektirmektedir. Bu bağlamda metalik cürüflar atık endüstrisinde önemli bir yere sahiptir. Bu metalik cürüflara örnek olarak bakır cürufu, kurşun cürufu, nikel cürufu ve kobalt cürufu verilebilir. Bunlardan birisi de çinko cürufudur.

Fabrikalarda üretilen çinko tozlarının üretim sonucu oluşan atık halinin depolanma ve bertaraf etme sıkıntıları bulunmaktadır. Geri kazanımı sağlanamayan çinko cürüflarının depolanma maliyetleri zamanla artmaktadır. Üretimin yapıldığı fabrikalara ek bir masraf olarak ortaya çıkan depolama (landfill) maliyetleri atıkların tonu başına 7-10 doları bulurken, yeterli depolanması olmayan fabrika tesislerinde ise bu maliyetler 20 dolara kadar yükselmekte ve tehlikeli atıklar olarak göz önüne alındığında ise bu maliyet fazladan ton başına yaklaşık 140 dolar daha artarak 100-150 dolara kadar çıkmaktadır (Bakar 2005). Bu nedenle çinko cürufunun beton üretiminde kullanımı ile depolanma maliyetlerinin, katlanarak artmasının önüne geçilmiş olunacaktır. Metalik malzemelerin üretimi sonucunda ortaya çıkan atıkların yanısıra fazla miktarda oluşan diğer bir endüstri atığı da seramiklerdir.

Üretim, depolama ve sevkiyat işlemleri sırasında ortaya çıkabilecek olumsuzluklar nedeni ile seramik malzemelerin yüksek miktarlarda atıkları da oluşabilmektedir. Bu atık maddelerin hem depolanması hem de çevreye verdiği kirlilikten dolayı ek bir masraf ortaya çıkarması söz konusudur. Ayrıca atık seramik malzemelerin sahip oldukları yüksek sertlikten dolayı beton endüstrisinde kullanımı betonun performansında iyileştirme sağlayacaktır.

Tüm bu bilgilerin ışığı altında bu çalışmada;

- Obsidiyen taşının beton içerisinde çimentonun bir kısmı yerine kullanılması ile puzolan olarak kullanılabilirliğinin belirlenmesi ve bu malzemelerin betonun mekanik özellikleri üzerine etkisinin test edilmesi ile daha ekonomik ve çevreci beton üretilmesi,

- Depolanması yüksek maliyet gerektiren atık malzeme olan çinko cürufu metal tozlarının kullanımı,
- Yüksek sertlik, düşük su geçirgenliği ve yüksek dayanıklılık özelliklerinden dolayı atık seramik malzemelerin beton endüstrisinde kullanımının araştırılması hedeflenmiştir.



KURAMSAL TEMELLER

Beton

Evrenin merkezîyetli temelının ana unsurunu oluşturan insanoğlunun dünyaya geldikten sonraki en temel gereksinimlerinin başında barınma ihtiyacı bulunmaktadır. İnsanoğlu bu temel ihtiyacını karşılamak için sürekli bir yeni arayış içinde olmuştur. Bu arayış sonunda asrın buluşu olarak nitelendirilen betonun keşfedilmesi insanoğlunun yaşamında dönüm noktası olmuştur.

Beton en temel olarak; içeriğinde belirli oranlarda ince ve iri agrega, çimento ve suyun bulunduğu kompozit bir malzemedir. Tarihte betonun keşfedilmesinden önce atılan ilk adım portland çimentosunun bulunmasıdır. 1824 yılında çimentonun keşfedilmesi, dünyadaki beton çağına atılan ilk adımdır. Çimentonun keşfi ile birlikte yapılar genel olarak çimento harçlarından inşa edilmeye başlanmıştır. Harçlardan inşa edilen yapıların dayanımlarının düşük olması nedeni ile insanoğlu daha yeni bir arayışa girmiştir. Bu arayış 19. yüzyılın ortalarında betonun keşfedilmesi ile son bulmuştur.

İnsanoğlu barınma ihtiyacını ilk var oluşundan beri bir şekilde karşılamış olsa da betonun keşfi ile artık daha yüksek dayanıklı ve dayanımlı yapıların inşa edilmesi için kapı aralanmıştır. Beton keşfiyle birlikte ilk zamanlarda istenilen dayanımlara sahip beton yapılar inşa edilmesine rağmen dünya nüfusunun artması ve buna bağlı olarak yaşam alanlarının daralması nedeni ile daha yüksek yapıların tasarlanması gerektiği anlaşılmıştır.

Yüksek yapıların inşa edilebilmesi için betonun daha dayanıklı ve dayanımlı olması gerekmektedir. Bu durum karşısında betonun en zayıf noktası olan düşük çekme dayanımını karşılamak için çelik donatılar ile beton birlikte kullanılmıştır. Bu ortak kullanım 19. yüzyılın sonları doğru betonarme yapıların ortaya çıkmasını sağlamıştır.

20. yüzyılda daha ekonomik ve yüksek dayanımlı betonların üretilmesi için hazır beton sektörüne geçişlerin başlamasına ek olarak beton içerisinde çeşitli kimyasal ve mineral katkıları kullanılmaya başlanmıştır.

21. yüzyıla geldiğimizde ise bilim dünyasında artık betonun daha nasıl kaliteli ve ekonomik üretilebileceği tartışılırken bu düşünce felsefesinde betonu oluşturan malzemelerin iyileştirilmesi, daha yüksek kaliteli ve ekonomik olanlarla değiştirilmesi, farklı üretim tekniklerinin kullanılması, betonu oluşturan malzemelerin nano boyutunda incelenerek geliştirilmesi gibi çeşitli girişimlere başlanmıştır. Bu girişimler neticesinde ortaya çıkan farklı

Üretim tekniklerinden birisi 3D yazıcılardır. Bu teknik sadece beton endstrine yenilik katmakla kalmayıp gıda, tıp ve çeşitli mühendislik alanlarında da kullanılmaktadır.

3D yazıcı tekniği kullanılarak daha zor mimari tasarımların çözümlenmesi, daha ekonomik inşa olanağı sağlaması ve zamandan tasarruf edilmesi amaçlanmıştır. Bu teknik son zamanlarda yaygın bir şekilde araştırmalara konu olarak geliştirilmeye devam edilmektedir. Günümüzde betonun geliştirilmesi için teknolojidен yararlanıldığı bir diğer durum ise nano boyutta inceleme ve nano malzemelerin betonda kullanılmasıdır.

Beton malzeme içeriği olarak artık son model teknolojik cihazlar yardımıyla incelenmeye başlanmıştır. Betonu oluşturan malzemeler nano boyutta incelenmiş ve nano malzemeler ile takviye edilerek çeşitli özelliklerinin iyileşmesi sağlanmıştır. Beton üzerinde nanoteknolojik çalışmalar günümüzde de devam etmektedir. Teknolojiden yararlanılarak yapılan çalışmaların yanı sıra betonu geliştirmek için çeşitli amaçlarla farklı özellikteki özel beton türleri de geliştirilmiştir

20. yüzyılın sonlarında ortaya çıkan ve çoğunlukla 21. yüzyılda üretim ve araştırmasının yapıldığı özel betonlar, çeşitli yapılarda betondan istenen farklı ihtiyaçların karşılanması amacıyla ortaya çıkmıştır. Bu beton türleri genel olarak; yüksek dayanımlı beton, lifli beton, reaktif pudra betonu, kendiliğinden yerleşen beton, prepakt beton, püskürtme beton, polimer beton, ağır beton olmak üzere sıralanabileceği gibi daha farklı birçok türü de bulunmaktadır.

Özel betonların kullanılmaya başlanması ile yeterli kalitenin elde edildiği fakat maliyetlerde ciddi oranda artış olduğu belirlenmiştir. Bu nedenle betonun hem maliyetini düşürmek hem de üretilen betonda yeterli performans elde etmek amacıyla ilk olarak çimentonun içeriği analiz edilmiş yapabileceği kimyasal reaksiyonlar göz önüne alınarak çeşitli endüstri atıkları (silis dumanı, yüksek fırın cürufu ve uçucu kül) ve doğanın sunduğu volkanik malzemeler (doğal puzolanlar) beton içerisinde çeşitli oranlarda denenmeye başlanmıştır. Bu malzemeler betonu oluşturan çimentonun maliyetini azaltarak istenilen dayanıma uygun beton üretmek için řu anda da günümüzde kullanılmaktadır.

Beton endüstrisinde gerçekleşen bu gelişmeler sonucunda yeterli dayanıma sahip betonlar elde edilmesine rağmen inşa edilen yapılarda zamanla sadece dayanımın yeterli olmadığı grlmştir. Bu durum genel olarak malzemelerin servis ömürleri boyunca herhangi bir bozulma göstermeden görevlerini yerine getirme olan dayanıklılık kavramını ortaya çıkarmıştır.

Dayanıklılık kavramının ortaya çıkması ile birlikte üretilen betonların hem yeterli dayanıma hem de yeterli dayanıklılığa sahip olması gerçeğinin görülmesi sağlanmıştır. Böylece beton performansı kavramı ortaya çıkmıştır.

Betonun performansı kavramı genel olarak dayanım ve dayanıklılığın bir arada değerlendirilmesi olarak açıklanabilmektedir. Betonu oluşturan bileşenler beton performansında temel unsur olarak yer almaktadır. Bu ana bileşenlerin başında betonu oluşturan temel malzemeler yer almaktadır. Bunlar çimento, agrega ve çeşitli kimyasal veya mineral katkılarıdır.

Beton Performansında Bileşenlerin Önemi

Genel literatürde betonun mekanik özelliklerinin geliştirilmesi amacıyla yapılan çalışmalarda betonun ana bileşenleri olan agrega, çimento ve puzolan etkisi üzerinde durulduğu belirlenmiştir. Bu çalışmada değişken parametrelerden olan agrega ile puzolan etkisi üzerinde çalışıldığından bu bileşenlerin etkileri irdelenmiştir.

Agrega etkisi

Betonun hacimce yaklaşık olarak %75'ini oluşturan ve betonun performansı için çok önemli yere sahip olan agregaların; yapıları, sertlikleri ve içerikleri doğrudan kalitesini etkilemektedir. Beton performansında önemli yere sahip olan agregaların farklı tür ve boyutta betonda kullanılması ile yapılan çalışmalar incelenirse;

Kalker, bazalt ve kalker-bazalt karışık, olmak üzere kırmataş agregalarla üretilen 3 farklı tip betonlarda bu agregaların betonun dayanımına etkisi incelendiğinde basınç dayanımlarının birbirlerine yaklaşık eşdeğer olduğu (Karpuz ve Akpınar 2009), bazalt, kumtaşı ve kalker agregaları kullanılarak üretilen betonlarda ise hava sürükleyici katkısı basınç ile eğilme dayanımını düşürürken en iyi dayanımın bazalt agregası kullanılarak elde edildiği (Şengül vd 2003) ve buna ek olarak bazalt, granit, dolomit, kuvarsit ve normal çakıl kullanılarak üretilen betonlarda agreganın elastite modülünün beton dayanımında doğrudan etkili olduğu, en iyi dayanımın ise yine bazalt agregalı betonlarda görüldüğü (Gora and Piasta 2020), beş farklı agrega tipi (gabro, bazalt, kuarsit, kireçtaşı ve kumtaşı) kullanılarak üretilen betonlarda ise gabro agregalı betonların en yüksek dayanıma, kum taşı agregalı betonların ise en düşük dayanıma sahip olduğu (Kılıç vd 2008) belirlenmiştir.

Dolerit agregaları ile granit agregalarının kullanımıyla üretilen betonların basınç dayanımları karşılaştırıldığında ise dolerit agregalı betonun basınç dayanımının daha yüksek olduğu ve granit agregalarının boyutları küçüldüğünde betonun geçirimsizliğinin azaldığı gözlemlenmiştir (Huang *et al.* 2020).

Genleştirilmiş polistiren sert köpük malzemesi beton içerisinde agrega yerine % 15, 25, 35 oranlarında kullanılmış ve oran artışına bağlı olarak dayanımda kısmen azalma meydana gelmesine rağmen kullanılan malzeme betonun daha hafif olmasını sağlamıştır (Rosca and Corobceanu 2020).

Ayrıca ince agrega yerine %10, 20, 30, 40 ve 50 oranında metakaolin kullanılması sonucunda elde edilen betonlarda en iyi basınç ve çekme dayanımının %40 oranında metakaolin agregası kullanılarak elde edildiği gözlemlenmiştir (Rashad 2013).

Sürdürülebilirlik ve doğal malzeme kaynaklarını etkin biçimde kullanmak amacıyla atık malzemelerin beton içerisinde agrega olarak kullanıldığı birçok çalışmada mevcuttur. Bu çalışmaların büyük bir bölümü geri dönüştürülmüş agreganın betonda kullanılması ile gerçekleştirilmiştir;

Geri dönüştürülmüş agregaların yeterince suya doyurularak betonda kullanıldığında basınç dayanımını artırdığı (Kurowa *et al.* 1999) ve buna ek olarak silis dumanı ikamesi sonucunda ise geri dönüştürülmüş agrega ile arayüzeyin güçlenerek dayanımı pozitif yönde etkilediği (Tam and Tam 2008) belirlenirken geri dönüşüm agregasının miktarının artışı ile beton basınç ve çekme dayanımının azaldığı görülmüş (Köken vd 2008; Silva *et al.* 2014) ve %100 oranında normal agrega yerine kullanıldığında %35 oranında dayanım kaybına sebep olduğu görülür iken (Kou *et al.* 2011), %10 oranında ince agrega yerine kullanılması ile de beton basınç dayanımında %4,7'lik artış sağlandığı (De Britob and Evangelista 2007) gözlemlenmiştir.

Geri dönüşüm agregaları kullanılarak üretilen betonda kireç taşı tozu çimento yerine %10 oranında kullanıldığında basınç dayanımında artış sağlanabildiği (Li 2020) ve iri geri dönüştürülmüş agregalı betonda kullanıldığında filler etkisi oluşturabilmesinin yanında bir kısmının reaksiyon oluşturarak yine dayanımı artırabileceği (Yang *et al.* 2018) belirlenmiştir.

S/Ç oranının 0.25 ve 0.30 oranında değişken tutularak geri dönüştürülmüş agregalar ile üretilen betonlarda geri dönüştürülmüş agrega miktarı arttıkça geçirimsizliğin düştüğü ve en düşük geçirimsizliğin %50 oranında normal agrega yerine kullanılması ile elde edildiği belirlenirken (Vieira *et al.* 2020), agrega yerine %55 oranına kadar kullanılan geri dönüştürülmüş agrega ve atık beton tozları ile üretilen betonların dayanımlarında yeterli basınç dayanımlarına ulaşıldığı belirlenmiştir (Jian and Wu 2020).

Beton içerisinde bazı atık ürünler de agrega olarak kullanılabilirler:

İnce ve iri agrega yerine atık plastik agrega (PVC) %5, 15, 30, 45, 65 ve 85 oranında kullanılarak üretilen betonların mekanik davranışları incelendiğinde, basınç ve yarmada çekme

dayanımında en iyi sonucun her iki agrega yerine %5 oranında plastik agrega kullanılması ile elde edildiği belirlenirken (Mohammed *et al.* 2019), fabrika üretim sırasında oluşan mermer atıklarının iri agrega ve ince agrega olarak betonda kullanılabilirliği araştırıldığında ise basınç dayanımları (tahribatsız deney yöntemleri ile desteklendiğinde) kontrol edilerek her iki grupta da C25/30 betonu elde edilmiş ve mermer atıklarının betonda agrega olarak kullanılabileceği görülmüştür (Ceylan ve Mança 2013).

Atık camların betonda agrega yerine yüksek miktarlarda kullanılması sonucunda basınç dayanımlarında düşüş gözlemlendiği ve sadece ince agrega yerine kullanılarak elde edilen betonların dayanımlarının hem iri hem ince agrega yerine kullanılarak üretilen betonların dayanımlarından daha yüksek olduğu tespit edilmiştir (Terro 2006).

Plastik atıkların agrega olarak kullanıldığı bir çalışmada, agrega yerine %7,5 oranında plastik atıkların kullanılması ile basınç ve eğilmede çekme dayanımlarının yanı sıra işlenebilirlikte de artış sağlandığı belirlenmiştir (Castillo *et al.* 2020).

Kömür, madeninden çıkarıldığında oluşan atıkların betonda kullanılabilirliği incelendiğinde, iri agrega yerine kullanılan kömür atıklarının miktarının artışına bağlı olarak beton basınç dayanımının düştüğü gözlemlenirken (Gao *et al.* 2020), %30 oranında kullanılması ile beton su emme miktarının kontrol betonuna benzer olduğu tespit edilmiştir (Liu *et al.* 2018).

Ayrıca atık lastiklerin ince agrega yerine kullanılması ile beton basınç dayanımında ve elastisite modülünde azalmaya sebep olduğu (Khaloo *et al.* 2008), iri agrega yerine kullanıldığında ise bu dayanım kaybının daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir (Ganjian *et al.* 2009).

Puzolan etkisi

ASTM C 618 (Anonymous 2005)'e göre kendi kendine bağlayıcılık özelliği çok az olan veya hiç olmayan ancak uygun rutubet şartlarında ve normal ortam sıcaklığında kireç ile reaksiyona girip bağlayıcı özelliği olan ürünler açığa çıkaran, ince toz halindeki silisli veya silisli ve alüminli maddelere puzolan denir. Puzolanlar esasen reaktif silisyum dioksit (SiO_2) ve alüminyum oksit (Al_2O_3)'den oluşmaktadır.

Puzolanlar başlıca 2 kısma ayrılmakta; doğal puzolanlar; volkanik kül, tuf, ve diatom olarak adlandırılan silisli alglerin kalıntılarını içeren diatomlu toprak ve benzeri malzemeler ile belirli sıcaklığa kadar pişirilme işlemine tabi tutulmuş olan bazı killer bu sınıfa girmektedir. Yapay puzolanlar uçucu kül, granüle yüksek fırın curufu ve silis dumanı, pirinç kabuğu külü gibi endüstriyel bir üretim esnasında yan ürün olarak ortaya çıkan puzolanlardır (Erdoğan ve

Erdoğan 2007). Atık ürün olarak doğada yer kaplayan uçucu kül, silis dumanı ve yüksek fırın cürufu gibi yapay puzolanlar beton üretimlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Ardahanlı vd 2019; Alameri *et al.* 2019).

Puzolanlar; işlenebilirliği, mekanik özellikleri, çeşitli durabilite özelliklerini iyileştirirler, hidrasyon ısısını ve maliyeti düşürürler. Bunun yanında su ihtiyacını artırıp sertleşme ve dayanım kazanma hızını azaltabilmektedirler. Literatürde genelde doğal ve yapay puzolan sınıfına giren malzemelerle beraber tanımı gereği içerisinde belirtilen maddeler (SiO_2 , Al_2O_3) bulunan malzemelerin puzolanik özellik gösterip göstermediğinin tayini ile ilgili çalışmalar yapılmaktadır.

Portland çimentosuna katılan puzolanlar ile elde edilen portland puzolanik çimentolar su ile temas ettiğinde öncelikle portland çimentosu hidrasyon reaksiyonuna başlar ve kalsiyum silikatlar çimentodaki dayanıklılığı sağlayan kalsiyum silika hidrat jellerini ve yan ürün olarak kalsiyum hidroksiti oluşturur. Puzolanik mineral katkı maddesi portland çimentosunun hidrasyon ürünü olan kalsiyum hidroksit ile tepkimeye girerek dayanımın ana bileşeni olan kalsiyum silika hidrat jellerini oluşturur (Erdoğan ve Erdoğan 2007). Böylece puzolanlar içerdikleri silis oranına bağlı olarak dayanıma erken veya uzun vadede etki edebilmektedirler.

Betonda çoğunlukla yapay puzolanların etkisi incelenmiş olup bu puzolanlardan uçucu kül mineral katkısı çimentonun %5-%70'i oranında, yüksek fırın cürufu %15-%110 oranı arasında, silis dumanı ise %5-%25 oranı arasında kullanılmıştır ve bu çalışmalar üzerinde daha çok betonun mekanik özellikleri incelenmiştir (Naik *et al.* 1994; Siddique 2004; Wong and Razak 2005; Öner ve Akyüz 2007; Yazıcı ve Sezer 2007; Temiz vd 2009; Demir 2009; Binici vd 2010a). Mineral katkılar ile üretilen betonların mekanik özellikleri incelendiğinde;

%40, 45 ve 50 oranlarında F sınıfı uçucu kül içerikli betonun 28, 91 ve 365 günlük kür sonunda basınç ve eğilme dayanımı için tüm kür sürelerinde en iyi sonuçların %40 oranında olduğu ve bütün karışımlarda beton yaşının artması ile basınç dayanımının da arttığı (Siddique 2004), çimentonun %40'ına varan oranlarda uçucu kül katkılı betonların yol kaplaması yapımında kullanılabilirliği araştırıldığında 90 gün kür sonunda çimentonun %30'u oranında uçucu kül katkısıyla üretilen numunelerin basınç dayanımları kontrol numunelerin basınç dayanımlarından daha yüksek olduğu (Temiz vd 2009), uçucu külün %0, 50, 70 oranlarında çimento yerine kullanılması ile 28 gün standart kür sonunda basınç dayanımları sırasıyla 43 MPa, 32 MPa, 18 MPa olup uçucu kül oranının artışı ile basınç dayanımının azaldığı (Naik *et al.* 1994) tesbit edilmiştir. Üç farklı s/ç oranı (0.27, 0.30, 0.33) ve üç farklı silis dumanı ikame oranı (%5, 10 ve 15) kullanılarak üretilen betonların basınç dayanımları incelendiğinde; 7

günlük kür sonuçlarında silis dumanı ikamesinin pek etkili olmadığı fakat 90 gün sonrasında beton basınç dayanımında etkili olduğu ve %10 silis dumanı ikamesi ile dayanımda %17'lik artış sağlandığı (Wong and Razak 2005) görülmüştür. Yüksek fırın cürufunun ise %0'dan %110'a kadar çimento yerine ikame olarak kullanıldığı beton karışımları, dört farklı dozajda (250, 300, 350, 400 kg/m³) üretilmiş, 365 güne kadar kür sonunda beton basınç dayanımlarının kür süresi ve dozaj ile doğru orantılı ve en iyi dayanımın ise 400 kg/m³ dozaj ile %55 oranında yüksek fırın cürufu ikamesinde elde edildiği belirlenmiştir (Öner ve Akyüz 2007).

Mineral katkıların birlikte kullanıldığı çalışmalar incelenirse;

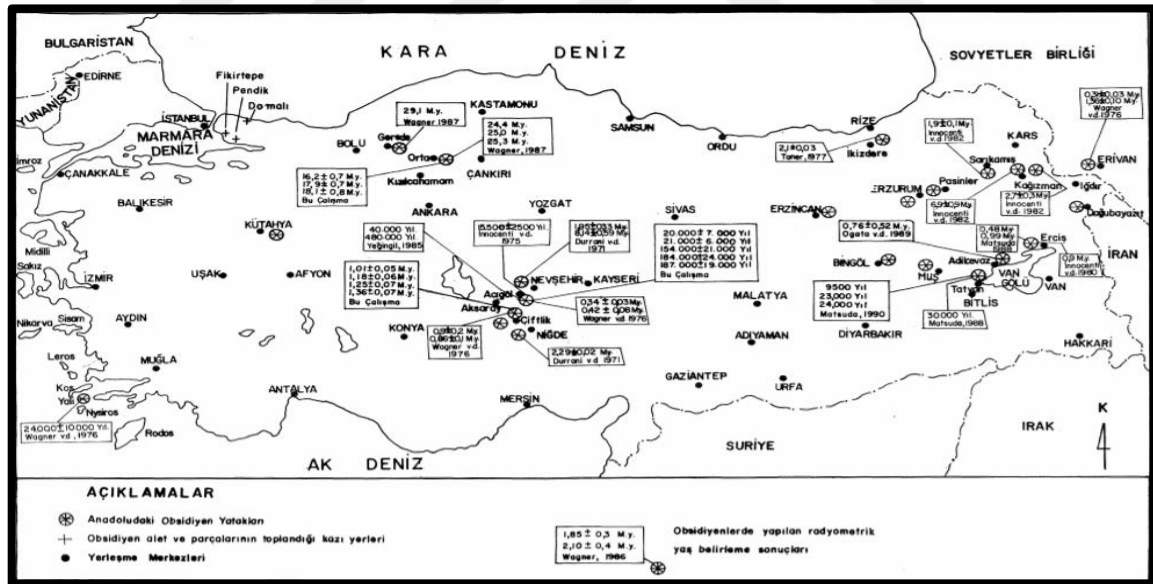
%5, 10, 15, 20 ve 25 oranında ağırlıkça çimentoya ikame olarak silis dumanı ve F sınıfı uçucu külün betonun basınç ve yarmada çekme dayanımına etkisi incelendiğinde her orandaki basınç ve yarmada çekme dayanımları silis dumanı ikameli karışımlarda uçucu kül ikameli karışımlara göre daha yüksek ve en iyi dayanımların %20 silis dumanı ikameli karışımlarda olduğu belirlenmiştir (Demir 2009). Yine uçucu kül ve silis dumanı kullanılarak üretilen yüksek dayanımlı betonun mekanik özelliklerinin incelendiği bir diğer çalışmada, silis dumanı çimento yerine %30 oranında ikame edilerek sabit alınmış ve uçucu kül %5, 10, 15 ve 25 oranlarında kullanılarak üretilen betonların 28 günlük kür sonunda en iyi basınç dayanımının tek başına %30 oranında silis dumanı içeren yüksek dayanımlı betonlarda elde edildiği görülmüştür (Yazıcı ve Sezer 2007). Uçucu külün betonun ileriki yaşlardaki dayanımına etkisinin fazla olması erken yaşlarda beton dayanımına negatif etki göstermesi (Carette and Malhotra 1983; Bilodeau *et al.* 1989) bu sonucun oluşmasının sebebi olarak açıklanmıştır. Yüksek fırın cürufu ve pomza katkılı betonların geçirimsizliği incelendiğinde; 7 ve 28 gün standart kür sonunda sadece pomza içeren numunelerin permeabilitesi en fazla iken yüksek fırın cürufu ile birlikte pomza kullanılarak üretilen numunelerde ise en düşük olduğu (Binici vd 2010a) gözlemlenmiştir. Ayrıca barit, bazaltik pomza, kolemanit ve yüksek fırın cürufu katkılı betonların 7, 28 ve 180 gün standart kür sonunda özellikleri incelendiğinde 7 gün kür sonunda beton basınç dayanımlarında bütün malzemeler azalmaya sebep olurken 28 ve 180 gün kür sonunda en iyi basınç dayanımı ve en düşük permeabilite sonuçları kolamenit ve yüksek fırın cürufunun kullanılması ile oluşturulan numunelerde olduğu belirlenmiştir (Binici vd 2010b).

Puzolan olarak kullanılabilen pirinç kabuğu külünün çimentoya %20 oranında katılması ile elde edilen betonda pirinç kabuğu külü, Los Angeles aşınma cihazında üç farklı sürede (180, 270 ve 360 dakika) öğütülmüş ve 31.3, 18.3 ve 11.5 µm tane boyutlarında kullanıldığında ince pirinç kabuğu külü ikameli betonlarda 28, 90 ve 180 günlük basınç ve eğilme mukavemet değerlerinin daha yüksek olduğu belirlenmiştir (Görhan ve Şimşek 2011).

Puzolanların betonun performansına etkisi ile ilgili literatür incelendiğinde betonda mineral katkı türü olarak yapay puzolanlar ağırlıklı olarak tercih edilmiştir. Yapay puzolanlardan silis dumanının, yüksek fırın cürufu ve uçucu küle göre betonun erken dayanımlarında etkisinin daha yüksek olduğu görülmüştür. Günümüzde içeriğinde SiO_2 oranı yüksek olan malzemelerin puzolanik aktivitesinin belirlenmesi konusu araştırılmaya devam edilmektedir. Yüksek SiO_2 miktarına sahip olan malzemelerden biri de obsidiyendir. Rezervi yüksek olan obsidiyenin puzolanik aktivitesinin belirlenmesi bu nedenle önemlidir.

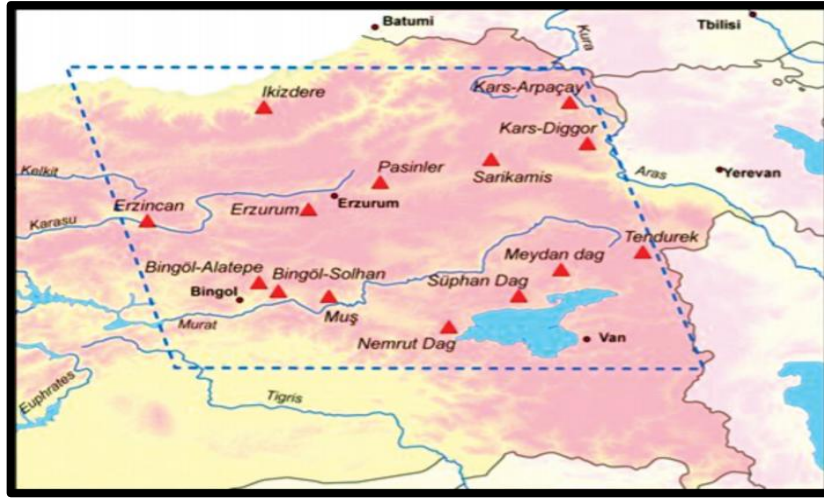
Obsidiyen

Obsidiyenin bulunduğu başlıca ülkeler: Meksika, İskoçya, Amerika, İtalya, Yunanistan, Ermenistan, Türkiye'dir. Türkiye'de tersiyer ve kuvaterner yaşlı volkanizmaların birçok bölgemizde etkin olmasından dolayı obsidiyen yatakları fazla miktarda oluşmuştur (Şekil 1). Bu obsidiyen yatakları Doğu Anadolu Bölgesi'nde Nemrut, Süphan, Tendürek ve Ağrı Dağı civarında; Orta Anadolu Bölgesi'nde Erciyes ve Hasan Dağı gibi büyük genç dağların etrafında değişik tip ve boyutta bulunmaktadır. Ayrıca bu yatakların yanısıra Rize, Bingöl, Erzurum, Erzincan çevrelerinde ve Ankara-Bolu arasında da obsidiyen yatakları tespit edilmiştir (Ercan vd 1990).



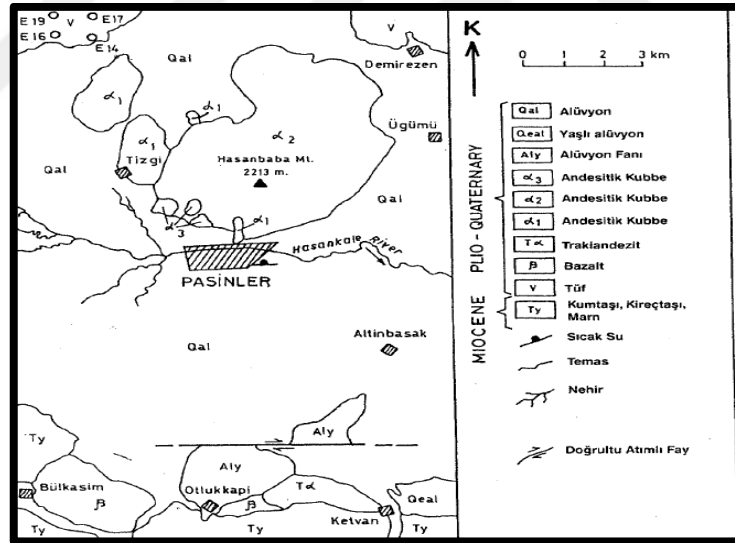
Şekil 1. Anadoludaki obsidiyen yatakları (Ercan vd 1990)

Ülkemizin volkanik topografya haritası gözönüne alındığında en geniş alana sahip coğrafik bölgesi Doğu Anadolu'dur. Bu bölge Şekil 2'deki haritada görüldüğü üzere obsidiyen varlığı bakımından oldukça zengin bir bölgedir. Doğu Anadolu Bölgesi çok zengin bir arkeolojik geçmişe sahip ve bu bölgedeki obsidiyen ana kaynakları göl-akarsu eğimli kısımları ve ovaların olduğu yerlerde fazla miktarda bulunmaktadır (Akköprü vd 2017).



Şekil 2. Doğu Anadolu Bölgesi obsidiyen kaynakları (Akköprü vd 2017)

Doğu Anadolu Bölgesi'nde yer alan Erzurum'da volkanik kökenli obsidiyenin; Kible Tepesi'nde, Tambura Köyü çevresinde ve Tabya Dağı'nda olduğu tespit edilmiştir. Erzurum'un ilçelerinden biri olan Pasinler ilçesi, Erzurum merkezine göre daha doğuda yer almakta ve bu ilçe çevresinde obsidiyen kaynaklarının Şekil 3'de görüldüğü üzere fazla miktarda olduğu belirlenmiştir (Bigazzi *et al.* 1997).



Şekil 3. Pasinler ilçesinin obsidiyen haritası (Bigazzi *et al.* 1997)

Obsidiyen kayacı silis açısından zengin olmakla beraber Şekil 4'de görüldüğü gibi siyah, kahverengi, bazen yeşil renklerde olabilen ve genellikle riyolitik bileşimli bir kayaç türü olup konkoidal (midye kabuğu şeklinde) kırınım gösterir (Anonim 2018). Geçmişte mızrak ucu, okbaşı ve diğer keskin aletlerde, ayrıca mücevherat ya da sanatsal objelerin yapımında kullanılmıştır (Gündeşli 2008).

Ülkemizde obsidiyenlerle alakalı olarak yapılan rezerv hesaplamalarında, 5.850.000 tonluk obsidiyen bulunduğu belirlenmiştir (Bilgin vd 2012). Genel özellikleri; sertliği (Mohs

sertlik skalasına göre): 5-5,5, yoğunluğu yaklaşık 2,35-2,6 gr/cm³, yapısal görünümü yarı saydam, parlaklığı camsı ve kimyasal formülü: SiO₂+H₂O+Fe₂O₃ dır (Anonim 2018).



Şekil 4. Obsidiyen taşının genel görüntüsü



Şekil 5. Obsidiyenin kayaç halindeki görüntüsü

Volkanik cam olarak bilinen obsidiyenin betonda kullanılması ile ilgili yapılan çalışmalar literatürde sınırlı sayıda olmakla birlikte bu çalışmalar incelendiğinde;

Türkiye'nin Rize İli İkizdere İlçesi'nde çıkarılan obsidiyenin diğer puzolanlar (uçucu küllü ve yüksek fırın cürufu) ile karşılaştırmalı olarak puzolanik özellikleri araştırıldığı çalışmada elde edilen sonuçlara göre, obsidiyenli çimentonun uçucu kül içeren çimentoya göre puzolanik olarak daha olumlu etkiler sağladığı görülmüştür. Obsidiyenin bir puzolan olarak yüksek fırın cürufuna eşdeğer olduğu sonucuna varılmıştır. Çimento yerine %25 oranında obsidiyen kullanımı ile puzolanik aktivite değeri maksimum olarak 7 günlük 77,48, 28 günlük 90,41, 90 günlük ise 95,68 olduğu görülmüştür. Bu nedenle bölgede bulunan obsidiyenin,

çimentoda puzolan olarak kullanılabilirliğinin uygun olduğu sonucuna ulaşılmıştır (Kaya ve Ustabas 2018).

Rize yöresi obsidiyeninin çimentonun hidratasyon ısisına olan etkisinin incelendiği çalışmada, çimentoda sıklıkla kullanılan mineral katkılardan yüksek fırın cürufunun ve uçucu külün çimentodaki hidratasyon ısisına olan etkisi ile harçların basınç dayanımları karşılaştırılmıştır. Obsidiyenin, katılan mineral katkılar gibi benzer davranış gösterdiği ve çimentonun hidratasyon ısisını düşürdüğü belirlenmiştir. Obsidiyen çimentoya %10, 20, 30 ve 40 oranlarında katılıp 28 gün standart küre bırakılan harçların basınç dayanımları kıyaslandığında obsidiyen miktarının artışına bağlı olarak dayanımın düştüğü gözlemlenmiştir. Ayrıca obsidiyen, uçucu kül, yüksek fırın cürufundan çimentoya %40 oranında katılarak oluşturulan çimentolar ile oluşturulan harçların basınç dayanımları kıyaslanmış olup en yüksek basınç dayanımları sırasıyla yüksek fırın cürufu, obsidiyen, uçucu küllü harçlarda elde edilmiştir (Ustabas ve Ömür 2019).

Obsidiyenin yüksek silis oranına sahip olması, dünyada ve başta ülkemizde olmak üzere yüksek miktarda rezervlerinin bulunmasına rağmen betonda kullanımına dair yapılan çalışmalar sınırlı olup son zamanlarda bu çalışmaların sayısında artış görülmektedir. Çalışmada kullanılan yüksek silis içerikli (%77,3) Pasinler obsidiyeninin daha önce betonda kullanılmaması çalışmanın özgünlüğünü ön plana çıkarmaktadır. Ayrıca literatürde de görüldüğü üzere %25 oranından fazla katılan obsidiyen tozunun dayanımı düşürdüğü ve en iyi puzolanik aktivite değerinin belirlenmesi için seçilen oranlar bu oranın altında olup en ideal oran tespit edilmeye çalışılmıştır.

Günümüzde sanayi endüstrilerinde metal veya alaşım ürünlerinin üretimi sırasında birçok atık malzeme ortaya çıkmaktadır. Bu atık malzemelerin bir bölümünü de metalik cüruflar oluşturmaktadır.

Metalik Cüruflar

Beton sektöründe son zamanlarda yaygınlaşan bir diğer konuda atık yapı malzemelerin betonda kullanımını incelemek ve bu malzemelerin kullanılabilirliği sağlandığında hem daha az çevre kirliliği hem de daha ekonomik bir yapı malzemesi elde etmektir. Bu atık malzemelerden olan metalik cürufların ortaya çıkışları sırasında doğaya karışan karbondioksit ve karbonmonoksit gazları hem sağlığımızı hem de havamızı olumsuz etkileyebilmektedir. Bu nedenle metalik cürufların doğadan uzaklaştırılması ayrı bir önem arz etmektedir.

Metalik cürufların betonda kullanıldığı çalışmalar incelendiğinde özellikle literatürün henüz tam anlamıyla yeterli olmadığı gözlemlenirken bu cürufların beton performansına

etkisinin incelendiği literatür çalışmaları özetlenirse; farklı cürufların betonda kısmen agregası olarak kısmen de çimento yerine ikame şeklinde katılarak kullanıldığı, farklı oranlarına ve kimyasal özelliklerine göre betonda basınç ve çekme dayanımlarında artış sağlandığı görülmektedir. Bu çalışmalar incelenirse;

Agregası yerine granül haldeki çinko cevheri cürufunun farklı oranlarda karıştırılması ile elde edilen betonların deneysel sonuçlarını incelenmesi için yapılan çalışmada çinko cevheri cürufu, 0-5 mm ve 5-15 mm tane boyutlarına ayrılmış, agreganın yerine betona ilave edilmiştir. 0-5 mm ve 5-15 mm tane boyutlu cüruf içeren numunelerde 28 günlük standart kür sonunda kontrol betonuna eşdeğer dayanımlı ve daha hafif beton numuneler elde edilmiştir (Öztürk vd 2018).

Kurşun-çinko maden işletmesinden alınan fazlalık kayalardan üretilen betonların fiziksel ve mekanik özelliklerinin incelenmesi amacıyla kurşun ve çinko atığı içeren kayalardan elde edilen agregalar, kireçtaşı agregaları yerine %25, 50, 75 ve 100 oranlarında yer değiştirilerek C16/20, C25/30 ve C35/45 beton dayanım sınıflarındaki örnekler ile karşılaştırma yapılmıştır. Kurşun ve çinko atığı içeren kayalardan elde edilen agregalar ile üretilen betonların basınç ve eğilme dayanımlarında artış olduğu, en yüksek dayanımın %100 oranında kireçtaşı agregası yerine kullanılması ile elde edildiği görülmüştür (Çullu 2018).

Bakır cürufunun %5, 10, 15, 20, 30, 40 ve 50 oranlarında ince agregası yerine kullanılması ile elde edilen beton karışımlarının 28 gün kür sonundaki en iyi basınç ve yarmada çekme dayanımı sırasıyla %35-40 ve %30-35 aralığında elde edilmiştir (Brindha and Nagan 2010).

Elazığ ferrokrom cürufunun çimento yerine ikame olarak %1, 3, 5, 7 ve 10 oranlarında katılması ile elde edilen betonlarda 28 gün standart kür sonunda %3 oranında ferrokrom cüruf ikamesi ile kontrol betonundan daha yüksek basınç dayanımı elde edilmiştir (Yazıcıoğlu vd 2005).

İşlenmemiş düşük CaO içerikli çelik cürufunun ince agregası yerine %15, 30, 50 ve 100 oranlarında kullanılması ile 28 günlük kür sonunda %30'a kadar kullanılması basınç dayanımında iyi sonuçlar verirken çekme dayanımında da en iyi sonuçların %30 ve %50 oranlarında kullanımı ile elde edildiği belirlenmiştir. Çelik cürufunun ince agregası yerine kullanılması ile basınç dayanımında 1,4-2,4 kat, çekme dayanımında ise 1,1-1,3 kat arasında artış olduğu gözlemlenmiştir (Qasrawi *et al.* 2009).

Elektrikli ark fırınlarında ortaya çıkan çelik cürufların agregası yerine kullanılması ile elde edilen betonlardaki basınç dayanımı kontrol betonu değerlerine çok yakın bulunmuş ve

radasyona karşı direnci barit agregaları ile üretilen betonlarla karşılaştırıldığında ise daha düşük olduğu görülmüştür (González-Ortega *et al.* 2014).

Kurşun-çinko cüruf atıkları ile oluşturulan hibrit karışımın (ince agrega) geleneksel betondan daha iyi radyasyon kalkanı ve basınç dayanımı özelliklerine sahip olduğu belirlenmiştir (Alweli 2017).

Granüle kurşun-çinko cürufunun betonda ince agrega yerine %25, 50, 75 ve 100 oranlarında kullanımı ile normal betondan daha iyi basınç dayanımına sahip olduğu ve en yüksek basınç dayanımının ince agrega yerine %100 oranında hibrit kullanılan karışımda elde edildiği görülmüştür (Alweli 2013).

Öğütülmüş granül yüksek fırın cürufu (GGBFS), kurşun cürufu (LS) ve çinko cürufu (ZS)'nin ince agrega yerine kullanılması ile GGBFS kullanıldığında basınç dayanımı artarken ZS veya LS sırasıyla betonda ince agrega yerine kullanıldığında basınç dayanımında nispeten küçük bir azalma olduğu belirlenmiştir (Mosavinezhad and Nabavi 2012).

Çinko cürufunun çimento yerine %10, 20 ve 30 oranında kullanılması ile elde edilen harç numunelerinde 7, 14 ve 28 gün standart kür sonunda en iyi basınç dayanımlarının %10 ikame ile elde edildiği görülmüştür (Aslan vd 2019).

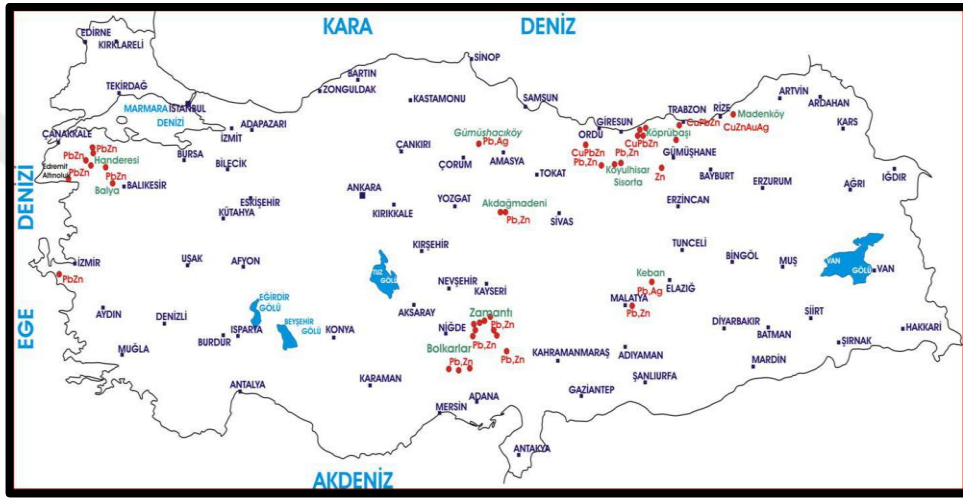
Ayrıca nano çinko oksit %1, 2 ve 5 oranlarında betona katılarak beton basınç dayanımını 28 gün kür sonunda %15 oranında artırdığı ve en iyi dayanımın %1 katkı ile sağlandığı görülmüştür (Chaipanich *et al.* 2015).

Literatür incelendiğinde metalik malzemeler içerisinde rezerv, üretim ve tüketim açısından önemli bir metal cevheri bulunmaktadır. Bu metal alüminyum, demir ve bakır metalinden sonra sanayi endüstrisinde en çok kullanılan çinkodur.

Demirde ve çelikte oluşabilecek korozyona karşı direnç oluşturulmasında, sanayi sektöründe kullanılan pirinç ve diğer özel alaşımların yapımında, dış etkilere dirençli bir malzeme olduğundan binaların çatı kaplamalarında, lastik ve pil üretiminde yüksek miktarlarda çinko kullanılmaktadır. Çinko metali dünyada yaklaşık 200 milyon ton seviyelerinde bulunurken, bu rezerv miktarı Türkiye'de 2,3 milyon ton kadardır. ABD, Kanada, Avustralya, Çin dünya genelinde en çok çinko rezervine sahip ülkelerdir. Bu çinko cevheri rezervlerinden yapılan üretim dünyada 8 milyon ton olup, üretim sonucu elde edilen ve Şekil 6'da gösterilen atık madde çinko cürufu miktarı ise 0,5 milyon ton kadardır. Ülkemizde çinko metali tüketimi dikkate değer seviyede olup 60 bin tondur (Anonim 2019).



Şekil 6. Çinko madeni cürufu



Şekil 7. Türkiye çinko-kurşun yatakları haritası (MTA 2020)

Şekil 7’de görüldüğü üzere ülkemizde birçok ilde ve bölgede çinko-kurşun yatakları bulunmaktadır. Ağırlıklı olarak Doğu Karadeniz Bölgesi’nde çıkarılan çinko ve kurşun madenine, İç Anadolu Bölgesi’nde Kayseri ili ve çevresinde yoğun olarak rastlanmaktadır. Şekilde gösterilen Türkiye haritasında Doğu Karadeniz ve İç Anadolu Bölgesi’ne ek olarak Marmara Bölgesi’nin batısında da çinko-kurşun madeni yataklarına sahip olduğu görülmektedir. Ülkemizin birçok bölgesinde bulunan çinko yatakları bu bölgelerde çinkoyu işleyecek fabrikaların kurulmasına olanak vermektedir. İşlenen çinko madeni çeşitli sektörlerde kullanılırken işlenme sonrasında ortaya çıkan çinko cürufu atık maddesi doğada kirliliğe ve depolanması gerektiğinden sorumlu fabrikalar için maddi kayıplara sebep olabilmektedir.

Bu nedenle çinko cürufunun farklı alanlarda kullanımı sağlanmalıdır. Bu çalışmada çinko cürufunun yeterli puzolanik aktivite göstererek betonun dayanımında artış sağlayabileceği ve literatüre bu yönden de katkı sağlayabileceği düşünülmektedir.

Metalik cüruflar gibi atık malzeme olan ve değerlendirilmesi gereken bir başka malzeme de atık seramik malzemelerdir. Dünyada çok geniş bir üretim kapasitesi olan seramik

malzemeler, günümüzde neredeyse bütün yapılarda kullanılabilmekte ve bu yönüyle atıklarının kullanım alanlarının da geliştirilmesi gerekmektedir.

Seramik Atıklar

Endüstri sanayisinin gelişmesine paralel olarak üretilen malzemelerden çıkan atık maddeler gün geçtikçe artış göstermekte ve bu maddelerin yeniden değerlendirilmesi için çalışmalar yapılmadığı takdirde birçok endüstri sektörü atığı çevre kirliliği açısından insanlık için büyük sorun teşkil etmektedir. Günümüzde bu endüstriyel atıklardan yüksek verim elde etmek amacıyla çeşitli alanlarda kullanılması ile ilgili çalışmalar gittikçe yaygınlaşmıştır. Bu endüstriyel atıklar içerisinde en önemli olanları inşaat sektöründe olup bu atıkların arasından; seramik, cam, refrakterler ve kompozitler üzerine atık yönetimine yönelik geniş çaplı çalışmalar mevcuttur. Çevre kirliliğine neden olan bu malzemeler doğru bir şekilde kullanıldığında istenilen ekonomiklik elde edilmiş olunacaktır (Mırdalı ve Çetin 2005).

Bu endüstriyel atıklardan biri de seramik atıklardır. Seramik kaplamalarının üretimindeki farklı aşamalarda (sır işleme, şekil verme işlemi, pişirme aşaması, parlaklık katma aşaması ve taşlama) meydana gelen kırıklar, çatlaklar veya düşük standartta üretim nedeniyle çok yüksek miktarlarda atık malzeme ortaya çıkabilmektedir. Bu durum seramik endüstrisindeki üretim sırasında her aşamada oluşan atıkların neden olduğu çevresel sorunlara ek olarak depolama sebebiyle yüksek maliyetlerin oluşmasına da neden olmaktadır (Poyraz ve Yılmaz 2017). Dünya seramik üretim sanayisi 11 milyar m² ile inşaat sektöründe önemli yere sahiptir. Bu sektörde yapılan üretimler sonucunda minimum %5 oranı kadar atık seramik (Şekil 8) meydana gelmekte ve bu miktar dünyada yaklaşık olarak 550 milyon m² gibi yüksek değerlere ulaşmaktadır.



Şekil 8. Atık seramik

Atık madde olarak dünyada yüksek miktarlara ulaşan seramik malzemesi sahip olduğu yüksek sertlik ve dayanıklılık sayesinde beton endüstrisinde kullanılmaya başlanmıştır.

Betonun mekanik özellikleri üzerinde seramik atıkların etkisinin incelendiği çalışmalar irdelendiğinde;

Seramik atıkları ince agregaya yerine %40, 50, 60 oranlarında katılması ile elde edilen betonda 7, 28, 90 ve 365 gün standart kür sonunda yapılan mekanik testler sonucunda tüm kür sürelerinde en iyi basınç dayanımı %60 oranında seramik atık kullanılması sonucunda elde edilmiştir (Binici 2007).

Porselen seramik atığı ve daha düşük sıcaklıklarda üretilen kırmızı seramik atıklarının beton üretiminde iri agregaya yerine %25, 50, 75 ve 100 oranında kullanılması ile elde edilen betonların basınç dayanımları incelendiğinde iki atık maddenin %100 oranında kullanılması ile dayanımda artış olduğu gözlemlenmiştir. Artış oranının porselen seramik atık ile %41'e kadar iken kırmızı atık seramikte ise %29 olduğu belirlenmiştir (Keshavarz and Mostofinejad 2019).

Geleneksel betonda kullanılan iri agregaya yerine %10, 20 ve 30 oranında seramik atık ikame edilerek oluşturulan betonların 7, 28 ve 63 günlük kür sonundaki basınç dayanımlarında artış olduğu ve en iyi sonucun %30 oranında iri agregaya yerine seramik atık kullanılması ile elde edildiği görülmüştür. Kür süresinin artışı ile seramik atık agregalı betonların basınç dayanımları ile geleneksel betonların basınç dayanımları arasındaki farkın açıldığı belirlenmiştir. Ayrıca seramik atık agregasının miktarının artışı ile betonun birim hacim ağırlığının azaldığı gözlemlenmiştir (Rashid *et al.* 2017).

Seramik atığın ince ve iri agregaya yerine kullanılması ve çimento olarak alüminli çimento tercih edilmesi sonucunda seramik atığın her iki agreganın yerine kullanımı ile yüksek dayanım sağladığı belirlenmiştir (Zegardlo *et al.* 2013).

Seramik kırıklarının agregaya (iri ve ince) yerine %33, 67 ve 100 oranlarında katılması ile elde edilen betonlarda en iyi basınç dayanımının %33 ince %67 iri agregaya yerine kullanılan seramik atıklı betonlardan elde edildiği görülmüştür (Correia *et al.* 2006).

İnce agregaya yerine %20, 40, 60, 80 ve 100 oranlarında seramik atık kullanılması ve su/bağlayıcı oranının 0,35-0,45-0,55 oranlarında tutulması ile elde edilen beton numunelerde 28 gün standart kür sonunda basınç dayanımında en iyi sonuç %60 oranında seramik atık kullanımı ve su/bağlayıcı oranının 0.35 seviyesinde iken elde edilmiştir (Siddique *et al.* 2019).

Seramik endüstrisinde açığa çıkan seramik tozunun (CP) çimento yerine kullanılabilirliği araştırıldığında, %10 seramik atık tozu katkısının 28 günlük eğilme dayanımı, basınç dayanımı ve asitlere dayanıklılığını arttırdığı belirlenmiştir (Kalinçimen vd 2015).

Seramik atığın iri agregaya yerine %15, 20 ve 25 oranında kullanılması ile oluşturulan beton gruplarında, %25 oranında kullanılması sonucunda basınç ile çekme dayanımlarında %12

ile %25 oranlarında artış sağlandığı ve seramik atık agregasının çimento hidratasyonuna olumsuz etkisinin olmadığı belirlenmiştir (Medina *et al.* 2012).

Seramik atık agregasının beton karışımlarında ince agrega yerine %10, 20, 30, 40, 50 ve 100 oranında kullanılmasıyla birlikte elde edilen beton gruplarının 7, 14 ve 28 gün kür sonunda; seramik atığın ince agrega yerine %50 oranına kadar katılması ile basınç dayanımının arttığı ve bütün oranlardaki basınç dayanımının geleneksel betonun basınç dayanımından daha yüksek olduğu görülmüştür (Torkittikul and Chaipanich 2010).

Doğal agregalar ve seramik atığın iri agrega yerine kullanılması ile 6 farklı su/çimento oranında üretilen betonlarda gerçekleştirilen mekanik deneylere göre; s/ç oranı azaldıkça basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı ve eğilme dayanımı artarken, bu deney sonuçları incelendiğinde geleneksel beton agregası ile üretilen betonların seramik atıklı betonlara göre ortalama %9 daha iyi sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir (Manoharan and Senthamarai 2005).

Seramik atıkların beton performansına etkisinin incelendiği literatür çalışmaları özetlenirse; seramik atık malzemelerinin betonda kullanılmasının son zamanlarda çok yaygınlaştığı, farklı atıkların oranlarına ve kimyasal özelliklerine göre betonda performans artışı sağladığı görülmektedir.

Bu literatür bilgilerinden hareketle bu çalışmada;

Seramik atık içeren betonlar ile ilgili önceden yapılmış çalışmalar neticesinde basınç ve çekme dayanımında en iyi sonuç ince agrega yerine %60 oranında (Binici 2007; Siddique *et al.* 2019) kullanımı ile elde edildiğinden bu oran seramik atık için sabit seçilip çimento yerine obsidiyen tozu ve çinko cürufu katılarak yöntem kısmında verilen gruplar oluşturulmuştur. Puzolanik deneyler için ince öğütülmüş obsidiyen ve çinko cürufu, çimentonun bir kısmı yerine belirli oranlarda (obsidiyen: %5, 10, 15, 20 ve 25, çinko cürufu: %2.5, 5, 7.5 ve 10) katılarak 7 günlük ve 28 günlük puzolanik aktivite indeksi belirlenmiştir. Puzolanik aktivite indeksleri sonuçlarına göre en ideal beton grupları oluşturulmuş olup mekanik deneyler için hazırlanan numuneler 28 gün standart su küründe tutulmuştur. Kür sonunda numunelere; basınç deneyi, eğilmede çekme deneyi, kapilarite (kılcallık) deneyi, birim hacim ağırlık deneyi, Schmidt çekiç (sertlik) deneyi, ultrases darbe hızı deneyi ve elde edilen mekanik deney sonuçlarını daha iyi destekleyebilmek için SEM-EDS ve XRD analizleri uygulanmıştır.

MATERYAL VE YÖNTEM

Materyal

Çalışmanın bu bölümünde beton ve harç üretiminde kullanılan malzemeler hakkında bilgiler verilmiştir.

Çimento

Çalışmada Erzurum Aşkale Çimento Fabrikası'ndan temin edilen TS EN 197-1 (Anonim 2012) standardına uygun CEM I 42,5 R tipi çimento kullanılmıştır ve bu çimento tipine ait özellikleri Tablo 1'de verilmiştir. Çimento tipi literatürden betonun mekanik özelliklerinin belirlemek için Binici (2007), çalışmasına göre seçilmiştir.

Tablo 1. CEM I 42,5 R tipi çimento kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri

İçerik Türü	Yüzde (%)
SiO ₂	18,10
Al ₂ O ₃	4,48
Fe ₂ O ₃	3,09
CaO	63,65
MgO	2,58
SO ₃	2,84
Kızdırma Kaybı	3,9
Na ₂ O	0,21
K ₂ O	0,62
Na ₂ O+0,66K ₂ O	0,62
Cl	0,015
Ölçülemeyen	0,52
Toplam	100
Serbest CaO	0,44
Çözünemeyen Kalıntı	0,55
İncelik 45 mikron elek üstü	7,18
Özgül Ağırlık (gr/cm ³)	3,12
Özgül Yüzey (cm ³ /gr)	3690
Hacim Genişlemesi	1
Dayanım	MPa
Basınç Dayanımı (2. Gün)	27,9
Basınç Dayanımı (28. Gün)	58
Priz Başlangıç	2 saat-31 dakika
Priz Sonu	3 saat-11 dakika

Agrega

Deneylerde Erimsan Beton Fabrikasından alınan 0-2, 2-4, 4-8, 8-16 mm boyutlu kum ve kırmataş agrega kullanılmıştır. Deneyde kullanılan agregalara ait; tane yoğunluğu, su emme oranı ve yüzey nemi değeri TS EN 1097-6 (Anonim 2013) standardına uygun olarak gerçekleştirilen deneylerle tespit edilmiştir.

Karışım suyu

Beton karışımlarında TS EN 1008 (Anonim 2003) standardına uygun olarak Erzurum Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Malzemesi Laboratuvar musluk suyu kullanılmıştır.

Kimyasal katkı

Çalışmada yapılan ön denemeler sonucunda ve TS EN 934-2+A1 (Anonim 2014) standardına uygun olarak polikarboksilik eter esaslı, süper akışkanlaştırıcı katkı maddesi MasterGlenium RMC303 %1 oranında kullanılmıştır.

Atık seramik

Hızlı ilerleyen endüstri sektörü ile meydana gelen çevreye karşı duyarlılık ilgisi çok büyük önem arz etmektedir. Özellikle beton sanayisinde ucuz malzeme arayışı atık maddelerin betonda kullanılabilirliğinin araştırılmasına neden olmuştur. Günümüzde yüksek miktarlara ulaşan atıklara sebep olan seramikler özellikle sahip oldukları yüksek sertlik ve korozyon dirençleri sebebiyle beton endüstrisinde kullanılmaya başlanmıştır (Başman vd 2001).

Çalışmada kullanılan seramik atıklar Doruklar İnşaat firmasından atık olarak elde edilmiştir (Şekil 9). Bu malzemenin agrega boyutuna getirilmesi için Los Angeles cihazı (Şekil 10) kullanılmıştır. Los Angeles cihazında agrega boyutuna getirilen malzemeye elek analizi deneyi (Şekil 11) uygulanmıştır.



Şekil 9. Seramik atık



Şekil 10. Los Angeles cihazı



Şekil 11. Elek analizi deneyi

Çinko cürufu

Bu çalışmada Kayseri Çinkom AŞ firmasında temin edilen çinko cürufu çimento yerine belirli oranlarda ikame edilerek kullanılmış olup bu oranlar kısıtlı olan literatüre göre belirlenmiştir. Agreg a boyutunda (Şekil 12) temin edilen çinko cürufu Los Angeles cihazında öğütölürken yapışma oluşmaması için etüvde yeterli miktara kadar kurutulmuştur ve kuru agreg a numunesi Los Angeles cihazı yardımıyla mikron boyutuna küçültölmüştür. TS 25 (Anonim 2008) standardına göre malzemenin puzolan olarak kullanılabilmesi için 90 mikronluk elek üstü kalan en fazla %8 olmalıdır. 90 mikronluk elekten tamamen geçen ve Los Angeles cihazında küçöltölen çinko cürufuna ait fiziksel özellikler Tablo 2’de ve kimyasal özellikler, 63 ve 75 mikrondan geçen yüzde miktarı ise Tablo 3’de verilmiştir.



Şekil 12. Agrega boyutunda temin edilen çinko cürufu

Tablo 2. Çinko cürufunun fiziksel özellikleri

Tane Yoğunluğu ve Su Emme Oranları	Agrega Tane Sınıfı (mm)	Doygun Kuru Yüzey Tane Yoğunluğu (gr/cm ³)	Su Emme (%)
	0-4	2,22	10,2
	4-8	2,23	9,5

Tablo 3. Çinko cürufunun kimyasal içeriği ve elekten geçen yüzdesi

İçerik Türü	Yüzde (%)
SiO ₂	16,10
Al ₂ O ₃	8,53
Fe ₂ O ₃	26,47
CaO	29,83
MgO	3,22
Na ₂ O	-
K ₂ O	-
Na ₂ O + 0,66K ₂ O	-
Kızdırma Kaybı	11,10
<63 Mikron (Elekten Geçen)	58
<75 Mikron (Elekten Geçen)	82

Obsidiyen tozu

Çalışmada Erzurum Pasinler İlçesi'nden alınan obsidiyen kayacı (Şekil 13) toz haline getirilerek çimento yerine belirli oranlarda ikame edilmiştir. Bu oranlar Kuramsal Temeller bölümünde verilen literatüre göre belirlenmiştir. Ham madde kaynağından alınan obsidiyen Erzurum Karayolları 12. Bölge Müdürlüğü'nde bulunan çeneli kırıcı yardımıyla küçültülmüştür (Şekil 14). Agregaya boyutuna getirilen obsidiyen Los Angeles cihazı aracılığıyla çimento yerine kullanılacak boyutlara (Şekil 15) getirilmiştir. TS 25 (Anonim 2008) standardına göre malzemenin puzolan olarak kullanılabilmesi için 90 mikronluk elek üstü kalan en fazla %8 olmalıdır. 90 mikronluk elekten tamamen geçen ve Los Angeles cihazında küçültülen obsidiyen tozuna ait kimyasal özellikler, 63 ve 75 mikrondan geçen yüzde miktarı Tablo 4'de verilmiştir.

Tablo 4. Pasinler obsidiyeninin kimyasal içeriği (Chataigner *et al.* 2013) ve elekten geçen yüzdesi

İçerik Türü	Yüzde (%)
SiO ₂	77,3
Al ₂ O ₃	12,9
Fe ₂ O ₃	1,08
CaO	0,32
MgO	0,04
Na ₂ O	3,94
K ₂ O	4,30
<63 Mikron (Elekten Geçen)	60
<75 Mikron (Elekten Geçen)	85



Şekil 13. Obsidiyen taşı



Şekil 14. Kırıcı yardımıyla küçültülmüş obsidiyen



Şekil 15. Los Angeles cihazından çıkarılan obsidiyen tozu

Yöntem

Agrega deneyleri

Çalışmada 0-2 mm, 2-4 mm, 4-8 mm ve 8-16 mm olmak üzere 4 farklı boyutta agregalar kullanılmış ve bu agregalara ait doygun kuru yüzey tane yoğunluğu, su emme oranı ve yüzey nemi değeri TS EN 1097-6 (Anonim 2013) standardına uygun şekilde gerçekleştirilen deneyler (Şekil 16) ile tespit edilerek, bu değerler Tablo 5’de verilmiştir.

Tablo 5. Agregaların tane yoğunluğu, su emme oranı ve yüzey nemi değerleri

	Agrega Tane Boyutu Aralıkları (mm)			
	0-2	2-4	4-8	8-16
Tane Yoğunluğu (DKY) (gr/cm ³)	2,62	2,67	2,7	2,68
Su Emme Oranı (%)	1,9	0,8	1,56	1,43
Yüzey Nemi (%)	1,2	0,2	0,8	0,4



Şekil 16. Agrega deneyleri

Beton basınç deneyi

Betonların basınç dayanımları, 28 günlük numuneler üzerinde yapılan basınç dayanımı deneyi ile belirlenmiştir. Basınç dayanımı deneyi TS EN 12390-3 (Anonim 2010) “Deney numunelerinde basınç dayanımının tayini” standardına uygun olarak ve 15×15×15 mm boyutlu küp numunelerde gerçekleştirilmiştir. Deneyde kullanılan küp numunelerin basınç deneyleri, 300 ton kapasiteli Utest Marka otomatik yükleme hızı kontrollü cihazda (Şekil 17) gerçekleştirilmiştir. Deney sırasında uygulanan yükleme hızı 0,4 MPa/s dir. Yapılan deney ile numunelerin kırılmadan ve parçalanmadan dayanabileceği maksimum gerilme belirlenmiştir. Deney numunelerinin basınç dayanımı için kullanılan formül:

$$f_c = \frac{F}{A_c} \quad (1)$$

Burada;

f_c : Deney numunesinin basınç dayanımı (kgf/cm²),

f : Maksimum kırılma yükü (kgf),

A_c : Numunenin en kesit alanı (cm),



Şekil 17. Beton presi

Eğilmede çekme deneyi

Eğilmede çekme deneyleri 7×7×28 cm boyutlu kiriş numuneler üzerinde TS EN 12390-5 (Anonim 2019) “Deney numunelerinin eğilme dayanımının tayini” standardına uygun olarak tek noktalı yükleme şeklinde ve yükleme hızı 0,05 MPa/sn alınarak yapılmıştır (Şekil 18).

Deney numunelerinin eğilmede çekme dayanımı için kullanılan formül:

$$f_{cte} = \frac{3FL}{2BD^2} \quad (2)$$

f_{cte} : Eğilmede çekme dayanımı (kgf/cm²),

F : Maksimum kırılma yükü (kgf),

L : Kiriş numune boyu (cm),

B : Kiriş kesiti eni (cm),

D : Kiriş kesiti yüksekliği (cm),



Şekil 18. Tek noktalı eğilmede çekme deneyi

Kılcal su emme deneyi

Betonda kılcal su emme deneyi TS EN 13057 (Anonim 2004)'e göre yapılmıştır (Şekil 19). $7 \times 7 \times 7$ cm boyutlu küp numuneler su kürü ortamından alınarak 24 saat süreyle 100°C etüvde tutulduktan sonra kesik yüzeyleri batacak şekilde suya konulup suda bekletilen numuneler belirli aralıklarla (5, 15, 30 dakika, 1, 2, 4, 8, 24 saat) su içerisinde çıkarılarak aşağıdaki formül 3.14'den hareketle kılcallık katsayısı tespit edilmiştir.

Burada, Q, emilen su miktarı (cm^3); K, kılcallık katsayısı (cm^2/sn); A, numunenin suyla temas ettiği alan (cm^2); t, geçen süre (sn) dir.

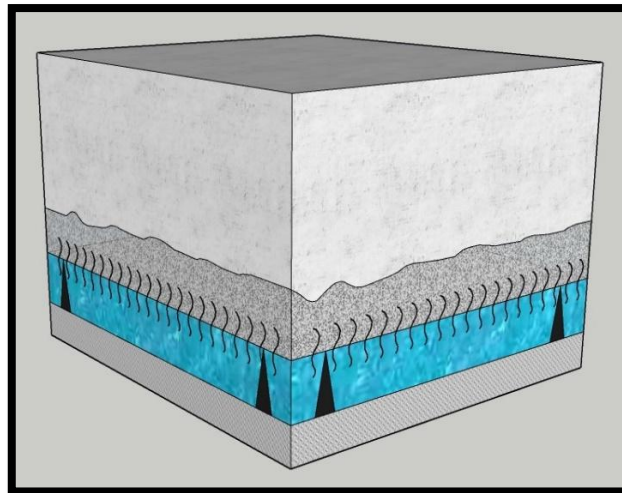
$$K = \frac{Q^2}{A^2 \times t} \quad (3)$$

Q : Numunenin temas yüzeyine bağlı emdiği su miktarı (cm^3),

K : Kılcallık katsayısı (cm^2/sn),

A : Deneyde kullanılan numunenin suyla temas ettiği yüzey alanı (cm^2),

t : Deney sürecince geçen süre (sn) dir.



Şekil 19. Betonda kılcal emilim deney düzeneği

Puzolanik aktivite deneyi

Obsidiyen tozu ve çinko cürufu ile üretilen betonların puzolanik aktivite indeksi belirleme çalışmaları yapılarak bu malzemelerin puzolan etkisi gösterme miktarı mekanik deneylerden elde edilen sonuçlara göre belirlenecektir. Mekanik yöntem kireç-puzolan karışımlarının, basınç dayanımlarının ölçülmesi esasına dayanır. Kireç-puzolan karışımlarının dayanım artışı, puzolan tarafından bağlanan kireç miktarı arttıkça artmaktadır. Aynı durum portland çimentosu-puzolan karışımlarının dayanımı ile kireç bağlanma miktarı arasındaki ilişki için de geçerlidir. Bu amaçla yapılan deneylerde puzolan, kireç ya da portland çimentosu ile belirli oranlarda karıştırılır. Elde edilen bu bağlayıcı ile hazırlanan harç örneklerinin, belirli sürelerdeki basınç dayanımları tespit edilir. Ancak, mekanik yöntemde de puzolan-kireç veya puzolan-portland çimentosu karışımlarının, dayanım kazanma hızlarının zamanla çok yavaş ilerlemesi nedeniyle bazı olumsuzluklar bulunmaktadır (Baradan vd 2012).

Puzolanlar için kullanılan puzolanik aktivite indeksi kavramı standartlara uygun olarak çimento yerine belirli oranlarda puzolan ikame edilmesi ile üretilen harç numunesinin basınç dayanımının, puzolan katkısız harç numunesinin basınç dayanımına oranıdır. Puzolanik aktivite indeksi ile puzolanların tür ve oran kıyaslanması yapılabilmektedir. TS EN 450-1 (Anonim 2013) standardına göre uçucu külün puzolan olarak kullanılabilmesi için 28 günlük puzolanik aktivite indeksinin minimum %75, 90 günlük puzolanik aktivite indeksinin ise minimum %85 oranında olması gerekirken TS EN 15167-1 (Anonim 2006) standardına göre ise yüksek fırın cürufunun puzolan olarak kullanılabilmesi için 7 günlük puzolanik aktivite indeksinin minimum %45, 28 günlük puzolanik aktivite indeksinin ise minimum %70 olması gerekir.

Obsidiyen tozunun ve çinko cürufunun puzolanik aktivitesi için TS EN 196-1 (Anonim 2016) “Çimento deney metotları - Bölüm 1: Dayanım tayini” standardına uygun olarak CEN standart kumu kullanılmıştır ve deney TS EN 196-5 (Anonim 2012) “Çimento deney yöntemleri - Bölüm 5: Puzolanik çimentolarda puzolanik özellik deneyi” standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir.

Birim hacim ağırlık deneyi

Üretilen betonların birim ağırlık deneyi TS EN 12350-6 (Anonim 2019)’a göre yapılmıştır. Taze beton 15×15×15 cm’lik küp kalıplara yerleştirilmeden önce kalıp ağırlığı tartılır (M_2) ve taze beton kalıp içerisine sıkıştırılarak doldurulmuş olan kalıp tartılarak (M_1) aralarındaki farkın alınıp kalıp hacmine (V) bölünmesi ile elde edilen taze betonun birim ağırlıkları (D , kg/m³) aşağıdaki bağıntı yardımıyla hesaplanmıştır.

$$D = (M_1 - M_2) / V \quad (4)$$

Ultrases darbe hızı deneyi

Tahribatsız basınç dayanımı belirleme yöntemi olan ultrases darbe hızı deneyi için Proceq marka cihaz (Şekil 20) kullanılmıştır. Cihaz içeriğinde iki adet transdüserden oluşur. Numuneye gönderilen dalga boyunu bu transdüserlerden biri alıcı iken diğeri verici görevini görür. Cihaz tarafından numuneye gönderilen ultrasonik dalgaların iki transdüser arasındaki geçiş süresi μs cinsinden hassas ölçüm olarak belirlenir. Deneyin uygulandığı numunenin iki yüzeyindeki pürüzlülüğü ortadan kaldırmak için iki prob yüzeyine ultrasonik jel sürülür. Cihaz tarafından numuneye gönderilen ultrasonik dalgaların iki prob arasındaki geçiş süresi; numunedeki boşluk oranına, mikroçatlaklara, çeşitli kusur miktarına bağlı olarak değişebilmektedir. Ultrases darbe hızı deneyi ile numunelerin içerisindeki boşluk oranı, beton kalitesi ve dayanımı ile ilgili bilgiler elde edilebilmektedir. Ultrases darbe hızı deneyi her bir beton grubu için 3 adet $15 \times 15 \times 15$ cm boyutlu küp numunelerde TS EN 12504-4 (Anonim 2012) standardına uygun olarak yapılmıştır (Şekil 21).

Ultrases darbe hızı;

$$V = \frac{L}{T} \quad (5)$$

V : Ultrases Darbe Hızı (km/s),

L : Dalga Geçiş Uzunluğu (mm),

T : Ultrasonik Dalganın Geçiş Süresi (μs),



Şekil 20. Ultrases deneyi cihazı



Şekil 21. Ultrases darbe hızının belirlenmesi

Beton test çekici (Schmidt) deneyi

Tahribatsız basınç dayanımı belirleme yöntemi olan Schmidt çekiç deneyi için Proceq marka cihaz (Şekil 22) kullanılmıştır. Test çekici yüzeye uygulandığında yüzeyin sertliğine göre farklı geri sıçrama değerleri elde edilir. Geri sıçrama değerleri ile numunenin basınç dayanımı arasında ilişki kurabilmektedir Beton test çekici deneyi 15×15×15 cm boyutlu küp numunelerde ve TS EN 12504-2 (Anonim 2013) standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 23).



Şekil 22. Schmidt çekiç deneyi



Şekil 23. Test çekici ile geri tepme (Rebound) sayısının belirlenmesi

Tane Yoğunluğu ve Su Emme Oranı Tayini Deneyi

İnce agrega yerine kullanılan seramik atık agregalarının tane yoğunluğu ve su emme oranı, çimento yerine ikame olarak katılan obsidiyen tozunun tane yoğunluğu belirlenmiştir.

Seramik atık agregasının tane yoğunluğu ve su emme değeri

Çalışmada kullanılan seramik atık beton karışımında ince agrega yerine kullanıldığından 0-2 ve 2-4 mm boyutundaki malzemenin tane yoğunluğu ve su emme oranı TS EN 1097-6 (Anonim 2013) standardına uygun olarak hesaplanmıştır ve deneye ait sonuçlar araştırma bulguları bölümünde verilmiştir.

Seramik atık agregalarından numune alınarak piknometreye yerleştirilir. Piknometredeki seramik atık agregası üzerine deney numunesinin tamamen su içinde kalacağı şekilde su ilave edilir. Piknometre içinde hapsolan hava piknometrenin yuvarlanması ve sallanması ile uzaklaştırılır. Piknometre, su banyosu içerisine daldırılarak düşey hale getirilir ve deney numunesi kısmı, $(22 \pm 3)^{\circ} \text{C}$ 'de, $(24 \pm 0,5)$ saat süreyle tutulur. 24 saat sonunda piknometre su banyosundan çıkarılır ve varsa geriye kalan hapsolmuş hava, piknometre hafifçe yuvarlanmak ve sallanmak suretiyle uzaklaştırılır. Yeterince hava uzaklaştırıldıktan sonra piknometre taşacak seviyeye kadar su ile doldurulur ve hava boşluğu oluşmayacak şekilde dış kısmı kurutulduktan sonra tartılır (M_2). Piknometre içerisindeki su dikkatlice süzülür ve numune herhangi bir temiz tepsiye boşaltılır. Boş olan piknometre tekrar su ile doldurulur kapak hava boşluğu oluşturmamak şekilde yerleştirilir. Piknometre dış kısmı kurutulduktan sonra tartılır (M_3). Islak olan deney numunesi kısmı tepsiye yayılır ve bir ısıtıcı yardımıyla Şekil 24'deki gibi yüzey rutubeti uzaklaştırılır. Agrega taneleri, yüzeyinde nem görülmeinceye ve tanelerin artık birbirine yapışmayıncaya kadar ısıtıcıdaki tepside karıştırılır. Kurutma işleminin

temel amacı beton karışımında esas olan doymun kuru yüzeye sahip agreganın özelliklerini doğru bir şekilde tespit edebilmektir. Agreganın yeterli yüzey kuruluğuna ulaştığı veya Doygun Kuru Yüzey durumuna geldiğini anlamak için taban çapı 90 mm üst çapı 40 mm ve yüksekliği 75 mm olan kesik koni metal kesik koni kalıp kullanılır. Koni kalıp en büyük çapa sahip kısmı tepsinin tabanına gelecek şekilde yerleştirildikten sonra kalıp içerisine kuru numune gevşek olarak doldurulur. Koni kalıbın üst kısmından geçirilen 340 gr ağırlığındaki sıkıştırıcı tokmak ile agregaya yüzeyi 25 kere hafifçe vurularak sıkıştırılır (Şekil 25). Sıkıştırma sona erdikten sonra üst kısımda oluşan boşluğa tekrar agregaya doldurulmaz ve koni kalıp yavaşça kaldırılır. Eğer agregaya konisi çökmezse kalıp kaldırıldığında çökme oluşana kadar kurutmaya devam edilir. Çökme gerçekleştiğinde (Şekil 26) doymun ve yüzeyi kurutulmuş agregaya deney numunesi kısmı tartılır (M_1). Agregaya hava akımlı etüv içerisinde $(110 \pm 5)^0$ C’de sabit kütleye (M_4) kadar kurutulur.

Tane yoğunlukları (ρ_a , ρ_{rd} ve ρ_{ssd}), aşağıdaki eşitlikler yardımıyla hesaplanır:

$$\text{Görünür tane yoğunluğu: } \rho_a : M_4 / M_4 - (M_2 - M_3) \quad (6)$$

$$\text{Etüvde kurutulmuş esasta tane yoğunluğu: } \rho_{rd} : M_4 / M_1 - (M_2 - M_3) \quad (7)$$

$$\text{Doygun ve yüzeyi kurutulmuş esasta tane yoğunluğu: } \rho_{ssd} : M_1 / M_1 - (M_2 - M_3) \quad (8)$$

$$\text{Su emme oranı: } W_A : 100 \times (M_1 - M_4) / M_4 \quad (9)$$

$$\text{Yüzey nemi: } N : ((M_0 - M_1) / M_1) \times 100 \quad (10)$$

Burada;

M_0 : Deney numunesinin başlangıçtaki ağırlığı

M_1 : Doygun ve havada yüzeyi kurutulmuş agreganın kütlesi (g),

M_2 : Doygun agregaya numunesini ihtiva eden piknometrenin kütlesi (g),

M_3 : Sadece su ile doldurulmuş piknometrenin kütlesi (g),

M_4 : Etüvde kurutulmuş deney numunesi kısmının kütlesi (g)’dir.



Şekil 24. Seramik atık agregasının ısıtıcı ile doymun kuru yüzey hale getirilmesi



Şekil 25. Koni kalıbın tokmak ile sıkıştırılması



Şekil 26. Koni kalıp kaldırıldığında oluşan çökme şekli

Obsidiyen tozunun tane yoğunluğunun belirlenmesi

Deney TS EN 1097-7 (Anonim 2009) standardına uygun olarak aşağıdaki gibi gerçekleştirilmiştir ve bu deney için elde edilen sonuçlar araştırma bulguları bölümünde verilmiştir.

Deney başlangıcında kullanılacak olan 250 ml’lik piknometreler tartılır (P_1). Obsidiyen tozu numunesinden 50’şer gr olarak piknometrelere doldurulur. Numune piknometreye yerleştirildikten sonra tartılır (P_2). İçerisinde numune bulunan piknometre tamamen damıtık su (saf su) ile doldurulur ve piknometrede oluşabilecek olan hava kabarcıklarının uzaklaşması için piknometre sarsılır. Piknometre içerisindeki hava kabarcıklarının tamamen uzaklaşması için 24 saat boyunca 25 ° C sıcaklıklı su banyosunda bekletilir. 24 saat sonunda piknometre tamamen su ile dolu olacak şekilde tartılır (P_3). Piknometre içerisindeki deney numunesi ve su boşaltılır. Piknometre tamamen su ile doldurulur ve dışı kurularak tartılır (P_4). Şekil 27’de deneye ait görseller verilmiştir.

$$G_s = \frac{P_2 - P_1}{(P_4 - P_1) - (P_3 - P_2)} \quad (11)$$



Şekil 27. Obsidiyen tozunun tane yoğunluğunun belirlenmesi

Enstrümental Analiz Teknikleri

Görüntüleme analiz teknikleri

SEM analizi, malzemelerin iç yapıları, yüzeylerinin sahip olduğu özellikleri belirlemek için günümüzde en çok tercih edilen yöntemlerden biridir. Bu analiz yönteminde yüksek elektrik voltajı ile analiz yapılacak numune üzerine elektronların çok yüksek bir hızda hareket etmesi ve cihaz yardımıyla bu elektronların numuneler üzerinde taratılması sonucunda oluşan etkilerin uygun geri dönüş algılayıcıları ile toplanarak bir katot ışını tüpünün cihaz ekranına yansıtılması ile elde edilir (Anonim 2018).



Şekil 28. Taramalı elektron mikroskobu (SEM)

Kristalografik analiz teknikleri

Kompozitlerde elemental analiz, faz belirlenmesi, kimyasal kompozisyon ve kristal yapının belirlenmesinde kullanılır. X ışınları 0.02-100 Å arasında dalga boyları olan ışınlardır. Bu ışın demeti kristalin yüzeyine çarptığı zaman yansıma meydana gelir. Yansıyan ışın demeti

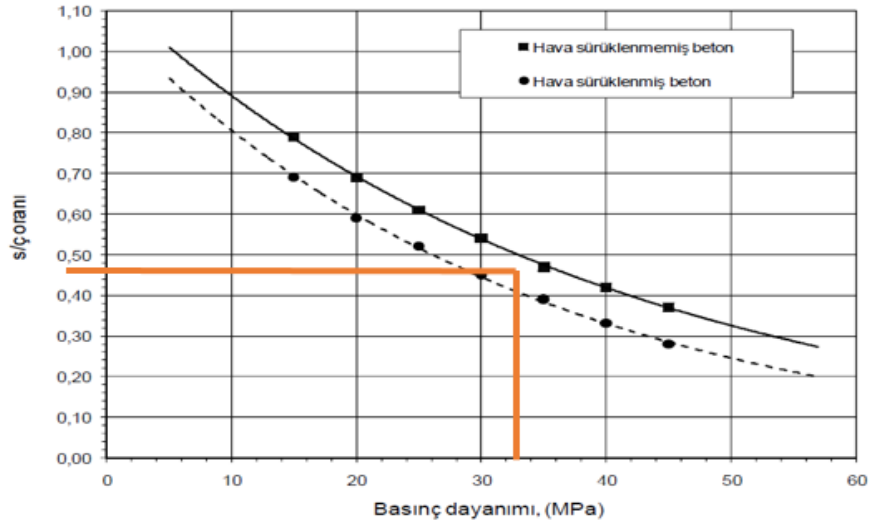
toplanarak çıkan difraktogramlar her bir mineralin farklı geometrisine dayandırılan bu analoji XRD ile yapılan kalitatif analizerin esasını oluşturur (Gaitero *et al.* 2015).



Şekil 29. X ışını kırınım cihazı (XRD)

Beton Karışım Oranları

TS 802 (Anonim 2016)'ye göre yapılan karışım hesabı TS EN 206:2013+A1 (Anonim 2017) standardına uygun olarak tasarlanmıştır. Bu çalışmada üretilecek betonların hedef dayanımı C30/37 olarak belirlenmiş olup en büyük agrega tane boyutu 16 mm olarak seçilmiştir. TS EN 206:2013+A1 (Anonim 2017) standardına göre çevresel etki sınıfı olarak XC2 dikkate alınmış olup S/Ç oranı Şekil 30'dan 0.46 olarak tespit edilmiştir. Tablo 6'da XC2 çevresel etki sınıfı için S/Ç oranı maksimum değeri 0.60 olduğu ve seçilen S/Ç oranının standarta uygun olarak 0.46 alınabileceği belirlenmiştir. Yapılan ön denemeler ile S/Ç oranının 0.46'nın uygun olduğu görülmüştür. Standartlar dikkate alınarak karışım hesabı yapılan beton gruplarının içerdikleri malzeme miktarları Tablo 7'de, TS802 (Anonim 2016) ve TS EN 206:2013+A1 (Anonim 2017) standardına uygun olarak üretilen beton numuneleri ise Şekil 31'de verilmiştir. Üretilen betonların Tablo 7'de verilen slump (Çökme) miktarları incelendiğinde ince agrega yerine ağırlıkça %60 oranında kullanılan seramik atığın, betonun slump değerini artırdığı ayrıca kontrol betonunun çökme değeri ile karşılaştırıldığında obsidiyen tozu slump değerini artırırken çinko cürufunun ise azalttığı belirlenmiştir. Çalışmada kullanılan seramik atık malzemesinin sahip olduğu su emme yüzdesinin agregadan düşük olması slump miktarını artırdığı, çinko cürufunun sahip olduğu yüksek su emme yüzdesinin ise slump miktarını azalttığı öngörülmektedir.



Şekil 30. Beton basınç dayanımı-S/Ç oranı arasındaki ilişki (TS 802, 2016).

Tablo 6. Beton çevresel etki sınıfı (TS EN 206:2013+A1, 2017)

	Karbonatlaşma nedeniyle korozyon etkisi			
	XC1	XC2	XC3	XC4
Maksimum S/Ç oranı	0,65	0,60	0,55	0,5
Minimum dayanım sınıfı	C20/25	C25/30	C30/37	C30/37
Minimum çimento içeriği (kg/m ³)	260	280	280	300
Minimum hava içeriği (%)	-	-	-	-

Araştırma Bulguları bölümünde verilen puzolanik aktivite deneyinde çinko cürufunun ve obsidiyen tozunun optimum puzolanik aktivite indeksi gösterdiği oranlara göre beton grupları oluşturulmuştur.

Tablo 7. Beton karışım oranları

MALZEME (kg/m ³)													
AGREGA													
(mm)													
Gruplar	Ç	OT	ÇC	0-2	2-4	4-8	8-16	SA	Su	A	S/B	Çökme (cm)	
								0-2	2-4				
KB	447,8	-	-	638	233,4	269,7	518,7	-	-	206	4,47	0,46	7
SA60	447,8	-	-	255,2	93,3	269,7	518,7	382,8	140,1	206	4,47	0,46	11
ÇC(5)	425,4	-	22,4	638	233,4	269,7	518,7	-	-	206	4,47	0,46	6
OT(15)	380,7	67,1	-	638	233,4	269,7	518,7	-	-	206	4,47	0,46	9
SA60OT(15)	380,7	67,1	-	255,2	93,3	269,7	518,7	382,8	140,1	206	4,47	0,46	13
SA60ÇC(5)	425,4	-	22,4	255,2	93,3	269,7	518,7	382,8	140,1	206	4,47	0,46	8
SA60OT(15)ÇC(5)	358,3	67,1	22,4	255,2	93,3	269,7	518,7	382,8	140,1	206	4,47	0,46	10

A : Akışkanlaştırıcı, SA :Seramik atık, Ç : Çimento, OT : Obsidiyen tozu, ÇC : Çinko cürufu, S/B : Su/Bağlayıcı oranı



Şekil 31. Kür havuzundan çıkarılan beton numuneleri

Harç Numune Grupları

Puzolanik aktivite deneyi ile karışımların belirlenmesi

Bu deneyde 50×50×50 mm boyutlu küp numune kalıpları (Şekil 33) ile oluşturulan kontrol harç numunesine ilaveten çimento yerine %5, 10, 15, 20 ve 25 oranında obsidiyen tozu (OT), %2.5, 5, 7.5 ve 10 çinko cürufu (ÇÇ) ikame edilerek 7 günlük ve 28 günlük numunelerin puzolanik aktivite indekslerinin belirlenmesi için toplamda 20 grup (7 günlük kür sonundaki puzolanik aktivite indeksi için 10 grup, 28 günlük kür sonundaki puzolanik aktivite indeksi için 10 grup) oluşturulmuştur. Deneyde kullanılan mikser Şekil 34’de ve harçlarda kullanılan CEN standart kumu Şekil 32’de gösterilmiştir. Puzolanik aktivite için oluşturulan harç grupları Tablo 8’de verilmiştir. Harçların kalıplara yerleştirilmesi Şekil 35’de deney için oluşturulan küp numuneler ise Şekil 36’da gösterilmiştir. Kürden çıkarılan harç numuneleri Şekil 37’deki gibi basınç presinde kırılarak dayanımı ölçülmüştür.



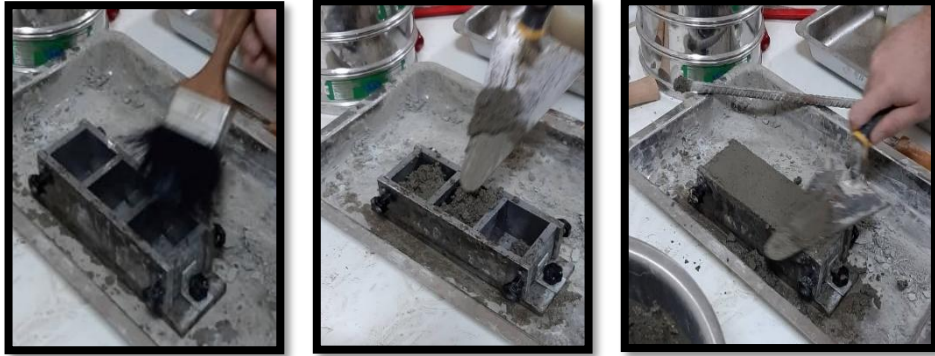
Şekil 32. CEN standart kumu



Şekil 33. 50×50×50 mm boyutlu küp numune kalıpları



Şekil 34. Numunelerin üretiminde kullanılan mikser



Şekil 35. Harçların kalıplara yerleştirilmesi



Şekil 36. Deney için oluşturan küp numuneler



Şekil 37. Kürden çıkarılan harç numunelerinin basınç presinde kırılması

Tablo 8. Puzolanik aktivite numune grupları

Ağırlıkça Malzeme Oranları				
Harç Grupları	Çimento	Kum	İkame Oran	Su
Kontrol	1	3	-	0,5
OT5	0,95	3	0,05	0,5
OT10	0,90	3	0,10	0,5
OT15	0,85	3	0,15	0,5
OT20	0,80	3	0,20	0,5
OT25	0,75	3	0,25	0,5
ÇC2,5	0,975	3	0,0025	0,5
ÇC5	0,95	3	0,05	0,5
ÇC7,5	0,925	3	0,075	0,5
ÇC10	0,90	3	0,10	0,5

Beton Numune Grupları

Karışımlar; katkısız (mineral katkı maddesi içermeyen, salt normal portland çimentolu), obsidiyen tozlu (OT) ve çinko cürufllu (ÇC) ve seramik atıklı (SA) betonlardır. Beton grupları ve kısaltmaları Tablo 9’da verilmiştir. Kısaltmalar yapılırken OT obsidiyen tozunu, SA seramik atığı, ÇC çinko cürufunu ve yanındaki sayısal değer yüzde olarak kullanım oranını göstermektedir. Herhangi bir katkı içermeyen normal agregalı beton KB ile gösterilmiş olup kontrol betonu olarak kullanılacaktır.

Örneğin; SA60OT(OPT); İnce agregasının %60’ı yerine seramik atık kullanılan, çimentosunun yerine ise puzolanik aktivite deneyinde belirlenen oranlarda en iyi puzolanik reaksiyon gösteren obsidiyen tozlu harçlardaki obsidiyen tozu miktarı çimento yerine ikame olarak kullanılması ile üretilen beton grubunu göstermektedir. Toplamda 7 grup beton ve 10 grup puzolanik aktivite deneyleri için harç örnekleri hazırlanmış olup normal betonda 0-2, 2-4, 4-8, 8-16 mm boyutlarında normal agregalı kullanılmıştır.

Tablo 9. Beton numune grupları

KARIŞIM NO	KARIŞIM KOD
1	KB
2	SA60
3	ÇC(OPT)
4	OT(OPT)
5	SA60OT(OPT)
6	SA60ÇC(OPT)
7	SA60OT(OPT)ÇC(OPT)

ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Bu bölümde deneysel numuneler üzerinde gerçekleştirilen Yöntem başlığı altında bilgisi verilen deneylerin sonuçları verilmiştir.

Tane Yoğunluğu ve Su Emme Oranı Sonuçları

Bu bölümde yöntem başlığında belirtilen standartlara uygun olarak atık seramiğin beton karışımında kullanılan 0-2 ve 2-4 mm boyutlarında sahip olduğu tane yoğunluğu ve su emme oranı ile obsidiyen tozunun tane yoğunluğu belirlenmiştir.

Seramik atık agregasının tane yoğunluğu ve su emme oranı sonuçları

Seramik atığın tane yoğunluğu, su emme değeri ve yüzey nemi Tablo 10’da verilmiştir.

Tablo 10. Seramik atık agregasının tane yoğunluğu, su emme ve yüzey nemi değeri

Tane Yoğunluğu (gr/cm ³)	0-2 mm	2-4 mm
ρ_a	2,18	2,29
ρ_{rd}	2,16	2,24
ρ_{ssd}	2,19	2,26
Su Emme Oranı (W_A)	%+0,4	%+1
Yüzey Nemi (N)	%+2,65	%+1,5

Obsidiyen tozunun tane yoğunluğu

Obsidiyen tozunun standartlara uygun olarak yapılan deneyler sonucunda elde edilen tane yoğunluğu değeri Tablo 11’de verilmiştir.

Tablo 11. Obsidiyen tozunun tane yoğunluğu

Tane Yoğunluğu (gr/cm ³)	2,46
--------------------------------------	------

Birim Hacim Ağırlık Deneyi Sonuçları

Tablo 12’de üretilen beton gruplarına ait birim hacim ağırlık sonuçları verilmektedir. Tablodaki sonuçlar incelendiğinde sadece çinko cürufu kullanılarak üretilen betonun, normal kontrol betonuna göre birim ağırlığının yüksek olduğu belirlenmiştir. SA60 grubunun normal beton grubuna göre daha hafif olduğu ve SA60OT grubunun ise birim hacim ağırlığının en az olup en hafif beton grubunu oluşturduğu belirlenmiştir. Seramik atığın agrega yerine kullanılması ile beton birim hacim ağırlığı düşürmesi literatür ile desteklenmektedir (Rashid *et*

al. 2017). Üretim sırasında çinko cürufunun normal çinko tozuna göre çok daha hafif olması nedeniyle herhangi bir olumsuz durum yaşanmamıştır.

Tablo 12. Taze beton birim hacim ağırlık sonuçları

Birim Hacim Ağırlık (kg/m ³)		KB'ye Göre % Değişim
K	2319	-
SA60	2221	-4,2
ÇC5	2335	+0,7
OT(15)	2282	-1,6
SA60OT(15)	2183	-5,9
SA60ÇC(5)	2224	-4,1
SA60OT(15)ÇC(5)	2199	-5,2

Puzolanik Aktivite Deneyi Sonuçları

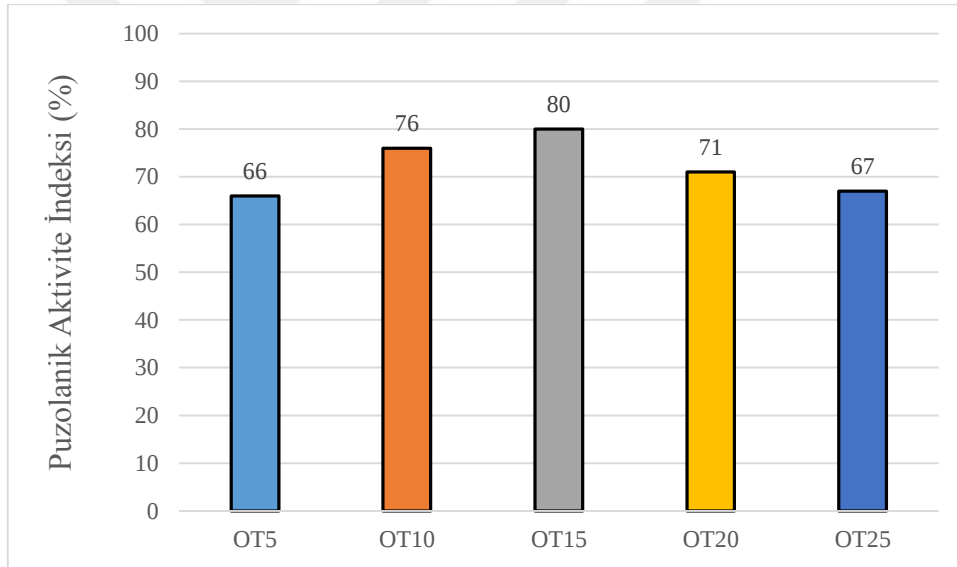
50×50×50 mm boyutlu numuneler üretilmiş olup TS EN 196-5 (Anonim 2012) standardına uygun olarak her bir gruptan 3 adet numune üzerinde deney gerçekleştirilmiştir. 7 günlük ve 28 günlük olmak üzere iki farklı kür süresinde üretilen numunelerin basınç dayanımları ölçülmüştür ve Tablo 13'de 7 ve 28 gün su küründe kalan harç numunelerin ortalama basınç dayanımları ve puzolanik aktivite indeksleri verilmiştir.

$$\text{Puzolanik Aktivite İndeksi (PAI)} = \frac{\text{Puzolanlı Harç Numunelerin Ortalama Basınç Dayanımı}}{\text{Kontrol Harç Numunelerin Ortalama Basınç Dayanımı}} \quad (12)$$

Tablo 13. Harç numunelerinin puzolanik aktivite indeksleri

Harç Grupları	Ortalama Basınç Dayanımı (MPa)		Puzolanik Aktivite İndeksi (PAI) (%)	
	7 gün	28 gün	7 gün	28 gün
K	52,82	68,96	-	-
OT5	34,50	48,13	66	70
OT10	39,76	54,89	76	80
OT15	42,33	57,31	80	83
OT20	37,25	47,46	71	69
OT25	35,41	46,42	67	68
ÇC2,5	34,99	48,01	67	70
ÇC5	38,32	48,59	73	71
ÇC7,5	31,56	47,06	60	69
ÇC10	27,92	38,93	53	57

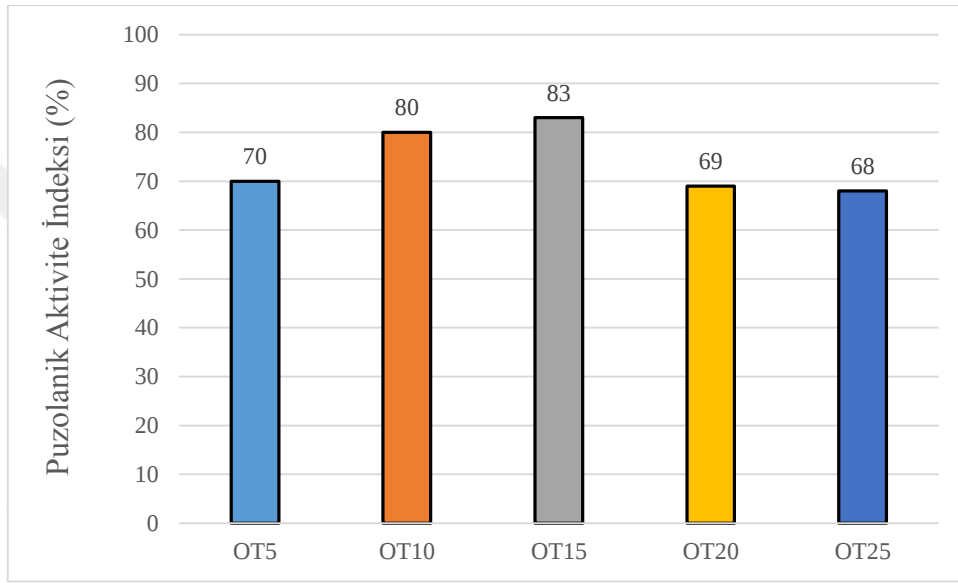
Şekil 38’de obsidiyen tozunun çimento yerine %5, 10, 15, 20 ve 25 oranlarında ikame edilmesi ile oluşturulan harçların basınç dayanım esasına göre belirlenen 7 günlük puzolanik aktivite indekslerini gösteren grafik verilmektedir. Bu şekilde de görüldüğü üzere 7 günlük harç numunelerin puzolanik aktivitesi en yüksek oran, %80 ile OT15’de elde edilmiştir. 7 günlük numunelerde obsidiyen tozunun çimento yerine ikame oranı %15 oranına kadar puzolanik aktivite indeksi ile doğru orantılı olarak artarken, maksimum değere ulaştığı %15 oranında ikame olarak kullanılan OT15 harç grubundan itibaren obsidiyen tozunun artışına bağlı olarak puzolanik aktivite indeksinin azaldığı belirlenmiştir. TS EN 15167-1 (Anonim 2006) standardına göre yüksek fırın cürufunun puzolan olarak karışımlarda kullanılabilmesi için 7 günlük puzolanik aktivite indeksinin minimum %45 oranında olması gerekmektedir. Obsidiyen tozu kullanılarak oluşturulan numunelerin en düşük puzolanik aktivite indeksi %66 ile OT5’de olup yüksek fırın cürufu puzolanının standartı ile karşılaştırıldığında obsidiyenin puzolan olarak kullanılabileceği belirlenmiştir. Şekil 38’de görüldüğü üzere obsidiyen tozunun çimento içerisinde oranının artışına bağlı olarak puzolanik aktivite indeksi verilmiştir.



Şekil 38. Obsidiyen tozlu numunelerin 7 günlük puzolanik aktivite indeksi

Şekil 39’da obsidiyen tozunun çimento yerine %5, 10, 15, 20 ve 25 oranlarında ikame edilerek oluşturulan harç numunelerinin 28 gün kür sonundaki dayanımlarına göre belirlenen puzolanik aktivite indeksleri görülmektedir. Şekilde görüldüğü üzere 28 günlük obsidiyen tozlu harçlarda en yüksek puzolanik aktivite indeksi OT15 harç grubunda elde edilirken %15 oranında ikame oranına kadar obsidiyen miktarının artışına bağlı olarak puzolanik aktivite indeksinde artış gözlemlenirken %15 ikame oranından itibaren obsidiyen miktarının artışı ile puzolanik aktivite indeksinde düşüş olduğu belirlenmiştir. 28 günlük kür sonunda OT15 ile OT20 harç numuneleri arasındaki puzolanik aktivite indeksi farkı %14 iken OT20 ile OT25 arasındaki puzolanik aktivite indeksi farkı çok düşük olup %1 kadardır. Bu durum obsidiyen

tozunun çimentodaki miktarının artışına bağlı olarak belirli bir orandan sonra puzolanik aktivite indeksindeki düşüşün azaldığını göstermektedir. TS EN 450-1 (Anonim 2013)'e göre uçucu külün çimentoda puzolan olarak kullanılabilmesi için 28 günlük puzolanik aktivite indeksinin minimum %75 ve TS EN 15167-1 (Anonim 2006)'e göre ise yüksek fırın cürufunun çimentoda puzolan olarak kullanılabilmesi için 28 günlük puzolanik aktivite indeksinin ise minimum %70 olması gerekmektedir. Obsidiyen tozu kullanılarak üretilen numunelerin 28 gün kür sonrasında puzolanik aktivite indeksleri incelendiğinde OT15 harç grubunda %83 puzolanik aktivite değeri elde edilmiş ve Erzurum ili Pasinler İlçesi'ne ait obsidiyenin çimento yerine ikame şeklinde katılarak puzolan olarak kullanılabilir olduğu görülmüştür.

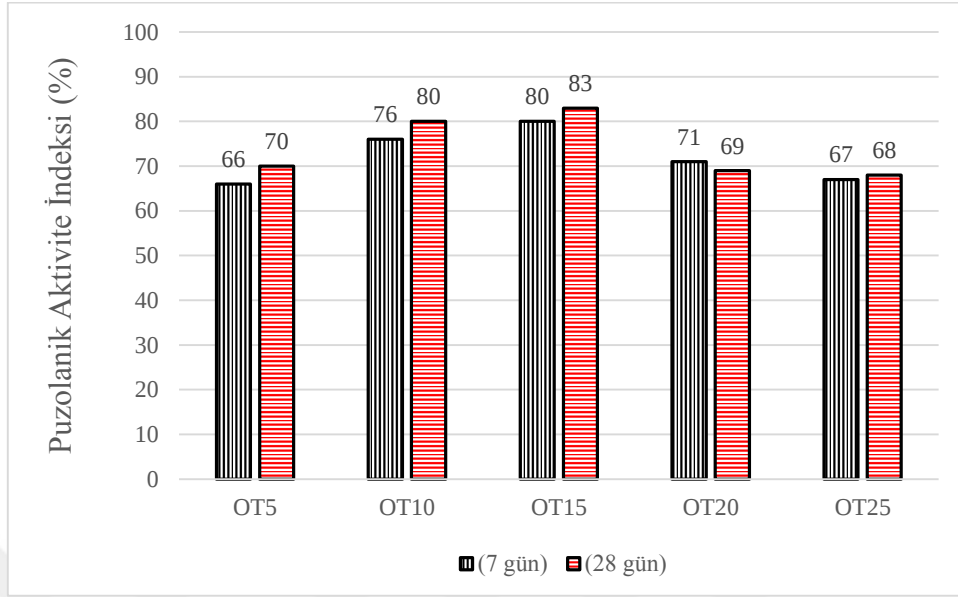


Şekil 39. Obsidiyen tozlu numunelerin 28 günlük puzolanik aktivite indeksi

Şekil 40'da obsidiyenin çimento yerine %5, 10, 15, 20 ve 25 oranlarında kullanılması ile üretilen harç numunelerinin 7 ve 28 günlük puzolanik aktivite indeksleri verilmektedir. Obsidiyen tozunun çimento yerine %15 oranında kullanılması (OT15) ile elde edilen numunelerde puzolanik aktivite indeks değerlerinde hem 7 günlük kür hem de 28 günlük kür sonunda en iyi sonuçlar elde edilmiştir. OT15 harç grubunda 28 günlük indeks değeri 7 günlüğe göre %3 oranında artarken OT20'de %2 azalma ve OT25'de %1 artış olduğu belirlenmiştir. Özellikle obsidiyen oranının artışına bağlı olarak 7 ve 28 günlük harç numunelerinde puzolanik aktivite indeksleri farkının azaldığı görülmektedir. OT20 grubunda 7 günlük puzolanik aktivite indeksinin %71, 28 günlük puzolanik aktivite indeksinin ise %69 olduğu belirlenmiştir. 28 günlük ile 7 günlük arasındaki dayanım azalması ilginç bir sonuç olmakla beraber değerler birbirine yakın olsa dahi laboratuvar çalışmasından kaynaklanabilecek bir hata olduğu düşünülmektedir.

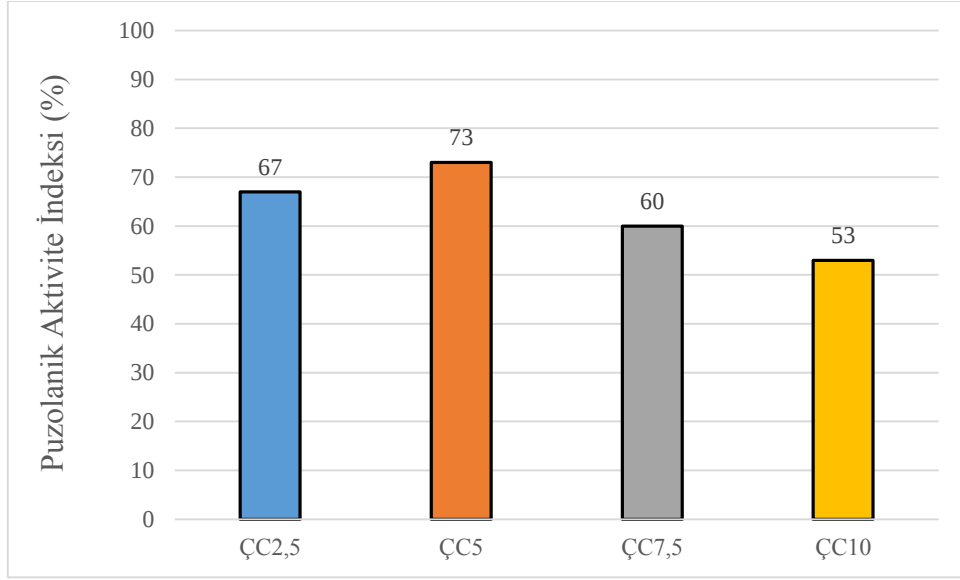
Tüm gruplarda 7 ve 28 günlük dayanımlar arası farkın az olmasının sebebi ise kullanılan çimento türünün hızlı priz alan CEM I 42.5 R tipi çimentodan kaynaklı olduğu

düşünülmektedir. Bu çimento tipinin erken dayanım kazanması sonucunda puzolanik malzemelerin 7 günlük harç dayanımlarına etkisinin daha fazla olabileceği öngörülmektedir.



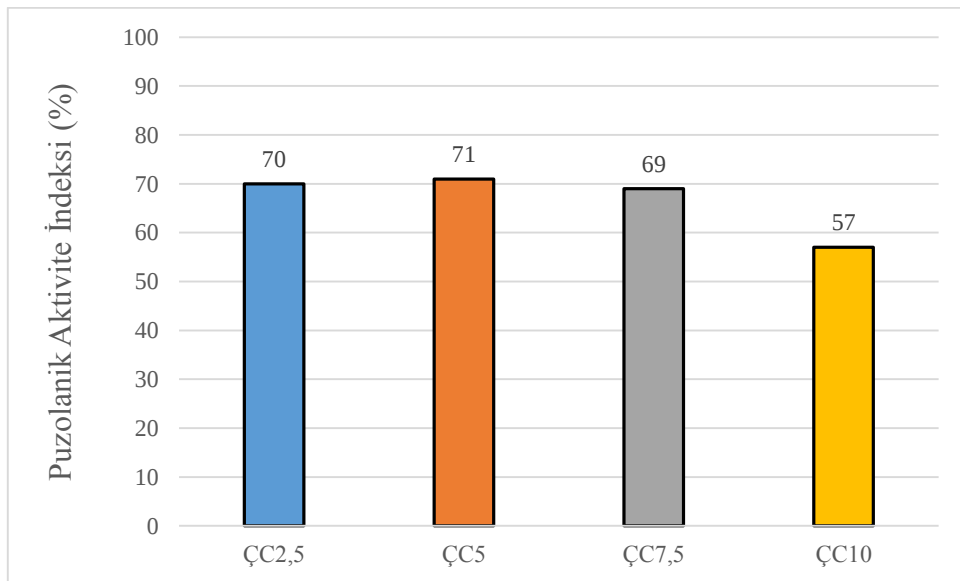
Şekil 40. Obsidiyen tozlu numunelerin 7 ve 28 günlük puzolanik aktivite indeksi

Şekil 41’de Çinko cürufunun çimento yerine %2.5, 5, 7.5 ve 10 oranlarında ikame edilmesi ile üretilen harç numunelerin 7 günlük standart su kürü sonundaki basınç dayanımı esasına uygun olarak puzolanik aktivite indeks sonuçları verilmektedir. Şekil 41 incelendiğinde üretilen harç numunelerinde en yüksek puzolanik aktivite indeksi ÇC5 grubunda %73 olarak elde edilirken bu orandan itibaren çinko cürufu oranının artışına bağlı olarak puzolanik aktivite indeksinin azaldığı belirlenmiştir. TS EN 15167-1 (Anonim 2006)’e göre 7 günlük yüksek fırın cürufunun puzolan olarak kullanılabilmesi için puzolanik aktivite indeksinin minimum %45 olması gerekirken 7 günlük çinko cürufu harç numunelerinin puzolanik aktivite indeks sonuçları incelendiğinde çinko cürufunun puzolan olarak kullanılabileceği belirlenmiştir. Çinko cürufu oranının artışı ile 7 günlük harç numunelerindeki puzolanik aktivite indeksleri ÇC5’in, ÇC7,5’e göre %13 ve yine ÇC5’in ÇC2,5’e göre %6, ÇC7,5’un ise ÇC10’a göre %7 daha fazla olduğu görülmüştür.



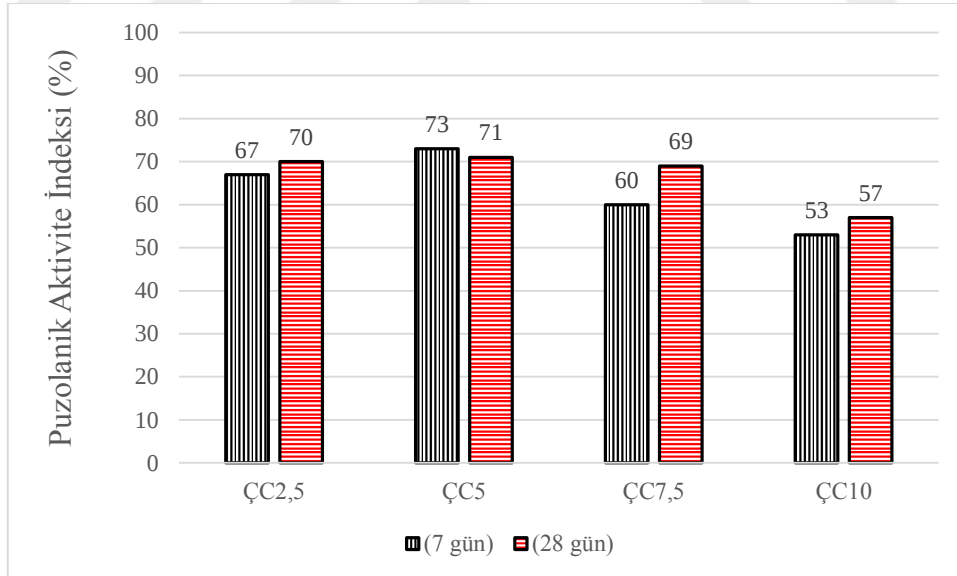
Şekil 41. Çinko cüruflu numunelerin 7 günlük puzolanik aktivite indeksi

Şekil 42’de çimento yerine %2.5, 5, 7.5 ve 10 oranında çinko cüruflu ikamesi ile oluşturulan harç numunelerinin 28 gün kür sonunda basınç dayanımları esas alınarak elde edilen puzolanik aktivite indeksleri verilmiştir. 28 gün su kürüne bırakılan çinko cüruflu harç numunelerinde en yüksek puzolanik aktivite indeksi değeri %71 ile ÇC5 harç grubunda görülürken optimum indeks değeri elde edildiği çinko cüruflu ikame oranındaki artış ile oluşturulan harçlardaki puzolanik aktivite indekslerinde azalma olduğu görülmektedir. Yüksek fırın cürufunun puzolan olarak kullanılabilmesi için 28 günlük puzolanik aktivite indeksinin en az %70 olması gerektiğinden çinko cürufunun %5 oranında kullanılarak oluşturulan harç grubunun indeks değerinin %71 olarak bulunması bu malzemenin puzolan olarak kullanılabileceğini göstermektedir.



Şekil 42. Çinko cüruflu numunelerin 28 günlük puzolanik aktivite indeksi

Şekil 43’de çinko cürufunun %2.5, 5, 7.5 ve 10 oranlarında çimento yerine kullanılması ile oluşturulan harç numunelerinin 7 ve 28 gün su kürü etkisinde bırakıldıktan sonra basınç dayanımları esasına göre belirlenen puzolanik aktivite indeks değerleri verilmiştir. Puzolanik aktivite indeksleri hem 7 gün su kürü etkisinde kalan numunelerde hem de 28 gün su kürü etkisinde kalan numunelerde en yüksek indeks değerleri ÇC5 harç grubunda elde edilmiştir. ÇC5 harç grubunda 28 gün sonundaki puzolanik aktivite indeksinde 7 günlük numunelerin indeks değerlerine göre %2 azalırken cüruf oranının artışı ile ÇC7,5 harç grubunda 28 gün sonundaki indeks değeri 7 günlük numunelerin indeks değerine göre %9 oranında arttığı, ÇC10 harç grubunda ise 28 gün sonundaki puzolanik aktivite indeksinde 7 günlük numunelerin indeks değerlerine göre %4 oranında artış olduğu ve bu durumun çinko cürufunun oranının artışına bağlı olarak nihai dayanımda etkisinin daha fazla olabileceği göstermektedir. ÇC5 grubunda 7 günlük puzolanik aktivite indeksinin %73, 28 günlük puzolanik aktivite indeksinin ise %71 olduğu olduğu belirlenmiştir. 28 günlük ile 7 günlük arasındaki dayanım azalması ilginç bir sonuç olmakla beraber değerler birbirine yakın olsa dahi laboratuvar çalışmasından kaynaklanabilecek bir hata olduğu düşünülmektedir. Ayrıca bazı oranlarda 7 ve 28 günlük dayanımlar arası farkın az olmasının sebebi yukarıda anlatıldığı üzere deneyde kullanılan CEM I 42.5 R tipi çimento tipinin erken priz alması nedeniyle puzolanik malzemelerin 7 günlük harç dayanımlarına etkisinin daha fazla olabileceği düşünülmektedir.



Şekil 43. Çinko cürufllu numunelerin 7 ve 28 günlük puzolanik aktivite indeksi

Puzolanik aktivite indeksi sonuçları incelendiğinde; obsidiyenin sahip olduğu silis miktarının çinko cürufunun silis miktarından daha yüksek olmasının 7 ve 28 gün standart kür sonundaki puzolanik aktivitelerindeki ana farkın sebebi olduğu öngörülmektedir. Şekiller incelendiğinde obsidiyenin ve çinko cürufunun çimento yerine ikame olarak kullanılması sonucunda puzolanik özellik gösterebileceği belirlenmiştir.

Beton Basınç Deneyi Sonuçları

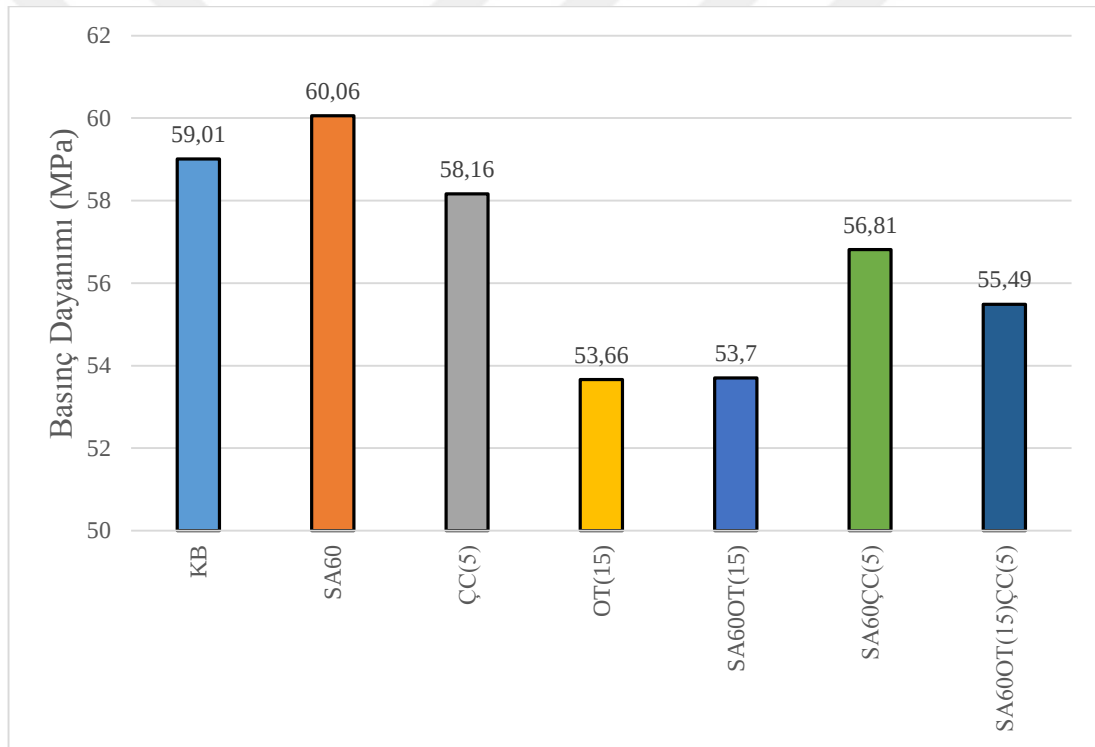
Beton basınç deneyi için her bir beton grubundan 3 adet 15×15×15 cm boyutlu küp numuneler üretilmiştir. Üretilen numunelere 28 gün standart su kürü uygulanmıştır. 28 gün sonunda numunelere basınç deneyi uygulanmış ve elde edilen sonuçlar Tablo 14’de ve Şekil 44’de verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde ince agrega yerine %60 oranında kullanılan seramik atıklı beton grubunun (SA60) 28 günlük kür sonundaki basınç dayanımı kontrol ve diğer beton gruplarından daha yüksek olduğu görülmüştür. Bu sonuç seramik atığın beton basınç dayanımını artırdığı literatürdeki çalışmalar ile desteklenmektedir (Binici 2007; Keshavarz and Mostofinejad 2019; Siddique *et al.* 2019; Torkittikul and Chaipanich 2010). SA60OT15 ve SA60OT15ÇC5 gruplarında kullanılan seramik atık malzemesinin OT15 ve ÇC5 grupları ile karşılaştırıldığında basınç dayanımına olumlu etki ettiği gözlemlenmiştir. Seramik malzemesinin sahip olduğu yüksek sertlik özelliğinin optimum oranla birleştirildiğinde beton basınç dayanımına olumlu etki ettiği öngörülmektedir. Çimento yerine ikame olarak kullanılan obsidiyen tozu ve çinko cürufu içeren beton grupları incelendiğinde; OT15 beton grubunun 28 günlük kür sonundaki basınç dayanımı kontrol betonunun basınç dayanımından %9 oranında daha az iken, ÇC5 beton grubunun 28 günlük kür sonundaki basınç dayanımı kontrol betonunun basınç dayanımından %1,4 oranında az olduğu belirlenmiştir. Çinko cürufunun agrega olarak kullanılması (Öztürk vd 2018) ve çimentoya ikame olarak katılması (Aslan vd 2019) ile oluşturulan betonların basınç dayanımlarının kısmen düşük fakat kontrol betonuna yaklaşık eşdeğer sonuç göstermesi literatür ile uyum göstermektedir. Seramik atık ile birlikte oluşturulan çinko cürufu ve obsidiyenli beton grupları incelendiğinde üçünün birlikte kullanıldığı SA60OT15ÇC5 beton grubundaki basınç dayanımının sadece seramik atık ve obsidiyenin birlikte kullanıldığı SA60OT15 beton grubundaki basınç dayanımına göre %3 daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Bu nedenle çinko cürufunun seramik atık ve obsidiyenle birlikte kullanılması sonucunda basınç dayanımına olumlu etki ettiğini göstermektedir. Bu durum içeriğinde yaklaşık olarak %30 oranında CaO bulunan çinko cürufunun beton üretiminde su ile reaksiyonu sonucunda meydana getirdiği Ca(OH)_2 , seramik atık ve obsidiyenin birlikte kullanılması ile ortamda bulunan yüksek miktardaki silis ile reaksiyona girerek dayanımda kısmen artış oluşturabileceği öngörülmektedir.

Sonuçlar incelendiğinde aslında tüm grupların basınç dayanımlarının kontrol betonuna yaklaşık eşdeğer olarak elde edildiği görülmekle beraber SA60 grubunun basınç dayanımı çok az da olsa kontrole göre yüksek çıkmıştır. Burada dikkat çeken en önemli husus bu tür betonlardan inşa edilen yapıların maliyetleri çimento miktarının azalması nedeniyle daha az olup ayrıca atık malzemelerin kullanılması sayesinde de çevre kirliliği ve firmalarda ek masrafa

sebebi olan yüksek atık depolama ücretlerinin azalmasını sağlamasıdır. Bu yönüyle atık malzeme kullanımıyla kontrol betonunun dayanımına eş dayanım sağlaması bu betonların tercih edilme sebebi olacaktır.

Tablo 14. 28 günlük betonun basınç dayanımı sonuçları

Beton Grubu	Basınç Dayanımı (MPa)	KB'ye Göre % Değişim
KB	59,01	-
SA60	60,06	+1,8
ÇC(5)	58,16	-1,4
OT(15)	53,66	-9,1
SA60OT(15)	53,70	-9
SA60ÇC(5)	56,81	-3,7
SA60OT(15)ÇC(5)	55,49	-6



Şekil 44. 28 günlük betonun basınç dayanımı sonuçları

Eğilmede Çekme Dayanımı Deney Sonuçları

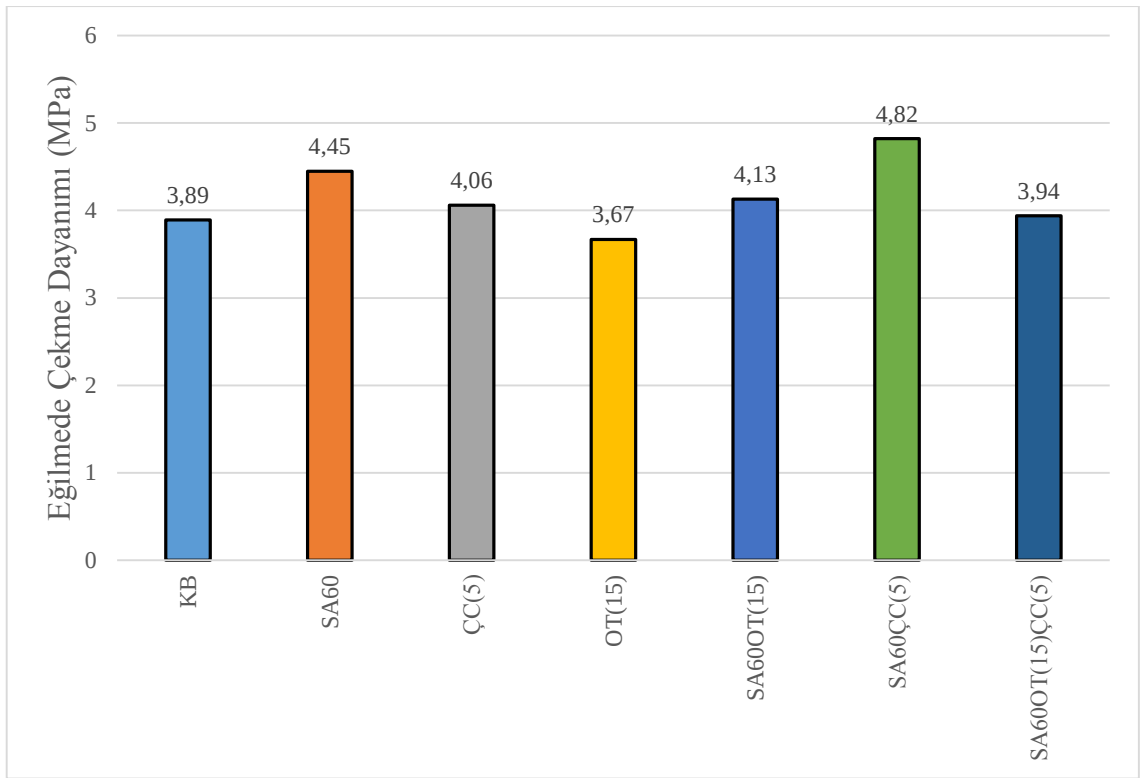
7×7×28 cm boyutlu kiriş numuneler üzerinde eğilmede çekme deneyi gerçekleştirilmiş olup her bir grup için eğilmede çekme deneyi sonuçları Tablo 15 ve Şekil 45’de verilmiştir. Tablo 15 ve Şekil 45 incelendiğinde kontrol betonunun eğilmede çekme dayanımına kıyasla SA60 karışımındaki eğilmede çekme dayanımı %14,4 daha yüksek, OT15 karışımının eğilmede çekme dayanımı %5,7 daha düşük ve %5 oranında çinko cürufu içeren ÇC5 karışımındaki eğilmede çekme dayanımı ise %4,4 daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Seramik atık

malzemesine ilaveten obsidiyen tozu ve çinko cürufu kullanılarak üretilen karışımlarda malzeme türüne bağlı olarak eğilmede çekme dayanımları kontrol betonu ile karşılaştırıldığında artış gösterdiği görülmektedir. SA60 ile SA60OT15 karışımları incelendiğinde SA60OT15 karışımının eğilmede çekme dayanımı SA60 karışımından %7,7 daha düşük çıkarken SA60ÇC5 karışımının eğilmede çekme dayanımının SA60 karışımından %8,3 daha yüksek çıktığı görülmüş olup en iyi eğilmede çekme dayanımı sonucunu veren grup olduğu belirlenmiştir. Seramik atık agregası ile birlikte obsidiyen veya çinko cürufunun çimento yerine ikame olarak kullanılması sonucunda obsidiyenin veya çinko cürufunun beton içindeki boşlukları doldurması sonucunda iç yapıyı güçlendirdiği ve eğilmede çekme dayanımlarında olumlu sonuçlar elde edildiği öngörülmektedir. Seramik atık, obsidiyen tozu ve çinko cürufunun birlikte kullanıldığı karışımda ise eğilmede çekme dayanımları incelendiğinde kontrol karışımına göre %1,3 oranında daha fazla dayanıma sahip olduğu ve genel olarak beton karışımlarında kullanılan seramik atığın ve çinko cürufunun betonların eğilmede çekme dayanımlarına olumlu etkisi olduğu sonucu görülmüştür.

Sonuçlar incelendiğinde bazı grupların eğilmede çekme dayanımlarının kontrol betonuna yaklaşık eşdeğer olarak elde edildiği görülmekle burada dikkat çeken en önemli husus bu tür betonlardan inşa edilen yapıların maliyetlerinin ve çevre kirliliğinin azalmasıdır.

Tablo 15. 28 günlük eğilmede çekme dayanımı sonuçları

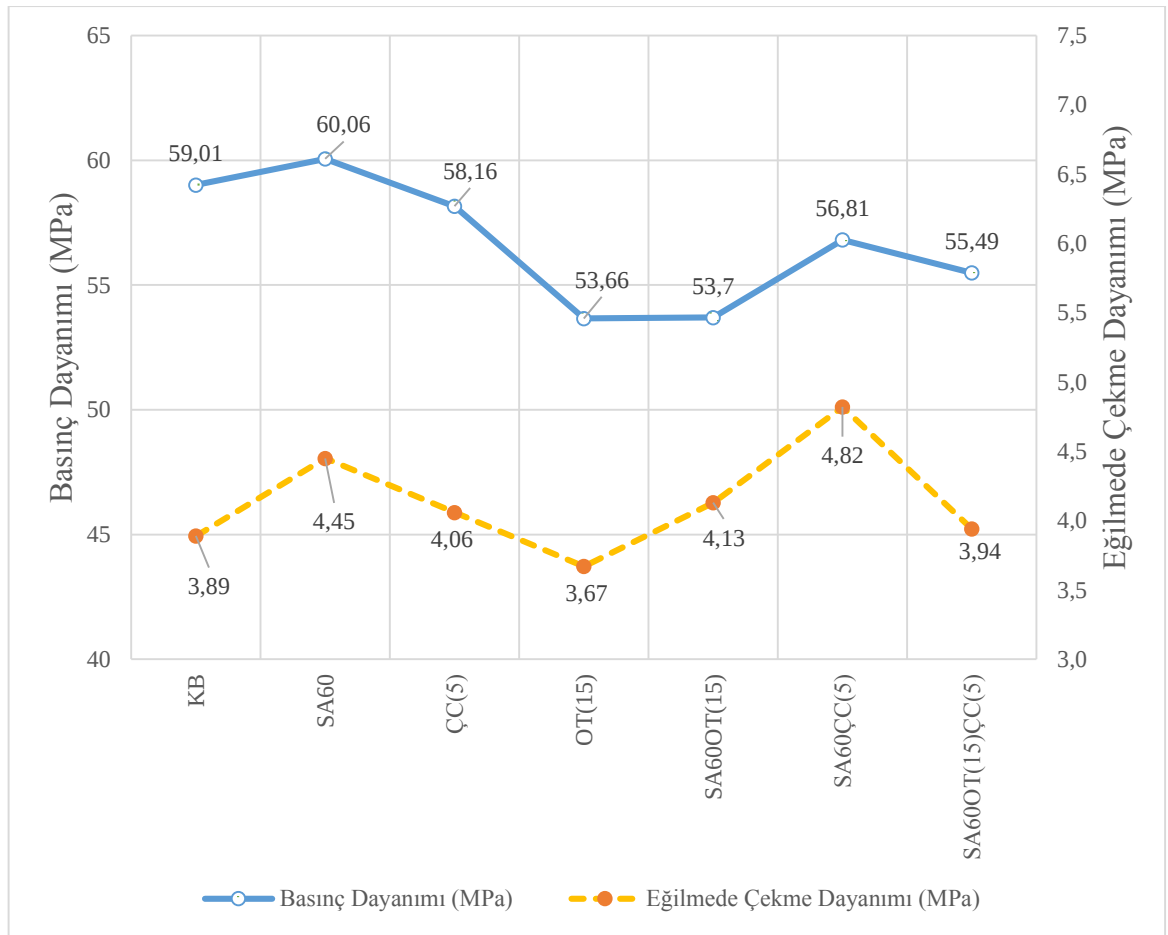
Beton Grubu	Eğilmede Çekme Dayanımı (MPa)	KB'ye Göre % Değişim
KB	3,89	-
SA60	4,45	+14,4
ÇC(5)	4,06	+4,4
OT(15)	3,67	-5,7
SA60OT(15)	4,13	+6,2
SA60ÇC(5)	4,82	+23,9
SA60OT(15)ÇC(5)	3,94	+1,3



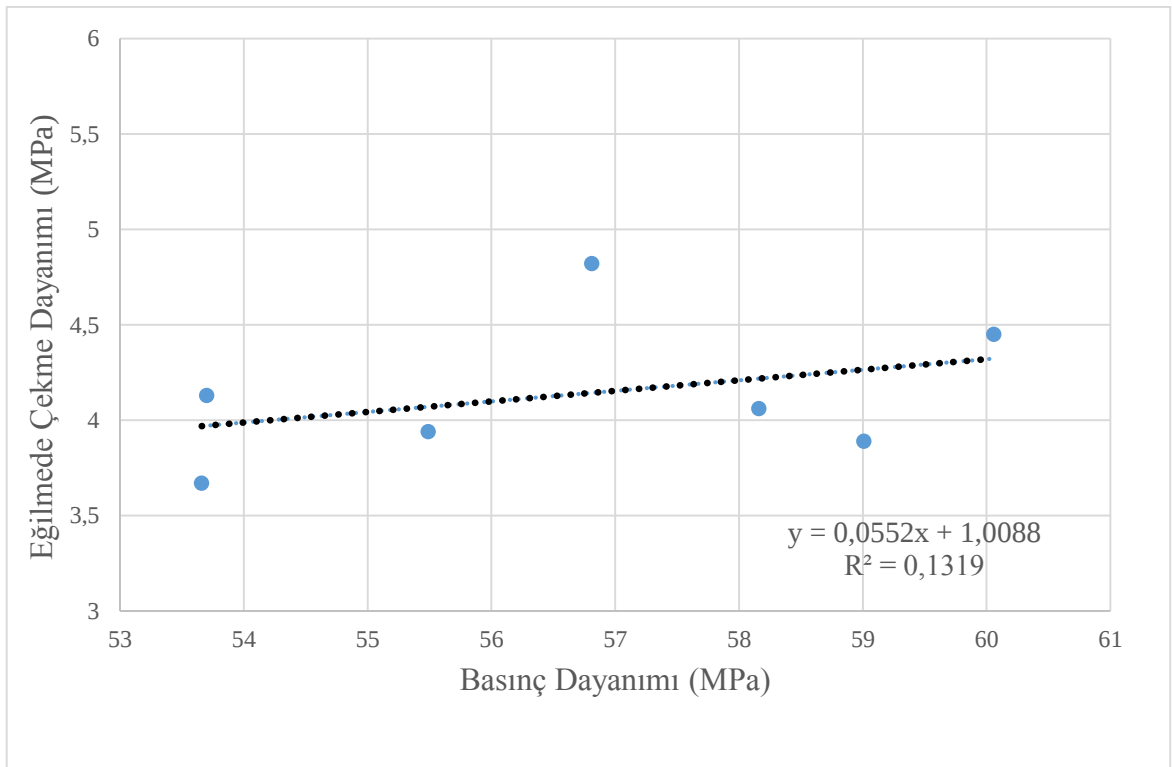
Şekil 45. 28 günlük betonun eğilmede çekme dayanımı sonuçları

Eğilmede çekme dayanımı ile basınç dayanımı sonuçlarının birlikte incelenmesi

Şekil 46’da eğilmede çekme dayanımı ile basınç dayanımı sonuçları aynı grafikte verilmiştir. Şekil 46 incelendiğinde basınç dayanımı ve eğilmede çekme dayanımı sonuçlarının kısmen paralellik gösterdiği görülmektedir. En iyi basınç dayanımının elde edildiği SA60 beton grubunun eğilmede çekme dayanımı, kontrol betonunun çekme dayanımına göre daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Şekil 47’de iki grafik arasındaki korelasyon katsayısı belirlenmiş olup 28 günlük betonların eğilmede çekme dayanımı ile basınç dayanımı arasında kısmen zayıf bir korelasyon olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 46. 28 günlük betonun eğilmede çekme ve basınç dayanımı arasındaki ilişki



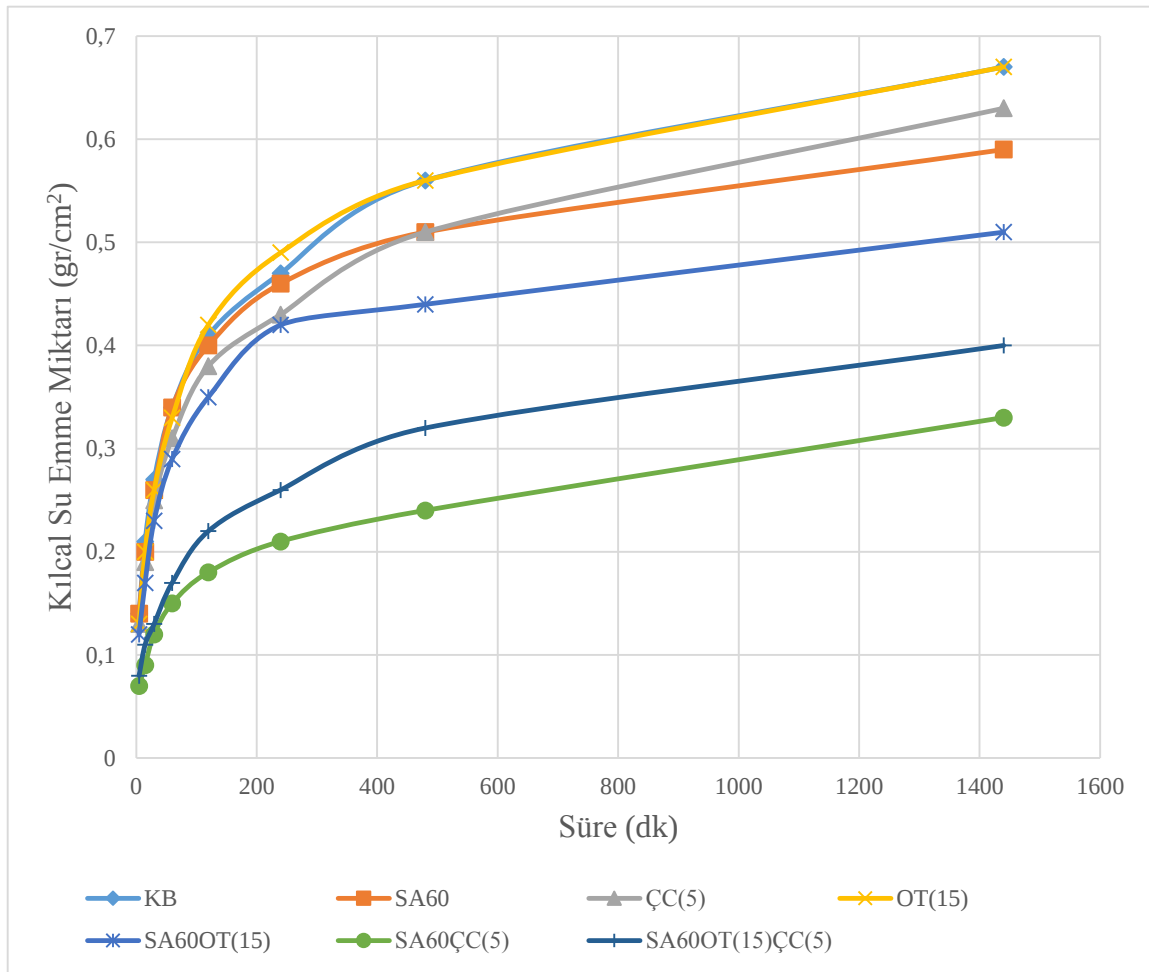
Şekil 47. 28 günlük betonun eğilmede çekme ve basınç dayanımı arasındaki korelasyon ilişkisi

Kılcal Su Emme Deneyi Sonuçları

Kılcal su emme deneyi, betonun su emme oranı ve boşluk miktarı ile ilgili bilgiler verir. Bu deney 7×7×7 cm boyutlu her grup için 3'er adet küp numunede gerçekleştirilmiş olup her bir gruba ait kılcal su emme miktarı (gr/cm²) ortalama olarak Tablo 16'da verilmiştir. Şekil 47'de verilen her bir nokta 3 adet numunenin ortalaması alınarak elde edilmiştir. Şekil 48 incelendiğinde en yüksek su emme değerinin KB karışımında olduğu ve en az su emme değerinin ise SA60ÇC5 karışımında olduğu gözlemlenmiştir. KB ve OT15 karışımlarının su emme değerleri birbirine çok yakın iken SA60OT15 karışımının su emme değeri bu iki gruptan düşüktür. Dolayısı ile beton karışımında ince agrega yerine seramik atık kullanılması su emme oranında azalma sağlamaktadır. Su emme oranı düşük olan seramik agregaların betonda kullanılması ile betonun su emme oranını azalttığı literatür ile desteklenmektedir (Manoharan and Senthamarai 2005). Beton karışımında farklı olarak sadece çinko cürufu ikamesi ile oluşturulan ÇC5 karışımının su emme değeri KB ve OT15 karışımlarında daha düşük olup seramik atık agregası ile çinko cürufunun bulunduğu SA60ÇC5 karışımında ise su emme değerinin minimum seviyeye düştüğü belirlenmiştir. Bu grupta kullanılan malzemelerin atık ürünlerden oluşması nedeni ile elde edilen minimum kılcal su emme, sürdürülebilirlik açısından önemli bir bulgudur. En düşük su emme değerinde ikinci sırada olan karışımın SA60ÇC5OT15 olduğu ve bu nedenle obsidiyen tozunun betonda su emme değerini artırabileceği görülmektedir. SA60OT15ÇC5 ve SA60OT15 karışım grupları karşılaştırıldığında SA60OT15ÇC5 karışımının daha düşük su emme oranına sahip olduğu gözlemlenmiştir. Dolayısıyla yapılan bu deney sonucunda seramik atığın ve çinko cürufunun betonda kapiler su emme miktarının azalttığı ve bu olumlu sonuca ilaveten yine aynı gruptaki eğilmede çekme dayanımının (Şekil 45) en yüksek olduğu görülmektedir. Bu durum seramik atık agregası ile çinko cürufunun birlikte kullanılması sonucunda beton içerisinde boşluk oranının düştüğü ve oluşabilecek ürünlerle iç yapının iyileştiği şeklinde açıklanabilir. Böylece SA60ÇC5 ve SA60OT15ÇC5 beton gruplarının su emme oranlarının az olması nedeniyle su ile temas içinde olan yapılarda kullanılmasının sonucunda agreganın bir kısmının atık malzeme ile değiştirilmesi nedeniyle azalan çevre kirliliği ve çimentonun belirlenen oranlarda azaltılarak üretimde ekonomiklik sağlanması gibi olumlu etkiler ortaya koyabilmektedir.

Tablo 16. 28 günlük betonun kılcal su emme sonuçları

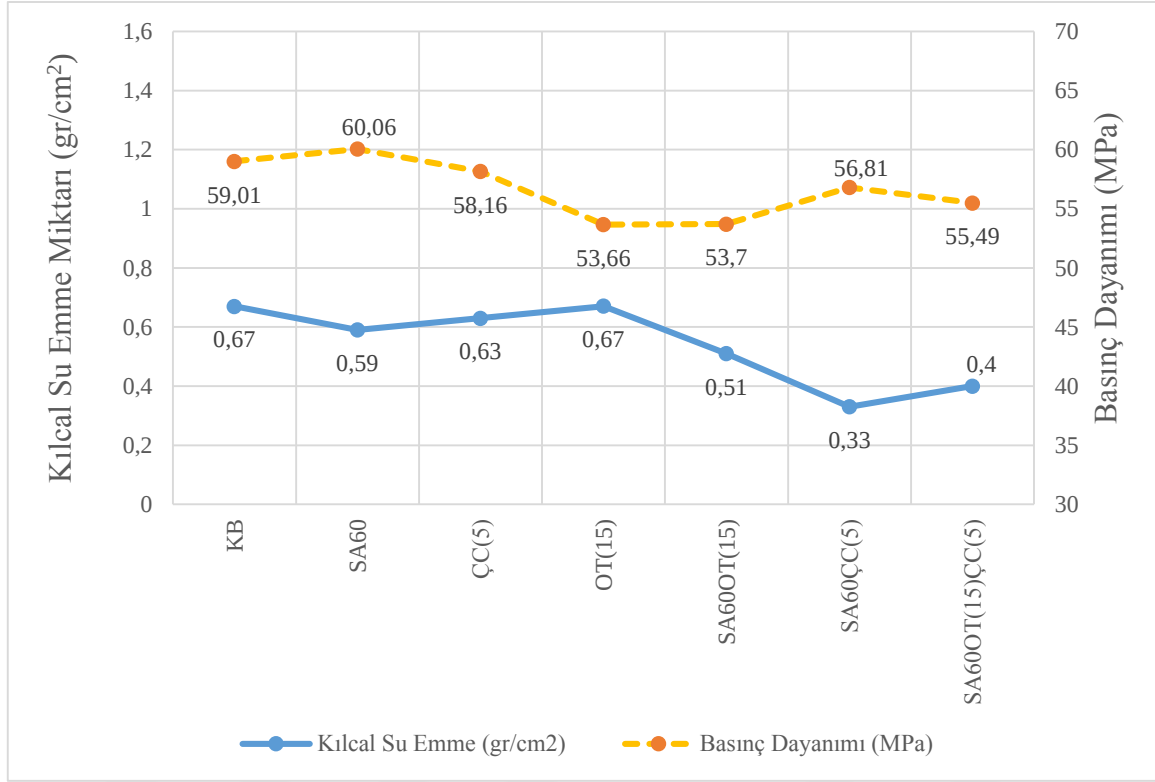
	Kılcal Su Emme Miktarı (gr/cm ²)							
Süre (dk)	5	15	30	60	120	240	480	1440
KB	0,14	0,21	0,27	0,34	0,41	0,47	0,56	0,67
SA60	0,14	0,20	0,26	0,34	0,40	0,46	0,51	0,59
ÇC(5)	0,13	0,19	0,25	0,31	0,38	0,43	0,51	0,63
OT(15)	0,13	0,20	0,26	0,33	0,42	0,49	0,56	0,67
SA60OT(15)	0,12	0,17	0,23	0,29	0,35	0,42	0,44	0,51
SA60ÇC(5)	0,07	0,09	0,12	0,15	0,18	0,21	0,24	0,33
SA60OT(15)ÇC(5)	0,08	0,11	0,13	0,17	0,22	0,26	0,32	0,40

**Şekil 48.** 28 günlük betonun kılcal su emme sonuçları

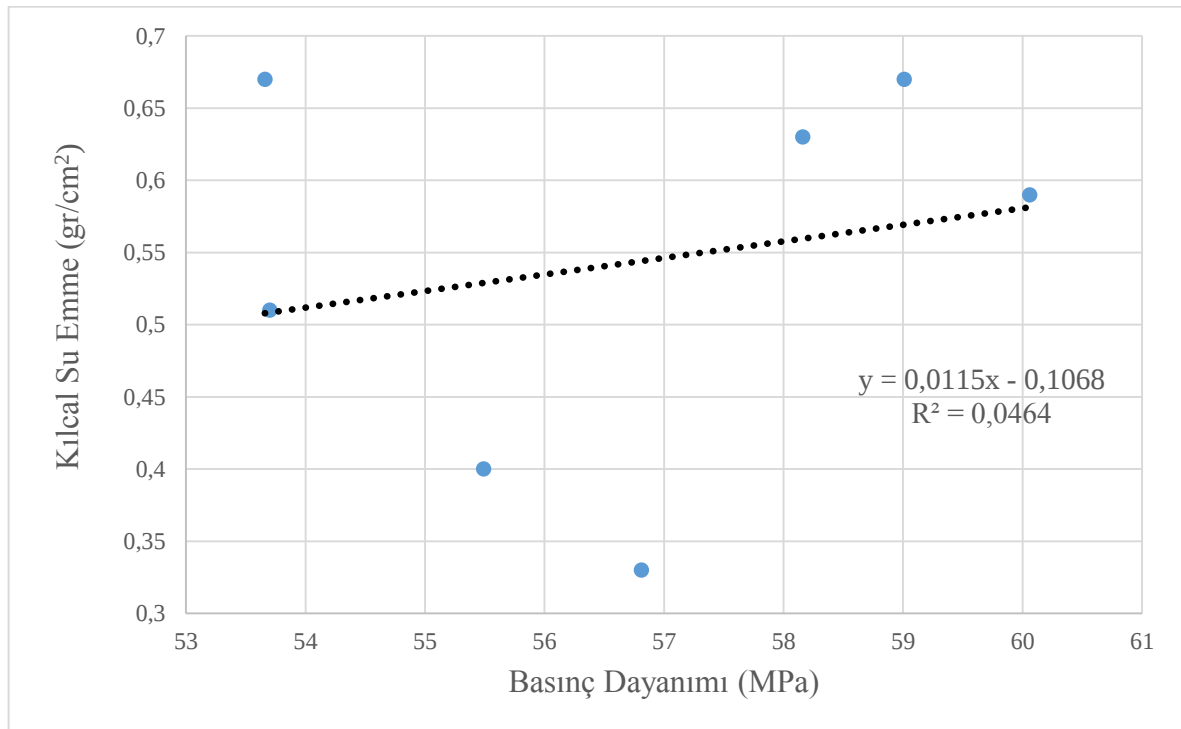
Kılcal su emme ile basınç dayanımı sonuçlarının birlikte incelenmesi

Şekil 49’da 24 saat sonundaki kılcal su emme değerleri ile beton basınç dayanımları arasındaki ilişki aynı grafik üzerinde gösterilmiştir. Şekil 49 incelendiğinde basınç dayanımının en yüksek olduğu SA60 beton grubundaki kılcal su emme miktarının kontrol betonuna göre daha az olduğu görülmektedir. 24 saat sonunda numunelerdeki en yüksek kılcal geçirimlilik yaklaşık eşit olarak OT15 ve KB gruplarında elde edilirken en düşük basınç dayanımının ise

yine kılcal geçirimsizliğin en yüksek olduğu OT15 beton grubunda olduğu görülmektedir. Şekil 50’de hesaplanan korelasyon katsayısının 0’a çok yakın olması, kılcal su emme ile basınç dayanımı arasında büyük oranda doğrusal orantının olmadığı ve bu nedenle kılcal su emme oranının azaldıkça basınç dayanımının arttığı görülmektedir.



Şekil 49. 28 günlük betonun kılcal su emme miktarı ile basınç dayanımı arasındaki ilişki



Şekil 50. 28 günlük betonun kılcal su emme miktarı ile basınç dayanımı arasındaki korelasyon ilişkisi

Ultrases Darbe Hızı Deneyi Sonuçları

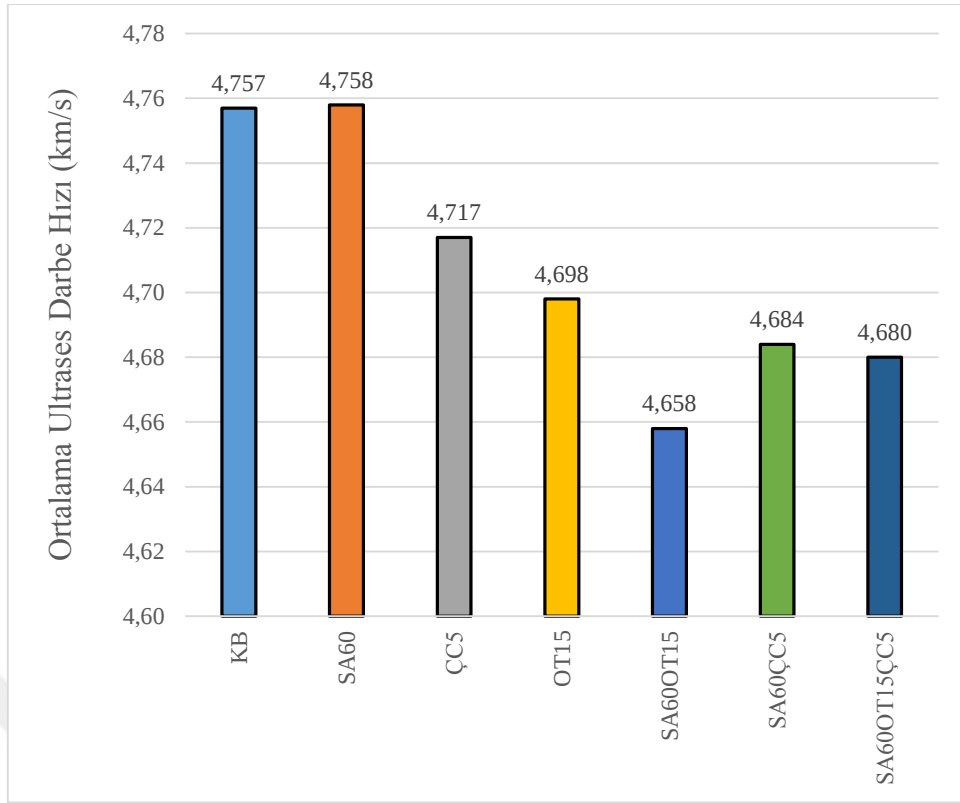
Ultrases deneyi tahribatsız bir deney yöntemi olup 28 gün standart su küründe kalan 15×15×15 cm boyutlu beton küp numunelere uygulanmıştır. Her bir beton grubundan 3 adet küp numuneye döküm yönüne dik olacak şekilde ultrases darbe hızı ölçümü yapılmıştır. Her bir numunenin 5 farklı bölgesinden 5 farklı UPV ölçümü yapılmış olup bu değerlerin ortalaması alınarak elde edilen veriler Tablo 17 ve Şekil 51’de verilmiştir. Veriler incelendiğinde en yüksek ultrases darbe hızı SA60 karışımında elde edilirken en düşük ultrases darbe hızı SA60OT15 karışımında elde edilmiştir. SA60 karışımının ultrases darbe hızı kontrol betonu karışımından çok az bir farkta olsa daha yüksek çıkarak en iyi sonucu vermiştir. Kontrol betonu karışımının ultrases darbe hızı ile karşılaştırıldığında sadece SA60 karışımında daha yüksek darbe hızı elde edilirken; OT15 karışımında %1,2, ÇC5 karışımında %0,8, SA60OT15 karışımında %2,1, SA60ÇC5 karışımında %1,5, SA60OT15ÇC5 karışımında %1,6 oranında azalma olduğu belirlenmiştir. SA60 karışımının ultrases darbe hızı SA60OT15 ve SA60ÇC5 karışımlarının ultrases darbe hızları ile birlikte incelendiğinde SA60OT15 ve SA60ÇC5 karışımlarının darbe hızları SA60 karışıma göre sırasıyla %2,1 ve %1,6 oranında daha düşük olduğu görülmektedir. Fakat SA60OT15 karışımının ultrases darbe hızına göre SA60OT15ÇC5 karışımının ultrases darbe hızı %0,5 oranında daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Bu nedenle ince agrega yerine %60 oranında seramik atık kullanılarak üretilen SA60 karışımında daha yüksek ultrases darbe hızı elde edilmesi seramik malzemenin sahip olduğu yüksek sertlik ile ilişkili olduğu öngörülmektedir. Seramik atık agregası ile birlikte çimento yerine ikame olarak ayrı ayrı katılan obsidiyen tozu ve çinko cürufunun ultrases darbe hızını kısmen düşürdüğü fakat SA60OT15ÇC5 karışımındaki ultrases darbe hızı SA60OT15 karışımına göre daha yüksek çıkmıştır. Bu durum çinko cürufunun, seramik atık ve obsidiyen tozu ile birlikte kullanıldığında ultrases darbe hızında olumlu etki gösterdiğini ortaya koymaktadır. Yapılan ultrases darbe hızı ölçümleri için Tablo 18 dikkate alındığında üretilen tüm karışımların darbe hızları 4,671 km/s ile 4,790 km/s arasında olup ‘çok iyi’ sınıfına girdiği görülmektedir.

Tablo 17. 28 günlük betonun ultrases darbe hızı deney sonuçları

Beton Grubu	Ultrases Darbe Hızı (km/s)	Ortalama Ultrases Darbe Hızı (km/s)
KB1	4,745	4,757
KB2	4,736	
KB3	4,790	
SA60-1	4,763	4,758
SA60-2	4,762	
SA60-3	4,747	
ÇC5-1	4,730	4,717
ÇC5-2	4,712	
ÇC5-3	4,709	
OT15-1	4,694	4,698
OT15-2	4,729	
OT15-3	4,671	
SA60OT15-1	4,671	4,658
SA60OT15-2	4,662	
SA60OT15-3	4,642	
SA60ÇC5-1	4,712	4,684
SA60ÇC5-2	4,679	
SA60ÇC5-3	4,662	
SA60OT15ÇC5-1	4,705	4,680
SA60OT15ÇC5-2	4,632	
SA60OT15ÇC5-3	4,703	

Tablo 18. Betonun UPV sonuçlarına göre karşılaştırılması (IS 13311, 1992)

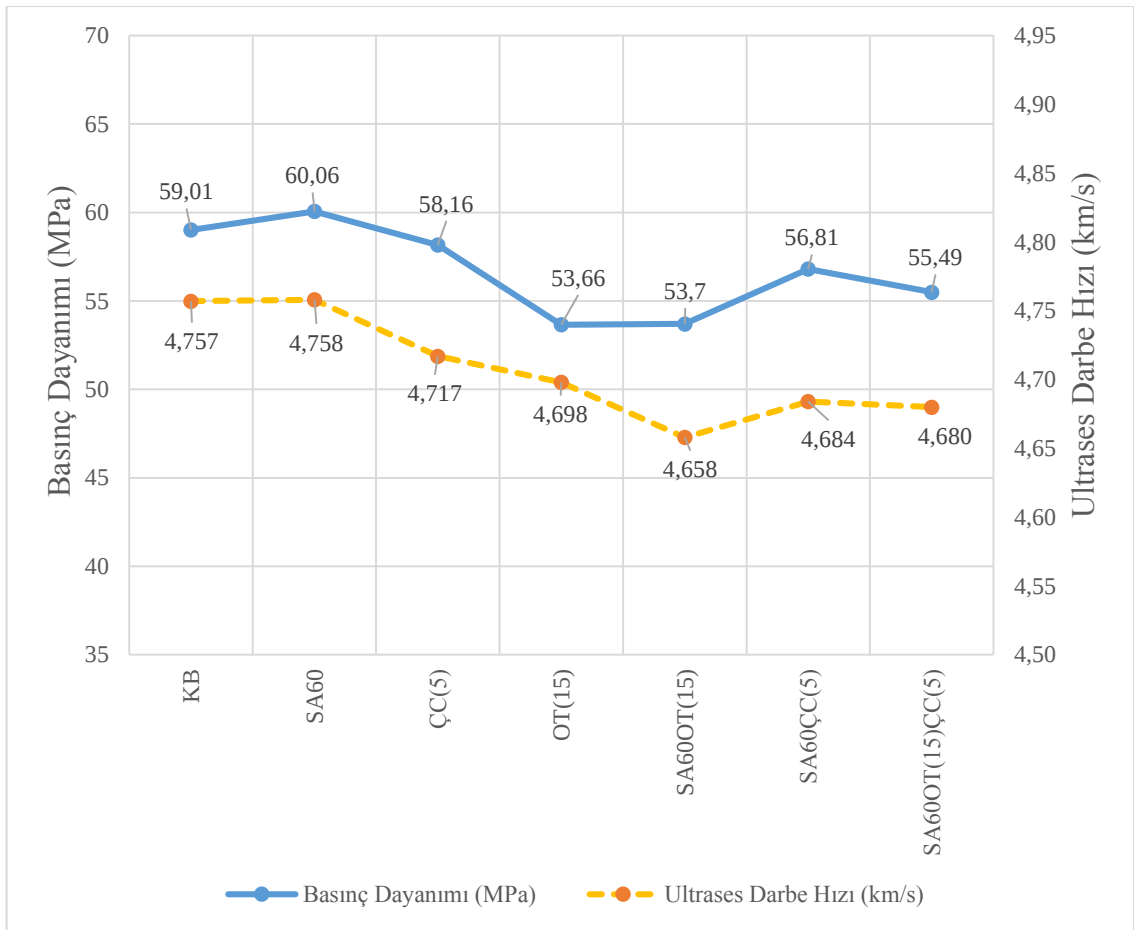
Ultrases Darbe Hızı (km/s)	Beton Kalitesi
>4,5	Çok İyi
3,5-4,5	İyi
3-3,5	Orta
<3	Kötü



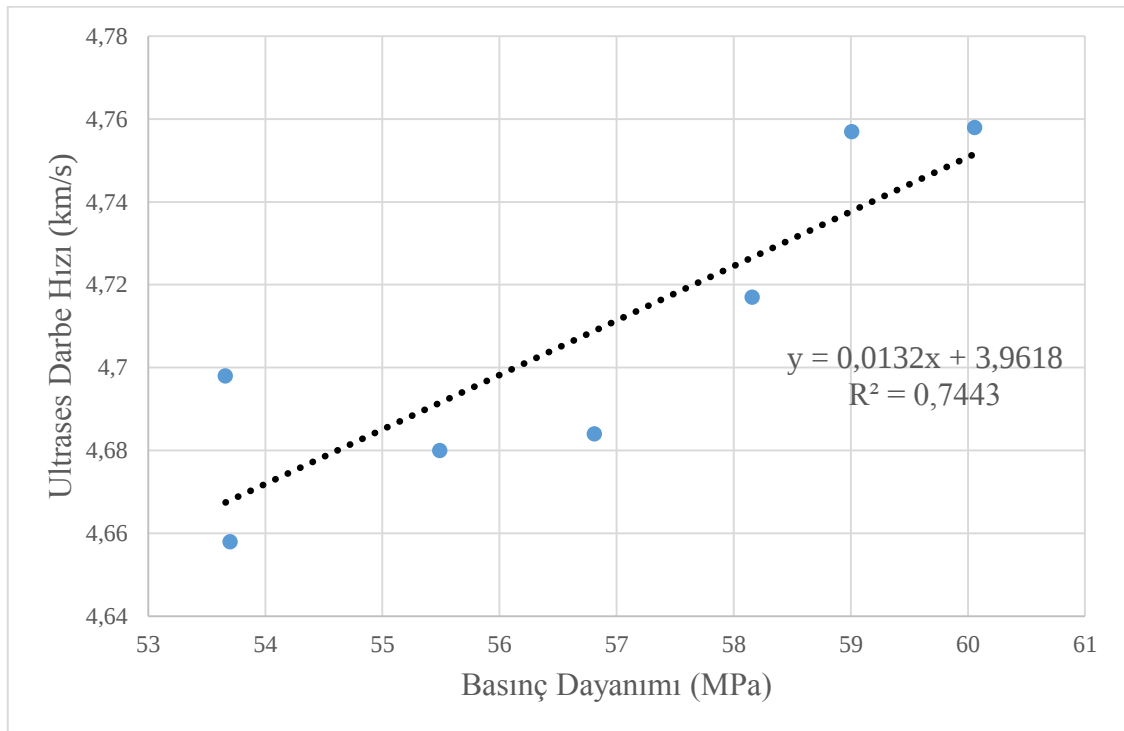
Şekil 51. 28 günlük betonun ultrases darbe hızı sonuçları

Ultrases darbe hızı ile basınç dayanımı sonuçlarının birlikte incelenmesi

Şekil 52’de ultrases darbe hızı ve beton basınç dayanımı sonuçları aynı grafik üzerinde verilmektedir. Şekil 52 incelendiğinde üretilen beton karışımlarının ultrases darbe hızı ve beton basınç dayanımı sonuçları birbirleri ile büyük oranda benzerlik göstermektedir. Her iki deney ölçümünde de en iyi sonuçlar SA60 karışımında elde edilmiştir. Şekil 53’de ultrases darbe hızı ve basınç dayanımı arasındaki korelasyon eğrisi verilmiştir. Şekil 53 incelendiğinde korelasyon katsayısının 1 değerine yakın olduğu görülmektedir. Bu nedenle ultrases darbe hızı deney sonuçları ile basınç dayanımı sonuçları arasında doğrusal bir ilişki olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 52. 28 günlük betonun UPV ve beton basınç dayanımı arasındaki ilişki



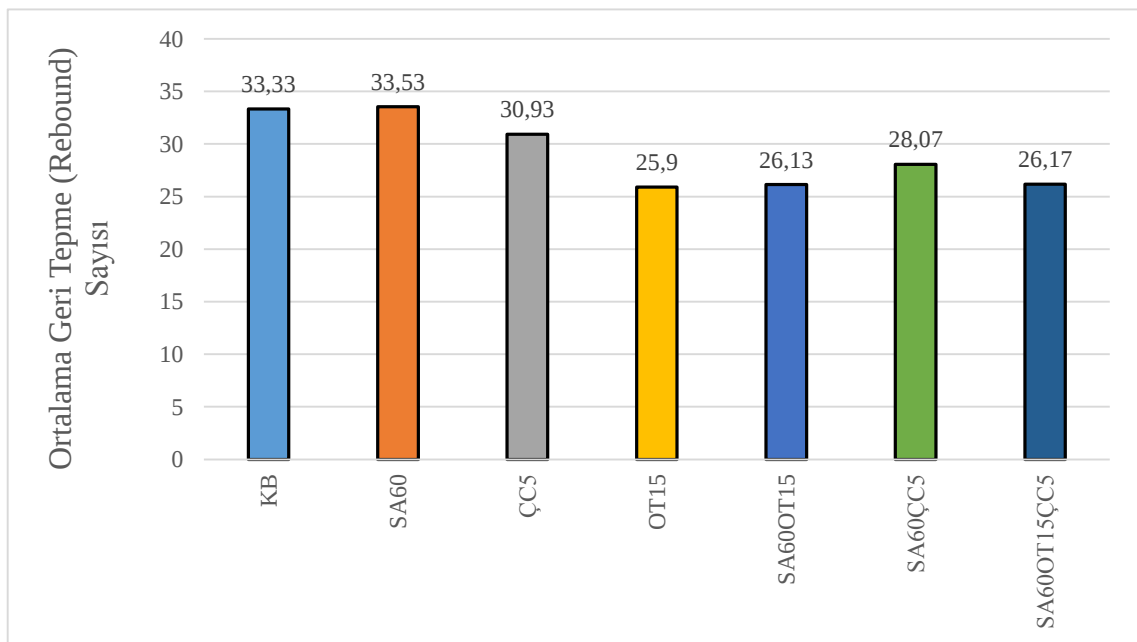
Şekil 53. 28 günlük betonun UPV ve beton basınç dayanımı arasındaki korelasyon ilişkisi

Beton Test Çekici (Schmidt) Deneyi Sonuçları

Beton test çekici deneyi, beton yüzeylerinin sertliği ve tek eksenli basınç dayanımlarının tayini için uygulanan tahribatsız bir deney yöntemidir. Beton test çekici deneyi 28 gün standart kürde tutulan $15 \times 15 \times 15$ cm boyutlu küp numunelerin ait olduğu her bir beton grubunda 3 adet numuneye döküm yönüne dik olacak şekilde karşılıklı iki yüzeye 10'ar kez uygulanmış olup elde edilen geri tepme (Rebound) sayısına ait ortalama sonuçlar Tablo 19 ve Şekil 54'de verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde en yüksek geri tepme sayısı SA60 karışımında, en düşük geri tepme ise OT15 karışımında elde edilmiştir. Kontrol betonu ile karşılaştırıldığında SA60 karışımındaki geri tepme sayısı %0,6 oranında daha yüksek iken; OT15, ÇC5, SA60OT15, SA60ÇC5, SA60OT15ÇC5 karışımlarında ise sırasıyla; %22.2, %7.2, %21.6, %15.8 ve %21.5 oranlarında daha düşük olduğu belirlenmiştir. OT15 ile SA60OT15 karışımları karşılaştırıldığında SA60OT15 karışımının geri tepme sayısı %0,9 oranında daha yüksek ve ÇC5 ile SA60ÇC5 karışımları karşılaştırıldığında SA60ÇC5 karışımının geri tepme sayısı %9,2 oranında daha düşük olduğu belirlenmiş olup SA60OT15 ile SA60OT15ÇC5 karışımları karşılaştırıldığında ise SA60OT15ÇC5 karışımının geri tepme sayısının %0,2 oranında daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu nedenle seramik atık agregasının çinko cürufu ile birlikte kullanıldığında, çinko cürufunun tek başına kullanıldığı gruba göre daha düşük geri tepme sayısı elde edildiği fakat obsidiyen tozuyla birlikte kullanıldığında, obsidiyen tozunun tek başına kullanıldığı gruba göre daha yüksek geri tepme sayısı elde edildiği belirlenmiştir. Her üç malzemenin bir arada kullanılması ile elde edilen karışımlarda ise kullanılan çinko cürufunun olumlu etki göstermesi ile birlikte elde edilen geri tepme sayısı SA60OT15 karışımından daha yüksek çıkmıştır.

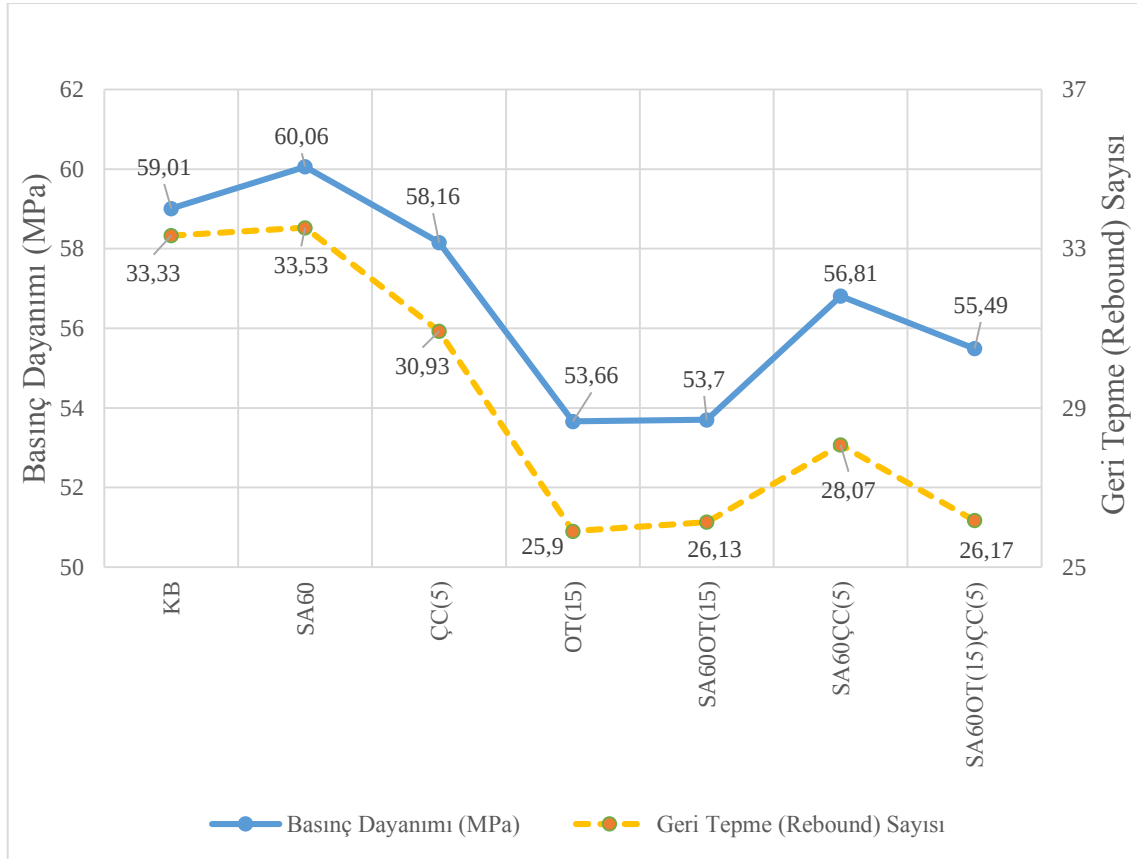
Tablo 19. 28 günlük betonun test çekici deneyi sonuçları

Beton Grubu	Geri Tepme (Rebound) Sayısı	Ortalama Geri Tepme (Rebound) Sayısı
KB1	32,9	33,33
KB2	32,7	
KB3	34,4	
SA60-1	33,5	33,53
SA60-2	32,7	
SA60-3	34,4	
ÇC5-1	33,6	30,93
ÇC5-2	30,4	
ÇC5-3	28,8	
OT15-1	26,3	25,9
OT15-2	27,4	
OT15-3	24	
SA60OT15-1	27,7	26,13
SA60OT15-2	24,7	
SA60OT15-3	26,0	
SA60ÇC5-1	26,8	28,07
SA60ÇC5-2	28,3	
SA60ÇC5-3	29,1	
SA60OT15ÇC5-1	27,2	26,17
SA60OT15ÇC5-2	25,8	
SA60OT15ÇC5-3	25,5	

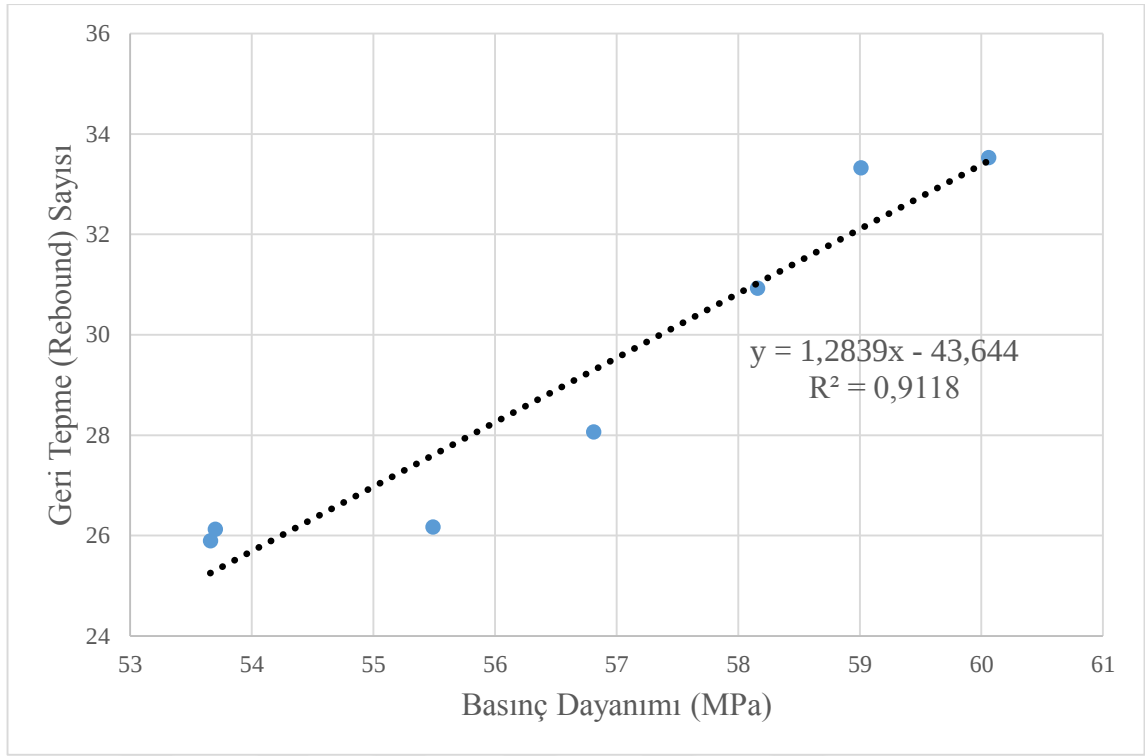
**Şekil 54.** 28 günlük betonun test çekici deneyi sonuçları

Beton test çekici geri tepme sayısı ile basınç dayanımı sonuçlarının birlikte incelenmesi

Beton test çekici deneyi geri tepme sayısı ile basınç dayanımı sonuçları aynı grafik üzerinde Şekil 55’de verilmiştir. Şekil 55 incelendiğinde her iki deneyde de en yüksek değerli sonuçlar SA60 karışımında elde edilirken en düşük değerli sonuçlar ise OT15 karışımında elde edilmiştir. Şekil 56’daki korelasyon eğrisi ve katsayısı incelendiğinde beton test çekici sonuçlarının basınç dayanımı sonuçları ile neredeyse tamamen uyumlu ve doğrusal olduğu görülmektedir.



Şekil 55. 28 günlük betonun test çekici ve basınç dayanımı arasındaki ilişki



Şekil 56. 28 günlük betonun test çekici ve basınç dayanımı arasındaki korelasyon ilişkisi

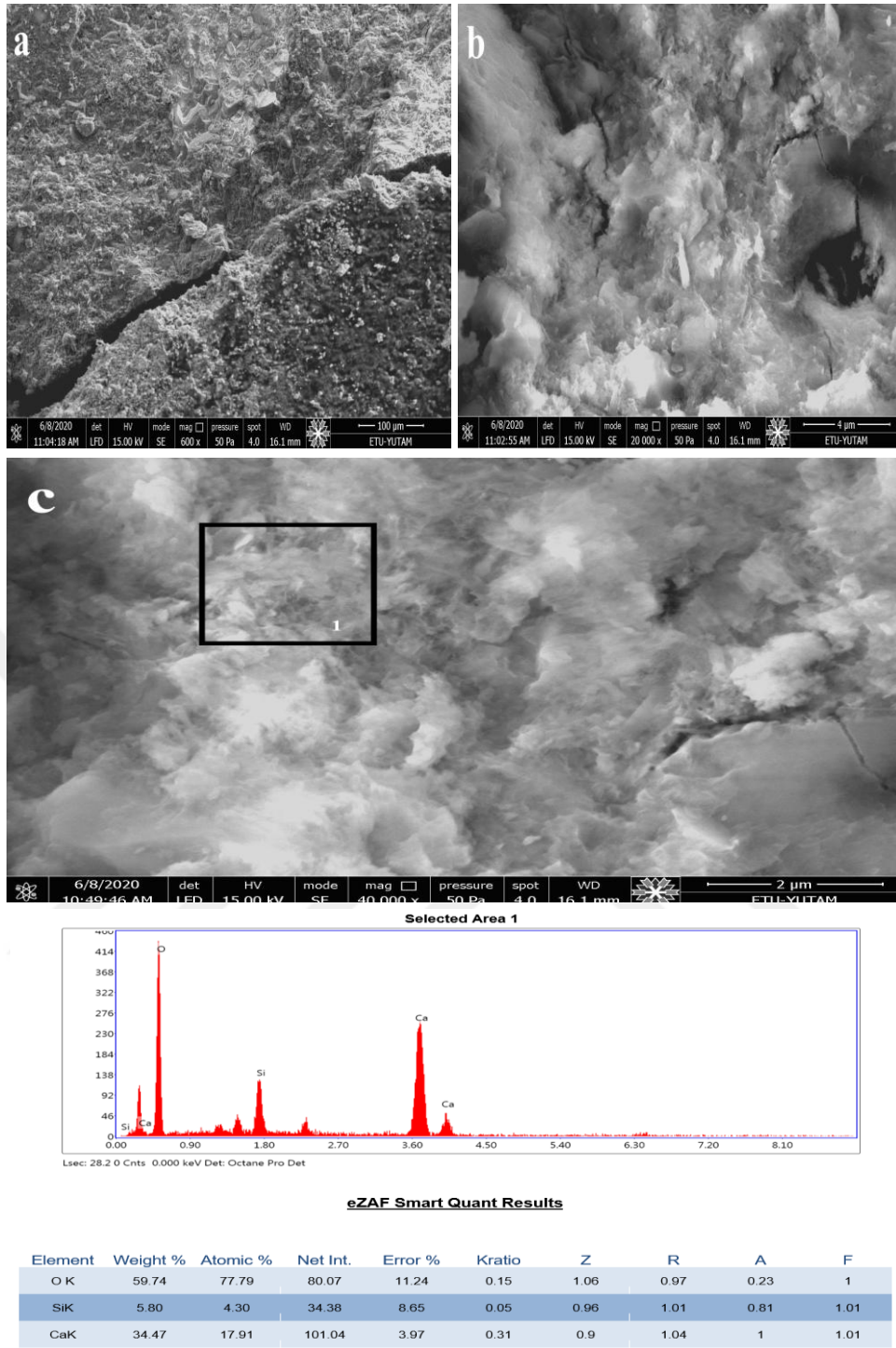
Enstrümental Analiz Teknikleri İle İnceleme Sonuçları

Sertleşmiş beton numuneleri üzerinde entrümental analiz tekniklerinden; taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve EDS elementel analizine ek olarak X ışını difraksiyonu (XRD) analizi sonuçları incelenirse:

Taramalı elektron mikroskobu (SEM) analizi

Sertleşmiş beton gruplarının her birinden alınan numuneler üzerinde SEM ve EDS analizleri aşağıda verilmiş olup bu gruplar incelenirse;

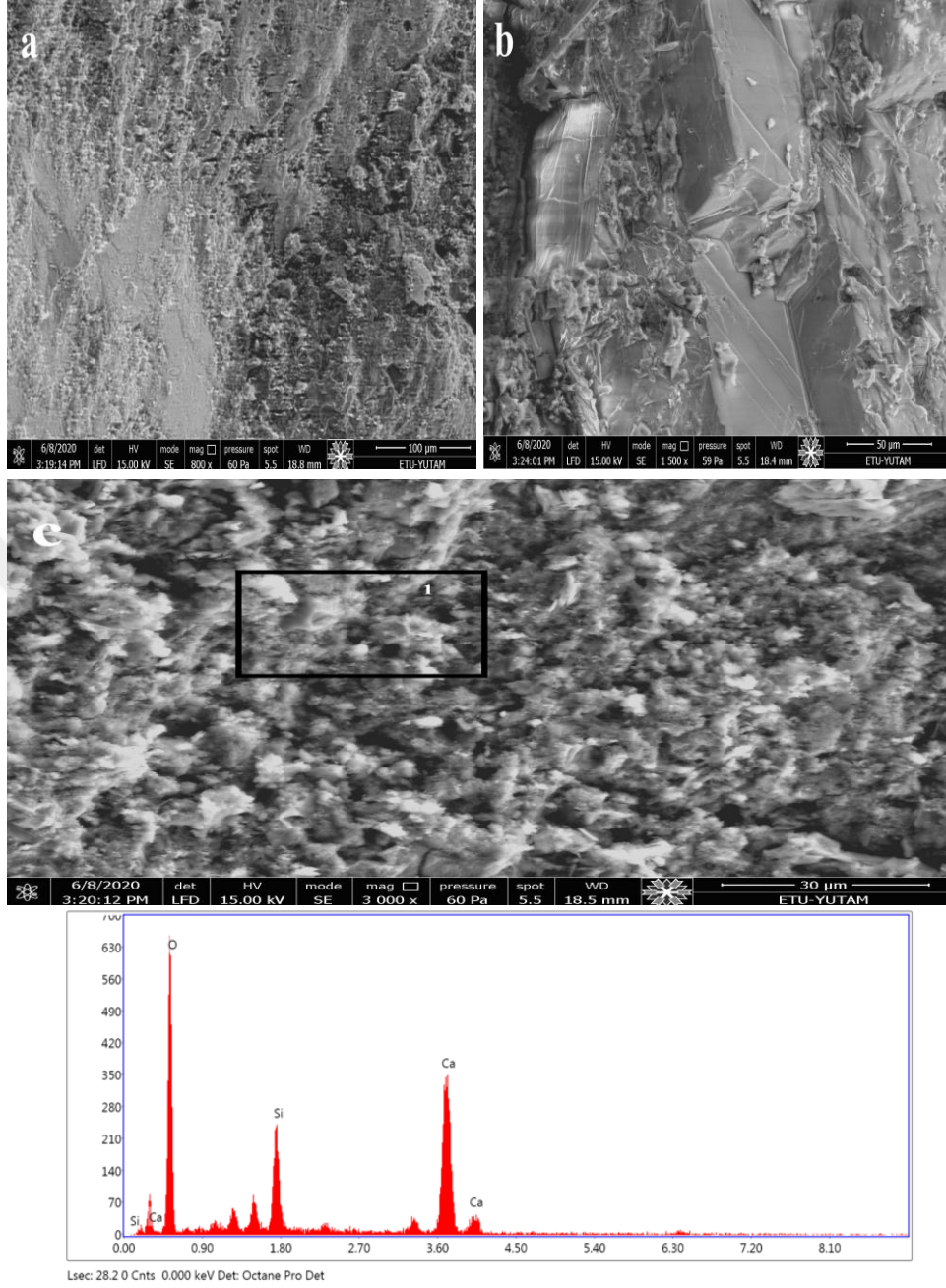
Şekil 57’de kontrol beton grubuna ait SEM ve EDS analizi görüntüleri verilmiştir. Şekil 57(a)’da numunede kırılmanın meydana geldiği ara yüzey bölgesi ve genel görünümü görülmekte iken Şekil 57(b)’de kontrol betonunda boşlukların belirgin olduğu ve bu durumun kısmen dayanımı düşürüp kılcal su emme miktarının artışına sebep olduğu öngörülmektedir. Şekil 57(c)’de ise C-S-H jellerinin görüntülendiği ve belirlenen bölgede yapılan EDS elementel analizinde betonun ve çimentonun dayanımının en önemli bileşeni olan C-S-H jelinin, içeriğindeki ana minerali olan silisin bu bölgede bulunduğu tespit edilmiştir.



Şekil 57. Kontrol grubuna ait SEM/EDS görüntüleri

Şekil 58’de SA60 beton grubuna ait yapılan SEM ve EDS analizleri sonucunda elde edilen görüntüler verilmiştir. Şekil 58(a) incelendiğinde SA60 beton grubuna ait genel görünümün Şekil 57’deki kontrol betonunun genel görünümüne göre daha kompakt bir şekilde olduğu ve boşluk oranının daha az olduğu görülmektedir. Şekil 58(b)’de bu kompakt yapıdaki seramik agrega ile çimento hamurunun yaptığı güçlü aderansın görüntüsü ve bu duruma bağlı olarak boşluk miktarının az olduğu öngörülmüşken, bu güçlü arayüzeyi oluşumu ve Şekil 58(c)’de verilen EDS analizi sonucunda silis miktarı tespit edildiği C-S-H jellerinin, yoğun

oluşu sebebiyle SA60 beton grubunun dayanımının yüksek; kılcal su emme oranının ise düşük çıktığı öngörülmektedir.

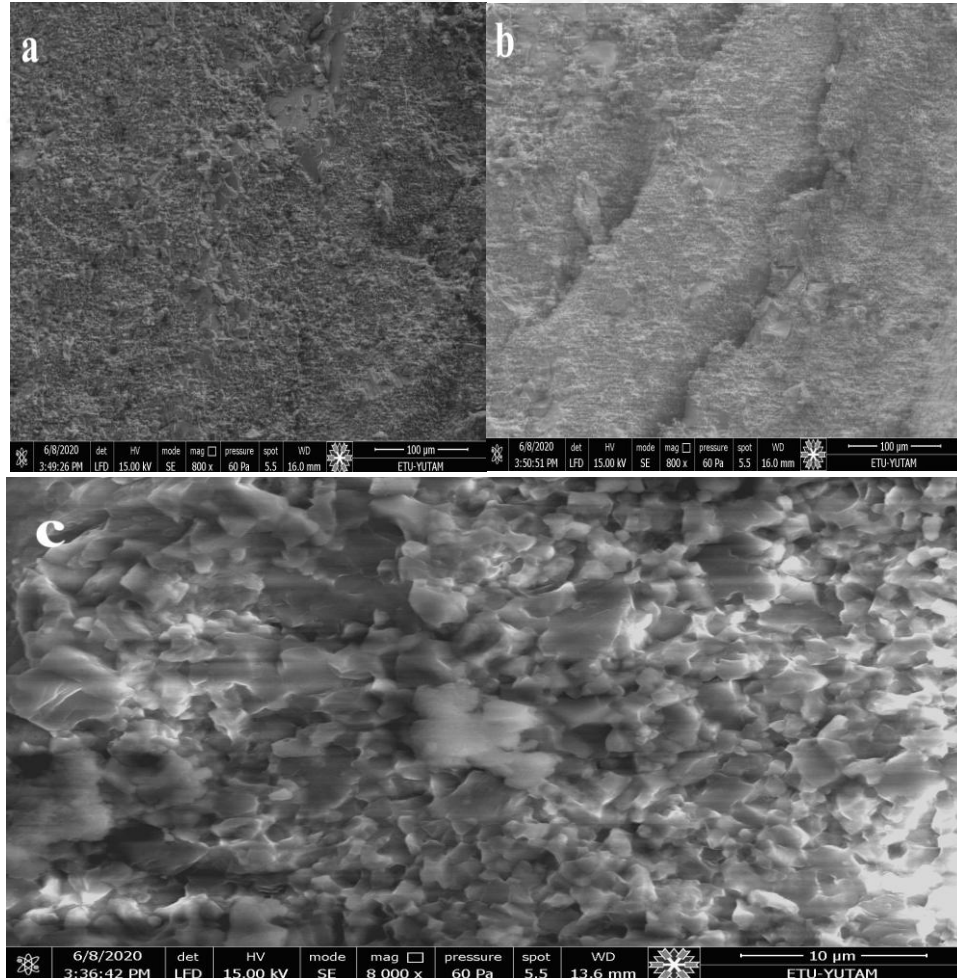


eZAF Smart Quant Results

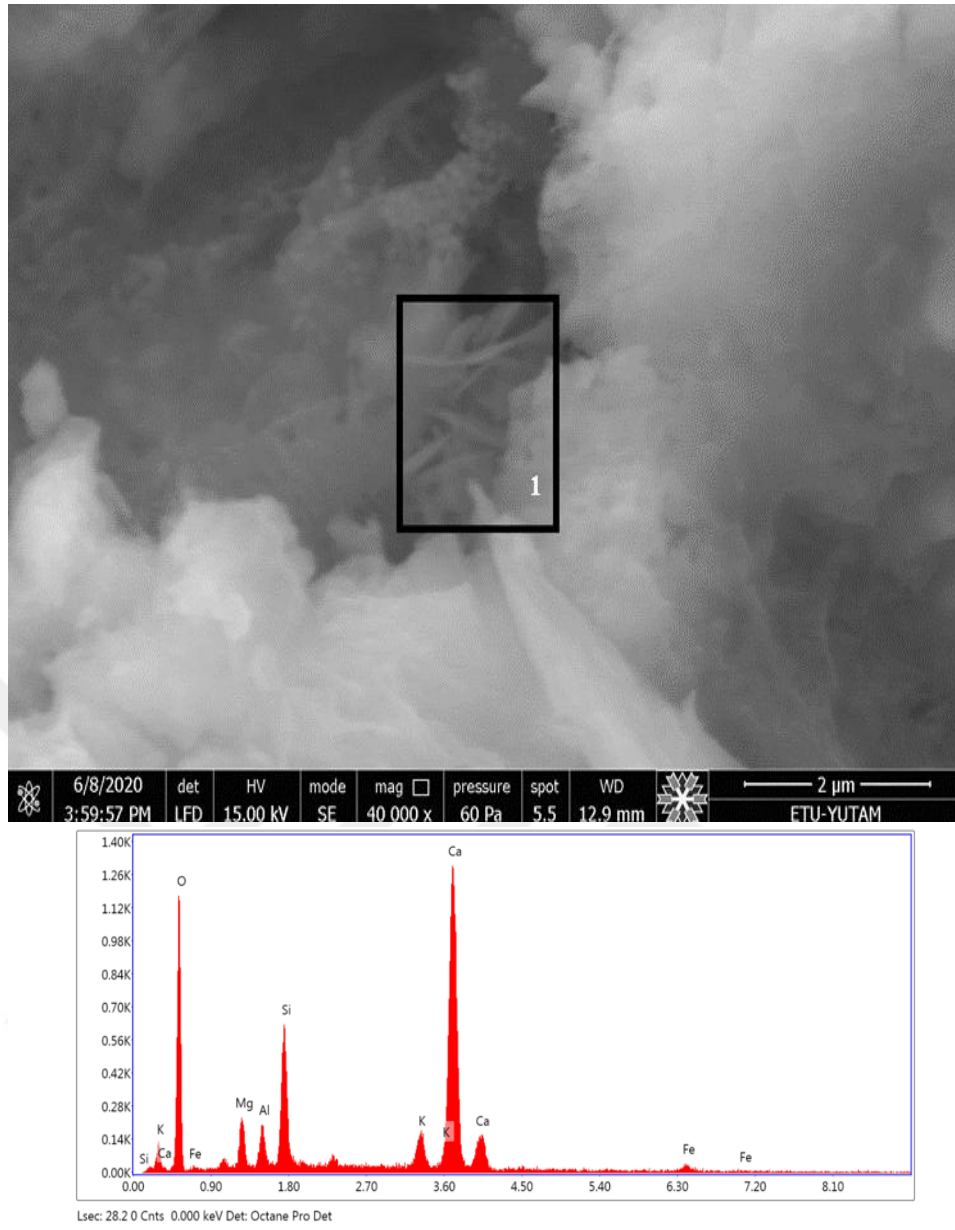
Element	Weight %	Atomic %	Net Int.	Error %	Kratio	Z	R	A	F
O K	60.23	77.88	119.86	10.73	0.15	1.06	0.97	0.24	1
Si K	7.22	5.32	61.37	6.76	0.06	0.95	1.01	0.82	1.01
Ca K	32.55	16.80	136.19	3.78	0.29	0.89	1.04	1	1.01

Şekil 58. SA60 grubuna ait SEM/EDS görüntüleri

Şekil 59’da ÇC5 beton grubuna ait numuneden çekilen SEM görüntüleri verilmiştir. Şekil 59(a)’da numunenin genel görüntüsü verilmiş olup iyi bir kompakt yapı oluştuğu görülmektedir. Şekil 59(b)’de büyük boşlukların bulunmadığı görülürken Şekil 59(c)’de de C-S-H jellerinin yoğun bir şekilde oluştuğu görülmektedir. ÇC5 beton grubunun kontrol betonuna yaklaşık eş değer basınç dayanımı göstermesi kompakt yapısı ile ilişkilendirilebilir iken içerisinde kısmen boşlukların bulunması ve bu boşluklarda, Şekil 60’da görüldüğü üzere entrenjit oluşumu nedeniyle dayanımda düşüş meydana geldiği öngörülmektedir. Şekil 61’de ise çinko cürufuna ait SEM görüntüsü ve EDS analizi yer almaktadır. Çinko cürufunun oluşmasında ilk aşama olarak çinko metalinin ayrıştırılması yer alır. Bu ayrıştırma işlemi bir çok yöntemle yapılırken bu yöntemlerde büyük oranda, karbon kullanılır ve çinko oksit madeni çinko metale dönüşerek ilk aşama tamamlanır. Bu aşamalar sonunda karbonmonoksit veya karbondioksit gazları açığa çıkar (Bakar 2005). Çinko cürufunun oluşmasında kullanılan bu karbon elementine çinko cürufuna ait olduğu düşünülen SEM görüntüsündeki EDS analizinde rastlanmıştır. Şekil 61’de görüldüğü üzere çinko cürufu, çimento hamuru ile iyi bir bağ yaptığı ve dolayısıyla ÇC5 grubu beton dayanımının kontrol beton dayanımına eş değer olabilmesine büyük oranda etki ettiği öngörülmektedir.



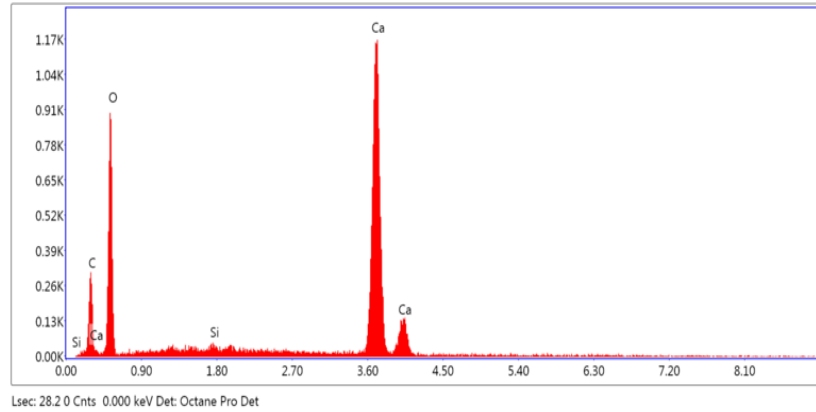
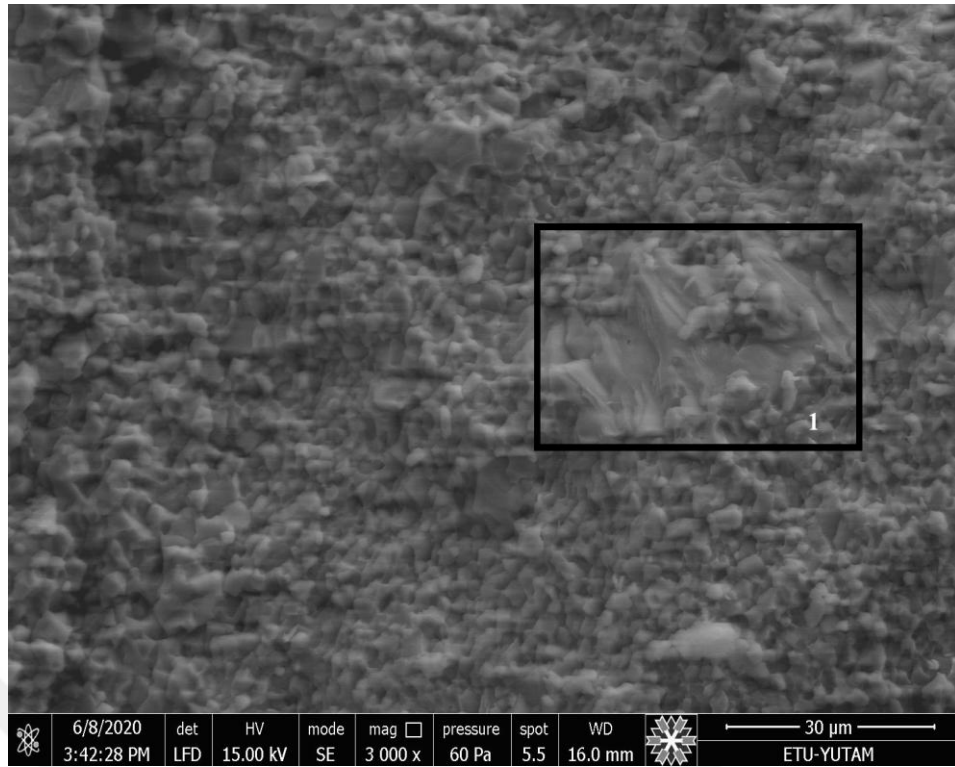
Şekil 59. ÇC5 grubuna ait SEM görüntüleri



eZAF Smart Quant Results

Element	Weight %	Atomic %	Net Int.	Error %	Kratio	Z	R	A	F
O K	45.43	66.03	208.84	10.82	0.09	1.08	0.95	0.19	1
MgK	1.95	1.86	37.51	11.32	0.01	1	0.99	0.57	1.01
AlK	1.38	1.19	30.39	11.92	0.01	0.96	1	0.7	1.01
SiK	6.16	5.10	149.74	6.10	0.05	0.98	1	0.79	1.01
K K	3.08	1.83	51.15	10.82	0.03	0.9	1.03	0.98	1.13
CaK	39.68	23.02	483.41	2.85	0.36	0.92	1.04	0.98	1.01
FeK	2.33	0.97	10.21	23.77	0.02	0.81	1.05	0.98	1.05

Şekil 60. ÇC5 grubunda oluşan etrenjit görüntüsü

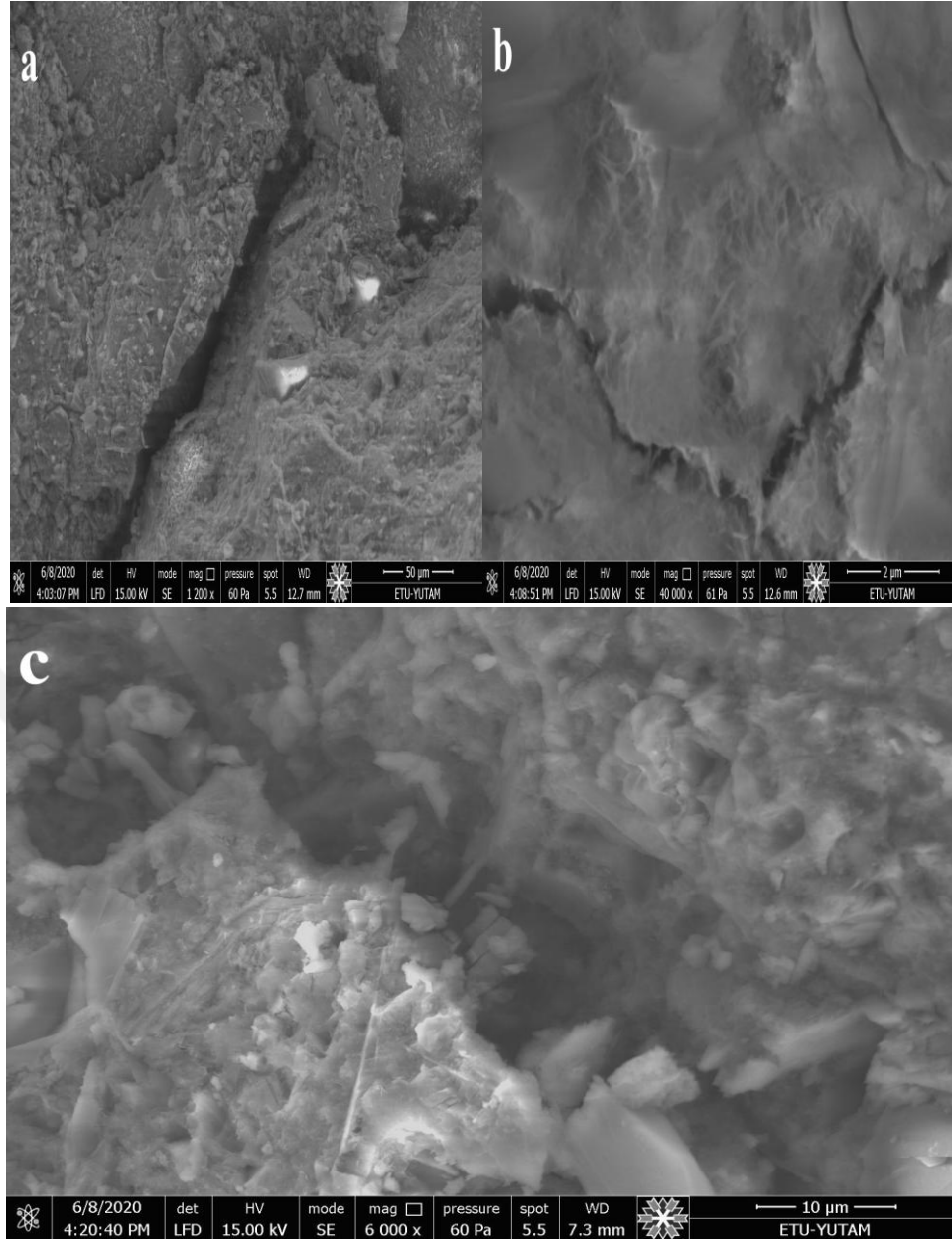


eZAF Smart Quant Results

Element	Weight %	Atomic %	Net Int.	Error %	Kratio	Z	R	A	F
C K	7.17	12.61	38.28	9.78	0.04	1.12	0.94	0.51	1
O K	48.37	63.89	165.62	11.10	0.09	1.06	0.96	0.18	1
Si K	0.27	0.20	5.31	41.42	0.00	0.96	1.01	0.81	1.02
Ca K	44.19	23.30	438.69	2.75	0.41	0.9	1.04	1.01	1.01

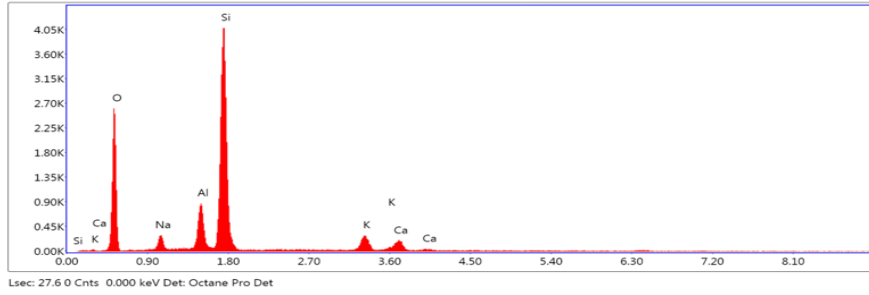
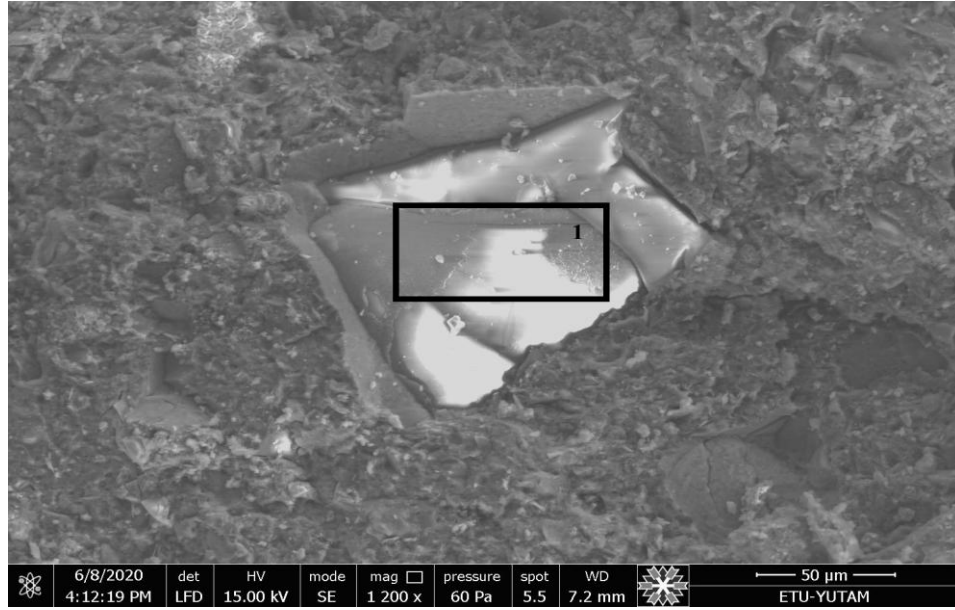
Şekil 61. ÇC5 grubundaki çinko cürufunun SEM/EDS görüntüsü

Şekil 62’de OT15 beton grubuna ait SEM analizi sonucunda çekilen görüntüler verilmiştir. Şekil 62(a) ve Şekil 62(b)’de görüldüğü üzere beton içerisinde büyük boşluklar bulunmaktadır. Şekil 62(c)’de görüldüğü üzere beton içerisindeki bu boşluklarda kısmen etrenjit oluşumlarının olduğu görülmektedir. Boşluk oranının fazla olması ve kompakt yapının elde edilememesi nedeniyle bu grubun basınç dayanımlarının düşük (KB’ye göre %-9,1) ve kılcal su emme oranının yüksek olduğu öngörülmektedir.



Şekil 62. OT15 grubuna ait SEM görüntüleri

Şekil 63’de sadece katkı olarak obsidiyenin bulunduğu OT15 grubunda, volkanik kökenli camsı yüzeyli olan ve yüksek silis içeriğine sahip obsidiyenin beton içerisindeki SEM görüntüsü verilmiştir. Belirlenen bölgeye yapılan EDS analizinde de yüksek oranda silis tespit edilerek SEM görüntüsü desteklenmiştir.

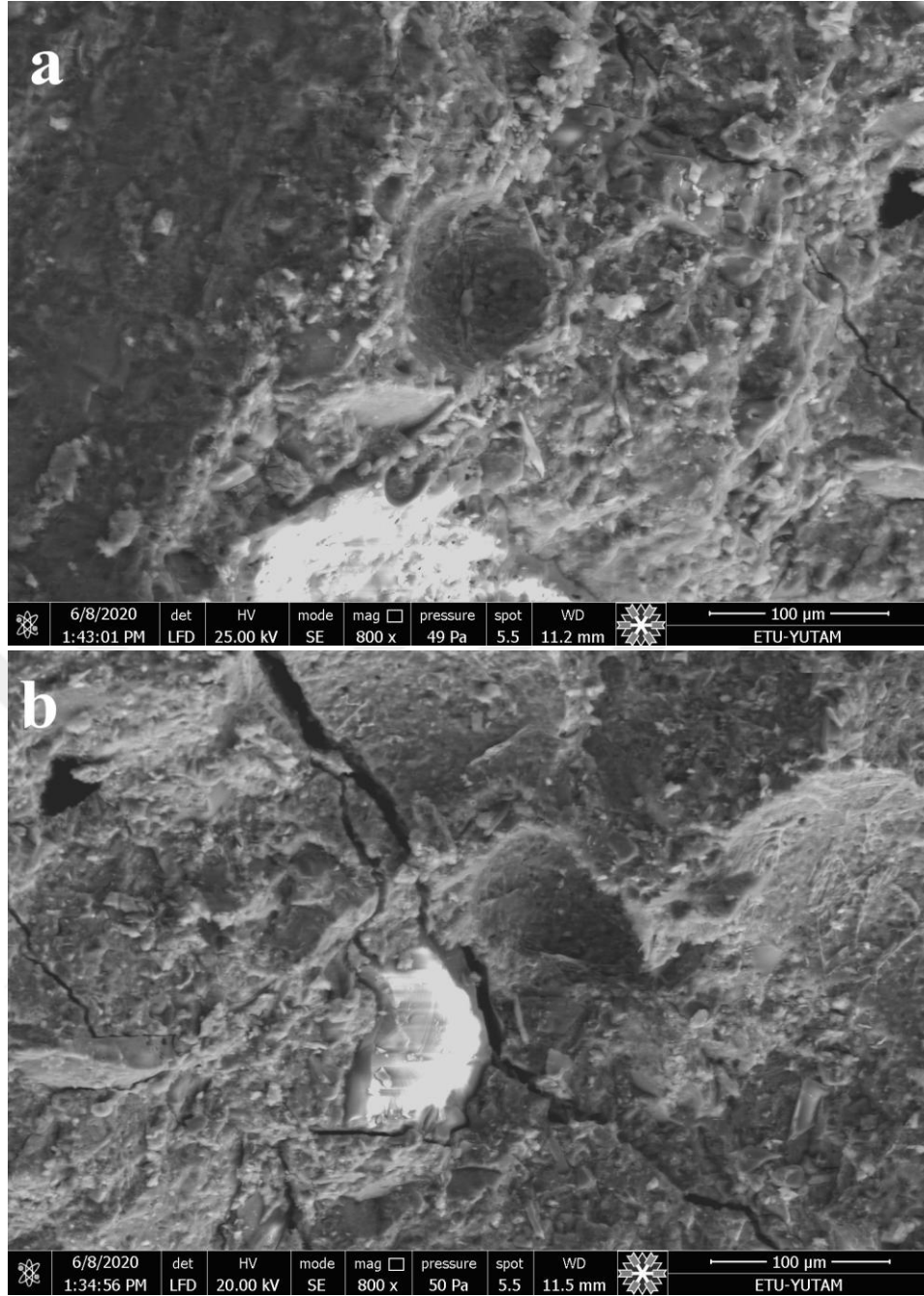


eZAF Smart Quant Results

Element	Weight %	Atomic %	Net Int.	Error %	Kratio	Z	R	A	F
O K	44.38	59.26	477.46	8.69	0.16	1.06	0.97	0.35	1
NaK	2.89	2.68	53.12	10.37	0.01	0.96	1	0.53	1.01
AlK	6.78	5.37	217.13	5.42	0.05	0.94	1.01	0.79	1.02
SiK	35.64	27.11	1,137.43	3.66	0.28	0.96	1.02	0.83	1
K K	5.57	3.04	100.64	6.32	0.05	0.88	1.04	0.93	1.02
CaK	4.75	2.53	70.61	7.30	0.04	0.9	1.05	0.94	1.02

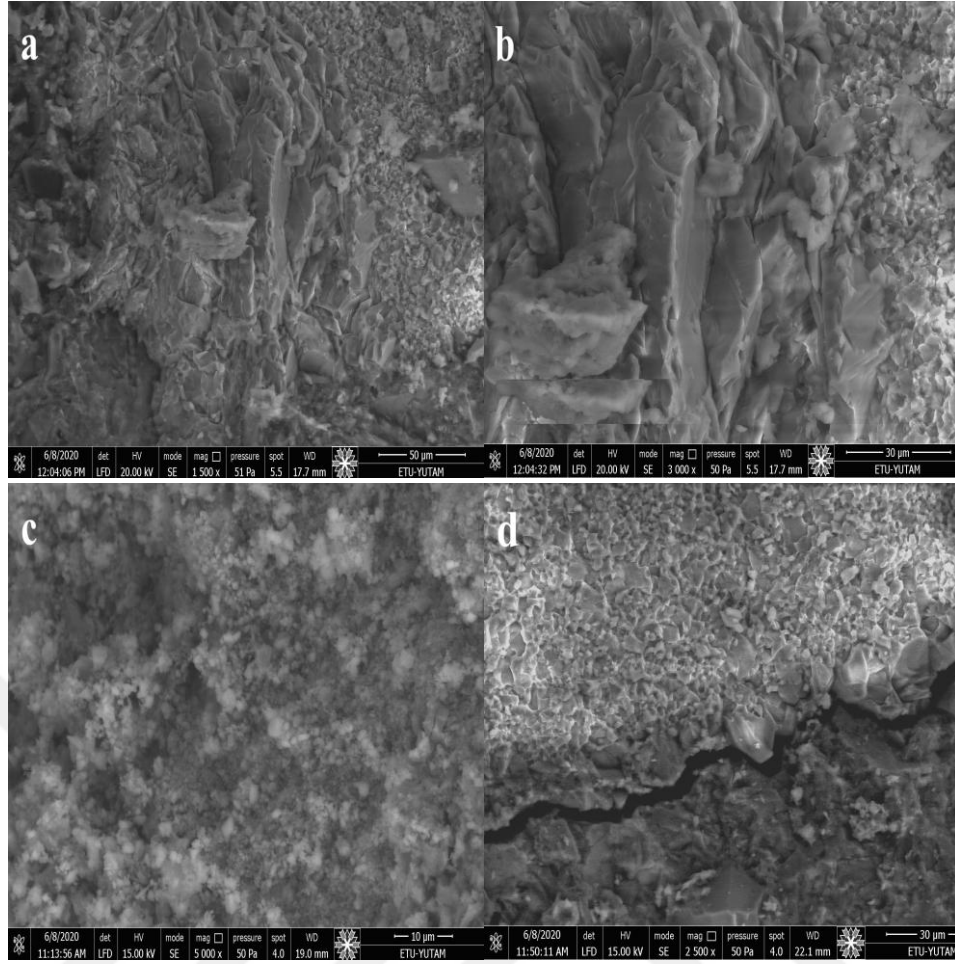
Şekil 63. OT15 grubundaki obsidiyenin SEM/EDS görüntüsü

Şekil 64’de SA60OT15 beton grubundan alınan numuneye ait SEM görüntüleri verilmiştir. Şekil 64(a) ve (b) incelendiğinde betondaki boşluk miktarının fazlalığı ve çatlakların düzlem boyunca ilerlediği görülmektedir. Bu nedenle SA60OT15 beton grubunda dayanımın 28 gün sonunda kontrol betonuna göre kısmen düşük çıktığı öngörülmektedir



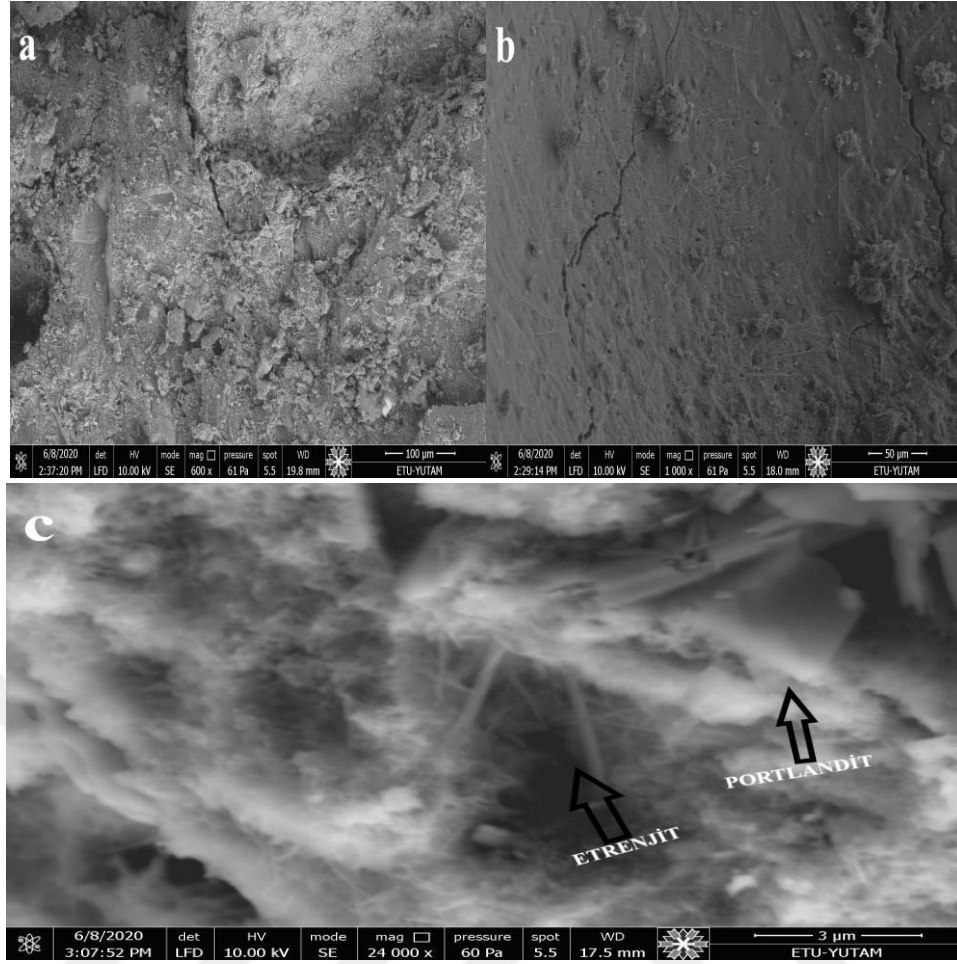
Şekil 64. SA60OT15 grubuna ait SEM görüntüleri

Şekil 65’de SA60ÇC5 beton grubuna ait numunenin SEM görüntüleri verilmiştir. Şekil 65 incelendiğinde betonun boşluk oranının çok az olduğu ve çinko cürufunun beton içerisindeki boşlukları doldurarak kompakt bir beton elde edilmesini sağladığı öngörülmektedir. Bu durumun SA60ÇC5 beton grubunda düşük kılcal geçirimsiliğe sebep olduğu düşünülmektedir. Şekil 65(c)’de beton içerisindeki C-S-H yapılarının yoğun olduğu görülmekte ve Şekil 65(d)’de ise belirgin bazı boşlukların olduğu görülmektedir. Bu nedenle SA60ÇC5 beton grubu her ne kadar kompakt bir yapıya sahip olsa da boşluklardan dolayı meydana gelen kısmi zayıflıkların bu betonun basınç dayanımını (KB’ye göre %-3,7) olumsuz etkilediği düşünülmektedir.



Şekil 65. SA60ÇC5 grubuna ait SEM görüntüleri

Şekil 66’da SA60OT15ÇC5 beton grubuna ait numunenin SEM görüntüleri verilmiştir. Şekil 66(a)’da beton numunesinin genel SEM görüntüsü verilmiş olup oluşan küçük boşluklar ve oluşan ince çatlaklı hasarlar şekilde görülmektedir. Şekil 66(b)’de ise beton içerisinde ince çatlakların olduğu ve Şekil 66(c)’de ise beton içerisinde oluşan portlandit ve etrenjitin SEM görüntüleri görülmektedir. SA60OT15ÇC5 beton numunesinde genel itibari ile oluşan ince çatlakların ve boşlukların olması dayanımında kısmen düşüşe sebep olacağı öngörülmektedir.

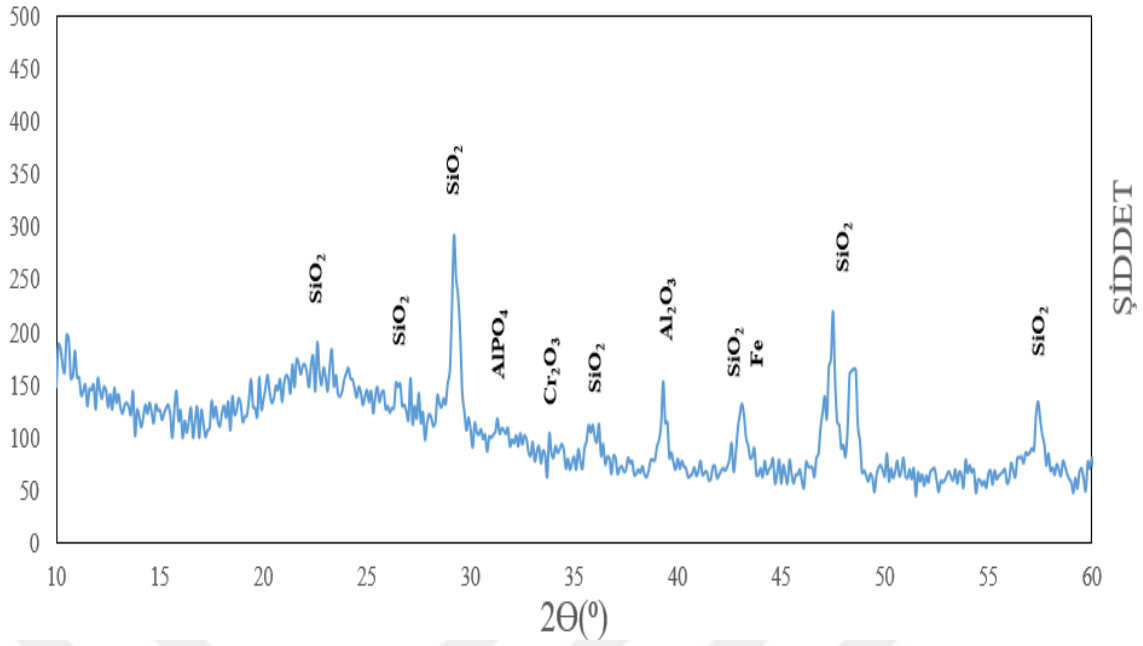


Şekil 66. SA60OT15ÇC5 grubuna ait SEM görüntüleri

X Işını difraksiyonu (XRD) analizi

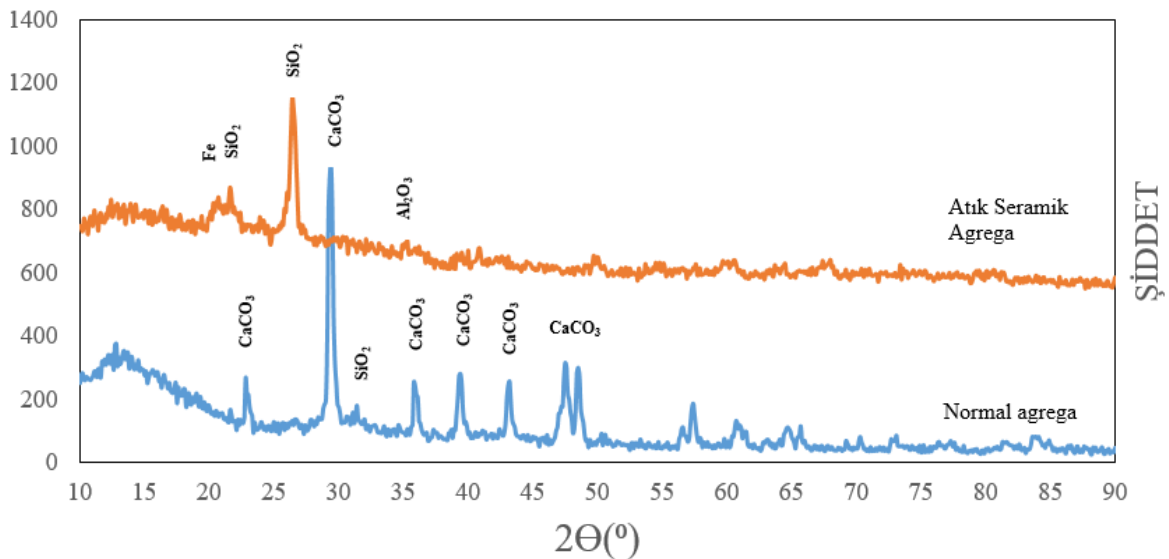
Malzemelerin her birinin kendine özel çeşitli kristal yapıları bulunmaktadır. X ışını difraksiyonu analizi ile numune tahrip olmadan içyapısında bulunan kristaller belirlenebilir.

Şekil 67’de obsidiyene ait XRD analiz grafiği verilmektedir. Şekil 67’de obsidiyenin büyük bir çoğunluğunun SiO_2 ’den oluştuğu ve ikinci ana bileşenin de Al_2O_3 olduğu görülmektedir. Analizde silisyum dioksit ek olarak volkanik kayalarda bulunabilen kromyum ve demire rastlandığı görülmektedir.



Şekil 67. Obsidiyenin XRD analizi

Şekil 68’de normal (ince) agregaya ve seramik atığa ait XRD analizi grafikleri verilmiştir. Normal ince agregada, kalker pik seviyesinin güçlü olduğu Şekil 68’de görülmektedir. İnce agregada olarak betonda kullanılan seramik atık agregalarının XRD analizine ait grafik incelendiğinde ise SiO_2 (kuvars) pik seviyesinin güçlü olduğu ve daha zayıf piklerde de demir elementi ile Al_2O_3 bileşenine rastlandığı belirlenmiştir. İnce agregada yerine seramik atık agregası kullanılan beton gruplarında basınç ve çekme dayanımlarının arttığı, bunun sebebi olarak iki agreganın XRD analizlerinin karşılaştırıldığı Şekil 68’de görüldüğü üzere ince seramik agregasının sahip olduğu yüksek SiO_2 sayesinde kısmen de olsa puzolanik reaksiyon oluşturabilmesi ve boşlukları doldurarak daha kompakt bir yapı oluşturması olarak öngörülmektedir.



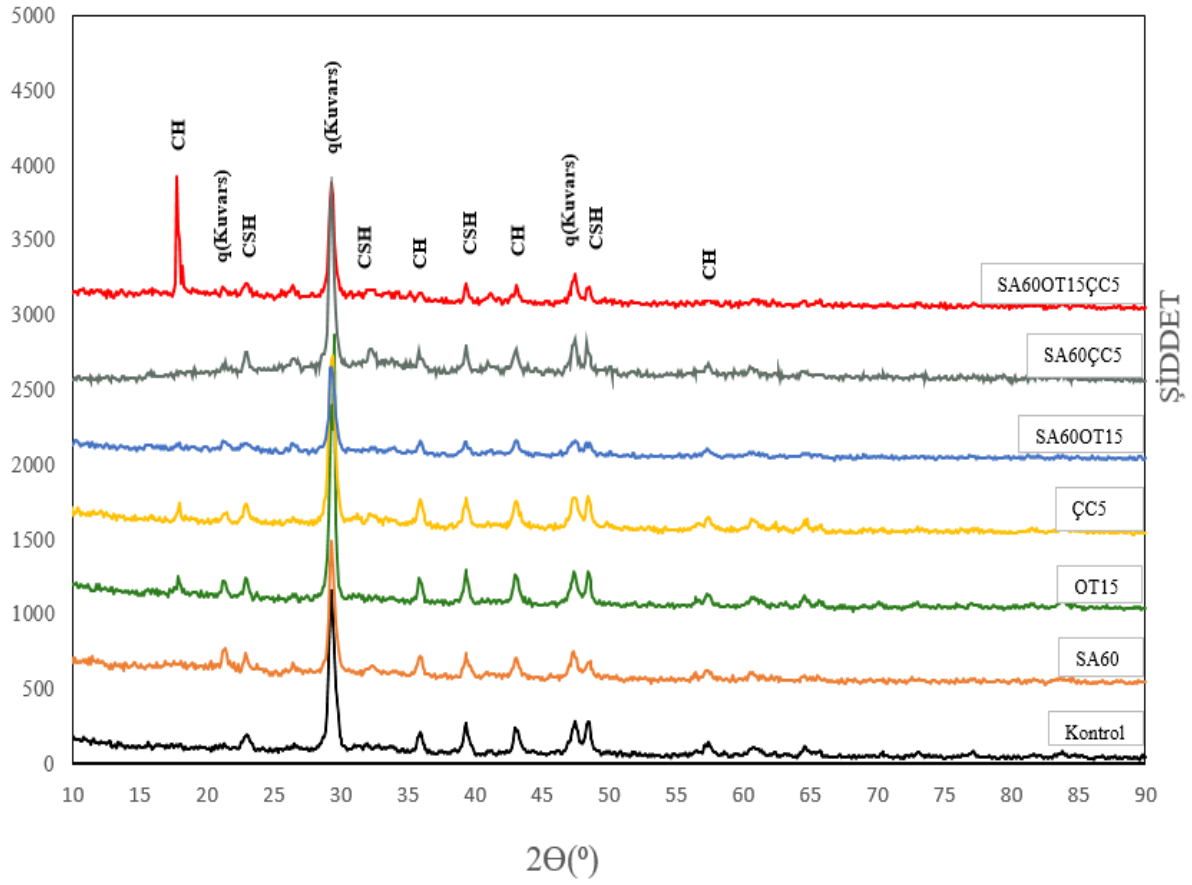
Şekil 68. Normal (ince) agregada ile atık seramik agreganın XRD analizi

XRD analizi her bir beton grubundan alınan numunelere yapılmış olup her gruba ait XRD analiz grafiği Şekil 69'da verilmiştir. Şekil 69 incelendiğinde her grupta en güçlü pik değeri Q (Kuars) mineraline aittir. Bu mineralle birlikte beton gruplarına ait numunelerde C-S-H ve CH piklerinin de olduğu görülmüştür. CH pik şiddetinin zayıf olduğu SA60ÇC5 beton grubunda basınç dayanımının kontrol betonuna yaklaşık eş değer olarak çıkması ve bu durumun sebebi olarak içeriğindeki çinko cürufunun CH ile reaksiyonu sonucunda C-S-H oluşuma katkı vermesi öngörülebilir ve yine bu grupta kılcal su emmenin en az olması çinko cürufunun CH ile puzolanik reaksiyon sonucunda C-S-H oluşturarak boşlukları doldurması kuramını da destekler niteliktedir.

SA60OT15ÇC5 beton grubuna ait XRD grafiği incelendiğinde CH pik şiddetinin güçlü olduğu görülmektedir. Bu grupta yapılan SEM analizinde de CH ve etrenjit görüntülerine (Şekil 66(c)) yoğun olarak rastlanması bu grafiğin oluşmasını desteklemektedir. Şekil 69 incelendiğinde bu grupta oluşan C-S-H piklerinin kontrol betonundakilere göre kısmen zayıf olduğu ve bu durumun sebebi olarak içeriğindeki obsidiyen ve çinko cürufunun henüz yeterli puzolanik reaksiyon gösterememiş olması düşünülmektedir. Yetersiz puzolanik reaksiyon sonucunda C-S-H miktarı yeterli seviyelere ulaşamayacağından basınç dayanımındaki azalma kaçınılmaz olacaktır.

SA60OT15 ile SA60OT15ÇC5 beton gruplarına ait numunelerin XRD grafikleri birlikte incelendiğinde oluşan kuvars ve C-S-H pik şiddetleri, SA60OT15ÇC5 grubunda daha güçlü olması sonucu, basınç dayanımının SA60OT15 grubuna göre daha yüksek olması sonucuyla desteklenmektedir. Ayrıca SA60OT15ÇC5 grubunda bulunan çinko cürufunun beton içerisinde boşlukları doldurması ve puzolanik reaksiyona katkı vermesi nedeniyle SA60OT15 grubuna göre basınç dayanımında kısmen iyileşme olduğu öngörülmektedir.

En yüksek basınç dayanımı gösteren SA60 beton grubuna ait numunenin XRD analizi grafiği kontrol grubunun grafiği ile karşılaştırıldığında büyük oranda benzer olduğu ve SA60 beton grubunun basınç ve çekme dayanımının kontrol grubuna göre daha yüksek olması; SA60 beton grubunun sahip olduğu yüksek işlenebilirliğin etkisi ile daha az boşluklu ve Şekil 68'de görüldüğü üzere seramik atıkların içeriğinde yüksek miktarda silis bulunması nedeniyle ince agrega olarak katılması sonucunda azda olsa beton içerisinde oluşabilecek puzolanik reaksiyonun olumlu etkisi ile açıklanabilir.



Şekil 69. Beton gruplarına ait XRD grafikleri

SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışma iki aşamada gerçekleştirilmiş olup ilk aşamada çinko cürufunun ve obsidiyen tozunun literatürden yapılan araştırmalar sonucunda ideal oranları belirlenip 7 ve 28 günlük pozolanik aktivite indeksleri tespit edilmiştir. İkinci aşamada ise belirlenen bu pozolanik özellik gösteren optimum oranlara göre beton grupları üretilmiştir. Beton gruplarında ince agrega yerine kullanılan seramik atık malzemesi literatürdeki basınç ve eğilme dayanımlarında en iyi sonucu verdiği %60 oranı esas alınarak kullanılmıştır. Üretilen beton numuneleri üzerinde taze betonda; slump ve birim hacim ağırlık deneyi sertleşmiş betonda ise; basınç, eğilmede çekme, kılcal geçirimsizlik, ultrases darbe hızı, beton test çekici deneyleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca sertleşmiş beton deneyleri sonunda beton gruplarından numuneler alınarak SEM-EDS ve XRD analizleri yapılmıştır. Araştırma Bulguları ve Tartışma bölümünde elde edilen değerlerden çıkarılan sonuçlar incelenirse;

- Çalışmanın ilk aşamasında obsidiyen tozunun ve çinko cürufunun çimento yerine belirlenen oranlarda kullanılması ile üretilen harç numunelerinin 7 ve 28 günlük pozolanik aktivite indeksleri incelendiğinde her iki kür süresinde de en yüksek oran; obsidiyen için %15, çinko cürufu için %5 oranında elde edilmiştir. Obsidiyen tozunda %15 oranından sonra pozolanik aktivite indeksinin azalışa geçmesinin sebebi olarak obsidiyen miktarının artışına bağlı olarak topaklaşmanın olduğu öngörülmektedir. Çinko cürufu için pozolanik aktivite indeksinin %5 oranından sonra azalışa geçmesinin sebebi de topaklaşma olduğu ve bu durumun iç yapıda boşluklar oluşturduğu şeklinde yorumlanabilir. Her iki malzemenin de TS EN 450-1 (Anonim 2013) ve TS EN 15167-1 (Anonim 2006) standartlarına göre pozolan olarak kullanılabileceği belirlenmiştir.

İkinci aşamada 28 gün standart su kürü sonunda yöntem kısmında verilen deneylere ait sonuçlar incelenirse;

- Birim hacim ağırlık deneyi sonucunda, SA60 beton karışımının kontrol karışımına göre daha hafif olduğu ve birim hacim ağırlığı en düşük beton karışımının SA60OT15 karışımı olduğu belirlenmiştir. Genel olarak seramik atığın ve obsidiyen tozunun betonun birim hacim ağırlığını azalttığı fakat çinko cürufunun kısmen birim hacim ağırlığı artırdığı gözlemlenmiştir.
- Üretilen karışımlarda en yüksek basınç dayanımı SA60 karışımında elde edilmiştir. Seramik malzemesinin sahip olduğu yüksek sertlik özelliğinin bu sonuca katkı sağladığı öngörülmektedir. Kullanılan malzeme miktarına göre elde edilen dayanım farklarının çok düşük olup üretilen karışımların dayanımlarının kontrol karışımına eş değer olduğu

belirlenmiştir. Ayrıca seramik atık agregası ve obsidiyen tozu içeren karışıma çinko cürufu ikamesi ile dayanımın olumlu etkileneceği belirlenmiştir.

- Eğilmede çekme dayanımında optimum dayanım SA60ÇC5 karışımında elde edilmiştir. Seramik atık agregası içeren bütün karışımların eğilmede çekme dayanımlarının kontrol betonun çekme dayanımından daha yüksek olduğu belirlenmiştir.
- Üretilen beton karışımlarının tümünün kılcal su emme miktarı kontrol karışımından daha düşük olduğu tespit edilmiş olup ayrıca kullanılan üç malzemenin de betonun kılcal su emme miktarını düşürdüğü belirlenmiştir. En düşük kılcal su emme miktarı SA60ÇC5 karışımında elde edilmiş olup karışımlarda kullanılan malzemelerin betonun kılcal su emmesinin azalmasına etkisi seçilen kullanım oranları için sıralanırsa; seramik atık>çinko cürufu>obsidiyen tozu olduğu görülmüştür.
- Beton karışımlarının ultrases darbe hızları ve beton test çekici (Schmidt) sonuçları incelendiğinde en yüksek değerin SA60 karışımında elde edildiği ve bu iki deneyin sonuçları ile beton basınç deneyi sonuçları arasında oluşturulan korelasyon eğrileri ve katsayıları incelendiğinde, 28 günlük betonun ultrases darbe hızları ve test çekici sonuçlarının basınç dayanımı sonuçları ile uyumlu olduğu belirlenmiştir.
- Sertleşmiş beton numunelerindeki SEM-EDS ve XRD analiz sonuçlarının mekanik deneyleri destekler tarzda olduğu ve bu analizlere göre çinko cürufu ile Pasinler obsidiyeninin beton içerisinde pozolanik reaksiyon göstererek boşlukları doldurabildiği belirlenmiştir. SEM-EDS analizlerinde beton gruplarında dayanımı düşüren etrenjit çubuklarına ve portlandit görüntülerine rastlanılmıştır. Ayrıca XRD analizi sonucunda anabilesenlerin Pasinler obsidiyeninde ve seramik atık ince agregasında SiO_2 , normal ince agregada CaCO_3 olduğu tespit edilmiştir.

Diğer araştırmacılar için;

- Obsidiyen, çinko cürufu ve seramik atığın agrega olarak birlikte kullanılması ile üretilen betonların farklı tür çimento kullanılarak farklı kür şartlarında uzun süreli performans özelliklerinin saptanması
- Farklı karışım oranlarında çinko cürufu ve seramik atığı içeren sürdürülebilir betonların farklı kür şartlarında uzun süreli performans özelliklerinin belirlenmesi konularında çalışmalar yapmaları önerilmektedir.

KAYNAKLAR

- Akköprü, E., Muralı, D., Robin, A.K., Kuzucuoğlu, C. ve Erturaç, M.K., 2017. Doğu anadolu'daki obsidiyen kaynak alanlarının belirlenmesinde jeomorfolojik ve volkanolojik göstergelerin önemi. Türkiye Jeoloji Bülteni, 60(1), 49-61.
- Alameri, I., Oltulu M. and Ardahanlı, M., 2019. Effect of early-age temperature on the behavior of concrete containing silica fume. 3rd International Conference on Advanced Engineering Technologies, Bayburt, Turkey.
- Alweli, M., 2017. Investigation of gamma radiation shielding and compressive strength properties of concrete containing scale and granulated lead-zinc slag wastes. Journal of Cleaner Production, 166, 157-162.
- Alweli, M., 2013. Application of granulated lead–zinc slag in concrete as an opportunity to save natural resources. Radiation Physics and Chemistry, 83, 54-60.
- Anonim, 2003. TS EN 1008: Beton - Karma suyu- Numune alma, deneyler ve beton endüstrisindeki işlemlerden geri kazanılan su dahil, suyun, beton karma suyu olarak uygunluğunun tayini kuralları.
- Anonim, 2004. TS EN 13057: Beton yapılar - Koruma ve tamir için mamul ve sistemler – Deney metotları - Kılcal su emmeye direncin tayini.
- Anonim, 2006. TS EN 15167-1: Ögütülmüş yüksek fırın curufu - Beton, harç ve şerbette kullanım için - Bölüm 1: Tarifler, özellikler ve uygunluk kriterleri.
- Anonim, 2008. TS 25: Doğal puzolan (tras)-Çimento ve betonda kullanılan-Tarifler, gerekler ve uygunluk kriterleri.
- Anonim, 2009. TS EN 1097-7: Agregaların mekanik ve fiziksel özellikleri için deneyler - Bölüm 7: Dolgu malzemesi tane yoğunluğunun tayini - Piknometre yöntemi.
- Anonim, 2010. TS EN 12390-3: Beton-Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 3: Deney numunelerinde basınç dayanımının tayini.
- Anonim, 2012. TS EN 196-5: Çimento deney yöntemleri - Bölüm 5: Puzolanik çimentolarda puzolanik özellik deneyi.
- Anonim, 2012. TS EN 197-1: Çimento - Bölüm 1: Genel çimentolar - Bileşim, özellikler ve uygunluk kriterleri.
- Anonim, 2012. TS EN 12504-4: Beton deneyleri – Bölüm 4: Ultrases geçiş hızının tayini.
- Anonim, 2013. TS EN 450-1: Uçucu Kül - Betonda kullanılan - Bölüm 1: Tarif, özellikler ve uygunluk kriterleri.
- Anonim, 2013. TS EN 1097-6: - Agregaların mekanik ve fiziksel özellikleri için deneyler - bölüm 6: Tane yoğunluğuve su emme oranının tayini.
- Anonim, 2013. TS EN 12504-2: Yapılarda beton deneyleri – Bölüm 2: Tahribatsız muayene - Geri sıçrama sayısının belirlenmesi.
- Anonim, 2014. TS EN 934-2+A1: Kimyasal katkıları - Beton, harç ve şerbet için - Bölüm 2: Beton kimyasal katkıları - Tarifler, gerekler, uygunluk, işaretleme ve etiketleme.
- Anonim, 2016. TS EN 196-1: Çimento deney metotları - Bölüm 1: Dayanım tayini.
- Anonim, 2016. TS 802: Beton karışım tasarımı hesap esasları.
- Anonim, 2017. TS EN 206:2013+A1: Beton- Özellik, performans, imalat ve uygunluk.
- Anonim, 2019. TS EN 12350-6: Beton - Taze beton deneyleri – Bölüm 6: Yoğunluk.
- Anonim, 2019. TS EN 12390-5: Beton - Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 5: Deney numunelerinin eğilme dayanımının tayini.
- Anonim, 2020. <http://www.simbeton.com.tr/p25-betonun-tarihi> (14.08.2020).
- Anonim, 2020. <http://www.taslar.net/obsidyen> (27.06.2020).
- Anonim, 2020 <http://www.yapimalzeme.com.tr/turkiye-seramik-sektorunde-abye-girdi>

(03.09.2020).

- Anonymous, 1992. IS 13311: Non-destructive testing of concrete methods of test, part1.
- Anonymous, 2005. ASTM C618: Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete.
- Ardahanlı, M., Oltulu, M. and Alameri, I., 2019. Evaluation of the mechanical properties of self-compacting concrete containing fly ash subjected to early-age temperature. Hoca Ahmet Yesevi 2. Uluslararası Bilimsel Araştırmalar Kongresi, Erzurum, Turkey.
- Aslan, İ., Oltulu, M. and Karakurt C., 2019. Investigation of the waste zinc slag on the workability and mechanical properties of cement based mortars. 3rd International Conference on Advanced Engineering Technologies, Bayburt.
- Bakar, D., 2005. Demir ve çelik tesislerinin yüksek demir ve karbon içeren atıklarını değerlendirme teknolojileri ve erdemir için önerilen yöntemin tanıtımı. III. Demir Çelik Kongresi ve Sergisi, Zonguldak.
- Baradan, B., Yazıcı H. ve Aydın S., 2012. Beton. Dokuz Eylül Üniversitesi, s 825, İzmir, Türkiye.
- Bigazzi, G., Yeğingil, Zehra., Ercan, T., Öddöne, M. ve Özdoğan, M., 1997. Doğu Anadolu'daki obsidiyen içeren volkaniklerin "Fizyon Track" yöntemiyle yaş tayini. Türkiye Jeoloji Bülteni, 40(2), 57-72.
- Bilgin, A., Polat, S., Bilgin, N. ve Arslan, S., 2012. Erciş obsidyenlerinin mineralojik-petrografik, jeokimyasal özellikleri ve süs taşı olarak değerlendirilmesi üzerinde ön çalışma. Iğdır Univ. J. Inst. Sci. & Tech, 2 (2), 85-92.
- Bilodeau, A., Carette, G. G. and Malhotra, V. M., 1989. Mechanical properties of non-air-entrained high strength concrete incorporating supplementary cementing materials. CANMET, Energy, Mines and Resources, Canada, USA
- Binici, H., 2007. Effect of crushed ceramic and basaltic pumice as fine aggregates on concrete mortars properties. Construction and Building Materials, 21, 1191–1197.
- Binici, H., Görür, E. ve Durgun, M., 2010a. Yüksek fırın cürufu ve bazaltik pomza katkılı betonların mekanik aşınması ve su geçirimsizliği. Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi, 6 (1), 1-10.
- Binici, H., Sevinç, A.H., ve Durgun, M., 2010b. Barit, bazaltik pomza, kolemanit ve yüksek fırın cürufu katkılı betonların özellikleri. KSÜ Mühendislik Bilimleri Dergisi, 13.
- Brindha, D. and Nagan, S., 2010. Utilization of copper slag as a partial replacement of fine aggregate in concrete. International Journal of Earth Sciences and Engineering, 3(4), 579-585.
- Carette, G. G. and Malhotra, V. M., 1983. Earlyage strength development of concrete incorporating fly ash and condensed silica fume. First CANMET/ACI International Conference on the Use of Fly Ash, Silica Fume, Slag and Other Minerals Byproducts in Concrete, Detroit, USA.
- Castillo, E.D.R., Almesfer, N., Saggi, O. and Ingham, J.M., 2020. Light-weight concrete with artificial aggregate manufactured from plastic waste. Construction and Building Materials, 265.
- Ceylan, H. ve Mança, S., 2013. Mermer parça atıklarının beton agregası olarak değerlendirilmesi. Süleyman Demirel Üniversitesi Teknik Bilimler Dergisi, 3(2), 21-25.
- Chaipanich, A., Choopun, S., Sekine, Y. and Nochaiya, T. 2015. Microstructure, characterizations, functionality and compressive strength of cement-based materials using zinc oxide nanoparticles as an additive. Journal of Alloys and Compounds, 630, 1-10.

- Chataigner, C., Işıklı, M., Gratuze, B. and Çıl, V. 2013. Obsidian sources in the regions of Erzurum and Kars (north-east turkey): new data. *Archaeometry*, 1-24.
- Correia R, J., De Brito, J. and Pereira S. A., 2006. Effects on concrete durability of using recycled ceramic aggregates. *Materials and Structures*, 39(2), 169–177.
- Çerçevik, A.E., Toklu, Y.C., Kandemir, S.Y. ve Yaylı, M.Ö., 2018. 3B beton üretimi için mermer tozu ve seramik atıklarının kullanılmasının araştırılması, *SDU International Journal of Technological Science*, 10(2), 57-68.
- Çullu M., 2018. Kurşun-çinko maden artığı kayaçlarla üretilen betonların mekanik ve fiziksel özelliklerinin araştırılması. *Politeknik Dergisi*, 21(2), 427-435.
- De Britob, J. and Evangelista, L., 2007. Mechanical behaviour of concrete made with fine recycled concrete aggregates. *Cement and Concrete Composites*, 29 (5), 397-401.
- Demir, İ., 2009. Aynı oranlarda ikame edilen silis dumanı ve uçucu külün betonun mekanik özelliklerine etkisi. *Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi*, 1(2), 1-8.
- Ercan, T., Yeğingil, Z., Bigazzi, G., Öddöne, M. ve Özdoğan, M., 1990. Kuzeybatı anadolu obsidiyen buluntularının kaynak belirleme çalışmaları. *Jeoloji Mühendisliği*, 36, 19-32.
- Erdoğan, S. ve Erdoğan, T., 2007. Pozolanik mineral katkılar ve tarihi geçmişleri. *Yapılarda Kimyasal Katkılar SEMpozyumu*, Ankara.
- Gaitero, J.J., Perez, G., Erkizika, E., Kaltzakorta, I., Jimenez, I. ve Guerrero, A., 2015. Synthesis and characterization of epoxy encapsulating silica microcapsules and amine functionalized silica nanoparticles for development of an innovative self-healing concrete. *Materials Chemistry and Physics*. 165, 39-48.
- Ganjian, E., Khorami, M. and Maghsoudi, A.A., 2009. Scrap-tyre-rubber replacement for aggregate and filler in concrete. *Construction and Building Materials*, 23(5), 1828-1836.
- Gao, S., Zhao, G., Guo, L., Zhou, L. and Yuan, K., 2020. Utilization of coal gangue as coarse aggregates in structural concrete. *Construction and Building Materials*.
- González-Ortega, M.A., Segura, I., Cavalaro, S.H.P., Toralles-Carbonari, B., Aguado, A. and Andrello, A.C., 2014. Radiological protection and mechanical properties of concretes with EAF steel slags. *Construction and Building Materials*, 51, 432-438.
- Gora, J. and Piasta, W., 2020. Impact of mechanical resistance of aggregate on properties of concrete. *Case Studies in Construction Materials*, 13.
- Görhan, G. ve Şimşek, O., 2011. Betonun fiziksel ve mekanik özelliklerine pirinç kabuğu külünün etkisi. *Electronic Journal of Construction Technologies*, 7 (1), 107-117.
- Gündeşli, U., 2008. Uçucu kül, silis dumanı ve yüksek fırın cürufunun beton ve çimento katkısı olarak kullanımı üzerine bir kaynak taraması. *Yüksek Lisans Tezi*, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- Huang, J., Luo, Z. and Khan, M.B.E., 2020. Impact of aggregate type and size and mineral admixtures on the properties of pervious concrete: An experimental investigation. *Construction and Building Materials*, 265.
- Jian, S.M. and Wu, B., 2020. Compressive behavior of compound concrete containing demolished concrete lumps and recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*.
- Kalınçimen, G., Öztürk U, A., Kaplan, G. ve Yıldız A. S., 2015. Seramik atıklarının çimento ikame malzemesi olarak kullanılması ve asit dayanıklılığının incelenmesi. *Kastamonu Üniversitesi Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, 1(1), 9-16.
- Karpuz, O. ve Akpınar, M., 2009. İnce agrega türünün kaplama betonunun aşınma direncine etkisi. *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 5 (2), 1-8.

- Kaya, A. and Ustabaş, İ., 2018. Comparing the pozzolanic activity properties of obsidian to those of fly ash and blast furnace slag. *Construction and Building Materials*, 164, 297-307.
- Keshavarz, Z. and Mostofinejad, D., 2019. Porcelain and red ceramic wastes used as replacements for coarse aggregate in concrete. *Construction and Building Materials*, 154, 218-230.
- Khaloo, A.R., Dehestani, M. and Rahmatabadi, P., 2008. Mechanical properties of concrete containing a high volume of tire-rubber particles. *Waste Manage*, 28(12), 2472-2482.
- Kılıç, A., Atış, D., Teymen, O., Karahan, F. and Bilim, M., 2008. The influence of aggregate type on the strength and abrasion resistance of high strength concrete. *Cement and Concrete Composites*, 30(4), 290-296.
- Kou, S.C., Poon, C.S. and Agrela, F., 2011. Comparisons of natural and recycled aggregate concretes prepared with the addition of different mineral admixtures. *Cement and Concrete Composites*, 33(8), 788-795.
- Köken, A., Köroğlu, M.A. ve Yonar, F., 2008. Atık betonların beton agregası olarak kullanılabilirliği. *Selçuk Teknik Dergisi*, 7(1), 86-97.
- Kurowa, R., Tsuji, M., Sawamoto, T. and Tanaka, Y., 1999. Effect of water condition in aggregate and mixing procedure under decreased pressure on compressive strength of recycled aggregate concrete. *JCA Proc. Cem. Concrete*, 53, 535-542.
- Li, Chenzhi., 2020. Mechanical and transport properties of recycled aggregate concrete modified with limestone powder. *Composites Part B: Engineering*, 197.
- Liu, S., Liu, H.Q. and Xing, S., 2018. Prediction of water transport and distribution of the gangue concrete. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 37(3), 786-791.
- Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü Kurumu, 2018.
- Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü https://www.mta.gov.tr/v3.0/sayfalar/hizmetler/images/b_h/kur_cin.jpg (05.03.2020).
- Manoharan, P.D. and Senthamarai, R.M., 2005. Concrete with ceramic waste aggregate”, *Cement and Concrete Composites*, 27 (9–10), 910-913.
- Medina, C., Sánchez de Rojas, M.I. and Frías, M., 2012. Reuse of sanitary ceramic wastes as coarse aggregate in eco-efficient concretes. *Cement and Concrete Composites*, 34, 48-54.
- Mindes, S. and Young, J.F., 1981. *Concrete*. Prentice Hall Inc, New Jersey, USA.
- Mohammed, A., Mohammed, I. and Mohammed, S., 2019. Some properties of concrete with plastic aggregate derived from shredded PVC sheets. *Construction and Building Materials*, 201, 232–245.
- Mosavinezhad, S. and Nabavi, S., 2012. Effect of 30% Ground granulated blast furnace, lead and zinc slags as sand replacements on the strength of concrete. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 16, 989–993.
- Naik, T., Singh, S. and Hossain, M., 1994. Abrasion resistance of concrete as influenced by inclusion of fly ash. *Cement and Concrete Research*, 24 (2), 303-312.
- Oner, A. and Akyuz, S., 2007. An experimental study on optimum usage of GGBS for the compressive strength of concrete. *Cement and Concrete Composites*, 29, 505-514.
- Öztürk, Z., Bağiran, M., Sağlar, B., Arslan, L. ve Aycan, Ş., 2018. Agregası olarak çinko madeni cürufu kullanımının beton basınç dayanımına etkisi. *International Journal of Engineering Research and Development*, 10 (2), 144-152.
- Poyraz, M. ve Yılmaz, Z., 2017. Seramik karo sektöründe sürdürülebilirlik ve geri dönüşüm. *Anadolu Üniversitesi Sanat & Tasarım Dergisi*, 256-270.

- Rashad M. A., 2013. Preliminary study on the effect of fine aggregate replacement with metakaolin on strength and abrasion resistance of concrete. *Construction and Building Materials*, 44, 487–495.
- Rashid, K., Razzaq, A., Ahmad, M., Rashid, T. and Tariq, S., 2017. Experimental and analytical selection of sustainable recycled concrete with ceramic waste aggregate. *Construction and Building Materials*, 154, 829-840.
- Rosca, B. and Corobceanu, V., 2020. Structural grade concrete containing expanded polystyrene beads with different particle distributions of normal weight aggregate. *Materials Today: Proceedings*, 1-7.
- Siddique, R., 2004. Performance characteristics of high-volume Class F fly ash concrete. *Cement and Concrete Research*, 34, 487-493.
- Siddique, S., Chaudhary, S., Shrivastava, S. and Gupta, T., 2019. Sustainable utilisation of ceramic waste in concrete: Exposure to adverse conditions. *Journal of Cleaner Production*, 210, 246-255.
- Silva, R.V., De Brito, J. and Dhir, R.K., 2014. The influence of the use of recycled aggregates on the compressive strength of concrete: a review. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 19(7), 825-849.
- Şengül, Ö., Taşdemir, C., Koruç, Ş. ve Sönmez, R., 2003. Agregat türünün betonun donma - çözülme dayanıklılığına etkisi. III Ulusal Kırmataş SEMpozyumu, İstanbul.
- Tam, V.W.Y. and Tam, C.M., 2008. Diversifying two-stage mixing approach (TSMA) for recycled aggregate concrete: TSMA s and TSMA sc. *Construction and Building Materials*, 122(10), 2068-2077.
- Temiz, H., Binici, H. ve Zülfikadiroğlu, F., 2009. Termik santral külü katkılı betonların yol kaplaması yapımında kullanılabilirliğinin Araştırılması. Fırat Üniversitesi, Mühendislik Bilimleri Dergisi, 21(1), 53-61.
- Terro, M.J., 2006. Properties of concrete made with recycled crushed glass at elevated temperatures. *Building and Environment*, 41(5), 633-639.
- Torkittikul, P. and Chaipanich, A., 2010. Utilization of ceramic waste as fine aggregate within Portland cement and fly ash concretes. *Cement and Concrete Composites*, 32, 440-449.
- Türkiye Atom Enerjisi Kurumu, 2018.
- Türkiye Mühendisler ve Mimarlar Odası Birliği Jeoloji Mühendisleri Odası, <https://www.jmo.org.tr> (12.11.2019).
- Ustabaş, İ. ve Ömür, İ., 2019. Rize yöresi obsidyeninin çimentonun hidratasyon ısısına etkisi. *Neveşehir Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 8(1), 78-87.
- Vieira, G.L., Schiavon, J.Z., Borges, P.M., Silva, S.R.D. and Andrade, J.J.D.O., 2020. Influence of recycled aggregate replacement and fly ash content in performance of pervious concrete mixtures. *Journal of Cleaner Production*.
- Yang, H., Liang, D., Deng, Z. and Qin, T., 2018. Effect of limestone powder in manufactured sand on the hydration products and microstructure of recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 1045-1049.
- Yazıcı, Ş. and Sezer, G.İ., 2007. Abrasion resistance estimation of high strength concrete. *Pamukkale University Engineering College Journal Of Engineering Sciences*, 13 (1), 1-6.
- Yazıcıoğlu, S., Gönen, T. ve Çobanoğlu, Ö.C., 2005. Elazığ ferrokrom çürüğünün betonun basınç dayanımı ve çarpma enerjisi üzerine etkisi. *Fırat Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilim Dergisi*, 17(4), 681-686.
- Zegardlo, B., Halicka, A. and Ogrodnik, P., 2013. Using ceramic sanitary ware waste as concrete aggregate. *Construction and Building Materials*, 48, 295-305.

- Qasrawi H., Shalabi, F. and Asi, I., 2009. Use of low CaO unprocessed steel slag in concrete as fine aggregate. *Construction and Building Materials*, 23, 1118–1125.
- Wong, H.S. and Razak, H.A., 2005. Efficiency of calcined kaolin and silica fume as cement replacement material for strength performance. *Cement and Concrete Research*, 35, 696–702.



ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı:	Metehan ARDAHANLI
Doğum tarihi:	2 Ocak 1995
Doğum Yeri:	Palandöken/Erzurum
Uyruğu:	T.C.
Adres:	Erzurum Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü
Tel:	05554339686
E-mail:	metehan.ardahanli@erzurum.edu.tr
Eğitim	
Lise:	Erzurum Anadolu Lisesi
Lisans:	Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü(2013-2017)
Yüksek lisans:	Atatürk Üniversitesi, Fen bilimleri Enstitüsü, Yapı Malzemeleri Anabilim Dalı (2020)
Doktora:	
Yabancı Dil Bilgisi	
İngilizce:	İyi
Üye Olunan Mesleki Kuruluşlar	
İnşaat Mühendisler Odası, 2019	
Tezden Üretilmiş Yayınlar	