

**BETON ÜRETİMİNDE BOR ATIKLARININ
PUZZOLAN MATERYAL OLARAK
KULLANILABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI**
Aylin AKYILDIZ
Doktora Tezi
Biyosistem Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Yrd. Doç. Dr. Can Burak ŞİŞMAN

2012

T.C.
NAMIK KEMAL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DOKTORA TEZİ

BETON ÜRETİMİNDE BOR ATIKLARININ PUZZOLAN MATERYAL
OLARAK KULLANILABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI

Aylin AKYILDIZ

BİYOSİSTEM MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMAN: Yrd. Doç. Dr. Can Burak ŞİŞMAN

TEKİRDAĞ-2012

Her hakkı saklıdır

ÖZET

Doktora Tezi
BETON ÜRETİMİNDE BOR ATIKLARININ PUZZOLAN MATERYAL
OLARAK KULLANILABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI
Aylin AKYILDIZ

Namık Kemal Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Biyosistem Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Can Burak ŞİŞMAN

Günümüzde endüstriyel yönden büyük gelişmeler kaydedilmektedir. Endüstriyel gelişime paralel olarak meydana gelen endüstriyel atıkların azaltılması, mevcut atıkların potansiyel ham madde kaynağı olarak değerlendirilmesi, kullanılmış ham maddelerin yeniden kullanılması gibi atık yönetimi konuları giderek önem kazanmaya başlamıştır. İnşaat endüstrisinde, ekonomik ve çevresel etkenlerden dolayı, geleneksel malzeme yerine atık malzemelerin kısmen ya da tamamen kullanımı artış göstermektedir. İnşaat sektörünün en önemli malzemelerinden birisi ise betondur. Betonda çimento yerine kullanılacak malzemeler arasında çeşitli sanayi atıkları gelmektedir. Ülkemizde dünya rezervinin çok büyük bir kısmına sahip olduğu bor ve bor endüstrisi atıkları da bu amaçla kullanılacak atıklar arasında yer almaktadır.

Bu çalışmada, bor atığı ve zeolit gibi zengin yer altı kaynaklarına sahip olduğumuz minerallerin beton üretiminde değerlendirilmesi ve betonun dayanım ve dayanıklılığı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Bu amaçla çimento, bor atığı, zeolit üzerinde kimyasal, fiziksel, mekanik, mineralojik analizler gerçekleştirilmiştir. Üretilen her bir beton türü üzerinde taze beton deneyleri yapılmış, 150x150x150 mm'lik küp şeklindeki kalıplara yerleştirilmiştir. Yirmi dört saat kalıpta tutulduktan sonra kalıptan çıkarılarak 23±2 °C kirece doygun suda 7, 28 ve 56 gün bekletilmiştir. Daha sonra sudan çıkarılan beton numuneleri üzerinde basınç, yarma, ses geçiş hızı, su emme ve donma-çözülme deneyleri ile dayanım ve dayanıklılık özellikleri araştırılmış ve betonda ve hafif betonda bor atığı katkısının etkisi araştırılmıştır. Araştırma sonuçlarına göre normal betonda %3 katkının 7 günlük basınç dayanımı değeri 13.69 MPa iken 56 günlük basınç dayanımı 25.73 MPa olarak bulunmuştur. 56 günlük basınç dayanımında % 88 artış görülmüştür. Hafif agregalı betonda ise %3 katkının 7 günlük basınç dayanımı değeri 9.40 MPa iken 56 günlük basınç dayanımı 15.02 MPa olarak bulunmuştur. Basınç ve yarma dayanımı sonuçları %3 bor atığı katkısının betonun dayanım özelliklerini uzun vadede iyileştirdiğini göstermiştir. Ayrıca %3 katkılı betonların su emme yüzdesinin şahit numuneye yakın değer aldığı görülmüştür. Özellikle bor atığı katkılı betonların uzun vadede dayanımının arttığı ve bor atığı katkısının puzzolonik materyal olarak kullanılabilir olduğunu göstermiştir. Sonuç olarak; bor atığının betona katkı olarak kullanılabileceği görülmüştür.

Anahtar kelimeler: Beton, Bor atığı, Dayanım, Katkı, Zeolit

Hazırlanan Doktora Tezi, NKÜ BAP tarafından NKUBAP.00.24.DR.11.02 no'lu proje olarak desteklenmiştir.

ABSTRACT

Ph.D. Thesis

INVESTIGATION OF USABILITY OF BORIC WASTE AS A POZZOLANIC MATERIAL IN PRODUCTION OF CONCRETE

Aylin AKYILDIZ

Namık Kemal University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Biosystems Engineering

Supervisor: Assist. Prof. Can Burak ŞİŞMAN

Nowadays, there has been development in the industrial fields. Thus with development, industrial waste management policy such as recycle of wastes, using waste as new raw materials etc. becomes very important. In the civil engineering field, the use of waste materials partially or totally, instead of conventional materials has increased due to the economical and environmental reason. In this field concrete is one of the most important materials. Boron minerals and components are used in the production of different materials and products in different industrial applications.

In this research utilization of minerals that are highly available in our country such as boron waste in production of concrete and effect of these minerals on strength and durability of concrete were investigated. For this purpose chemical, physical, mechanical, mineralogical, molecular, electrokinetic's, and simultaneous thermal analyses were performed on the binders. Concrete have been produced with the constituent combinations of normal concrete. Several fresh concrete tests have been performed on the produced concrete types and then fresh concrete was placed to 150x150x150 mm cubic moulds. After keeping in the mould for 24 hours, the concrete samples have been taken out of the moulds and placed in lime saturated water bath for duration of 28 days under a temperature of $23\pm 2^{\circ}\text{C}$. After the end of 7, 28 and 56 days periods, on each of the concrete types particular characteristics of concrete and lightweight concrete strength and durability were investigated. As a result of experiments, compressive strength of boron waste added normal concretes, with ascending ratio of waste content 3% is found 13.69 MPa in 7 days, 25.73 MPa in 56 days respectively. 56 days compressive strength increased by 88%. Compressive strength of boron waste added lightweight concretes, with ascending ratio of waste content 3% is found 9.40 MPa in 7 days, 15.02 MPa in 56 days respectively. 56 days compressive strength increased by 59%. The results of the compressive and splitting strength tests showed that 3% boron waste additives improves the strength characteristics of the concrete in long terms. In conclusion, results of analyses have shown that using binders like boron concrete could be produced.

Keywords : Additive, Boron waste, Concrete, Strength, Zeolite

This study was supported by University of Namık Kemal as BAP Project numbered NKUBAP.00.24.DR.11.02

2012, 112 pages

ÖNSÖZ

Hazırlamış olduğum bu tez çalışmasında her zaman ilgi ve teşvikleri ile beni yönlendiren danışman hocam Yrd. Doç. Dr. Can Burak ŞİŞMAN'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Deneysel çalışmalar süresince, laboratuvar olanaklarının kullanımı konusunda desteğini esirgemeyen Namık Kemal Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dekanı Prof. Dr. Ahmet İSTANBULLUOĞLU'na, Tarımsal Yapılar ve Sulama Bölüm Başkanı Prof. Dr. Ahmet Nedim YÜKSEL'e ve Çorlu Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölüm Başkanı Yrd. Doç. Dr. Zekeriya AYDIN'a ve Yrd. Doç. Dr. Ayşe KOPUZ'a, deneysel çalışmalarımın gerçekleşmesinde benden ilgi ve desteğini esirgemeyen Arş. Gör. H. Cömert KURÇ'a ve Arş. Gör. Erhan GEZER'e ve malzeme temininde yardımcı olan Levent ÖZMEN'e teşekkürlerimi sunarım.

Bugünlerimi borçlu olduğum manevi desteğini hiçbir zaman esirgemeyerek her zaman yanımda olan annem Serpil AKYILDIZ'a, babam Muhittin AKYILDIZ'a kardeşlerim İmren AKYILDIZ'a ve Neslihan AKYILDIZ'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Aylin AKYILDIZ

İÇİNDEKİLER

	Sayfa No
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
ÖNSÖZ.....	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
SİMGELER DİZİNİ ve KISALTMALAR DİZİNİ	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	x
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ÖZETLERİ	4
2.1. Beton.....	4
2.1.1. Betonu oluşturan malzemeler	5
2.1.1.1. Agregalar	5
2.1.1.2. Çimento	6
2.1.1.3. Su.....	6
2.1.2. Betonun fiziksel ve mekanik özellikleri	7
2.1.2.1. İşlenebilirlik.....	7
2.1.2.2. Dayanıklılık	7
2.1.2.3. Dayanım	8
2.1.2.4. Agregas- matris aderansı.....	11
2.1.3. Betonun sınıflandırılması	11
2.2. Hafif Beton	12
2.2.1. Hafif betonun fiziksel ve mekanik özellikleri	13
2.2.1.1. İşlenebilirlik.....	13
2.2.1.2. Dayanıklılık	14
2.2.1.3. Dayanım	14
2.2.1.4. Agregas- Matris Aderansı	16
2.3. Hafif betonların sınıflandırılması	17

2.4. Zeolit.....	18
2.5. Puzolanlar	23
2.6. Bor	25
3. MATERYAL VE YÖNTEM	33
3.1. Materyal	33
3.1.1. Agregalar	33
3.1.2. Çimento	36
3.2. Yöntem	37
3.3. Numune Üretimi	37
3.4. Taze Betonun Deneylei	38
3.4.1. Çökme deneyi.....	38
3.5. Sertleşmiş Beton Deneylei	39
3.5.1. Ses geçiş hızı deneyi.....	39
3.5.2. Basınç Deneyi.....	39
3.5.3. Su emme deneyi	40
3.5.4. Yarma deneyi.....	41
3.5.5. Donma-çözülme deneyi.....	41
3.5.6. Birim ağırlık deneyi.....	42
3.5.7. Dinamik elastisite modülü	42
3.5.8. X-Işınları toz difraktometresi (XRD) analizi.....	43
3.5.9. SEM analizi	43
3.6. Maliyet Analizi	43
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA	45
4.1. Agrega ve Bor Atığının Minerolojik Analizleri	45
4.2. Sertleşmiş Betonun Özellikleri.....	48
4.2.1. Normal beton	48
4.2.1.1. Fiziksel özellikler	49
4.2.1.1.1. Birim ağırlık	50
4.2.1.1.2. Ses geçiş hızı	51
4.2.1.1.3. Su emme	54
4.2.1.1.4. Donma çözülme.....	56

4.2.1.2. Mekanik özellikler.....	57
4.2.1.2.1. Basınç dayanımı	57
4.2.1.2.2. Betonun dinamik elastisite modülü	60
4.2.1.2.3. Yarmada çekme dayanımı	61
4.2.1.2.4. Basınç dayanımı ve yarmada çekme dayanımı arasındaki ilişki	64
4.2.1.2.5. Basınç dayanımı ve ses geçiş hızı arasındaki ilişki	65
4.2.1.3. SEM analiz sonuçları.....	66
4.2.2. Hafif agregalı beton	69
4.2.2.1. Fiziksel özellikler	70
4.2.2.1.1. Birim ağırlık	70
4.2.2.1.2. Ses geçiş hızı	71
4.2.2.1.3. Su emme	75
4.2.2.1.4. Donma çözülme.....	76
4.2.2.2. Mekanik özelliklerin değerlendirilmesi.....	77
4.2.2.2.1. Basınç dayanımı	78
4.2.2.2.2. Dinamik elastisite modülü	81
4.2.2.2.3. Yarmada çekme dayanımı	83
4.2.2.2.4. Basınç dayanımı ve yarmada çekme dayanımı arasındaki ilişki	86
4.2.2.2.5. Basınç dayanımı ve ses geçiş hızı arasındaki ilişki	87
4.2.2.3. SEM analizi sonuçları.....	88
4.3. Maliyet Analizi	90
4.3.1. Nakliye maliyetleri ve ekonomik taşıma uzaklığı	91
5. TARTIŞMA VE SONUÇLAR.....	94
6. KAYNAKLAR.....	97

SİMGELER DİZİNİ ve KISALTMALAR DİZİNİ

ρ_b	Agregaların gevşek yığın yoğunluğunun tayini
ρ_{ssd}	Agregaların yüzey kuru suya doymun tane yoğunluğu tayini
ρ_p	Agregaların kuru tane yoğunluğu tayini
v	Boşluk hacminin tayini
σ	Basınç dayanımı
f_{ct}	Yarmada çekme dayanımı
f_c	Basınç dayanımı
A	Numunenin, üzerine basınç yükünün uygulandığı en kesit alanı
ASTM	Amerikan standardı
BA	Bor atığı
CEB	Avrupa standardı
d	Numunenin seçilen en kesit boyutu
E_d	Dinamik elastisite modülü
F	En büyük yük
G1	Etüv kuru ağırlığı
G2	Kuru yüzey doymun ağırlığı
KA	Kolemanit atığı
L	Numune boyu
LSD	En küçük önemli fark
m	Poisson oranı
NB	Normal beton
P	Kırılma anında ulaşılan en büyük yük
t	Ses geçiş süresi
V	Ses hızı
TSE	Türk standardı
ZB	Zeolit katkılı beton

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 2. 1. Agregası, sertleşmiş çimento hamuru ve betonun basınç altında gerilme-şekil değiştirme eğrileri.....	9
Şekil 2. 2. Sertleşmiş betona yük uygulanmadan önceki ve sonraki çatlak gelişimi	10
Şekil 2. 3. Hafif ve normal betonda gerilme dağılımlarının gösterimi	15
Şekil 2. 4. Hafif ve normal agregaların şematik gösterimi	17
Şekil 3. 1. Betonun karışım agregası tane boyut dağılımı ve referans eğrileri	35
Şekil 3. 2. Hafif agregalı betonun karışım agregası tane boyut dağılımı ve referans eğrileri	36
Şekil 3. 3. Beton üretimi	37
Şekil 3. 4. Çökme deneyi.....	38
Şekil 3. 5. Basınç deney aleti.....	40
Şekil 3. 6. Kür havuzu	40
Şekil 3. 7. Donma-çözülme deneyi için kullanılan soğutucu	42
Şekil 4. 1. Kırmı taşıın mineralojik analizi	45
Şekil 4. 2. Doğal kumun mineralojik analizi	46
Şekil 4. 3. Zeolitin mineralojik analizi	47
Şekil 4. 4. Bor atığının mineralojik analizi.....	48
Şekil 4. 5. Beton birim ağırlığının katkı oranı ile ilişkisi	50
Şekil 4. 6. Beton numunelerde ses geçiş hızının katkı yüzdesine, kür süresine göre değişimi	51
Şekil 4. 7. Betonun ses geçiş hızının katkı yüzdesine göre değişimi ve sınıflandırılması	53
Şekil 4. 8. Betonun katkı yüzdesine göre su emme değerleri.....	55
Şekil 4. 9. Betonun katkı yüzdesine göre donma-çözülme değerleri	56
Şekil 4. 10. Betonun katkı yüzdesi ve kür süresine göre basınç dayanım değerleri.....	57
Şekil 4. 11. Betonun katkı yüzdesine göre ortalama basınç dayanımları	59
Şekil 4. 12. Betonun dinamik elastisite modülü ile katkı yüzdesi ilişkisi	60
Şekil 4. 13. Betonun dinamik elastisite modülü-basınç dayanımı ilişkisi	61
Şekil 4. 14. Betonun katkı yüzdesine, kür süresine göre yarmada çekme dayanım değerleri..	62
Şekil 4. 15. Betonun katkı yüzdesine göre ortalama yarma dayanımları	63
Şekil 4. 16. Betonun basınç dayanımı ile yarmada çekme dayanımı ilişkisi	65
Şekil 4. 17. Beton numunelerde basınç dayanımı-ses geçiş hızı ilişkisi	66
Şekil 4. 18. Beton numunesine ait SEM görüntüsü.....	67
Şekil 4. 19. %3 katkılı beton numunesine ait SEM görüntüsü	67
Şekil 4. 20. %6 katkılı beton numunesine ait SEM görüntüsü	67
Şekil 4. 21. %9 katkılı beton numunesine ait SEM görüntüsü	68
Şekil 4. 22. %12 katkılı beton numunesine ait SEM görüntüsü	68
Şekil 4. 23. Hafif agregalı betonun katkı oranı ile beton birim ağırlık ilişkisi	70
Şekil 4. 24. Hafif agregalı betonun katkı yüzdesi ve kür süresine göre ses geçiş hızı ilişkisi .	72

Şekil 4. 25. Hafif agregalı betonun ses geçiş hızının katkı yüzdesine göre değişimi ve sınıflandırılması.....	73
Şekil 4. 26. Hafif agregalı betonun katkı yüzdesine göre su emme değerleri	75
Şekil 4. 27. Hafif agregalı betonun katkı yüzdesine göre donma çözülme değerleri	77
Şekil 4. 28. Hafif agregalı betonun katkı yüzdesine ve kür süresine göre basınç dayanımı	78
Şekil 4. 29. Hafif agregalı betonun katkı yüzdesine göre ortalama basınç dayanımları	80
Şekil 4. 30. Hafif agregalı betonun dinamik elastisite modülü- katkı yüzdesi ilişkisi	82
Şekil 4. 31. Hafif agregalı betonun dinamik elastisite modülü-basınç dayanımı ilişkisi	82
Şekil 4. 32. Hafif agregalı betonun katkı yüzdesi ve kür süresine göre yarma dayanım değerleri.....	83
Şekil 4. 33. Hafif agregalı betonun katkı yüzdesine göre ortalama yarma dayanımları.....	85
Şekil 4. 34. Hafif agregalı betonun basınç dayanımı ile yarmada çekme dayanımı ilişkisi.....	86
Şekil 4. 35. Hafif agregalı betonun basınç dayanımı- ses geçiş hızı ilişkisi.....	87
Şekil 4. 36. Hafif agregalı beton numunesine ait SEM görüntüsü	88
Şekil 4. 37. ZB%3 katkılı hafif beton numunesine ait SEM görüntüsü	89
Şekil 4. 38. ZB%6 katkılı hafif beton numunesine ait SEM görüntüsü	89
Şekil 4. 39. ZB%12 katkılı hafif beton numunesine ait SEM görüntüsü	89
Şekil 4. 40. ZB%9 katkılı hafif beton numunesine ait SEM görüntüsü	90

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa No

Çizelge 2. 1. Dünyadaki bor rezervleri	26
Çizelge 3. 1. Kullanılan kırmataşın ve kumun özellikleri	33
Çizelge 3. 2. Kırmataşın, kumun ve zeolitin kimyasal bileşimi	34
Çizelge 3. 3. Elek analizi sonuçları	34
Çizelge 3. 4. Elek analizi sonuçları	35
Çizelge 3. 5. Kullanılan Çimentonun Fiziksel, Kimyasal ve Mekanik Özellikleri	36
Çizelge 3. 6. Çökme Sınıfları	38
Çizelge 4. 1. Bor atığının kimyasal analizi.....	47
Çizelge 4. 2. Katkılı ve katkısız betonların mekanik deney sonuçları	49
Çizelge 4. 3. Bor atığı katkılı ve katkısız betonların birim ağırlık, su emme ve bağıntılardan hesaplanmış dinamik elastisite modülü değerleri	49
Çizelge 4. 4. Beton numunelerin kür süresi ve katkı yüzdesine göre ses geçiş hızı verilerine ait varyans çözümleme sonuçları.....	52
Çizelge 4. 5. Beton numunelerin kür süresi ve katkı yüzdesine göre ses geçiş hızı verilerinin sınıflandırılması	52
Çizelge 4. 6. Betonun varyans analiz tablosu	58
Çizelge 4. 7. Betonun ortalama tablosu	58
Çizelge 4. 8. Betonun varyans analiz tablosu	63
Çizelge 4. 9. Betonun ortalama tablosu	63
Çizelge 4. 10. Zeolit ve bor atığı katkılı ve katkısız hafif betonların mekanik deney sonuçları	69
Çizelge 4. 11. Bor atığı ve zeolit katkılı ve katkısız hafif betonların birim ağırlık, su emme ve bağıntılardan hesaplanmış elastisite modülü değerleri	69
Çizelge 4. 12. Hafif betonların kür süresi, katkı yüzdesi ve katkı x kür'e göre ses geçiş hızı verilerine ait varyans çözümleme sonuçları	72
Çizelge 4. 13. Hafif beton numunelerin kür süresi, katkı yüzdesi ve kür x katkı'a göre ses geçiş hızı verilerinin sınıflandırılması	73
Çizelge 4. 14. Hafif agregalı betonun varyans analiz tablosu	79
Çizelge 4. 15. Hafif agregalı betonun ortalama tablosu	79
Çizelge 4. 16. Hafif agregalı betonun varyans analiz tablosu	84
Çizelge 4. 17. Hafif agregalı betonun ortalama tablosu	84
Çizelge 4. 18. Malzeme birim fiyat listesi.....	91
Çizelge 4. 19. Beton maliyetleri ve % kâr miktarları	91

1. GİRİŞ

Nüfus artışı, hızlı ekonomik gelişme ve şehirleşmenin sonucu olarak inşaat sanayi gelişmekte, buna bağlı olarak beton, çimento üretimi ve çeşitleri de artmaktadır. Yapı sektörü ve yapı teknolojileri arasında en çok kullanılan malzeme betondur. Beton; bileşenleri olan çimento, agrega, su ve gerektiğinde katkı maddelerinin belirli oranlarda karışımlarından meydana gelmektedir. Kullanış amacına göre çok çeşitli tiplerde beton elde etmek olasıdır. Betonun oluşturan ham maddeler doğada bol miktarda bulunmaktadır. Ucuz sağlanması ve kolay şekil verilmesinin yanı sıra dış etkenlere karşı dayanıklı olması bakımından beton yaygın kullanılan yapı malzemesi olmuştur (Baradan 1997).

Teknolojinin ilerlemesiyle birlikte beton endüstrisinde de ilerlemeler olmuş ve beton üretimindeki bu yenilikler beton teknolojisine özel betonlar adı ile girmiştir. Özel betonlar, kullanım yerlerine göre farklı beklentileri karşılamak amacıyla üretilen betonlardır. Ağır beton, taşıyıcı hafif beton, yüksek akıcılığa sahip beton, yalıtım özellikli beton bu farklı özelliklerden bazılarıdır. Betona bu farklı özellikleri kazandırmak betonun geleneksel bileşenlerinin dışında farklı nitelikteki yapı malzemelerini karışıma ilave etmektedir (Beycioğlu ve ark. 2008).

Özel beton çeşitlerinden bir tanesi de hafif betonlardır. Ağırlığı az, yalıtımı yüksek, dayanımı yeterli ve yanmaz bir madde olan hafif beton geleceğin mimarlığı açısından büyük önem taşıyan bir malzemedir. Normal betondan ayrıcalığı, hafifliği ve ısı yalıtımı sağlayan boşluklu yapısıdır. Bu boşluklar, boşluk oranı yüksek hafif agrega kullanılarak (zeolit, bims veya pomza taşı, cüruf, perlit vb), boşluklu içyapı oluşturarak veya ince harç içinde gaz kabarcıkları oluşturmak yolu ile sağlanmaktadır (Topçu ve ark. 2005).

Dünyada hafif beton üretimi, 20. yüzyılın ilk yıllarında başlamıştır. Önceleri genellikle duvar elemanlarında kullanılan bu ürünler, İkinci Dünya Savaşı'ndan sonra taşıyıcı hafif beton olarak kullanılmaya başlamıştır. Özellikle temel problemlerinin yaşandığı yerlerde taşıyıcı hafif betonların ekonomik çözümler getirdiği belirlendikten sonra, başta ABD olmak üzere birçok ülkedeki yapılarda kullanılmaya başlanmıştır. Günümüzde ise yapı sektöründe, hafif beton kullanımında artış görülmektedir (Tokyay ve Şatana 1997).

Hafif beton üretiminde en önemli sorunların başında hafif agrega temini gelmektedir. Hafif agrega olarak pomza, kireç taşı, perlit ve vermikulit gibi farklı minerolojik yapıya sahip agregalar kullanılmaktadır. Son yıllarda bu hafif agregalar içerisine zeolit de girmiştir.

Doğada büyük rezervler halinde bulunan zeolitlerin işletilmesinin diğer madenlere göre daha kolay ve ucuz olması, yüksek boşluk miktarı, düşük ağırlığı, homojen yapısı, kolay işlenebilmesi, genleşmeye uygun olması ve sıkışmaya ve aşınmaya karşı dayanımının yüksek olması nedeniyle inşaat sektöründe daha fazla tercih edilebilen mineral haline gelmiştir (Şişman ve ark. 2008).

Hafif beton üretiminde kısıtlayıcı faktör ise çimento kullanımı ve maliyetidir. Betonun fiziksel, mekaniksel ve termal özelliklerini en fazla etkileyen çimento beton maliyetinin de en önemli kısmını oluşturmaktadır. Beton maliyetinin düşürülmesi ancak karışıma giren çimento, miktarının azaltılması ile olasıdır. Bu ise çimento ile yer değiştirilmeli olarak kullanılan puzolan materyallerin kullanılması ile sağlanabilmektedir. Doğal, yapay ve organik kökenli çok sayıda puzolan materyal bulunmakta olup, bor atıklarından boraks ta bu amaçla kullanılabilir.

Ülkeler endüstriyel yönden hızlı gelişim göstermektedir ve bu büyük gelişim insanlık açısından olağanüstü öneme sahiptir. Endüstriyel gelişimin yararlarının yanı sıra bir takım olumsuz getirileri de göz ardı edilemez bir gerçektir. Endüstriyel gelişimin insanlık ve çevre için olumsuz getirilerinin başında atık maddeler bulunmaktadır (Beycioğlu ve ark. 2008).

Günümüzde insan nüfusunun hızla artması ve mevcut kaynakların tükenmeye başlamasıyla meydana gelen atıkların azaltılması, mevcut atıkların potansiyel ham madde kaynağı olarak değerlendirilmesi, kullanılmış ham maddelerin yeniden kullanılması gibi atık yönetimi konuları giderek önem kazanmaya başlamıştır (Akbulut ve Gürer 2006). Doğal kaynakların daha az tüketilmesi, çevre kirliliğinin daha aza indirgenmesi ve enerji maliyetlerinin azaltılması amacıyla endüstriyel atık kullanımı gün geçtikçe daha fazla ilgi çeken bir konu olmaktadır (Çelik 2004).

Atıklar çevre sorunu yanı sıra birçok durumda depolanma zorunluluğundan dolayı ilave maliyet getirmektedir. Bu nedenle birçok atık içeriğine bakılmaksızın ortadan kaldırılmaya çalışılmaktadır. Ancak atık malzemelerin de bir değeri vardır ve atıklar katma değeri yüksek ürünlerin elde edilmesinde kullanılabilir (Kaya ve Turan 2004).

Günümüzde çeşitli endüstriyel atıklar, betonda puzolanik malzeme olarak kullanılmaktadır. Puzolanlar tek başına bağlayıcılık özelliği olmayan, ancak normal sıcaklıkta ve nemli ortamlarda kalsiyum hidroksitle kimyasal reaksiyona girerek bağlayıcılık özelliği gösteren malzeme olarak tanımlanırlar. Puzolanlar betonlarda mineral katkı olarak

kullanılmaktadır. Mineral katkıları betonun dayanımını arttırarak dayanıklılığını ve akıcılığını geliştirmek için kullanılmaktadır. Beton veya çimento içerisine puzolanik malzeme eklenmesinin hidrasyon ısısını düşürmesi, yüksek hedef dayanımı ve düşük permeabilite sağlaması, alkali silika reaksiyonunu kontrol altına alması gibi birçok yararlar sağladığı bilinmektedir (Subaşı ve ark. 2008).

Kimyasal ve fiziksel yapısı uygun olan ya da uygun hale getirilebilen atık materyaller yapı malzemesi üretiminde; özellikle çimento, harç, beton, tuğla kiremit, yol vs yapımında kullanılır olmuştur. Böylece atıkların değerlendirilmesi yanında daha ucuz ve kaliteli yapı malzemelerinin üretilmesi de sağlanmıştır.

Bor, doğada serbest olarak bulunmaz. Bor elementi, doğada değişik oranlarda bor oksit olarak 150'den fazla mineralin yapısında bulunmaktadır. Ancak ekonomik anlamda bor mineralleri kalsiyum, sodyum ve magnezyum elementleri ile hidrat bileşikleri halinde bulunur. Bor minerallerinden ticari değere sahip olanlar; tinkal ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$), kolemanit ($\text{Ca}_2\text{B}_6\text{O}_{11} \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) ve üleksittir ($\text{NaCaB}_5\text{O}_9 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$).

Türkiye, büyük stratejik öneme sahip doğal bir kaynak olan bor yataklarının % 72'sine sahiptir. Bor cevherlerinin en verimli şekilde üretimi ve açığa çıkan atıklarının etkili şekilde değerlendirilmesi ülkemiz açısından önemlidir. Bor minerallerinin zenginleştirilmesi sırasında içerisinde düşük miktarlarda bor bulunan atıklar ortaya çıkmakta ve önemli çevresel sorunlara neden olmaktadır. Bugüne kadar üretimde açığa çıkan atık malzemenin farklı endüstriyel alanda kullanılabilirlikleri araştırılmaktadır (Erdoğan 2006).

2. KAYNAK ÖZETLERİ

2.1. Beton

Günümüzde beton, birçok farklı yapıda en yaygın kullanılan yapı malzemesidir. Betonun ucuzluğu ve kolay üretilebilir olmasından dolayı binalar, yollar, köprüler, barajlar, santraller, istinat duvarları, su depoları, limanlar, hava alanları vb. birçok yerde yaygın kullanım alanına sahip olduğu görülmektedir (Topçu ve ark. 2006). Bileşenleri açısından önceleri yalnızca su, çimento ve agregadan oluşan iyi betona bir takım kimyasal ve mineral katkıları ilâve edilerek istenen bazı özellikler kazandırılmakta ve özellikler iyileştirilebilmektedir (Felekoğlu ve Baradan 2004, Özşahin 2011).

Beton; çimento, agrega, su ve gerektiğinde katkı maddesinden oluşan, oranları belirli esaslara göre ayarlanmış bir karışımı, kalıplar içine boşluksuz olarak yerleştirmek ve uygun bakım koşulları altında sertleştirme yolu ile elde edilen kompozit malzemedir (Kocataşkın 1991). Beton hangi amaç için üretilirse üretilsin üç ana niteliğe sahip olmalıdır:

1. İşlenebilir olmalı,
2. Dayanımlı olmalı,
3. Dış etkilere karşı dayanıklı olmalıdır (Akman 1987).

Dayanım, betonun diğer tüm özelliklerini etkileyen bir etkidir. Dayanımı yüksek beton aynı zamanda geçirimsiz, dayanıklılığı yüksek ve en az poroziteye denmektedir. Bu koşulları sağlayabilmek için betonu oluşturan malzemelerin birbirine bağlanarak dolu bir beton oluşturmaları gerekmektedir.

Günümüzde beton diğer yapı malzemelerine oranla gerek kentsel ve gerekse kırsal alanlarda fazla miktarda kullanılmaktadır. Betonun yapı malzemesi olarak kullanılmasının yarar ve sakıncaları söz konusudur (Şişman ve ark. 2008). Betonun en önemli yararları şu şekilde sıralanabilir;

- * Beton harcına istenen şekil verilebilir.
- * Betonun iskeletini oluşturan agrega kolayca bulunabilir.
- * Beton işçiliği için her işçinin ihtisaslaşmasına gerek olmayıp bir uzmanın bulunması beton üretimi için yeterlidir, yani yapımı kolaydır.
- * Betonla istenilen boyutta yek pare yapı kısımları yapılabilir.

- * Betonun dayanımı taş, tuğla, briket ve kerpice oranla yüksek olduğundan yapı elemanlarının boyutları küçültülebilir ve böylece yapı alanından ekonomi sağlanmış olur.
- * Beton dış etkilere dayanıklıdır.
- * Beton yangına karşı güvenilirdir.
- * Gerekli önlemler alınarak su içinde yapı elemanlarının yapımına olanak verir.
- * Beton yapı elemanları çıplak olarak bırakılabilir veya çeşitli yapı malzemeleriyle kaplanabilir.

Betonun sakıncaları ise şunlardır;

- * Beton çok yüksek sıcaklığa dayanamaz ve gerekli önlemler alınmazsa sesi, ısıyı ve nemi iletir.
- * Sökülüp tekrar kullanılma özelliği yoktur.
- * Onarılması zor ve olanaksızdır.
- * Betonarme yapı elemanları diğer yapı malzemeleriyle yapılanlara kıyasla daha ağır olur (Alkaya 2010).

Son yıllarda beton ile ilgili yapılan çalışmaların büyük çoğunluğu beton dayanımı üzerine yoğunlaşmıştır. Yapılan çalışmalara göre betonda kimyasal kullanımıyla daha az su miktarında istenilen işlenebilmeyi sağlamak olasıdır. Bunun yanında katkı kullanımı ile beton içerisindeki boşluklar azalmakta ve betonun dış etkilere karşı direnci artmaktadır. Beton boşluklarının azalması betonun dayanıklılığı açısından önemli yararlar sağlamakta ve oluşabilecek olumsuz etkiler önlenmektedir.

2.1.1. Betonu oluşturan malzemeler

2.1.1.1. Agregalar

Normal ağırlıklı beton içerisinde kullanılan daneli malzemeler (agregalar) genellikle; kum, çakıl ve/veya kırmataştır. Betonun yaklaşık %75'ini agregalar oluşturmaktadır. Agregalar ince ve iri agrega olmak üzere ikiye ayrılmaktadırlar.

Agregaların beton içerisinde kullanılmasıyla, çimento hamurunun zamanla göstereceği büzülme (rötre) sınırlandırılıp, betonun hacim sabitliği korunmaktadır (Saran 2007). Ayrıca beton içerisinde kullanılan agregaların dayanımının yüksek olması, beton dayanımının yüksek

olmasına katkıda bulunmaktadır. Beton içerisinde kullanılacak agregaların çeşitli özelliklere sahip olması istenmektedir. Bu özellikleri tane boyu dağılımı, maksimum tane büyüklüğü, su emme kapasitesi, birim ağırlık, özgül ağırlık, tane şekli, agrega içindeki yabancı ve zararlı maddelerin türü ve miktarı, dona dayanıklılık, aşınmaya dayanıklılık, dayanım, elastiklik modülü, ısısal özellikler vb. şeklinde sıralanabilir (Erdoğan 2003).

2.1.1.2. Çimento

Beton içerisinde bağlayıcı olarak birçok malzeme kullanılmaktadır. Geçmişte yağlı kireç, çeşitli tür doğal çimentolar, alçı, çeşitli puzolanlar kullanılmıştır. Günümüzde ise bağlayıcı olarak en çok kullanılan malzeme portland çimentosudur.

Betonun oluşturulmasında çimento hamurunun işlevi, agrega tanelerinin yüzeylerini kaplamak, agrega taneleri arasındaki boşlukları doldurmak ve agrega tanelerini bir arada tutacak tarzda bağlayıcılık sağlamaktır. Çimento kil, kalker ve demir oksitin döner fırında 1400°C'de pişirildikten sonra, oluşan klinkerin alçı taşı ile birlikte değirmende 90 µm inceliğine kadar öğütülmesi sonucunda oluşur (Onaran 2003). Çimento içerisinde bulunan, trikalsiyum silikat (C₃S), dikalsiyum silikat (C₂S), trikalsiyum alüminat (C₃A), tetrakalsiyum alümino ferrit (C₄AF) ana bileşenler, su ile karıştırılan çimentonun hidrate olmasını sağlar.

Çimentolar TS EN 197-1 standardına göre su şekilde gruplandırılabilir.

- 1- Portland Çimentoları (CEM I)
- 2- Portland Kompoze Çimentoları (CEM II)
- 3- Portland Yüksek Fırın Cürüflü Çimento (CEM III)
- 4- Puzolanik Çimento (CEM IV)
- 5- Kompoze Çimento (CEM V)

2.1.1.3. Su

Beton yapımında kullanılan temel malzemelerden biriside sudur. Su olmadan çimento hidratasyona uğrayamaz, yani sertleşemez. Beton karışımının hazırlanmasında kullanılacak olan suyun uygun kalitede olması, beton özelliklerini olumsuz yönde etkileyecek yabancı maddeleri içermemesi gerekmektedir. Genel olarak içilebilen her su, betonda karışım suyu olarak rahatlıkla kullanılabilir (Sarıkaya 2006).

2.1.2. Betonun fiziksel ve mekanik özellikleri

Çimento, su, agrega ve yardımcı katkıların bir arada karılmasıyla elde edilen beton, başlangıçta şekil verilebilir sıvı bir kıvamdadır. Zamanla içerisinde gelişen hidrasyon olayı sonucu sertleşir ve katı bir hal alır.

2.1.2.1. İşlenebilirlik

Taze beton özellikleri arasında en önemli olanı işlenebilirlikdir. İşlenebilirlik; taze betonun kullanılacağı amaca göre, yerleştirilmesi, sıkıştırılabilmesi ve yüzeyinin düzeltilmesi amacıyla gereken akıcılıkta olduğunu gösteren bir değerdir. Yeterli işlenebilirliğe sahip olmayan beton yerleştirme, sıkıştırma ve düzeltme işlemleri istenilen düzeyde olmadığında, yeterli dayanımı ve dayanıklılığı göstermez. İşlenebilirliği yüksek olan beton en az enerjiyle karıştırılabilir ve kalıba yerleştirilebilir.

İşlenebilirlik özelliği, betonun yapısından kaynaklanan şu özellikler ile ilgilidir:

- * Taze beton kütlede akma başlatacak kuvvete karşı betonun göstereceği direnç (kayma dayanımı),
- * Akma başladıktan sonraki hareketlilik (akıcılık),
- * Betonun oluşturan malzemelerin birbirine ne ölçüde bağlanmış olduğu, böylece segregasyona karşı göstereceği direnç
- * Yerleştirilmeyi ve yüzeyinin düzeltilmesini etkileyen yapışkanlıktır (Kılınç 2007).

Taze betonun işlenebilirliğini etkileyen etkenler, karışımdaki su miktarı, hava miktarı, karışım oranları, agrega özellikleri, agrega tane dağılımı, çimento özellikleri, katkıları, zaman ve sıcaklık sayılabilir.

2.1.2.2. Dayanıklılık

Sertleşmiş betonda aranılan iki önemli özellik betonun dayanımı ve betonun dayanıklılığıdır. Beton kullanılacağı yapının gerektirdiği yeterli dayanıma sahip olmasının yanında, bu yapı için aranılan servis ömrü süresince işlevini koruyabilmelidir. Betonun dayanıklılığı; betonun kullanıldığı yapıya göre gereken hizmet ömrü boyunca özelliklerini koruyabilmesidir.

Betonun servis ömrü süresince donma-çözümeye, alkali agrega reaksiyonları vb. bir takım etkilere maruz kalmakta ve bu durum bozulmalara yol açmaktadır. Bu bozulmalar sonucu

beton daha boşluklu bir hale gelmekte, donatılar paslanabilmekte, beton aşınabilmekte ve içerisinde büyük gerilmeler oluşabilmektedir.

Betonun dayanıklılığı açısından beton geçirimsizliği ve betonun boşluk yapısı da oldukça önemlidir. Çünkü betonu etkileyen dış etkenler beton içerisine, kılcal boşluklar ile nüfuz etmektedir. Aynı zamanda betonda boşluklar, betonun dayanımını da olumsuz etkilemektedir. Betonun geçirimsizliği ne kadar az olursa, bahsedilen dış etkenler beton içerisine nüfuz edemeyeceği için betonun bozulması engellenmiş olacak, dayanımı korunabilecektir (Saran 2007).

Betonda agrega-çimento hamuru temas yüzeyinden oluşan bir malzeme olduğu için en zayıf halkasının ara yüzeyler olduğu ortaya çıkmaktadır. Beton teknolojisindeki gelişmenin anahtarı çimento hamuru ile agrega arasındaki ara yüzeylerin güçlendirilmesidir. Geçirimsizlik ile betonun dayanıklılığı arasında doğru orantılı ilişki vardır.

Soğuk iklim koşullarında betonun kalıcılığını tehdit eden en önemli etkenlerden birisi donma- çözülme olayıdır. Sertleşmiş ve suya doymun haldeki bir beton don etkisinde kalınca, çimento harcının içindeki kılcal boşluklardaki su donar ve genişir. Gerilmeler, betonun çekme dayanımını aştığında kapak atma, çatlama ve ufalanma şeklinde hasarlar ortaya çıkar (Baradan ve ark. 2002).

2.1.2.3. Dayanım

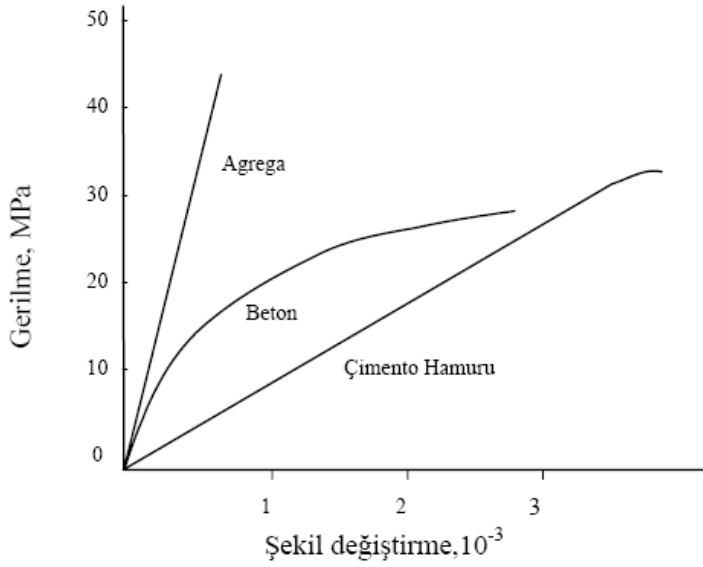
Beton bilindiği üzere gevrek bir malzemedir ve çekme dayanımı basınç dayanımına göre oldukça düşüktür. Betonun basınç dayanımı, eksenel basınç yükü etkisi altında betonda oluşan maksimum gerilme ile eşdeğerdir. Betonun basınç dayanımı pratikte en çok kullanılan dayanım değeridir. Bunun sebepleri arasında bu deneyin kolay oluşu, betonun basınç dayanımı ile çekme, eğilme vb. dayanımları arasında ilişki olması ve gerçek hayatta beton elemanlara etkileyen yüklerin çoğunluğunu basınç yüklerinin oluşturması olarak özetlenebilir. Basınç dayanımı, betonun hem kalitesiyle hem de kullanım alanını belirlemek ile ilgili genel bilgi verir (Neville 1996).

İçyapısı heterojen olan betonun basınç dayanımı,

- Matrisin (çimento hamuru) dayanımı,
- Agreganın dayanımı,
- Agrega-çimento ara yüzeyinin dayanımı

olmak üzere üç faktörden etkilenmektedir (Popovics 1998). Agregası, çimento hamuru ve betona ayrı ayrı yük uygulandığı durumlardaki gerilme-şekil değıştirme eğrileri Şekil 2.1’de gösterilmektedir. Şekilden de anlaşılacağı gibi agregası ve çimento hamurunun gerilme-şekil değıştirme eğrileri hemen hemen doğrusal iken; betonunki doğrusal değildir.

Matris, agregası ve agregası-çimento ara yüzeyi dayanımı etkenlerinden her biri değışik sınıflardaki betonların dayanımlarına farklı şekillerde etki eder. Normal betonlar için agregası dayanımı ve elastisite modülü değeri çimento hamurununkinden büyük olduğundan, kırılmalar nispeten daha zayıf olan agregası-çimento ara yüzeyinde oluşur. Oysa bu durum hafif betonlarda normal betonun aksine çimento hamurunun mukavemet ve elastisite modülü değeri agregasınınkinden daha büyük olduğu için, kırılmalar agregaların göçmesi şeklinde gözlemlenir (Azizi 2007).

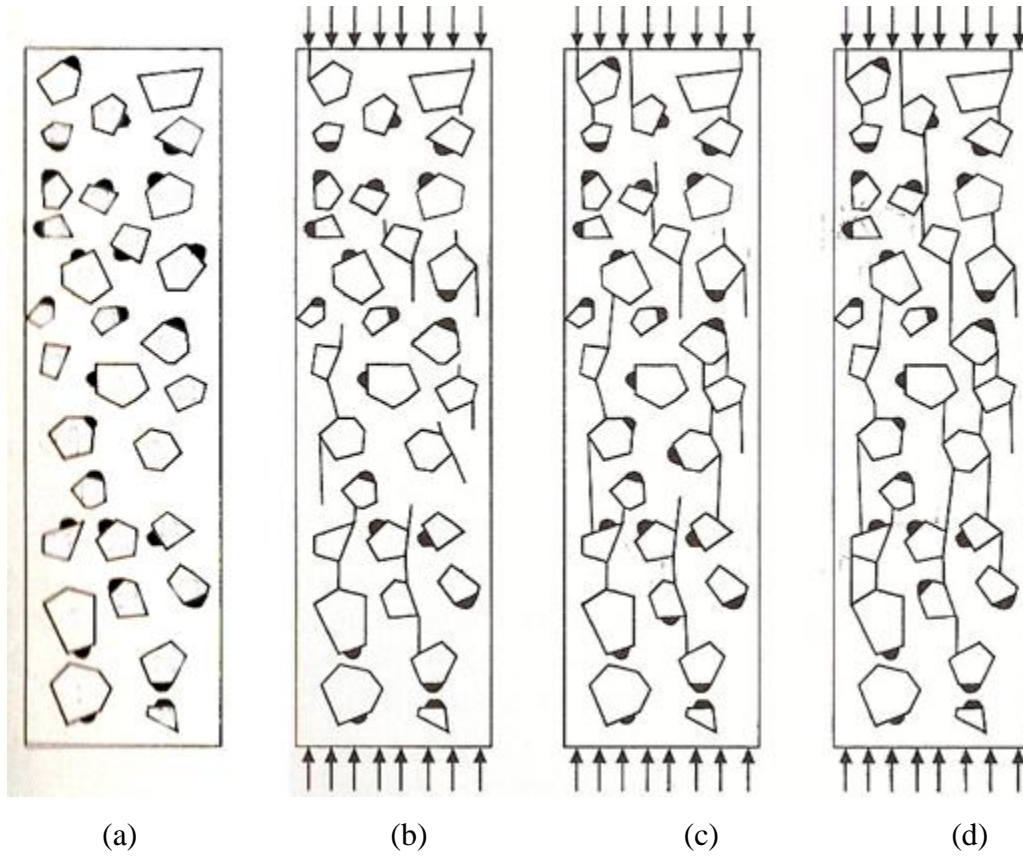


Şekil 2. 1. Agregası, sertleşmiş çimento hamuru ve betonun basınç altında gerilme-şekil değıştirme eğrileri (Neville 1996).

Düşük gerilme değeri göz önüne alındığında, betonu oluşturan iki malzemenin de gerilme-şekil değıştirme davranışlarının doğrusal olduğu belirtilebilir. Betonu oluşturan agregası ve çimento hamurunun elastisite modülleri oldukça farklıdır. Betona uygulanan gerilmeye bileşenlerden agregası ve çimentonun farklı tepki vermesi, betonu yüksek gerilme düzeylerinde elastik olmayan davranış göstermesine neden olmaktadır (Şekil 2.1). Bu durum, betonun kompozit malzeme olması yanında çimento hamuru ve agregası arasındaki bağın yapısına da bağlıdır. Agregası sertliğinin çimento hamurunun sertliğine yakın olduğu durumda, betonun elastik davranışa yakın bir özellik gösterdiği görülmüştür (Neville 1996).

Betonun gerilme–şekil değiştirme eğrisindeki bu eğrilik agrega ile imento hamuru ara yzeyinde oluşan mikro atlamlardan kaynaklanmaktadır. Gerilme–şekil değiştirme eğrisinin biçimi; agrega içeriği, yzkleme hızı ve mikro çatlama süreci gibi faktörlerden önemli derecede etkilenmektedir.

Sertleşmiş betona yz uygulamadan önce betonda bulunan mikro çatlaklar ve betona yz uygulanmasının ardından çatlakların gelişimi şekil 2.2’de görülmektedir. Betonun genel bir özelliği olan mikro çatlaklar; iri agrega ile hidrate olmuş imento hamurunun, kuruma rtresi gibi özelliklerinin farklı olmasından kaynaklanmaktadır. Bu mikro çatlaklar, da betona herhangi bir yz uygulamadan önce şekil (2.2 a) betonun içyapısında bulunmaktadır (Neville 1996).



şekil 2. 2. Sertleşmiş betona yz uygulanmadan önceki ve sonraki çatlak gelişimi (Arıoğlu ve ark. 2006)

Betona yz uygulandığında basınç dayanımının %30’una kadar mikro çatlaklar yavaşça açılmakta (şekil 2.2 b), %30’un üzerinde bu bağ çatlaklarının uzunlukları, genişlikleri ve sayıları artmaya başlamaktadır. Bu aşamada çatlakların ilerlemesi yavaştır. Yzde elli basınç dayanım düzeyinde çatlaklar birleşerek (şekil 2.2 c) hamur içinde büyümektedir. Gerilmenin basınç dayanımına oranı %70-90 olduğunda çatlaklar imento

hamuru ile ince agregadan oluşan harç fazı içinde açılmaya başlamakta ve sayıları önemli ölçüde artmaktadır (Şekil 2.2 d). Bu çatlakların birleşerek sürekli çatlakları oluşturması sonucu çatlak ağı ortaya çıkmaktadır. Bu aşamada hızlı çatlak yayılması görülmektedir. Basınç dayanımının, %90'ına ulaşıldıktan sonra ise bu bileşik çatlaklarda kararsız yayılış olmaktadır. Bu aşamada yük kaldırılırsa bile çatlaklar kendiliğinden hareket etmekte ve numunenin taşıma kapasitesini sona erdirmektedir (Arioğlu ve ark. 2006, Azizi 2007).

2.1.2.4. Agregas- matris aderansı

Normal agregalı betonlarda normal agreganın dayanımının harç dayanımından daha fazla olmasından dolayı kırılma işlemi normal betonda en zayıf bölge olan agrega-çimento hamuru ara yüzeyinde oluşmaya başlar (Şekil 2.2). Normal agregaların yük altındaki davranışları farklı olduğundan bu agregalarla üretilen betonların da üzerindeki gerilim dağılımları farklı olmaktadır (Uygunoğlu 2008).

2.1.3. Betonun sınıflandırılması

Betonlar yoğunluklarına, basınç dayanımlarına ve üretim yerlerine göre gruplara ayrılmaktadırlar.

Üretildikleri yerlere göre betonlar:

- Şantiye betonu,
- Beton santralı olmak üzere iki temel grup altında incelenmektedir.

Basınç dayanımlarına göre betonlar:

- Hafif betonlar: Basınç dayanımları 20 N/mm^2 'nin altında olan betonlar,
- Normal betonlar: Basınç dayanımları $20-40 \text{ N/mm}^2$ olan betonlar,
- Yüksek dayanımlı betonlar: Basınç dayanımları 40 N/mm^2 'den fazla olan betonlardır.

Birim ağırlıklarına göre betonlar:

- Normal Betonlar: Yaklaşık 2400 kg/m^3 birim ağırlığında olan betonlardır ve taşıyıcı amaçlarla en çok kullanılan beton türüdür.
- Hafif betonlar: Birim ağırlıkları 2000 kg/m^3 'den az olan betonlardır. Yalıtım amaçlı olarak veya dayanım ağırlık oranının yüksek olması gereken koşullarda kullanılırlar.

Beton iyi bir taşıyıcı olmasına karşın birim ağırlığı büyük, ısı iletkenliği yüksektir. Normal betonun birim ağırlığının düşürülmesiyle betonarme elemanın öz ağırlıkları azaltılıp yapı hafifletilebilmekte, böylece taşıyıcı sistem elemanlarının kesitleri küçültülerek ekonomi

sağlanabilmektedir (Azizi 2007). Diğer yandan yurdumuzun büyük çoğunluğunun 1. derece deprem riski taşıyan bölgelerde bulunması göz önüne alındığında, yapıların öz ağırlıklarının hafifletilebilmesi yapıya etkiyen deprem yükünü azaltacak ve dolayısı ile olası depremlerdeki yapı hasarları da azaltılmış olacaktır (Konuk 2003).

2.2. Hafif Beton

Hafif beton teknik, ekonomik ve çevresel üstünlükleri sayesinde yapılar için çok yönlü kullanılan bir materyal olmuş ve son zamanlarda yapılarda daha fazla kullanılmaya başlamıştır (Haque ve ark. 2004). Hafif betonun yapı malzemesi olarak kullanımı ile yapı yükünün azaltılması, dolayısıyla malzeme yönünden ekonomi ve düşük birim ağırlığı sayesinde de yüksek ısı ve ses yalıtımı gibi yararlar sağlanmıştır (Şişman ve ark. 2008).

Hafif beton üretiminin çeşitli yöntemleri vardır. Bu yöntemlerden en sık başvurulanı birim ağırlıkları düşük olan agregalar ile hafif beton üretmektir. Genel olarak hafif agregalı betonlar, yapılarda blok olarak kullanılmakta ve bu blokların kullanımı ile yapıların zati yüklerinin azaltılmasının yanında ısı yalıtımı, deprem sorunu, yangına karşı dayanım ve estetik gibi özelliklere de sahip olması amaçlanmaktadır.

Normal ağırlıklı betonun birim ağırlığının azaltılmasıyla, yapı veya yapı elemanının ağırlığını azaltarak, ekonomi ve emniyet üstünlüklerini sağlamak olanaklıdır (Subaşı 2009). Hafif malzemeler, bina yükünü önemli oranda azalmaktadır. Böylece binalar kendi ağırlıklarıyla ezilmemekte ve depremin yıkıcı zararları azalmaktadır. Diğer yandan depremin oluşturduğu yatay ve düşey yöndeki şiddetli sarsıntılar boşluklu malzemeler tarafından emilmekte, dolayısıyla bina sallanmakta ancak yıkılmamaktadır (Azizi 2007).

Tarımsal yapıların inşasında geleneksel ağır inşaat malzemeleri (kum, çakıl, yapı taşları vb.) yanında gittikçe artan oranlarda hafif inşaat malzemeleri de kullanılmaktadır. Yapılarda hafif malzemelerin kullanımı daha çok kalkınmış ülkelerde gelişmiştir. Oysa üretim tesisleri büyük yatırım gerektirmeyip, doğal kaynağı bulunan her ülkenin işletebileceği tesislerdir (Karaman 2007).

Enerji tasarrufu ya da enerjinin verimli kullanılması, depremin yıkıcı etkilerinin azaltılması, toplumsal refah, çevre koruma bilinci ve enerji kaynaklarımızın sınırlı olması nedeniyle hafif inşaat malzemelerinin kullanımının yaygınlaştırılmasının önemi büyüktür. Yurdumuzun çeşitli bölgelerinde yaygın olarak bulunan ve kolayca sağlanabilen doğal hafif inşaat malzemelerinin özelliklerinin incelenerek, hafif yapı malzemelerinin üretilmesi ve

uygulama alanlarının genişletilebilmesiyle üstün niteliklere sahip inşaat malzemesi elde etme olanakları söz konusudur (Karaman 2007).

Bütün malzemelerde olduğu gibi hafif betonun üstünlükleri ve sakıncaları bulunmaktadır. Hafif betonların normal betonlara göre üstünlükleri şöyle özetlenebilmektedir:

- * Birim hacimdeki toplam malzeme ağırlığının azalması nedeniyle beton kalıbında daha düşük basınç oluşur, üretim ve yerleştirme kolaylaşır.
- * Hafif betonla üretilen elamanların düşük birim ağırlıkları nedeniyle yatay ve dikey yapı yükleri azalır, bu azalma ile temeller ve diğer yapı elemanları daha küçük boyutlarda yapılarak ekonomi sağlanır.
- * Isıl iletkenlikleri düşük, ısı ve ses yalıtımları yüksektir.
- * Yangın bakımından normal betona göre daha elverişlidir

Hafif betonların normal betonlara göre sakıncaları ise şöyle özetlenebilmektedir:

- * Boşluklu olmaları nedeniyle mukavemetleri düşüktür. Bu nedenle birçok yüksek dayanımlı beton uygulamalarında tercih edilen malzeme değildir .
- * Aşınmaya karşı dayanıksızdırlar.
- * Neme karşı yalıtım gereklidir.
- * Elastisite modülü düşük değerler alır.
- * Sünme ve rötre normal betona göre daha yüksektir (Taşdemir 1982).

2.2.1. Hafif betonun fiziksel ve mekanik özellikleri

Hafif betonun fiziksel ve mekanik özellikleri, hafif betonu oluşturan bileşenlerin bütün özellikleriyle ilişkilidir. Dayanım, betonun belli başlı özelliklerinden biridir ve genel olarak betonun yoğunluğuyla yakından ilişkilidir. Hafif agregalı betonlar değişik tiplerde olup, özellikleri kullanılan agregalara ve karışımındaki bileşenlere bağlıdır. Beton sertleştiğinde hacminde değişimler olur. Bu değişimler dayanım, elastiklik, yoğunluk, su emme gibi betonun fiziksel ve mekanik özellikleriyle ilişkilidir.

2.2.1.1. İşlenebilirlik

Hafif betonların yapımında temel ilkelerden biri, üretilecek betonun istenilen işlenebilirliğe sahip olmasıdır. Hafif agreganın yüzey dokusu, şekli ve ince agreganın

da iri agrega yüzey dokusuna sahip olması, bu betonların işlenebilirliğini azaltıcı etki yapmaktadır (Chandra ve Bertsson 2003, Aitcin 1998, Ulusu 2007).

Hafif agregalı betonların işlenebilir karakteristikleri, normal agrega ile üretilen betonunkinden oldukça farklılık göstermektedir. Doğal agrega kullanılarak üretilen betonlarda, geniş bir su miktarı aralığında çok geniş bir işlenebilirlik aralığı elde edilirken, hafif agregada aynı su miktarı kullanıldığında işlenebilirlik çok düşük olabilmektedir. Eğer hafif betonun işlenebilirliği çok düşükse, betonu kompaksiyon veya şişleme ile yerleştirmek mümkün olmaz. Vibratör kullanıldığında ise hafif olan iri agregalar yüzerek yüzeye çıkar ve betonda segregasyonun oluşumuna neden olur (Ulus 2007).

2.2.1.2. Dayanıklılık

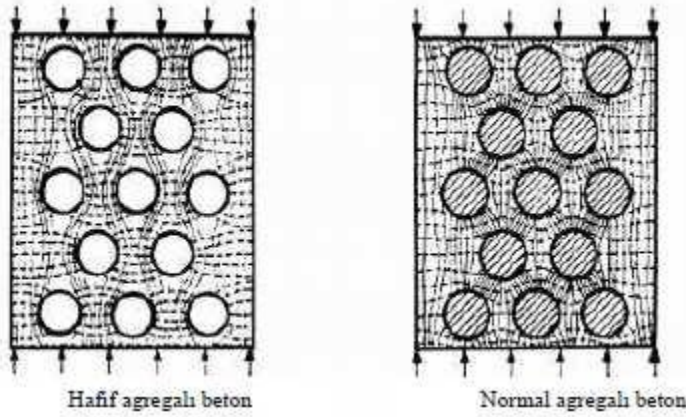
Betonun gözeneklerini işgal eden su mekanik ve termik özellikleri olumsuz yönde etkilediğinden, betonların az su emmesi istenir. Betonun su emmesi, hafif beton üretiminde kullanılan hafif agregaların su emme kapasitesine ve agrega/çimento oranına bağlı olarak değişmektedir. Hafif agregalı betonların üretimlerinde kullanılan agregaların gözenekli yapılarından dolayı hafif betonların da su emmeleri oldukça yüksektir. Agregaların gözenek yapısı da hafif betonun su emme oranı üzerinde büyük rol oynamaktadır. Aynı agrega oranında fakat farklı agregalarla üretilen betonların su emme oranları da agregaların gözenek yapılarından dolayı farklı olmaktadır (Topçu ve Uygunoğlu 2007).

Azizi (2007) hafif agrega katkılı betonların kapilarite katsayısı ve porozitelerini inceledikleri çalışmalarında, betona eklenen hafif agrega miktarı arttıkça hafif agrega katkılı betonların kapilarite katsayısı ve porozitelerinin arttığını belirlemişlerdir.

2.2.1.3. Dayanım

Agregalar genellikle betonun hacim olarak %70-80'ini oluşturmaktadır. Agregalar beton içerisindeki bu geniş hacminden dolayı basınç ve çekme dayanımı gibi özellikleri üzerinde önemli etkiye sahiptir. Normal agregalı betonlarla karşılaştırıldığında, hafif agregalı betonların basınç ve çekme dayanımları daha düşüktür. Bunun nedeni de beton üretiminde kullanılan agregaların dayanımıdır. Hafif agregalı betonlarda agrega üzerine yük aktarıldığında, agreganın dayanımı çimento harcının dayanımından daha düşük olmasından dolayı kırılma, agrega-çimento ara yüzü yerine agregada başlar. Normal agregalı betonlarda

ise normal agreganın dayanımı harç dayanımından daha fazla olmasından dolayı kırılma işlemi normal betonda en zayıf bölge olan agrega-çimento hamuru ara yüzünde oluşmaya başlar (Şekil 2.4) (Uygunoğlu 2008). Hafif agregaların dayanımları harç dayanımından daha düşük olduğundan, gelen yük çimento harcı tarafından taşınıp, hafif agregalar tarafından aktarılmaktadır (Hüsem 2003). Dolayısıyla kırılma, betona uygulanan yüke paralel olarak düz çizgiler halinde oluşmaktadır (Şekil 2.3).



Şekil 2. 3. Hafif ve normal betonda gerilme dağılımlarının gösterimi (Hüsem 2003).

Normal agregalı betonlarda ise durum farklıdır. Normal agregaların dayanımı harç dayanımından çok daha yüksektir. Dolayısıyla beton üzerine gelen yük çimento harcı tarafından aktarılmakta ve yük agregalar tarafından taşınmaktadır. Dolayısıyla normal agregalı betonlarda basınç yükü altındaki bir beton numunede oluşan gerilmeler, köşelerden numunenin orta kısmına doğru olmaktadır.

Diğer yandan yarmada çekme dayanımında yapılan deneylerde kırılmanın iri agregaların boyunca gerçekleştiği gözlemlenmiştir. Bu durumda hafif betonda agrega-matris aderansının iyi olduğunu göstermektedir (Neville 1996).

Demirboğa ve ark. (2001), farklı karışımlarda hafif agregalar ile ürettikleri hafif agregalı betonların dayanımlarını incelemiş ve karışımdaki hafif agrega oranı arttıkça hafif agregalı betonların dayanımlarının düştüğünü belirtmişlerdir.

Türkmen ve Kantarcı (2007), hafif agrega katkılı betonların dayanımlarını inceledikleri çalışmalarında, betona eklenen hafif agrega miktarı arttıkça hafif agrega katkılı betonların dayanımlarının azaldığını belirlemişlerdir.

Taşdemir (1982), normal betonun agrega granülometrisinin çeşitli bölümlerini hafif agregalarla değiştirerek karışımların elastisite modüllerinin modeller yardımı ile hesaplanabileceğini, aynı birim ağırlık için ortalama hafif agrega boyutu arttıkça, basınç mukavemetinin azaldığını göstermiştir. Aynı şekilde normal agrega ile değiştirilen hafif agreganın boyutu arttıkça hafif beton gevrek kırılmakta, tokluğu azalmakta, nihai basınç birim kısılması yine azalma göstermektedir. Böylece aynı sürekli granülometriye ve birim ağırlığa sahip betonlar içinde ince bölümü hafif agrega olan betonların mekanik özellikler bakımından daha iyi sonuç verdiğini bulmuşlardır.

2.2.1.4. Agrega- Matris Aderansı

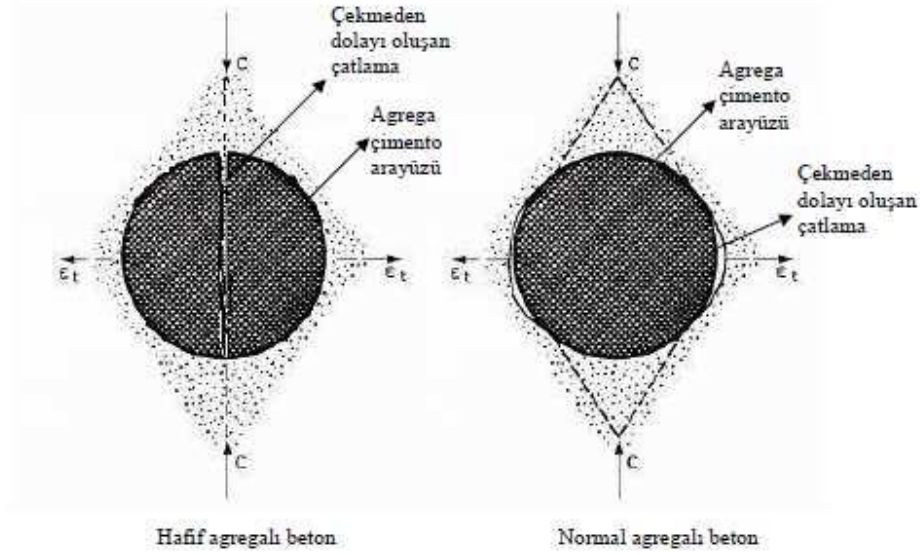
Hafif betonlarda iç gerilme transferi ve kırılma mekanizması normal betonunkinden büyük oranda farklıdır. Hafif beton içerisindeki agregalar normal betondaki harç matrisinden daha az sertliğe sahiptir. Bu nedenle basınç yükleri genel olarak agrega ve matris arasındaki sertlik ilişkisine göre harç matrisindeki sertliği ile açıklanmaktadır (Uzbaş 2008).

Hafif agregalı betonun önemli bir özelliği, agrega ile onu çevreleyen hidrate çimento pastası arasındaki yüksek aderanstır. Bu durum birkaç faktörün sonucudur. Birincisi, çoğu hafif agregaların pürüzlü yüzey yapısı iki malzeme arasında iyi bir mekanik kilitleme sağlar. İkincisi, hafif agrega tanelerinin ve sertleşmiş çimento pastasının elastisite modülleri birbirlerine göre çok farklılık göstermez. Sonuçta iki malzeme arasında gerek uygulanan dış yükten, gerekte termal değişimlerden dolayı farklı gerilmeler oluşmaz. Üçüncü olarak, karıştırma sırasında absorblanan su, zamanla hidrate olmamış çimento kısmının hidratasyonu için kullanılabilir. Böylece ilave hidratasyonun büyük bölümü agrega çimento pastası ara yüzeyinde gerçekleştiğinden aderans daha güçlü hale gelir (Neville 1996).

Normal agregalı betonlarla karşılaştırıldığında, hafif agregalı betonların basınç ve çekme dayanımları daha düşüktür. Bunun nedeni de, beton üretiminde kullanılan agregaların dayanımıdır. Hafif agregalı betonlarda agrega üzerine yük aktarıldığında, agreganın dayanımı çimento harcının dayanımından daha düşük olmasından dolayı kırılma işi agrega-çimento ara yüzü yerine agregada başlar.

Normal agregalı betonlarda ise normal agreganın dayanımı harç dayanımından daha fazla olduğundan kırılma işlemi normal betonda en zayıf bölge olan agrega çimento hamuru ara yüzeyinde oluşmaya başlar (Sekil 2.4). Hafif ve normal agregaların yük altındaki

davranışlarının farklı olması nedeniyle bu agregalarla üretilen betonların üzerindeki gerilim dağılımları da farklı olmaktadır (Uygunoğlu 2008).



Şekil 2. 4. Hafif ve normal agregaların şematik gösterimi (Uygunoğlu 2008).

2.3. Hafif betonların sınıflandırılması

Birim ağırlıkları normal betonlardan belirgin şekilde düşük olan betonlara hafif beton denilmektedir. Hafif betonlar birim ağırlıklarına, dayanımlarına ve kullanım amacına göre gruplandırılabilirler (Sancak 2005).

Hafif betonlar birim ağırlıkları ve basınç dayanımlarına göre şu şekilde sıralanırlar.

- Yalıtım betonu: Birim ağırlığı $0.2-0.6 \text{ kg/dm}^3$ ve basınç dayanımı $0.2-2.5 \text{ MPa}$ olan hafif betonlar.
- Hem yalıtım, hem taşıyıcı beton: Birim ağırlığı $0.6-1.2 \text{ kg/dm}^3$ ve basınç dayanımı $2.5-10 \text{ MPa}$ olan hafif betonlar.
- Taşıyıcı beton: Birim ağırlığı $1.2-2.0 \text{ kg/dm}^3$ ve basınç dayanımı $15-60 \text{ MPa}$ olan hafif betonlar (Beycioğlu 2008).

Normal ve hafif betonlar ile yapılan çalışmalar değerlendirildiğinde agrega beton hacminin yaklaşık % 45-70 arasındaki bir kısmını kapsadığı gözükmektedir. Bu da agreganın beton içerisinde ne derece önemli olduğunu göstermektedir.

Agregalar kaynağına göre doğal ve yapay olarak ayrılırken, ağırlıklarına göre hafif, normal ve ağır olarak üçe ayrılırlar. Agregalar tane büyüklüğüne göre iri ve ince agrega olarak iki gruba ayrılırlar. Bu grupların dışında; tane şekillerine, yüzey dokusuna, elde edilişlerine, jeoloji orijinlerine ve reaktif özelliklerine göre sınıflandırılmaktadır. Yoğunluğu 2.0-2.8 kg/dm³ arasında olan agregalar normal agrega, 2.8 kg/dm³'den büyük olan agregalar ağır agrega ve 2.0 kg/dm³'den küçük olan agregalar hafif agrega olarak sınıflandırılmaktadır.

Hafif beton üretiminde en çok başvurulan yöntem, hafif agrega ile birim ağırlığı istenen düzeyde tutmaktır. Hafif beton üretiminde kullanılan hafif agregalar, üretildikleri malzemenin kaynağına ve kendi birim ağırlıklarına göre sınıflandırılırlar. Elde edilmiş biçimlerine göre hafif agregalar dört ana grupta sıralanabilmektedir:

- Doğal hafif agregalar: Ponza taşı, volkanik tüf, volkanik cüruf ve ağaç parçacıkları gibi organik malzemeler.
- Doğal malzemelerden üretilen yapay hafif agregalar: Genleştirilmiş kil, genleştirilmiş şist, genleştirilmiş arduvaz, zeolit, vermikulit, ve strofor gibi polimer bazlı malzemeler.
- Endüstriyel atıklardan üretilen hafif agregalar: Yüksek fırın cürufu, uçucu kül.
- Endüstriyel atıkların işlenmesiyle üretilen hafif agregalar: Genleştirilmiş yüksek fırın cürufu ve kızdırılmış uçucu kül.

2.4. Zeolit

Zeolit doğal ya da yapay olmak üzere atomik düzeyde gözenekli yapıya sahip sulu alümina silikat bileşikleridir (Sarıkaya 2006). Zeolitler, kristal yapıları ve kimyasal özellikleri nedeni ile günümüz endüstrisinin yeri tutulmaz ham maddeleridir (Dayı 2006). Zeoliti 1756'da İsveç'li mineralog Cronstedt keşfetmiş ve doğal zeoliti sınıflandırmıştır. Isıtıldığında çok çabuk su kaybeden yapısından dolayı Latince "zeo" ve kaya parçalarının ısıtılmasına da "lithos" denilmesinden dolayı, malzemeye zeolit adı vermiştir (Yıldız ve ark. 2010)

Dünya zeolit rezervleri 1950'lerden sonra belirlenmeye başlanmıştır. Bin dokuz yüz seksen dokuz yılında 250.000 ton olan dünya doğal zeolit üretimi 1991 yılında 1.000.000 tona ulaşmıştır. Dünya üretiminin yaklaşık % 60'ı Küba tarafından gerçekleştirilmektedir. Diğer önemli üreticiler Japonya, ABD, Güney Afrika, Macaristan, Bulgaristan ve İtalya'dır.

Zeolitlerin ülkemizdeki varlığı 1971 yılında belirlenmiştir. Ülkemizdeki zeolit oluşumları klinoptilolit, heulandit ve analsim minerallerinden oluşmaktadır. Diğer zeolit minerallerine daha az rastlanmıştır (Dayı 2006).

Dünyada doğal zeolitlerin kullanımı ve üretimi artarken Türkiye'deki zeolit yataklarının büyüklüğü, kalitesi, işletilebilirliği ve kullanım alanları ile ilgili bilgilerin azlığı zeolit kaynaklarının değerlendirilmesini engellemektedir. Balıkesir Bigadiç yöresinde yaklaşık 50 milyar ton toplam rezerv tespit edilmiştir. Bigadiç yöresinden boratlı seviyeler üzerindeki zeolitli üst tuf biriminden üretilen zeolit yurtdışına ihraç edilmektedir (Dayı 2006).

Ülkemizin doğal zeolit kaynaklarınca zengin olması, bu malzemenin çimento endüstrisinde kullanılarak ülke ekonomisine kazandırılmasını önemli kılmaktadır. Özellikle dünyanın en büyük çimento üreticilerinden birisi olan Çin'de yılda 30 milyon ton zeolit kullanılmaktadır (Canpolat ve ark. 2004). Türkiye her ne kadar zengin zeolit yataklarına sahip ise de, zeolit endüstriyel kullanımı henüz tam olarak gerçekleşmemiştir.

Zeolitler inşaat sektöründe başlıca şu şekillerde kullanılırlar.

- Puzzolan çimento,
- Hafif agrega,
- Boyutlandırılmış taş.

Zeolitler 200 yıldan beri yapı taşı olarak kullanılmışlardır. Zeolitli tüflerin hafif oluşu kadar dayanıklı oluşları ve kolaylıkla kesilip işlenebilmeleri de yapı taşı olarak kullanılmalarının en önemli nedenleridir. Güney Meksika' da birçok binalar % 90 mordenit ve klinoptilolit içeren zeolitik tüflerden kesilmiş taşlardan yapılmışlardır. Aynı şekilde Japonya'nın Otsunomiyo kenti yakınlarında yüzlerce yıldır yapı taşı olarak işletilen zeolitler 100 metreden fazla kalınlığa sahiptirler. Yapı taşı olarak işletilen zeolitler, % 80–85 klinoptilolit yanında az miktarlarda montmorilonit, kaledonit ve volkanik cam içerirler. Orta İtalya'daki ünlü Napoli kentinin hemen hemen tüm binaları büyük miktarlarda şabazit ve filipsit içeren sarı zeolit tüflerinden yapılmışlardır. Orta Avrupa'daki birçok büyük binalarda, Almanya'daki Leacher bölgesindeki zeolitik tüflerden kesilmiş yapı taşları kullanılmıştır. Avrupa'daki birçok ülkede, zeolitlerin yapı endüstrisinde değişik biçimlerde kullanılmaları araştırılmaktadır. Klinoptilolit, 1200–1400°C kadar ısıtıldığında, içerdiği suyun ani olarak buhar fazına geçmesi ile genişmekte ve bu anda soğuma sağlanırsa hafif ve gözenekli bir

silikat malzemesi oluşmaktadır. Böylece geliştirilmiş zeolitlerde yoğunluk 0.8 g/cm^3 'e kadar düşmekte, gözeneklilik de % 65'e kadar çıkabilmektedir.

Genleştirilmiş doğal zeolitlerin sıkışma ve aşınmaya karşı dayanımı daha yüksek olup, geliştirilmiş hafif agrega üretilmektedir. Doğal zeolitik tüfler düşük ağırlıklı, yüksek gözenekli, homojen, sıkı-sağlam yapıdadırlar. Bu özelliklerinden dolayı hafif yapı taşı olarak yapı endüstrisinde kullanılabilirler.

Gelişmiş ülkelerde doğal zeolitlerin yapı endüstrisinde kullanımı uygun olarak görülmektedir. Bu ülkelerin başında Rusya, Kanada, USA, Japonya ve Belçika gelmektedir. Özellikle Rus bilim adamları doğal zeolitlerden yapı endüstrisinde, dekoratif süslemelerde kullanılması için çalışmalar yapmışlar ve bu çalışmaların sonuçlarını patent alarak hayata geçirmişlerdir.

Zeolitik tüf yatakları birçok ülkede puzzolonik ham madde olarak kullanılmaktadır. Zeolit puzzolanları, son beton ürününün daima yeraltı su korozyonuna maruz kalacağı hidrolik çimentolarda, önemli uygulamalar bulmaktadır. Zeolitlerin sulu altyapılarda kullanılacak puzzolan çimento üretiminde kullanılması, yüksek silis içermeleri nedeniyle betonun katılma sürecinde açığa çıkan kirecin nötrleşmesini sağlayabilmektedir.

Zeolit düşük ağırlıklı, yüksek gözenekli, homojen, sıkı-sağlam yapıdır. Kolayca kesilip işlenebilmeleri ve hafiflikleri ile iyi bir yapı taşı olarak kullanılabilirler. Doğal zeolitlerden elde edilen hafif yapı malzemelerinin kullanılmasıyla, yapı ağırlıklarının azaltılması sonucu, deprem güvenliğinin artması da sağlanacaktır. Bu malzemelerin hafif olması yapıların taşıyıcı sistemlerinde ekonomi sağlandığı gibi, deprem yüklerine karşı güvenliği de arttırmaktadır.

Doğal zeolitlerden yapılan hafif yapı malzemelerinin, taşıma ve işçilik giderlerinde önemli tasarruf sağlayacağı bir gerçektir. Bu malzemelerden yapılan blokların düzgün yüzeyli ve düzgün kenarlı olması, duvarların sıvasız bırakılmasına veya yalnızca ince sıva ile sıvanmasına olanak verecektir. Bu malzemelerin yüksek dayanım gücüne sahip özelliklerde üretilmeleri olasıdır. Bu malzemeler yüksek düzeyde ısı yalıtım özelliğine sahiptirler. Doğal zeolitleri özelliklerinden dolayı, iklim ve çevre koşullarından etkilenmez, dayanıklı ve uzun ömürlüdür ve hafifliği nedeniyle büyük boyutlarda üretilmektedir. Büyük boyutlu ve düzgün yüzeyli bloklarla duvar örülmesi özel bir beceri gerektirmez. Ahşap gibi kesilebilir, delinebilir, tesisat kanalları açılabilir. Bu özellikleri ile yapıyı hızlandırır, malzeme israfını

ortadan kaldırır. Doğal zeolitlerden yapılan bu yapı malzemelerinin ateşe dayanıklı olması, yangına karşı güvenliği artırır ve yangından korunmuş mekânların yaratılmasına olanak sağlar (Sarıkaya 2006).

Son yıllarda zeolitin puzzolan çimento, hafif agrega, boyutlandırılmış taş olarak kullanımı üzerine çeşitli çalışmalar yapılmış ve yapılmaktadır. Türkiye'deki zeolit rezervleri düşünüldüğünde bu çalışmaların ülkemiz için önemi bir kat daha fazladır.

Serbest (1999), Manisa-Gördes yöresi ve Balıkesir-Bigadiç yöresine ait içinde doğal zeolitlerden klinoptilolit bulunan zeolitik tüf örnekleriyle deneyler yapılmıştır. Deneyler sonucunda zeolitik tüflerden üretilen "Anafom" adlı malzemenin, hafif yapı endüstrisinde kullanımının daha uygun olduğunu saptanmıştır.

Poon, Lam, Kou ve Lin (1999), 0.25 ve 0.30 su/çimento oranına sahip beton örneklerinde çimento yerine çimento ağırlığının %0, %15 ve %25 oranlarında zeolit kullanarak basınç dayanımlarını ve zeolitin pozolanik aktivitesi ile porozitesini incelemişlerdir.

Saka (2001), zeoliti endüstriyel atıkların çöp depolama alanı dizaynında geçirimsizlik malzemesi olarak değerlendirmiştir.

Apaydın ve Sunay (2004), çimento yerine farklı oranlarda zeolit kullanarak beton üzerinde etkisini araştırmışlar ve ayrıca aynı oranlarda uçucu kül kullanarak, zeolitli örneklerle kıyaslayarak dayanımlarını incelemişlerdir.

Yılmaz ve ark. (2002), zeolitin harç üzerindeki kullanımını inceledikleri çalışmada pozolanik malzemelerin harcın hacim genişmesi, priz süresi ve su yüzdelere olan etkilerini araştırmışlardır. Çalışma sonunda kullanılan katkıların çimento üretiminde katkı maddesi olarak kullanılabileceği belirlenmiştir.

Yapılan diğer çalışmada, Manisa-Gördes yöresinden elde edilen doğal zeolitin ve Soma Termik Santral atığı olan taban külünün çimento üretiminde pozolanik malzeme olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır. Manisa- Gördes doğal zeolitinin % 10, % 20, % 30, doğal zeolit katkılı ve doğal zeolit+taban külü katkılı çimentoların fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri yönünden birbirleriyle ve kontrol çimentoları olan CEM I 32.5 ve CEM I 42.5 ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar zeolit katkılı çimento ve doğal zeolit+taban külü katkılı çimentoların ilgili Türk Standartlarına uygun olduğunu ve dolayısıyla doğal zeolit ve

taban külünün çimento üretiminde katkı malzemesi olarak kullanılabileceğini belirtilmiştir (Yılmaz ve ark. 2004).

Okucu (1998) yaptıkları çalışmada zeolitik, perlitik ve bunlara alternatif diğer yakın çevre puzolanları ile TS 24'e uygun olarak katkılı çimentolar hazırlanmıştır. Katkı oranları Balıkesir SET Çimento Fabrikası işletme koşullarına uygun %24, %26,%28 olarak belirlenmiştir. Zeolitik tüflerin puzolanik aktivitelerinin ve 28. gün sonunda basınç mukavemetlerinin yüksek olduğunu saptamışlardır. Zeolitik ve perlitik tüf katkılı çimentolar ve portland çimentosunun dayanıklılık özelliklerini belirlemek için %24, %28, %32 katkılı çimentolar ve aynı klinkerden portland çimentosu (şahit çimento) üretmişlerdir. Bu çimentolarla hazırlanan harçlar 28. gün normal koşullarda suda, 28. gün (0. başlangıç yaşı) den sonra 12 hafta su ve sülfat çözeltisinde kür edilmiştir. Portland çimentosuna göre sülfatlı ortamda harcın dayanıklılığını arttırdığını ve özellikle zeolit katkılı harçlarda bu özelliklerin daha belirgin olduğunu, fakat çimentoya katılacak katkı miktarının çok önemli olduğunu belirlemişlerdir.

Çimento üretiminin daha düşük maliyetli olması için hidrolik çimentolara puzolan katılması uygundur. Yapılan bir deneysel çalışmada, Manisa-Gördes yöresinden elde edilen doğal zeolitin çimentoda katkı uygunluğu araştırılmıştır. Manisa-Gördes doğal zeolitinin %0, % 15 ve %30 doğal zeolit katkılı ve doğal zeolit + süperplastikleştirici katkılı çimentoları fiziksel ve kimyasal özellikleri yönünden birbirleriyle ve kontrol çimentosu olan CEM I 42.5 ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlarda %15 doğal zeolit katkılı numunelerin çimentoda uygun olduğunu belirlenmiştir (Yıldırım 2007).

Karaüç (2008) tarafından hazır beton sanayinde kullanılan süper akışkankatıştırıcı katkıların ve belirli oranlarda çimento yerine kullanılan uçucu kül veya zeolit miktarının kendiliğinden yerleşen betonun özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Belirli oranlarda çimento yerine kullanılan farklı oranlarda uçucu kül veya zeolit miktarına sahip beton karışımları, uçucu kül veya zeolit kullanılmayan karışımla karşılaştırılmış ve sonuçta uçucu kül veya zeolitin maliyet ve hidrasyona olumlu etkisi gibi üstünlükleri de gözönüne alındığında, kendiliğinden yerleşen beton karışımlarında çimento yerine %20 oranında uçucu kül kullanılmasının dayanım özellikleri bakımından daha iyi olacağı görülmüştür.

Mesci (2007) tarafından, Samsun Eti Bakır İşletmeleri Tesisi flotasyon atıkları ve Manisa-Gördes klinoptilolitlerinin çimento katkı maddesi olarak kullanılabilirliği

araştırılmıştır. İlk aşamada çimentoya, % 2.5, % 5, % 7.5, % 10, % 12.5 ve % 15 oranlarında flotasyon atıkları, klinoptilolit ve flotasyon atıkları-klinoptilolit ilave edilerek çimentonun kıvam suyu, priz süresi, hacim genişmesi, elek bakiyesi, özgül yüzey, özgül ağırlık ve basınç dayanımı gibi fiziksel ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Sonuç olarak bakır endüstrisi flotasyon atıklarının çimento ham maddesi olarak % 5 oranlarında klinoptilolit ile birlikte kullanıldığında beton performansı yönünden daha iyi sonuçlar verdiği ve klinoptilolit'in iyon değiştirme özelliği ile flotasyon atığındaki bakır konsantrasyonunu önemli ölçüde azalttığı görülmüştür. Aynı zamanda bakır flotasyon atıkları klinoptilolit ile birlikte kullanıldığında bakır atığının çimentoda oluşturduğu olumsuz etkileri azalttığı gözlenmiştir.

Sarıkaya (2006) yaptığı çalışmada, Atabey agregası ile Manisa-Gördes bölgesinden çıkartılan zeolit agregası kullanılmıştır. Üretilen betonlarda zeolit miktarı arttıkça basınç dayanımları azalmıştır. Katkılı betonun basınç dayanımları ise normal betona göre yüksektir. Katkılı betonun eğilme dayanımları ise zeolit miktarı arttıkça eğilme dayanımı azalmıştır.

Doğal zeolitlerin çimento esaslı hafif yapı malzemesi üretiminde hafif agrega olarak kullanımı konusunda ise; çimento-beton katkısı olarak kullanımına oranla daha az bilgi bulunmaktadır.

2.5. Puzolanlar

Puzolanlar, kendi başlarına bağlayıcılık değeri olmayan veya çok az bağlayıcılık gösterebilen, sulu ortamda kalsiyum hidroksitle birleştirildiklerinde hidrolik bağlayıcılık özelliğine sahip olan silisli veya silis ve alüminli malzemeler olarak tanımlanmaktadır (Erdoğan 2003).

Puzolanların yapısında yer alan silisin ve alüminin yanı sıra, bir miktar da demir oksit, kalsiyum oksit, alkaliler ve karbon bulunmaktadır. Puzolanlar iki genel gruba ayrılmaktadır:

- Doğal puzolanlar, doğada volkanik kütlelerin bulunduğu yerlerde görülür. Her puzolanın kimyasal yapısı ve aktivitesi, bulunduğu bölgeye göre değişir. Doğal puzolanlara örnek olarak volkanik tüfler, tras, diatomit, pomza taşı verilebilir. Doğal puzolanlar çoğunlukla genç volkanizma ürünüdür (Dayı 2006).
- Yapay puzolanlar, sanayi üretim atığıdır. Yapılarında doğal puzolanlardaki gibi oksit bileşenler (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO) içermelerinden dolayı, puzolan ve üretimdeki

reaksiyonlar sonunda oluştukları için yapay puzolan denilmiştir. Atıktaki silisin aktifliği, puzolanın aktifliğini belirler. Yapay puzolanlar yüksek fırın curufu, uçucu kül, silis dumanı ve pirinç kabuğu külüdür (Dayı 2006).

Kalsiyumhidroksit, silis ve su arasındaki reaksiyonlar, Portland çimentosunun hidrasyonunda olduğu gibi hidrolik bağlayıcılık özelliğine sahip kalsiyumsilikahidrat (C-S-H) jellerinin oluşmasına yol açmaktadır (Erdoğan 2003). Oluşan bu madde bağlayıcı özelliğe sahiptir.

Yapı sektöründe genel maliyetler incelendiğinde, maliyetlerin en büyüklerinden birini beton, beton incelendiğinde ise en büyük maliyeti çimento oluşturmaktadır. Kullanılan tüm puzolanik materyaller çimentoyu azaltma amaçlıdır. Bu sayede gerek portland çimentosunun bir kısmını oluşturarak katkılı çimento üretiminde, gerekse beton yapımında kullanılan portland çimentosunun bir miktarının yerine kullanılmasıyla hem çevresel problemlerin azaltılması hem de beton maliyeti açısından küçümsenmeyecek bir ekonomi sağlanmış olmaktadır.

Çimento yerine puzolanik materyallerin betonda kullanımı son yıllarda üzerinde önemle durulan konuların başındadır. Bu önem puzolanik materyallerin kullanımının sağladığı enerji tasarrufu ve çimento üretimi sırasında ortaya çıkan çevre sorunlarının azaltılmasından ileri gelmektedir. Bir ton portland çimentosu üretimi sırasında, bir kısmı ham maddelerin kalsinasyonundan bir kısmı ise kullanılan fosil yakıtlardan kaynaklanan yaklaşık bir ton CO₂ gazı atmosfere salınmaktadır. Dünyadaki toplam CO₂ gazı emisyonunun yaklaşık %8'inin çimento endüstrisinden kaynaklandığı bilinmektedir. Dolayısıyla inşaat sektörü için gerekli çimento üretimini azaltmaksızın portland çimentosu klinkeri üretiminin azaltılabilmesi, belirli miktarlarda puzolanik materyal içeren katkılı çimentoların veya beton karışımlarının yaygın olarak kullanımıyla sağlanabilecektir.

İlave bağlayıcı malzemelerin katkılı çimentolardaki veya betondaki miktarları arttıka, bu malzemelerin kullanımıyla sağlanan yararların büyüklüğu de artmaktadır. Ancak ilave bağlayıcı malzemelerin bağlayıcı sistemlerdeki miktarı, özellikle doğal puzolanlar için su gereksinimindeki artış ve dayanım kazanma hızındaki azalma gibi faktörler tarafından kısıtlanmaktadır. Bundan dolayı katkılı çimentolarda veya betonda kullanılan doğal puzolan miktarını, dayanım kaybı olmaksızın olanaklar ölçüsünde artırmak amacıyla araştırmalar

yapılması gerekmektedir. Bu amaç yaygın olarak kullanılan doğal puzolanlardan daha reaktif doğal malzemeleri içeren bağlayıcı sistemler üzerinde çalışılmasını gerektirmektedir.

2.6. Bor

Bor, periyodik tabloda III A grubunda yer alan, B simgesi ile gösterilen, atom numarası 5 atom ağırlığı 10.81 olan, iki kararlı izotop; B10 (% 19.8) ve B11 (%80.2)'den oluşan, metalle ametal arası yarı iletken özelliğe sahip bir elementtir. Tabiatta hiçbir zaman serbest halde bulunmaz. Yer kabuğunda ortalama 10 ppm denizlerde ortalama 4.6 ppm bor bulunmaktadır (Altun 2005).

Borun çeşitli metal veya ametal elementlerle yaptığı bileşiklerin gösterdiği farklı özellikler, bor bileşiklerinin birçok endüstride kullanılmasına olanak sağlamaktadır. Bor, bileşiklerinde metal dışı bileşikler gibi davranır, ancak farklı olarak saf bor, görünüm ve optik özellikleri açısından elmasa benzer ve neredeyse elmas kadar serttir (Altun 2005).

Bor, doğada serbest olarak bulunmaz. Bor elementi, doğada değişik oranlarda bor oksit olarak 150'den fazla mineralin yapısı içinde bulunmaktadır. Ancak ekonomik anlamda bor mineralleri kalsiyum, sodyum ve magnezyum elementleri ile hidrat bileşikleri halinde bulunur. Bor minerallerinden ticari değere sahip olanlar; tinkal ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$), kolemanit ($\text{Ca}_2\text{B}_6\text{O}_{11} \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) ve üleksittir ($\text{NaCaB}_5\text{O}_9 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$).

Türkiye, başta bor olmak üzere toryum, perlit, ponza, mermer, trona, volkanik tuzlar, volkanik killer, manyezit, feldspat, altın ve kromit'te dünya ölçeğinde önemli rezervlere sahiptir. Bu rezervlerin dış pazarlarda ciddi pay sahibi olabileceği düşünülmektedir (Bayar 2004).

Türkiye, 21. yüzyılda petrol kadar, önemli olabileceği düşünülen bor madeninin dünyadaki en büyük rezerv ülkesidir. Türkiye, dünya toplam rezervinin % 64'üne sahiptir. Türkiye'den sonra bor rezervi bakımından USA (%9), Rusya (%11), Çin(%4), Şili(%5), Bolivya(%2), Peru(%2), Arjantin(%2) ve Kazakistan (%2) gelmektedir.

Günümüzde Dünya bor rezervlerinin ve üretiminin en fazla olduğu iki ülke USA ve Türkiye'dir. Önemli üretici ülkelerin bu üretimdeki payları sırasıyla Türkiye % 33, USA % 28, Rusya % 23 ve diğer ülkeler % 16 düzeyindedir (Binici 2010). Dünya toplam bor rezervi ve ülkelere göre dağılımı Çizelge 2.1 ve Şekil 2.5'de görülmektedir.

Çizelge 2. 1. Dünyadaki bor rezervleri

Ülke	Mevcut Rezerv	Olası Rezerv	Toplam Rezerv	Toplam Rezerv %	Rezerv
Türkiye	224.000	339.000	563.000	64	389
USA	40.000	40.000	80.000	9	55
Rusya	40.000	60.000	100.000	11	69
Çin	27.000	9.000	36.000	4	25
Şili	8.000	33.000	41.000	5	28
Bolivya	4.000	15.000	19.000	2	13
Peru	4.000	18.000	22.000	2	15
Arjantin	2.000	7.000	9.000	1	6
Kazakistan	14.000	1.000	15.000	2	10
Toplam	363.000	522.000	885.000	100	610

Ülkemizde bor yatakları; Balıkesir, Bursa, Eskişehir, Kütahya illerinde yer almaktadır. Bu yataklardan Eskişehir-Kırka bor yatağı bugüne kadar bilinen dünyanın en büyük bor yatağıdır. Türkiye rezervlerinin % 37'si Bigadiç, % 34'ü Emet, % 28'i Kırka ve %1'i Kestelek bölgesinde bulunmaktadır.

Türkiye'de bulunan önemli ölçüde ticari değere sahip olan bor minareleri tinkal ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$), kolemanit ($\text{Ca}_2\text{B}_6\text{O}_{11} \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) ve üleksittir ($\text{NaCaB}_5\text{O}_9 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$) (Bayca ve ark. 2008, Batar ve ark. 2009). Bor bileşiklerinin içindeki B_2O_3 (bor oksit) oranına “tenör” adı verilmektedir. Bor madenlerinin değeri, içindeki B_2O_3 oranı ile ölçülmekte ve yüksek oranda B_2O_3 bileşiğine sahip olanlar daha değerli kabul edilmektedir (Buluttekin, 2008). Tinkal minerali %36.6 B_2O_3 oranına sahiptir.Yüksek tenördeki bor cevherleri ekonomik olarak çıkarılmakta ve işlenmektedir.

Kırka Bor Tesisi, çözme, kristallendirme kuruyuma ve ergitme olmak üzere üç bölümden oluşmaktadır.

I. Çözme Bölümü: Tinkal konsantresi buharla ısıtılan ve içinde karıştırıcı bulunan çözme tankına beslenir. Burada sirküle ettirilen zayıf çözelti ve suyla karıştırılarak çözülür. Çözme tankı sıcaklığı 98°C 'de tutulur.

Tinkal konsantresinde çözünmeyen safsızlıkların flokülasyon çözeltisi dairevi tiknere beslenir. Boraks çözeltisi tikner taşkanı olarak alınır, filtre edilir, kristalizöre beslemek üzere

depolanır. Tikner alt çıkışı ise, ikinci bir flokülasyona tabi tuulduktan sonra atık göletine gönderilir.

II. Kristallendirme Bölümü: Besleme tankından alınan çözelti 66°C’de vakumla çalışan penta kristalizatörüne gönderilir ve $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ kristalleri elde edilir. Kristaller bir tanka alınır, hidrosiklon ve santrifüjde kristaller ve çözelti ayrılır. Çıkan çözelti $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ kristalleri elde etmek için 46 °C’de çalışan deka kristalizatörüne gönderilir. Bu kristalizörden alınan kristaller de bir tanka alınır. Hidrosiklon ve santrifüjde çözeltiden ayrılır. Ana çözelti, beslenen tinkal konsantresini çözmek için tekrar çözme tankına gönderilir. Pentahidrat ve dekahidrat kristalleri kurutma ve ergitme bölümüne gönderilir.

III. Kurutma ve Ergitme Bölümü: Boraks dekahidrat kristallerinden bir kısmı önce döner kurutucuda kurutulur. Kurutulmuş kristallerin bir kısmı bir elekten geçirilerek istenen tane büyüklüğündeki kristaller mamul rafine boraks dekahidrat olarak depolamaya gönderilir. Elek üstü elek altı ve geri kalan ile bir direkt döner kurutucuda kurutulan dekahidrat kristalleri ikinci döner kavurucuda kalsine edilerek 2.5 mol su ihtiva eden boraks elde edilir. Kalsine edilmiş bu boraks ham boraks pentahidratın elek üstü ve elek altıyla beraber ham susuz boraks elde etmek için suyu uçurulmak üzere ham boraks fırınına gönderilir.

Pentahidrat kristalizatöründe elde edilen boraks pentahidrat kristalleri esas olarak ham boraks pentahidrat üretiminde kullanılır. Bunun için pentahidrat kristalizatöründen alınan boraks pentahidrat döner kurutucuda kurutulur. Kurutulan kristaller istenen tane büyüklüğüne göre ayrılmak için bir elekten geçirilir. Elek altı ve elek üstü 2.5 mol su ihtiva eden boraksla beraber ham susuz boraks elde etmek üzere ham boraks fırınına gönderilir. Fırından ergimiş halde çıkan boraks içten soğutmalı merdanelerde soğutularak levha haline getirilir daha sonra levha kırıcı ve çekiçle kırıcıda kırılır. Elekten geçirilerek istenen tane büyüklüğündeki ürün depolamaya gönderilir (Kula 2000).

Zenginleştirme yöntemi olarak, kilin suda şişerek kolayca kıymetli bor minerallerinden ayrılması özelliğinden yararlanarak, su ile ayırma işlemi uygulanmaktadır. Söz konusu ayırma prensibi, ülkemizdeki Kırka- Eskişehir, Emet-Kütahya ve Bigadiç-Balıkesir'deki tesislerde, benzer şekilde uygulanmaktadır. Ancak zenginleştirme sonrasında atık barajlarında tutulan sulu atıklarda bulunan bor içeriği (B_2O_3 tenörü), diğer bor üreticisi ülkelere oranla oldukça yüksektir (Batar ve ark. 2009).

Son yıllarda bor mineralleri içeren kimyasal atıkların çimento katkısı olarak kullanımı üzerine çeşitli çalışmalar yapılmış ve yapılmaktadır. Türkiye'deki bor rezervleri düşünüldüğünde, bu çalışmaların ülkemiz için önemi bir kat daha fazladır.

Bor atıklarının değerlendirilmesine yönelik çalışmalar, öncelikle bor atıklarının tekrar kazanılması veya geriye kalan kil içerikli minerallerin uygun sektörlerde kullanılabilir hale getirilmesinin en uygun değerlendirme şekli olduğu görülmektedir. Yan kayacının çoğunlukla kil mineralleri içermesinden dolayı, esas ham maddesi kil olan inşaat ve seramik sektörlerinde bor atıklarının kullanılabilirliğine yönelik birçok çalışma yapılmıştır (Bayca ve ark. 2008).

Bor atıklarının değerlendirilmesine yönelik çalışmaların büyük kısmı mevcut yaş yöntem atıklarının değerlendirilmesi üzerinedir. Bor atıklarının seramik sanayisinde; sır, çini hamuru, döküm çamuru yapımı, yer ve duvar karosu yapı sektöründe; çimento, hazır beton, hafif yapı elemanı, tuğla ve kiremit üretiminde ayrıca cam, emaye ve silika refrakterler için hammadde veya katkı maddesi olarak kullanılabilir. Bu çalışmada ise, tinkal cevherinin ısıl işlemle zenginleştirilmesi sonucu elde edilen konsantre ve atık ayrı ayrı değerlendirilmeye çalışılmıştır. Böylece çevre dostu bir yöntem sonucu üretilen ürünlerin (konsantre ve atık) yapı sektöründe kullanılabilmesinin mümkün olabileceği görülmüş ve söz konusu yaş yöntemle ortaya çıkan zararlı atıkların sakıncaları ortadan kaldırılmıştır.

Aydın (2009) yaptığı çalışmada kolemanit atığının beton numunelerinin basınç ve silindir yarmada çekme dayanımına olan etkisi araştırılmıştır. Bor atığı çimento ile %3, %5, %10 ve %15 yer değiştirme oranlarında kullanılmıştır. Basınç ve silindir yarmada çekme dayanımı sonuçları %3 ve %5 bor katkısının betonun dayanım özelliklerini iyileştirdiğini göstermiştir. Özellikle bor katkılı tüm karışımların uzun vadede şahit numuneden daha yüksek dayanım göstermesi, bor atığının betonda mineral katkı olarak kullanılabilmesi ortaya konulmuştur.

Olgun ve ark. (2007), çimento üretiminde kolemanit konsantratör atığının alçıtaşı yerine kullanılmasıyla priz zamanlarının uzadığını tespit etmiştir. Kolemanit konsantratör atığı katkısının, harç numunelerinin erken yaşlardaki basınç dayanımını düşürdüğünü belirlemişlerdir.

Fındık (2007) tarafından, kolemanit konsantratör atığının çimento ve beton katkısı olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır. Kolemanit konsantratör atığını (KKA) %3 ve %5 oranında içeren harç ve beton numunelerinin büyük bir kısmı şahit beton ve harç

numunelerinin dayanımını karşılamıştır. Boşluk oranı, aşınma, karbonatlaşma deneyleri de gerçekleştirilmiş olup bu deneyler sonucunda şahit numunelerde en yakın sonucu yine %3 ve %5 katkılı harçlar vermiştir. Tüm KKA katkılı harçlar, şahit numunelerden daha düşük rötre yapmışlardır. Yüzde üç KKA katkılı harçların şahit numunelere göre %40 daha düşük rötre değeri verdiği belirlenmiştir. Bu yüzden KKA'nın rötre azaltıcı katkı olarak kullanılabilceği düşünülmektedir.

Özmal ve ark (2005), kolemanit katkılı olarak üretilen çimentolarla yaptıkları çalışmalar sonucunda kolemanit katkısının çimentonun priz başlangıç ve sona erme sürelerini uzattığını bildirmişlerdir. KA (kolemanit atığı) katkılı olarak üretilen çimentolarla üretilmiş oldukları harç numunelerinin basınç dayanımlarının KA yüzdesinin artmasıyla birlikte azaldığını belirlemişlerdir. Sonuç olarak; kolemanit konsantratör atığı, uçucu kül ve alümit katkılı çimentoların priz süreleri, kolemanit konsantratör atığının klinkere ağırlıkça %1, %3 ve %5 oranında katıldığı çimentolarda önerilen değerlere uygun olduğu belirlenmiştir.

Kavas ve ark. (2005), kolemanit katkılı çimentolara ilave edilen organik katkı maddesinin kolemanitten dolayı uzayan priz zamanlarını kısalttığını tespit etmişlerdir. KA (kolemanit atığı) katkılı çimentolara ilave edilen %0.5 ve %1.0 oranlarında organik katkı maddesinin, numunelerin basınç dayanımlarını artırdığını söylemişlerdir. KA katkılı çimentolara ilave edilen %0.5 ve %1.0 oranlarında organik katkı maddesinin, numunelerin çekme dayanımlarını artırdığını belirtmişlerdir.

Topçu ve Boğa (2005) yapmış oldukları araştırmada; tinal üretim sırasında ortaya çıkan bor atıklarının harçlar içerisinde belli oranlarda çimento ile yer değiştirilerek kullanılması ile harçların dayanıklılığının değişimleri incelenmiştir. Sonuç olarak donma-çözülme, sülfat ve klor iyonlarının zararlı etkilerine karşı %3 ve daha düşük oranlarda bor atığının kullanılmasının yararlı olacağı görülmüştür.

Targan (2001), %4 kolemanit katkısının çimentonun priz süresinde büyük bir gecikme etkisi yarattığını belirlemişlerdir.

Başka bir çalışmada, tinal konsantratör atığı, taban külü ve uçucu kül atıkları portland çimentosuna ilave edilmiş ve bu atıkların çimento katkı maddesi olarak kullanılabilceği sonucuna ulaşmıştır (Kula ve ark. 2002).

Kula ve ark. (2001) kolemanit atığı, taban külü ve uçucu kül atıklarının portland çimentosuna katkı maddesi olarak kullanımının genellikle portland çimento pastasının basınç dayanımlarını geliştirdiğini bulmuşlardır.

Targan (2001) tarafından yapılan çalışmada kolemanit konsantratör atıklarını PÇ-42.5 klinkerine Kula Cürufu ve Bentonit ile birlikte ikili karışımlar şeklinde %4 oranında ilave ederek alçı taşı ile birlikte karışımı kuru şekilde öğütürerek çimentonun mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini incelemiştir. Kolemanit konsantratörü atığının ilavesiyle oluşan çimento karışımlarında priz sonu değerleri, diğer harçların priz değerlerinden daha fazla olmuştur. Basınç dayanım değerleri göz önüne alındığında kolemanit konsantratörü atığı ilavesiyle oluşturulan çimento harçlarının basınç dayanım değerleri portland çimentosu değerlerine göre düşük çıkmış, ancak Kula cürufu ile birlikte ikili karışım harcı oluşturduğu için tüm basınç dayanım değerleri önerilen değerlere uygun çıkmıştır. Fakat 60 ve 90 günlük basınç dayanım değerleri incelendiğinde %5 Bentonit ile birlikte kolemanit konsantratör atığı kullanılarak hazırlanan çimento harçlarının basınç dayanım değerleri önerilen değerlerden yüksek çıkmıştır.

Zeybek (2000) yapmış olduğu çalışmasında; Kütahya–Emet–Hisarcık Bor Konsantr Tesislerinden elde ettiği kolemanit konsantratör atığını portland çimentosu klinkerine çeşitli oranlarda ilave ederek çimento karışımları hazırlamış ve nötron tutma kapasitelerini incelemiştir. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde; kolemanit konsantratör atığı ilavesiyle oluşturulan çimento karışımlarının, katkısız çimentoya göre daha fazla suya gereksinim duyduğu tespit edilmiştir. Basınç dayanım değerleri de yine portland çimentosu değerinden düşüktür. Borlu çimento harçlarının nötron tutma kapasiteleri ise, %7 atık ilavesiyle oluşturulan çimento numunelerinde nötron geçirgenliğinin en az olduğu belirlenmiştir. portland çimentosuyla hazırlanan bir betonun nötronları 4 cm kalınlıkta % 60'ını tutabilirken % 15 Hisarcık elek altı katkılı çimentolarla hazırlanan beton blokların nötron tutma kapasiteleri % 76.2 dir.

Kula (2000) yapmış olduğu çalışmasında; Kütahya–Emet-Hisarcık Bor konsantratör tesislerinden elde ettiği kolemanit konsantratörü atığını önce %1.3, %5.7 ve %9 oranlarında tek başına portland çimentosu klinkerine ilave etmiş ve alçı taşı ile birlikte öğütürerek çimento karışımları oluşturmuştur. Kolemanit konsantratörü atığı katkılı karışımlara %4, %7, %10, %13 ve %16 oranlarında uçucu kül ilave edilerek yeni seri çimento karışımları elde etmiş ve bu çimentolardan elde edilen harçların mekanik özellikleri incelenmiştir. Elde edilen verilere

göre; kolemanit katkılı çimento harçlarının ve uçucu kütle birlikte kolemanit konsantratör atığı ikili karışım harçlarının priz değerleri önerilen değerlere uygun çıkmıştır. Kolemanit konsantratör atıklı harçların ve uçucu kütle birlikte oluşturulan ikili karışım harçlarından elde edilen basınç dayanım değerleri önerilen değerlere uygun bulunmuş, ancak kolemanit konsantratör katkı oranı %9'ı geçtiği takdirde standartların altında kalmaya başlamıştır.

Sarıkaya ve Tonak (1999), ülkemizde bulunan bazı bor cevherleri ile bunların çimento üretiminde kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Araştırma sonucunda; incelenen bor cevherleri ve atıkları içinde kolemanit içeren bor cevheri ve atıklarının çimento üretimi için en uygun ham maddeler olduğunu tespit etmişlerdir.

Kavas ve Emrulloğlu (2005), Seydişehir kırmızı çamuru ile Kırka bor atık killerini değişik oranlarda karıştırarak, yüksek dayanımlı ve düşük su emme özelliğine sahip kaliteli tuğla üretmişlerdir.

Erdoğan ve ark. (1998), kolemanitin çeşitli oranlarda portland çimentosuna ilavesi ile hazırlanan numunelerin priz zamanlarının artan kolemanit atığının (KA) yüzdesi ile beraber arttığını ancak önerilen sınırlar içerisinde kaldığını bildirmiştir. Kolemanit atığının çeşitli oranlarda portland çimentosuna ilavesi ile hazırlanan numunelerin hacim genleşmelerini incelemiş ve KA katkısının portland çimentosunun hacim genleşmesini etkilemediğini, bütün numunelerin önerilen değerlerin altında hacim genleşmesi gösterdiğini rapor etmiştir. Yüzde bir'den %7' ye kadar KA katkısının numunelerin basınç dayanımını arttırdığını bildirmişlerdir.

Erdoğan (1994), rafine borojips çimentonun %4 oranında ilave edildiğinde portland çimento pastasının eğilme dayanımını arttırırken, traslı çimento pastasının basınç dayanımını azaltmıştır. Bu sonuçlar, Erdoğan ve ark. (1992) tarafından da doğrulanmıştır.

Kula (2000) tarafından yapılan çalışmalarda, bor içeren atıkların çimento üretiminde kullanılması sırasında özellikle çimentonun priz süresini geciktirdiği ve çimento harcının erken dayanımını azalttığı bulunmuştur.

Erkal (1990) yapmış olduğu çalışmasında; Kütahya-Emet-Hisarçık Bor konsantre tesislerinden sağlanan kolemanit konsantratör atıklarının değerlendirilme olanaklarını araştırmış ve kolemanit konsantratör atıklarının çeşitli endüstri dallarında kullanılmasının ekonomiye büyük katkılar sağlayacağı sonucuna varmıştır.

Erdoğan ve ark. (1992), rafine borojipsin portland çimentosuna ve traslı çimentoya katkı maddesi olarak kullanımının çimento pastalarının mekanik özellikleri üzerine etkilerini incelemiştir. Rafine borojips çimentonun %4'ü oranında ilave edildiğinde portland çimento pastasının eğilme dayanımını arttırırken, traslı çimento pastasının basınç dayanımını azaltmıştır. Bu sonuçlar, Erdoğan ve ark. (1994) tarafından doğrulanmıştır. Kula ve ark. (2001), kolemanit atığı, taban külü ve uçucu kül atıklarının portland çimentosuna katkı maddesi olarak kullanımının genellikle portland çimento pastasının basınç dayanımlarını geliştirdiğini bulmuşlardır (Zeybek 2004). Olgun ve ark. (2007), çimento üretiminde kolemanit atığının alçıtaşı yerine kullanılmasıyla priz zamanlarının uzadığını tespit etmiştir. Özmal ve ark. (2005) ve Targan (2001) kolemanit katkılı olarak üretilen çimentolarla yapmış oldukları deneysel çalışmaların sonuçlarında kolemanit katkısının çimentonun priz başlangıç ve sona erme sürelerini uzattığını bildirmişlerdir. Yapılan çalışmalarda bor içeren atıkların çimento üretiminde kullanılması sırasında özellikle çimentonun priz süresini geciktirdiği ve çimento harcının erken dayanımını azalttığı bulunmuştur. Bu olumsuz etkilerin ortadan kaldırılması için ilave araştırmaların yapılması gerektiği ortaya çıkmıştır.

Bir çalışmada Kütahya-Emet-Espey yöresindeki kolemanit konsantratör atıkları ve borojips ile Balıkesir-Havran yöresindeki zeytinyağı fabrikası atıklarının çimentoya katkı maddesi olarak ilave edilmesi ve bu şekilde değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Katkıların çimentonun mekanik özelliklerinden priz süresi, hacim genleşmesi, basınç dayanımı, öğütme süresi üzerine etkileri incelenmiştir. Kolemanit konsantratör atığı katkısının çimento klinkerine ilave edilmesiyle özellikle priz süreleri ve basınç dayanımları olumsuz etkilenmektedir. Priz hızlandırıcılar ve polimer akışkanların bu katkıyla birlikte betona ilave edilmesiyle priz süreleri ve basınç dayanım değerlerinin standartta uygun hale geleceği bu çalışmanın öngörülerindedir (Altınköprü 2010)

Bor atıklarının çimento üretiminde katkı veya beton üretiminde kullanılabilirliği üzerine çeşitli araştırmalar yapılmış ve yapılmakta olmasına karşın, normal betonun en önemli sakıncalarını ortadan kaldıran hafif betonlarda kullanılabilirliği pek fazla üzerinde durulmamış bir konudur. Bu çalışmada bor atığının hafif betonda inşaat endüstrisindeki kullanılabilirliğinin araştırılarak kullanılabilirliği değerlendirilecektir. Bu çalışmanın, hem kullanılacak bor atığının çimento ile yer değiştirmeli olarak kullanılması çevre için olduğu kadar, ekonomik bakımdan da yararlı olacağı ve literatüre önemli veri girişi sağlayacağı düşünülmektedir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmada, Türkiye'deki bor atığının inşaat endüstrisinde özellikle beton ve hafif beton üretiminde puzolan materyal olarak kullanılabilirliğinin araştırılması amaçlanmıştır. Bu amaçla, bor atıkları çimentonun belirlenen yüzdelerinde çimentoyla yerdeğıştirmeli olarak kullanılmıştır.

3.1. Materyal

Araştırmanın materyalini öğütölmüş doğal zeolit, kırmataş, doğal kum, çimento, su ve bor atığı (BA) ve bu malzemelerle üretilen beton ve hafif beton örnekleri oluşturmuştur. Hafif beton üretiminde kullanılan zeolit (Klinoptilolit) dünyadaki en yüksek saflık oranına sahip olduğu (%96 saflıkta) Manisa Gördes yöresindeki ocaklardan, bor atığı Etibank Kırka Boraks Tesisinden ve doğal kum ve kırmataş Setbeton beton santralinden temin edilmiştir.

3.1.1. Agregalar

Beton üretiminde fiziksel özellikleri Çizelge 3.1'de verilen kalker esaslı kırmataş ve kum kullanılmıştır. Kırmataş ve kumun granölometrisi TS 802 (2009)'de belirtilen metotlar kullanılarak yapılmıştır.

Çizelge 3. 1. Kullanılan kırmataşın ve kumun özellikleri

DENEY ADI	BİRİM	DENEY SONUCU	
		KUM	KIRMATAŞ
Agregaların Kum Eşdeğerliği Deneyi		92	
Agregaların Metilen Mavisini Deneyi	g(boya)/kg	0.6	
Agregaların Parçalanma Direnci (Los Angeles) Katsayısı Tayini			33
Agregaların Gevşek Yığın Yoğunluğunun Tayini (ρ_b)	(megagram/m ³)	1.52	1.27
Boşluk Hacminin Tayini (v)	%	41	50
Agregaların Y.K.S.D Tane Yoğunluğu Tayini (ρ_{ssd})	(megagram/m ³)	2.61	2.60
Agregaların Kuru Tane Yoğunluğu Tayini (ρ_p)	(megagram/m ³)	2.58	2.55
Su Emme Oranı Tayini	%	1.1	1.8
Agregaların Tane Şeklinin Tayini - Şekil İndisi			13
Agregaların Yassılık Endeksi Tayini			17

Manisa-Gördes yöresinden elde edilen zeolit, %96 Klinoptilolit ($\text{CaSi}_7\text{Al}_2\text{O}_{18} \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) ve geri kalan kısmı ise Höylendit ($\text{KNa}_2\text{Ca}_2\text{Si}_29\text{Al}_7\text{O}_{72} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) içermektedir. Zeolit, kırmataşın ve kumun kimyasal bileşimi Çizelge 3.2'de verilmiştir.

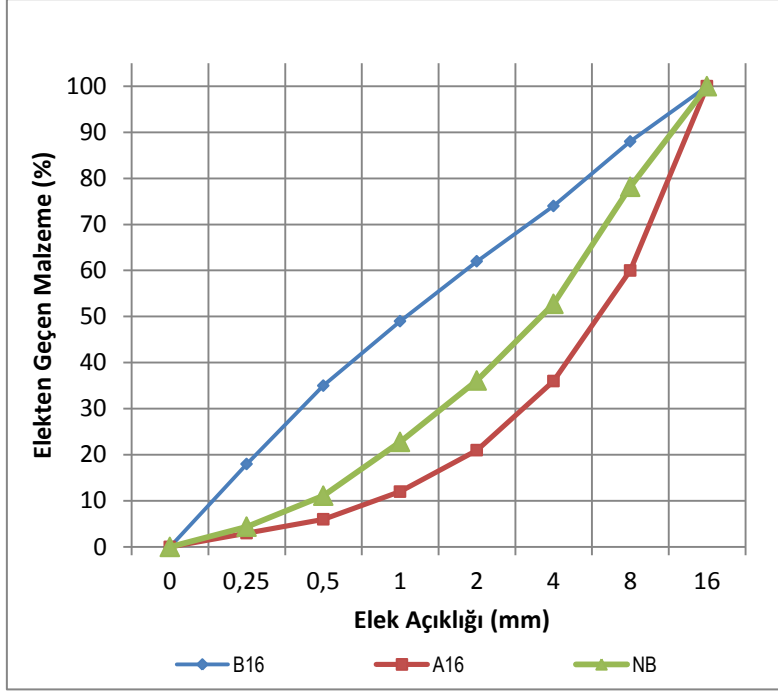
Çizelge 3. 2. Kırmataşın, kumun ve zeolitin kimyasal bileşimi

Bileşen	SiO ₂	CaO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	K ₂ O	MgO
Kırmataş	43.64	18.49	12.84	10.22	0.03	7.82
Kum	89.82	0.10	0.48	4.82	2.95	0.39
Zeolit	71.0	3.40	1.70	11.80	2.40	1.40

Agrega tane büyüklüğü dağılımının, beton özelliklerini etkilemesi söz konusu olduğundan, betonda yüksek kompasiteyi sağlamak için TS 3530 EN 933-1 (2007) standardına uygun olarak agregada dane dağılımını belirlenmiştir (Çizelge 3.3, Çizelge 3.4). İri ve ince agregalara ait numunelerin tane büyüklüklerine göre dağılımı elek analizi sonucunda belirlenmiştir. Belirlenen iri ve ince agregada tane dağılımları için karışık agregada dağılımını belirleyebilmek amacıyla, belirli yüzdelere denenecek beton agregaları standartları TS 706 EN 12620 (2009)'daki maksimum dane büyüklüğü 16 mm olan eğriye ait alt (A) ve üst sınırlara (B) uygun düşecek şekilde karışık agregada granülometrisi ayarlanmıştır (Şekil 3.1, Şekil 3.2).

Çizelge 3. 3. Elek analizi sonuçları

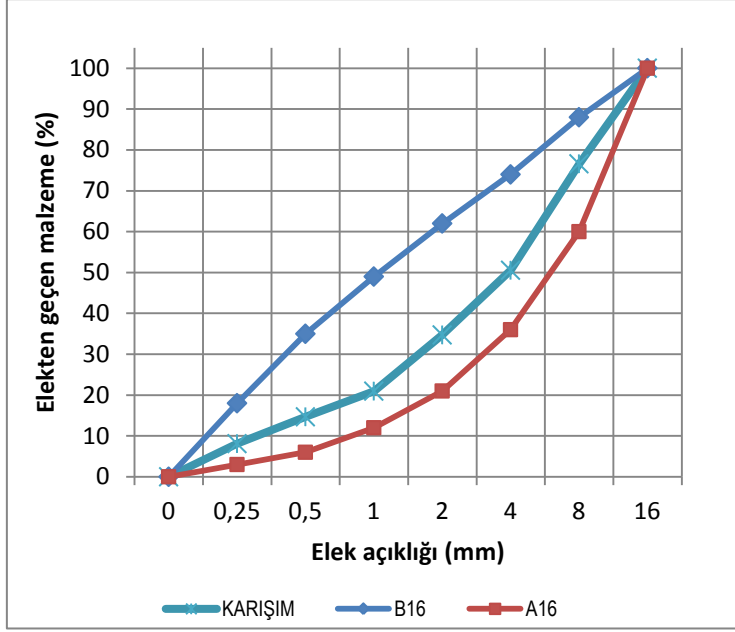
Elek göz boyutu, mm			Elek Altına Geçen (%)		Elek Altına Geçen Malzeme (g)		Karışım
	Kırmataş	Doğal Kum	Kırmataş	Doğal Kum	Kırmataş	Doğal Kum	
0.25	2998	940	0	6	2	60	0
0.5	2998	768	0	23	2	232	4
1	2920	604	3	40	80	396	11
2	2976	304	1	70	24	696	23
4	2950	104	2	90	50	896	36
8	2504	2	17	100	496	998	53
16	960	0	68	100	2040	1000	78
31.5	0	0	100	100	3000	1000	100



Şekil 3. 1. Betonun karışım agrega tane boyut dağılımı ve referans eğrileri

Çizelge 3. 4. Elek analizleri sonuçları

Elek göz boyutu, mm			Elek Altına Geçen (%)		Elek Altına Geçen Malzeme (g)		Karışım
	Kırmataş	Zeolit	Kırmataş	Zeolit	Kırmataş	Zeolit	
0.25	2998	1186	2	315	0	21	8
0.5	2998	1134	2	367	0	24	10
1	2976	973	24	528	1	35	15
2	2957	632	43	868	1	58	24
4	2925	102	75	1398	3	93	39
8	2214	0	786	1500	26	100	56
16	998	0	2002	1500	67	100	80
31.5	0	0	3000	1500	100	100	100



Şekil 3. 2. Hafif agregalı betonun karışım agrega tane boyut dağılımı ve referans eğrileri

3.1.2. Çimento

Beton üretiminde, TS EN 197-1/A1 (2005) standardına uygun olan Setbeton çimento fabrikasından temin edilen özgül ağırlığı 3.14 g/cm^3 olan CEM I A-LL 42.5 çimentosu kullanılmıştır. Kullanılan çimentonun fiziksel ve kimyasal ve mekanik özellikleri Çizelge 3.6'da verilmiştir.

Çizelge 3. 5. Kullanılan Çimentonun Fiziksel, Kimyasal ve Mekanik Özellikleri

Özellik	Birim	CEM I	
Çözünmez Kalıntı	%	0.52	
SO ₃	%	3.16	
Kızdırma Kaybı	%	6.28	
Cl ⁻	%	0.0106	
Özgül Ağırlık	g/cm^3	3.14	
Priz süresi Başlama	dak	230	
Priz süresi Bitiş	dak	270	
Hacim Genleşmesi	mm	1	
ÖzgülYüzey- Blaine	cm^2/g	3818	
Basınç Dayanımı	2	N/mm^2	24.7
	7	N/mm^2	32.0
	28	N/mm^2	45.6

3.2. Yöntem

Çalışmada, CEM I çimentosu, bor atığı, zeolit, doğal kum ve kırmataş malzemeleri kullanılarak 300 kg/m^3 dozlu beton ve hafif beton üretimi yapılmıştır. Beton üretiminde bor atığı çimento ağırlığının %0, %3, %6, %9 ve %12 oranlarında yerdeğiştirmeli olarak kullanılmıştır.

3.3. Numune Üretimi

Normal beton ve hafif agregalı beton 50 litre özellikli laboratuvar tipi beton mikseri kullanılarak üretilmiştir. Beton üretiminde kullanılacak çimento, agrega, su ve hava miktarları beton karışım hesapları kullanılarak ağırlık olarak belirlenmiş ve su dışındaki tüm bileşenler mikserde kuru olarak karıştırıldıktan sonra su ilave edilmiştir. Çalışmanın amacını oluşturan bor atıkları ise hazırlanan bu taze betona en son ilave edilmiştir



Şekil 3. 3. Beton üretimi

Üretilen betonların çökme miktarları sabit olarak alınmış ve karışım suyu bu çökme değerine göre belirlenmiştir. Çökme sınıfı S2 (5-9 cm) olarak seçilmiş ve üretilen taze betonların TS EN 206-1'e göre bu sınıf içerisinde kalması bir seri deney yapılarak belirlenmiştir. Çökme deneyi yapıldıktan sonra numuneler, 150x150x150 mm boyutlarında ve TS EN 12390-1 (2002)'de belirtilen özelliklerde standart küp kalıplara yerleştirilmiştir. Beton kalıplara yerleştirildikten sonra 10 sn. sarsma tablası aleti (Şekil 3.3) ile sarsılmış ve betonu kalıba tam yerleşmesi sağlanmıştır. Beton örnekleri 24 saat kalıpta bekletildikten sonra

kalıplardan çıkarılmış, sıcaklığı 20 ± 2 °C sıcaklıkta kirece doymun su içerisine konularak deney gününe kadar (7, 28 ve 56 gün) normal kür altında saklanmıştır. Numuneler 7, 28 ve 56 gün sonra havuzundan çıkarılmış ve örnekler üzerinde ses geçiş hızı deneyi, basınç deneyi, yarma deneyi, su emme deneyi, birim ağırlık, donma çözülme deneyleri yapılmıştır. Ayrıca örneklerin iç yapı analizinin belirlenmesi amacıyla deneylerde kullanılan numunelerin SEM görüntüleri alınmıştır.

3.4. Taze Betonun Deneyleri

3.4.1. Çökme deneyi

Taze betonun kıvamını belirlemek amacıyla yapılan bu deneyde taban çapı 20 cm, üs çapı 10 cm ve yüksekliği 30 cm olan metal huni kullanılmıştır. TS EN 12350-2 (2010) Beton Taze Beton Deneyleri- Bölüm 2'ye göre yapılmış olan çökme deneyinde ilk önce kalıbın iç yüzeyi ve taban plakası yüzeyinde serbest su kalmayacak şekilde nemlendirilmiştir. Taze beton kalıba üç eşit yükseklikte olacak şekilde doldurulup, doldurma sırasında her tabaka 25 defa şişlenmiştir. Sıkıştırma işlemi sonrasında kalıbın üst seviyesi beton sıkıştırma çubuğu üzerinde yuvarlanarak düzlenip kalıp el tutamaklarından tutularak düşey şekilde yukarı çekilmiştir. Kalıbın alınmasından hemen sonra, kalıp üst seviyesi ile çöken beton kütesinin en yüksek noktası arasındaki çökme mesafesi (h) ölçülerek kaydedilmiştir. TS EN 206-1'e göre çökme sınıfları Çizelge 3.7'de verilmiştir.

Çizelge 3. 6. Çökme sınıfları

Sınıf	Çökme, mm
S1	10-40
S2	50-90
S3	100-150
S4	160-210
S5	>210



Şekil 3. 4. Çökme deneyi

3.5. Sertleşmiş Beton Deneyleri

3.5.1. Ses geçiş hızı deneyi

Ses geçiş hızı ölçümü; numunelerin kalıpla temas eden yüzeylerine dik doğrultuda yapılmıştır. Numune, verici ve alıcı uçların arasına yerleştirilip ve numune boyunca ses geçiş süresi mikro saniye cinsinden ölçülmüştür. Deney ASTM C597-83 “Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete”, standardında belirtilen esaslara uygun olarak MaTest marka deney aleti kullanılarak yapılmıştır. Numune üzerinde yapılan deney ile ses dalgaları geçirme süreleri ölçülmüştür. Ses hızı deney sonuçlarının değerlendirilmesinde mikro saniye (µsn) olarak okunan ses hızı geçiş süresi değerleri aşağıdaki formül ile hesaplanarak ses hızı km/sn cinsinden bulunmuştur.

$$V = L / t \quad 3.1$$

V : Ses hızı, km/s

L : Numune boyu, km

t : Ses geçiş süresi, s

3.5.2. Basınç Deneyi

TS EN 12390-3 (2010)'e uygun şekilde yapılmıştır. En büyük yüke ulaşıncaya kadar sabit hızda uygulanmıştır. Deney numunesi ve deney makinesinin yükleme başlığı arasına yerleştirilip, numuneler yük uygulama yönü beton döküm yönüne dik olacak şekilde yerleştirilmiştir. Numuneler, makinenin alt yükleme başlığı üzerine merkezlenerek yerleştirilmiştir. Göstergeden okunan en büyük yük kaydedilmiş ve aşağıdaki formülle basınç dayanım değeri hesaplanmıştır.

$$\sigma = P / A \quad 3.2$$

σ : Basınç dayanımı, MPa

P : Kırılma anında ulaşılan en büyük yük, N

A : Numunenin, üzerine basınç yükünün uygulandığı en kesit alanı, mm².



Şekil 3. 5. Basınç deney aleti

3.5.3. Su emme deneyi

Sertleşmiş betonda su emme oranlarının tayini yapılmıştır. Numunelerin sırasıyla etüv kurusu ağırlıkları, su içinde tutulduktan sonra suya doymuş ağırlıkları tayin edilmiştir. Hesaplanan ağırlıklar, aşağıda verilen eşitlikler kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\text{Su emme Oranı (\%)} = [(G2 - G1) / (G1)] \times 100$$

3.3

G1: Etüv kurusu ağırlığı, g

G2: Kuru yüzey doymuş ağırlığı, g



Şekil 3. 6. Kür havuzu

3.5.4. Yarma deneyi

Yarmada çekme dayanımı deneyleri TS EN 12390-6 (2002) standardına uygun olarak 28 günlük 150×150×150 mm'lik beton numuneler üzerinde yürütülmüştür. Yarmada çekme dayanımları, aşağıda verilen eşitlik kullanılarak hesaplanmıştır.

$$f_{ct} = 2 \times F / (\pi \times L \times d) \quad 3.4$$

f_{ct}: Yarmada çekme dayanımı, MPa

F: En büyük yük, N

L: Numunenin yükleme parçasına temas çizgisi uzunluğu, mm

d: Numunenin seçilen en kesit boyutu, mm

3.5.5. Donma-çözülme deneyi

Hazırlanan her bir beton numunesi, (110 ± 5) °C' da sabit kütleye ulaşana kadar etüvde kurutulduktan sonra ölçülen ağırlığı W₁ ve daha sonra 20 °C sıcaklıkta 24 saat süreyle bekletilerek suya doymun hale getirilip tartılan ağırlığı W₂ olmak üzere; numunenin su emme miktarı:

$$Sa = ((W_2 - W_1) / W_1) * 100 \quad 3.5$$

bağıntısıyla bulunmuştur.

Üçer adet 150 mm'lik küp numune üzerinde ASTM C 672-84'e uygun olarak donma-çözülme deneyi gerçekleştirilmiştir. Suya doymun hale gelmiş numuneler dondurucu içerisine yerleştirilerek -20°C sıcaklıkta 12 saat süreyle dondurucuda bekletildikten sonra numuneler 20°C oda sıcaklığında 12 saat süreyle çözülmeye bırakılmıştır. Donma-çözülme işlemi 10 defa tekrarlandıktan sonra, numuneler 110 ± 5°C'de sabit kütleye ulaşana kadar etüvde kurutulup, daha sonra oda sıcaklığında soğutulup hemen tartılmıştır (W₃). 10 donma-çözülme çevrimi sonunda numunelerde oluşan fiziksel değişimler görsel olarak incelendikten sonra, numunelerdeki ağırlık kayıpları ve basınç dayanımı değişimleri deneysel olarak belirlenmiştir. Donma-çözülme çevrimleri sonunda numunelerde oluşan ağırlık kaybının hesabı için:

$$Sa = ((W_1 - W_3) / W_1) * 100 \quad 3.6$$

formülü kullanılmıştır. Burada Sa ağırlıkça su emme yüzdesini göstermektedir.



Şekil 3. 7. Donma-çözülme deneyi için kullanılan soğutucu

3.5.6. Birim ağırlık deneyi

Birim ağırlığı (TS EN 12390-8, 2010) belirlemek amacı ile tüm numuneler, başlangıçta ve sonra 0.1 gr duyarlıklı terazide tartılmıştır. Numunelerin hacmi, geometrik olarak hesaplanmış, ağırlığın hacme oranı ile birim ağırlıkları (Δ , kg/dm^3) belirlenmiştir.



Şekil 3. 8. Birim ağırlık deneyi için kullanılan etüv ve terazi

3.5.7. Dinamik elastisite modülü

Bu çalışmada, beton üretiminde kırmataş agregası kullanıldığı için E_d 'nin hesabında, Poisson oranı $m = 0.21$ kabul edilmiştir. Bağlantıda; dinamik elastisite modülü E_d , MPa, Poisson oranı m , yoğunluk D , kg/m^3 ve ses geçiş hızı V , km/sn ile gösterilmiştir.

$$E_d = \Delta V^2 \frac{(1+\mu)(1-2\mu)}{1-\mu}$$

3.7

3.5.8. X-Işınları toz difraktometresi (XRD) analizi

Malzeme örneklerinin kimyasal kompozisyonlarının tespiti için; XRD görüntüleri Erciyes Üniversitesi Teknoloji araştırma ve uygulama merkezinde Bruker Axs D8 model deney aleti kullanılarak yaptırılmıştır.

3.5.9. SEM analizi

Betondaki çimento hamurunun kazanabileceği dayanım hızı ve miktarı, çimentodaki kalsiyum silikatlı ana bileşenlerin suyla reaksiyonları sonucunda ortaya çıkan kalsiyum-silika-hidrat (C-S-H) jellerinin ne hızla ve ne miktarda oluştuğuna bağlıdır. C-S-H jelleri ne kadar hızlı oluşurlarsa, dayanım o kadar yüksek olmaktadır. Puzolanik katkıların çimento hamuru içerisinde dayanım kazanmaları, bu maddelerin çimentodaki kalsiyum silikatlı ana bileşenlerin hidratasyonu sonucunda ortaya çıkan kalsiyum hidroksitle reaksiyona girmeleriyle olabilmektedir. Numunelerimizin davranışlarını görebilmek için numunelerimizin SEM görüntüleri, Erciyes Üniversitesi TAU Merkezinde LEO 440 computer controlled dijital model ve 5x-300.000x arası büyütme kapasitesine sahip taramalı elektron mikroskobunda çektilmiştir.

3.6. Maliyet Analizi

Kullanılan malzemelerin maliyetlerinin birim fiyatları Bayındırlık Bakanlığı birim fiyat listesinden bulunmuştur. Nakliye maliyetleri ve ekonomik taşıma uzaklığı aşağıdaki denklemlerden hesaplanmıştır.

M km'lik taşıma uzaklığı için nakliye maliyeti:

- 1) $M < 10$ km. olan taşımalar Poz No. 07.005 den;

$$F = A.K * (0.00017 * \sqrt{M}) = 0.0204 * \sqrt{M} \quad (\text{TL/t}) \quad 3.8$$

- 2) $M > 10$ km olan taşımalar Poz No. 07.006'dan;

$$F = A.K * (0.0007M + 0.01) = 0.084M + 1.2 \quad (\text{TL/t}) \quad 3.9$$

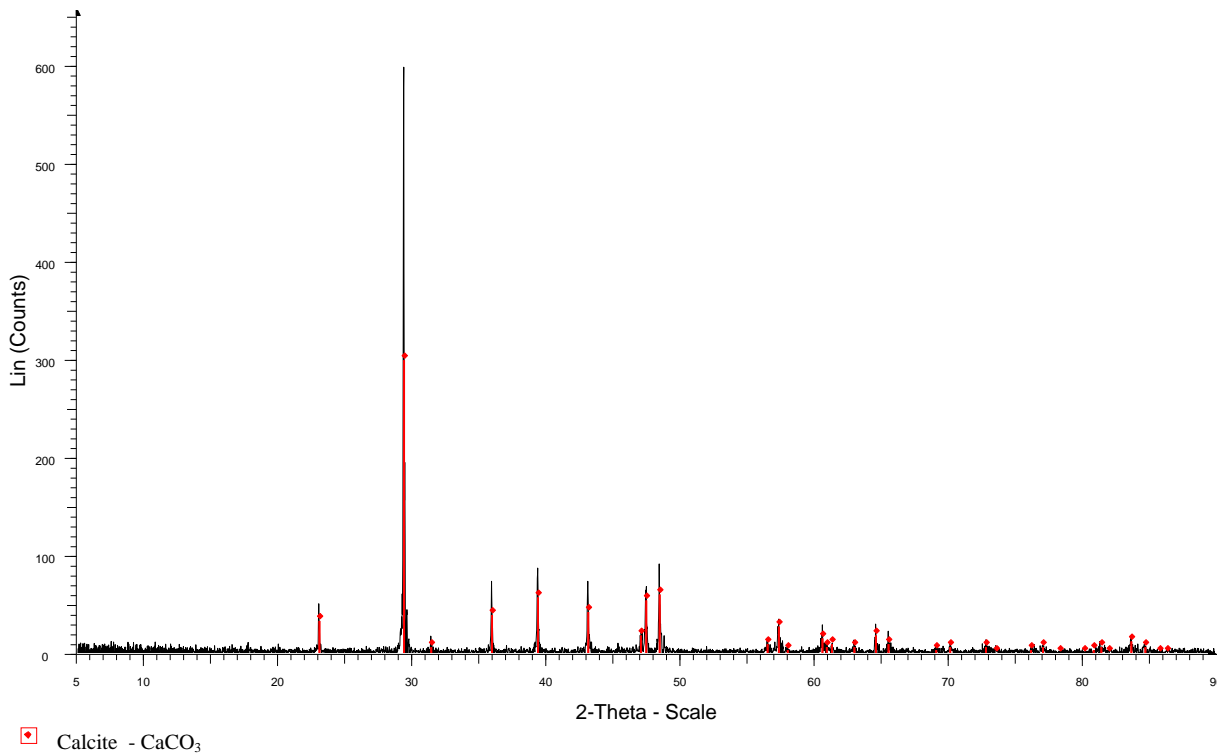
Motorlu taşıt formüllerindeki "K" değeri rayiç listesindeki Poz 02.017'den, "A" katsayısı yolun fiziki durumu ve kaplaması ile ilgili katsayı 1 olarak alınmıştır. Yükleme-boşaltma

bedeli olarak, Bayındırlık ve İskan Bakanlığı Birim Fiyat Analizlerinden 09.005/1 No'lu poz "Moloz, blokaj, kırma taş, balast, kaldırım taşının taşıtlara yükleme ve boşaltılması" kullanılmıştır. Ayrıca taşıma maliyetlerine %25 yüklenici karı ve yükleme-boşaltma bedeli ayrıca eklenmiştir. Hesaplanan taşıma maliyeti, 1 ton malzeme için bulunan fiyat farkına eşitlenerek, M taşıma uzaklığı hesaplanmıştır.

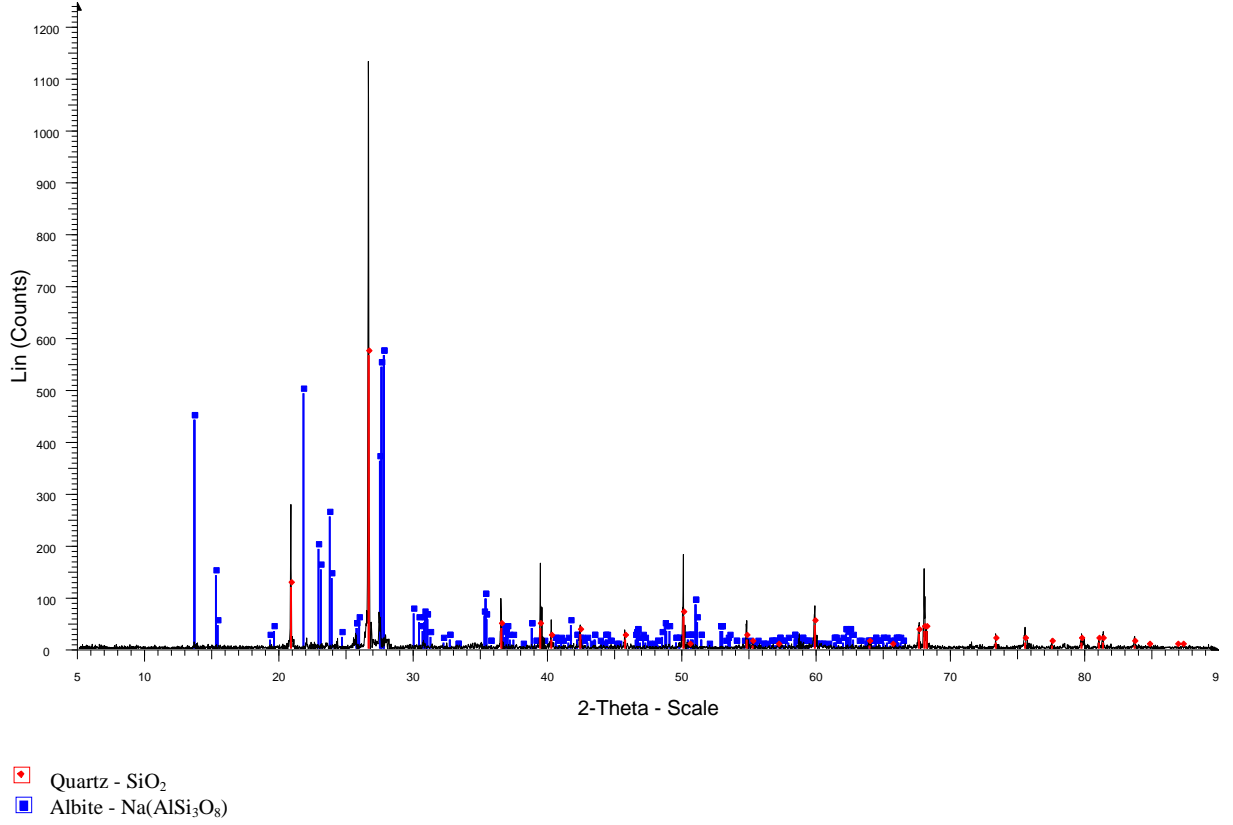
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

4.1. Agrega ve Bor Atığının Minerolojik Analizleri

Beton üretimine başlamadan önce kullanılan malzemelerin mineralojik yapısını belirlemek amacıyla XRD analizi yaptırıldı. Kullanılan agregaların XRD analizi sonuçlarına göre, doğal kumda kuvars (SiO_2), albit ($\text{Na(AlSi}_3\text{O}_8)$) ve az miktarda da kalsit fazları kırmataşta da kalsit (CaCO_3) ve az miktarda kuvars fazları bulunmaktadır (Şekil 4.1 ve Şekil 4.2)

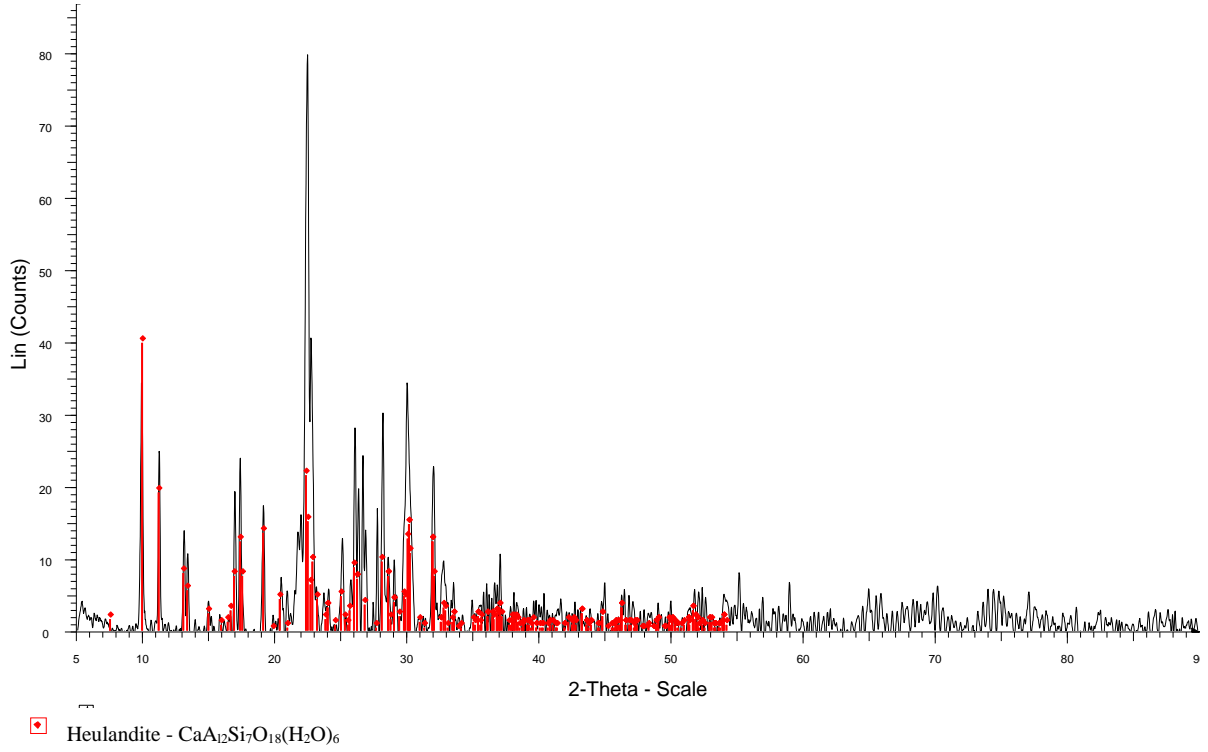


Şekil 4. 1. Kırma taşın mineralojik analizi



Şekil 4. 2. Doğal kumun mineralojik analizi

Şekil 4.3'de zeolit numunesinin XRD analizi sonucu elde edilen pik değerleri ve ana malzeme fazları görülmektedir. Genel olarak zeolitın klinoptilolit (Heulandite) yapısında olduğu yapılan mineralojik analizden görülmüştür. Malzemede klinoptilolit dışında kalsit ve kuvars mineralleri belirlenmiştir. Ancak bu minerallerin yoğunluğu klinoptilolit kadar yüksek değildir. Deneysel çalışmada kullanılan malzemenin yüksek oranda klinoptilolit içermesi zeolitın endüstriyel kalitesinin yüksekliğinin göstergesidir.



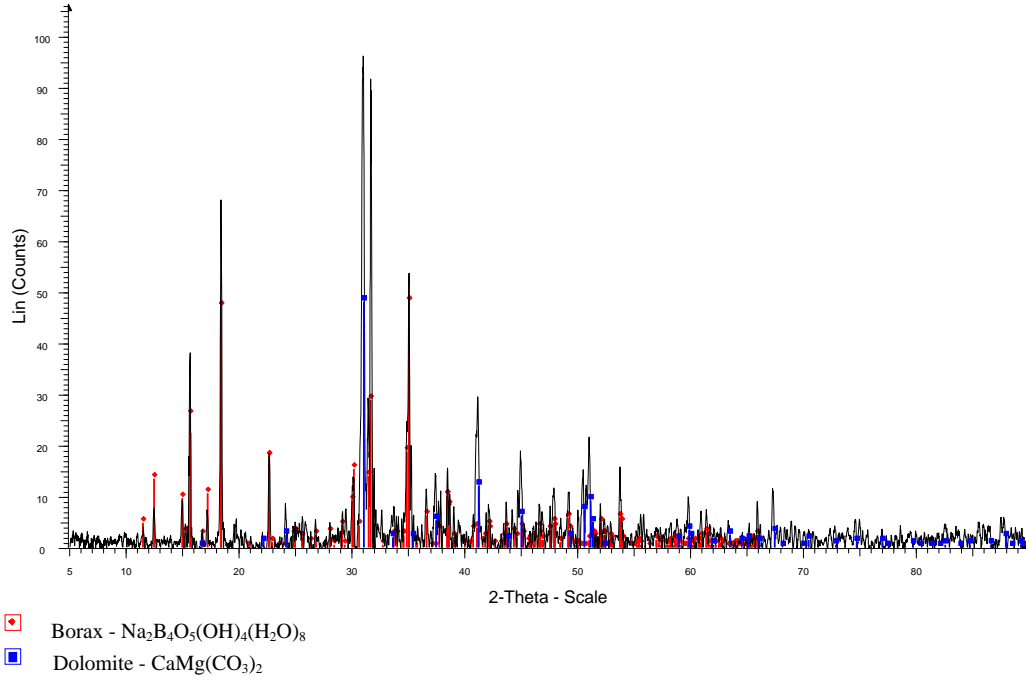
Şekil 4. 3. Zeolitin mineralojik analizi

Kalsiyum karbonat değişik oranlarda magnezyum karbonat, kil mineralleri, demir silikat-oksit ve sülfürleri ve silis gibi çimentonun içeriğinde bulunan bileşiklerin puzolanik bir özellik taşıdığı açıktır. Kullandığımız bor atığının mineralojik analizinde de boraks ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_5(\text{OH})_4(\text{H}_2\text{O})_8$) ve dolomit ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) minerallerine rastlanmıştır.

Bor atığının içerisinde çimentolu hidrolik bağlayıcılar için önemli sayılan kuvars (SiO_2), alümina (Al_2O_3) ve demir oksit (Fe_2O_3) gibi bileşenler mevcuttur. Bu değerlerle puzolanik bir özellik taşıyor olabileceği açıktır. Etibank Kırka Boraks Tesislerinden temin edilen bor atığı materyalinin kimyasal özellikleri Çizelge 4.1’de, mineralojik özelliği Şekil 4.4’de verilmiştir.

Çizelge 4. 1. Bor atığının kimyasal analizi

Bileşen	B_2O_3	CaO	MgO	SiO_2	Na_2O	Al_2O_3	Fe_2O_3	K_2O	Kızdırma Kaybı
Bor atığı, %	25	10.38	13.94	12.98	5.67	0.96	0.20	0.72	29.15



Şekil 4. 4. Bor atığının mineralojik analizi

4.2. Sertleşmiş Betonun Özellikleri

4.2.1. Normal beton

Çimento yerine belirli oranlarda katılan bor atığının, puzolonik olarak betona etkisinin araştırıldığı bu çalışmada, öncelikle deneylerden alınan veriler ile gerekli hesaplamalar yapılmış, ortalama değerler belirlenmiş, bu değerler kür süresine ve katkı yüzdesi değişimine göre değerlendirilmiştir. Yapılan deneylerden hesaplanan değerler Çizelge 4.2’te verilmiştir.

Çizelge 4. 2. Katkılı ve katkısız betonların mekanik deney sonuçları

Beton Kodu	Katkı oranı (%)	Beton yaşı (gün)	V (km/s)	fc (MPa)	fct (MPa)
B0	0	7	4.35	15.75	1.89
B3	3	7	4.87	13.69	1.70
B6	6	7	3.82	11.82	1.68
B9	9	7	3.66	11.07	1.67
B12	12	7	3.63	9.99	1.59
B0	0	28	4.77	18.84	2.09
B3	3	28	4.22	14.06	1.91
B6	6	28	4.11	11.72	1.90
B9	9	28	3.68	11.20	1.83
B12	12	28	3.63	10.45	1.82
B0	0	56	4.89	25.73	2.22
B3	3	56	4.29	19.97	2.00
B6	6	56	4.18	19.01	1.98
B9	9	56	3.74	14.74	1.89
B12	12	56	3.64	13.69	1.83

Çizelge 4. 3. Bor atığı katkılı ve katkısız betonların birim ağırlık, su emme ve bağıntılardan hesaplanmış dinamik elastisite modülü değerleri

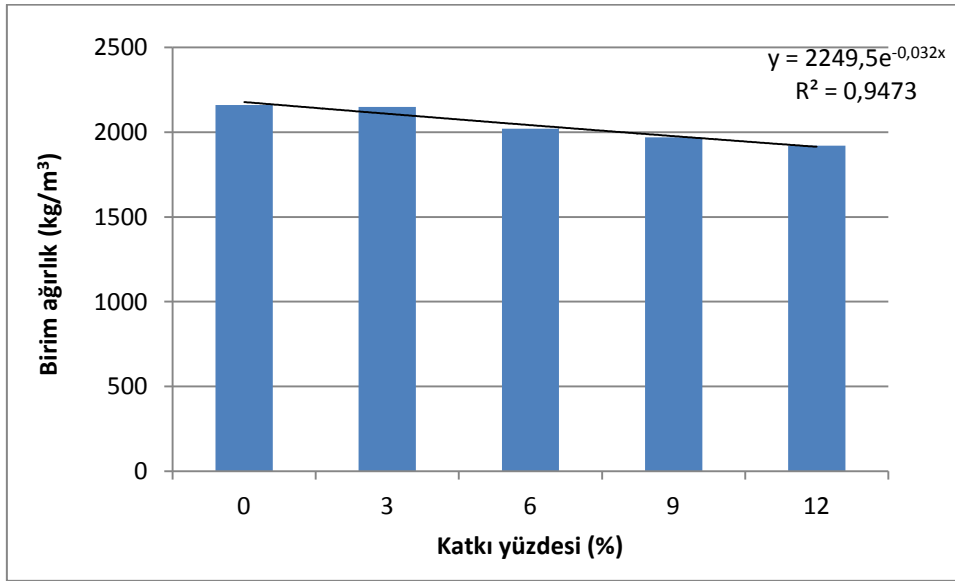
Beton Kodu	Katkı oranı (%)	Beton yaşı (gün)	Birim ağırlık (kg/m ³)	Su emme (%)	Dinamik Elastisite Modülü (GPa)
B0	0	28	2160	1.39	53.19
B3	3	28	2150	1.44	39.71
B6	6	28	2120	4.57	36.52
B9	9	28	1970	4.56	27.08
B12	12	28	1920	4.91	25.87

4.2.1.1. Fiziksel özellikler

Normal beton numunelerde yapılan deneylerden elde edilen birim ağırlık ve ses geçiş hızı, su emme ve donma-çözülme gibi fiziksel özellikler ile ilgili değerlendirmeler aşağıda verilmiştir.

4.2.1.1.1. Birim ağırlık

Bor atığı, katkılı ve katkısız betonların küp numuneler üzerinde belirlenen birim ağırlıklarının ortalamaları, katkı yüzdelere göre Şekil 4.5'te verilmiştir. Standart koşullarda kür edilen kontrol grubu betonların 28. gündeki ortalama birim ağırlığı 2160 kg/m^3 'tür. Beton gruplarında en düşük birim ağırlık ise 1920 kg/m^3 ile %12 grubu numunelerde elde edilmiştir. Bor atığı katılmamış %0 grubunun birim ağırlığı, bor atığı katılmış olan %3, %6, %9 ve %12 katkı oranlarına kıyasla daha yüksek değerler almıştır.



Şekil 4. 5. Beton birim ağırlığının katkı oranı ile ilişkisi

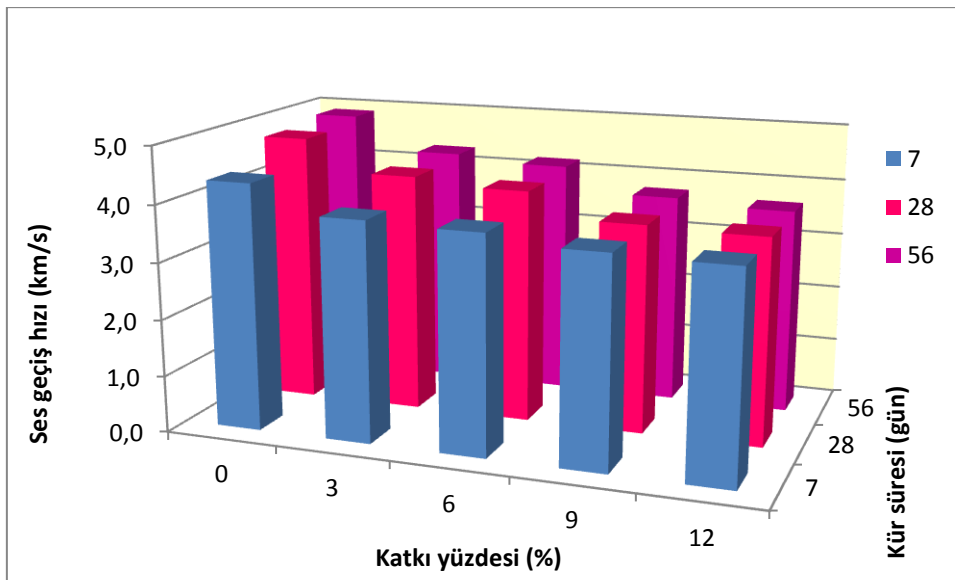
Betona katılan BA miktarı arttıkça bununla ters orantılı olarak ağırlığın azaldığı görülmüştür. Yüzde üç katkılı betonların birim ağırlık değeri şahit numuneye göre % 0.46, %6 katkı oranında %1.85, %9 katkı oranında %8.80 ve %12 katkı oranında %11.11 oranında azalma olduğu belirlenmiştir. Şekil 4.5'den görüldüğü gibi birim ağırlık değeri %6 katkı oranından sonra düşüş göstermiştir. Birim ağırlıklardaki azalma, basınç dayanımı düşüşlerini de beraberinde getirmiştir. Betonun birim ağırlığının düşmesi özellikle yapı ölü yükünün azaltılması, ısı ve ses yalıtım özelliklerinin artırılması gibi avantajlar sağlamaktadır.

Yapılan regresyon analizi sonucunda bu deney çıktılarına uygun eğri çizilerek bu eğriye ait regresyon katsayısı $R^2=0.89$ olarak belirlenmiştir. Değerler lineer olarak azalmıştır R^2 değerinin 1'e yakın olmasından dolayı, verilen bu denklem kullanılarak, bilinen katkı yüzdesi değerinden birim ağırlık değeri belirlenebilmektedir.

4.2.1.1.2. Ses geçiş hızı

Beton gruplarına ait ses geçiş hızı değerleri katkı yüzdesi ve kür süresine bağlı olarak izelge 4.2’de verilmiştir. Betonda başlangıçtaki (7. günde) ses geçiş hızlarının B0 grubunda 4.35 km/s, B12 grubunda 3.63 km/s arasında değişmiştir. Yirmi sekizinci günde ses geçiş hızlarının B0 grubunda 4.77 km/s, B12 grubunda 3.63 km/s arasında olduğu; 56. günde ses geçiş hızlarının B0 grubunda 4.89 km/s, B12 grubunda 3.64 km/s arasında olduğu görülmektedir. Katkılı betonların ses geçiş hızları katkısız grubun ses geçiş hızından 7. günde B3 grubunda %11, B6 grubunda %12 B9 grubunda %16 ve B12 grubunda %17, 28. günde B3 grubunda %12, B6 Grubunda %14 B9 grubunda %23 ve B12 grubunda %24, 56. günde B3 grubunda %13, B6 grubunda %14 B9 grubunda %24 ve B12 grubunda %25 daha azdır.

Herhangi bir beton içerisinden geçen ses dalgasının hızı, o betonun içerdiği boşluk miktarı ve yoğunluğu ile yakından ilgili olduğu için, elde edilen ses hızları ile beton kalitesi hakkında genel bir fikir sahibi olmak olasıdır. Neville (1990) belirttiği üzere; ses geçiş hızı 4.5 km/s değerinden daha büyük olan betonlar mkemmell, 3.5-4.5 km/s arasında olan betonlar iyi, 3.0-3.5 km/s arasında olanlar şüpheli, 2.0-3.0 km/s arasında olan betonların kötü ve 2.0 km/s değerinden düşük olanlar ise çok kötü kalitededir.



şekil 4. 6. Beton numunelerde ses geçiş hızının katkı yüzdesine ve kür süresine göre değişimi

Ses geçiş hızı deney sonuçlarına ait genel varyasyonu belirlemek için kür süresi ve katkı yüzdeleri için varyans analizi yapılmış, F testi ile önemliliği kontrol edilmiştir. LSD (en küçük önemli fark) kritik değerleri kullanılarak yapılan testlere göre bu farklılığın hangi faktörlerden kaynaklandığı belirlenmeye çalışılmıştır. Kür süresinin kendi içindeki, katkı yüzdelerinin kendi içindeki ve Kür x katkı yüzdeleri interaksyonun varyasyonunu ölçmek için her gruba ayrı ayrı varyans analizi uygulanmıştır. Daha sonra kendi içlerinde Duncan testi ile gruplandırılmıştır. Ses geçiş hızı deney sonuçlarına ait varyans çözümleme sonuçları izelge 4.4'de verilmiştir.

Çizelge 4. 4. Beton numunelerin kür süresi ve katkı yüzdesine göre ses geçiş hızı verilerine ait varyans çözümleme sonuçları

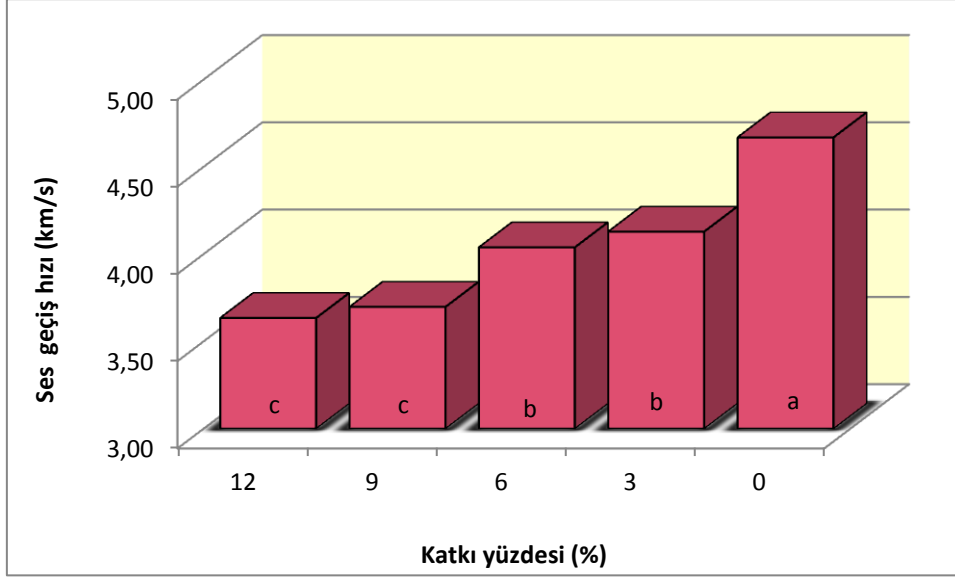
Varyasyon Kaynağı	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	Hesaplanan F	Tablo Değeri	
					%5	%1
Kür	2	0.657	0.329	4.711*	3.320	5.390
Katkı	4	6.163	1.541	22.084**	2.690	4.020
Kür x katkı	8	0.361	0.045	0.646 öd	2.270	3.170
HATA	30	2.093	0.070			
Genel	44	9.274	0.211			

*: % 5 düzeyinde önemli, **: % 1 düzeyinde önemli, öd: Önemsiz

Ses geçiş hızı değerleri ile yapılan varyans analizinde, kürler arasındaki farklar istatistikî olarak %5 düzeyinde, katkı yüzdesi arasındaki farklar istatistikî olarak %1 düzeyinde önemli bulunmuştur. Kür x katkı yüzdeleri interaksyonu istatistikî olarak önemsiz olduğu saptanmıştır (izelge 4.5). Bulunan ortalamalar arasındaki farklılığın önemliliği Duncan karşılaştırma testi ile kontrol edilmiştir.

Çizelge 4. 5. Beton numunelerin kür süresi ve katkı yüzdesine göre ses geçiş hızı verilerinin sınıflandırılması

KÜR (gün)	KATKI (%)					Ortalama
	0	3	6	9	12	
7	4.35	3.87	3.82	3.66	3.63	3.87 <i>b</i>
28	4.77	4.22	4.11	3.68	3.63	4.08 <i>a</i>
56	4.89	4.29	4.18	3.74	3.64	4.15 <i>a</i>
Ortalama	4.67 <i>a</i>	4.13 <i>b</i>	4.04 <i>b</i>	3.70 <i>c</i>	3.63 <i>c</i>	4.03
LSD ($P \leq 0.05$)	Kür: 0.197 Katkı: 0.254 Kür x katkı: -					



Şekil 4. 7. Betonun ses geçiş hızının katkı yüzdesine göre değişimi ve sınıflandırılması

Kür süresinin ortalamaları incelendiğinde, en yüksek ses geçiş hızı 4.15 değeri ile 56 günlük uygulamadan, en düşük ses geçiş hızı 3.87 değeri ile 7 günlük kür uygulamasında elde edilmiştir (Çizelge 4.5). Duncan çoklu karşılaştırma testine göre sınıflandırdığımızda, 28 günlük ve 56 günlük kür süreleri aynı sınıfta, 7 günlük kür süresi ayrı sınıfta olduğu belirlenmiştir.

Katkı yüzdeleri yönünden değerlendirildiğinde; ses geçiş hızının 3.63-4.67 arasında değiştiği görülmektedir. En yüksek basınç dayanımı %0 katkı oranından elde edilmiş, bunu 4.13 ile %3 katkı yüzdesi değeri izlemiştir. En düşük ses geçiş hızı ise, %12'lik katkı yüzdesinde belirlenmiştir. Katkı yüzdeleri arasında gerçekleştirilen Duncan çoklu karşılaştırma testi sonuçlarına göre; %3 ve %6 katkı yüzdelerinin aynı grupta, %9 ve %12 yüzdelerinin aynı grupta sınıflandırıldığı ancak %0'ın bu gruplardan farklı olduğu görülmüştür (Şekil 4.7).

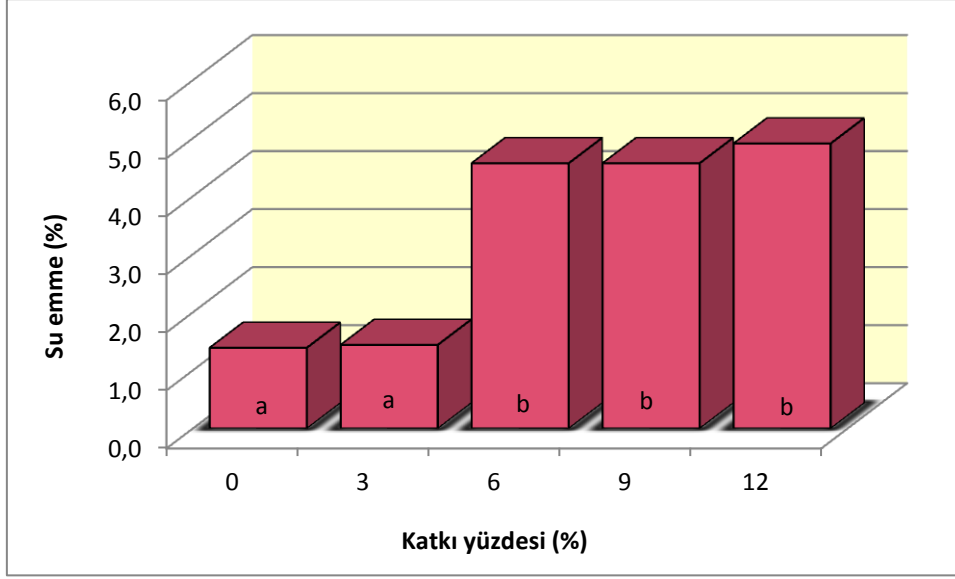
Kür x katkı yüzdesi iteraksiyonunda, ses geçiş hızı 3.63 - 4.89 arasında değiştiği belirlenmiştir. En yüksek basınç dayanımı, 56 günlük kür uygulamasının %0 katkı yüzdesinden elde edilmiş, bunu 4.77 ile aynı kür uygulamasının 28 günlük katkı yüzdesi izlemiştir. Yedi günlük kür uygulamasının %12'lik katkı yüzdesi ise, en düşük ses geçiş hızına sahip olmuştur. Kür x katkı yüzdeleri iteraksiyonun istatistikî olarak önemsiz olduğundan dolayı sınıflandırılmamıştır (Çizelge 4.5).

Gerçekleştirilen Duncan testi sonuçlarına göre ses geçiş hızı değerleri bakımından; kür süreleri içinde 56 günlük kürün en büyük ses geçiş hızına sahip olduğu, en düşük ses geçiş değerine 7 günlük kür süresinin sahip olduğu görülmektedir (Şekil 4.7). Neville'nin belirttiği üzere; ses geçiş hızı değeri 3.5-4.5 km/s arasında olduğu için üretilen betonlar iyi kalitededir (Neville, 1990). Üretilen betonun ses geçiş hızı kür süresi için 3.87 – 4.15 arasında, katkı yüzdeleri için 3.63 - 4.89 arasında ve kür x katkı yüzdesinin ise 3.63 – 4.80 arasında kaldığı için betonlarımızın iyi kalitede olduğunu söyleyebiliriz.

Bor atığının beton içyapısında, herhangi olumsuz bir sorun gözlenmemiş aksine düşük yüzdelerdeki kullanımı ile ses geçiş sürelerinden de görüleceği üzere daha yoğun bir içyapı elde edilmiştir. Aydın (2009) ve Uğurlu (2004) yapmış olduğu çalışmalarda benzer sonuçları bulmuşlar ve düşük yüzdelerde bor atığı kullanımı ile beton iç yapısında herhangi bir kusur oluşmadığı atık oranının yükselmesi ile geçiş süresin uzadığını tespit etmişlerdir.

4.2.1.1.3. Su emme

Betonun su geçirimsizliği, içindeki boşluk oranına bağlıdır. Katı cisim olmalarına rağmen yapı malzemeleri, içyapılarında gözle görülebilen veya görülemeyen boşluklara sahiptirler. Büyüklü küçüklü, sürekli veya süreksiz olabilen bu boşlukların betonun dayanımını ve dayanıklılığını etkilediği bilinmektedir. Deneysel kapsamında yer alan betonlara ait su emme oranları tayini 28 günlük suda kür edilmiş küp numuneler üzerinde yürütülmüştür. Su emme değerleri, katkı yüzdesine göre Çizelge 4.3'de verilmiştir. Beton numunelerin su emme oranlarının % 1.39 - 4.91 arasında değiştiği görülmüştür.



Şekil 4. 8. Betonun katkı yüzdesine göre su emme değerleri

Betonların su emme değerleri katkı yüzdesi yönünden değerlendirildiğinde; en yüksek su emme değeri 1.39 ile %0 katkı oranından elde edilmiş, bunu 1.44 ile %3 katkı yüzdesi değeri izlemiştir. En düşük su emme değeri ise, %12'lik katkı yüzdesinde belirlenmiştir. Katkı yüzdesi arasında gerçekleştirilen Duncan çoklu karşılaştırma testi sonuçlarına göre; %0 ve %3 yüzdesi aynı sınıf içerisinde yer almış, %6, %9 ve %12 katkı yüzdesi ise diğer sınıf içerisinde yer almıştır. Duncan testi sonuçları Şekil 4.8'de görülmektedir.

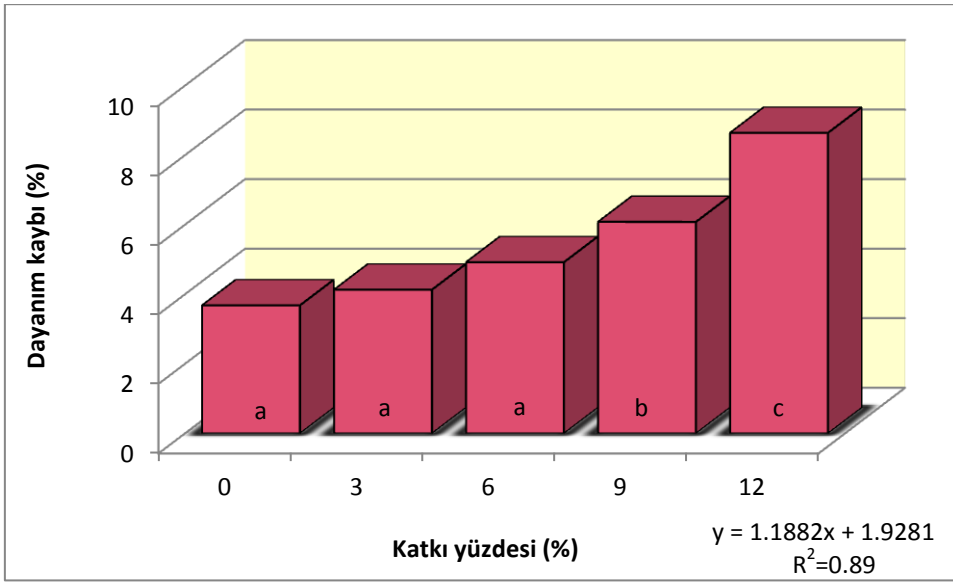
Şekil 4.8 incelendiğinde, %3 katkı oranının referans betonuyla çok yakın değer aldığı görülmektedir. Bu durum, çimento hamuru ve özellikle ara yüzey bölgesinin çok sıkı yapışmasına neden olduğu, betonun dayanıklılığını büyük oranda arttırdığı ile açıklanabilir. Betonda %3 katkı oranından sonra ki katkı oranlarında su emme yüzdesinde belirgin bir artış görülmüştür. Benzer sonucu Öntürk (2011) yaptığı çalışmada % 3 ve % 5 bor atığı içeren numunelerin şahit numuneden bir miktar az su emdiğini tespit etmiştir.

Bu veriler değerlendirildiğinde, su etkisinde tüm gruplarda hidrasyonun sürdüğü, betona katılan BA'nın %3 katkı oranında kontrol numunesine yakın değer aldığı ve boşluk oluşumunu bir ölçüde engellediği görülmektedir.

4.2.1.1.4. Donma çözülme

Soğuk iklim koşullarında betonun kalıcılığını tehdit eden en önemli etkenlerden biriside donma-çözülme olayıdır. Beton numuneleri üzerinde yapılan donma-çözülme deneyleri sonunda meydana gelen dayanım kayıpları değerleri Şekil 4.9'da gösterilmiştir.

B12 katkıli betonların yüzde 8.04 ile en fazla dayanım kaybına sahip olduğu, yüzde 3.68 ile referans betonun en düşük dayanım kaybına sahip olduğu görülmüştür. Yüzde 12 katkı oranlı betonların referans betonlara göre %45 daha fazla donma dayanım kaybına uğradığı belirlenmiştir.



Şekil 4. 9. Betonun katkı yüzdesine göre donma-çözülme değerleri

Duncan çoklu karşılaştırma testi sonuçlarına göre; %0 %3 ve %6 yüzdelерinin aynı grup içerisinde, %9 katkı yüzdelерinde ise b grubu içerisinde sınıflandırıldığı %12'nde c grubu içerisinde sınıflandırıldığı Şekil 4.9'da görülmektedir.

Bor atığı miktarı arttıkça bununla ters orantılı olarak donma- çözülme dayanımının azaldığı görülmüştür. Bor atığı ikame miktarı ile donma-çözülme dayanımları arasındaki ilişki grafiği Şekil 4.9'da görülmektedir.

Yüzde üç ve yüzde altı katkı oranlarında donma-çözülme çevrimleri sonucundaki dayanım kayıpları kontrol numunesine yakın değerler almıştır. Buradan, bor atığı katkı malzemesinin kullanılmasının düşük katkı oranlarında donma-çözülme dayanımına olumlu etkisi olduğu görülmektedir. Topçu ve Boğa (2005) yaptıkları çalışmada da benzer sonuçlar

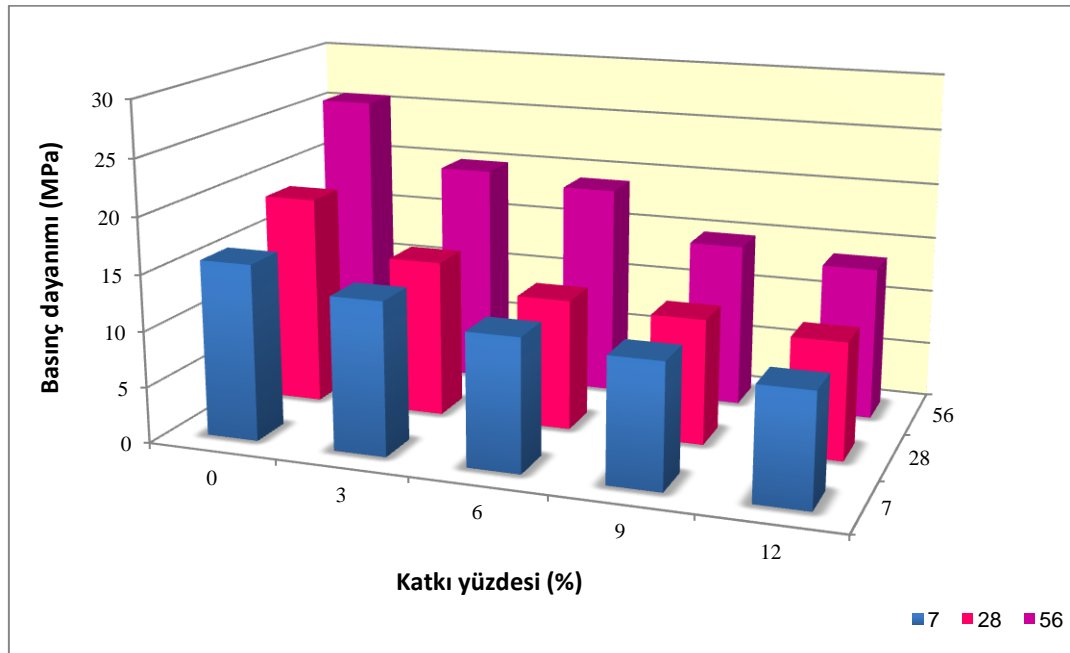
bulmuşlar ve %3 bor atığı katkı oranı ve daha düşük yüzdelerde kullanılmasının yararlı olacağını belirlemişlerdir.

4.2.1.2. Mekanik özellikler

Beton numunelerde yapılan basınç dayanımı, dinamik elastisite modülü ve yarma deneyleri ile ilgili değerlendirmeler ve bu özelliklerin katkı yüzdesi ve kür süresi ile değişimi aşağıda açıklanmıştır.

4.2.1.2.1. Basınç dayanımı

Betonda bor atığı katkı yüzdelere (%0, %3, %6, %9 ve %12) ve kür süresine (7, 28 ve 56 gün) göre basınç dayanımı değerleri Çizelge 4.2’de, katkı yüzdesi ve kür süresine göre değişimi Şekil 4.10’da görülmektedir. Beton serileri incelendiğinde; bor atığı katkılı betonların 7 günlük basınç dayanımı katkısız betona göre B3 serisinde %13, B6 serisinde %25, B9 serisinde %30 B9 serisinde %37 daha düşüktür. Bor atığı katkı oranı arttıkça basınç dayanımı azalmaktadır. Yirmi sekizinci günde bor atığı katkılı betonların 28 günlük basınç dayanımı katkısız betona göre B3 serisinde %25, B6 serisinde %37, B9 serisinde %41 ve B12 serisinde %45 daha düşüktür. 56. günde ise bor atığı katkılı betonların 56 günlük basınç dayanımı katkısız betona göre B3 serisinde %22, B6 serisinde %26, B9 serisinde %43 ve B12 serisinde %47 daha düşüktür.



Şekil 4. 10. Betonun katkı yüzdesi ve kür süresine göre basınç dayanım değerleri

Şekil 4.10 incelendiğinde, basınç dayanımının bor atığı katkılı ve katkısız tüm betonlarda 56. güne kadar arttığı görülmüştür. Kür süresinin ortalamaları incelendiğinde, en yüksek basınç dayanımı 18.63 MPa ile 56 günlük uygulamadan elde edilmiştir. Yedi günlük kür uygulaması ise en düşük basınç dayanıma (12.46 MPa) sahip olmuştur. Çizelge 4.7’de görüldüğü gibi 56 günlük kür süresinin dayanım değerinin 7 günlük kürün dayanım değerinden %34.5 oranında daha yüksek değer aldığı görülmektedir. Kür süreleri arasında gerçekleştirilen Duncan çoklu karşılaştırma testi sonuçlarına göre; beton basınç dayanımı bakımından; beton türü 7. ve 28. gündeki betonların istatistiki anlamda birbirinden farklı olmadığı ancak 56. gündeki betonların (7. ve 28.) betonlardan farklı olduğu görülmüştür (Çizelge 4.7).

Çizelge 4. 6. Betonun varyans analiz tablosu

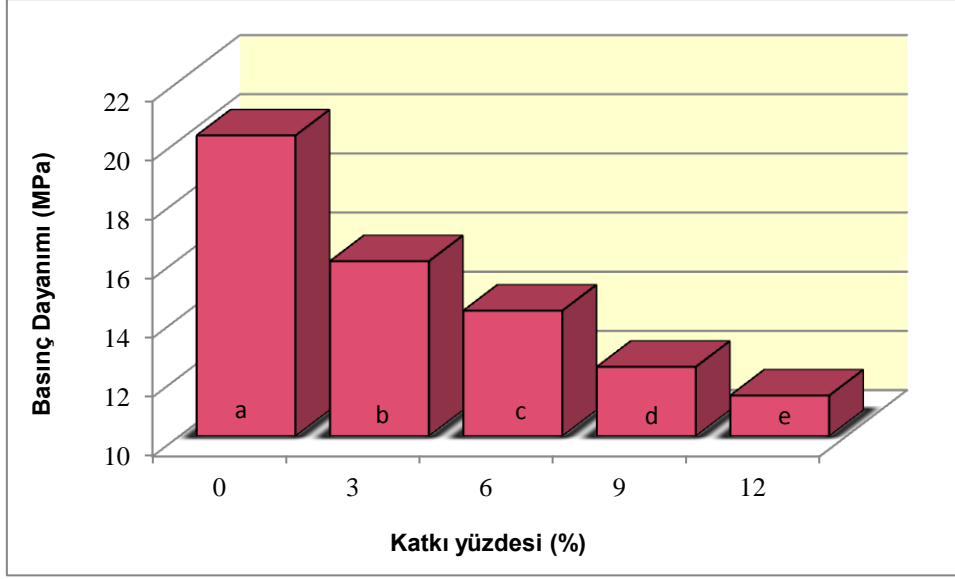
Varyasyon Kaynağı	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	Hesaplanan F	Tablo Değeri	
					%5	%1
Kür	2	343.000	171.500	231.256**	3.320	5.390
Katkı	4	433.582	108.396	146.164**	2.690	4.020
Kür x katkı	8	49.820	6.228	8.397**	2.270	3.170
HATA	30	22.248	0.742			
Genel	44	848.651	19.288			

*: % 5 düzeyinde önemli, **: % 1 düzeyinde önemli, öd: Önemsiz

Basınç dayanımı değerleriyle yapılan varyans analiz sonuçlarına göre kür süresi, katkı yüzdesi ve kür x katkı yüzdesi (KK) interaksyonu istatistiki olarak % 1 düzeyinde önemli bulunmuştur (Çizelge 4.7).

Çizelge 4. 7. Betonun ortalama tablosu

KÜR (gün)	KATKI (%)					Ortalama
	0	3	6	9	12	
7	15.75 c	13.69 d	11.82 e	11.07 ef	9.99 f	12.46 c
28	18.84 g	14.06 d	11.72 e	11.20 ef	10.45 ef	13.14 b
56	25.73 a	19.97 b	19.01 b	14.74 cd	13.69 d	18.63 a
Ortalama	20.11 a	15.91 b	14.10 c	12.24 d	11.37 e	14.74
LSD (P<005)		Kür: 0.642	Katkı: 0.829	Kür x katkı: 1.436		



Şekil 4. 11. Betonun katkı yüzdesine göre ortalama basınç dayanımları

Katkı yüzdeleri yönünden değerlendirildiğinde; basınç dayanımının 11.37-20.11 MPa arasında değiştiği görülmektedir. En yüksek basınç dayanımı %0 katkı oranından elde edilmiş, bunu 15.91 MPa ile %3 katkı oranı izlemiştir. En düşük basınç dayanımı ise, 11.37 ile %12'lik katkı yüzdesinde belirlenmiştir. Bunu 12.24 MPa ile %9'luk katkı yüzdesi izlemiştir. Katkı yüzdeleri arasında gerçekleştirilen Duncan çoklu karşılaştırma testi sonuçlarına göre; %3, %6 katkı yüzdeslerinde betonların istatistiki anlamda birbirinden farklı olmadığı, %9 ve %12 yüzdeslerinin betonların istatistiki anlamda birbirinden farklı olmadığı ve %0 yüzdesinin diğer iki gruptan farklı olarak sınıflandırıldığı Şekil 4.11'de görülmüştür.

Kür x katkı yüzdesi iteraksiyonunda, basınç dayanımının 9.99-25.73 MPa arasında değiştiği belirlenmiştir. En yüksek basınç dayanımı, 56 günlük kür uygulamasının %0 katkı yüzdesinden elde edilmiş, bunu 19.97 MPa ile aynı kür uygulamasının %3'lük katkı yüzdesi izlemiştir. Yedi günlük kür uygulamasının %12'lik katkı yüzdesi ise, en düşük basınç dayanımına sahip olmuş, bunu 10.45 MPa ile 28 günlük kür uygulamasının %12'lik katkı yüzdesi izlemiştir (Çizelge 4.7).

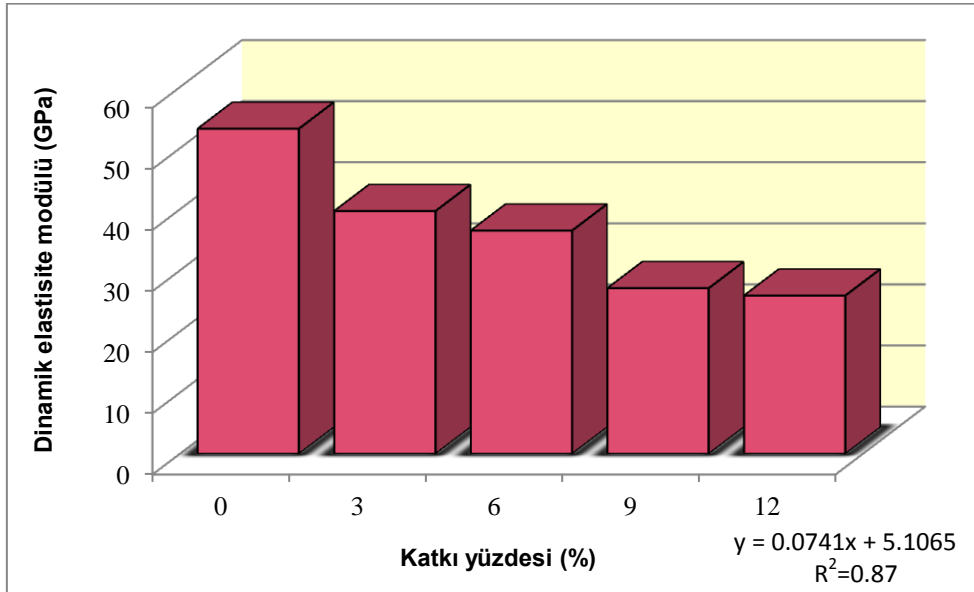
Bor atığı katkılı numunelerin 7 gündeki basınç dayanımları bütün serilerde referans betonuna daha düşük bulunmuştur. Ancak 56 günlük dayanımlarda basınç dayanımları referans betonuna daha yakın değer almıştır. Bu sonuç, katkılı betonların zamanla dayanımlarının daha yüksek oranda artacağını göstermektedir. Bunun nedeni katkıların Ca(OH)_2 ile reaksiyona girerek bunu bağlaması ile açıklanabilir. Ayrıca katkı malzemesinin betondaki boşlukları bir miktar azaltmış ve katkılar ile agrega arasında ara yüzeyleri

geliştirmiş olduğu muhtemeldir. Benzer sonucu Aydın (2009), Özmal ve ark. (2005), Targan (2001) ve Kula (2000) bor atığı katkısının betonun erken dayanımını azalttığını bulmuşlardır.

4.2.1.2.2. Betonun dinamik elastisite modülü

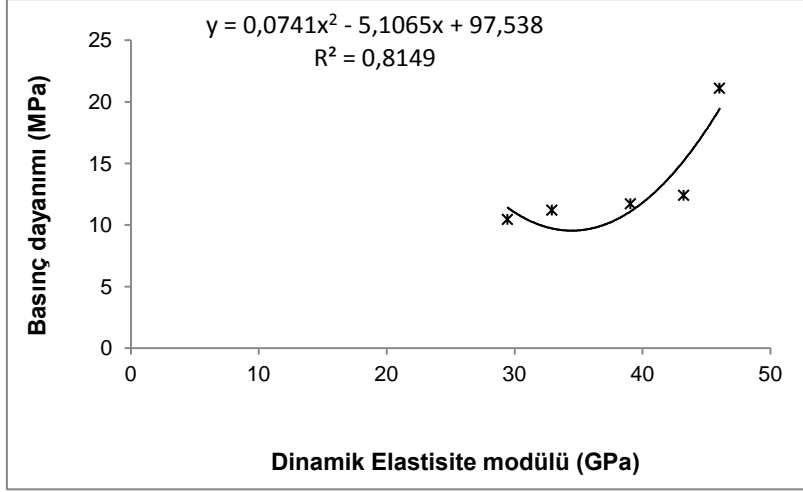
Dinamik elastisite modülü (E_d), bu çalışmadaki deneysel verilerden ve ASTM C 597 (2002) verilen ses geçiş hızı, birim ağırlığı ve Poisson oranını esas alarak hesaplanmıştır.

Üretilen numunelerin ses geçiş sürelerine ve birim ağırlıklarına bağlı olarak hesaplanan dinamik elastisite modülü değerleri katkı yüzdesine göre Şekil 4.12’de verilmiştir. Hesaplanan dinamik elastisite modülleri 25.87-53.19 GPa arasında değişim göstermektedir. En yüksek dinamik elastisite modülü 53.19 GPa ile %0 katkı oranında elde edilmiştir. 25.87 MPa değeri ile %12 katkı oranlı numunelerde ise en düşük dinamik elastisite modülüne sahip olmuştur. Betonda kullanılan BA miktarının artması ile dinamik elastisite modülü değerleri % 51’e ulaşan oranlarda azalma göstermiştir. Bu azalmanın nedeni, BA katkılı betonlarda boşluk oranını arttırması ile açıklanabilir. Su emme değerleri de bu durumu desteklemektedir.



Şekil 4. 12. Betonun dinamik elastisite modülü ile katkı yüzdesi ilişkisi

Basınç dayanımı ile elastisite modülü arasındaki ilişki ise Şekil 4.13’de görülmektedir. Yapılan regresyon analizi sonucunda bu deney çıktılarına uygun eğri çizilerek bu eğriye ait regresyon katsayısı (R^2) 0.82 olarak belirlenmiştir. R^2 değerinin 1’e yakın olmasından dolayı, verilen bu denklem kullanılarak, bilinen dinamik elastisite değerinden tahribatsız olarak basınç dayanımı belirlenebilir.



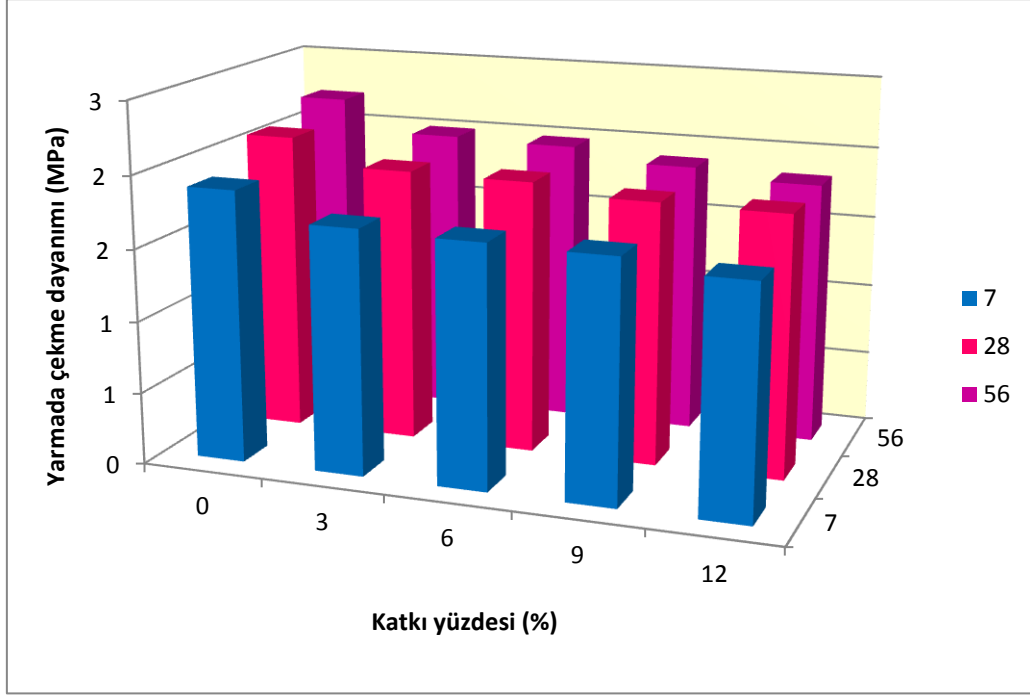
Şekil 4. 13. Betonun dinamik elastisite modülü-basınç dayanımı ilişkisi

Serilerin ses geçiş hızlarından elde edilen dinamik elastisite modülleri ile basınç dayanımları arasında regresyon analizi yapılarak, iki değer arasında iyi bir korelasyon olduğu belirlenmiştir. Bu durumda, yapılan analiz sonucunda elde edilen eğri denklemleri kullanılarak, betonlar tahrip edilmeden, sadece dinamik elastisite modülünün bulunması ile basınç dayanımları hesaplanabilir.

4.2.1.2.3. Yarmada çekme dayanımı

Betonun bor atığı katkı yüzdelere (%0, %3, %6, %9 ve %12) ve kür süresine (7, 28 ve 56 gün) göre yarmada çekme dayanımı değerleri Çizelge 4.2’de, Şekil 4.14’de verilmiştir.

Beton serileri incelendiğinde; betonun yarmada çekme dayanımı, 7. günde BA katkılı betonların 7 günlük yarmada çekme dayanımı katkısız betona göre B3 serisinde %10, B6 serisinde %11, B9 serisinde %10 B9 serisinde %16 daha düşüktür. BA katkı oranı arttıkça yarmada çekme dayanımı azalmaktadır. Yirmi sekizinci günde ise BA katkılı betonların 28 günlük yarmada çekme dayanımı katkısız betona göre B3 serisinde %9, B6 serisinde %8, B9 serisinde %13 ve B12 serisinde %14 daha düşüktür. Elli altıncı günde ise ise BA katkılı betonların 56 günlük yarmada çekme dayanımı katkısız betona göre B3 serisinde %10 B6 serisinde %11, B9 serisinde %15 ve B12 serisinde %18 daha düşüktür.



Şekil 4. 14. Betonun katkı yüzdesine ve kür süresine göre yarmada çekme dayanım değerleri

Şekil 4.14 incelendiğinde, yarmada çekme dayanımının BA katkılı ve katkısız tüm betonlarda 56. güne kadar arttığı görülmüştür. Yedi günlük dayanımlarda kontrol betonunun dayanımına göre, B12 dışında birbirine yakın değerler almıştır. BA'lı betonlarda en yüksek dayanımı 1.70 ile B3, en düşük dayanımı 1.59 ile B12 göstermiştir. BA katkılı betonların yarmada çekme dayanımları, basınç dayanımında olduğu gibi ikame oranı arttıkça azalmaktadır. B0 ile B12 arasında yüzde 16 azalma görülmüştür.

Yirmisekiz günlük dayanımlarda, 7 günlük dayanımlara göre yarmada çekme dayanımı artış göstermiştir. Bu yaşta da, ikame oranı arttıkça BA'lı betonların dayanımları azalmaktadır. B3 ve B6 katkılı betonlar referans betonuna (B0) yakın değerler almıştır. BA katkılı betonlarda en yüksek dayanımı 1.91 ile B3, en düşük dayanımı 1.82 ile B12 göstermiştir.

Elli altı günlük dayanımlarda, 7 ve 28 günlük dayanımlara göre artış göstermiştir. BA katkı oranı arttıkça dayanımlar azalmıştır. B3 ve B6 katkılı betonlar referans betonuna yakın değerler almıştır.

Çizelge 4. 8. Betonun varyans analiz tablosu

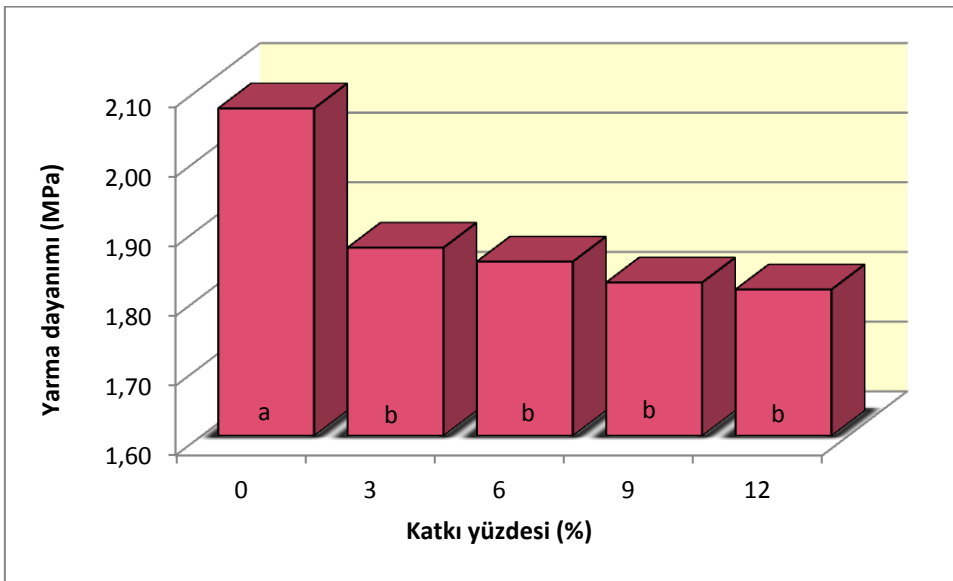
Varyasyon Kaynağı	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	Hesaplanan F	Tablo Değeri	
					%5	%1
Kür	2	0.383	0.192	13.769**	3.320	5.390
Katkı	4	0.393	0.098	7.052**	2.690	4.020
Kür x katkı	8	0.109	0.014	0.982öd	2.270	3.170
HATA	30	0.418	0.014			
Genel	44	1.303	0.030			

*: % 5 düzeyinde önemli, **: % 1 düzeyinde önemli, öd: Önemsiz

Yarmada çekme dayanımı değerleriyle yapılan varyans analiz sonuçlarına göre kür süresi ve katkı yüzdesi istatistik olarak % 1 düzeyinde önemli, kür x katkı yüzdesi (KK) interaksiyonu istatistik olarak önemsiz bulunmuştur (Çizelge 4.8).

Çizelge 4. 9. Betonun ortalama tablosu

KÜR (gün)	KATKI (%)					Ortalama
	0	3	6	9	12	
7	1.89	1.70	1.68	1.67	1.59	1.76 b
28	2.09	1.91	1.90	1.83	1.82	1.91 a
56	2.22	2.00	1.98	1.89	1.83	1.98 a
Ortalama	2.07 a	1.87 b	1.85 b	1.81 b	1.82 b	1.88
LSD ($P \leq 0.05$)	Kür: 0.088 Katkı: 0.114 Kür x katkı: -					



Şekil 4. 15. Betonun katkı yüzdesine göre ortalama yarma dayanımları

Kür süresinin ortalamaları incelendiğinde, en yüksek yarmada çekme dayanımı 1.98 MPa ile 56 günlük uygulamadan elde edilmiştir. Yedi günlük kür uygulaması ise 1.76 MPa değeriyle en düşük yarma dayanıma sahip olmuştur. Çizelge 4.9'da görüldüğü gibi 56 günlük kür süresinin dayanım değerinin 7 günlük kürün dayanım değerinden %34.5 oranında daha yüksek değer aldığı görülmektedir. Kür süreleri arasında gerçekleştirilen Duncan çoklu karşılaştırma testi sonuçlarına göre; beton basınç dayanımı bakımından; beton türü 28. ve 56. gündeki betonların birbirinden farklı olmadığı ancak 7. gündeki betonların 28 ve 56 günden farklı olarak sınıflandırıldığı Çizelge 4.9'da görülmüştür.

Katkı yüzdeleri yönünden değerlendirildiğinde; yarmada çekme dayanımının 1.82-2.07 MPa arasında değiştiği görülmektedir. En yüksek yarmada çekme dayanımı %0 katkı oranından elde edilmiş, bunu 1.87 MPa ile %3 katkı oranı izlemiştir. En düşük yarmada çekme dayanımı ise, %12'lik katkı yüzdesinde belirlenmiştir. Katkı yüzdeleri arasında gerçekleştirilen Duncan çoklu karşılaştırma testi sonuçlarına göre; %3, %6, %9 ve %12 katkı yüzdelerinde betonların aynı sınıflandırıldığı sadece %0 yüzdesinin farklı sınıflandırıldığı Şekil 4.15'de görülmüştür.

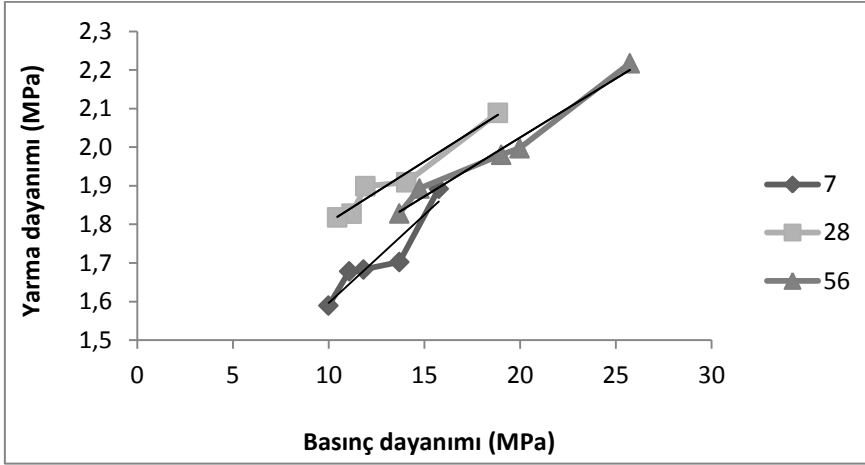
Kür x katkı yüzdesi iteraksiyonunda, yarmada çekme dayanımının 1.68-2.22 MPa arasında değiştiği belirlenmiştir. En yüksek yarmada çekme dayanımı, 56 günlük kür uygulamasının %0 katkı yüzdesinden elde edilmiş, bunu 19.97 MPa ile aynı kür uygulamasının %3'lük katkı yüzdesi izlemiştir. Yedi günlük kür uygulamasının %12'lik katkı yüzdesi ise, en düşük yarmada çekme dayanımına sahip olmuş, bunu 10.45 MPa ile 28 günlük kür uygulamasının %12'lik katkı yüzdesi izlemiştir (Çizelge 4.9).

Bor atığı katkılı numunelerin 7 gündeki basınç dayanımları bütün serilerde referans betonlarından daha düşük bulunmuştur. Ancak 56 günlük dayanımlarda yarma dayanımları kontrol örneğine daha yakın değer almıştır. Bu sonuç, katkılı betonların zamanla dayanımlarının daha yüksek oranda artacağını göstermektedir. Bunun nedeni katkıların Ca(OH)_2 ile reaksiyona girerek bunu bağlaması ile açıklanabilir.

4.2.1.2.4. Basınç dayanımı ve yarmada çekme dayanımı arasındaki ilişki

Araştırma kapsamındaki numunelerin basınç dayanımları ile yarma dayanımları arasında bir ilişki kurulmuş ve Şekil 4.16'da gösterilmiştir. Elde edilen ilişki neticesinde üretilen numunelerin 7 günlüklerinde korelasyon katsayısı 0.88, 28 günlüklerinde korelasyon katsayısı 0.96, 56 günlüklerinde korelasyon katsayısı 0.98'dir.

Şekilde görüldüğü gibi kür süresine göre basınç dayanımı arttıkça yarmada dayanımı da artmıştır. Fakat yarmada çekme dayanımındaki artış oranı basınç dayanımına göre daha az olmuştur.



Şekil 4. 16. Betonun basınç dayanımı ile yarmada çekme dayanımı ilişkisi

Basınç dayanımı ve yarmada çekme dayanımı arasındaki ilişkiyi belirleyebilmek için, deney sonuçlarına lineer regresyon analizi yapılmıştır. Lineer regresyon analizinin grafiği Şekil 4.16'da verilmiştir. Bu grafikte ampirik denklem için en uygun eğri çizilmiştir. Bu denklemlerde; x= Basınç dayanımı, y=yarmada çekme dayanımını ifade etmektedir.

$$y_7 = 0.0456x_7 + 1.1409 \quad R^2= 0.86 \quad 4.1$$

$$y_{28} = 0.0315x_{28} + 1.4899 \quad R^2= 0.96 \quad 4.2$$

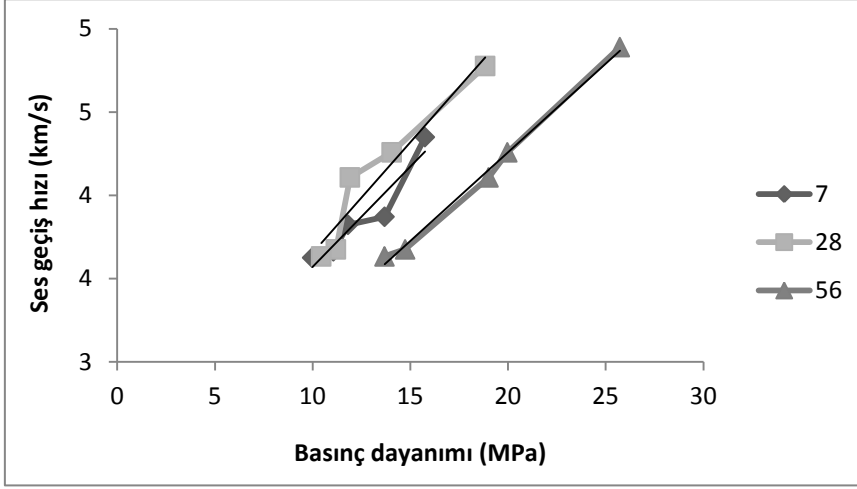
$$y_{56} = 0.0304x_{56} + 1.4164 \quad R^2= 0.98 \quad 4.3$$

Denklemlerden de görüldüğü gibi 56 günlük kür edilmiş beton numuneler basınç ve yarma dayanımları arasında lineerliğe en yakın değerleri almıştır.

4.2.1.2.5. Basınç dayanımı ve ses geçiş hızı arasındaki ilişki

Numunelerin basınç dayanımı ile ses geçiş hızı arasında Şekil 4.17'de görüldüğü gibi, ses geçiş hızı ile basınç dayanımı arasındaki ilişki lineerdir. Basınç dayanımı ve ses geçiş hızı arasındaki ilişkiyi belirleyebilmek için, deney sonuçlarına lineer regresyon analizi yapılmıştır. Lineer regresyon analizinin grafiği Şekil 4.17'de verilmiştir. Bu grafiklerde ampirik denklem için en uygun eğri çizilmiştir. Bu denklemlerde; y= Basınç dayanımı, x=ses geçiş hızı ifade etmektedir.

$y_7 = 0.1201x_7 - 2.3701$	$R^2=0.90$	4.4
$y_{28} = 0.133x_{28} - 2.3236$	$R^2=0.92$	4.5
$y_{56} = 0.1064x_{56} - 2.1312$	$R^2=0.995$	4.6



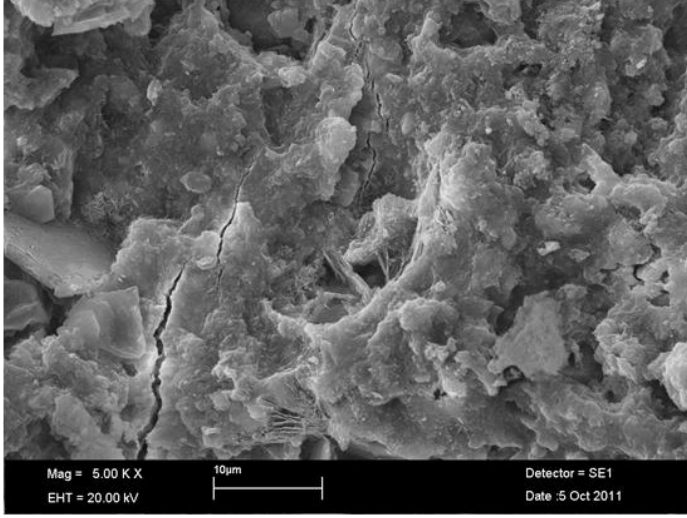
Şekil 4. 17. Beton numunelerde basınç dayanımı-ses geçiş hızı ilişkisi

Denklemlerden de görüldüğü gibi 56 günlük kür edilmiş beton numuneler basınç ve yarma dayanımları arasında lineerliğe en yakın değerleri almıştır.

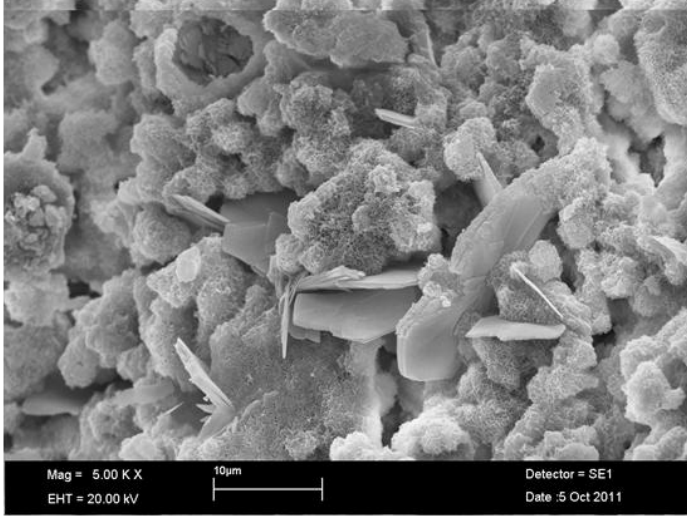
4.2.1.3. SEM analiz sonuçları

Üretilen katkıli çimentoların mekanik özelliklerinin belirlendiği standart numunelerinden alınan kesitler üzerinde SEM analizleri yapılmıştır. SEM görüntüleri alınırken beton içindeki BA ile çimento ara yüzeyinin değerlendirilmesi yapılmıştır. SEM görüntüsünde C-H fazlarının kristallendiği, C-H fazlarının kaybolduğu ve yerini C-S-H jellerine bıraktığı görülmüştür. Şekillerden de görüldüğü gibi agregalar agrega-matris ara yüzeyinde zayıf bir bağ oluşmuştur. Agrega-matris ara yüzeyinin betonun dayanımı üzerine büyük bir etkisi vardır.

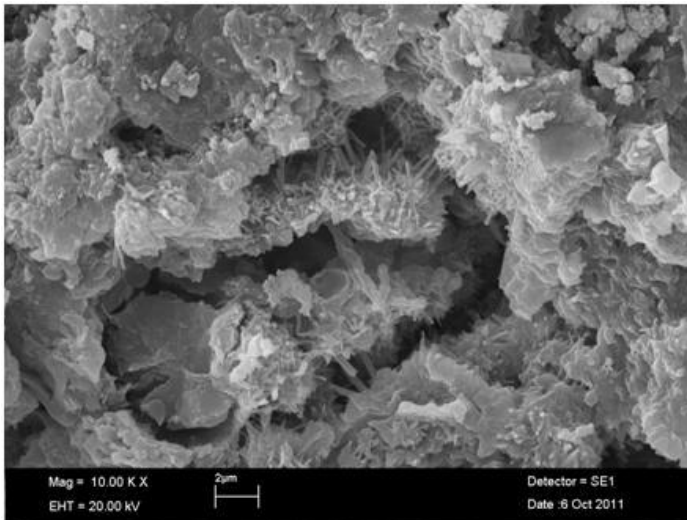
Çimento üretiminde kullanılan farklı kaynaklı mineral katkıların pozolanik aktiviteye bağlı olarak harçlara kazandırdığı bağ özelliklerinin mikro yapıdaki değişimlerini belirlemek için analizler 28 günlük numuneler üzerinde yapılmıştır. Şekil 4.18'de referans numunesinin mikro yapısı görülmektedir.



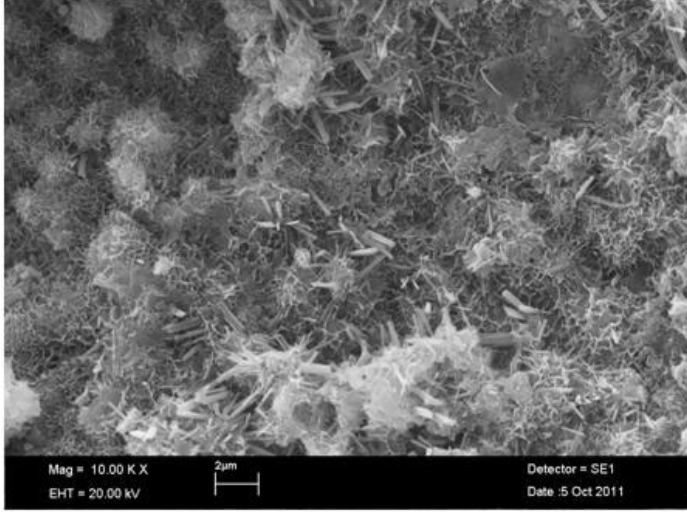
Şekil 4. 18. Beton numunesine ait SEM görüntüsü



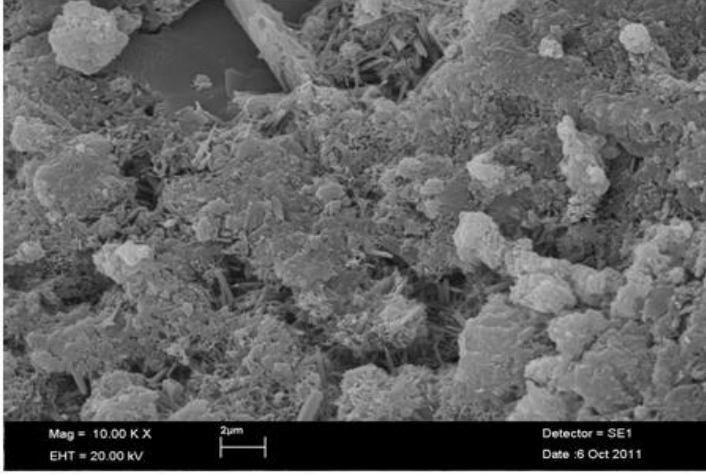
Şekil 4. 19. %3 katkılı beton numunesine ait SEM görüntüsü



Şekil 4. 20. %6 katkılı beton numunesine ait SEM görüntüsü



Şekil 4. 21. %9 katkılı beton numunesine ait SEM görüntüsü



Şekil 4. 22. %12 katkılı beton numunesine ait SEM görüntüsü

SEM görüntüleri incelenmesinde referans betonunda agrega ile hidrate olmuş çimento hamuru arasında oldukça yoğun bir bağ olduğu gözlenmektedir. İncelenen numunelerde, çimentonun başlıca hidrasyon ürünlerinin kalsiyum silikat hidrat (C-S-H), kalsiyum sülföalüminat (etrenjit) meydana geldiği görülmüştür. Etrenjit kristalleri o kadar incedir ki hidrasyonun ilk zamanlarında rijit bir yapı meydana getiremediğinden dolayı priz olayı gerçekleşmez.

Betonun mekanik özellikleri üzerinde, bileşen özellikleri önemli derecede etkiye sahiptir. Beton içerisindeki bor atığı ve çimento ara yüzeyinin yapışma özelliğinin zayıf olduğu zayıf yapışma özelliğinden kaynaklanmaktadır. Bilindiği gibi beton içerisindeki çatlak oluşumları bu zayıf bölgelerden başlayıp daha sonra ilerlemektedir.

4.2.2. Hafif agregalı beton

Çimento yerine belirli oranlarda katılan bor atığının, puzolan katkı olarak hafif betona etkisinin araştırıldığı bu çalışmada öncelikle deneylerden alınan veriler ile gerekli hesaplamalar yapılmış, ortalama değerler belirlenmiş, bu değerlerin kür süresine ve katkı yüzdesi değişimine göre değerlendirilmiştir. Yapılan deneylerden hesaplanan değerler Çizelge 4.10 ve Çizelge 4.11’de verilmiştir.

Çizelge 4. 10. Zeolit ve bor atığı katkılı ve katkısız hafif agregalı betonların mekanik deney sonuçları

Beton Kodu	Katkı oranı (%)	Beton yaşı (gün)	V (m/sn)	fc (MPa)	fct (MPa)
ZB0	0	7	4.18	11.49	1.43
ZB3	3	7	4.12	9.40	1.23
ZB6	6	7	4.08	7.92	1.17
ZB9	9	7	4.01	7.57	1.16
ZB12	12	7	3.68	6.68	1.09
ZB0	0	28	4.42	14.63	1.48
ZB3	3	28	4.17	13.33	1.23
ZB6	6	28	4.15	11.82	1.18
ZB9	9	28	4.07	11.64	1.16
ZB12	12	28	3.79	8.64	1.12
ZB0	0	56	4.68	16.35	1.50
ZB3	3	56	4.44	15.02	1.24
ZB6	6	56	4.18	12.18	1.18
ZB9	9	56	4.13	11.48	1.17
ZB12	12	56	3.83	9.43	1.11

Çizelge 4. 11. Bor atığı ve zeolit katkılı ve katkısız hafif agregalı betonların birim ağırlık, su emme ve bağıntılardan hesaplanmış elastisite modülü değerleri

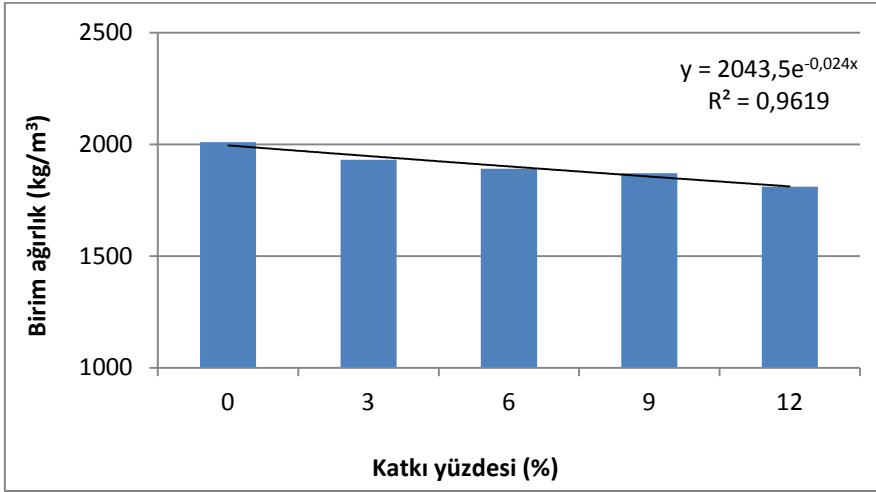
Beton Kodu	Katkı oranı (%)	Beton yaşı (gün)	Birim ağırlık (kg/m ³)	Su emme (%)	Dinamik Elastisite Modülü (GPa)
ZB0	0	28	2010	13.02	46.02
ZB3	3	28	1930	11.92	43.22
ZB6	6	28	1890	13.23	39.06
ZB9	9	28	1870	15.11	32.92
ZB12	12	28	1810	16.03	29.45

4.2.2.1. Fiziksel özellikler

Hafif agregalı beton numunelerde yapılan deneylerden elde edilen birim ağırlık ve ses geçiş hızı, su emme ve donma-çözülme gibi fiziksel özellikler ile ilgili değerlendirmeler aşağıda verilmiştir.

4.2.2.1.1. Birim ağırlık

Bor atığı katkılı ve katkısız hafif betonların küp numuneler üzerinde belirlenen birim ağırlıklarının ortalamaları katkı yüzdelere göre Çizelge 4.11’de verilmiştir. Standart koşullarda kür edilen kontrol grubu betonların 28. gündeki ortalama birim ağırlığı 2000 kg/m³’tür. Beton gruplarında en düşük birim ağırlık ise 1810 kg/m³ ile %12 grubu numunelerde elde edilmiştir. Bor atığı katılmamış ZB grubunun birim ağırlığı, bor atığı katılmış olan ZB3, ZB6, ZB9 ve ZB12 gruplarına kıyasla daha yüksek değer almıştır. Bor atık oranının artışı ile birim ağırlık değerleri düşmüştür.



Şekil 4. 23. Hafif agregalı betonun katkı oranı ile beton birim ağırlık ilişkisi.

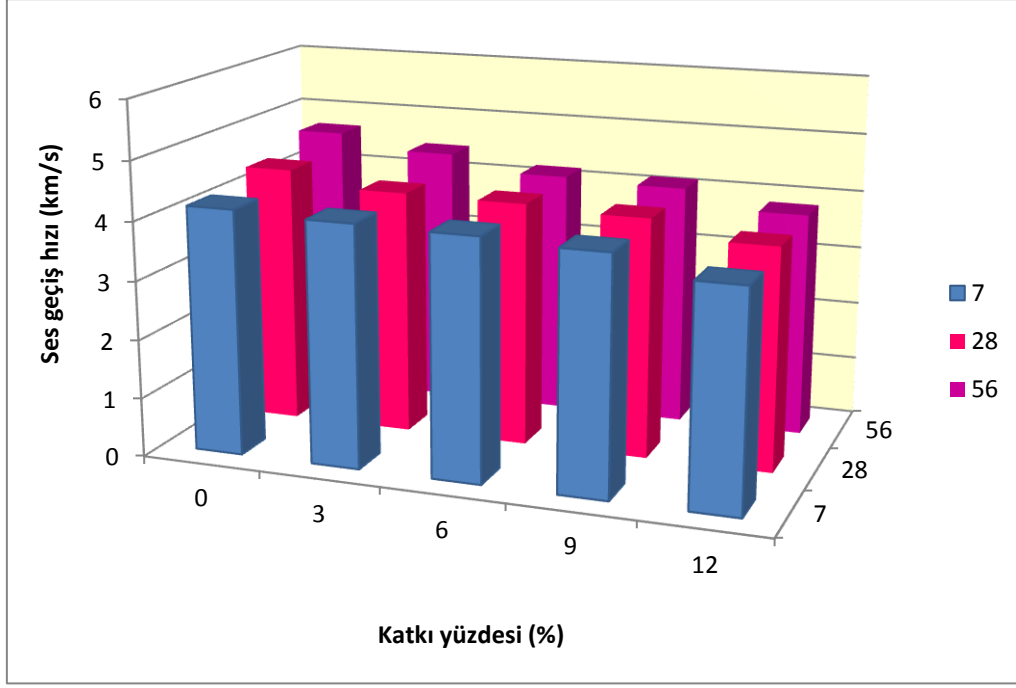
Betona katılan bor atığı katkı oranı arttıkça betonun birim ağırlıklarında bir düşüş gözlenmiştir (Şekil 4.23). Yüzde üç katkılı betonların birim ağırlık değeri şahit numuneye göre % 4, ZB6 katkı oranında % 6, ZB9 katkı oranında % 7 ve ZB12 katkı oranında % 10.1 oranında azalma olduğu belirlenmiştir. Şekil 4.23’den görüldüğü gibi birim ağırlık değeri %3 katkı oranından sonra belirgin bir şekilde düşüş göstermiştir. Birim ağırlıklardaki azalma, basınç dayanımı düşüşlerini de beraberinde getirmiştir. Basınç dayanımı sonuçlarına baktığımızda dayanım sonuçlarının bu düşüşü desteklediği görülmektedir. Bu düşüşe

kullandığımız zeolit malzemesinin sahip olduğu yüksek boşluk oranı ve hafif olmasının da etkisi olduğunu unutmamız gerekir.

Bor atığı katkı oranı ile birim ağırlık arasındaki ilişki grafiği Şekil 4.23'te görülmektedir. Yapılan regresyon analizi sonucunda bu deney çıktılarına uygun eğri çizilerek bu eğriye ait regresyon katsayısı $R^2=0,96$ olarak belirlenmiştir. Değerler lineer olarak azalmıştır. R^2 değerinin 1'e çok yakın olmasından dolayı, verilen bu denklem kullanılarak, bilinen katkı yüzdesi değerinden birim ağırlık değeri belirlenebilir.

4.2.2.1.2. Ses geçiş hızı

Hafif beton gruplarına ait ses geçiş hızı değerleri katkı yüzdesi ve zamana bağlı olarak Çizelge 4.10'da verilmiştir. Hafif betonda başlangıçtaki (7. gündeki) ses geçiş hızlarının ZB0 grubunda 4.18 km/s, ZB 3 grubunda 4.12 km/s, ZB6 grubunda 4.08 km/s, ZB9 grubunda 4.01 km/s, ZB12 grubunda 3.68 km/s olduğu; 28. gündeki ses geçiş hızlarının ZB0 grubunda 4.42 km/s, ZB3 grubunda 4.17 km/s, ZB6 grubunda 4.15 km/s, ZB9 grubunda 4.07 km/s, ZB12 grubunda 3.79 km/s olduğu; 56. Gündeki ses geçiş hızlarının ZB0 grubunda 4.68 km/s, ZB3 grubunda 4.44 km/s, ZB6 grubunda 4.18 km/s, ZB9 grubunda 4.13 km/s, ZB12 grubunda 3.83 km/s olduğu görülmektedir. Katkılı betonların ses geçiş hızları katkısız grubun ses geçiş hızından 7. günde ZB3 grubunda %2, ZB6 Grubunda %3, ZB9 grubunda %4 ve ZB12 grubunda %12, 28. Günde ZB3 grubunda %6, ZB6 Grubunda %6, ZB9 grubunda %8 ve ZB12 grubunda %14, 56. Günde ZB3 grubunda %5, ZB6 Grubunda %11, ZB9 grubunda %12 ve ZB12 grubunda %18 daha azdır.



Şekil 4. 24. Hafif agregalı betonun katkı yüzdesi ve kür süresine göre ses geçiş hızı ilişkisi

Ses geçiş hızı deney sonuçlarına ait genel varyasyonu belirlemek için kür süresi, katkı yüzdeleri ve kür x katkı için varyans analizi yapılmış, F testi ile önemliliği kontrol edilmiştir. LSD (en küçük önemli fark) kritik değerleri kullanılarak yapılan testlere göre bu farklılığın hangi faktörlerden kaynaklandığı belirlenmeye çalışılmıştır. Daha sonra kendi içlerinde Duncan testi ile gruplandırılmıştır. Ses geçiş hızı deney sonuçlarına ait varyans çözümleme sonuçları Çizelge 4.12’de verilmiştir.

Çizelge 4. 12. Hafif betonların kür süresi, katkı yüzdesi ve katkı x kür’e göre ses geçiş hızı verilerine ait varyans çözümleme sonuçları

Varyasyon Kaynağı	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	Hesaplanan F	Tablo Değeri	
					%5	%1
Kür	2	0.442	0.221	4.096*	3.320	5.390
Katkı	4	2.110	0.527	9.768**	2.690	4.020
Kür x katkı	8	0.205	0.026	0.474öd	2.270	3.170
HATA	30	1.620	0.054			
Genel	44	4.377	0.099			

*: % 5 düzeyinde önemli, **: % 1 düzeyinde önemli, öd: Önemsiz

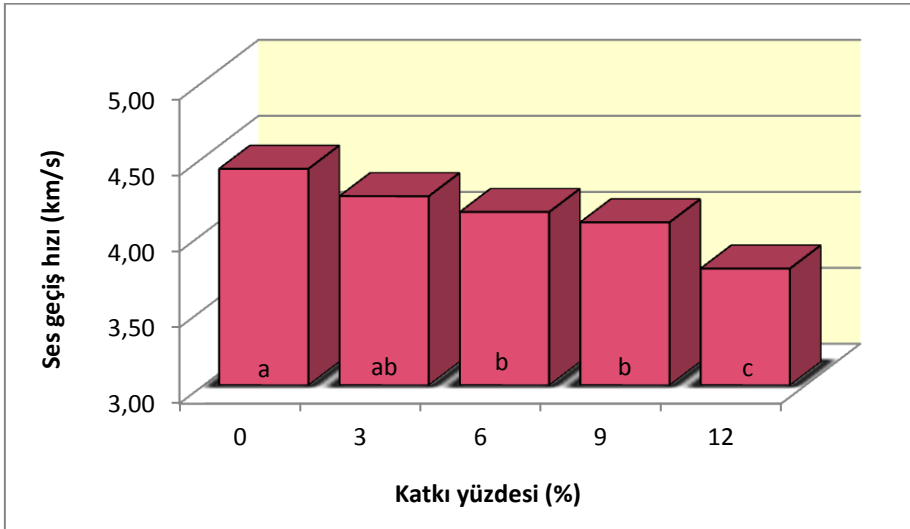
Ses geçiş hızı değerleri ile yapılan varyans analizinde, kürler arasındaki farklar istatistikî olarak %5 düzeyinde, katkı yüzdesi arasındaki farklar istatistikî olarak %1 düzeyinde önemli bulunmuştur. Kür x katkı yüzdeleri interaksiyonu istatistikî olarak önemsiz

olduğu saptanmıştır (Çizelge 4.13). Bulunan ortalamalar arasındaki farklılığın önemliliği Duncan karşılaştırma testi ile kontrol edilmiştir.

Çizelge 4. 13. Hafif beton numunelerin kür süresi, katkı yüzdesi ve kür x katkı'a göre ses geçiş hızı verilerinin sınıflandırılması

KÜR (gün)	KATKI (%)					Ortalama
	0	3	6	9	12	
7	4.18	4.12	4.08	4.01	3.68	4.02 <i>b</i>
28	4.42	4.17	4.15	4.07	3.79	4.12 <i>ab</i>
56	4.68	4.44	4.18	4.13	3.83	4.26 <i>a</i>
Ortalama	4.42 <i>a</i>	4.24 <i>ab</i>	4.14 <i>b</i>	4.07 <i>b</i>	3.77 <i>c</i>	
LSD ($P \leq 0.05$)	Kür: 0.173 Katkı: 0.224 Kür x katkı: -					

Kür süresinin ortalamaları incelendiğinde, en yüksek ses geçiş hızı değeri 4.18 ile 56 günlük uygulamadan elde edilmiştir. Yedi günlük kür uygulaması ise 3.68 değer ile en düşük basınç dayanıma sahip olmuştur.



Şekil 4. 25. Hafif agregalı betonun ses geçiş hızının katkı yüzdesine göre değişimi ve sınıflandırılması

Kür süresinin ortalamaları incelendiğinde, en yüksek ses geçiş hızı 4.15 değeri ile 56 günlük uygulamadan, en düşük ses geçiş hızı 3.87 değeri ile 7 günlük kür uygulamasında elde edilmiştir (Çizelge 4.13). Duncan çoklu karşılaştırma testine göre sınıflandırdığımızda, 28 günlük ve 56 günlük kür süreleri aynı sınıfta, 7 günlük kür süresi ayrı sınıfta olduğu belirlenmiştir.

Katkı yüzdeleri yönünden değerlendirildiğinde; ses geçiş hızı 3.63 - 4.67 arasında değiştiği görülmektedir. Yüzde on iki katkılı betonların 3.63 ortalama ile en düşük beton basınç dayanımına sahip olduğu, %0 yüzdesindeki betonların 4.67 ortalama ile en yüksek ses geçiş hızına sahip olduğu belirlenmiştir. En düşük ses geçiş hızı ise, %12'lik katkı yüzdesinde belirlenmiştir. Katkı yüzdeleri arasında gerçekleştirilen Duncan çoklu karşılaştırma testi sonuçlarına göre; %3 ve %6 katkı yüzdelerinde aynı sınıflandırıldığı, %9 ve %12 yüzdelerinde betonların aynı sınıflandırıldığı ancak %0'ın farklı olduğu görülmüştür.

Kür x katkı yüzdesi iteraksiyonunda, ses geçiş hızı 3.63 - 4.89 arasında değiştiği belirlenmiştir. En yüksek basınç dayanımı, 56 günlük kür uygulamasının %0 katkı yüzdesinden elde edilmiş, bunu 4.77 ile aynı kür uygulamasının 28 günlük katkı yüzdesi izlemiştir. Yedi günlük kür uygulamasının %12'lik katkı yüzdesi ise, en düşük ses geçiş hızına sahip olmuştur. Kür x katkı yüzdeleri iteraksiyonun istatistikî olarak önemsiz olduğundan dolayı sınıflandırılmamıştır (Çizelge 4.13).

Gerçekleştirilen Duncan testi sonuçlarına göre ses geçiş hızı değerleri bakımından; kür süreleri içinde 56 günlük kürün en büyük ses geçiş hızına sahip olması en düşük ses geçiş değerine 7 günlük kür süresinin sahip olduğu görülmektedir. Neville'nin belirttiği üzere; ses geçiş hızı değeri 3.5-4.5 km/s arasında olduğu için üretilen betonlar iyi kalitededir (Neville 1990). Bizim ürettiğimiz betonun ses geçiş hızı kür süresi için 3.87 – 4.15 arasında, katkı yüzdeleri için 3.63 - 4.89 arasında ve kür x katkı yüzdesinin ise 3.63 – 4.80 arasında kaldığı için betonlarımızın iyi kalitede olduğunu söyleyebiliriz.

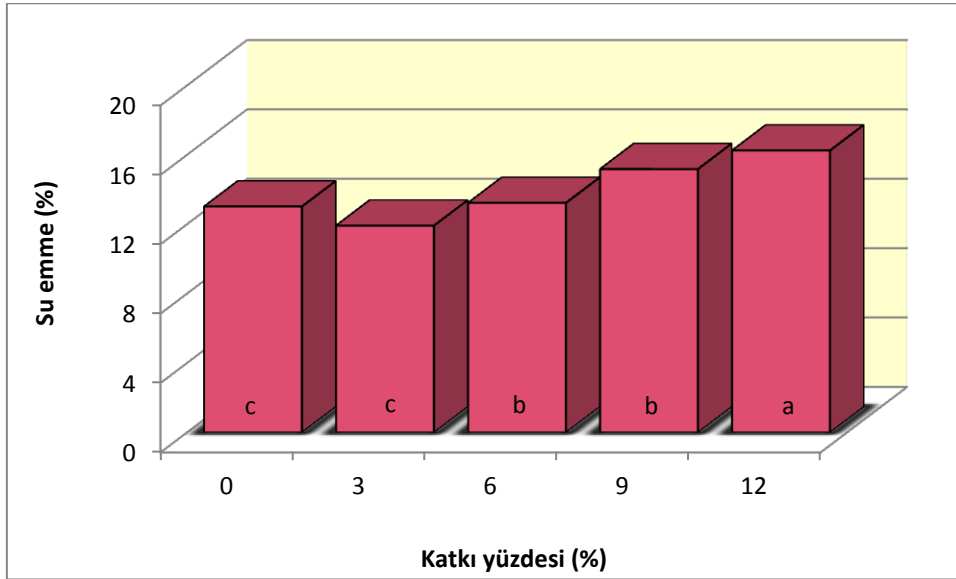
Bor atığının beton iç yapısında, herhangi olumsuz bir sorun gözlenmemiş aksine düşük yüzdelerdeki kullanımı ile ses geçiş sürelerinden de görüleceği üzere daha yoğun bir iç yapı elde edilmiştir. Bu durum teorik olarak üretilen malzemenin geçirimsizliğini olumlu yönde etkileyecek ve onu durabilite yönünden güçlendirecektir.

Bor atığının beton iç yapısında, herhangi olumsuz bir sorun gözlenmemiş aksine düşük yüzdelerdeki kullanımı ile ses geçiş sürelerinden de görüleceği üzere daha yoğun bir iç yapı elde edilmiştir. Bu durum teorik olarak üretilen malzemenin geçirimsizliğini olumlu yönde etkileyecek ve onu durabilite yönünden güçlendirecektir.

4.2.2.1.3. Su emme

Betonun su geçirirliği, içindeki boşluk oranına bağlıdır. Katı cisim olmalarına rağmen yapı malzemelerinin çoğunun iç yapılarında gözle görülebilen veya görülemeyen boşluklara sahip oldukları bilinmektedir. Büyüklü küçüklü, sürekli veya süreksiz olabilen bu boşlukların betonun dayanımını ve dayanıklılığını etkilediği bilinmektedir.

Deneyleer kapsamında yer alan betonlara ait su emme oranları tayini 28 günlük suda kür edilmiş küp numuneler üzerinde yürütülmüştür. Hafif agregalı beton gruplarına göre ağırlıkça su emme değerleri zamana bağlı olarak Çizelge 4.11'de verilmiştir. Porozitenin göstergesi olan su emmenin zamanla değişimi Şekil 4.26'da verilmiştir. Hafif agregalı betonlar incelendiğinde su emme, başlangıçta %13.02, ZB3 grubunda %11.92, ZB6 grubunda %13.23, ZB9 grubunda %15.18 ve ZB12 grubunda %16.25 değerlerindedir. Hafif agregalı betonda BA katkı oranı arttıkça su emme yüzdesinde artış görülmüştür. Hafif agregalı beton, normal betona göre oldukça fazla su emme göstermiştir. Bunun sebebi kullandığımız zeolit malzemesinin su emme yüzdesinin yüksek olmasıdır. Burada önemli olan %3 katkı oranlı numunelerin su emme değeri %0 katkı oranlı su emme değerinden daha düşük olmasıdır.



Şekil 4. 26. Hafif agregalı betonun katkı yüzdesine göre su emme değerleri

Kullandığımız zeolit malzemesinin mikro gözenekli kristal yapılı, yüksek su emme özelliğine ve geniş yüzeye sahip hafif bir malzemesi olması sebebiyle su emme yüzdeleri betondan yüksek çıkmaktadır.

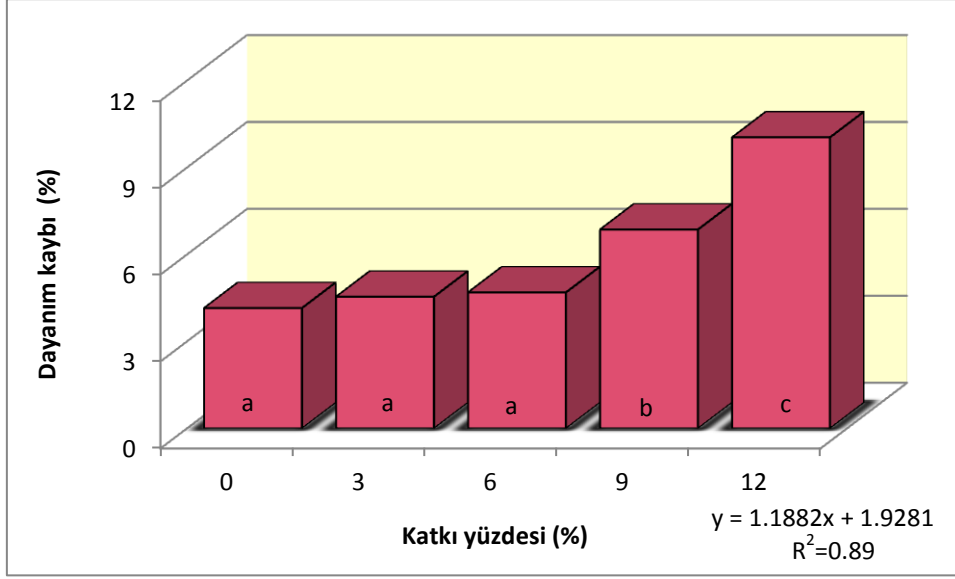
Hafif agregalı beton numunelerin su emme oranlarının % 11.92 - 16.03 arasında değiştiği görülmüştür. Çizelge ve şekiller incelendiğinde, su emme oranlarına bakıldığında ZB3 grubunun %3 katkı oranında su emmede yüzde 16 azalma görülmüştür. Bu durum ZB3 grubunun imento hamuru ve özellikle ara yüzey bölgesinin yapılaşmasına neden olduğu, betonun dayanıklılığını büyük oranda arttırdığı ile açıklanabilir. Hafif agregalı betonda ZB3 grubu hariç BA katkı oranı arttıka su emme yüzdesinde artış görülmüştür (şekil 4.26).

Su emme oranlarına bakıldığında ZB3 grubunun kontrol serisinden daha iyi değer aldığı görülmüştür. Bu durum imento hamuru ve özellikle ara yüzey bölgesinin çok sıkı yapılaşmasına neden olduğu, betonun dayanıklılığını büyük oranda arttırdığı ile açıklanabilir. Daha önce yapılmış çeşitli çalışmalarda da benzer sonuçlar elde edilmiştir. Sarıkaya (2006), zeolit miktarı arttıka su emme yüzdesi de artmıştır. şişman ve ark. (2008), zeolit kullanarak yaptıkları bir çalışmada karışıma giren zeolit miktarı artışına bağlı olarak su emme oranlarının %6.1'den %8.3'e yükseldiğini belirlemişlerdir.

Bu veriler değerlendirildiğinde, su etkisinde tüm gruplarda hidrasyonun sürdüğü, betona katılan BA'nın %3 katkı oranında kontrol numunesinden daha iyi değer aldığı ve boşluk oluşumunu bir ölçüde engellediği görülmektedir.

4.2.2.1.4. Donma zlme

Beton numuneleri üzerinde yapılan tekrarlı donma-çözülme deneyleri sonunda meydana gelen dayanım kayıpları şekil 4.27'de gösterilmiştir. Kontrol serileri incelendiğinde, ZB0 grubunda 4.15, ZB3 grubunda 4.54, ZB6 grubunda 4.69, ZB9 grubunda 6.86 ve ZB12 grubunda 10.04 değerlerindedir. Değerlere bakıldığında, %3 ve %6 BA katkılı betonların kontrol serisine yakın değerler aldığı görülmüştür. Katkının boşlukların ve kılcal çatlakların azalmasına sebep olması ve zeolit malzemesinin boşluklu olmasına ve fazla su emmesine karşın dondan etkilenmemiş olmasının nedeni, betonda suya tam doygun hale gelmemiş olmasına bağlanabilir.



Şekil 4. 27. Hafif agregalı betonun katkı yüzdesine göre donma çözülme değerleri

ZB12 katkılı betonların %10.04 ile en yüksek dayanım kaybına sahip olduğu, %4.15 ile ZB0 şahit betonunda en düşük don dayanım kaybına sahip olduğu görülmüştür. ZB12 grubu betonların referans betonlarına göre %4.96 daha düşük donma dayanımına sahip olduğu belirlenmiştir.

BA miktarı arttıkça bununla ters orantılı olarak donma- çözülme dayanımının azaldığı görülmüştür. BA ikame miktarı ile donma-çözülme dayanımları arasındaki ilişki grafiği Şekil 4.27’de görülmektedir.

Deney verileri üzerinde yapılan değerlendirmelerde bor atığı katkı oranının artması ile donma-çözülme dayanımında düşük yüzdelerde önemli azalmaların olduğu görülmektedir. Bunun birinci sebebi, katkının boşlukların ve kılcal çatlakların azalmasına sebep olması, ikinci sebep olarak ta kullandığımız zeolit malzemesinin buz ve kar çözücü olarak kullanımı olabilir. Sonuç olarak, zeolit katkılı hafif betona %6’ya kadar katılan bor atığının kullanılmasının donma- çözülme dayanımına olumlu bir etkisi olduğu söylenebilir.

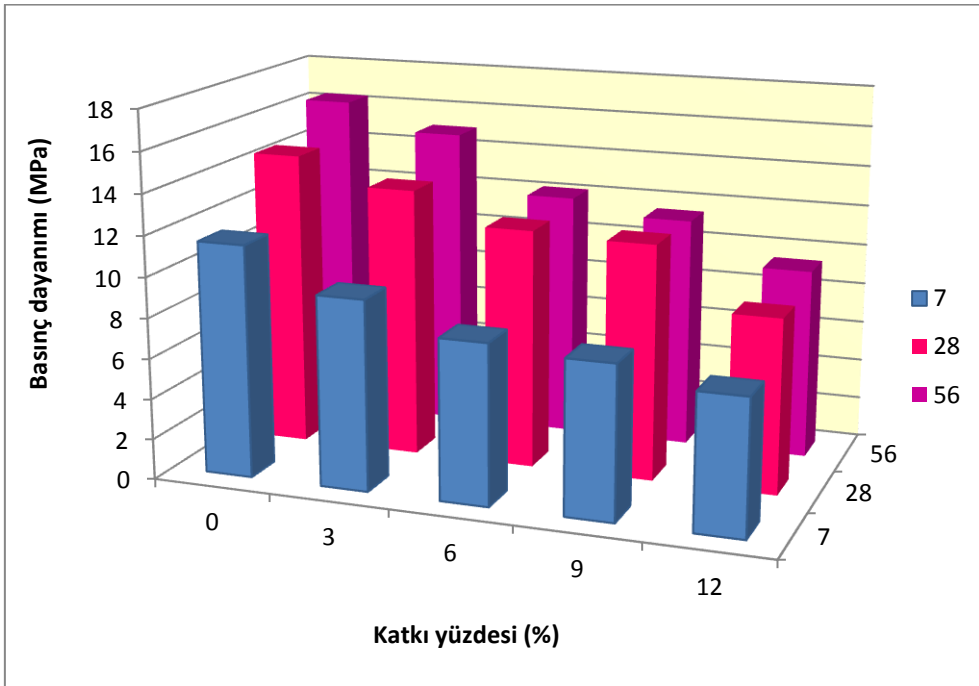
4.2.2.2. Mekanik özelliklerin değerlendirilmesi

Hafif beton numunelerde yapılan basınç dayanımı, dinamik elastisite modülü ve yarma deneyleri ile ilgili değerlendirmeler ve bu özelliklerin katkı yüzdesi ve kür süresi ile değişimi aşağıda açıklanmıştır.

4.2.2.2.1. Basınç dayanımı

Hafif agregalı beton BA katkı yüzdelere (%0, %3, %6, %9 ve %12) ve kür sürelerine (7, 28 ve 56 gün) göre basınç dayanımı Şekil 4.28’de verilmiştir. BA katkı oranı arttıkça basınç dayanımı azalmaktadır. Yirmi sekizinci günde ZB0 grubunda 14.63 MPa, ZB3 grubunda 13.33 MPa, ZB6 grubunda 11.82 MPa, ZB9 grubunda 11.64 MPa ve ZB12 grubunda 8.64 MPa olarak bulunmuştur. Buna göre BA katkılı betonların 28 günlük basınç dayanımı katkısız hafif betona göre ZB3 serisinde % 9, ZB6 serisinde % 19, ZB9 serisinde % 22 ve ZB12 serisinde % 41 daha düşüktür. Elli altıncı günde ZB0 grubunda 16.35 MPa ve ZB12 grubunda 9.43 MPa arasında değişmiştir. Elli altıncı günlük basınç dayanımı değerlerine göre BA katkılı betonların 56 günlük basınç dayanımı katkısız betona göre ZB3 serisinde % 8, ZB6 serisinde % 26, ZB9 serisinde % 28 ve ZB12 serisinde % 0.42 daha düşüktür.

Katkı yüzdelere incelediğimiz, 7 günlük dayanıma göre ZB0 grubunda 28 günde dayanım değeri %20, 56 günde dayanım değeri %63; ZB3 grubunda 28 günde dayanım değeri %3, 56 günde dayanım değeri %46; ZB6 grubunda 28 günde dayanım değeri %1, 56 günde dayanım değeri %61; ZB9 grubunda 28 günde dayanım değeri %1, 56 günde dayanım değeri %33; ZB12 grubunda 28 günde dayanım değeri %5, 56 günde dayanım değeri %37 oranında artmıştır.



Şekil 4. 28. Hafif agregalı betonun katkı yüzdesine ve kür süresine göre basınç dayanımı

Basınç dayanımının BA katkılı ve katkısız hafif betonlarda 56. güne kadar arttığı görülmüştür. Bu veriler değerlendirildiğinde, su etkisinde tüm gruplarda hidrasyonun sürdüğü, betona katılan BA'nın %3 katkı oranında kontrol numunesine yakın değer aldığı ve boşluk oluşumunu bir ölçüde engellediği görülmektedir.

Çizelge 4. 14. Hafif agregalı betonun varyans analiz tablosu

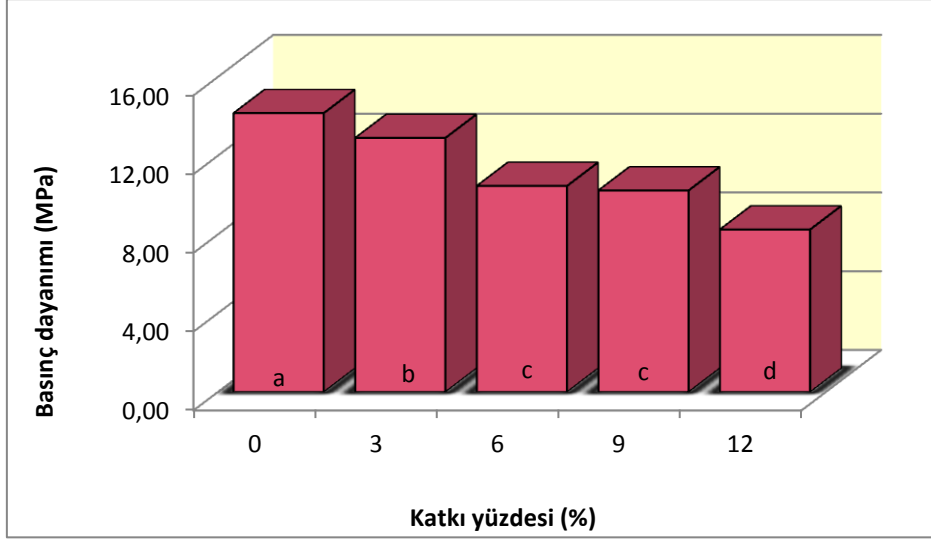
Varyasyon Kaynağı	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	Hesaplanan F	Tablo Değeri	
					%5	%1
Kür	2	161.461	80.731	123.090**	3.320	5.390
Katkı	4	196.764	49.191	75.002**	2.690	4.020
Kür x katkı	8	15.544	1.943	2.963*	2.270	3.170
HATA	30	19.676	0.656			
Genel	44	393.445	8.942			

*: % 5 düzeyinde önemli, **: % 1 düzeyinde önemli, ns: Önemsiz

Basınç dayanımı değerleriyle yapılan varyans analiz sonuçlarına göre kür süresi, katkı yüzdesi istatistiki olarak % 1 ve kür x katkı yüzdesi (KK) interaksyonu %5 düzeyinde önemli bulunmuştur.

Çizelge 4. 15. Hafif agregalı betonun ortalama tablosu

KÜR (gün)	KATKI (%)					Ortalama
	0	3	6	9	12	
7	11.49 d	9.40 e	7.92 fg	7.57 fg	6.68 g	8.61 c
28	14.63 b	13.33 bc	11.82 d	11.64 d	8.64 ef	11.89 b
56	16.35 a	15.02 a	12.18 cd	11.48 d	9.43 e	13.09 a
Ortalama	14.16 a	12.90 b	10.46 c	10.23 c	8.25 d	11.20
LSD (P≤005)		Kür: 0.604	Katkı: 0.780	Kür x katkı: 1.350		



Şekil 4. 29. Hafif agregalı betonun katkı yüzdesine göre ortalama basınç dayanımları

Kür süresinin ortalamaları incelendiğinde, en yüksek basınç dayanımı 13.09 MPa ile 56 günlük uygulamadan elde edilmiştir. Yedi günlük kür uygulaması ise en düşük basınç dayanıma (8.61 MPa) sahip olmuştur. Çizelge 4.15’de görüldüğü gibi 56 günlük kür süresinin dayanım değerinin 7 günlük kürün dayanım değerinden %34 oranında daha yüksek değer aldığı görülmektedir. Kür süreleri arasında gerçekleştirilen Duncan çoklu karşılaştırma testi sonuçlarına göre; beton basınç dayanımı bakımından; beton türü 7. ve 28. gündeki betonların istatistiksel anlamda birbirinden farklı olmadığı ancak 56. gündeki betonların (7. ve 28.) betonlardan farklı olduğu görülmüştür (Çizelge 4.15).

Katkı yüzdeleri yönünden değerlendirildiğinde; basınç dayanımının 8.25 - 14.16 MPa arasında değiştiği görülmektedir. En yüksek basınç dayanımı %0 katkı oranından elde edilmiştir. En düşük basınç dayanımı ise, %12’lik katkı yüzdesinde belirlenmiştir. Katkı yüzdeleri arasında gerçekleştirilen Duncan çoklu karşılaştırma testi sonuçlarına göre; %9, %12 katkı yüzdelerinde betonların istatistiksel anlamda birbirinden farklı olmadığı, %3 ve %6 yüzdelerinin de birbirinden farklı olmadığı ve %0 yüzdesinin diğer iki gruptan farklı olduğu Şekil 3.29’da görülmüştür

Kür x katkı yüzdesi iterasyonunda, basınç dayanımının 6.67-16.35 MPa arasında değiştiği belirlenmiştir. En yüksek basınç dayanımı, 56 günlük kür uygulamasının %0 katkı yüzdesinden elde edilmiştir. Yedi günlük kür uygulamasının %12’lik katkı yüzdesi ise, en düşük basınç dayanımına sahip olmuş, bunu 8.64 MPa ile 28 günlük kür uygulamasının %12’lik katkı yüzdesi izlemiştir.

Gerçekleştirilen Duncan testi sonuçlarına göre basınç dayanımı değerleri bakımından; 7 günlük ve 28 günlük kür sürelerinin birbirinden farklı olmadığı, kür süreleri içinde 56 günlük kürün en büyük basınç dayanımına sahip olduğu, en düşük basınç dayanım değerine 7 günlük kür süresinin sahip olduğunu, 56 günlük kür süresinin dayanım değerinin 7 günlük kürün dayanım değerinden %34 oranında daha yüksek değer aldığı görülmektedir.

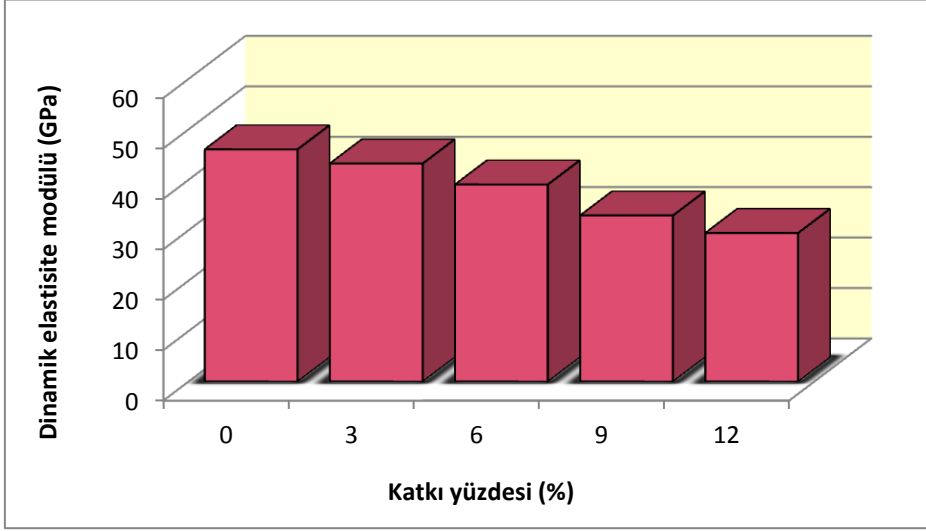
Basınç dayanımının birim ağırlık ile arasındaki ilişki hafif betonlar üzerine daha önce yapılan çalışmalarda elde edilmiştir (Şişman ve ark.2008, Turgutalp ve Örüng 1992, Ünal ve Uygunoğlu 2007, Yasar ve ark. 2003). Birim ağırlığın azalması karışıma katılan katkının özgül ağırlıklarının oldukça düşük olmasından ve beton içerisindeki boşluk oranını azaltmasından kaynaklanmaktadır. Beton içerisindeki boşluk oranının artması ise basınç dayanımının düşmesine neden olmaktadır.

4.2.2.2.2. Dinamik elastisite modülü

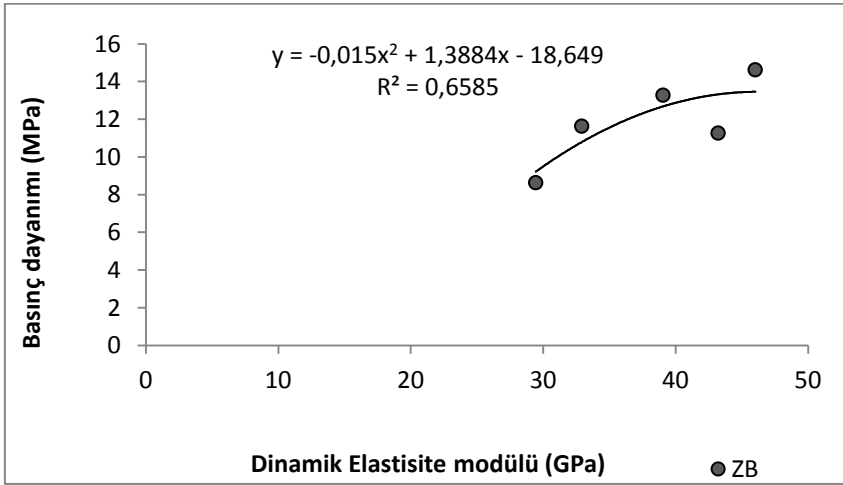
Dinamik elastisite modülü (Ed), bu çalışmadaki deneysel verilerden ve ASTM C 597 (2002) ve BS 1881 Part 203'de (1986) verilen ses geçiş hızı, birim ağırlığına göre hesaplanmıştır.

Hafif betonun kontrol serileri (28. gün) incelendiğinde; dinamik elastisite modülü, başlangıçta ZB0 grubunda 46.02 GPa, ZB3 grubunda 43.22 GPa, ZB6 grubunda 39.06 GPa, ZB9 grubunda 32.92, ZB12 grubunda 29.45 değerlerindedir. Buna göre bor katkılı betonların başlangıçtaki dinamik elastisite modülü bor katkısızına göre ZB3 grubunda yaklaşık 0.06, ZB6 grubunda 0.15, ZB9 grubunda 0.28, ZB12 grubunda 0.36 daha düşüktür, bor atığı oranı arttıkça dinamik elastisite modülü azalmaktadır.

Üretilen numunelerin ses geçiş sürelerine ve birim ağırlıklarına bağlı olarak hesaplanan dinamik elastisite modülü değerleri katkı yüzdesine göre Şekil 4.30'da verilmiştir. Hesaplanan dinamik elastisite modülleri 25.87-53.19 GPa arasında değişim göstermektedir. En yüksek dinamik elastisite modülü 46.02 GPa ile %0 katkı oranında elde edilmiştir. Yüzde on iki katkı oranlı numunelerde 29.45 MPa değeri ile ise en düşük dinamik elastisite modülüne sahip olmuştur. Betonda kullanılan bor atığı katkı yüzdesinin artması ile dinamik elastisite modülü değerleri % 51'e ulaşan oranlarda azalma göstermiştir. Bu azalmanın nedeni, bor atığı katkılı betonlarda boşluk oranını arttırması ya da kullandığımız zeolit malzemesinin dayanımının düşük olması ile açıklanabilir.



Şekil 4. 30. Hafif agregalı betonun dinamik elastisite modülü- katkı yüzdesi ilişkisi



Şekil 4. 31. Hafif agregalı betonun dinamik elastisite modülü-basınç dayanımı ilişkisi

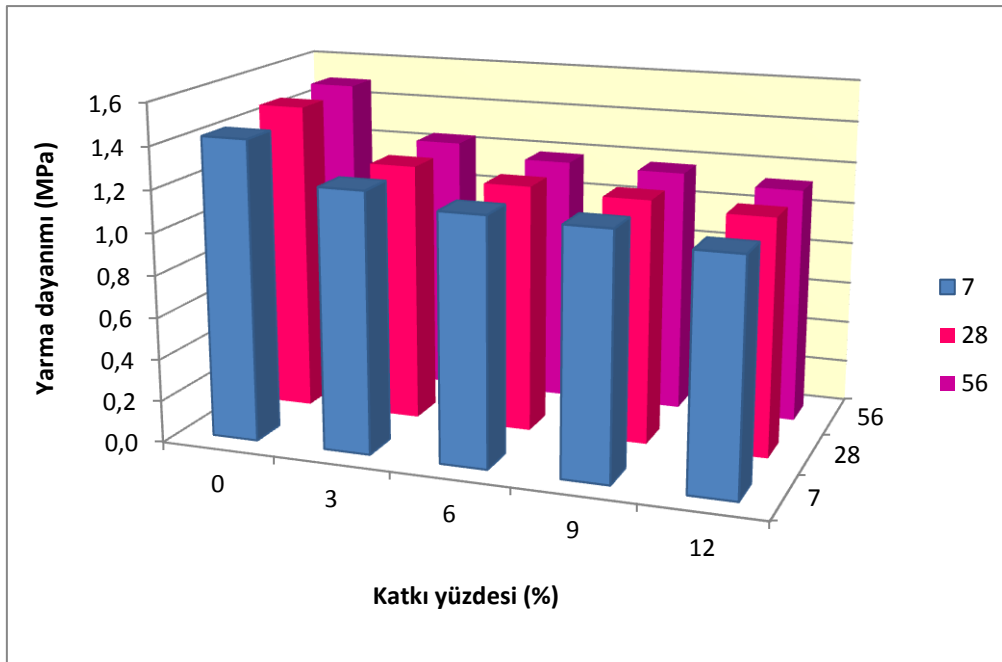
Basınç dayanımı ile elastisite modülü arasındaki ilişki ise Şekil 4.31’de görülmektedir. Yapılan regresyon analizi sonucunda bu deney çıktılarına uygun eğri çizilerek bu eğriye ait regresyon katsayısı (R^2) 0.66 olarak belirlenmiştir.

Serilerin ses geçiş hızlarından elde edilen dinamik elastisite modülleri ile basınç dayanımları arasında regresyon analizi yapılarak, iki değer arasında bir korelasyon olduğu belirlenmiştir.

Bu veriler değerlendirildiğinde, başlangıçta en büyük dinamik elastisite modülünün bor katkısız ZB0 grubunda olduğu ve bor atığı ilavesi ile dinamik elastisite modülünün az da olsa azaldığı görülmektedir.

4.2.2.2.3. Yarmada çekme dayanımı

Hafif beton, BA katkı yüzdelere (%0, %3, %6, %9 ve %12) ve kür süresine (7,28 ve 56 gün) göre yarmada çekme dayanımı Şekil 4.32’de verilmiştir. Hafif beton serileri incelendiğinde 7. günde ZB0 grubunda 1.43 MPa, ZB3 grubunda 1.23 MPa, ZB6 grubunda 1.17 MPa, ZB9 grubunda 1.16 MPa ve ZB12 grubunda 1.09 MPa olarak bulunmuştur. 28. günde ZB0 grubunda 1.48 MPa, ZB3 grubunda 1.23 MPa, ZB6 grubunda 1.18 MPa, ZB9 grubunda 1.16 MPa ve ZB12 grubunda 1.12 MPa olarak bulunmuştur. Elli altıncı günde ZB0 grubunda 1.50 MPa, ZB3 grubunda 1.24 MPa, ZB6 grubunda 1.18 MPa, ZB9 grubunda 1.17 MPa ve ZB12 grubunda 1.13 MPa olarak bulunmuştur.



Şekil 4. 32. Hafif agregalı betonun katkı yüzdesi ve kür süresine göre yarma dayanım değerleri

Şekil 4.32 incelendiğinde yarmada çekme dayanımının bor atığı katkılı ve katkısız tüm betonlarda 56. güne kadar arttığı görülmüştür. Yedi günlük dayanımlarda kontrol betonunun dayanımına göre ZB12 dışında birbirine yakın değerler almıştır. Bor atığı katkılı betonlarda en yüksek dayanımı 1.50 ile ZB3, en düşük dayanımı 1.09 ile ZB12 göstermiştir. Bor atığı

katkılı betonların yarmada dayanımları, basınç dayanımında olduğu gibi katkı oranı arttıkça azalmaktadır. ZB0 ile ZB12 arasında yüzde 16 azalma görülmüştür.

Yirmi sekiz günlük dayanımlarda, 7 günlük dayanımlara göre yarmada çekme dayanımı artış göstermiştir. Bu yaşta da, katkı oranı arttıkça bor atığı katkıli betonların dayanımları azalmaktadır. BA katkıli betonlarda referans betonuna en yakın dayanımı 1.23 ile B3, en düşük dayanımı 1.12 ile B12 göstermiştir.

Çizelge 4. 16. Hafif agregalı betonun varyans analiz tablosu

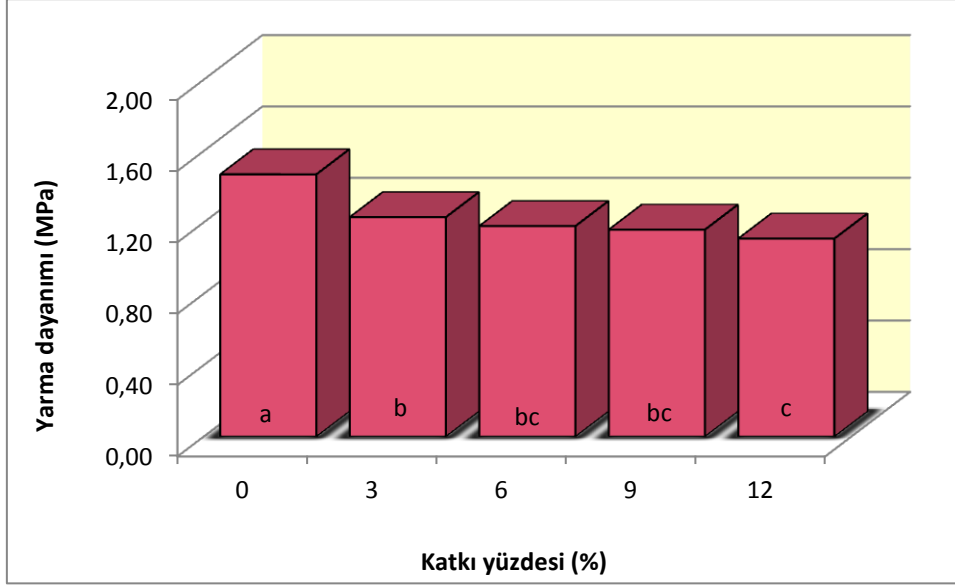
Varyasyon Kaynağı	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	Hesaplanan F	Tablo Değeri	
					%5	%1
Kür	2	0.008	0.004	0.411öd	3.320	5.390
Katkı	4	0.722	0.181	17.829**	2.690	4.020
Kür x katkı	8	0.022	0.003	0.269öd	2.270	3.170
HATA	30	0.304	0.010			
Genel	44	1.056	0.024			

*: % 5 düzeyinde önemli, **: % 1 düzeyinde önemli, öd: Önemsiz

Yarmada çekme dayanımı değerleriyle yapılan varyans analiz sonuçlarına göre katkı yüzdesi istatistiki olarak % 1 düzeyinde önemli, kür süresi ve kür x katkı yüzdesi (KK) interaksiyonu istatistiki olarak önemsiz bulunmuştur (Çizelge 4.17).

Çizelge 4. 17. Hafif agregalı betonun ortalama tablosu

KÜR gün	KATKI (%)					Ortalama
	0	3	6	9	12	
7	1.43	1.23	1.17	1.16	1.09	1.22
28	1.48	1.23	1.18	1.16	1.12	1.25
56	1.50	1.24	1.18	1.17	1.11	1.23
Ortalama	1.47 a	1.23 b	1.18 bc	1.16 bc	1.11 c	1.23
LSD (P<005)	Kür: - Katkı: 0.097 Kür x katkı: -					



Şekil 4. 33. Hafif agregalı betonun katkı yüzdesine göre ortalama yarma dayanımları

Kür süresinin ortalamaları incelendiğinde, en yüksek yarmada çekme dayanımı 1.98 MPa ile 56 günlük uygulamadan elde edilmiştir. Yedi günlük kür uygulaması ise 1.76 MPa değeriyle en düşük yarma dayanıma sahip olmuştur. Çizelge 4.16’de görüldüğü gibi 56 günlük kür süresinin dayanım değerinin 7 günlük kürün dayanım değerinden %34.5 oranında daha yüksek değer aldığı görülmektedir. Kür süreleri arasında gerçekleştirilen Duncan çoklu karşılaştırma testi sonuçlarına göre; beton basınç dayanımı bakımından; beton türü 28. ve 56. gündeki betonların birbirinden farklı olmadığı ancak 7. gündeki betonların 28 ve 56 günden farklı olarak sınıflandırıldığı Çizelge 4.17’de görülmüştür.

Kür süreleri arasında gerçekleştirilen Duncan çoklu karşılaştırma testi sonuçlarına göre; beton yarmada çekme dayanımı 1.22 - 1.25 arasında değerler almaktadır. Kür süresi yüzdesinin istatistiki olarak önemsiz bulunmasından dolayı sınıflandırılmamıştır.

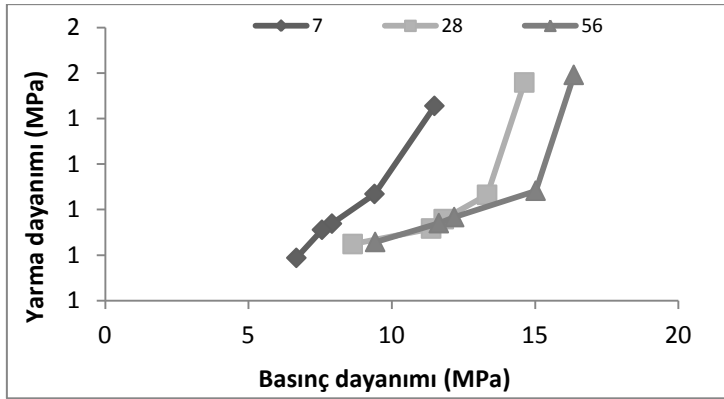
Katkı yüzdeleri arasında gerçekleştirilen Duncan çoklu karşılaştırma testi sonuçlarına göre; beton yarmada çekme dayanımı bakımından; katkı yüzdesi faktörünün bir düzeyinde istatistik olarak, %0 katkı a olarak, %3 katkı b olarak, %6 ve %9 katkı oranları bc olarak ve %12 katkı yüzdesi de c olarak sınıflandırılmıştır. %12 katkılı betonların 1.11 MPa ortalama ile en düşük beton basınç dayanımına sahip olduğu, %0 yüzdesindeki betonların 1.47 MPa ortalama ile en yüksek yarmada çekme dayanımına sahip olduğu belirlenmiştir.

Bor atığı katkılı numunelerin 7 gündeki basınç dayanımları bütün serilerde kontrol örneğinden daha düşük değerler almıştır. Ancak 56 günlük dayanımlarda yarma dayanımları

kontrol örneğine daha yakın değer almıştır. Bu sonuç, katkılı betonların zamanla dayanımlarının daha yüksek oranda artacağını göstermektedir.

4.2.2.2.4. Basınç dayanımı ve yarmada çekme dayanımı arasındaki ilişki

Araştırma kapsamındaki numunelerin basınç dayanımları ile yarma dayanımları arasında bir ilişki kurulmuş ve Şekil 4.34'te gösterilmiştir. Elde edilen ilişki sonucunda hafif agregalı beton ile üretilen numunelerin 7 günlüklerinde korelasyon katsayısı 0.97, 28 günlüklerinde korelasyon katsayısı 0.69, 56 günlüklerinde korelasyon katsayısı 0.75'dir. Şekilde görüldüğü gibi kür süresine göre basınç dayanımı arttıkça yarmada çekme dayanımı da artmıştır. Fakat yarmada dayanımındaki artış oranı, basınç dayanımına göre daha az olmuştur.



Şekil 4. 34. Hafif agregalı betonun basınç dayanımı ile yarmada çekme dayanımı ilişkisi

Basınç dayanımı ve yarmada çekme dayanımı arasındaki ilişkiyi belirleyebilmek için, deney sonuçlarına lineer regresyon analizi yapılmıştır. Lineer regresyon analizinin grafiği Şekil 4.34'de verilmiştir. Bu grafiklerde amprik denklem için en uygun eğri çizilmiştir. Bu denklemlerde; x= Basınç dayanımı, y=yarmada çekme dayanımını ifade etmektedir.

$$y_7 = 0.0672x_7 + 0.6376 \quad R^2 = 0.97 \quad 4.7$$

$$y_{28} = 0.0525x_{28} + 0.6073 \quad R^2 = 0.69 \quad 4.8$$

$$y_{56} = 0.0458x_{56} + 0.6519 \quad R^2 = 0.75 \quad 4.9$$

4.2.2.2.5. Basınç dayanımı ve ses geçiş hızı arasındaki ilişki

Numunelerin basınç dayanımı ile ses geçiş hızı arasında Şekil 4.35'te görüldüğü gibi, ses geçiş hızı ile basınç dayanımı arasındaki ilişki lineerdir. Basınç dayanımı ve ses geçiş hızı arasındaki ilişkiyi belirleyebilmek için, deney sonuçlarına lineer regresyon analizi yapılmıştır. Lineer regresyon analizinin grafiği Şekil 4.35'te verilmiştir. Bu grafiklerde amprik denklem için en uygun eğri çizilmiştir.

Bu denklemlerde; y = basınç dayanımı, x = ses geçiş hızını ifade etmektedir.

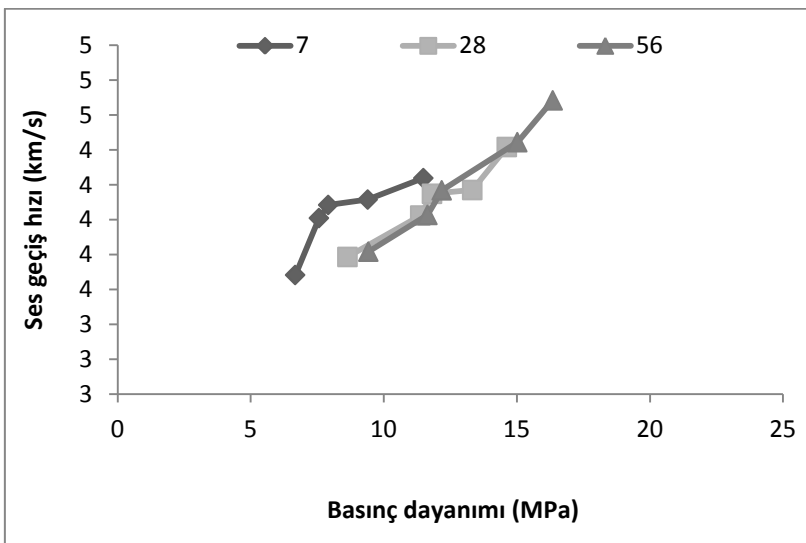
$$y_7 = 0.1201x_7 - 2.3701 \quad R^2=0.90 \quad 4.10$$

$$y_{28} = 0.133x_{28} - 2.3236 \quad R^2=0.92 \quad 4.11$$

$$y_{56} = 0.1064x_{56} - 2.1312 \quad R^2=0.995 \quad 4.12$$

Her iki beton türünde numunelerin yarmada çekme dayanımı ile basınç dayanımlarının birlikte verildiği Şekil 4.35'te ise genel olarak eğrisel bir ilişki kurulmuş ve bu ilişkiye ait korelasyon katsayısı 0.90 olmuştur. Her iki kür durumunu ifade etmesi bakımından 0.90 korelasyon katsayısı oldukça tatminkar bulunmuştur.

Numunelerin basınç dayanımı ile ses geçiş hızı arasında Şekil 4.35'te görüldüğü gibi, ses geçiş hızı ile basınç dayanımı arasındaki ilişki lineerdir.

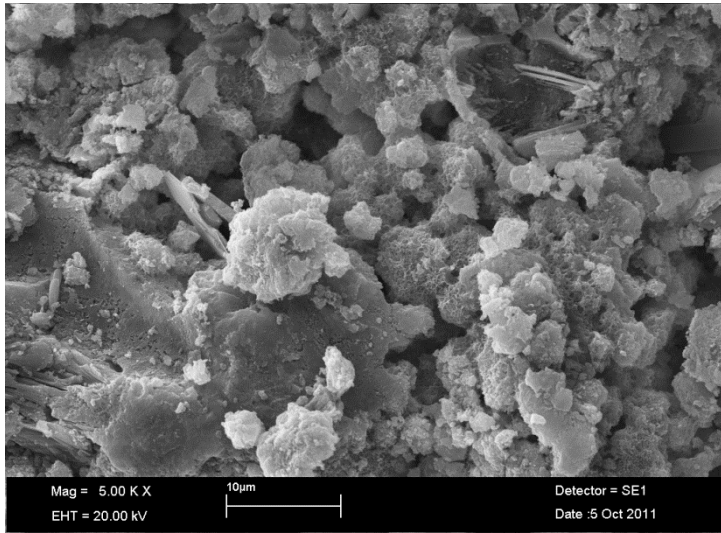


Şekil 4. 35. Hafif agregalı betonun basınç dayanımı- ses geçiş hızı ilişkisi

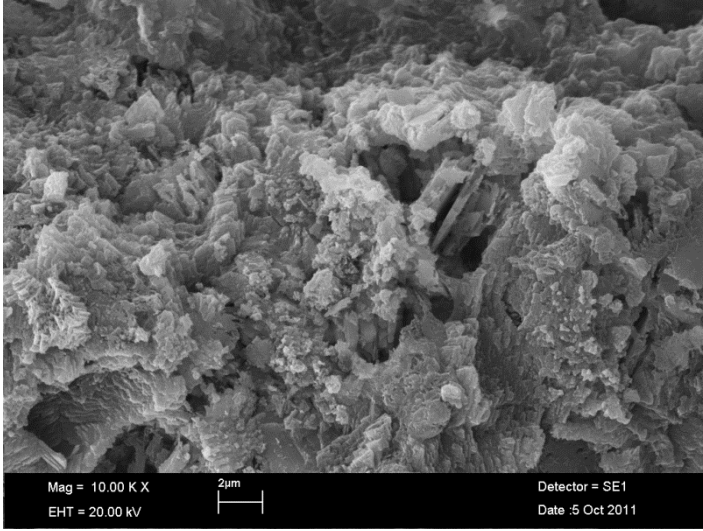
4.2.2.3. SEM analizi sonuçları

Basınç dayanımı deneyi sonrasında kırılan küp numunelerinden alınan numuneler SEM analizi için kullanılmıştır. SEM görüntüleri alınırken beton içindeki BA ile çimento ara yüzeyinin değerlendirilmesi yapılmıştır. Deney numunelerinin 28 günlük SEM görüntüsünde C-H fazlarının kristallendiği, C-H fazlarının kaybolduğu ve yerini C-S-H jellerine bıraktığı görülmüştür. Şekillerden de görüldüğü gibi agregalar agregamatriks ara yüzeyinde zayıf bir bağ oluşmuştur. Agregamatriks ara yüzeyinin betonun dayanımı üzerine büyük bir etkisi vardır.

Zeolit kullanılarak üretilen hafif agregalı betonların mikroyapısı betonun SEM görüntüsünde incelenmiştir. Agregatanesiyle çimento bağının agreganın çevresinin çok iyi bir biçimde hidrasyon ürünleri tarafından sarıldığı görülmektedir. Hidrate olmuş zeolit taneleriyle agregat yüzeyine bağlanmış CSH yapısı belirgin bir yoğunluğa sahiptir. Bor atığı katkı hafif betonların mikro yapısının referans betonuyla karşılaştırıldığında daha boşluksuz ve sıkı olduğu görülmektedir.



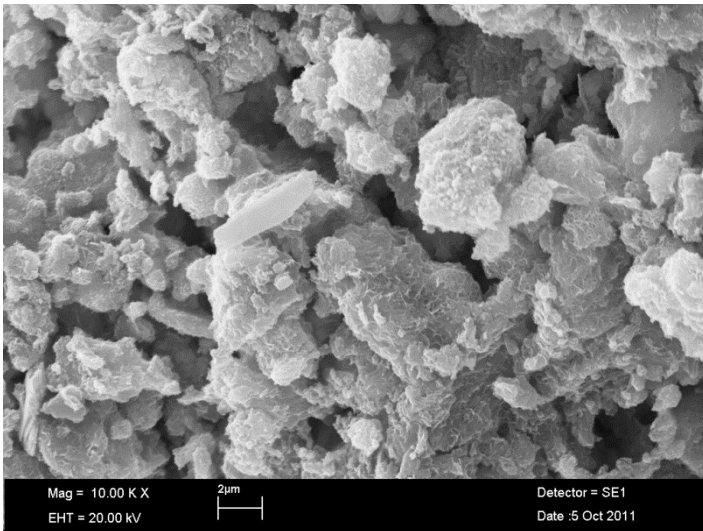
Şekil 4. 36. Hafif agregalı beton numunesine ait SEM görüntüsü



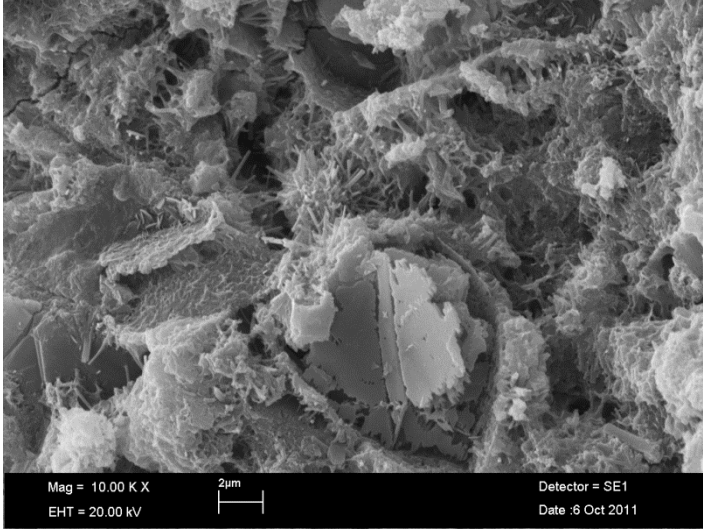
Şekil 4. 37. ZB%3 katkılı hafif beton numunesine ait SEM görüntüsü



Şekil 4. 38. ZB%6 katkılı hafif beton numunesine ait SEM görüntüsü



Şekil 4. 39. ZB%9 katkılı hafif beton numunesine ait SEM görüntüsü



Şekil 4. 40. ZB%12 katkılı hafif beton numunesine ait SEM görüntüsü

Mikroyapı incelendiğinde kristallerin tam olarak mikroyapıyı kaplamadıkları görülmüştür. Bu sebeple kompozit yapı içinde mikro çatlakların ortaya çıkmasına neden olmuştur. Mekanik deney sonuçları dikkate alındığında katkının beton yapısında etrenjit oluşumunu kısmen de olsa engellediği görülmüştür.

Bor atığı katkısının ortama girmesi ile C_3S ve C_3A azalmış ve daha az CH açığa çıkmış dolayısı ile erken dayanım azalmıştır. Ancak katılan katkı CH'yı zamanla bağlayarak yeni (puzolanik) C-S-H jeline dönüştürecektir. Dolayısıyla zamana bağlı olarak dayanım ve dayanıklılık da artacaktır.

4.3. Maliyet Analizi

Bağlayıcı Malzeme Maliyeti Analizi: Referans betonuna dayanım açısından eşit olan katkılı betonların bağlayıcı (B=çimento+BA) maliyeti ile referans betonunun bağlayıcı (çimento) maliyeti çıkarılarak optimizasyon için değerler karşılaştırılmıştır. Çizelge 4.18'da bu yılın birim fiyat listesi verilmiştir.

Çizelge 4. 18. Malzeme birim fiyat listesi

Malzeme	Birim Fiyatı
Çimento	2.497 TL/kg
Kırmataş	19.10 TL/m ³
Doğal Kum	10.23 TL/m ³
Su	3.8 TL/m ³
Bor atığı	A

Bulunan bağlayıcı maliyetleri ve % kârları Çizelge 4.19’da verilmiştir. BA’lı katkılı betonun maliyetinin değerlendirilmesi kontrol betonlarına göre yapılmıştır. Çizelge 4.19’da görüldüğü gibi çimentoda da 300 dozajlı betona dayanımı açısından denk BA betonlarında %3 BA kullanımı ile en iyi sonuç elde edilmiştir.

Çizelge 4. 19. Beton maliyetleri ve % kâr miktarları

ÜRETİ M	KAT KI%	HEDEFİ VEREN BAĞLAYICI		
		MALİYET	KAR	A=1
C300	0	749	-	-
C300	3	726+9*A	21-9*A	13
C300	6	704+18*A	45-18*A	27
C300	9	683+27*A	68-27*A	41
C300	12	659+36*A	90-36*A	54

4.3.1. Nakliye maliyetleri ve ekonomik taşıma uzaklığı

Nakliye maliyetleri, doğal ve atık malzemelerde aynı eşitlik kullanılacağı için en önemli etken taşıma uzaklığıdır. Taşıma maliyeti 10 km’ye kadar mesafelerde kullanılan aşağıdaki eşitlikteki köklü ifade nedeniyle, uzaklığın üslü formu ile tanımlanmaktadır. On km’den daha uzak taşımalar için maliyet, uzaklık ile doğrusal ilişki içindedir (Yıldız 2008).

Doğal agregadan imal edilen 1 ton temel malzemesinin nakliye hariç birim maliyeti 29.33 TL/dir. Bor atıklarının imal edilen 1 ton temel malzemenin nakliye hariç birim maliyeti de 15.04 TL/dir

1 ton temel malzemesi için fiyat farkı: $29.33 - 15.04 = 10.87$ TL olur.

İki malzeme arasındaki bu birim fiyat farkının taşıma uzaklığı olarak kaç kilometreye karşılık geldiğini hesap edilirse:

Öncelikle yukarıda bulunan nakliye maliyetine %25 yüklenici karını ve yükleme boşaltma bedeli eklemelidir. Yükleme-boşaltma bedeli olarak, Bayındırlık ve İskan Bakanlığı 2010 yılı Birim Fiyat Analizlerinden 09.005/1 No'lu poz "Moloz, blokaj, kırma taş, balast, kaldırım taşının taşıtlara yükleme ve boşaltılması" kullanılmaktadır.

09.005/1 Yükleme-boşaltma maliyeti (2010 Yılı) : 4.26 TL/m³ dür.

Bu değer "ton" cinsinden ifade edilirse $4.26/1.35 = 3.15$ TL/t olur.

(Bor atıklarının birim ağırlığı 1.35 t/ m³)

Bu durumda yeni taşıma formülü;

$F = (0.084 * M + 1.2) * 1.25 + 3.15$ şeklini alır.

Buradaki F taşıma maliyetini, 1 ton temel malzemesi için bulunan fiyat farkına eşitlenerek, M taşıma uzaklığı hesaplanabilir (Yıldız 2008).

$F = (0.084 * M + 1.2) * 1.25 + 3.15 = 10.87$ TL/t

$M = 59.24$ km olarak bulunur.

Taşıma uzaklığına bor atıkları ve doğal agrega ve kum için başa-baş mesafesi diyebiliriz. Diğer bir anlatımla, atık sahasına 59.24 km uzaklıktaki bir şantiye için, hemen şantiye yanında bir taş ocağı olsa dahi, 69.24 km uzaklıktan atıkları getirerek kullanmak, doğal malzeme kullanımı ile aynı maliyeti vermektedir. Her şantiyesinin yanı başında bir taş ocağı olamayacağına göre atıkları için ekonomik taşıma uzaklığı ($M_e > 59.24$ km) bu değerinde olacaktır.

59.24 km'lik taşıma uzaklığı için atıklarının toplam birim maliyet ise (nakliye dahil) $15.04 + 10.87 = 25.91$ TL/t olur.

Bu atık malzemeler değerlendirilmeye başlandıktan sonra fabrika sahipleri ücretlendirme getirirse maliyet yükselecektir. Bunun yanında saha dolgu maliyetleri ise malzeme kullanıldığı takdirde sıfıra inecektir.

Bor atıklarının maliyet analizinde; atıkların Portland çimentosu yerine kullanıldığında en az 10 kat daha fazla tasarruf sağlayacağı yapılan hesaplamalar sonucu ortaya konmuştur. Bor atıkları ise birim maliyette ton başına 10.87 TL tasarruflu olduğu görünmektedir. Bu da 59.24 km uzaklıkta bir fabrikadan atıkları almak yakın bir ocak şantiyesinden malzeme almaktan daha uygun olduğunu göstermektedir. Atıkların değerlendirilmesi göz önünde bulundurulduğunda bu mesafe daha da artabilecektir.

5. TARTIŞMA VE SONUÇLAR

Bor ve zeolit gibi zengin yer altı kaynaklarına sahip olduğumuz minerallerin beton üretiminde değerlendirilmesi ve betonun dayanım ve dayanıklılığı üzerindeki etkilerinin araştırıldığı bu çalışmada, katkı yüzdelerinin ve kür sürelerinin etkilerini görmek için deneyler yapılmış, çalışmadan elde edilen sonuçlar ve öneriler aşağıda özetlenmiştir.

1. Betonda ses geçiş hızı şahit numunede kür süresine bağlı olarak artmıştır. Şahit numuneye göre %3 ve %6 bor atığı katkı oranlarında ses geçiş hızında artış olmuş, %9 ve %12 katkı oranlarındaki numunelerde 7, 28 ve 56 günlük kür süresince artış görülmemiştir. Normal ve hafif agregalı betonları incelediğimizde, %3 ve %6 katkı oranlı betonların tümünde ses geçiş hızları değerleri Neville'nin (1996) sınıflandırmasına göre iyi betonlar olarak değerlendirilmektedir. Ses geçiş hızı ve basınç dayanımı arasındaki ilişkiye baktığımızda betonda özellikle 56 gün kür edilen numunelerde lineer bir bağıntı olduğu görülmüştür.
2. Su emme verileri değerlendirildiğinde, tüm beton gruplarında hidrasyonun sürdüğü görülmüştür. Normal betonda ve hafif betonda %3 oranında bor atığı katkısının olumlu etki yaptığı ve boşluk oluşumunu bir ölçüde engellediği görülmektedir. Hafif betonda %3 bor atığı katkı oranının referans betonundan daha iyi sonuç alındığı ve diğer katkı yüzdelerinde boşluk oluşumunun ve su emme miktarını arttırdığı belirlenmiştir.
3. Elde edilen beton karışımlarından oluşturulan numuneler 7, 28 ve 56 gün sonunda basınç dayanımı deneylerine tabi tutulmuş ve sonuçlar elde edilmiştir. Bor atık katkılı numunelerde, atık katkı oranı arttıkça basınç dayanımının azaldığı görülmektedir. Burada önemli olan nokta, bor atık katkılı numunelerin 7 ve 28 günlük dayanım değerleri birbirine yakın ve düşük olmasına rağmen 56 günlük dayanım değerleri (%3 ve %6 bor atık katkılı) yüksektir. Numunelerde özellikle 56 günde geçişte bu artış sıçrama şeklinde olmuştur. Bor atığı katkısının puzolanik özelliğinin ilerleyen zaman diliminde ortaya çıkması, erken dayanımların düşük, geç dayanımların yüksek olmasına neden olmaktadır. Hafif betonlarda 28 ve 56 günlük kür süresinde şahit numuneye göre %3 katkının yakın değer aldığı görülmektedir. Diğer yüzde değerlerinde 28 günlük numunelerde dayanımda artış görülürken 28 ve 56 günlük

numunelerde az bir artış görülmektedir. Sonuç olarak betonda bor atığının maksimum % 3 ve %6 oranına kadar betona ilave edilebileceği görülmüştür.

4. Serilerin ses geçiş hızlarından elde edilen dinamik elastisite modülleri ile basınç dayanımları arasında regresyon analizi yapılarak, iki değer arasında iyi bir korelasyon olduğu belirlenmiştir. Bu durumda, yapılan analiz sonucunda elde edilen eğri denklemi kullanılarak, betonlar tahrip edilmeden, sadece dinamik elastisite modülünün bulunması ile basınç dayanımları hesaplanabilir.
5. Betonda yarmada çekme dayanımı bütün katkı oranlarında kür sürelerinde artış devam etmiştir. Şahit numuneler hariç diğer katkı oranlarında yakın değerler almıştır. Hafif betonlarda şahit numunede kür sürelerinde artış sürerken diğer katkı yüzdelerinde 7, 28 ve 56 günlük kür sürelerinde yarmada çekme dayanımı değerleri birbirilerine çok yakındır.
6. Basınç dayanımı ve yarmada çekme dayanımı arasında 56 günlük kür süresinde lineer bir bağıntı olduğu görülmektedir.
7. SEM analizi sonuçlarını incelediğimizde; numunelerin mikro yapılarında çoğunluğu C-S-H jellerinden oluşan hidratasyon ürünleri görülmektedir. Numuneleri üzerinde yapılan uygulamada bağlayıcı özelliği olan ve mikro yapıları doğrular şekilde C-S-H jelleri gibi hidratasyon ürünlerinin varlığı anlaşılmaktadır. Bu durum bize çimento hidratasyonu sırasında oluşan kirecin katkıdaki silis ile puzolanik bir reaksiyon verdiğinin göstermektedir. Mikroyapısı incelendiğinde yapıda ara yüzeye yakın bölgede Ca(OH)_2 kristallerinin varlığı tespit edilmiştir. Ca(OH)_2 kristalleri puzolanlar tarafından bağlanıp puzolanik özellik gösteren ürünler oluşturmaktadırlar.
8. Bor atıklarının betonda %3 katkı yüzdelerdeki kullanımı ile ses geçiş sürelerinden de görüleceği üzere yoğun bir iç yapı elde edilmiştir. Bu durum teorik olarak üretilen malzemeleri durabilite yönünden güçlendirecektir.
9. Yapılan değerlendirmelerde hafif betonda bor atığı katkı oranının artması ile donma-çözülme dayanımında düşük yüzdelerde önemli azalmaların olduğu görülmektedir. Bunun birinci sebebi, katkının boşlukların ve kılcal çatlakların azalmasına sebep olması, ikinci sebep olarak ta kullandığımız zeolit malzemesinin buz ve kar çözücü olarak kullanımı olabilir. Sonuç olarak, zeolit katkılı hafif betona %6'ya kadar katılan bor atığının kullanılmasının donma-çözülme dayanımına olumlu bir etkisi olduğunu söyleyebiliriz.
10. Bor atıklarının maliyet analizinde; atıkların Portland çimentosu yerine kullanıldığında en az 10 kat daha fazla tasarruf sağlayacağı yapılan hesaplamalar sonucu ortaya

konmuştur. Bor atıkları ise birim maliyette ton başına 10,87 TL tasarruflu olduğu görünmektedir. Bu da 59.24 km uzaklıkta bir fabrikadan atıkları almak yakın bir ocak şantiyesinden malzeme almaktan daha uygun olduğunu göstermektedir. Atıkların değerlendirilmesi göz önünde bulundurulduğunda bu mesafe daha da artabilecektir.

11. Bor atığı, beton yapısındaki jips nedeniyle priz geciktirici olarak işlev görmektedir. Özellikle sıcak bölgelerdeki harç ya da beton uygulamalarında teknik ve ekonomik yönden daha kullanılabilir bir yapı malzemesi için bor atığı katkı malzemeler üretilebilir.
12. Yukarıda verilen bilgiler ve elde edilen veriler ışığında, bor atığı betona katkı maddesi olarak değerlendirilebilir. Bu sayede klinkerden sağlanan tasarruf çimento ve beton maliyetini de düşüreceğinden Türk Ekonomisi'ne küçümsenemeyecek ölçüde katkı sağlayacaktır. Bu atıkların çevreye ve canlılara verdiği zararlar da göz önüne alındığında durumun önemi daha da önemli olduğu anlaşılmaktadır.

6. KAYNAKLAR

- Akman S (1987). Yapı Malzemeleri. İTÜ İnşaat Fakültesi Matbaası
- Akbulut H, Gürer C (2006). Atık Mermerlerin Asfalt Kaplamalarda Agrega Olarak Değerlendirilmesi. İMO Teknik Dergi, 261: 3943-3960
- Altun F (2005). Bor. Ulusal Bor Araştırma Enstitüsü, 1: 80, Ankara
- Aitcin P C (1998). High-Performance Concrete. E and Fn Spon, 650 s, London, Newyork
- Alkaya Ş (2010). Hafif Beton Üretiminde Organik Atıkların (Ayçiçeği Sapı) Kullanılabilme Olanakları. Yüksek Lisans Tezi, Namık Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Tekirdağ
- Altinköprü N (2010). Bor Endüstri Atıkları ve Prina Atıklarının Çimento Üretiminde Katkı Maddesi Olarak Değerlendirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kütahya
- Arıoğlu E, Arıoğlu N ve Yılmaz A O (2006). Beton Agregaları, Evrim Yayınevi, İstanbul
- ASTM C597-83 (1991). Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete. Annual Book of ASTM Standards, Vol 04.02, Philadelphia.
- Aydın U (2009). Kolemanit Atığının Beton Dayanımına Olan Etkisinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Mustafa Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Antakya
- Azizi S (2007). Perlit Katkılı Hafif Betonların Mekanik Özellikleri ve Isı Yalıtımı. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul
- Baradan B (1997). Yapı Malzemesi-II. Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları : 174-176, İzmir
- Baradan B, Yazıcı H ve Ün H (2002). Betonarme Yapılarda Kalıcılık (Durabilite). Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, 298, İzmir
- Batar T, Köksal S ve Yersel E (2009). Atık Bor, Atık Kâğıt ve Perlit Katkılı Sıva. Malzemesinin Üretimi ve Karakterizasyonu, Ekoloji 18, 72: 45-53
- Bayar G (2004). Bor Madeni Ve Türkiye İçin Önemi, <http://www.tirebor.com/bor-madenleri-makale/bor-ve-toryum.html>
- Bayca S U, Batar T, Sayın E, Solak O ve Kahraman B (2008). The Influence of Coal Ash and Tincal (Boron Mineral) Additions on The Physical Properties and Microstructures of Ceramic Bodies. Journal of Ceramic Processing Research 9, 2: 118-122
- Beycioğlu A, Başyigit C ve Subaşı S (2008). Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanımı ile Geri Kazanılması ve Çevresel Etkilerinin Azaltılması. Çevre Sorunları Sempozyumu. s: 1386-1394, Kocaeli

- Binici H, Sevinç A H ve Durgun M Y (2010). Barit, Bazaltik Pomza, Kolemanit ve Yüksek Fırın Cürufu Katkılı Betonların Özellikleri. Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Mühendislik Bilimleri Dergisi, 13(1), Kahramanmaraş
- Buluttekin B (2008). Bor Maden Ekonomisi: Türkiye'nin Dünya Bor Piyasasındaki Yeri. 2. Ulusal İktisat Kongresi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İktisat Bölümü, İzmir
- Canpolat F, Yılmaz K, Köse M, Sümer M ve Yurdusev M (2004). Use of Zeolite, Coal Bottom Ash And Fly Ash As Replacement Materials in Cement Production. Cement and concrete research, 2324:1-5
- Çelik Ö (2004). Uçucu Kül, Silis Dumanı ve Atık Çamur Katkılarının Çimento Dayanımlarına Etkileri. Beton 2004 Hazır Beton Kongresi Bildiriler Kitabı
- Chandra S ve Berntsson L (2003). Lightweight Aggregate Concrete. 430p Noyes Publications. U.S.A
- Dayı M (2006). Doğal Ve Yapay Puzolanların Kompoze Çimento Üretiminde Kullanılabilirliği. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara
- Demirboğa R, Gül R ve Örüng İ (2001). Effects of Expanded Perlite Aggregate and Mineral Admixtures on the Compressive Strength of Low-Density Concretes. Cement and Concrete Research. 31: 1627-1632
- Erdoğan E (2006). Çimentoya Bor Katkısı, Uçucu Kül, Yüksek Fırın Cürufu İlavesiyle Özelliklerinin İncelenmesi. Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul
- Erdoğan T Y (2003). Beton, ODTU İnşaat Mühendisliği Matbaası, Ankara
- Erdoğan Y, Zeybek M S ve Demirbaş A (1998). Cement Mixes Containing Colemanit From Concentrator Wastes. Cement Concrete Research 28: 605-609
- Erdoğan Y, Genç H ve Demirbaş A (1994). Partially-Refined Chemical By Product Gypsums As Cement Additives. Cement and Concrete Research 24: 601-604
- Erdoğan Y, Genç H ve Demirbaş A (1992). Utilization of Borogypsum For Cement. Cement and Concrete Research 22: 841-844
- Erkal İ F (1990). Etibank Emet Kolemanit İşletmesi Kaba Atıklarının Değerlendirilme Olanaklarının Araştırılması, Harran Üniversitesi Yüksek Lisans Tezi, Ankara
- Eti maden (2010). Dünyadaki Bor Rezervleri. <http://www.etimaden.gov.tr> (erişim tarihi, 11.05.2011)
- Felekoğlu B ve Baradan B (2004). Kendiliğinden Yerleşen Betonların Mekanik Özellikleri. Beton 2004 Kongresi, İstanbul

- Fındık A (2007). Kolemanit Konsantratör Atığının Beton ve Harç Numunelerinin Bazı Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Mustafa Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Hatay
- Haque M N, Al-Khaiata H ve Kayalı O (2004). Strength and Durability of Lightweight Concrete. Cement & Concrete Composites. Elsevier Ltd. Number 26: 307-314
- Karaüç E (2003). Uçucu Kül ve Zeolitin Kendiliğinden Yerleşen Betonlara Etkileri, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
- Karaman S (2007). Tarımsal Yapılarda Kullanılan Hafif İnşaat Malzemeleri. Harran Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi, 11(1/2): 63-69
- Kavas ve Emrullahoğlu (2005). Seydişehir Kırmızı Çamur ve Kırka Bor Atıklarının Endüstriyel Hammadde Olarak Kullanımı. I. Batı Hammadde Kaynakları Sempozyumu, TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası, 216-225, İzmir
- Kaya G ve Turan S (2004). Yüksek Fırın Cürufunun Seramik Sektöründe Katma Değeri Yüksek Ürünlerin Elde Edilmesinde Değerlendirilmesi. Mühendis Ve Makine - Cilt: 45
- Kılınç C (2007). Katkı Dozajı ve Taze Beton Sıcaklığının Kendiliğinden Yerleşen Beton Özelliklerine Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul
- Kocataşkın F (1991). Betonun Dünü Bugünü Yarını. 2. Ulusal Beton Kongresi, Yüksek Dayanımlı Beton, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası S:23-42
- Konuk H (2003). Hafif Agregalı Betonların Mekanik Özellikleri ve Isı Yalıtımı. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul
- Kula İ (2000). Bor Endüstri Atıklarının Çimento Üretiminde Katkı Maddesi Olarak Değerlendirilmesi. Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya
- Kula İ, Olgun A, Erdoğan Y ve Sevinç V (2001). Effects of Colemanite Waste, Coal Bottom Ash and Fly Ash on The Properties of Cement. Cement and Concrete Research 31: 491-494
- Kula I, Olgun A, Sevinc V ve Erdogan Y (2002). An Investigation on The Use of Tincal Ore Waste, Fly Ash and Coal Bottom Ash as Portland Cement Replacement Materials. Cement and Concrete Research 32: 227-232
- Mesci (2007). Bakır Endüstrisi Flotasyon Atıkları ve Zeolitlerin Beton Üretiminde Kullanılabilirliğinin Araştırılması. Doktora Tezi, On Dokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Samsun
- Neville A M (1996). Properties of Concrete. John Wiley&Sons Inc, New York
- Okucu A (1998). Bigadiç ve Turnatepe (Balıkesir) Yörelerindeki Zeolitik ve Perlitik Tüflerin Puzolanik Özellikleri. Doktora Tezi, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir, 30-60

- Olgun A ve Erdoğan Y (2001). Etibor Bandırma Borik Asit İşletmesi Atıklarının Seramik Endüstrisinde Kullanımı. Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi. Sayı 2 Kütahya: 58-61
- Onaran K (2003). Malzeme Bilimi, Bilim Teknik Yayınevi, İstanbul
- Özmal F, Erdoğan Y, Olgun A, Atar N, Kula İ ve Kalfa O (2005). Bor Endüstri Atıkları, Uçucu Kül ve Alünüt İçeren Çimentoların Fiziksel ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi. I. Ulusal Bor Bildirileri Kitabı
- Özşahin B (2011). Yalıtım Kalıplı Donatılı Beton Duvarlı Binaların Yapımsal ve Ekonomik Uygulanabilirliği. Doktora Tezi. Trakya Üniversitesi Mimarlık Ana Bilim Dalı, Edirne
- Poon C S, Lam L, Kou SC ve Lin ZS (1999). A Study on The Hydration Rate of Natural Zeolite Blended Cement Pastes. Construction Building Material, 13: 427-432
- Saka N (2001). Endüstriyel Atıkların Çöp Depolama Alanı Dizaynında Geçirimsizlik Malzemesi Olarak Değerlendirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi Fen Bilimler Enstitüsü, Eskişehir
- Sancak E (2005). Silis Dumanı Katkılı Bims Betonların Özellikleri, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara
- Saran G (2007). Öğütülmüş Granüle Yüksek Fırın Cürufunun Betonun Durabilite Özelliklerine Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul
- Sarıkaya Y (1997). Borlu Bileşiklerin Çimento Üretiminde Kullanılması. Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara
- Sarıkaya Y ve Tonak T (1999). Bor Minerallerinin Çimento Üretiminde Kullanılması. Çimento ve Beton Dünyası Dergisi, 19: 17-32.
- Sarıkaya H (2006). Zeolit Katkılı Betonların Fiziksel ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta
- Serbest D (1999). Doğal Zeolitlerin Hafif Yapı Endüstrisinde Kullanımı. Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir
- Subaşı S (2009). Portland Kompoze Çimentolu Betonlarda Uçucu Kül İkamesinin Donma-Çözülme Dayanıklılığına Olan Etkisi. E-journal of new world sciences academy technological applied sciences, 2a0007, 4, (2), 67-76
- Subaşı S, Kap T, Beycioğlu A ve Çullu M (2008). Effect of The Amount of Fly Ash on Setting Time and Workability of The Concrete. International Ready Mixed Concrete Congress, İstanbul.

- Şişman C B, Kocaman İ ve Gezer E (2008). Doğal Zeolitten Üretilecek Hafif Betonun Tarımsal Yapılarda Kullanılabilirliği Üzerine Bir Araştırma. Tekirdağ Ziraat Fakültesi Dergisi, 5 (2): 20-25
- Taşdemir M A (1982). Taşıyıcı Hafif Agregalı Betonların Elastik ve Elastik Olmayan Davranışları. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İstanbul.
- Targan Ş (2001). Kula Cürufu ve Bentonit ile Termik Santral ve Kolemanit Konsantratör Atıklarının Çimento Üretiminde Katkı Maddesi Olarak Değerlendirilmesi. Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
- Topçu İ B ve Uygunoglu T (2007). Properties Of Autoclaved Lightweight Aggregate Concrete. Building and Environment, 42:4108-4116
- Topçu İ B ve Boğa A R (2005). Bor Atıklı Çimento Harçlarının Dayanıklılığı. I. Ulusal Bor Çalıştayı: 113-120
- Tokyay M ve Şatana O A (1997). Hafif Beton Özelliklerine Çimento Miktarının Etkileri. Çimento ve Beton Dünyası Dergisi, 2,8: 31-3
- Turgutalp E Ü ve Özüng İ (1992). Doğal Hafif Agregalı Betonların Donma-Çözülme Etkisi Altındaki Bazı Özellikleri Üzerine Bir Araştırma. Atatürk Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi Sayı: 23(2), s. 72-88, Erzurum.
- Türk Standardı Enstitüsü (2010). Beton - Sertleşmiş Beton Deneyleri - Bölüm 6: Deney Numunelerinin Basınç Dayanımının Tayini, TS EN 12390-6: 1-3
- Türk Standardı Enstitüsü (2009). Beton Karışım Tasarımı Hesap Esasları, TS 802
- Türk Standardı Enstitüsü (2009). Beton Agregaları, TS 706 EN 12620
- Türk Standardı Enstitüsü (2007). Agregaların tane büyüklüğü dağılımı tayini, TS 3530 EN 933-1
- Türk Standardı Enstitüsü (2005). Çimento bileşim, özellikler ve uygunluk kriterleri, TS 197-1/A1
- Türk Standardı Enstitüsü (2002). Deney Numunesi ve Kalıplarının Şekil, Boyut ve Diğer Özellikleri, TS EN 12390-1
- Türk Standardı Enstitüsü (2002). Betonun Donma Çözülme Tayini , TS EN 12390-8
- Türk Standardı Enstitüsü (2002). Beton - Sertleşmiş Beton Deneyleri - Bölüm 6: Deney Numunelerinin Yarmada Çekme Dayanımının Tayini, TS EN 12390-6: 1-6
- Türk Standardı Enstitüsü (2002). Beton - Beton-Bölüm 1: Özellik, Performans, İmalat ve Uygunluk, TS EN 206-1
- Türk Standardı Enstitüsü (2000). Beton, Taze Beton Deneyleri, Çökme Deneyi, TS EN 12350-2

- Türk Standardı Enstitüsü (1981) Çabuk Donma ve Çözülme Koşulları Altında Betonda Dayanıklılık Faktörü Tayini, TS 3449
- Uğurlu A, Özdemir M ve Topçu İ (2004). Bor İçeren Kil Atıkların Çimento İçerisinde Değerlendirilmesi. Uluslararası Bor Sempozyumu, Eskişehir
- Ulus İ (2007). Ham Perlit Agregası Kullanılarak Yüksek Dayanımlı Hafif Beton Üretilirliğinin Araştırılması. Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum
- Uygunoğlu T (2008). Hafif Agregalı Kendiliğinden Yerleşen Betonların Özellikleri. Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta
- Uzbaş B (2008). Çimento Esaslı Malzemelerin Tek Eksenli Yük Altındaki Davranışının Mezo Düzey Modellemesi. Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum
- Ünal O ve Uygunoğlu T (2007). Diatomitin Hafif Beton Üretiminde Kullanılması. İnşaat Mühendisleri Odası Teknik Dergisi. 1: 4025-4034.
- Yamık A, Uçar A, Demir U ve Şahbaz O (2004). Bor atığının Tuğla Sanayinde Kullanılabilirliğinin Araştırılması. II. Uluslar arası Bor sempozyumu: 419- 423
- Yasar E, Atis C D, Kılıç A, Gülşen H (2003). Strenght Properties of Lightweight Concrete Made with Balastic Pumice and Fly Ash. Materials Letters 57: 2267-2270.
- Yıldırım F S (2007). Puzolanik Zeolitin Çimentoda Katkı Uygunluğunun Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Mustafa Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Hatay, 75
- Yıldız K, Dorum A ve Koçak Y (2010). Pomza Zeolit ve Cem I Çimentosunun Minerolojik Moleküler Elektrokinetik ve Termal Uyumunun Yüksek Dayanımlı Betona Etkisinin Araştırılması. Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, Cilt 25, No 4: 867-879
- Yıldız A (2008). Mermer Toz Atıklarının Yol İnşaatında Değerlendirilmesi. Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Yılmaz K, Canpolat F ve Arman H (2004). Taban Külü ve Doğal Zeolitin Puzolanik Çimentoda Katkı Olarak Kullanımı. Beton 2004 Kongresi, İstanbul, 10-12.
- Zeybek M S (2000). Borlu Çimentoların Üretilmesi ve Nötron Tutma Kapasitelerinin Araştırılması. Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta
- Zeybek B, Olgun A ve Erdoğan Y (2004). Tinkal Konsantratör Atığı İçeren Çimentoya Bazı Polimer Ve Alkali Tuzların Etkisi, Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, Sayı 6.