Atık Asfalt Kırıklarının Beton Yollarda Agrega Yerine Kullanılmasının Araştırılması

Burak Işıkdağ

DOKTORA TEZİ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Temmuz 2009

The Investigation on Use of Waste Crushed Asphalt as Aggregate in Concrete Roads

Burak Işıkdağ

DOCTORAL DISSERTATION

Department of Civil Engineering

July 2009

Atık Asfalt Kırıklarının Beton Yollarda Agrega Yerine Kullanılmasının Araştırılması

Burak Işıkdağ

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Lisansüstü Yönetmeliği Uyarınca
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Yapı Bilim Dalında
DOKTORA TEZİ
Olarak Hazırlanmıştır

Danışman: Prof. Dr. İlker Bekir Topçu

Temmuz 2009

ONAY

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Doktora öğrencisi Burak Işıkdağ'ın DOKTORA tezi olarak hazırladığı "Atık Asfalt Kırıklarının Beton Yollarda Agrega Yerine Kullanılmasının Araştırılması" başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

Danışman : Prof. Dr. İlker Bekir Topçu

İkinci Danışman :

Doktora Tez Savunma Jürisi:

Üye : Prof. Dr. İlker Bekir Topçu

Üye : Prof. Dr. Mustafa Karaşahin

Üye : Doç. Dr. Fatih Altun

Üye : Yrd. Doç. Dr. Mehmet Canbaz

Üye : Yrd. Doç. Dr. Cenk Karakurt

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun ..... tarih ve ..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Nimetullah BURNAK

Enstitü Müdürü

ÖZET

Atık asfalt kırıklarının agrega olarak beton yollarda kullanılması doğal agrega tüketimini ve beton maliyetini azaltır. Bitümlü bir malzeme olan atık asfalt kırıklarının su emme kapasitesinin doğal agregaya göre daha düşük olması taze betonda su gereksinimini azaltmakta ve işlenebilirlik artmaktadır, sertleşmiş betonda ise tokluk artmakta ve çatlak oluşumu azalmaktadır. Yapılan çalışmada atık asfalt kırıklarının beton ve harç numunelerde agrega yerine en uygun kullanım oranları araştırılmıştır. Deneylerde, atık asfalt kırıkları 4-16 ve 16-31.5 mm boyutlarında ve % 0, 25, 50, 75 ve 100 oranlarında doğal agrega yerine kullanılmıştır. CEM I 42.5 R çimento ile 300, 350 ve 400 dozajlı beton numuneler üretilmiştir. Atık asfalt kırıkları 0-4 mm boyutlarında öğütülerek, % 0, 25, 50, 75 ve 100 oranlarında CEN standart kum yerine kullanılmıştır. CEM II/B-M 32.5R çimento ile harç numuneler elde edilmiştir. Taze ve sertleşmiş beton ve harç numuneleri üzerinde fiziksel, mekanik ve dayanıklılık deneyleri yapılarak numunelerin özelikleri belirlenmiştir. Taze betonda çökme değerleri hesaplanırken, 28 günlük sertleşmiş beton, 7 ve 28 günlük harç numuneleri üzerinde yapılan deneylerde ultrases geçiş süresi, basınç, yarmada çekme ve eğilme dayanımları belirlenerek elastisite modülü değerleri hesaplanmıştır. Dayanıklılık deneylerinde ise aşınma, sıcaklık, sülfat dayanıklılığı, serbest rötre, kısıtlanmış rötre ve çatlak oluşumu değerleri belirlenmiştir. Harç numunelerinin mikroyapısı SEM cihazı ile incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Asfalt, kaplama, beton performansı, harç, dayanım, dayanıklılık, rötre, çatlak oluşumu, mikroyapı.

SUMMARY

The use of waste crushed asphalt in concrete roads reduces the consumption of natural aggregate and cost of concrete. The water absorption of waste crushed asphalt is lower than the water absorption of natural aggregate owing to the bituminous structure, this reduces the water demand in fresh concrete and improves workability, furthermore higher toughness values and lower crack formation occurs in hardened concrete. In this study, the optimum use of waste crushed asphalt as aggregate in concrete and mortars have been investigated. In the experiments, concretes have been produced with 4-16 and 16-31.5 mm waste crushed asphalt at the replacement ratios of 0, 25, 50, 75 and 100 %. CEM I 42.5 R cement was used at the dosages of 300, 350, 400 in production of concrete specimens. Mortar specimens have been produced with 0-4 mm granulated waste crushed asphalt as standard CEN sand with the replacement ratios of 0, 25, 50, 75 ve 100 %. CEM II/B-M 32.5R cement was used in production of mortar specimens. The destructive, nondestructive and durability tests have been conducted on fresh and hardened specimens to determine physical and mechanical properties. The slump values were obtained in fresh concrete and ultrasound pulse velocity, compressive, splitting tensile and flexural strengths were obtained in concrete at the end of 28^{th} days and in mortars at the end of 7^{th} and 28^{th} days. The abrasion, high temperature, sulfate resistances, free and restrained shrinkage values and crack formations have been determined with durability tests in experiments. In the experiments, the microstructure of mortar specimens was investigated with the SEM photos.

Keywords: Asphalt, pavement, concrete performance, mortar, strength, durability, shrinkage, crack formation, microstructure

TEŞEKKÜR

Doktora tezi çalışmalarında, gerek ders aşamasında ve gerekse tez çalışmalarında, bana danışmanlık ederek, beni yönlendiren ve her türlü olanağı sağlayan danışmanım Prof. Dr. İlker Bekir Topçu'ya, tez izleme komitesinde bulunan ve yardımlarını esirgemeyen Prof. Dr. Mustafa Karaşahin'e ve Doç. Dr. Fatih Altun'a, laboratuvar çalışmalarında yardımlarını esirgemeyen Yard. Doç. Dr. Mehmet Canbaz'a, Yard. Doç. Dr. Cenk Karakurt'a, Araş. Gör. Ahmet Raif Boğa'ya, Araş. Gör. Turhan Bilir'e, Araş. Gör. Dr. Abdullah Demir'e, Araş. Gör. Dr. Mustafa Sarıdemir'e ve İnşaat Teknikeri Sevgin Yılmaz'a, SEM ve EDX analizlerini gerçekleştiren Arş. Gör. Dr. Erhan Ayas'a, atık asfalt kırığı agregalarının sağlanmasında yardımcı olan Eskişehir Odunpazarı Belediyesi'ne ve maddi manevi desteğini benden esirgemeyen aileme ve eşime teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET ..... **v**

SUMMARY ..... **vi**

TEŞEKKÜR ..... **vii**

ŞEKİLLER DİZİNİ ..... **xi**

ÇİZELGELER DİZİNİ ..... **xv**

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ ..... **xvii**

1. GİRİŞ VE AMAÇ **1**

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI **5**

2.1 Beton Yol Özelikleri 5

2.2 Betonda Dayanıklılık 7

2.2.1 Sülfat etkisi 7

2.2.2 Alkali-silika reaktivitesi 8

2.2.3 Sıcaklık etkisi 8

2.2.4 Donma-çözülme etkisi 8

2.2.5 Aşınma etkisi 9

2.3 Rötre 9

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR **11**

3.1 Deneylerde Kullanılan Malzemeler 11

3.1.1. Portland çimentosu 11

3.1.2 Karışım suyu 12

3.1.3 Asfalt kırığı agregası 13

3.1.4 Agrega 15

3.1.5 Katkı 16

3.1.6 Sodyum hidroksit(NaOH) 17

3.1.7 Sodyum sülfat (Na_2SO_4) 17

3.2 Beton Numunelerinin Hazırlanması 17

İÇİNDEKİLER (devam)

Sayfa

3.2.1 Üretilecek beton numuneler için hacim ve ağırlık hesabı 18
3.3. Harç Numunelerinin Hazırlanması 22
3.4. Dayanıklılık Deneyleri 25
3.4.1 Sülfat etkisi 26
3.4.2 Alkali-silika reaktivitesi 26
3.4.3 Donma-çözülme etkisi 27
3.4.4 Sıcaklık etkisi 28

4. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ 29
4.1 Birim Ağırlık 29
4.2 Çökme 31
4.3 Ultrases Geçiş Hızı 31
4.4 Elastisite Modülü 32
4.5 Yarmada Çekme Dayanımı 33
4.6 Basınç Dayanımı 34
4.7 Eğilmede Çekme Dayanımı 35
4.8 Aşınma 37
4.9 Kısıtlanmış Rötre 38
4.10 Serbest Rötre 41
4.11 Mikroyapı İncelemesi 41

5. DENEY SONUÇLARININ İRDELENMESİ 53
5.1 Birim ağırlık 53
5.2 Çökme 55
5.3 Ultrases Geçiş Hızı 56
5.4 Elastisite Modülü 58
5.5 Yarmada Çekme Dayanımı 61
5.6 Basınç Dayanımı 63
5.7 Eğilmede Çekme Dayanımı 65

İÇİNDEKİLER (devam)

Sayfa

5.8 Aşınma 67
5.9 Kısıtlanmış Rötre 68
5.10 Serbest Rötre 70
5.11 Dayanıklılık Deneyleri 72
5.11.1 Sülfat etkisi 72
5.11.2 Alkali-silika reaktivitesi 77
5.11.3 Donma-çözülme etkisi 78
5.11.4 Yüksek sıcaklık etkisi 82
5.12 Mikroyapı İncelemesi 86

6. ASFALT KIRIĞI AGREGALI BETONLARDA YSA VE BM KULLANIMI 88
6.1 Farklı Agregalarla Üretilen Betonların Modellenmesi 90
6.2 AKAB Taze Beton Özeliklerinin YSA ve BM ile Tahmini 91
6.3 AKAB Taze Beton Özeliklerinin YSA ile Modellenmesi 91
6.4 AKAB Taze Beton Özeliklerinin BM ile Modellenmesi 93
6.5 AKAB Sertleşmiş Beton Özeliklerinin YSA ve BM ile Tahmini 93
6.6 AKAB Sertleşmiş Beton Özeliklerinin YSA ile Modellenmesi 94
6.7 AKAB Sertleşmiş Beton Özeliklerinin BM ile Modellenmesi 95
6.8 Model Sonuçlarının Değerlendirilmesi ve İrdelenmesi 99
6.8.1 AKAB taze beton model sonuçlarının değerlendirilmesi ve irdelenmesi 100
6.8.2 Yapay sinir ağları ve bulanık mantık basınç dayanımı sonuçları 102
6.8.3 Yapay sinir ağları ve bulanık mantık ultrases geçiş hızı sonuçları 103

8. SONUÇ VE ÖNERİLER 106

9. KAYNAKLAR 108

EKLER 117

ÖZGEÇMİŞ 139

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil		Sayfa
1.1	Asfalt kazıma çalışması: a) freze ile kazıma, b) asfalt kırıkları	2
2.1	Beton yol yapımı: a) tesviye, b) kayar kalıp	6
3.1	Atık asfalt kırığı agregalarının öğütülmesi: a) öğütme cihazı, b) elek seti	13
3.2	Asfalt kırığı agregası: a) öğütme öncesi, b) öğütme sonrası	14
3.3	Atık asfalt kırığı agregaları: a) numune, b) freze	15
3.4	Beton agregası karışımı için granülometri eğrisi	16
3.5	CEN standart kum: a) kutu içerisinde, b) poşet içerisinde	16
3.6	Kullanılan gereçler: a) numune kalıpları, b) beton mikseri ve vibratör	18
3.7	AKA ile üretilen beton numuneler: a) silindir, b) prizma	18
3.8	AKAH 40x40x160 mm prizmatik numuneler: a) taze, b) sertleşmiş	24
3.9	AKAH 150x150x150 mm prizmatik numuneler: a) taze, b) sertleşmiş	24
3.10	AKAH 25x25x285 mm prizmatik numuneler: a) taze, b) sertleşmiş	24
3.11	AKAH halka numuneleri: a) taze, b) sertleşmiş	25
4.1	AKAB serilerinin tanımlanması	30
4.2	AKAB silindir numune kesiti: a) seri I, b) seri II	35
4.3	İki noktadan yüklemeli eğilme deneyi: a) yükleme öncesi, b) yükleme sonrası	37
4.4	Eğilme deneyinde kullanılan numuneler: a) deney öncesi, b) deney sonrası	37
4.5	Böhme diski: a) çalışma öncesi, b) çalışma sonrası	38
4.6	Halka kalıpların boyutları	39
4.7	Halka kalıbı: a) kalıp sökümü öncesi, b) kalıp sökümü sonrası	40
4.8	Kısıtlanmış rötre çatlakları: a) optik dürbün ölçümü, b) cetvel ile ölçüm	41
4.9	AKAH SEM I spektrum 1, 250X	43
4.10	AKAH SEM I spektrum 1 element dağılımı	44
4.11	AKAH SEM I spektrum 2, 250X	45
4.12	AKAH SEM I spektrum 2 element dağılımı	45
4.13	AKAH SEM I spektrum 3, 250X	46
4.14	AKAH SEM I spektrum 3 element dağılımı	47
4.15	AKAH SEM II spektrum 1, 250X	48
4.16	AKAH SEM II spektrum 1 element dağılımı	48

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

Şekil		Sayfa
4.17	AKAH SEM II spektrum 2, 350X	49
4.18	AKAH SEM II spektrum 2 element dağılımı	50
4.19	AKAH SEM III spektrum 1, 350X	51
4.20	AKAH SEM III spektrum 1 element dağılımı	51
4.21	AKAH SEM III spektrum 2, 500X	52
4.22	AKAH SEM III spektrum 2 element dağılımı	52
5.1.	AKAB taze birim ağırlıkları	54
5.2.	AKAH sertleşmiş birim ağırlıkları	54
5.3.	AKAB çökme değerleri	56
5.4.	AKAH ultrases geçiş hızı	57
5.5.	AKAB ultrases geçiş hızı	57
5.6.	AKAB ultrases geçiş hızları kullanılarak hesaplanan E_d değerleri	60
5.7.	AKAH numunelerinde deneysel elastisite modülü değerleri	60
5.8.	AKAH numunelerinde tokluk ilişkisi	61
5.9.	AKAB yarmada çekme dayanımları	62
5.10.	AKAB basınç dayanımları	64
5.11.	AKAH basınç dayanımları	64
5.12.	AKAB eğilmede çekme dayanımları	66
5.13.	AKAH eğilmede çekme dayanımları	66
5.14.	AKAB aşınma değerleri	67
5.15.	AKAH için kısıtlanmış rötre çatlak genişlikleri	69
5.16.	AKAH için serbest rötre birim deformasyonları	70
5.17.	% 5 Na_2SO_4 çözeltisindeki harç çubuklarının boy değişimi, %	72
5.18.	% 5 Na_2SO_4 çözeltisindeki harçların ultrases geçiş hızları, km/sn	74
5.19.	% 5 Na_2SO_4 çözeltisindeki harçların eğilmede çekme dayanımları, MPa	75
5.20.	% 5 Na_2SO_4 çözeltisindeki harçların basınç dayanımları, MPa	76
5.21.	% 4 NaOH çözeltisindeki harç çubuklarının boy değişimi, %	78
5.22.	AKAH numunelerinde donma-çözülme etkileri	80
5.23.	Donma-çözülme deneyinde ultrases geçiş hızı ilk ve son okumaları	81

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

Şekil		Sayfa
5.24.	Donma-çözülme deneyinde basınç dayanımı ilk ve son okumaları	81
5.25.	Yüksek sıcaklık etkisi altında AKAH numunelerin ultrases geçiş hızı	84
5.26.	Yüksek sıcaklık etkisi altında AKAH numunelerin eğilme dayanımı	84
5.27.	Yüksek sıcaklık etkisi altında AKAH numunelerin basınç dayanımı	85
5.28.	Yüksek sıcaklık etkisi altında AKAH numunelerin birim ağırlıkları	85
5.29.	AKAH SEM görüntüsü, büyütme 590X	87
5.30.	AKAH SEM görüntüsü, büyütme 360X	87
6.1	AKAB taze beton için sinir ağı modelinde kullanılan sistem	92
6.2	AKAB sertleşmiş beton için sinir ağı modelinde kullanılan sistem	95
6.3	AKAB BA değerlerine: a) ince AKA ve ince kırmataşın, b) iri AKA ve iri kırmataşın, c) iri ve ince kırmataşın, d) çimento ve suyun etkisi	97
6.4	AKAB UGH değerlerine: a) ince AKA ve ince kırmataşın, b) iri AKA ve iri kırmataşın, c) ince AKA ve kumun, d) ince ve iri kırmataşın etkisi	97
6.5	AKAB f_c değerlerine: a) ince AKA ve ince kırmataşın, b) iri AKA ve iri kırmataşın, c) ince AKA ve kumun, d) ince ve iri kırmataşın etkisi	98
6.6	AKAB taze beton BA deney ve model sonuçlarının karşılaştırılması	101
6.7	AKAB taze beton Ç deney ve model sonuçlarının karşılaştırılması	102
6.8	AKAB f_c deney ile model sonuçlarının karşılaştırılması	103
6.9	AKAB UGH deney ile model sonuçlarının karşılaştırılması	104

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge		Sayfa
2.1	Beton yollarda 28 günlük dayanımlar	6
3.1	CEM I 42.5R Portland çimentosunun özelikleri	12
3.2	CEM II/B-M 32.5R Portland çimentosunun özelikleri	12
3.3	Karışım suyu özelikleri	12
3.4	AKA'nın fiziksel ve mekanik özelikleri	14
3.5	Agregaların özgül ağırlıkları	19
3.6	AKAB hacimce agrega oranları, %	19
3.7	AKAB hacimce agrega miktarları, dm^3	21
3.8	AKAB karışım değerleri, kg/m^3	22
3.9	AKAH hacimce karışım oranları	23
3.10	AKAH için ağırlıkça karışım oranları, kg/m^3	23
4.1	AKAB taze birim ağırlıkları, kg/m^3	30
4.2	AKAB çökme değerleri, cm	31
4.3	AKAB ultrases geçiş hızları, km/s	32
4.4	AKAB ultrases geçiş hızları kullanılarak hesaplanan E_d değerleri, GPa	33
4.5	AKAB yarmada çekme dayanımları, MPa	34
4.6	AKAB basınç dayanımları, MPa	35
4.7	AKAB eğilmede çekme dayanımı, MPa	36
4.8	AKAB aşınma değerleri, $cm^3/50\ cm^2$	38
4.9	AKAH kısıtlanmış rötre deney sonuçları	40
4.10	AKAH SEM I spektrum 1 elemental analiz oranları	43
4.11	AKAH SEM I spektrum 2 elemental analiz oranları	44
4.12	AKAH SEM I spektrum 3 elemental analiz oranları	46
4.13	AKAH SEM II spektrum 1 elemental analiz oranları	47
4.14	AKAH SEM II spektrum 2 elemental analiz oranları	49
4.15	AKAH SEM III spektrum 1 elemental analiz oranları	50
4.16	AKAH SEM III spektrum 2 elemental analiz oranları	52
5.1	AKAB deney sonuçlarının regresyon denklemleri ve korelasyon katsayıları	71
5.2	% 5 Na_2SO_4 çözeltisindeki harç çubuklarının boy değişimi, %	73

ÇİZELGELER DİZİNİ (devam)

Çizelge		Sayfa
5.3	% 5 Na_2SO_4 çözeltisindeki harçların ultrases geçiş hızları, km/s	74
5.4	% 5 Na_2SO_4 çözeltisindeki harçların eğilmede çekme dayanımları, MPa	76
5.5	% 5 Na_2SO_4 çözeltisindeki harçların basınç dayanımları, MPa	76
5.6	% 4 NaOH çözeltisindeki harç çubuklarının boy değişimi, %	77
5.7	AKAH donma-çözülme deney sonuçları	80
5.8	AKAH numunelerinin 100, 300, 450, 600 ºC sıcaklıktaki özelikleri	83
6.1	AKAB için model parametreleri	92
6.2	AKAB sertleşmiş beton için model parametreleri	97
6.3.	AKAB taze beton için modellerin BA istatistiksel değerleri	105
6.4.	AKAB taze beton için modellerin Ç istatistiksel değerleri	105
6.5.	AKAB için önerilen modellerin f_c istatistiksel değerleri	107
6.6.	AKAB için önerilen modellerin UGH istatistiksel değerleri	108
6.7.	AKAB taze beton deney sonuçları ile model test sonuçları	110
6.8.	AKAB sertleşmiş beton deney sonuçları ile modellerin test sonuçları	110

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
ºC	Sıcaklık
C_3A	Trikalsiyum alüminat
C_2S	Dikalsiyum silikat
C_3S	Trikalsiyum silikat
Ca	Kalsiyum
CH	Kalsiyum hidroksit
Cl^-	Klor iyonu
ε	Şekil değiştirme
E_d	Dinamik elastisite modülü
et al	Ve diğerleri
f_c	Basınç dayanımı
Ø	Çap
GPa	Giga paskal
kgf	Kilogram kuvvet
MPa	Mega paskal
Mg	Magnezyum
mm	Milimetre
mg	Miligram
μm	Mikrometre
μ	Poisson oranı
NaOH	Sodyum hidroksit
NaCl	Sodyum klorür
SO_4^-	Sülfat iyonu
$\sigma_{yç}$	Yarmada çekme dayanımı
σ_e	Eğilme dayanımı
V	Ultrases geçiş hızı
vd.	Ve diğerleri

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

Kısaltmalar	Açıklama
AASHTO	Amerikan Eyalet Karayolu ve Ulaştırma Memurları Birliği
AKA	Asfalt kırığı agregası
AKAB	Asfalt kırığı agregalı beton
AKAH	Asfalt kırığı agregalı harç
ASR	Alkali-silis reaktivitesi
ASTM	Amerikan Malzeme Test Standartları
C	Beton sınıfı
CEN	Standart kum
CSH	Kalsiyum silika hidrate
Ç	Çimento
ÇİMSA	Eskişehir Çimento Fabrikası
D	Dozaj
EDX	X ışını analiz donanımı
ESOGÜ	Eskişehir Osmangazi Üniversitesi
KI	Kırmataş I
KII	Kırmataş II
S	Su
SEM	Taramalı elektron mikroskobu
TS	Türk Standartları
t	Zaman
UGH	Ultrases geçiş hızı
V	Hacim
P	Basınç
XRD	X ışını difraksiyonu

BÖLÜM 1

GİRİŞ VE AMAÇ

Günümüzde karayollarında yenileme ve bakım çalışmaları sırasında, eski yol kaplamaları, freze adı verilen makineler ile yol yüzeyinden kazınmakta ve yine bu makineler yardımı ile belirli boyutlarda kırılarak belediye şantiyelerinde veya boş arazilerde atık malzeme olarak depolanmaktadır (Asphalt, 1983; Jon, 1990). Bu atık malzemeler miktarlarının oldukça fazla olması nedeniyle çevre kirliliğine yol açmaktadır (Jon, et al., 1977; Asphalt, 2006). Bu nedenle atık asfalt kırıklarının beton içerisinde doğal agrega yerine kullanılması sonucunda çevre kirliliği önlenebilir ve ülke ekonomisine büyük katkı sağlanabilir (Decker and Young, 1996; Senior, et al., 1994). Dünya ülkelerinin neredeyse tümünde yol yapım ve genişletme çalışmalarının her geçen gün arttığı göz önünde bulundurulursa agrega gereksiniminin buna bağlı olarak artması kaçınılmazdır (Hanks and Magni, 1989; Bansci, et al., 1980). Atık asfalt kırıklarının agrega olarak beton yollarda kullanılması doğal agrega tüketimini ve nakliye masraflarını azaltabilecek etkiye sahip olması nedeniyle, beton maliyeti düşecektir. Bitümlü bir malzeme olan atık asfalt kırıklarının su emme kapasitesinin doğal agregaya göre düşük olması taze betonda su gereksinimini azaltır ve işlenebilirlik artar, ayrıca çeşitli çalışmalar incelendiğinde, sertleşmiş betonda tokluk artmakta ve çatlak oluşumunun azaldığı görülmektedir (Krietch, 1991; Akpınar, 2005).

Asfalt kırıkları yolların yenilenmesi ve bakımı sırasında ortaya çıkan atık malzemelerdir, bu malzemelerin esnek ve rijit kaplamalarda yeniden kullanılması mümkündür. Rijit bir kaplama olan beton yollarda, sıcaklık ve nem farkından ve trafik yükleri nedeniyle oluşan gerilmeler altında, beton plakta çatlaklar görülebilmektedir. Bu çatlakları önlemek için beton yolu, serbest plaklar durumuna getiren derzlerin, belirli ve uygun aralıklarda yapılmaları gerekmektedir. Ayrıca, betona yüzeye yakın biçimde çelik teller konarak veya yine yüzeye yakın bir şekilde hasır donatıları yerleştirerek bu çatlamalar en az düzeye indirgenebilir ve beton çekme direnci yükseltilebilir. Beton yolun, yol çeşitleri arasında çelik donatı kabul eden tek kaplama tipi olması, büyük bir

avantaj olarak görülmektedir. Beton yollarda çatlak oluşumunu önleyici diğer bir yöntem ise agrega yerine şekil değiştirme kapasitesi daha yüksek çeşitli malzemeler kullanılarak beton tokluğunun artmasını sağlamaktır. Bu durum, yapılan çalışmada detaylı bir şekilde incelenerek, atık asfalt kırıklarının agrega yerine kullanılmasının betonda çatlak oluşumuna etkileri araştırılmıştır (Topçu ve Işıkdağ, 2006 a).

Atık malzemelerin betonda kullanımı son zamanlarda oldukça popüler hale gelmiştir (Nagataki, et al., 2004; Craig, et al., 1998). Betonda kullanılan atık malzemeler kaba ve ince agrega veya katkı olarak değerlendirilmektedir (Swamy and Ali, 1983; Sakai, et al., 1993). AKA'nın (asfalt kırığı agregası) yeni yolların yapımında ve eski yolların bakımında, sıcak karışım olarak üretilen asfalt kaplama içerisinde kullanılması oldukça yaygın bir kullanım şeklidir. AKA asfalt betonu ve alt yapı kaplamalarında da kullanılmaktadır (Topçu vd., 2005). Endüstri uzmanlarına göre asfalt kaplama endüstrisi geri dönüşüm açısından lider durumdadır. Her yıl 73 milyon ton asfalt kaplama tekrar kullanılmaktadır. Atık asfalt kaplamalar yol yapımı haricinde yol yatağı, şev ve toprak dolgularda kullanılır. Her yıl, eski yollardan sökülen asfalt kaplamaların % 80'i farklı şekilde yeni kaplama üretimlerinde değerlendirilmektedir. AKA, kaplamanın tamamen veya kısmen sökülmesi ile elde edilir (Şekil 1.1).

a b

Şekil 1.1. Asfalt kazıma çalışması: a) freze ile kazıma b) asfalt kırıkları

Atık malzemelerin kullanılması ile betonun tokluk ve işlenebilirlik gibi bazı özelikleri iyileştirilebilir (Malhotra, et al., 2000; Huang, et al., 2005). Eski yollardan elde edilen AKA bitüm ve agrega içermektedir. Çeşitli atık malzemelerin betonda kaba veya ince agrega yerine kullanılması enerji emme kapasitesini arttırır (Huang, et al., 2004; Li, et al., 2004). Bununla birlikte basınç ve çekme dayanımları düşmektedir (Topçu, 1995; Eldin and Senouci, 1993). Bir kompozit olarak, beton performansı çatlak oluşumu direnci için modern beton kırılma mekaniği kullanılarak sistematik olarak değiştirilebilir (Olivares, et al., 2002; Li and Maalej, 1996). AKA kullanım oranı arttıkça beton özelikleri azalmaktadır (Topçu and Işıkdağ, 2005). Literatürde AKA kullanımı ile betonun yorulma davranışında iyileşmelerin olduğu görülmektedir.

Yapılan bilimsel çalışmalarda gözlemlenen yorulma deney sonuçlarına göre agrega yerine AKA kullanımı çimento ve asfalt betonları üzerinde özel bir davranışa sahiptir (Li, et al., 1998; Mathias, et al., 2005). AKA'nın yol yapılarında bağlayıcılar ile kullanılarak değerlendirilmesi ve agregaların iyi derecede birbirine bağlanması birçok çalışmanın amacı haline gelmiştir. Çimento ile bağlanmış malzemeler ve silindir ile sıkıştırılmış beton ile elde edilen sonuçlara göre AKA'nın hidrolik malzemeler ile kullanımı yarmada çekme ve daha çok elastisite modüllerinde azalmalara neden olmaktadır (Kolias, 2001; Topçu ve Işıkdağ, 2006 b)

Beton, iri agrega, ince agrega, çimento, su ve gerektiğinde bazı katkı maddelerinin uygun oranlarda bir araya getirilmesiyle üretilen kompozit bir malzemedir (Kocataşkın, et al., 1993). Önceleri beton bileşiminin dörtte üçünü oluşturan agregalar sadece dolgu malzemesi olarak kabul edilip, agrega granülometrisi ve miktarı dikkate alınırken, kimyasal veya mineralojik yapısı gereken ilgiyi görmemiştir (Kocataşkın, 1998). Betonun çeşitli fazlardan oluşan bir kompozit malzeme olarak ele alınıp incelenmeye başlanmasından sonra, çimento hamuru ile birlikte agregaların mekanik özeliklerinin betonun davranışını etkilediği yapılan deneyler sonucunda belirlenmiştir (Topçu and Kocataşkın, 1995). Günümüzde kompozit bir malzeme olan betonda atıkların değerlendirilmesi, beton teknolojisi ve çevre kirliliğinin önlenmesi için oldukça önem kazanmıştır (Topçu and Avcular, 1997; Topçu, 1996; Topçu, et al., 2005).

Bu çalışmada atık asfalt kırıklarının beton ve harç numunelerde agrega yerine en uygun kullanım oranı hesaplanmıştır. Yapılan deneylerde 4-16 ve 16-31.5 mm boyutlarında atık asfalt kırıklarının % 0, 25, 50, 75 ve 100 oranlarında doğal agrega yerine kullanılması ile CEM I 42.5 R çimento ile 300, 350 ve 400 dozajlı beton numuneler üretilmiş, daha sonra atık asfalt kırıkları 0-4 mm boyutlarında öğütülerek % 0, 25, 50, 75 ve 100 oranlarında kırma kum yerine kullanılarak CEM II/B-M 32.5R çimento ile harç numuneleri üretilmiştir. Üretilen numuneler üzerinde Türk Standartları'na göre taze ve sertleşmiş beton deneyleri yapılarak fiziksel ve mekanik özelikler belirlenmiş ve dayanıklılık deneyleri laboratuvar ortamında yapılmıştır.

Taze beton numunelerinde çökme değerleri ölçülürken, 28 günlük sertleşmiş beton numunelerinde ve ayrıca 7 ve 28 günlük harç numuneleri üzerinde yapılan hasarsız deneylerde ultrases geçiş hızı, hasarlı deneylerde basınç, yarmada çekme ve eğilmede çekme dayanımları belirlenerek elastisite modülü değerleri hesaplanmıştır.

Dayanıklılık deneylerinde ise aşınma, serbest rötre, kısıtlanmış rötre, çatlak oluşumu, sodyum klorür etkisi, sıcaklık etkisi, donma-çözülme etkisi, alkali-silika reaktivitesi belirlenerek deney sonuçları ayrıntılı olarak yorumlanmıştır.

Harç deneylerinde, referans harçlarında oluşan rötre çatlaklarının genişlikleri ve boyları AKAH'ın (asfalt kırığı agregalı harç) çatlak oluşumlarıyla karşılaştırılmıştır. Kısıtlanmış rötrenin incelenebilmesi için literatürde betonun rötresinin incelenebildiği bir deney olan halka kalıbı kullanılarak deneyler yapılmıştır. Böylece, AKAH'ta oluşan rötre, çatlakların oluşum hızı ve sayısı gibi verilerin elde edilmesine çalışılmıştır.

AKA bir agrega olarak bitümlü yapısından dolayı doğal agregaya göre daha düşük elastisite modülüne sahiptir. Bu nedenle rötre deneylerinde amaç AKAH'ta çatlak oluşumunun geciktirilmesi ve gerilme kapasitesinin artırılması olarak belirlenmiştir. Harç numunelerinin mikroyapıları SEM ile görüntülenerek, kimyasal bileşimleri tanımlanmıştır. Ayrıca detaylı bir şekilde çizelge ve şekillerle açıklanmıştır.

BÖLÜM 2

LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Beton ile yapılan yol kaplamalarına beton yol adı verilmektedir. Beton yol kaplamasının görevi trafik tekil yüklerini tabana bozulmadan iletmektir. Bir tekerlek yükü beton plak üzerinden geçerken çekme, basınç ve eğilme gerilmeleri oluşur, daha sonra bu gerilmeler kaybolur. Bu nedenle tekrarlı yükler sonucunda zamanla betonda yorulma meydana gelmektedir. Yorulma beton yollarda oldukça önemli bir durumdur (Umar ve Ağar, 1985). Tekrarlanan gerilme, kırılma anındaki gerilmenin % 50'sini aşması durumunda emniyet katsayısı 2'den az olmak koşuluyla beton sonsuz gerilme tekrarına kırılmadan dayanabilir. Tekrarlanan gerilme kırılma anındaki gerilmenin % 50'sinden az ise emniyet katsayısı 2'den büyük olmak koşuluyla gerilme tekrarı yararlıdır ve beton dayanıklılığını artırır. Tekrarlanan gerilme kırılma anındaki gerilmenin % 50'sinden fazla ise emniyet katsayısı 2'den küçük olmak koşuluyla betonda kırılma gerçekleşir. Emniyet katsayısı 1-2 arasında ise kırılma için gerekli tekrar sayısı emniyet katsayısı azaldıkça azalır. Gerilme periyotları arasında dinlenme varsa yorulma etkisi daha fazla azalır (Umar ve Ağar, 1985).

2.1 Beton Yol Özelikleri

Sıcaklık etkisi ile oluşan genleşme ve büzülme davranışları beton kaplamalar için tehlike oluşturmaktadır. Bu tip gerilmelere karşı beton dayanımının yeterli seviyede olması gerekmektedir. Beton yollar uzun ömürlü olmaları ve düşük bakım ve onarım maliyetleri nedeniyle esnek kaplamalara göre uzun vadede daha ekonomiktir. Beton yolların kayma sürtünme katsayıları yüksektir, yuvarlanma sürtünme katsayısı düşüktür, dayanıklıdır, gürültüsüz ve tozsuzdur, gece görüşü kolaydır, yüzey geçirimsizliği yüksektir, bakım onarım maliyeti düşüktür, ıslak zeminlerde üretim yapılabilir ve hammaddesi yerlidir. Amerikan standartlarına göre, beton yol kaplaması için en düşük basınç dayanımı 25 MPa, eğilme dayanımı 3.8 MPa, taze betonda çökme değeri 7.5 cm, hava sürükleyici katkılı çimento dozajı 355 kg/m^3, hava sürükleyici katkısız, beton çimento dozajı 335 kg/m^3 olarak belirlenmiştir (AASHTO T22, 1997).

Betonda hava boşluğu miktarı toplam beton hacminin % 1'ini geçmemelidir. Ayrıca, bazı ülkelerde donatısız iki tabakalı beton yollarda temel betonu için 220 kg/m^3 çimento dozajı kullanılabilmektedir. Bu ülkelerde plak kalınlığı genellikle dayanımı daha düşük olan temel betonu için 15 cm, dayanımı yüksek olan kaplama betonu için 22 cm olarak belirlenmiştir (Umar ve Ağar, 1985). Yol betonu için S/Ç oranı 0.3-0.5 arasında olabilir, fakat olabildiğince küçük değer olması tercih edilmektedir. Bunun nedeni döküm aşamasında betonun kayar kalıplarda sabit kalmasını sağlamaktır (Şekil 2.1). Yol betonlarında taze birim ağırlıklar hava sürükleyici katkı oranına göre 2450-2520 kg/m^3 arasında değişmektedir. Beton yollarda trafik yüküne göre, 28 günlük basınç dayanımları Çizelge 2.1'de görülmektedir (Umar ve Ağar, 1985).

a b

Şekil 2.1. Beton yol yapımı: a) tesviye, b) kayar kalıp (Fuchs, 2002)

Çizelge 2.1. Beton yollarda 28 günlük dayanımlar (Umar ve Ağar, 1985)

Yol cinsi (Kaplama ve temel betonu)	**Basınç dayanımı (MPa)**	**Eğilme dayanımı (MPa)**
Ağır trafik	37 37	4.5 4.5
Orta trafik	30 25	3.5 3.0
Lokal trafik	25 20	3.0 2.5
Park alanı	25 20	3.0 2.5

2.2 Betonda Dayanıklılık

Beton tasarımları genellikle dayanıklılık konusunda araştırılmalar yapılmadan betonun 28 günlük basınç dayanımına göre yapılmaktadır. En az betonda dayanım kadar önemli olan betonda dayanıklılık, üretilecek yapının bulunduğu ortamdan etkilenmesini ve varlığını daha uzun süre emniyetli bir şekilde sürdürmesini sağlamada önemli bir unsurdur (Aitcin, 2000). Bu şekilde daha güvenli ve kalıcı yapılar inşa edilebilir. Üretilen binaların 28 günlük dayanımlarının uygun olması ileriki aşamalarda bu dayanımı koruyabilecekleri anlamına gelmemektedir. Beton, uygulanan kür koşulları ve çevrenin etkisi ile zamanla özeliklerini kolayca kaybedebilir (Baradan vd., 2002). Betonun üretiminden sonra servis süresi boyunca etkisinde kaldığı çevresel etkilere karşı gösterdiği direnç, dayanıklılık veya durabilite olarak nitelendirilir. Dayanıklılık, beton içerisindeki bileşenlerin sahip olduğu kimyasal yapıya, betonun bulunduğu ortamdaki su, nem, sülfat, klor, tuz ve asit gibi çeşitli maddelere bağlı olarak değişiklikler gösterir (Shannag, 2000). Betonda bulunan veya betonun içerisine sızan tüm zararlı maddeler beton dayanıklılığını etkiler, fiziksel etkiler ve kimyasal reaksiyonlar sonucu betonun kalitesini koruması zorlaşmaktadır (Massazza, 1997).

2.2.1 Sülfat etkisi

Yer altı sularında sodyum sülfat, kalsiyum sülfat, magnezyum sülfat ve potasyum sülfat gibi tuzlar bulunabilmektedir. Sertleşmiş beton içerisine sızan sularla giren sülfatlar betonda genişleme ve çatlamaya yol açmaktadır (Erdoğan, 2003). Kimyasal reaksiyonlar sonucu oluşan bu durum betona aşırı derecede zarar verebilir, dayanımında azalmalara neden olabilmektedir. Sülfat etkisi önlem alınmazsa yol betonlarında yıpratıcı olabilmektedir. Sülfat iyonları C_3S ve C_2S'in hidratasyon ürünü olan ve çimentoya bazik özelik sağlayan $Ca(OH)_2$ ile birleşerek kalsiyum sülfatı ($CaSO_4$), C_3A ile birleşerek Candlot tuzunu ($3CaO.Al_2O_3.3CaSO_4.32H_2O$) oluşturur (Aköz vd., 1995; Baradan vd., 2002). Candlot tuzu içerdiği su fazlası ile hacim artışına neden olduğundan betonda çatlak oluşur. Sülfat etkisi ortamda bulunan C_3A ve SO_3 miktarı ile ilgilidir (Tikalsky, 2002). Sülfat oluşumunu engellemek için sülfata dayanıklı çimentolar kullanılması uygundur (Neville, 2004; Topçu, 2006).

2.2.2 Alkali-silika reaktivitesi

Sertleşmiş betonun içerisinde bulunan alkaliler ile reaktif silika içeren agregalar arasında oluşan reaksiyon alkali-silika reaksiyonu (ASR) olarak tanımlanmaktadır (Erdoğan, 2003). ASR jellerinin su emme kapasitesi yüksektir. ASR sonucunda ASR jelleri oluşur ve bu jeller daha sonra ortamda bulunan nem ile birleşerek genleşmelere neden olur. ASR yavaş bir reaksiyondur ve genellikle beton yüzeyinde gerçekleşir (Erdoğan, 2003; Topçu and Sarıdemir, 2008). ASR sonucunda oluşan genleşmeler betonda çatlak ve bozulma oluşumuna neden olur (Bazant et al., 2000). ASR'e engel olabilmek için bağlayıcı madde içerisindeki alkali içeriği ve agregada bulunan reaktif silis miktarlarının düşük olması sağlanmalıdır (Topçu, 2006). Beton veya harçta puzolan ve mineral katkılar bağlayıcı olarak çimento kullanımını azaltacağından ASR'i önlemek için kullanılmaktadır (Topçu et al., 2008)

2.2.3 Sıcaklık etkisi

Beton yüksek sıcaklık altında diğer yapı malzemelerine göre daha dayanıklıdır. Betonarme yapılarda beton donatıyı sıcaklık altında belirli bir dereceye kadar koruyabilmektedir (Karakurt, 2008). Sınır değerler aşıldığında betonda çatlaklar gözlenir, aderans azalır (Lie and Irwin, 1993). Betonda sıcaklık artışı ile birlikte hidrate çimento içerisindeki serbest, kılcal ve jel suları ortamdan uzaklaşır. Fakat 100 ºC sıcaklıkta kılcal boşluklardaki su, 300 ºC sıcaklıkta CSH ara yüzey suyun bir kısmı kaybolur (Akman, 2007). Yapılan çalışmalarda 400-600 ºC sıcaklıklarda boşluk yapısının tamamen kurumaya başladığı ve CSH jellerinin parçalandığı görülmüştür (Topçu ve Demir, 2007). Yüksek sıcaklık etkisi sonucunda betonda renk değişimleri de gözlenebilmektedir (Topçu, 2006; Karakurt, 2008).

2.2.4 Donma-çözülme etkisi

Beton sıcaklığı yeterince azaldığında, kapiler boşluklarda bulunan su donmaktadır (Erdoğan, 2003). Beton yapısında bulunan boşlukların hacmi ve yapısı donma çözülmeyi etkileyen önemli unsurlardır. Kapiler ve jel boşluklarının miktarı ve

hacmi donmanın olacağı sıcaklığı belirlemede etkilidir (Karakurt, 2008). Çimento harcının içerisinde bulunan kılcal boşlukların donması sonucunda genleşme oluşur ve suyun hacmi % 9 artar (Erdoğan, 2003). Gerilmeler, çekme dayanımını aştığında çatlamalara ve ufalanmalara neden olur (Baradan vd., 2002). Beton içerisinde suyun kaçış hareketine izin verilmeyecek bir durum var ise hidrolik basınç artar ve belirli değerlerin üzerine çıktığında betonda hasar oluşur. Bunu önlemek için beton içerisinde hava sürükleyici katkılar yardımı ile kaçış bölgeleri oluşturulur. Sıcaklığın artması ile buz suya dönüşür ve gerilmelerin ortadan kalkmasına neden olur. Donma-çözülme olayının tekrarlanması betonda hasara yol açar ve beton özeliğini kaybeder. Bundan dolayı, yol betonları için donma-çözülme çevrimi önemli bir unsurdur ve hava sürükleyici katkıların kullanılması ile oluşacak hasarlar önlenebilir. Yol betonlarında önlem alınmadığı takdirde, donma-çözülme daha çok kaplama yüzeyi bölgesinde oluşur, ufalanmalara ve parçalanmalara neden olur (Topçu, 2006).

2.2.5 Aşınma etkisi

Beton yüzeyinde fiziksel etkiler sonucunda oluşan bozulmalara aşınma denir. Bu durum daha çok korumasız olan yol betonları, baraj betonları, tüneller, köprüler ve döşeme kaplamalarında görülür. Betonda aşınma suyun akışı sırasında oluşan sürtünme ile oluşabildiği gibi beton yüzeyinde fiziksel bir çarpma veya sürtünme ile de oluşabilmektedir. Bu etki beton yüzeyine oldukça zarar verebilir.

2.3 Rötre

Kuruma rötresi terimi, genellikle sertleşmiş beton özeliği olarak kullanılan bir terimdir. Sertleşmiş betonda oluşan su kaybı nedeniyle oluşan şekil değiştirmeyi ifade eder. Bünyesel rötre, beton hidratasyon sırasında kendi kendine kururken oluşan kuruma rötresinin özel bir halidir. Karbonatlaşma rötresi de, kuruma rötresinin hidrate olmuş çimentonun karbondioksitle reaksiyona girdiğinde oluşan bir başka türüdür. Kuruyan betonun hacimdeki değişim kaybedilen suyun hacmine eşit değildir. Daha önce gerçekleşen serbest suyun kaybı ya az miktarda rötreye neden olur ya da hiç hacim değişikliği gerçekleşmez. Kuruma devam ederken, emilmiş su da yapıdan kaybolur ve

bu durumda çimento pastasındaki hacim değişimi, jel partiküllerinin bütün yüzeylerinden 1 molekül kalınlıkta olan su kaybına eşittir. Bu nedenle, rötrenin temel nedeninin, jel yapısının kimyasal ve minerolojik özeliklerinden çok fiziksel yapısının önemli olduğu söylenebilir. Sertleşmiş betonun kuruma rötresi henüz tam olarak açıklanamamıştır. Rötre sınırlandırıldığında ya da kısıtlandığında betonda oluşan gerilmeler bağlı olarak çatlaklar ortaya çıkmaktadır. Beton tasarımında ve yapımında rötrenin dikkate alınmaması, elemanlarda rötre sırasında oluşan zorlamalardan kaynaklanan bazı çatlaklara ve görünüm bozukluklarına neden olmaktadır. Bu çatlaklardan yabancı maddelerin girişi ve bunun sonucu olarak beton dayanımı ve dayanıklılığında düşüşler oluşmaktadır. Bu nedenden dolayı, rötre oluşum mekanizmasının ve oluşan yan ürünlerin, ince agrega olarak kullanımının, rötreye etkisi konusunda literatürde yapılan çeşitli çalışmalar bulunmaktadır (Baradan vd., 2002).

Betonun rötresini çimento pastasının boşluk oranı, yaşı, hidratasyon derecesi, su-çimento oranı, kür sıcaklığı, çimento içeriği, su içeriği, katkıların özelikleri (kimyasal ya da mineral) gibi özelikleri, betonun agrega rijitliği, agrega içeriği, hacim-yüzey oranı, kalınlığı gibi özelikleri etkilemektedir. Ayrıca, göreceli nem, kuruma derecesi ve zamanı gibi çevresel koşullar da rötreyi etkilemektedir. Kuruma sırasında rötre kısıtlandığında betonda veya harçta çatlaklar oluşmaktadır. Bu çatlakları incelemek ve ölçmek için, optik ve elektron mikroskopları kullanımı gibi yöntemler geliştirilmektedir. Ancak, bu çatlakları oluşturmak ve optik bir mikroskopla ölçmek için en iyi ve ucuz yöntemin halka deneyi olduğu söylenebilir. Agrega, rötreyi kısıtlamaktadır. Buna karşın, özeliklerine bağlı olarak rötreyi ve rötre çatlaklarını da azalttığı bilinmektedir. Agreganın tipi, dayanımı, su emmesi, özgül yüzeyi, betonun veya harcın basınç dayanımı agreganın rötreyi azalmasında dikkate alınması gereken değişkenlerdir. Örneğin daha az su emmesi ve daha yüksek dayanımı olan agregalar, daha az dayanımlı ve daha yüksek su emmesine sahip agregalara göre kısıtlanmış rötreden kaynaklanan çatlakların oluşma süresini geciktirmekte ve en son ulaşılan çatlak genişliğini azaltmaktadır. Ayrıca, lastik ince agregası, atık lastiğin elastik ve mekanik özelikleri de betonun veya harcın rötre çatlaklarını geciktirmekte ve azaltmaktadır. Oluşan bu davranışın AKA kullanımı ile benzerliği geçmişte yapılan deneylerde incelenmiştir.

BÖLÜM 3

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Yapılan deneysel çalışmada asfalt kırığı agregalarının, doğal agrega yerine kullanımı ile beton ve harç numuneleri üretimi üç aşamada gerçekleşmiştir. Birinci aşamada, AKA içeren betonların fiziksel ve mekanik özeliklerini belirlemek için AKAB (asfalt kırığı agregalı beton), ikinci aşamada AKA içeren harçların fiziksel ve mekanik özeliklerini, çatlak oluşumu ve rötre değerlerini belirlemek için AKAH (asfalt kırığı agregalı harç), ve deneysel çalışmaların üçüncü aşamada ise dayanıklılık deneylerinin yapılması için farklı miktarlarda AKA içeren harç ve beton numuneleri üretilmiştir.

3.1 Deneylerde Kullanılan Malzemeler

Beton ve harç numunelerinin üretiminde numunelerin sahip olması istenilen özeliklere bağlı olarak değişen hammaddeler kullanılmıştır. Bunlar farklı çeşit ve oranlarda olmak üzere; Portland çimentosu, atık asfalt kırıkları, doğal agrega olarak kırma taş ve kırma kum, CEN standart kum, karışım suyu olarak Eskişehir şehir şebeke suyu, çimento ağırlığının % 0.03'ü kadar hava sürükleyici katkı maddesidir.

3.1.1. Portland çimentosu

Beton üretiminde ÇİMSA Eskişehir Çimento Fabrikası A.Ş. üretimi olan ve özelikleri Çizelge 3.1'de verilen CEM I 42.5R Portland çimentosu kullanılmıştır (TS EN 197-1, 2002). Harç üretiminde ise yine ÇİMSA (Eskişehir Çimento Fabrikası A.Ş.) üretimi olan, CEM II/B-M 32.5R Portland çimentosu kullanılmıştır. Kompoze çimento tipinin seçilmesinin amacı harç numunelerinin dayanıklılığını artırmak ve deneyler süresince AKA'nın olumsuz etkilerini en düşük seviyeye indirmektir. CEM II/B-M 32.5R Portland çimentosuna ait özelikler Çizelge 3.2'de verilmiştir (TS EN 197-1, 2002). Deneylerin üretim aşamasında 450 gr çimentoya karşılık, 1650 gr standart CEN kumu kullanılarak harç numuneleri üretilmiş, 7 ve 28 gün sürelerde kür uygulanmıştır.

Çizelge 3.1. CEM I 42.5R Portland çimentosunun özelikleri

Kimyasal bileşenler, %		**Fiziksel özelikler**	
SiO_2	20.96	Özgül ağırlık	3.15
Al_2O_3	5.58	Özgül yüzey (cm^2/g)	3315
Fe_2O_3	3.69	Basınç dayanımı, MPa	
CaO	63.97	2 Günlük	21.9
MgO	1.69	7 Günlük	38.3
SO_3	2.84	28 Günlük	45.1
Kızdırma kaybı	1.15		

Çizelge 3.2. CEM II/B-M 32.5R Portland çimentosunun özelikleri

Kimyasal bileşenler, %		**Fiziksel özelikler**	
SiO_2	31.53	Özgül ağırlık	2.85
Al_2O_3	7.06	Özgül yüzey (cm^2/g)	3574
Fe_2O_3	3.29	Basınç dayanımı, MPa	
CaO	48.89	2 Günlük	12.8
MgO	1.46	7 Günlük	26.9
SO_3	2.01	28 Günlük	42.5
Cl^-	0.27		
Kızdırma kaybı	4.55		

3.1.2 Karışım suyu

Harç ve beton numunelerinin üretiminde karışım suyu olarak Eskişehir şehir şebeke suyu kullanılmıştır (TS 1247, 1984). Karışım suyu özellikleri Çizelge 3.3'tedir.

Çizelge 3.3. Karışım suyu özelikleri

Parametreler	**Değerler**
pH	6.85
Kalsiyum $(Ca)^{++}$	58 mg/l
Magnezyum $(Mg)^{++}$	83 mg/l
Clorür $(Cl)^-$	46 mg/l
Sülfat $(SO_4)^{--}$	45 mg/l
Buharlaşma	434 mg/l

3.1.3 Asfalt kırığı agregası

Beton ve harç üretimlerinde Eskişehir Odunpazarı Belediyesinden elde edilen AKA kullanılmıştır. Deney sonuçlarına göre AKA birim ağırlıklarının genellikle 1940 ve 2300 kg/m^3 arasında değiştiği belirlenmiştir. Beton deneylerinde bu malzeme AKAI (4-16 mm) ve AKAII (16-31.5 mm) olarak iki sınıfa ayrılarak üretimde kullanılmıştır. Beton üretiminde kullanılan AKA'nın doygun yüzey kuru özgül ağırlığı 2.53 olarak laboratuvarda hesaplanmıştır. Harç deneylerinde ise AKA 0-4 mm boyutlarında öğütülerek ve elenerek kullanılmıştır (Şekil 3.1, Şekil 3.2).

a b

Şekil 3.1. Atık asfalt kırığı agregalarının öğütülmesi: a) öğütme cihazı, b) elek seti

a b

Şekil 3.2. Asfalt kırığı agregası: a) öğütme öncesi, b) öğütme sonrası

AKA'nın fiziksel ve mekanik özelikleri, elde edildiği kaplama içeriğine, yaşına ve durumuna göre farklılıklar göstermektedir, sıkıştırılmış birim ağırlığı 1600 ve 2000 kg/m^3, su emme oranı ise % 0.7-0.8 arasında değişmektedir. Çizelge 3.4'te AKA'nın fiziksel ve mekanik özelikleri verilmiştir. Şekil 3.3'te ise Eskişehir Odunpazarı Belediyesi depolarında saklanan atık asfalt kırıkları görülmektedir.

Çizelge 3.4. AKA'nın fiziksel ve mekanik özelikleri (AASHTO T22, 1997)

Özelik	**AKA özeliği**	**Değerlerin dizilimi**
Fiziksel özelikler	Özgül ağırlık	1940-2300
	Nem içeriği	Normal: % 5 En çok: % 7-8
	Asfalt içeriği	Normal: % 4.5-6 En çok: % 3-7
	Asfalt penetrasyonu	Normal: 10-80 (25 °C)
	Kesin viskozite veya geri kazanılan asfalt çimentosu	Normal: 4000-25000 (60 °C)
Mekanik özelikler	Sıkıştırılmış birim ağırlık	1600-2000 kg/m^3
	Kaliforniya taşıma oranı	% 100 AKA: % 20-25 % 40 AKA ve % 60 Doğal agrega: %150

a b

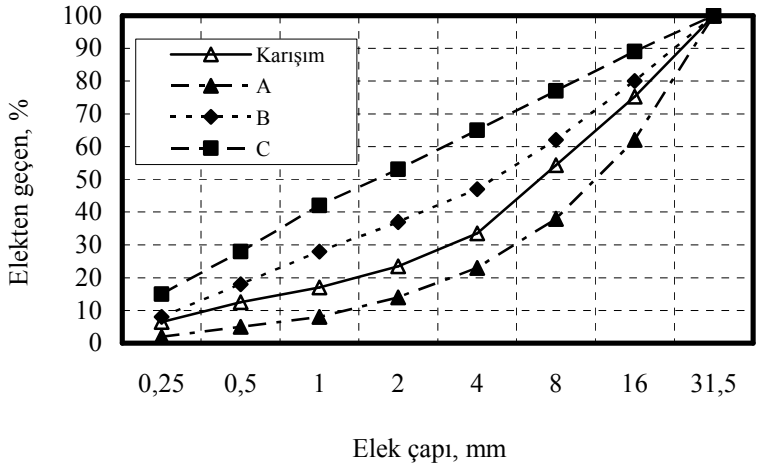
Şekil 3.3. Atık asfalt kırığı agregaları: a) numune, b) freze

3.1.4 Agrega

Beton numunelerin üretiminde doğal agrega olarak Osmaneli Bölgesi kumu (K) 0-4 mm ve Söğüt Bölgesi kırmataşları (KI ve KII) sırası ile 4-16 ve 16-31.5 mm boyutlarında alınarak kullanılmıştır. Beton üretiminde en büyük tane boyutu 31.5 mm olarak belirlenmiştir.

Üretimde kullanılan agregaların elek analizi yapılmış ve granülometri eğrisinin Şekil 3.4'te görüldüğü gibi standartlara elverişli olduğu belirlenmiştir (TS 707, 1980). Deneyler sonucunda, kullanılan agrega karışımının incelik modülü 3.23 olarak belirlenerek bu değere göre hesaplamalar yapılmıştır.

Kullanılan agregaların birim ve özgül ağırlıklarının standartlara uygun olduğu görülmüştür (TS 706 EN 12620, 2003). Harç numunelerinin üretiminde ise Şekil 3.5'te görüldüğü gibi Set Çimento Sanayi ve Ticaret A.Ş. Trakya Çimento Fabrikası tarafından üretilen standartlara uygun olan CEN standart kumu kullanılmıştır (TS EN 196-1, 2002; TS 2717 EN 13139, 2005). Laboratuvarda yapılan harç numunelerinin üretimlerinde harç agregası olarak standart kum kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan CEN standart kumu Eskişehir Osmangazi Üniversitesi olanaklarından sağlanmıştır.



Şekil 3.4. Beton agregası karışımı için granülometri eğrisi

a b

Şekil 3.5. CEN standart kum: a) kutu içerisinde, b) poşet içerisinde

3.1.5 Katkı

Deneylerde standartlara uygun olarak üretilmiş olan, çimento ağırlığının % 0.03'ü kadar hava sürükleyici katkı maddesi kullanılmıştır (TS 3456, 1984; ASTM C 260-00, 2000). Beton numunelerde hava hacmi miktarı % 1 olarak belirlenmiştir. Yol betonlarında donma-çözülmeye karşı kullanılma gereksinimi bulunmaktadır. AKA'nın

yapısında bulunan bitüm betonda su emme kapasitesini düşürmektedir. Bu nedenle, deneylerde AKAH numunelerin üretilmesi sırasında hava sürükleyici veya akışkanlaştırıcı katkıların kullanımına gerek duyulmamıştır.

3.1.6 Sodyum hidroksit (NaOH)

Alkali-silika reaktivitesinin belirlenmesi için, deneylerde harç numuneleri % 4 oranında sodyum hidroksit çözeltisinde bekletilmiştir. Sodyum hidroksit beyaz renkli ve katı halde bulunan, erime noktası 320 ºC olan, suda ısı açığa çıkararak çözünen kimyasal bazik bir maddedir. Mineral katkılar ile birlikte kullanıldığında bağlayıcı özelik kazandırır fakat alkali-silika reaktivitesi oluşturduğu için betona zarar verir.

3.1.7 Sodyum sülfat (Na_2SO_4)

Yol betonlarında sülfat etkisinin betona verdiği zararın belirlenmesi amacıyla üretilen beton numuneler sodyum sülfat çözeltisinde bekletilmiştir. Deneylerde sodyum sülfat çözeltilerde % 5 oranında kullanılarak betonda oluşabilecek sülfat etkisi deneyler ile araştırılmış ve sonuçlar yorumlanmıştır.

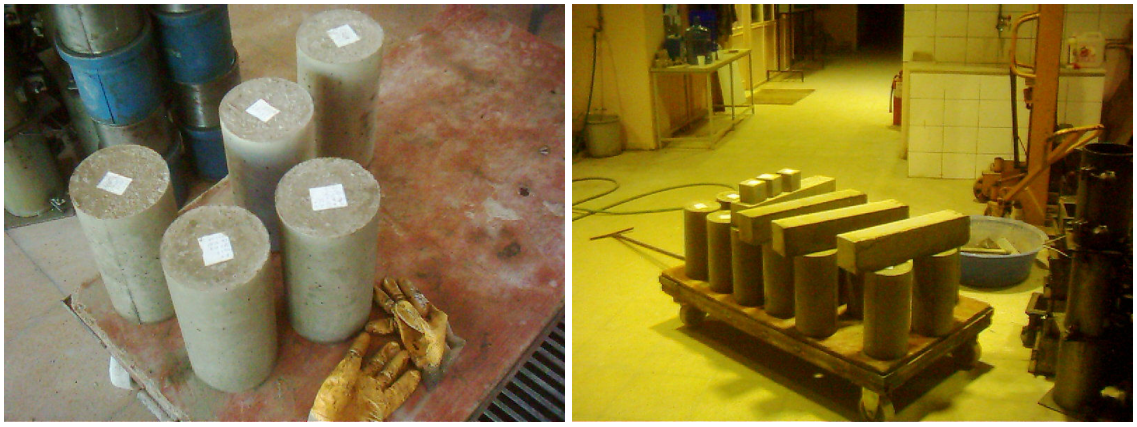
3.2 Beton Numunelerinin Hazırlanması

Deneylerde karışım oranları mutlak hacim yöntemi ile belirlenmiş ve Portland çimentosu 300, 350 ve 400 kg/m^3 dozajlar olarak kullanılmıştır. Laboratuvarda üretilen taze betonlar 60 dm^3 hacimli mikserde karıştırılarak, yine laboratuar ortamında vibrasyon cihazı ile sıkıştırılmıştır (Şekil 3.6).

CEM I 42.5R Portland çimentosu, kırma kum (K), 4-16 mm (KI), 16-31.5 mm (KII) tane boyutundaki kırmataşlar ve bu iki farklı kırmataş yerine % 0, 25, 50, 75 ve 100 oranlarında AKA kullanılarak 150x150x150 mm küp, Ø150x300 mm silindir, 100x100x500 mm boyutlu prizmatik, 70x70x70 mm küp beton numuneleri üretilmiştir (Şekil 3.7). Numuneler farklı amaçlarla kullanılmıştır.

a b

Şekil 3.6. Kullanılan gereçler: a) numune kalıpları, b) beton mikseri ve vibratör



a b

Şekil 3.7. AKA ile üretilen beton numuneler: a) silindir, b) prizma

3.2.1 Üretilecek beton numuneler için hacim ve ağırlık hesabı

Beton karışımları için ince ve iri agrega karışım oranları hesaplanırken doygun yüzey kuru özgül ağırlıklar kullanılmıştır (Çizelge 3.5). Karışımlardaki malzeme hacim ve ağırlık oranları Çizelge 3.7 ve Çizelge 3.8'de verilmiştir. % 1 hava miktarlı 1 m^3 beton karışımı için hacimce agrega hesabı Denklem 3.1-3.6'da verilmiştir.

Çizelge 3.5. Agregaların özgül ağırlıkları

Özgül ağırlıklar	
Kum özgül ağırlığı	2.60
Kırmataş I özgül ağırlığı (KI)	2.70
Kırmataş II özgül ağırlığı (KII)	2.70
Asfalt kırığı özgül ağırlığı (AKA)	2.53

Çizelge 3.6. AKAB hacimce agrega oranları, %

Hacimce agrega oranları	
Kum	% 40
Kırmataş I (KI)	% 30
Kırmataş II (KII)	% 30

$$V_T = V_Ç + V_S + V_H + V_A = 1000\,\mathrm{dm}^3 \tag{3.1}$$

300 dozaj için;

$$V_T = (300/3.15) + (150/1) + 10 + V_A = 1000\,\mathrm{dm}^3 \tag{3.2}$$

$$V_A = 744.76\,\mathrm{dm}^3 \tag{3.3}$$

350 dozaj için;

$$V_T = (350/3.15) + (175/1) + 10 + V_A = 1000 \text{ dm}^3 \quad (3.4)$$

$$V_A = 703.89 \text{ dm}^3 \quad (3.5)$$

400 dozaj için;

$$V_T = (400/3.15) + (200/1) + 10 + V_A = 1000 \text{ dm}^3 \quad (3.6)$$

$$V_A = 663.01 \text{ dm}^3$$

V_T = Toplam hacim (dm^3)

V_A = Agrega hacmi (dm^3)

$V_Ç$ = Çimento hacmi (dm^3)

V_S = Su hacmi (dm^3)

V_H = Hava boşluğu hacmi (dm^3)

Çizelge 3.7. AKAB hacimce agrega miktarları, dm^3

300 Dozaj 4-16 mm					
Agrega (dm^3)	**% 0**	**% 25**	**% 50**	**% 75**	**% 100**
V_{KUM}	297.904	297.904	297.904	297.904	297.904
$V_{K\ I}$	223.428	165.571	111.714	55.857	0
$V_{K\ II}$	223.428	223.428	223.428	223.428	223.428
V_{AKA}	0	55.857	111.714	165.571	223.428
350 Dozaj 4-16 mm					
Agrega (dm^3)	**% 0**	**% 25**	**% 50**	**% 75**	**% 100**
V_{KUM}	281.556	281.556	281.556	281.556	281.556
$V_{K\ I}$	211.167	158.375	105.584	52.792	0
$V_{K\ II}$	211.167	211.167	211.167	211.167	211.167
V_{AKA}	0	52.792	105.584	158.375	211.167
400 Dozaj 4-16 mm					
Agrega (dm^3)	**% 0**	**% 25**	**% 50**	**% 75**	**% 100**
V_{KUM}	265.206	265.206	265.206	265.206	265.206
$V_{K\ I}$	198.905	149.179	99.452	49.726	0
$V_{K\ II}$	198.905	198.905	198.905	198.905	198.905
V_{AKA}	0	49.726	99.452	149.179	198.905
300 Dozaj 16-31.5 mm					
Agrega (dm^3)	**% 0**	**% 25**	**% 50**	**% 75**	**% 100**
V_{KUM}	297.904	297.904	297.904	297.904	297.904
$V_{K\ II}$	223.428	165.571	111.714	55.857	0
$V_{K\ I}$	223.428	223.428	223.428	223.428	223.428
V_{AKA}	0	55.857	111.714	165.571	223.428
350 Dozaj 16-31.5 mm					
Agrega (dm^3)	**% 0**	**% 25**	**% 50**	**% 75**	**% 100**
V_{KUM}	281.556	281.556	281.556	281.556	281.556
$V_{K\ II}$	211.167	158.375	105.584	52.792	0
$V_{K\ I}$	211.167	211.167	211.167	211.167	211.167
V_{AKA}	0	52.792	105.584	158.375	211.167
400 Dozaj 16-31.5 mm					
Agrega (dm^3)	**% 0**	**% 25**	**% 50**	**% 75**	**% 100**
V_{KUM}	265.206	265.206	265.206	265.206	265.206
$V_{K\ II}$	198.905	149.179	99.452	49.726	0
$V_{K\ I}$	198.905	198.905	198.905	198.905	198.905
V_{AKA}	0	49.726	99.452	149.179	198.905

Çizelge 3.8. AKAB karışım değerleri, kg/m^3

Karışım, kg/m^3 (D=Dozaj)	K (0-4)	KI (4-16)	AKAI (4-16)	KII (16-31.5)	AKAII (16-31.5)	S (su)	Ç (çimento)
300 D kont.	775	603	0	603	0	150	300
300 D % 25	775	452	141	603	0	150	300
300 D % 25	775	603	0	452	141	150	300
300 D % 50	775	301	282	603	0	150	300
300 D % 50	775	603	0	301	282	150	300
300 D % 75	775	150	423	603	0	150	300
300 D % 75	775	603	0	150	423	150	300
300 D % 100	775	0	564	603	0	150	300
300 D % 100	775	603	0	0	564	150	300
350 D kont.	732	570	0	570	0	175	350
350 D % 25	732	427	133	570	0	175	350
350 D % 25	732	570	0	427	133	175	350
350 D % 50	732	284	267	570	0	175	350
350 D % 50	732	570	0	284	267	175	350
350 D % 75	732	142	400	570	0	175	350
350 D % 75	732	570	0	142	400	175	350
350 D % 100	732	0	534	570	0	175	350
350 D % 100	732	570	0	0	534	175	350
400 D kont.	690	537	0	537	0	200	400
400 D % 25	690	403	125	537	0	200	400
400 D % 25	690	537	0	403	125	200	400
400 D % 50	690	268	251	537	0	200	400
400 D % 50	690	537	0	268	251	200	400
400 D % 75	690	134	377	537	0	200	400
400 D % 75	690	537	0	134	377	200	400
400 D % 100	690	0	503	537	0	200	400
400 D % 100	690	537	0	0	503	200	400

3.3. Harç Numunelerinin Hazırlanması

Deneylerde, AKAH numunelerinin karışım oranları ağırlıkça olarak hesaplamıştır. Çimento ve agrega miktarları Türk Standartlarına göre belirlenmiştir (TS EN 196-1, 2002). Deneylerde, 450 gr CEM II/B-M 32.5R Portland çimentoya karşılık 1650 gr standart CEN kumu kullanılarak numuneler üretilmiştir. Karışımlardaki malzeme hacim ve ağırlık oranları Çizelge 3.9 ve Çizelge 3.10'da verilmiştir.

Çizelge 3.9. AKAH hacimce karışım oranları

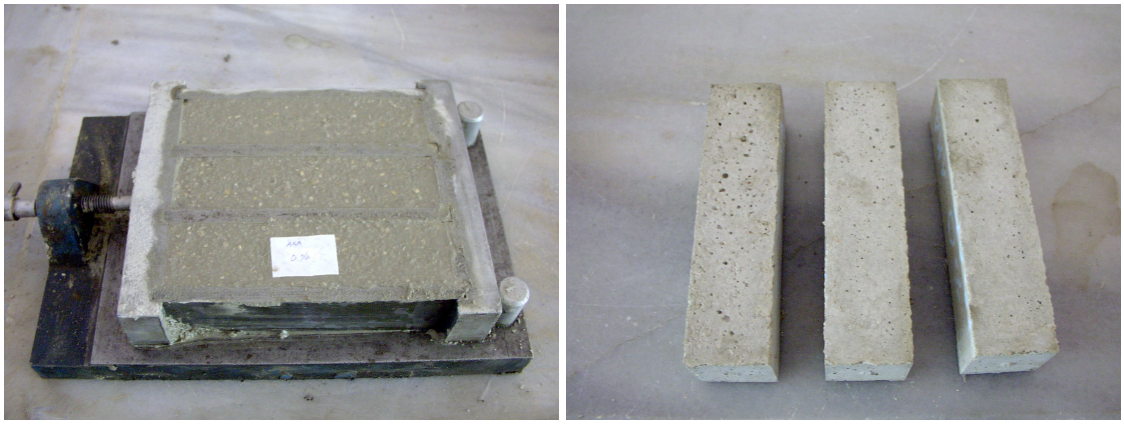
Deneyler	Numune sayısı	Boyut, mm	Hacim, m³	Toplam hacim, m³
Basınç dayanımı	6	40x40x40	Eğilme dayanımından elde edildi	
Eğilme dayanımı	6	40x40x160	0.0002560	0.0015360
Elastisite modülü	6	150x150x150	0.0033750	0.0202500
Serbest rötre	2	25x25x285	0.0001782	0.0003563
Kısıtlanmış rötre	2	Halka	0.0043872	0.0087745

Çizelge 3.10. AKAH için ağırlıkça karışım oranları, kg/m^3

AKAH, %	Kum, kg	Çimento, kg	Su, kg	AKAH, kg
0	1650	450	225	0
10	1485	450	225	165
20	1320	450	225	330
30	1155	450	225	495
40	990	450	225	660

Laboratuvarda üretilen taze harç, 60 dm^3 hacimli mikserde karıştırılıp, laboratuvarda vibrasyon uygulanmıştır. CEM II/B-M 32.5R Portland çimentosu, CEN standart kumu ve 0-4 mm boyutundaki AKA % 0, 25, 50, 75 ve 100 oranlarında kullanılarak 150x150x150 mm küp, 40x40x160 mm ve 25x25x285 mm boyutlu prizma ve halka numuneleri üretilerek, basınç dayanımı için gerekli numuneler eğilme dayanımı sonucunda artan numunelerden elde edilmiştir (Şekil 3.8, 3.9, 3.10).

Halka numunelerinin boyutları; en: 35 mm, yükseklik: 140 mm, çelik kalınlığı: 25 mm olarak belirlenmiştir. 25x25x285 mm boyutlu prizma numuneler önce 20 ºC sıcaklık ve % 100 bağıl nemde (RH) 24 saat süresince bekletilirken daha sonra 20 ºC sıcaklık ve % 50 bağıl nemde 60 gün süresince bekletilmiştir. Üzerlerinde mekanik deneyler uygulanacak olan 40x40x160 mm ve 150x150x150 mm boyutlu numuneler ise kirece doygun 20 ºC sıcaklıktaki suda 7 ve 28 gün kür edilerek bekletilmiştir.

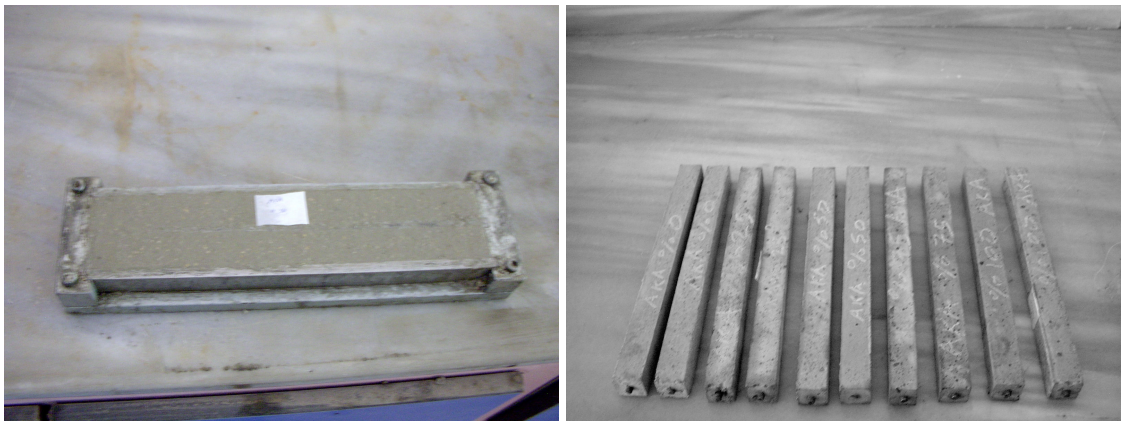


a b

Şekil 3.8. AKAH 40x40x160 mm prizmatik numuneler: a) taze, b) sertleşmiş

a b

Şekil 3.9. AKAH 150x150x150 mm prizmatik numuneler: a) taze, b) sertleşmiş



a b

Şekil 3.10. AKAH 25x25x285 mm prizmatik numuneler: a) taze, b) sertleşmiş

Kısıtlanmış rötre deneylerinde ise halka kalıbının dış çeperi harç dökümünden 24 saat sonra çıkarılmıştır (Şekil 3.11). Hazırlanan halka numunesinin üst tarafından su kaybını önlemek için silikon ile numunenin üzeri kaplanmıştır. Deneylerde çatlak oluşumu 60 gün boyunca incelenerek, çatlak uzunluğu ve genişliği her gün kaydedilmiştir. Harç numunelerinin çatlak açıklığı numunenin üst, orta ve alt tarafında oluşan çatlak genişliklerinin ölçülerek ortalamasının alınması şeklinde hesaplanmıştır. 40x40x160 ve 150x150x150 mm prizmatik numunelerde 7 ve 28 günlerin sonunda mekanik ve fiziksel deneyler yapılmıştır (ASTM C 349-02, 2002). Birim ağırlık ve ultrases geçiş hızı hasarsız deneyler ile basınç dayanımı ve eğilme dayanımı ise hasarlı deneyler sonucunda belirlenmiştir. Deneyler sonucunda, elastisite modülü ise 150x150x150 mm numuneler üzerinde hesaplanmıştır (ASTM C 469-02, 2002).

a b

Şekil 3.11. AKAH halka numuneleri: a) taze, b) sertleşmiş

3.4. Dayanıklılık Deneyleri

Dayanıklılık deneyleri için standartlara uygun olarak numuneler üretilerek sülfat direnci, alkali-silika reaktivitesi, donma-çözülme direnci ve yüksek sıcaklık etkisi araştırılarak sonuçlar değerlendirilmiştir.

3.4.1 Sülfat etkisi

Sülfat etkisinin belirlenmesi için kullanılan en yaygın yöntem ASTM C 1012 standardında bulunmaktadır. Çalışmada % 10, 20, 30 ve 40 oranlarında 0-4 mm boyutlarında öğütülerek kullanılan AKA ile 25x25x285 mm boyutlarında harç çubukları üretilmiştir. Her AKAH serisi için üç adet üretilen numunelere ilave olarak basınç ve eğilme dayanım değerlerinin belirlenebilmesi için 40x40x160 mm boyutlarında prizmatik harç numuneleri üretilmiştir. Harç çubuğu ve prizma numuneler ilk 24 saat 35±3 °C sıcaklıkta % 98 bağıl nemli kür kabininde bekletilmiştir. Kür sonunda kalıplardan çıkarılan harçlar, 20 MPa basınç dayanımına ulaşana kadar kirece doygun kür havuzunda 23±1 °C sıcaklıktaki su içinde bekletilmiştir (ASTM C 1012, 2004).

Daha sonra 25x25x285 mm harç çubukları ve prizmalar standartta belirtilen ağırlıkça % 5 Na_2SO_4 içeren çözeltilerde bekletilmiştir. Ortam sıcaklığı 23 °C olan çözelti içerisine numuneler konulmadan önce 0.001 mm hassasiyetli komparatör ile 25x25x285 mm boyutlu harç çubuklarında ilk ölçümler yapılmıştır. Sülfat çözeltisi derişimin sabit kalabilmesi için 15 günde bir Na_2SO_4 çözeltisi ile yenilenmiştir. Deneylerde, % 5 Na_2SO_4 içeren çözelti içerisinde bekletilen numunelerin boy değişimleri mekanik özelikleri ve ultrases geçiş hızları altı ay boyunca ölçülmüştür.

3.4.2 Alkali-silika reaktivitesi

Deneysel çalışmalarda agrega olarak % 10, 20, 30 ve 40 oranlarında AKA ve CEN standart kum karışımı kullanılmıştır. ASTM C 1260'a göre 25x25x285 mm boyutlarında standart harç çubukları 0.50 S/Ç oranında üretilmiştir. Harç çubukları (25x25x285 mm) neme doygun kür kabininde 24 saat süreyle bekletilmiştir. Kalıplarından ayrılan numuneler 80±2 °C sıcaklıkta hazırlanan su içerisine konularak 24 saat süreyle ikinci kür uygulanmıştır (ASTM C 1260, 2007).

Sıcak su küründen alınan harç çubuklarının boyları 0.001 mm hassasiyetli komparatörde ilk okumaları yapılarak referans boyları ölçülmüştür. Sıfır okumaları yapılan harç çubukları daha sonra ağırlıkça % 5 NaOH içeren 80±2 °C sıcaklıktaki

çözelti içerisine konularak 14 gün süreyle bekletilmiştir. NaOH çözeltisi içerisinde kür edilen harç çubukları üzerinde sırasıyla 4, 8 ve 14. günde komparatör okumaları yapılarak toplam 16 günlük deney tamamlanmıştır. Harç çubuklarının ortalama boy uzamaları yüzde cinsinden Denklem 3.7 ile hesaplanmıştır.

Deney sonundaki değerlendirmede % 0.10 veya daha düşük genleşme zararsız, % 0.10-0.20 arası potansiyel hasara yol açabilecek genleşme ve % 0.20'nin üzerinde ASR açısından zararlı genleşme olarak tanımlanır.

$$\Delta l = \frac{L_x - L_i}{L_g} \times 100 \tag{3.7}$$

$\Delta l =$ % boy değişimi

$L_x =$ harç çubuğunun komparatör okuması

$L_i =$ harç çubuğunun sıfır okuması

$L_g =$ nominal ölçü boyu (285 mm)

3.4.3 Donma-çözülme etkisi

Çalışmada % 10, 20, 30 ve 40 oranlarında 0-4 mm boyutlarında öğütülerek kullanılan AKA ile üretilen 70x70x70 mm boyutlarında harç numuneleri üzerinde donma-çözülme deneyleri yapılmıştır (TS 3449, 1980).

Üretilen numuneler laboratuar ortamında 28 gün boyunca kirece doygun 20 °C sıcaklıkta kür havuzunda bekletilmiştir. Daha sonra havuzdan alınan numunelerin kuru ağırlığının belirlenmesi için etüvde 24 saat süreyle 100±5 °C sıcaklıkta kurutulan numunelerin hacimce su emme değerleri belirlenmiştir.

Yeniden suya doygun hale getirilen harç numuneleri -20 °C sıcaklıkta derin dondurucuda 2 saat süreyle dondurulduktan sonra 20 °C sıcaklıktaki su içerisinde 2 saat süreyle çözülmeye bırakılmıştır. Bir donma-çözülme çevrimini oluşturan süreç 100 defa tekrarlanarak farklı harç numunelerinin donma-çözülme direnci üzerindeki etkiler belirlenmiştir. Donma-çözülme deneyi sonunda dinamik elastisite modülü, basınç dayanımı ve ağırlık kayıplarında oluşan değişim belirlenerek sonuçlar incelenmiştir.

3.4.4 Sıcaklık etkisi

AKAH'ın farklı sıcaklıklar altında göstereceği direnç deneyler ile belirlenmiştir. Üretilen harç numunelerinde sıcaklık etkisi sonrası oluşan fiziksel ve mekanik özeliklerdeki farklılıklar araştırılmıştır.

Standart kum kullanılarak standarda göre farklı AKA oranları ile üretilen 40x40x160 mm boyutlarındaki harç numuneleri 28 gün kirece doygun kür havuzunda 20±2 °C sıcaklıkta kür edilmiştir (TS EN 196-1, 2002).

Daha sonra harç numuneleri sırasıyla 100, 300, 450 ve 600 °C sıcaklıkta 3 saat süreyle 1200 °C sıcaklık kapasiteli yüksek sıcaklık fırınında kür edilmiştir.

Harç numuneleri yüksek sıcaklık fırınında standarda göre ısınma hızı 6 °C/dk olacak şekilde ısıtılmıştır (TS EN 1363-1, 2001). Bu işlem sonunda numuneler 24 saat süreyle havada yavaş soğumaya bırakılmıştır (Topçu, 2006; Karakurt, 2008).

Havada soğutma işlemi, fırının arabalı rafının fırının soğumasından sonra dışarıya çıkarılmasıyla gerçekleştirilmiştir. Yüksek sıcaklık uygulamasından sonra harç numunelerinin birim ağırlık, ultrases geçiş hızı, eğilme dayanımı ve basınç dayanımı özelikleri gerekli deney yöntemleriyle belirlenerek ayrıntılı olarak yorumlanmıştır.

Böylece yüksek sıcaklık etkisinde kalan farklı çimentolarla üretilmiş harç numunelerinin fiziksel ve mekanik özeliklerinde oluşan değişim incelenerek karşılaştırmalar yapılmıştır ve sonuçlar irdelenmiştir (Topçu, 2006; Karakurt, 2008).

BÖLÜM 4

DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Bu çalışmada farklı çimento dozajları ve yerine kullanım oranları belirlenerek AKAB (asfalt kırığı agregalı beton) numuneleri üretilmiştir. Üretilen taze ve sertleşmiş beton numuneleri üzerinde hasarlı ve hasarsız deneyler yapılarak AKAB'ın mekanik ve fiziksel özelikleri incelenmiştir. Her seri için taze beton deneylerinden taze birim ağırlık ve çökme deneyleri laboratuvar ortamında gerçekleştirilmiştir. Üretilen beton numuneler standart kür koşullarında kirece doygun 23±1 ºC suda 28 gün bekletilmiştir. Sertleşmiş betonlar üzerinde 28 gün sonunda hasarsız deneyler ile ultrases geçiş hızı, hasarlı deneylerden basınç dayanımı, yarmada çekme ve eğilme dayanımı belirlenmiştir (TS EN 12350, 2002; TS EN 12390, 2002). Ayrıca çalışmada üretilen beton numunelerin yüzey aşınma değerleri laboratuvarda uygulanan Böhme diski deneyi ile Türk standartlarına göre belirlenerek hesaplamalar yapılmıştır. Harç deneylerinde harç numunelerinin sertleşmiş birim ağırlık belirlenmiştir. Üretilen harç numuneleri standartlara uygun kür koşullarında 7 ve 28 gün bekletilmiştir. Sertleşmiş harç numuneleri üzerinde 7 ve 28 günler sonunda hasarsız deneyler yardımı ile ultrases geçiş hızı, hasarlı deneylerden basınç dayanımı, yarmada çekme, eğilmede çekme dayanımı ve aşınma değerleri belirlenmiştir (TS EN 12350, 2002; TS EN 12390, 2002). Ayrıca halka harç numuneleri üzerinde kısıtlanmış rötre ve çatlak oluşumu, prizmatik numunelerde ise serbest rötre incelenerek optik dürbünle okumalar yapılmıştır.

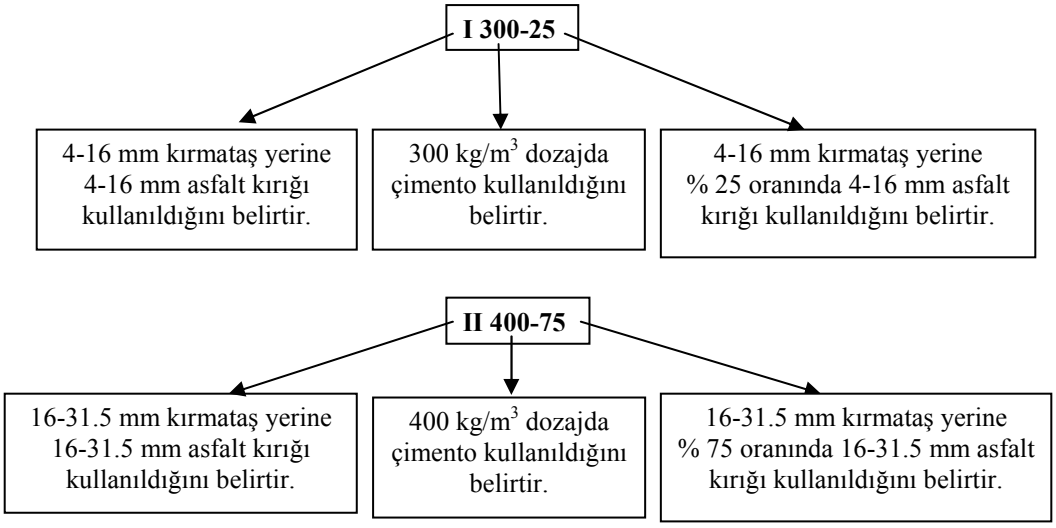
4.1 Birim Ağırlık

AKA'nın boşluklu yapısı nedeniyle üretilen beton numunelerinin taze birim ağırlıklarında düzensiz değerler gözlenmiştir. Yapılan çalışmalarda I 400-25 (4-16 mm AKA agrega: K; çimento dozajı: 400; agrega yerine kullanım oranı: % 25) serisi diğer serilerle karşılaştırıldığında en büyük taze birim ağırlık 2391 kg/m^3 değerini aldığı görülmüştür (Şekil 4.1). AKA'nın birim ağırlığı sahip olduğu bitümlü malzemeden dolayı kırmataşa göre daha düşüktür, bu nedenden AKA kullanım oranı arttıkça betonun

birim ağırlığında bir miktar azalma görülmekle birlikte bu durum dikkate değer görülmemiştir (Çizelge 4.1). Yapılan harç deneylerinde, 7 ve 28 günlük numunelerin sertleşmiş birim ağırlıkları AKA yerine kullanım oranının artması ile azalmıştır. Üretilen harç numunelerinin birim ağırlığı genelde kontrol betonu birim ağırlığında düşüktür. Bu durum, asfalt kırıklarının sahip olduğu birim ağırlığın doğal agregaya göre daha düşük olmasından ve boşluklu yapısından kaynaklanmaktadır.

Çizelge 4.1. AKAB taze birim ağırlıkları, kg/m^3

% 0	**% 25**	**% 50**	**% 75**	**% 100**
II300-0	II300-25	II300-50	II300-75	II300-100
2382	2361	2334	2321	2304
II350-0	II350-25	II350-50	II350-75	II350-100
2385	2374	2353	2334	2317
II400-0	II400-25	II400-50	II400-75	II400-100
2395	2390	2387	2352	2331
I300-0	I300-25	I300-50	I300-75	I300-100
2380	2366	2358	2332	2312
I350-0	I350-25	I350-50	I350-75	I350-100
2392	2372	2369	2336	2325
I400-0	I400-25	I400-50	I400-75	I400-100
2403	2391	2374	2359	2336



Şekil 4.1 AKAB serilerinin tanımlanması

4.2 Çökme

Yapılan beton deneyleri sonucunda, AKA kullanım oranı arttıkça, taze betonda çökme değerinin de arttığı görülmüştür. Deneylerde AKA'nın su emme kapasitesinin düşük olmasından dolayı akışkanlaştırıcı katkı kullanılmamıştır. Deneylerde üretilen kontrol betonu haricinde, en küçük ve en büyük çökme değerleri II 400-25 ve II 300-100 serileri için sırası ile 6.5 ve 15 cm olarak belirlenmiştir (Çizelge 4.2).

Çizelge 4.2. AKAB çökme değerleri, cm

% 0	**% 25**	**% 50**	**% 75**	**% 100**
II300-0	II300-25	II300-50	II300-75	II300-100
7	7	10	11	15
II350-0	II350-25	II350-50	II350-75	II350-100
6	8	8	10	13
II400-0	II400-25	II400-50	II400-75	II400-100
6	6.5	7	9	11
I300-0	I300-25	I300-50	I300-75	I300-100
7	8	10	10	14
I350-0	I350-25	I350-50	I350-75	I350-100
7	9	9	10	12
I400-0	I400-25	I400-50	I400-75	I400-100
6	7	8	9	10

4.3 Ultrases Geçiş Hızı

Beton deneylerinde ultrases geçiş hızı Ø150x300 mm silindir numuneler üzerinde belirlenmiştir. Çizelge 4.3'te görüldüğü gibi AKA'nın sahip olduğu farklı boşluklu yapılardan dolayı serilerde farklı ultrases geçiş hızları Denklem 4.1 ile elde edilmiştir. Harç deneylerinde ise ultrases geçiş süresi 40x40x160 mm prizmatik numuneler üzerinde belirlenmiştir. Üretilen, 7 ve 28 günlük harç numunelerinde ise ultrases geçiş hızları birbirine paralel olarak azalmaktadır. Ayrıca üretilen, 7 ve 28 günlük % 100 asfalt kırığı agregası oranlı harç numunelerinde yaklaşık olarak sırası ile % 23 ve % 20 azalmalar gözlenmiş ve bu durum irdelemeler bölümünde açıklanmıştır.

Çizelge 4.3. AKAB ultrases geçiş hızları, km/s

% 0	% 25	% 50	% 75	% 100
II300-0	II300-25	II300-50	II300-75	II300-100
4.27	4.23	3.64	3.39	3.08
II350-0	II350-25	II350-50	II350-75	II350-100
4.36	4.31	3.75	3.51	3.17
II400-0	II400-25	II400-50	II400-75	II400-100
4.51	4.33	3.78	3.58	3.23
I300-0	I300-25	I300-50	I300-75	I300-100
4.33	4.27	3.71	3.44	3.11
I350-0	I350-25	I350-50	I350-75	I350-100
4.41	4.35	3.82	3.67	3.35
I400-0	I400-25	I400-50	I400-75	I400-100
4.57	4.37	3.87	3.71	3.39

$$V = (S/t)10^6 \tag{4.1}$$

V = Hız (m/sn)

S = Uzaklık (m)

t = Zaman (zaman, mikrosaniye)

(Erdoğan, 2003)

4.4 Elastisite Modülü

Çizelge 4.4'te görüldüğü gibi, beton numunelerin ultrases geçiş hızları ve birim ağırlıkları dikkate alınarak dinamik elastisite modülü değerleri hesaplanmıştır. Hesaplamalar Denklem 4.2'e göre yapılarak hesaplamaların sonuçları belirlenmiştir. Harç numunelerinde ise deneysel elastisite modülleri ve tokluk değerleri 28 günlük AKAH numuneleri üzerinde yapılan deneyler sonucunda elde edilmiştir. Numunelerde AKA oranları arttıkça elastisite modüllerinin sistematik olarak azaldığı belirlenmiştir.

$$E_d = \frac{V^2 n(1+\mu)(1-2\mu)}{(1-\mu)}(10^{-6}) \tag{4.2}$$

(Erdoğan, 2003)

$E_d = E_{dinamik}$ (MPa)

$\mu = 0.3$ (Poisson oranı, düşük kalitedeki betonlar için)

n = Beton birim ağırlığı (kg/m^3)

V = Puls hızı (m/sn)

Çizelge 4.4. AKAB ultrases geçiş hızları kullanılarak hesaplanan E_d değerleri, GPa

% 0	**% 25**	**% 50**	**% 75**	**% 100**
II300-0	II300-25	II300-50	II300-75	II300-100
32.27	31.39	22.98	19.82	16.24
II350-0	II350-25	II350-50	II350-75	II350-100
33.69	32.77	24.59	21.37	17.30
II400-0	II400-25	II400-50	II400-75	II400-100
36.19	33.29	25.34	22.40	18.07
I300-0	I300-25	I300-50	I300-75	I300-100
33.15	32.05	24.11	20.50	16.61
I350-0	I350-25	I350-50	I350-75	I350-100
34.56	33.35	25.69	23.38	19.39
I400-0	I400-25	I400-50	I400-75	I400-100
37.29	33.93	26.42	24.12	19.95

4.5 Yarmada Çekme Dayanımı

Deneyler Ø150x300 mm silindir beton numuneler üzerinde, yükleme hızı 0.05 MPa/sn olarak yapılmıştır. Çizelge 4.5'de, AKAB'ın yarmada çekme dayanımı AKA kullanım oranı arttıkça azalmıştır, çalışmada Denklem 4.3'ten yararlanılmıştır.

$$\sigma_{yç} = (2P)/(\pi LD) \qquad (4.3)$$

(Erdoğan, 2003)

$\sigma_{yç}$ = Yarmada çekme dayanımı (Kgf/cm^2)

P = Kırılma basınç yükü (kgf)

L = Silindir numune boyu (cm)

D = Silindir numune çapı (cm)

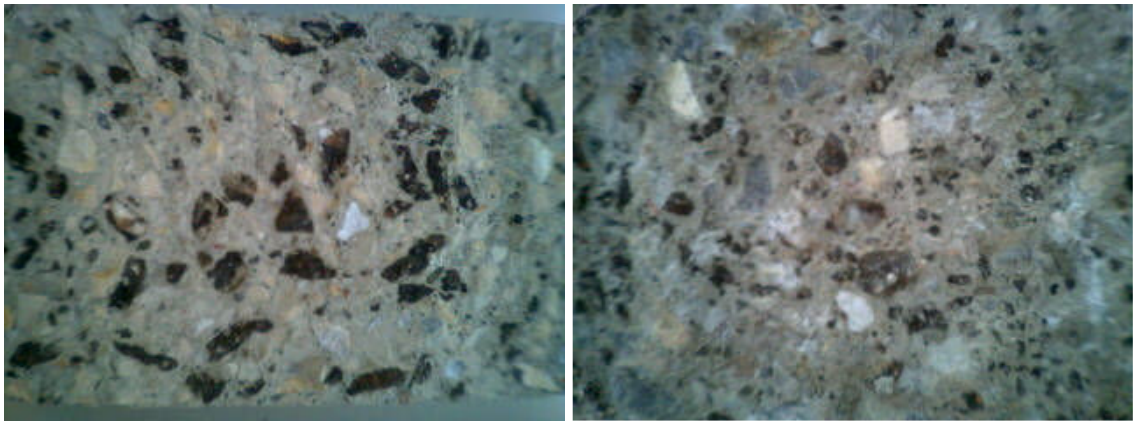
kgf/cm^2 = 0.098 MPa

Çizelge 4.5. AKAB yarmada çekme dayanımları, MPa

% 0	**% 25**	**% 50**	**% 75**	**% 100**
II300-0	II300-25	II300-50	II300-75	II300-100
2.83	2.49	2.42	2.21	1.73
II350-0	II350-25	II350-50	II350-75	II350-100
3.24	2.91	2.71	2.36	2.13
II400-0	II400-25	II400-50	II400-75	II400-100
3.35	3.07	2.89	2.42	2.19
I300-0	I300-25	I300-50	I300-75	I300-100
2.97	2.77	2.63	2.25	2.12
I350-0	I350-25	I350-50	I350-75	I350-100
3.32	3.03	2.76	2.41	2.17
I400-0	I400-25	I400-50	I400-75	I400-100
3.57	3.28	3.09	2.79	2.35

4.6 Basınç Dayanımı

Üretilen beton numunelerinde II ve I serileri için kesit görünüşler Şekil 4.2'de görülmektedir. Çizelge 4.6'da görüldüğü gibi AKAB'ın basınç dayanımları AKA'nın boşluklu yapısı ve kullanılan hava sürükleyici katkı nedeniyle, yerine kullanım oranı arttıkça azalmaktadır. Basınç dayanımı testlerinde yükleme hızı 0.25 MPa/sn olarak sabitlenmiştir. En büyük ve en küçük basınç dayanımları I 400-25 ve II 300-100 serilerinde sırası ile 38 ve 14 MPa olarak elde edilmiştir. Harç numunelerinde ise AKA miktarının artması ile basınç dayanımında azalmalar gözlenmiştir. Bu durum AKA'nın boşluklu yapısından ve doğal agregaya göre düşük dayanımdan kaynaklanmaktadır.



a b

Şekil 4.2. AKAB silindir numune kesiti: a) seri I, b) seri II

Çizelge 4.6. AKAB basınç dayanımları, MPa

% 0	% 25	% 50	% 75	% 100
II300-0	II300-25	II300-50	II300-75	II300-100
28	23	22	18	14
II350-0	II350-25	II350-50	II350-75	II350-100
30	29	23	22	17
II400-0	II400-25	II400-50	II400-75	II400-100
36	31	25	24	21
I300-0	I300-25	I300-50	I300-75	I300-100
29	27	24	20	15
I350-0	I350-25	I350-50	I350-75	I350-100
32	30	25	21	20
I400-0	I400-25	I400-50	I400-75	I400-100
37	35	28	26	25

4.7 Eğilmede Çekme Dayanımı

Beton deneylerinde eğilmede çekme dayanımı, iki noktadan yüklemeli olarak hesaplanmıştır, yükleme hızı 0.05 MPa/sn olarak sabitlenmiştir. Eğilme dayanımı hesabı için kullanılan formül Denklem 4.4 ve Denklem 4.5'te verilmiştir. Çizelge 4.7, Şekil 4.3 ve Şekil 4.4'te sırasıyla eğilme deneyi sonuçları, deney düzeneği ve deney numuneleri görülmektedir. Deneylerde üretilen harç numunelerinde eğilmede çekme dayanımlarında asfalt kırığı agregası oranının artması ile özellikle % 100 serilerde önemli azalmaların oluştuğu görülmektedir. Aynı şekilde, 7 ve 28 günlük % 100 AKA oranlı numunelerin her ikisinde de yaklaşık olarak % 40 azalma görülmüştür.

Çizelge 4.7. AKAB eğilmede çekme dayanımı, MPa

% 0	**% 25**	**% 50**	**% 75**	**% 100**
II300-0	II300-25	II300-50	II300-75	II300-100
5.73	5.44	5.12	4.92	4.69
II350-0	II350-25	II350-50	II350-75	II350-100
5.81	5.63	5.41	5.30	5.04
II400-0	II400-25	II400-50	II400-75	II400-100
5.92	5.65	5.47	5.23	5.11
I300-0	I300-25	I300-50	I300-75	I300-100
5.75	5.52	5.23	5.08	4.77
I350-0	I350-25	I350-50	I350-75	I350-100
5.83	5.73	5.52	5.39	5.16
I400-0	I400-25	I400-50	I400-75	I400-100
5.95	5.77	5.63	5.51	5.38

$$\sigma_e = \frac{Mc}{I} \tag{4.4}$$

$$\sigma_e = \frac{PL}{bd^2} \tag{4.5}$$

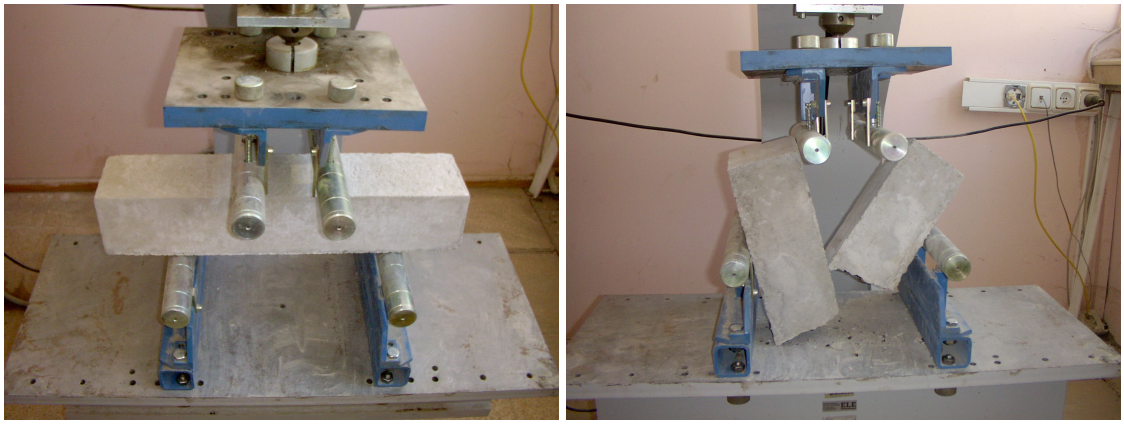
(Erdoğan, 2003)

σ_e = Eğilme dayanımı (kgf/cm^2), M = En büyük moment

c = d/2 (cm), d = Kiriş kesit yüksekliği (cm)

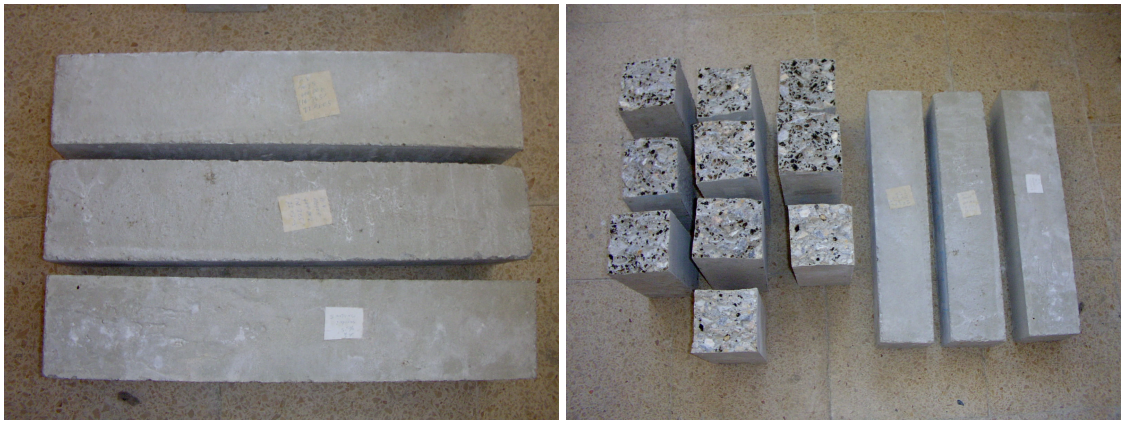
b = Kiriş kesit eni (cm), I = Atalet momenti (kare kesit için d^4/12)

P = Kırılma yükü (kgf)



a b

Şekil 4.3. İki noktadan yüklemeli eğilme deneyi: a) yükleme öncesi, b) yükleme sonrası



a b

Şekil 4.4. Eğilme deneyinde kullanılan numuneler: a) deney öncesi, b) deney sonrası

4.8 Aşınma

Beton deneylerinde, asfalt kırıklarının agrega yerine % 25, 50, 75 ve 100 oranlarda kullanılması ile üretilmiş olan AKAB 70x70x70 mm numuneleri üzerinde Böhme diski üzerinde aşınma deneyleri yapılmıştır (Şekil 4.5). Çizelge 4.8'de görüldüğü gibi bitüm içeren bir malzeme olan asfalt kırıklarının homojen olmayan yapısı ve betondaki değişken davranışları nedeni ile bu malzemelerin agrega yerine kullanım oranları arttıkça aşınma değerleri de artmaktadır (TS 699, 1987).

a b

Şekil 4.5. Böhme diski: a) çalışma öncesi, b) çalışma sonrası

Çizelge 4.8. AKAB aşınma değerleri, $cm^3/50\ cm^2$

% 0	**% 25**	**% 50**	**% 75**	**% 100**
II300-0	II300-25	II300-50	II300-75	II300-100
6.80	7.60	8.40	9.50	9.80
II350-0	II350-25	II350-50	II350-75	II350-100
6.50	7.30	8.20	9.10	9.40
II400-0	II400-25	II400-50	II400-75	II400-100
6.20	7.10	8.00	8.90	9.20
I300-0	I300-25	I300-50	I300-75	I300-100
6.50	7.50	8.90	9.00	9.20
I350-0	I350-25	I350-50	I350-75	I350-100
6.10	7.10	8.40	8.70	8.90
I400-0	I400-25	I400-50	I400-75	I400-100
6.00	6.90	8.20	8.40	8.60

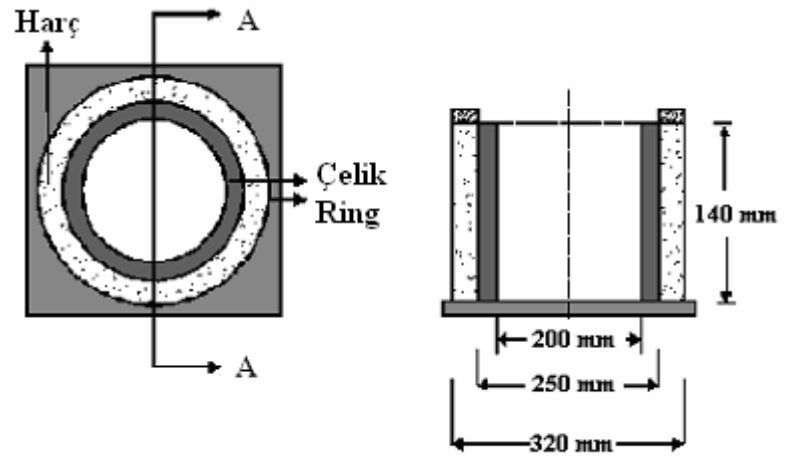
4.9 Kısıtlanmış Rötre

AKAH numunelerinde halka kalıbı deneyleri yapılarak kısıtlanmış rötre çatlakları, ilk çatlak başlangıç zamanı, çatlak uzunluğu ve çatlak genişliği belirlenmiştir. Halka numunelerinin deney düzeneği Şekil 4.6 ve Şekil 4.7'de görülmektedir. Deneylerde çatlak genişliği hassas ölçüm yapabilen optik dürbün ile ölçülmüştür.

Üretilen harç numunelerinde kısıtlanmış rötre çatlakları için ilk çatlak oluşumu kullanılan AKA miktarının artması ile gecikmiştir. AKA miktarının artması ile sistematik olarak çatlak genişlikleri azalmış ve çatlak oluşumu gecikmiştir.

Deneylerde elde edilen sonuçlara göre, % 100 AKA kullanılan serilerde kontrol numunelerine göre çatlak genişliklerinde yaklaşık olarak % 75 değerinde bir azalma görülmektedir. Sonuçlar incelendiğinde yüksek gibi görünen bu değerin aslında % 100 AKA kullanımı ile sağlandığı göz önünde bulundurulmalıdır (ASTM C1581-04, 2009).

En geç çatlak oluşumu ve en düşük çatlak genişliği yine % 100 AKA kullanımı sonucu elde edilmiştir. Bu durum AKAH'ın boşluklu yapısından ve artan AKA içeriğinden kaynaklanmaktadır. Bilindiği gibi düşük basınç dayanımı ve elastisite modülü çatlak oluşumunu geciktirir ve çatlak genişliğini azaltır (Eldin, 1993).



Şekil 4.6. Halka kalıpların boyutları

a b

Şekil 4.7. Halka kalıbı: a) kalıp sökümü öncesi, b) kalıp sökümü sonrası

Malzemenin boşluklu yapısı çatlak oluşumunun gecikmesindeki önemli etkenlerden birisidir. Bu çalışmada elastisite modülleri ve basınç dayanımları incelendiğinde düşük AKA oranları (% 25-50) ile üretilen numunelerin yeterli olduğu, yüksek AKA oranları (% 75-100) ile üretilen numunelerin ise yeterli özelliklere sahip olmadığı kanıtlanmıştır. İleriki çalışmalarda % 0-10-20-30-40-50 AKA oranlarının araştırılması uygun olabileceği sonucuna varılmıştır. Dayanım bakımından bazı olumsuz sonuçlara rağmen üretilen tüm serilerde kontrol betonuna göre daha düşük çatlak genişlikleri elde edilmiştir. Bu durum elastisite modülü davranışlarına göre de desteklenmektedir. Bilindiği gibi harç numunelerde düşük boşluk oranı yüksek basınç dayanımı ve elastisite modülü sağlamaktadır, bu nedenden dolayı kısıtlanmış rötre numunelerinde içsel dirençler daha yüksek olmaktadır ve çatlak oluşumu daha hızlı ve kolay bir biçimde gerçekleşir. Kısıtlanmış rötre çatlakları ve halka deney sonuçları Çizelge 4.9 ve Şekil 4.8'de verilmiştir. Sonuçlar bunlara göre yorumlanmıştır.

Çizelge 4.9. AKAH kısıtlanmış rötre deney sonuçları

AKA, %	**0**	**25**	**50**	**75**	**100**
İlk çatlak oluşumu zamanı, gün	17	21	23	26	27
60 günlük çatlak sayısı	1	1	1	1	1
60 günlük ana çatlak uzunluğu, mm	140	140	140	140	140
En büyük çatlak genişliği, mm	0.70	0.47	0.39	0.32	0.17

a b

Şekil 4.8. Kısıtlanmış rötre çatlakları: a) optik dürbün ölçümü, b) cetvel ile ölçüm

4.10 Serbest Rötre

Serbest rötre deneylerinde 25x25x285 mm harç numuneleri kısıtlanmış rötredeki gibi 20 °C sıcaklıkta ve % 50 bağıl nemde bekletilmiştir. Deneylerde AKA oranının artması ve AKAH'ın su emme kapasitesinin azalması sonucunda birim şekil değiştirmelerde bir azalma beklenirken tam aksine sistematik artışlar gözlenmiştir, % 100 AKA oranlı serbest rötre numunelerinde kontrol serilerine göre yaklaşık olarak % 40 artış belirlenmiştir. Bu durum serbest rötre için düşük elastisite modülünün çimento hamurunda daha az içsel direnç meydana getirmesi ile açıklanabilir.

4.11 Mikroyapı İncelemesi

Elektronik ve optik sistemlerin birlikte kullanımı ile yüksek büyütmelerde, üzerinde işlem ve analizler yapılabilen görüntülerin elde edildiği cihazlar mevcuttur. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) bu cihazlardan birisidir. Taramalı elektron mikroskobunda görüntü, yüksek voltaj ile hızlandırılmış elektronların numune üzerine odaklanması, bu elektron demetinin numune yüzeyinde tartılması sırasında elektron ve numune atomları arasında oluşan çeşitli girişimler sonucunda meydana gelen etkilerin uygun algılayıcılarda toplanması ve sinyal güçlendiricilerinden geçirildikten sonra bir katot ışınları tüpünün ekranına aktarılmasıyla elde edilir. Modern sistemlerde bu

algılayıcılardan gelen sinyaller dijital sinyallere çevrilip bilgisayar monitörüne verildikten sonra çıktısı alınabilmektedir. Gerek ayırım gücü, gerek odak derinliği gerekse görüntü ve analizi birleştirme özelliği, taramalı elektron mikroskobunun kullanım alanını genişletmektedir (Demir, 2008). Taramalı elektron mikroskop (SEM) çalışmaları için yüksek sıcaklıkların etkisini en iyi şekilde gözlemek amacıyla hazırlanan numuneler benzer büyütme değerlerinde incelemeye çalışılmıştır. Buna göre yaklaşık 20x20 mm boyutlu numuneler kontrol ve asfalt kırıklı harçlardan kesit alınarak hazırlanmış ve yüzeyleri aşındırılarak düzeltilmiş ve hazırlanmıştır.

Deneylerde hazırlanan harç numuneleri kurutulduktan sonra altın ile kaplanarak değişken basınçlı taramalı elektron mikroskobunda incelenmiştir. Bu inceleme % 0, 25, 50, 75 ve 100 asfalt kırığı oranlı harç numunelerinde yapılmıştır fakar agrega-çimeto hamuru arası arayüzey incelendiğinden numunelerin agrega yüzdeleri önemini yitirmiş, tüm numunelerde benzer yapılar görülmüştür. Bunun sonucunda en belirgin olarak gözlemlenen SEM çalışmaları teze eklenmiştir. SEM çalışmalarında normal ve asfalt harçlarda agrega-harç arayüzey belirlenmesi, arayüzeyin durum belirlenmesi, agrega-harç arayüzeyinin ve bu bölgedeki jel oluşumu ve mikro analiz (EDX) çalışmaları yapılmıştır. Üretilen asfalt kırığı agregalı harç numunelerinden % 50 AKA içeren serilerin içyapısı ve çimento hamurunun AKA ile yaptığı arayüz daha belirgin sonuçlar verdiğinden, çalışmada bu seriye ait SEM fotoğrafları kullanılmıştır.

Deneysel çalışmalarda yapılan SEM ve EDX analizleri, Anadolu Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Malzeme Bilimi Araştırma Laboratuvarında bulunan ZEISS Supra VP 50 marka SEM cihazı ile elde edilmiştir. Analiz işlemine başlamadan önce asfalt kırıklarından üretilen harç numunelerinden alınan, 20x20 mm boyutlu parçaların yüzeyi altın kaplanarak ön işlem tamamlanmıştır (Demir, 2008). Harç numunelerinin spektrum araştırması yapılarak belirlenen mineralojik analiz verileri çizelge ve şekillerde detaylı olarak verilmiştir. EDX değerleri incelendiğinde numunelerin mineralojik yapısında kalsiyum, demir, silis, potasyum, karbon, alüminyum, magnezyum ve sülfat gibi çok çeşitli elementler görülmüştür (Çizelge 4.10-4.16 ve Şekil 4.9-4.22). Bu durum AKA'nın atık malzeme olması ile açıklanabilir.

SEM I elemental analizi

Spektrum : 1

Muhtemel pik ihmali : 2.137 keV

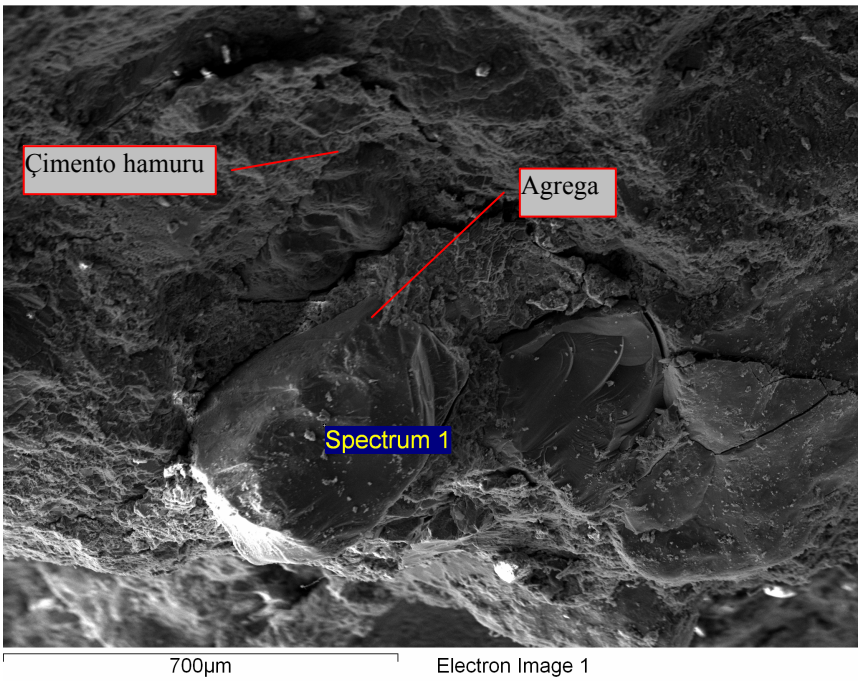
İşleme opsiyonu : Stokometri ile oksijen (normalize edilmiş)

İterasyon sayısı = 2

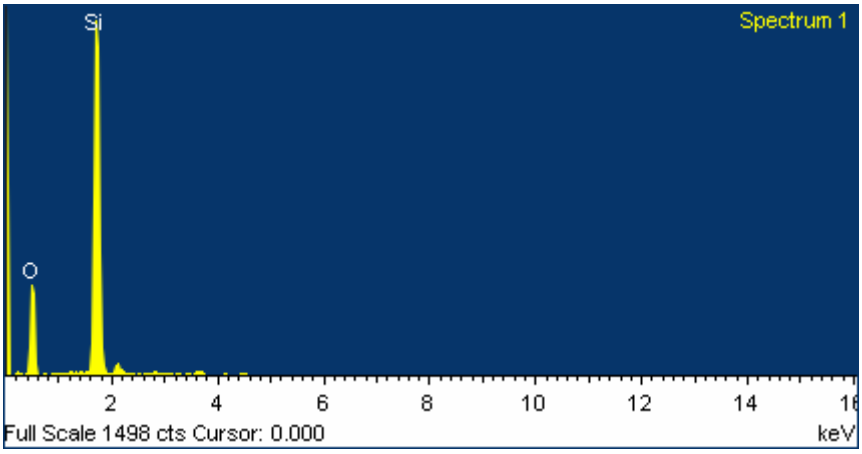
Standart : Si SiO_2

Çizelge 4.10. AKAH SEM I spektrum 1 elemental analiz oranları

Element	Ağırlık %	Atomik %	Bileşik %	Formül
Si	46.74	33.33	100.00	SiO_2
O	53.26	66.67		
Toplam	100.00			



Şekil 4.9. AKAH SEM I spektrum 1, 250X



Şekil 4.10. AKAH SEM I spektrum 1 element dağılımı

SEM I elemental analizi

Spektrum : 2

Muhtemel pik ihmali : 2.158, 9.740 keV

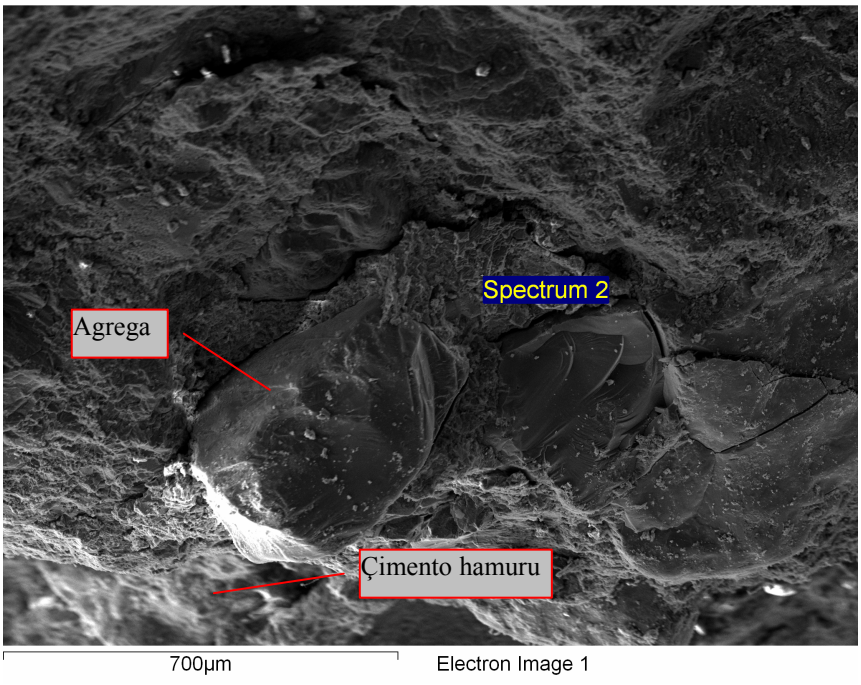
İşleme opsiyonu : Stokometri ile oksijen (normalize edilmiş)

İterasyon sayısı = 3

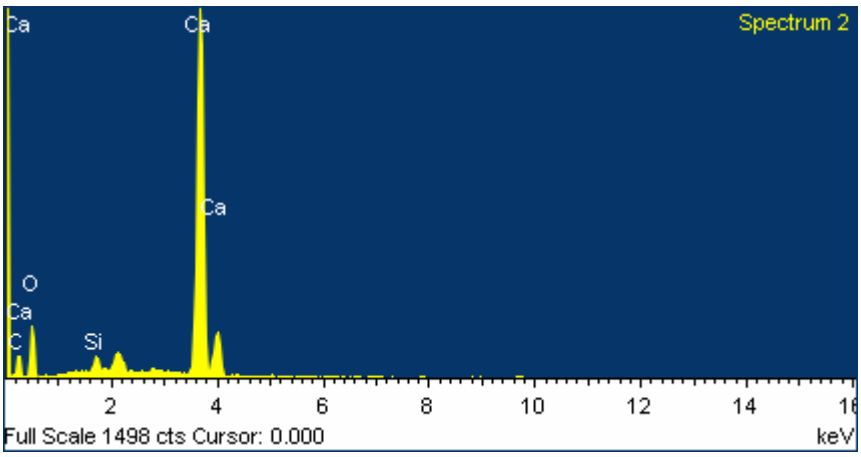
Standart : C $CaCO_3$, Si SiO_2, Ca Wollastonite

Çizelge 4.11. AKAH SEM I spektrum 2 elemental analiz oranları

Element	**Ağırlık %**	**Atomik %**	**Bileşik %**	**Formül**
C	7.88	14.44	28.89	CO_2
Si	1.31	1.03	2.81	SiO_2
Ca	48.82	26.79	68.30	CaO
O	41.99	57.74		
Toplam	100.00			



Şekil 4.11. AKAH SEM I spektrum 2, 250X



Şekil 4.12. AKAH SEM I spektrum 2 element dağılımı

SEM I elemental analizi

Spektrum : 3

Muhtemel pik ihmali : 2.136, 2.832, 4.340, 9.715, 11.480 keV

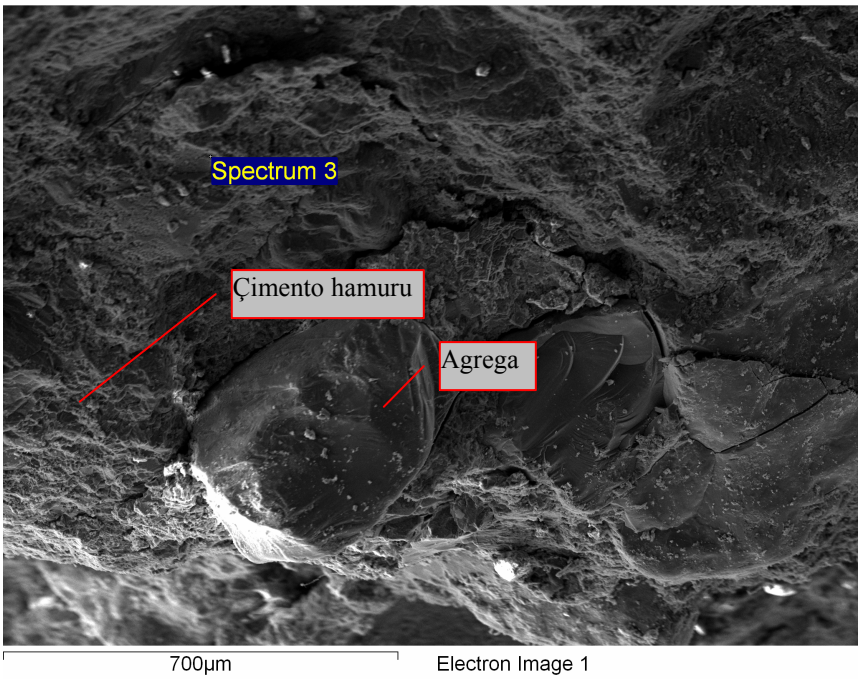
İşleme opsiyonu : Stokometri ile oksijen (normalize edilmiş)

İterasyon sayısı = 3

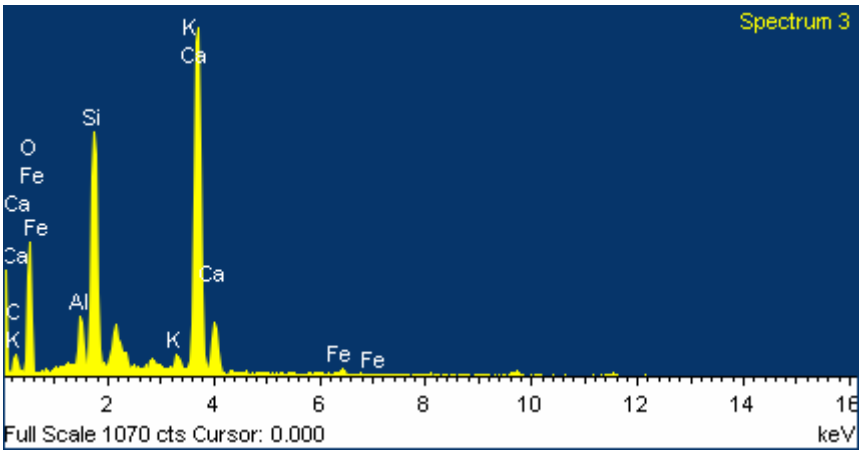
Standart : C $CaCO_3$, Al Al_2O_3, Si SiO_2, K MAD-10 Feldspar, Ca, Fe

Çizelge 4.12. AKAH SEM I spektrum 3 elemental analiz oranları

Element	Ağırlık %	Atomik %	Bileşik %	Formül
C	6.08	10.70	22.28	CO_2
Al	2.63	2.06	4.98	Al_2O_3
Si	12.79	9.62	27.35	SiO_2
K	1.08	0.59	1.31	K_2O
Ca	30.36	16.02	42.48	CaO
Fe	1.25	0.47	1.60	FeO
O	45.81	60.53		
Toplam	100.00			



Şekil 4.13. AKAH SEM I spektrum 3, 250X



Şekil 4.14. AKAH SEM I spektrum 3 element dağılımı

SEM II elemental analizi

Spektrum : 1

Muhtemel pik ihmali : 2.830, 9.724 keV

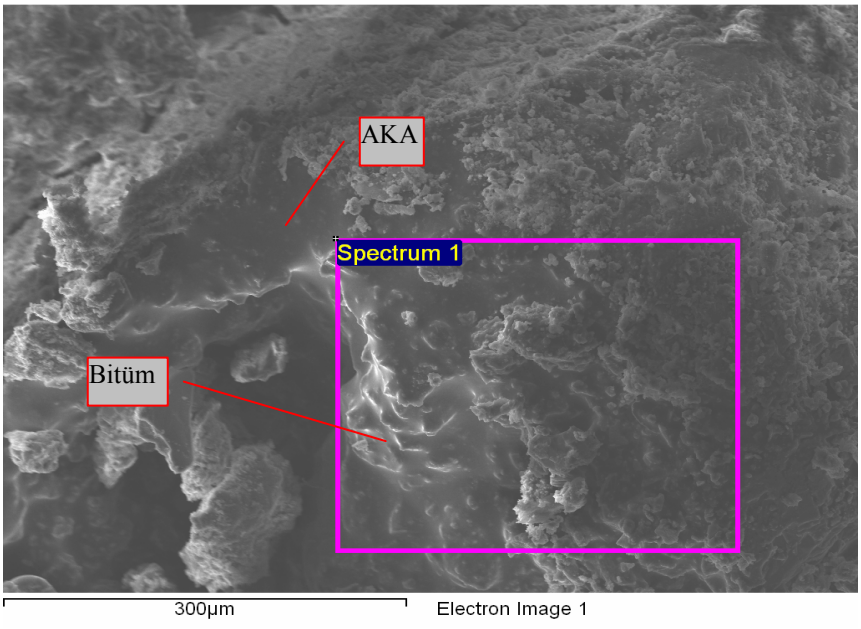
İşleme opsiyonu : Stokometri ile oksijen (normalize edilmiş)

İterasyon sayısı = 3

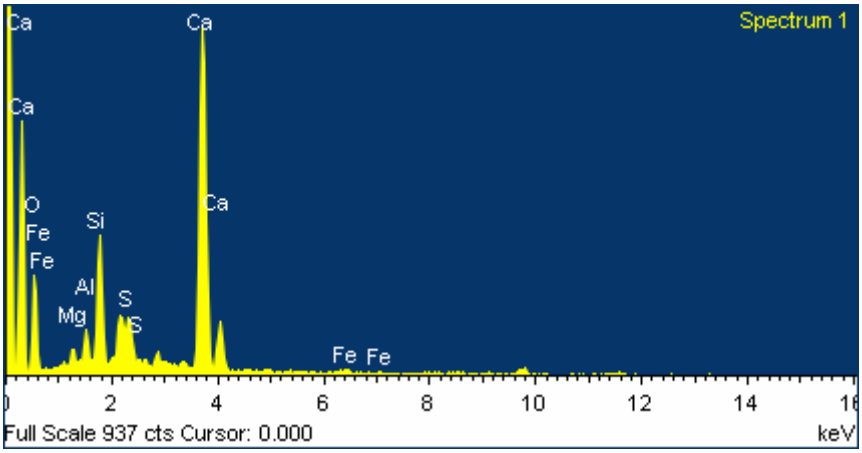
Standart : Mg MgO, Al Al_2O_3, Si SiO_2, S FeS_2, Ca Wollastonite, Fe Fe

Çizelge 4.13. AKAH SEM II spektrum 1 elemental analiz oranları

Element	**Ağırlık %**	**Atomik %**	**Bileşik %**	**Formül**
Mg	1.65	1.67	2.74	MgO
Al	2.60	2.37	4.91	Al_2O_3
Si	9.85	8.64	21.06	SiO_2
S	2.88	2.21	7.19	SO_3
Ca	44.32	27.26	62.01	CaO
Fe	1.63	0.72	2.09	FeO
O	37.08	57.13		
Toplam	100.00			



Şekil 4.15. AKAH SEM II spektrum 1, 250X



Şekil 4.16. AKAH SEM II spektrum 1 element dağılımı

SEM II elemental analizi

Spektrum : 2

Muhtemel pik ihmali : 2.842, 9.720 keV

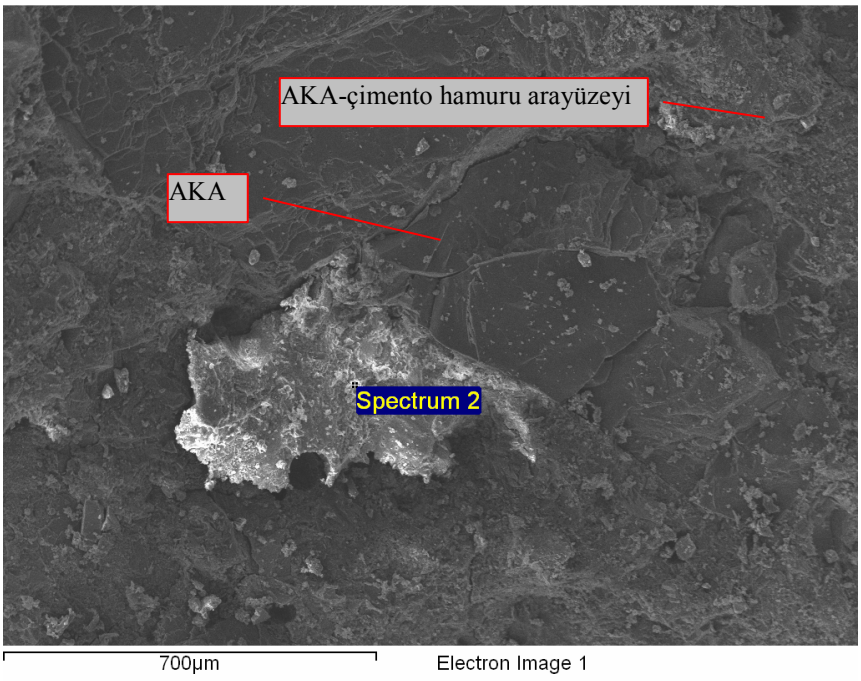
İşleme opsiyonu : Stokometri ile oksijen (normalize edilmiş)

İterasyon sayısı = 3

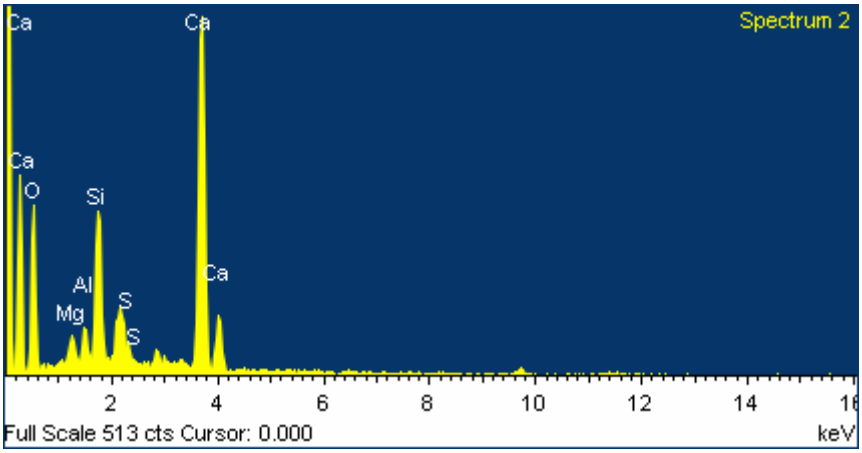
Standart : Mg MgO, Al Al_2O_3, Si SiO_2, S FeS_2, Ca Wollastonite

Çizelge 4.14. AKAH SEM II spektrum 2 elemental analiz oranları

Element	Ağırlık %	Atomik %	Bileşik %	Formül
Mg	2.20	2.23	3.64	MgO
Al	2.56	2.34	4.84	Al_2O_3
Si	12.35	10.83	26.41	SiO_2
S	0.00	0.00	0.00	SO_3
Ca	46.53	28.60	65.10	CaO
O	36.37	56.00		
Toplam	100.00			



Şekil 4.17. AKAH SEM II spektrum 2, 350X



Şekil 4.18. AKAH SEM II spektrum 2 element dağılımı

SEM III elemental analizi

Spektrum : 1

Muhtemel pik ihmali : yok

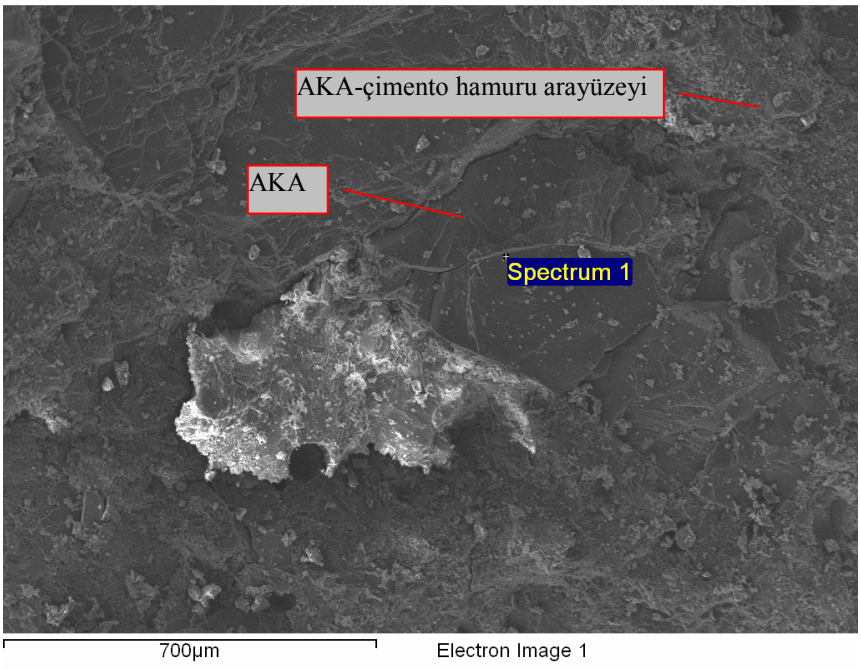
İşleme opsiyonu : Stokometri ile oksijen (normalize edilmiş)

İterasyon sayısı = 2

Standart : Si SiO_2

Çizelge 4.15. AKAH SEM III spektrum 1 elemental analiz oranları

Element	**Ağırlık %**	**Atomik %**	**Bileşik %**	**Formül**
Si	46.74	33.33	100.00	SiO_2
O	53.26	66.67		
Toplam	100.00			



Şekil 4.19. AKAH SEM III spektrum 1, 350X

SEM III elemental analizi

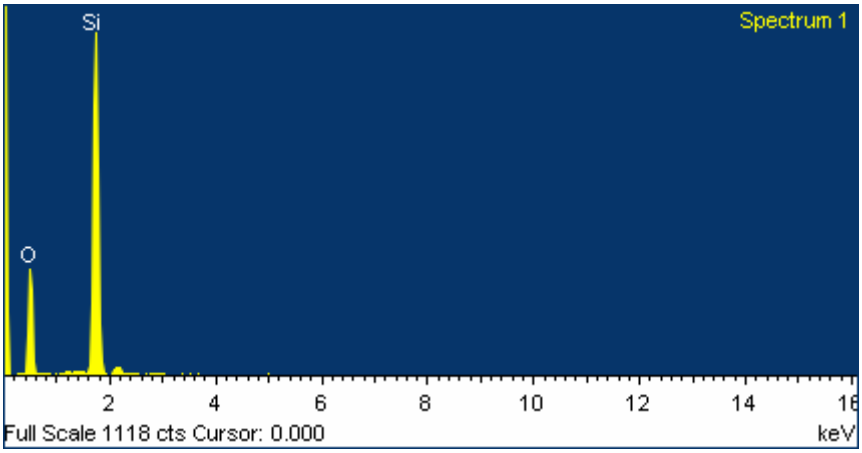
Spektrum : 2

Muhtemel pik ihmali : 2.146 keV

İşleme opsiyonu : Stokometri ile oksijen (normalize edilmiş)

İterasyon sayısı = 3

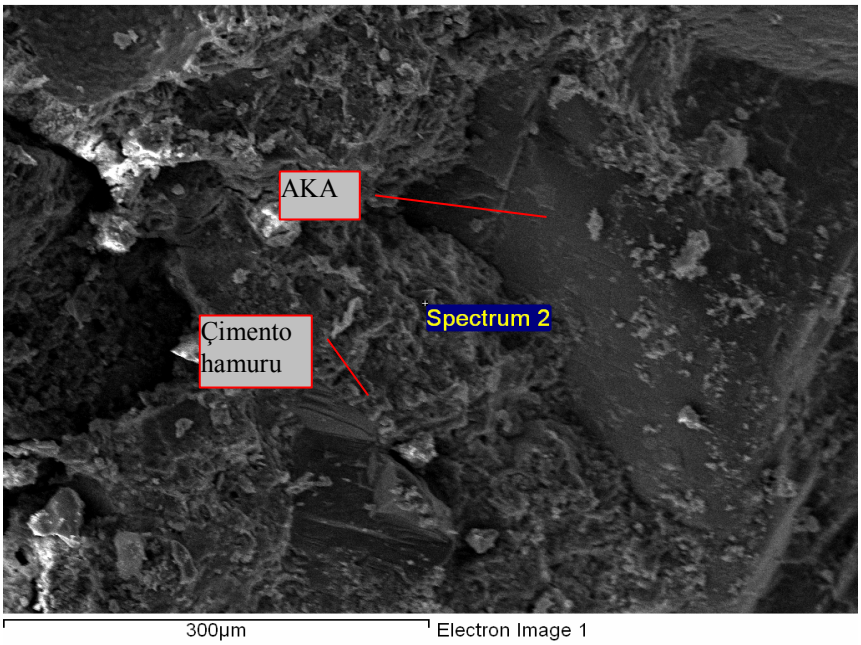
Standart : C $CaCO_3$, Si SiO_2, Ca Wollastonite



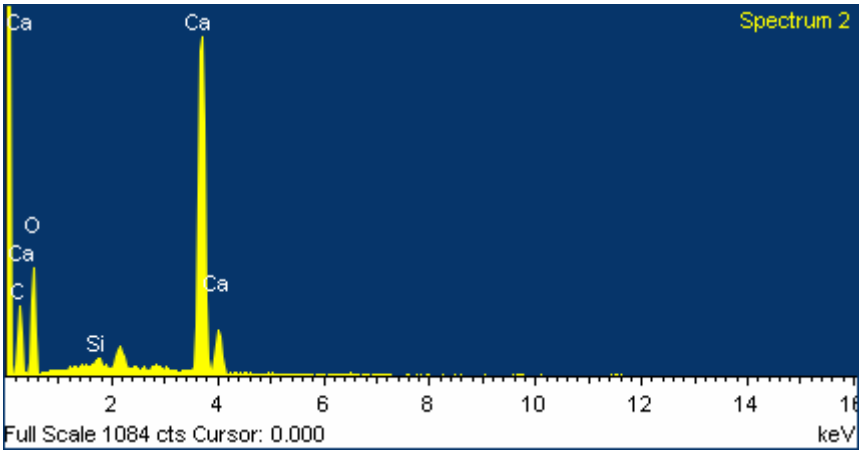
Şekil 4.20. AKAH SEM III spektrum 1 element dağılımı

Çizelge 4.16. AKAH SEM III spektrum 2 elemental analiz oranları

Element	Ağırlık %	Atomik %	Bileşik %	Formül
C	14.70	22.95	53.88	CO_2
Si	0.58	0.38	1.23	SiO_2
Ca	32.08	15.00	44.89	CaO
O	52.64	61.67		
Toplam	100.00			



Şekil 4.21. AKAH SEM III spektrum 2, 500X



Şekil 4.22. AKAH SEM III spektrum 2 element dağılımı

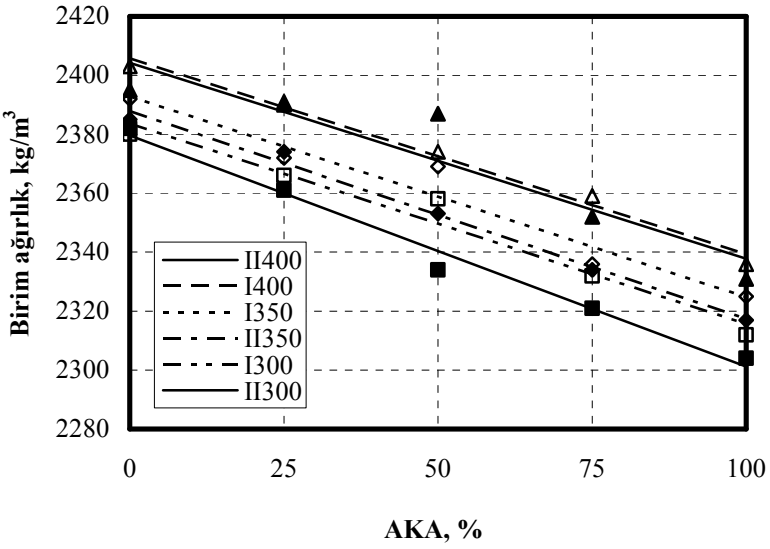
BÖLÜM 5

DENEY SONUÇLARININ İRDELENMESİ

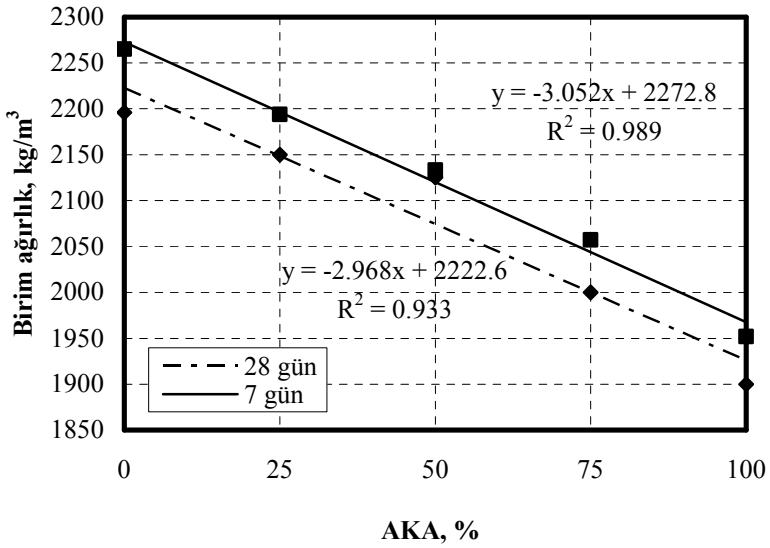
Asfalt kırıklarının agrega yerine kullanılması ile üretilen beton ve harçlar ve deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar bu bölümde karşılaştırmalar ile irdelenmiştir. Beton deney sonuçları yürütülen deneylere göre şekil ve çizelgeler yardımı ile yorumlanarak irdelenmiştir ve gerekli açıklamalar bu bölümde yapılmıştır.

5.1 Birim Ağırlık

Elde edilen veriler incelendiğinde ve diğer seriler ile karşılaştırıldığında en düşük birim ağırlığa sahip olan AKAB (asfalt kırığı agregalı beton) II 300-100 serilerinde 2300 kg/m^3 olarak görülmektedir (Şekil 5.1). Yapılan çalışmalarda I 400-25 serisi, kontrol numuneleri hariç diğer seriler ile karşılaştırıldığında, en büyük taze birim ağırlık değeri olan 2390 kg/m^3 değerini aldığı görülmüştür. Deneylerde taze beton numunelerinde belirlenen birim ağırlıklar 2300 kg/m^3 ve 2400 kg/m^3 arasında değişmektedir. Bu durum AKA'nın birim ağırlık konusunda betona yüksek etkisi bulunmadığını göstermektedir. Deneylerde üretilen tüm asfalt kırıklı beton serilerinde betonların taze birim ağırlıklarda yaklaşık olarak % 5 azalmalar belirlenmiştir. Betonda kullanılan çimento dozajı arttıkça doğal olarak birim ağırlıkların da arttığı görülmektedir. Beton karışımında çimento dozajının artması, birim ağırlığı en yüksek malzeme olan çimentonun karışımdaki miktarının artması anlamındadır. Bu nedenle betonun birim ağırlığının artması kaçınılmazdır (Akpınar, 2005). AKA'nın sahip olduğu birim ağırlığın doğal agregaya göre daha düşük olması nedeniyle üretilen taze beton ve harçlarda birim ağırlıklar azalmıştır. AKA'nın birim ağırlığının doğal agregaya göre daha düşük olmasının esas nedeni heterojen yapısı ve içerisinde bulunan boşluklu yapıdan kaynaklanmaktadır. Ayrıca, yol tamir ve bakım çalışmaları sırasında freze makinesi tarafından kırılarak oluşturulan asfalt kırığı agregalarının yuvarlak olmayışı, yerleştirme esnasında asfalt kırıklı beton ve harç serilerinde tam doluluğun sağlanamamış olması da bir etken olarak düşünülmektedir (Huang, et al., 2005).



Şekil 5.1. AKAB taze birim ağırlıkları



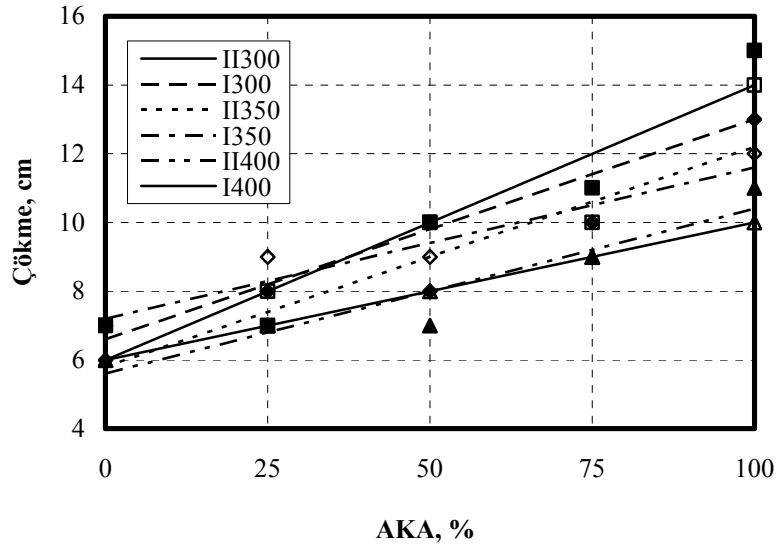
Şekil 5.2. AKAH sertleşmiş birim ağırlıkları

Harç deney sonuçları incelendiğinde 7 ve 28 günlük birim ağırlıklarda aynı oranda azalmalar görülmektedir. Fakat 7 günlük birim ağırlıklar 28 günlük birim ağırlıklardan daha büyüktür. Her iki seri için birim ağırlıklarda % 13 azalma görülmüştür (Şekil 5.2). Sertleşmiş AKAH numunelerinde en büyük ve en küçük birim ağırlıklar 7 günlük AKAH % 0 ve AKAH % 100 numunelerinde sırasıyla 2270 kg/m^3 ve 1930 kg/m^3 olarak belirlenmiştir. Harç numunelerinde 7 günlük birim ağırlıkların tüm serilerde 28 günlük numunelerin birim ağırlıklarından büyük olmasının nedeni 7 günlük numunelerin bünyesinde bulunan sudan kaynaklandığı görülmektedir. Harç numuneleri her geçen gün, içerisindeki suyu kaybetmekte ve bu nedenle 28 günlük numunelerin birim ağırlıklarının, 7 günlük numunelerin birim ağırlıklarından daha düşük olmasına neden olmaktadır. Birim ağırlık sonuçlarının, bu konuda yapılan diğer çalışmaların sonuçlarına yakın değerler aldığı belirlenmiştir (Huang, et al., 2005).

5.2 Çökme

AKA'nın su emme kapasitesi bitümlü yapısından dolayı kırmataşa göre daha düşüktür, ve betonda çökme değerlerini artırmaktadır, bundan dolayı beton üretiminde akışkanlaştırıcı kullanımına gerek kalmamış ve yapılan deneylerde kullanılmamıştır. AKAB numunelerinde kullanılan asfalt kırığı oranın artması ile çökme değerlerini arttığı gözlenmiştir. Bunun nedeni betonda % 0-100 arası oranlarda kırmataş yerine kullanılan asfalt kırıklarının etrafının bitümlü bir tabaka ile kaplı olmasıdır. Bitümlü tabaka düşük su geçirimliliğine sahip olduğundan betonda kullanılan suyun agrega tarafından emilmesi azalır. Bu durumda betonda kullanılan su miktarı azalacağından S/Ç oranı da düşer. Düşük S/Ç (su/çimento) oranı ile beton üretmek mümkündür. Çökme değeri 6 ve 8 arasında olan tüm seriler yol betonu üretimi için uygundur. Deney sonuçlarına göre I 350-25 hariç tüm serilerin % 25 AKA kullanımı ile üretimi çökme değeri bakımından beton yollarda kullanıma uygundur (Şekil 5.3). Yapılan deneyler sonucunda, AKAB II300 beton numunelerinin tümünde çökme değerlerinin artış hızının daha fazla olduğu görülmektedir. Bu durum düşük çimento dozajının taze betonda çökme değerlerini artırması ile açıklanabilir. Betonda çimento miktarının artması ile su gereksinimi de artmaktadır. Böylece çimento dozajı arttıkça çökme değerleri azalır.

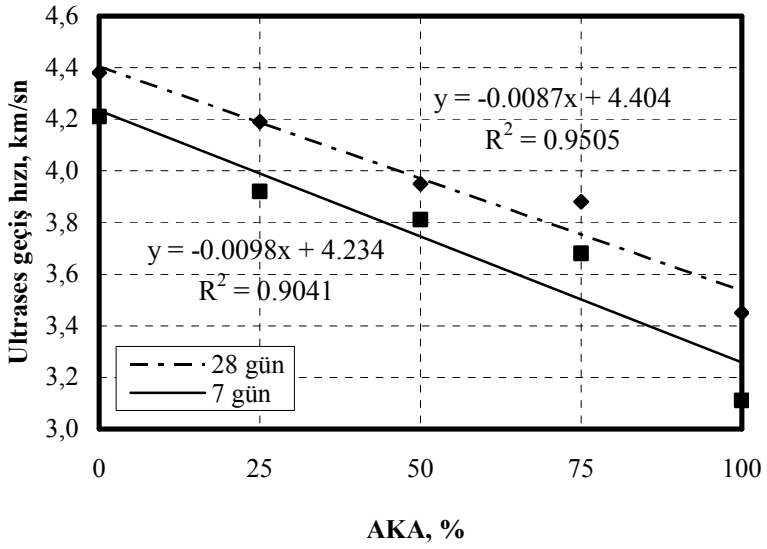
Deneylerde, II 400-50 ve I 400-50 taze beton serilerinin % 50 AKA kullanım oranına sahip seriler arasında çökme değerlerinin beton yol standartlarına göre kullanıma uygun olduğu görülmüştür (AASHTO T22, 1997). Düşük S/Ç oranı ve çökme değerleri beton yollarda aranan bir özeliktir. Bu durumda düşük su emme kapasitesine sahip asfalt kırıkları, işlenilebilirlik bakımından beton yollarda bir avantaj sağlamaktadır. Bilindiği gibi beton yollarda amaçlanan S/Ç oranı diğer yapılarda kullanılan oranlara göre daha düşüktür. Bunun başlıca nedeni beton finişerinde bulunan kayar kalıplarda betonun sıkıştırılması için gerekli kıvam ve düşük çökme değeridir. Bu nedenden AKA gibi su emme kapasitesi düşük olan agregaların beton yollarda kullanılmasının uygun olduğu yapılan deneyler sonucunda tahmin edilmektedir.



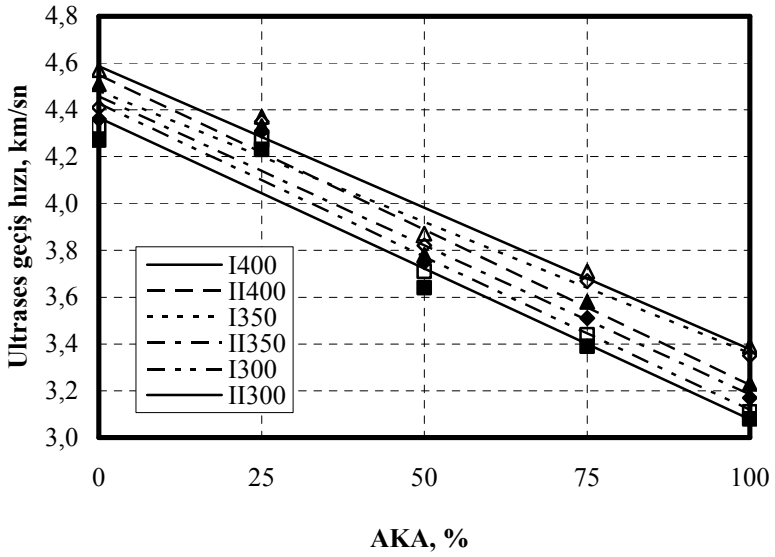
Şekil 5.3. AKAB çökme değerleri

5.3 Ultrases Geçiş Hızı

Şekil 5.4'e göre kontrol betonu haricinde en yüksek ultrases geçiş hızı I 400-25 serisinde 4.3 km/sn, en düşük ise II 300-100 serisinde 3.1 km/sn olarak belirlenmiştir. Betonda oluşan boşluk ve heterojen yapı nedeniyle, üretilen betonlarda AKA kullanım oranı arttıkça, ultrases geçiş hızlarının azaldığı görülmektedir (Şekil 5.4).



Şekil 5.4. AKAH ultrases geçiş hızı



Şekil 5.5. AKAB ultrases geçiş hızı

Harç numunelerinde, beton numunelerinde olduğu gibi AKA oranının artması sonucu ultrases geçiş hızlarında bir azalma belirlenmiştir. Bu durum, AKA'nın doğal agregaya göre daha boşluklu yapısının olmasından kaynaklanmaktadır (Şekil 5.5). Deneylerde ölçülen ultrases geçiş hızlarının, yapılan diğer çalışmalarda bulunan ultrases geçiş hızlarına yakın değerler aldığı belirlenmiştir (Akpınar, 2005; Huang, et al., 2005).

Harç numunelerinin ultrases geçiş hızlarında ortalama % 20 azalmalar gözlemlenirken, beton numunelerin ultrases geçiş hızlarında ortalama % 25 azalmalar gözlemlenmiştir. Bu azalmaların nedeni, beton numunelerinin içerisinde artan asfalt kırığı agregası miktarının kontrol betonuna göre daha boşluklu bir yapı oluşturması ile açıklanabilir. Yapılan deneylerde 7 ve 28 günlük % 100 asfalt kırığı agregalı oranlı harç numunelerinde yaklaşık olarak sırası ile % 23 ve % 20 azalmalar gözlenmiştir.

5.4 Elastisite Modülü

Beton numunelerinde asfalt kırığı agregası kullanım oranı arttıkça dinamik elastisite modülü değerlerinin AKA'nın sahip olduğu boşluklu yapıdan dolayı azaldığı gözlenmektedir. Şekil 5.6'a göre kontrol betonu haricinde en büyük Ed değeri I 400-25 serisinde 33 GPa ve en küçük değer II 300-100 serisinde 16 GPa olarak belirlenmiştir. Dinamik elastisite modülü değerlerinde özelikle % 100 asfalt kırığı oranlı serilerde kontrol numunelerine göre ortalama % 50 azalmalar görülmüştür. AKA oranı % 25 olan serilerin dinamik elastisite modülleri 30 GPa ve 35 GPa değerleri arasında belirlenirken AKA ornı % 50 olan serilerde 25 GPa ve 30 GPa değerleri arasında görülmektedir.

Hesaplanan elastisite modülü değerlerinin, literatürde bulunan diğer çalışmalardaki değerlere yakın olduğu görülmüştür (Akpınar, 2005; Huang, et al., 2005). Harç numuneleri dinamik elastisite modülü sonuçlarına göre, içsel gerilmeler basınç dayanımı ve elastisite modülü değerleri azaldıkça azalmaktadır. Bu durum asfalt kırıklarının düşük su emme kapasitesi ve esnek yapısı ile açıklanabilir (Şekil 5.7).

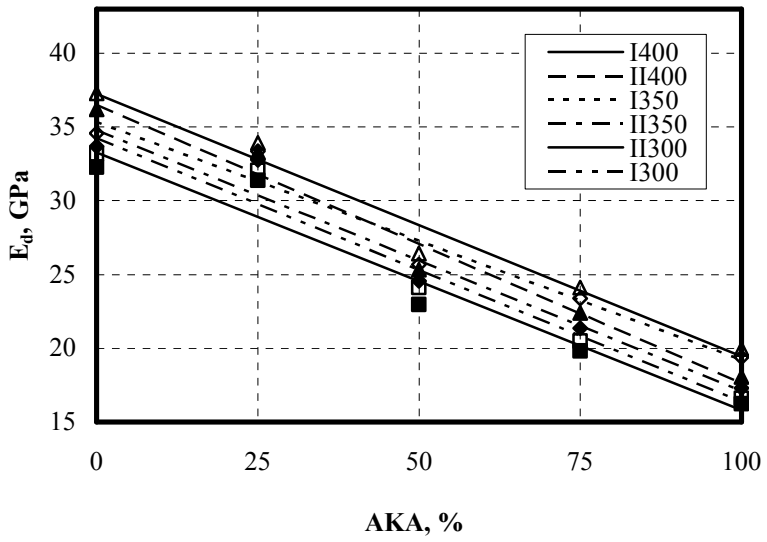
Ayrıca asfalt kırıkları doğal agregaya göre daha boşluklu yapıdadır. Bu durum üretilen betonlarda da boşluklu yapıyı artırdığından dinamik elastisite modülü

değerlerinin düşmesine neden olmaktadır (Huang, et al., 2005). Harçlarda ise kontrol ve % 25 serileri diğer seriler ile karşılaştırıldığında, deneysel elastisite modüllerinin daha yüksek olduğu görülmektedir. En düşük deneysel elastisite modül değeri % 100 serisinde belirlenmiştir ve kontrol harçları ile karşılaştırıldığında yaklaşık olarak % 65 civarı bir azalma görülmüştür. Tokluk değerleri σ-ε grafikleri altında kalan alanın integrali alınarak hesaplanmıştır. Hesaplanan eğri denklemi ile Mathematica programında en yüksek gerilmeye karşılık gelen şekil değiştirme aralığı içerisindeki eğri altında kalan alan hesaplanmıştır. Hesaplanan değerler en büyük şekil değiştirmelerin sınır değer olarak kabul edildiği serilerin tokluk değerleridir (Akpınar, 2005).

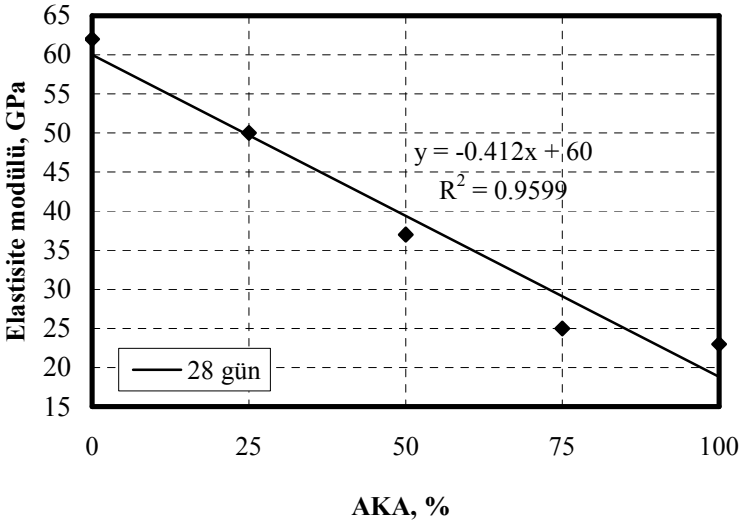
Harç deneylerinde hesaplanan en yüksek tokluk değeri % 25 AKA içeren numunelerde gözlemlenirken, en düşük tokluk değeri % 0 ve 75 AKA içeren numunelerde gözlenmiştir (Şekil 5.8). Tokluk değerlerinin 7 ve 14 J/m^3 arasında değiştiği görülmektedir (Şekil 5.8). Asfalt kırığı agregası oranı % 25 olan serilerde artan tokluk oranı kontrol numunelerinden daha yüksek değerler almıştır. Bu durum numunelerin şekil değiştirme kapasitesinin % 25 numunelerinde artmasından ve içsel gerilmelerin azalmasından kaynaklandığı tahmin edilmektedir (Huang, et al., 2005).

Fakat % 50 ve % 75 AKA oranları kullanıldığında numunelerin tokluk değerlerinin azaldığı görülmektedir. Bunun nedeni azalan mekanik dayanım ve azalan şekil değiştirme kapasitesi olarak yorumlanabilir. AKA % 100 serilerinde tekrar artan tokluk değerine ise net bir açıklama getirilememekle birlikte numunelerde düzensiz bir yapı oluşturan AKA'nın sistematik olmayan değişimlerin etkisi olarak açıklanabilir.

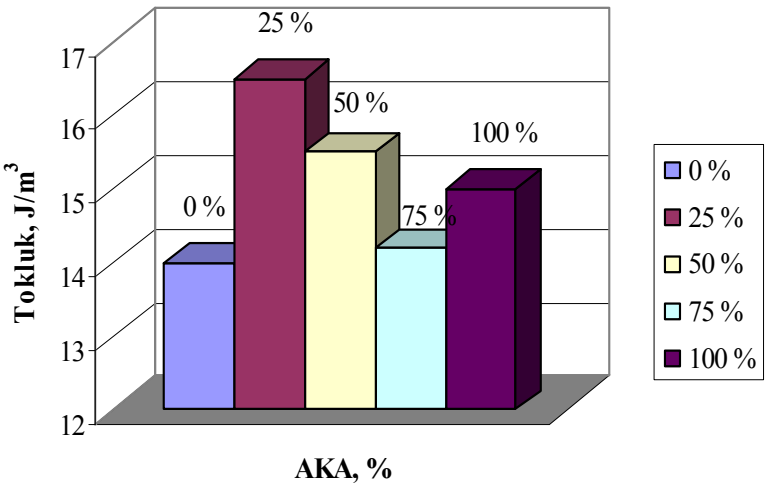
Numunelerde artan asfalt kırığı agregası oranı sistematik olmayan tokluk değerlerinin elde edilmesine neden olmakta ve bu düzensizlik harç numunelerinin içerisinde bulunan artan AKA oranının homojen yapıyı bozmasından, boşlukların ve şekil değiştirmelerin artmasından kaynaklanmaktadır. Yüksek tokluk değerleri, betondan beklenen performansın sağlandığı anlamını taşımaz. Asfalt kırığı ile üretilen harç numunelerinde, artan asfalt kırığı agregası miktarı ile tokluk değerlerinin aşırı değişim göstermemesi performans açısından daha önemlidir (Demir, 2008).



Şekil 5.6. AKAB ultrases geçiş hızları kullanılarak hesaplanan E_d değerleri



Şekil 5.7. AKAH numunelerinde deneysel elastisite modülü değerleri

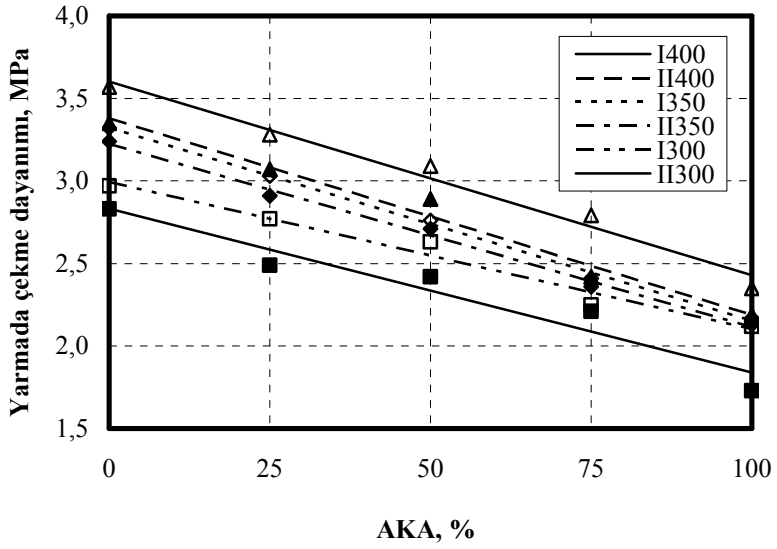


Şekil 5.8. AKAH numunelerinde tokluk ilişkisi

5.5 Yarmada Çekme Dayanımı

Yapılan çalışmada, yarmada çekme dayanımları sadece beton numuneler üzerinde belirlenmiştir. Deneylerde silindirik beton numuneler pres tablaları arasına boyuna şeklinde yerleştirilmiştir. Dolaylı yoldan çekme sağlamak amacı ile numunelerin alt ve üst kısımlarına paralel olarak yerleştirilen 25 mm eninde ve yaklaşık 3 mm kalınlığında demir çubuklar üzerine 0.05 MPa/sn yükleme hızı ile presle basınç yükü uygulanmıştır. Silindir beton numuneye basınç yükünün uygulanması durumunda, beton, yük ekseninde kısalmaya ve yük eksenine dik olan yatay eksende ise uzama etkisinde kalmıştır. Böylelikle silindir numune üzerinde çizgisel bir yük meydana getirilerek buna dik doğrultularda numune üzerinde çekme gerilmeleri oluşturulmuştur (Demir, 2008). Artan basınç yükünün numunenin çekme dayanımını aşması sonucunda silindir numunenin ortasından boyuna yarılarak kırıldığı gözlenmiştir. Kontrol betonu haricinde en büyük yarmada çekme dayanımı I 400-25 serisinde 3.3 MPa ve en küçük yarmada çekme dayanımı ise II 300-100 serisinde 1.7 MPa olarak belirlenmiştir. Bu durum açık olarak şekilde de görülmektedir (Şekil 5.9). Deneylerde, tüm asfalt kırığı agregalı serilerin kontrol numunelerinde elde edilen çekme dayanımı değerlerinin % 25-100 arası asfalt kırığı oranlı serilerden daha yüksek olduğu görülmektedir.

Kontrol numuneleri dışında en yüksek yarmada çekme I 400-25 serisinde değeri 3.5 MPa olarak elde edilmiştir. Artan AKA oranı ile serilerde yarmada çekme dayanımı değerlerinde düşüşler görülürken, bu düşüşler tüm serilerde paralellik göstermiştir. Bunun nedeni serilerde AKA oranlarının aynı oranlarda azalması ile açıklanabilir. En düşük yarmada çekme dayanımı değerleri II 300-100 serilerinde belirlenmiştir. Ayrıca, % 25 AKAH serilerinin tümü 2.5 MPa ve 3.5 MPa arasında değişirken % 50 AKAH serilerinin tümü yaklaşık 2.5 MPa ve 3.0 MPa arasında değişmektedir. Kritik AKA oranı % 50 olarak görülmekle birlikte bu oranın üzerinde yarmada çekme dayanımlarında önemli değişmelerin gözlenmesi beton yollar açısından sakıncalı olarak nitelendirilebilir. Asfalt kırığı agregalarının üzerinin bir petrol ürünü olan bitüm ile kaplı olması nedeniyle çimento hamurunun bağlayıcılık özeliği azalmakta agrega çimento hamuru arası bağların zayıflamasına ve bağlayıcılık özeliğini sağlayan CSH yapılarının bozulmasına etkisi olmaktadır (Demir, 2008; Erdoğan, 2003; Akman, 2001; Baradan vd., 2002). Bu nedenlerden AKAB numunelerinde yarmada çekme dayanımlarının azaldığı deneyler sonucunda belirlenmiştir (Topçu and Işıkdağ, 2005).

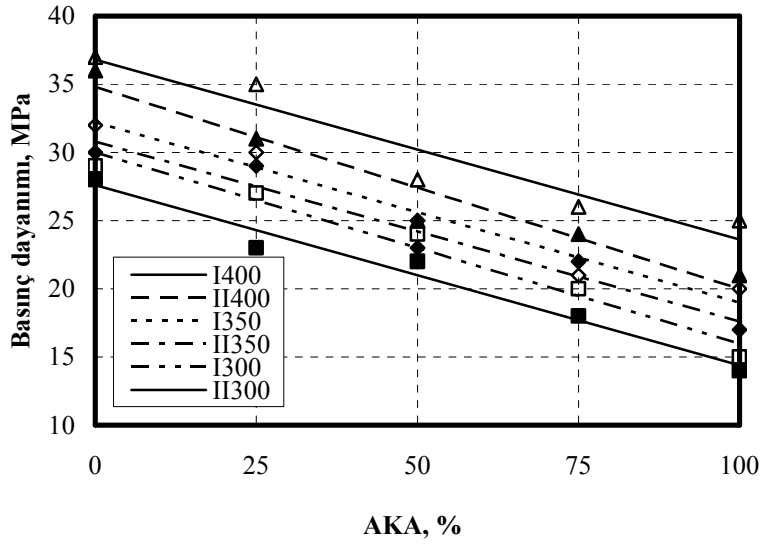


Şekil 5.9. AKAB yarmada çekme dayanımları

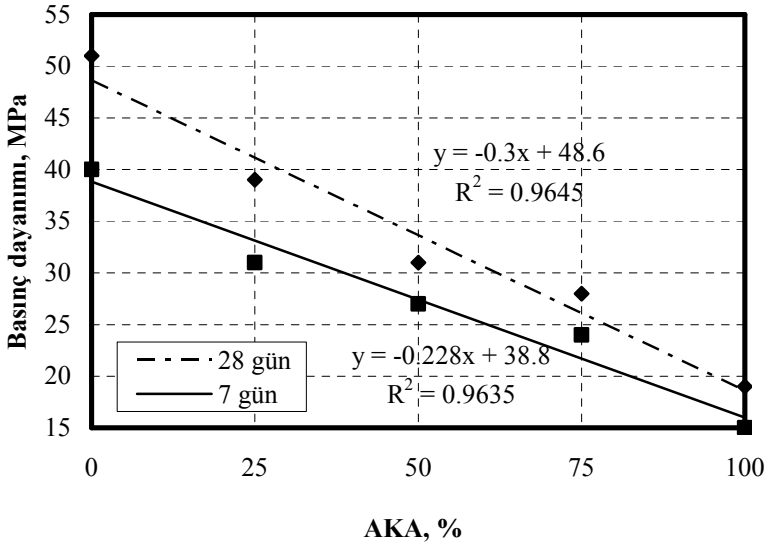
5.6 Basınç Dayanımı

Silindir beton numuneleri üzerinde yapılan basınç deneylerinden elde edilen basınç dayanım değerleri Şekil 5.10'da görülmektedir. Farklı AKA kullanım oranları ile kontrol betonu dışında en yüksek 35 MPa dayanımlı betonun I 400-25 serisi ile üretilebildiği belirlenmiştir (Şekil 5.10). Sonuçlara göre, 400 dozajlı betonlarda % 25 AKA kullanımı ile ağır trafik taşıyan beton yol üretimi için yeterli dayanım sağlanmaktadır. AKAB'ın basınç dayanımları AKA'nın boşluklu yapısı ve kullanılan hava sürükleyici katkı nedeniyle, agrega yerine kullanım oranı arttıkça azalmaktadır. Basınç dayanımı testlerinde yükleme hızı 0.25 MPa/sn olarak sabitlenmiştir. En büyük ve en küçük basınç dayanımları I 400-25 ve II 300-100 serilerinde sırası ile 38 ve 14 MPa olarak elde edilmiştir. Ayrıca 300, 350 ve 400 dozajlı betonların hepsinde % 50 AKA kullanımı ile çeşitli amaçlar için kullanılabilecek bir kalitede olan C20/25 sınıfı betonlar üretilebilmektedir. Basınç dayanımlarının azalmasına neden olarak AKA'nın çimento hamuru ile arasında oluşan aderansın AKA'nın yüzeyinde bulunan bitüm nedeniyle, doğal agregadan daha düşük olması ve AKA ile çimento arasındaki jel yapısının zayıf olması gösterilebilir. Beton yollarda istenilen en düşük basınç dayanımı 25 MPa değeri olması nedeniyle % 25 ve % 50 AKA oranlı seriler 300 kg/m^3 çimento dozajı dışında uygun olarak belirlenmiştir (AASHTO T22, 1997).

AKA kullanılarak üretilen harç numuneleri incelendiğinde, şekilde görüldüğü gibi, 28 günlük basınç dayanımların sahip olduğu eğrinin eğimi 7 günlük basınç dayanımlarının sahip olduğu eğrinin eğiminde daha yüksek bir değerdedir (Şekil 5.11). Her iki seri de basınç dayanımında % 100 AKA kullanımı sonucu % 60 azalma belirlenmiştir. Fakat % 25 ve % 50 AKA kullanımı sonucunda birçok yapı için yeterli basınç dayanımının elde edilebildiği görülmüştür (Akpınar, 2005). Tüm harç serileri için en büyük ve en küçük değerler 50 MPa ve 15 MPa arasındadır. Deneylerde 7 günlük numunelere ait basınç dayanımları 28 günlük numunelere göre daha düşüktür. Bu durum, çimento hamurunun aderansını 7 günlük numunelerde tam olarak tamamlamamış olması nedeniyle açıklanabilir. Bu durum literatürdeki çalışmalar ile desteklenmektedir. Ayrıca 28 günlük numunelerde AKA oranın artması ile basınç dayanımı değerleri 7 günlük numunelere göre daha hızlı bir şekilde azalmıştır.



Şekil 5.10. AKAB basınç dayanımları

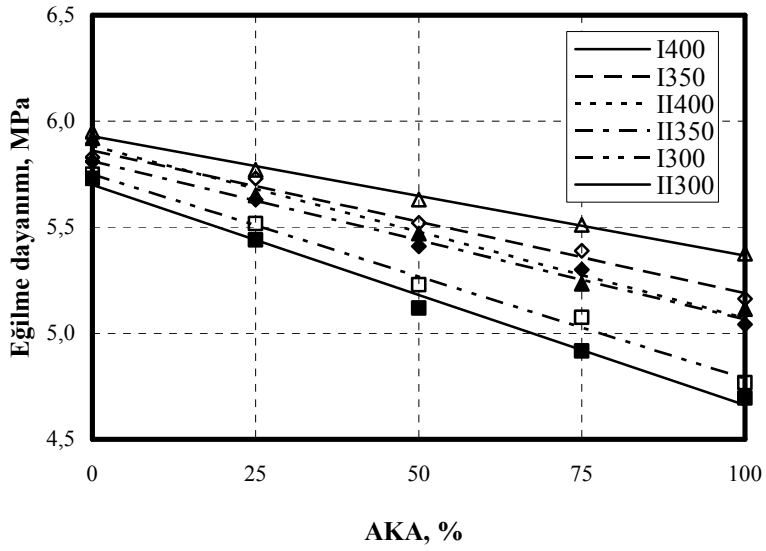


Şekil 5.11. AKAH basınç dayanımları

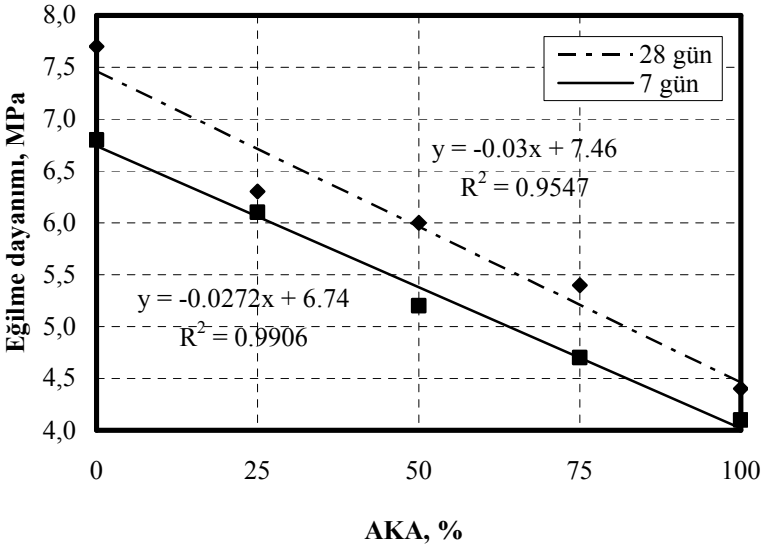
5.7 Eğilmede Çekme Dayanımı

AKA'nın boşluklu yapısı nedeniyle, AKA agrega yerine kullanım oranın artması, üretilen beton numunelerinde eğilmede çekme dayanımında azalmalara neden olmuştur (Şekil 5.12). AKAB'ın en büyük ve en küçük eğilmede çekme dayanımları kontrol betonu dışında I 400-25 ve II 300-100 serilerinde sırası ile 5.7 ve 4.7 MPa olarak bulunmuştur. Diğer seriler ile karşılaştırıldığında II 300-100 serisinin en düşük eğilmede çekme dayanımına sahip olduğu görülmektedir. Tüm beton serilerinde eğilmede çekme dayanımlarında ortalama % 10 azalmalar gözlemlenmiştir. Eğilme deneyleri sırasında çatlak oluşumu hızının azaldığı ve ilk çatlak oluşumunun kontrol numunelerine göre geciktiği görülmüştür. Bu durum literatürde bulunan diğer çalışmalar incelendiğinde numunelerde içsel direncin azalması ile açıklanabilir.

Harç deney sonuçlarına göre ise % 25 ve 50 AKA oranlı numunelerde eğilmede çekme dayanımları kabul edilebilir sınırlar içerisinde gözlenmiştir ve Şekil 5.13'te görülmektedir. Tüm seriler incelendiğinde en büyük ve en küçük eğilmede çekme dayanımı değerlerinin 7.5 MPa ve 4 MPa değerlerini aldığı görülmektedir (Şekil 5.13). Deneylerde üretilen AKAH numunelerinde eğilmede çekme dayanımlarında AKA oranının artması ile özellikle % 100 serilerde önemli azalmaların oluştuğu görülmektedir. Buna benzer olarak, 7 ve 28 günlük % 100 AKA oranlı numunelerin her ikisinde de yaklaşık % 40 azalma görülmüştür. Betonda artan miktarda AKA kullanımı sonucunda beton çekme dayanımında meydana gelen azalmaların nedenleri arasında çimento-agrega arası aderans bozulması ve çimento hamurundaki CSH jellerinin yapısının bozulması ve AKA'daki yapısal farklılıklar olarak değerlendirilebilir. Yapısal farklılıkların en önemli nedeni agreganın bitüm tabakası ile kaplı ve boşluklu yapıda olması olarak tanımlanmaktadır. Bu konu ile ilgili yapılan literatürdeki diğer çalışmaların da bu durumu desteklediği belirlenmiştir (Demir, 2008; Akpınar, 2005; Huang, et al., 2005). Yüksek çimento dozajına sahip beton ve harçlarda çekme dayanımlarında oluşan azalmaların bir bölümü en düşük seviyede tutulabilirken, düşük çümento dozajlı beton ve harçlar için aynı durum söz konusu değildir. Bu sonuç yüksek dayanımlı ve çimento dozajlı beton ve harçlarda agrega ile çimento hamuru arasındaki iyi aderansa ve kuvvetli CSH yapılarına bağlanabilir (Demir, 2008).



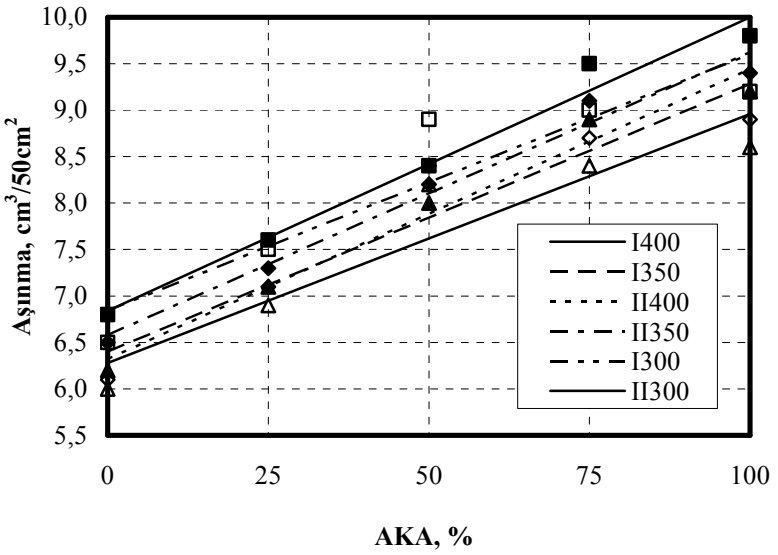
Şekil 5.12. AKAB eğilmede çekme dayanımları



Şekil 5.13. AKAH eğilmede çekme dayanımları

5.8 Aşınma

AKAB'ın aşınma direnci agrega yerine kullanım oranı arttıkça azalmaktadır. Yapılan deneyler sonucunda kontrol betonu haricinde, en küçük ve en büyük aşınma değerleri I 400-25 ve II 300-100 serileri için sırası ile 7.1 ve 9.8 $cm^3/50\ cm^2$ olarak belirlenmiştir (Şekil 5.14). Bu değerler, TS 2824 EN 1338'e göre uygun olarak tanımlanmıştır (TS 2824 EN 1338, 2005). Bilindiği gibi aşınma tüm yol çeşitleri için önemli bir özelliktir. Bu amaçla beton yol yapımı için AKA'nın agrega yerine düşük kullanım oranları daha uygun olacaktır (Akpınar, 2005). Yüksek miktarda AKA kullanımı sonucunda betonda aşınma miktarı artacağından, yol betonu gibi aşınmanın önemli olduğu yapılarda AKA'nın yüksek oranlarda kullanılması uygun olmayacaktır. Bu nedenle daha düşük AKA oranlarının tercih edilebilmesi uygun görülmektedir. Böhme diski ile yapılan deneylerde 70x70x70 mm numunelerin sürtünme nedeniyle ağırlık kaybına uğradığı belirlenmiştir. Bu durum aşınma sonucunda numunenin sürtünme etkisi altında kalan yüzeyinde görülmüş ve bu yüzeyde çimento ve agregalar arası aderansın bozulması ile açıklanmıştır. Numunelerde kopmalar ve parçalanmalar oluşması nedeniyle hacimce ve ağırlıkça kayıplar oluşmuştur (Şekil 5.14).



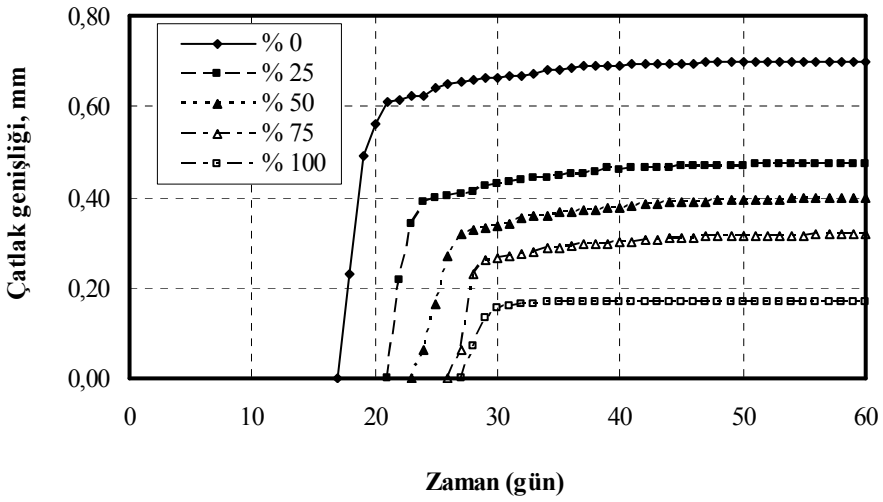
Şekil 5.14. AKAB aşınma değerleri

5.9 Kısıtlanmış Rötre

Deneylerde harç numuneleri 20 °C sıcaklıkta ve % 50 bağıl nemde bekletildikten sonra ilk çatlak oluşumu 17, 21, 23, 26 ve 27. günlerde sırası ile % 0, 25, 50, 75 ve 100 AKA kullanım oranları ile belirlenmiştir. Halka numunelerinde boyuna ve enine doğru gelişen çatlak boyları ve açıklıkları ölçülerek sonuçlar elde edilmiştir. Çatlak oluşumu tüm seriler için yaklaşık olarak 40 gün içerisinde tamamlanmıştır. Ancak, çatlak oluşum hızının ilk çatlak oluşumundan sonra ilk 4 gün içerisinde daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Bu durumun nedeni, harç içerisinde bulunan çimentonun ilk günlerde dayanım kazanma hızının ileriki günlere göre daha hızlı olması ve bunun sonucunda ilk günlerde oluşan hidratasyon hızının, ısısının ve miktarının daha fazla olması ile açıklanabilir. Hidratasyon ısısının ilk günlerde yüksek olması rötre oluşumunu da hızlandırmaktadır. Bu durum standartlarla desteklenmektedir (ASTM C1581-04, 2009).

Tüm harç serilerinde oluşan genleşmeler için çizilen eğrilerin eğimleri birbirine paralel ve benzer şekilde artmaktadır (Şekil 5.15). Bunun nedeni harç numunelerinde kullanılan malzemelerin aynı olması, sadece asfalt kırığı miktarının farklı olması ile açıklanabilir. Numunelerde asfalt kırığı agregası oranının artması, halka numunelerinde ilk çatlak oluşumunun gecikmesine ve son çatlak oluşumunun yavaşlamasına neden olmaktadır. Bu durum rötre oluşumunun yavaşlamasında AKA'nın olumlu etkileri olduğunu desteklemektedir. Bu nedenden en düşük çatlak genişliği % 100 serilerinde elde edilmiştir. Altmış günlük kür süresinden sonra en düşük ve en büyük çatlak genişlikleri % 100 ve kontrol harç serileri için sırası ile 0.17 ve 0.70 mm olarak belirlenmiştir. Bu duruma benzer olarak yine çatlak uzunluklarında da AKA oranının artması ile gecikmeler görülmüştür. Çatlak uzunlukları tüm seriler için 10 gün içerisinde en yüksek değere (140 mm) ulaşmış ve daha sonra sabit değerde kalmıştır. Deneylerde çatlak genişliklerinin ölçümü ana çatlaklar üzerinde gerçekleştirilmiş ve numuneler üzerinde 60 gün içerisinde ikincil çatlaklar gözlemlenmemiştir (ASTM C1581-04, 2009). Şekil 5.15'te görüldüğü gibi % 100 AKA kullanılan serilerde kontrol numunelerine göre çatlak genişliklerinde azalmalar görülmektedir. En geç çatlak oluşumu ve en düşük çatlak genişliği yine % 100 AKA kullanımı sonucu elde edilmiştir. Bu durum AKAH'ın boşluklu yapısından ve artan AKA içeriğinden kaynaklanmaktadır.

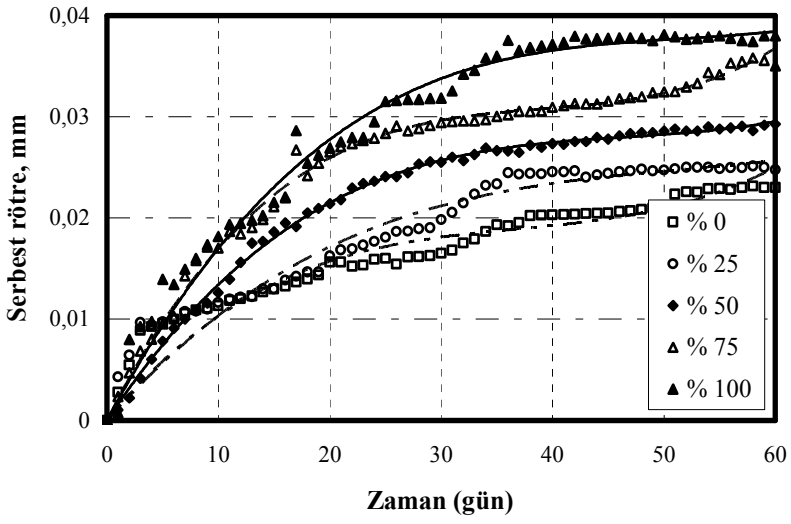
Düşük basınç dayanımı ve elastisite modülü çatlak oluşumunu geciktirir ve çatlak genişliğini azaltır (Eldin, 1993). Malzemenin boşluklu yapıda olması çatlak oluşumunun gecikmesindeki önemli etkenlerden birisidir. Bu çalışmada elastisite modülleri ve basınç dayanımları incelendiğinde düşük AKA oranları (% 25-50) ile üretilen numunelerin yeterli olduğu, yüksek AKA oranları (% 75-100) ile üretilen numunelerin ise yeterli özelliklere sahip olmadığı belirlenmiştir. Dayanım bakımından bazı olumsuz sonuçlara rağmen üretilen tüm serilerde kontrol harcına göre daha düşük çatlak genişlikleri elde edilmiştir. Bu durum elastisite modülü davranışlarına göre de desteklenmektedir. Bilindiği gibi harç numunelerinde düşük boşluk oranı yüksek basınç dayanımı ve elastisite modülü sağlamaktadır, bu gibi nedenlerden dolayı kısıtlanmış rötre numunelerinde içsel dirençler daha yüksek olmaktadır ve çatlak oluşumu daha hızlı ve kolay bir biçimde gerçekleşmektedir. Şekil 5.15'e göre çatlak oluşum başlangıç günleri % 0, 25, 50, 75 ve 100 AKAH serileri için sırası ile 17, 21, 23, 26 ve 27 olarak görülürken en büyük çatlak açıklıkları sırası ile 070, 0.47, 0.39, 0.32 ve 0.17'dir.



Şekil 5.15. AKAH için kısıtlanmış rötre çatlak genişlikleri

5.10 Serbest Rötre

Deneylerde, 25x25x285 mm boyutlarındaki harç çubuklarının boyca değişimleri 0.001 mm hassasiyetli komparatör ile deney süresince her gün okunarak belirlenmiştir. Asfalt kırıkları ve lastik agregalar gibi atık malzemeler içsel direncin azalmasına ve serbest rötre deneylerinde uzamanın artmasına neden olmaktadır (Eldin, 1993). Deneysel çalışmada harçlarda kullanılan asfalt kırığı miktarı arttıkça serbest rötre değerlerinde artışlar gözlenmiştir. Bu durum literatür çalışmaları tarafından da desteklenmektedir (Eldin, 1993). Diğer serilerle karşılaştırıldığında kontrol serisi ve % 25 serisi için serbest rötre değerleri birbirine daha yakındır. Yapılan çalışmada, 60 gün sonunda gözlemlenen serbest rötre değerleri tüm seriler için 0.02 mm ve 0.04 mm değerleri arasında belirlenmiştir. Serbest rötre değerlerinde en yüksek % 0.07 artışın ölçülmesi rötre değerlerinin standartlara göre uygun aralıklar arasında olduğunu göstermektedir (ASTM C 1012-04). Deneylerde AKA oranının artması ve AKAH'ın su emme kapasitesinin azalması sonucunda birim şekil değiştirmelerde bir azalma beklenirken tam aksine sistematik artışlar gözlenmiştir, % 100 AKA oranlı serbest rötre numunelerinde kontrol serilerine göre yaklaşık olarak % 40 artış belirlenmiştir (Şekil 5.16). Bu durum serbest rötre için düşük elastisite modülünün çimento hamurunda daha az içsel direnç meydana getirmesi ile açıklanmaktadır (Eldin, 1993).



Şekil 5.16. AKAH için serbest rötre birim deformasyonları

Deneysel çalışmalarda yapılan beton deney sonuçlarına ait tüm şekillerin regresyon denklemleri ve korelasyon katsayıları Çizelge 5.1'de görülmektedir.

Çizelge 5.1. AKAB deney sonuçlarının regresyon denklemleri ve korelasyon katsayıları

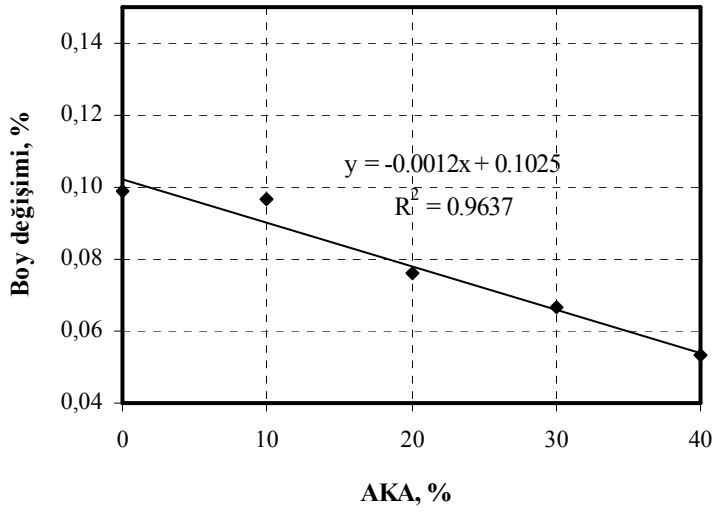
Karışım kodu	**Taze birim ağırlık**			**Çökme**	
	Regresyon denklemleri	R^2		Regresyon denklemleri	R^2
I300	y = -0.68x + 2383.6	0.967		y = 0.06x + 6.6	0.888
I350	y = -0.68x + 2392.8	0.949		y = 0.04x + 7.2	0.916
I400	y = -0.66x + 2405.8	0.988		y = 0.04x + 6.0	1.000
II300	y = -0.78x + 2379.6	0.985		y = 0.08x + 6.0	0.909
II350	y = -0.70x + 2387.8	0.992		y = 0.06x + 5.8	0.914
II400	y = -0.66x + 2404.2	0.873		y = 0.04x + 5.6	0.900
Karışım kodu	**Ultrases geçiş hızı**			**Dinamik elastisite modülü**	
	Regresyon denklemleri	R^2		Regresyon denklemleri	R^2
I300	y = -0.013x + 4.42	0.961		y = -0.17x + 34.2	0.961
I350	y = -0.011x + 4.48	0.953		y = -0.16x + 35.3	0.956
I400	y = -0.012x + 4.58	0.977		y = -0.17x + 37.2	0.973
II300	y = -0.012x + 4.36	0.953		y = -0.17x + 33.2	0.950
II350	y = -0.012x + 4.45	0.958		y = -0.17x + 34.7	0.956
II400	y = -0.013x + 4.54	0.976		y = -0.18x + 36.4	0.975
Karışım kodu	**Yarmada çekme dayanımı**			**Basınç dayanımı**	
	Regresyon denklemleri	R^2		Regresyon denklemleri	R^2
I300	y = -0.0089x + 2.99	0.973		y = -0.140x + 30.0	0.972
I350	y = -0.0117x + 3.32	0.997		y = -0.132x + 32.2	0.962
I400	y = -0.0117x + 3.60	0.979		y = -0.132x + 36.8	0.916
II300	y = -0.0099x + 2.83	0.934		y = -0.132x + 27.6	0.972
II350	y = -0.0111x + 3.22	0.994		y = -0.132x + 30.8	0.948
II400	y = -0.0119x + 3.37	0.981		y = -0.148x + 34.8	0.942
Karışım kodu	**Doğrudan eğilme dayanımı**			**Aşınma**	
	Regresyon denklemleri	R^2		Regresyon denklemleri	R^2
I300	y = -0.0096x + 5.74	0.992		y = 0.0276x + 6.84	0.864
I350	y = -0.0067x + 5.86	0.986		y = 0.0288x + 6.40	0.901
I400	y = -0.0056x + 5.92	0.994		y = 0.0268x + 6.28	0.889
II300	y = -0.0104x + 5.69	0.991		y = 0.0316x + 6.84	0.980
II350	y = -0.0075x + 5.81	0.989		y = 0.0304x + 6.58	0.979
II400	y = -0.0081x + 5.88	0.986		y = 0.0312x + 6.32	0.976

5.11 Dayanıklılık Deneyleri

Bu bölümde dayanıklılık deneyleri çizelgeler ile irdelenerek yorumlanmıştır.

5.11.1 Sülfat etkisi

Sülfat etkilerinin belirlenmesi için yapılan deneylerde harç çubukları ve prizma numuneler üzerinde 6 aylık deney sonucunda veriler toplanmıştır. Deney sürecinde kontrol numuneleri incelendiğinde hasarlar ve fiziksel bozulmalar gözlemlenmiştir. Deneylerde % 5 Na_2SO_4 çözeltisinde 6 ay bekletilen AKA'lı numunelerde kontrol numunelerine göre çok farklı olmamakla beraber daha düşük oranlarda bozulmalar elde edilmiştir (ASTM C 1157, 2000). Hidrolik çimentoların sülfat etkisindeki boy değişimleri 26 haftalık numunelerde % 0.10'a kadar boy değişimi için orta sülfat direnci, % 0.05'e kadar için ise yüksek sülfat direnci sınırı olarak tanımlanmaktadır. Sülfat çözeltide bekletilen 25x25x285 mm prizmatik çubuklar üzerinde 0.001 mm hassasiyetli komparatörle ölçümler yapılmıştır. Sülfat deneyi sonuçları % 0, 10, 20, 30 ve 40 AKAH numuneleri için Şekil 5.17'de verilmiştir. Sülfat deneyleri süresince ultrases geçiş hızı, eğilmede çekme dayanımı ve basınç dayanımları ölçülmüştür.



Şekil 5.17. % 5 Na_2SO_4 çözeltisindeki harç çubuklarının boy değişimi, %

Deneyler sonucunda harç numunelerinin içerdiği AKA miktarı arttıkça boy değişim oranlarının azaldığı görülmüştür. Bu durum AKA'nın bitümlü ve boşluklu yapısından, ayrıca düşük su emme kapasitesinden kaynaklanmaktadır. Çimento çeşidinin değişmemesi nedeniyle numunelerin boy değişimlerinde ASTM C 1157'e göre sınır koşulları sağlanmış ve agregaya bağlı değişimler incelenmiştir (Şekil 5.18). Harç numunelerinin ultrases geçiş hızları sekizinci haftaya kadar artmıştır. Sekizinci haftadan sonra ultrases geçiş hızlarında azalmalar gözlemlenmiştir, fakat azalmaların kontrol serilerine göre yakın değerler aldığı belirlenmiştir (Çizelge 5.2).

Kontrol serilerinin ultrases geçiş hızları sekizinci haftaya kadar 3.112 km/sn'den 4.115 km/sn'e kadar arttığı görülmüştür (Çizelge 5.3). Deneylerde sekizinci haftadan sonra oluşan çatlaklar nedeniyle ultrases geçiş hızlarında azalmalar gözlemlenmiştir. Bu durum numunelerde sülfat etkisi nedeniyle oluşan çatlaklardan kaynaklanmaktadır. Bu çatlaklar sonucunda oluşan boşluklar ultrases geçiş hızlarının sekizinci haftadan sonra azalmasına neden olmaktadır (Karakurt, 2008; Demir, 2008).

Harç çubuklarında boy değişimleri % 0.099 ve % 0.054 değerleri arasında ölçülmüştür. Numunelerdeki asfalt kırığı oranı artıkça boy değişimlerinin azaldığı görülmektedir. Bu durum asfalt kırıklarının sülfat etkisine karşı olumlu etkisi olduğunu göstermektedir. Bunun nedeninin sülfat etkisi altındaki harç numunelerinde asfalt kırığı agregalarının etrafını saran bitüm tabakası ve boşluklu yapı olduğu tahmin edilmektedir.

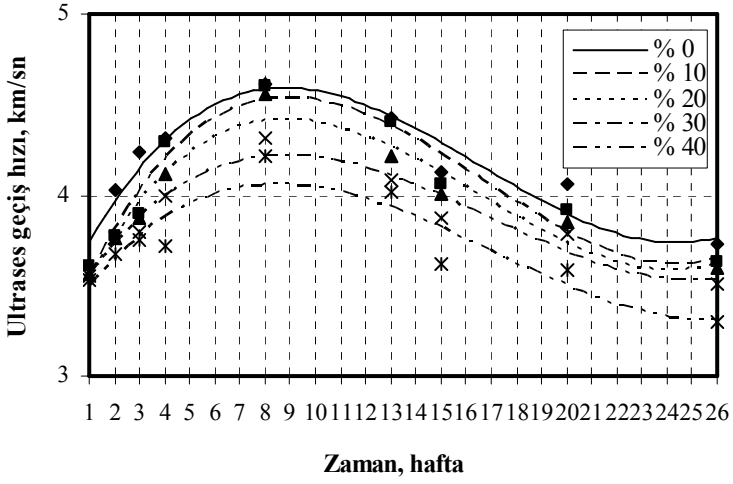
Çizelge 5.2. % 5 Na_2SO_4 çözeltisindeki harç çubuklarının boy değişimi, %

Numune Kodu	**Boy Değişimi, %**	**Sınır Koşulları, %**
% 0 Kontrol	0.099	0.05-0.10
% 10 AKAH	0.097	0.05-0.10
% 20 AKAH	0.076	0.05-0.10
% 30 AKAH	0.067	0.05-0.10
% 40 AKAH	0.054	0.05-0.10

Çizelge 5.3. % 5 Na_2SO_4 çözeltisindeki harçların ultrases geçiş hızları, km/s

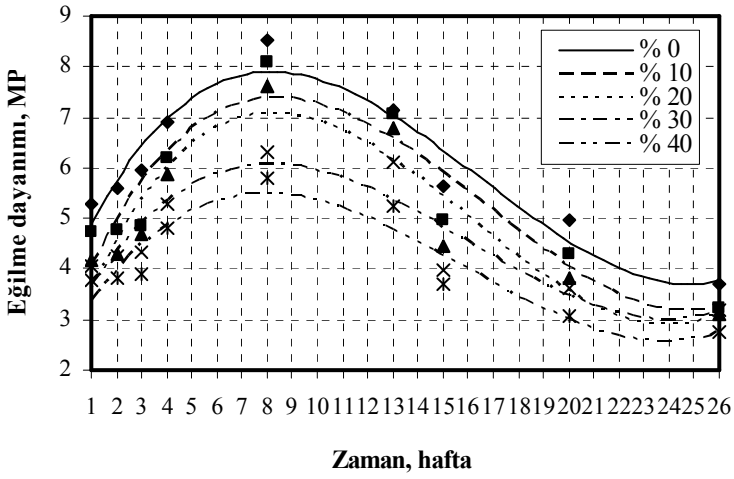
Kür süresi, hafta	% 0 AKAH	% 10 AKAH	% 20 AKAH	% 30 AKAH	% 40 AKAH
1	3.112	3.104	3.068	3.051	3.033
2	3.527	3.271	3.262	3.260	3.178
3	3.736	3.396	3.378	3.298	3.246
4	3.812	3.795	3.615	3.496	3.214
8	4.115	4.105	4.053	3.814	3.712
13	3.921	3.905	3.714	3.587	3.516
15	3.622	3.559	3.508	3.373	3.117
20	3.566	3.412	3.347	3.286	3.081
26	3.225	3.125	3.097	3.011	2.795

Bitüm tabakası agreganın su emme kapasitesini azalttığından sülfatlı çözeltinin agrega tarafından emilmesini önlemektedir. AKAH numunelerin içerdiği asfalt kırığı oranı arttıkça ultrases geçiş hızı değerlerinde azalmalar görülmüştür. Fakat deneylerde elde edilen bu azalmalar kontrol serisi ile karşılaştırıldığında çok büyük farklılıklar göstermemektedir (Şekil 5.18). Bu durumun, artan AKA oranının boyca uzama yönünden gerçekte olumlu etkisi olduğunu fakat numunelerdeki artan AKA oranının mekanik dayanımda azalmalara neden olması ile gerçekleştiğini göstermektedir.



Şekil 5.18. % 5 Na_2SO_4 çözeltisindeki harçların ultrases geçiş hızları, km/sn

Eğilmede çekme dayanımları incelendiğinde kontrol serisi numunelerinin çekme dayanımının sekizinci haftaya kadar arttığı daha sonra ise 3.69 değerlerine kadar azaldığı görülmektedir. En düşük değer ise 2.75 MPa ile % 40 AKAH serisinde görülmektedir (Çizelge 5.4, Şekil 5.19). Diğer AKAH serilerinde ise ileri yaşlarda kontrol serilerine benzer oranlarda azalmalar görülmektedir (Karakurt, 2008). Harç numunelerinin içerdiği asfalt kırığı oranının artması ile azalan mekanik dayanımın etkisi daha belirgin olarak gözlenmiştir. Eğilmede çekme dayanımlarındaki ani azalmaların nedeni çimentoda bulunan C_3A bileşeninin Na_2SO_4 ile reaksiyona girerek etrenjit kristallerini oluşturmasıdır. Etrenjit zamanla genleşerek beton veya harçlarda çatlak oluşumuna ve dağılmalara neden olmaktadır. Etrenjit oluşumu harçlarda istenmeyen bir durumdur. Çizelge 5.5 incelendiğinde, harç numunelerinin basınç dayanımlarının sekizinci haftaya kadar arttığı daha sonra ise azaldığı görülmektedir. Yirmi altıncı hafta sonunda ise en düşük değerler gözlenmektedir. Bunun nedeni etrenjit oluşumunun erken yaşlarda dayanıma olumlu katkısının olması ve daha ileriki yaşlarda ise olumsuz etki yaparak basınç dayanımını azaltıcı yönde etki göstermesidir (Karakurt, 2008). Deneylerde gözlenen en yüksek basınç dayanımı kontrol serisinde sekizinci hafta sonunda 46.55 MPa olarak belirlenmiştir, en düşük basınç dayanımı ise % 40 AKAH serisinde yirmi altıncı hafta sonunda 22.56 MPa olarak belirlenmiştir (Şekil 5.20).



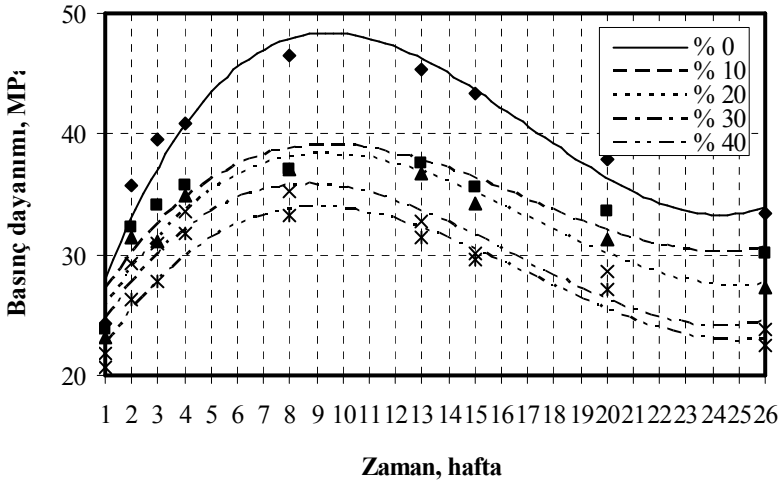
Şekil 5.19. % 5 Na_2SO_4 çözeltisindeki harçların eğilmede çekme dayanımları, MPa

Çizelge 5.4. % 5 Na_2SO_4 çözeltisindeki harçların eğilmede çekme dayanımları, MPa

Kür süresi, hafta	% 0 AKAH	% 10 AKAH	% 20 AKAH	% 30 AKAH	% 40 AKAH
1	5.27	4.73	4.18	4.05	3.77
2	5.58	4.76	4.29	4.26	3.82
3	5.96	4.84	4.68	4.35	3.91
4	6.92	6.18	5.87	5.27	4.82
8	8.53	8.11	7.63	6.32	5.80
13	7.14	7.05	6.79	6.11	5.24
15	5.62	4.98	4.46	3.98	3.71
20	4.96	4.31	3.82	3.62	3.07
26	3.69	3.21	3.10	3.17	2.75

Çizelge 5.5. % 5 Na_2SO_4 çözeltisindeki harçların basınç dayanımları, MPa

Kür süresi, hafta	% 0 AKAH	% 10 AKAH	% 20 AKAH	% 30 AKAH	% 40 AKAH
1	24.33	23.81	23.17	21.89	20.67
2	35.72	32.25	31.43	29.28	26.29
3	39.62	34.13	31.07	30.95	27.72
4	40.94	35.77	34.86	33.53	31.78
8	46.55	37.15	37.12	35.25	33.18
13	45.41	37.52	36.79	32.74	31.44
15	43.29	35.59	34.33	30.12	29.63
20	37.87	33.54	31.27	28.62	27.12
26	33.44	30.18	27.23	23.88	22.56



Şekil 5.20. % 5 Na_2SO_4 çözeltisindeki harçların basınç dayanımları, MPa

5.11.2 Alkali-silika reaktivitesi

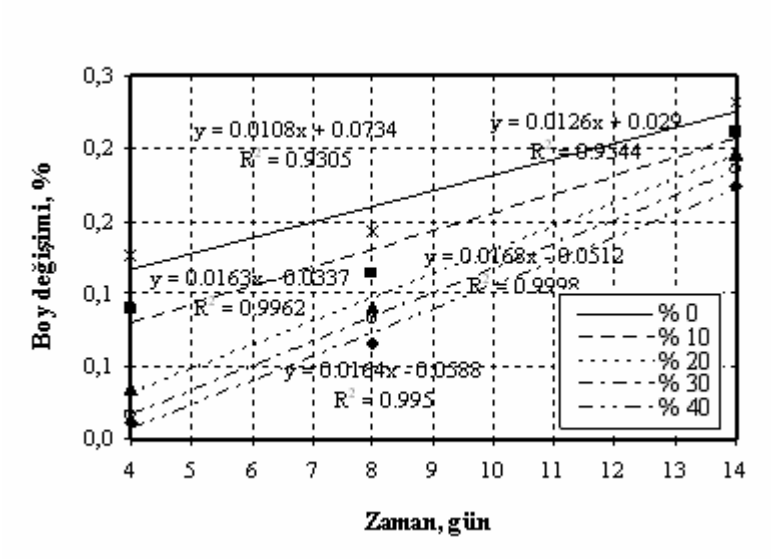
Standartlara göre yapılan deneyler sonucunda Çizelge 5.6'da görüldüğü gibi % 4 NaOH çözeltisinde 14 gün bekletilen harç çubuklarının boy değişimleri ölçülmüştür (ASTM 1260, 2007). Çizelge 5.6 incelendiğinde boy uzamalarında hızlı bir artış gözlenmiştir. Dördüncü gün sonunda ASTM C 1260'a göre tüm numunelerin riskli bölgede olduğu fakat zararlı durumda bulunmadığı gözlenmiştir.

Sekizinci gün sonunda ise % 0, 10 ve 20 AKAH serileri zararsız bölgededir fakat % 30 ve 40 AKAH serileri riskli bölgelerde bulunmaktadırlar. On dördüncü gün sonunda % 0, 10 ve 20 AKAH serileri riskli bölgede bulunurken % 30 ve 40 serileri zararlı bölgede bulunmaktadırlar (Şekil 5.21). Genel olarak incelenirse kullanılan çimentonun CEM II/B-M 32.5R Portland çimentosu olması nedeni ile CEM I 42.5R Portland çimentosundan daha düşük alkali-silika reaktivitesi olduğu anlaşılabilmektedir. Kompoze çimentolar içerdikleri mineral katkılar nedeniyle katkısız çimentolara göre daha alkali-silika reaktivitesi bakımından daha olumlu sonuçlar vermektedirler.

Çizelge 5.6. % 4 NaOH çözeltisindeki harç çubuklarının boy değişimi, %

Kür süresi, gün	% 0 AKAH	% 10 AKAH	% 20 AKAH	% 30 AKAH	% 40 AKAH	Sınır Koşulları, % (ASTM C 1260)
4	0.011	0.017	0.035	0.089	0.127	Zararsız (0-0.10)
8	0.066	0.082	0.091	0.114	0.143	Riskli (0.10-0.20)
14	0.174	0.185	0.197	0.212	0.232	Zararlı (>0.20)

ASR deneyleri agrega yönünden incelendiğinde ise kontrol numuneleri ile AKAH numuneleri ASR değereri arasında çok aşırı farklılıklar gözlenmemekle birlikte düşük oranlarda agregadan kaynaklanan ASR etkisi artışı belirlenmiştir. Bunun nedeni agreganın sahip olduğu bitümlü ve kararsız yapı ile açıklanabilir. Kullanılan agregaların atık malzemeler olması ve tam homojen bir durum elde edilememesi nedeni ile belirlenen değerler gözlemlerle sınırlı olmuştur. Ancak AKA'nın az da olsa ASR reaktivitesinde artışlara neden olduğu belirlenmiştir.



Şekil 5.21. % 4 NaOH çözeltisindeki harç çubuklarının boy değişimi, %

5.11.3 Donma-çözülme etkisi

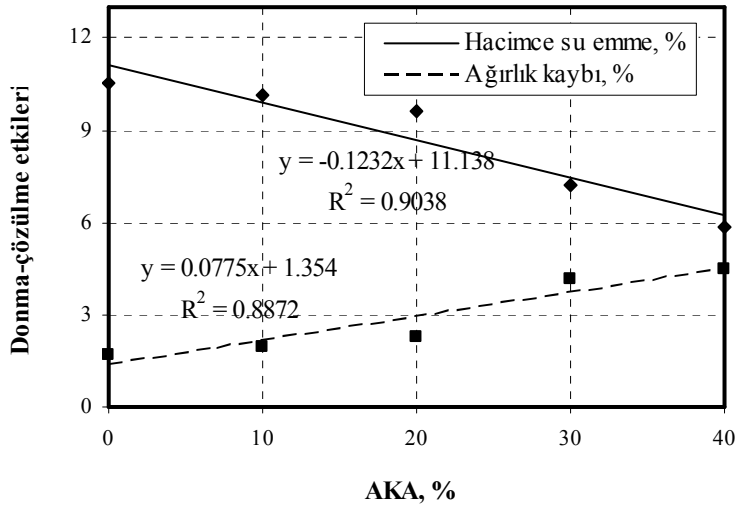
Beton sıcaklığı yeterince düşük olduğunda, kapiler boşluklarda bulunan su donmaktadır. Betonun içerisindeki suların tümü, açıktaki su gibi 0 °C sıcaklıkta donmamaktadır. Büyük kapiler boşluklarda yer alan su, 0 °C veya biraz daha düşük sıcaklıkta donarken, çok küçük kapiler boşluklarda su, -15 °C veya -20 °C gibi sıcaklıklarda donmaktadır. Jel boşlukları çok küçük olduğu için, bu boşluklardaki sular çok daha düşük sıcaklıkta (-78 °C'de) donmaktadır. Betonun içerisindeki suların donma noktası olarak belirtilebilecek tek bir değer yoktur (Demir, 2008). Buza dönüşen suyun hacmi % 9 kadar artmaktadır. Kapiler boşluklar tamamen veya % 91'den daha çok suyla dolu durumda olduklarında, donmanın başlaması ve suyun bir miktarının buz haline dönüşmesiyle, ortaya çıkan hacim genleşmesi, boşluklardaki henüz donmamış durumdaki su üzerinde hidrolik basınç yaratmaktadır (Demir, 2008). Henüz donmamış durumdaki su, boşluklardan dışarıya itilmektedir. Boşluklardan dışarıya çıkmaya zorlanan su, boşlukların etrafındaki çimento hamurunun çatlamasına yol açacak büyüklükte gerilmeler yaratmaktadır. Betondaki sıcaklığın artması ile beton soğukken oluşmuş olan buzlar çözülmekte, böylece, betonun içerisindeki gerilme ortadan kalkmış olmaktadır. Ancak, bir başka zamanda yer alan soğuma karşısında aynı olaylar tekrar

etmektedir (Demir, 2008; Erdoğan, 2003). Donma-çözülme olayı, fiziksel bir etkendir. Islanarak doygun duruma gelen ve donma-çözülme etkisinde kalan bütün betonlar kısa sürede hasar görmektedirler. Tekrar tekrar yer alan donma-çözülme olayları karşısında, betondaki iç gerilmeler nedeniyle, beton yüzeyindeki agregalar gevşeyip kopmakta, betonun içerisinde çatlaklar oluşmakta ve bu çatlaklar giderek daha büyük çatlaklar haline gelmektedirler. Şiddetli ortamda çok sayıda donma-çözülme etkisinde kalan en iyi betonlar en çok 1-2 yıl içerisinde büyük hasar görebilmektedir (Erdoğan, 2003).

Deneylerde hazırlanan harç numuneleri 28 gün süresince standart kür koşullarında bekletildikten sonra numuneler 100±5 ºC sıcaklıkta 24 saat boyunca etüvde kurutularak içerdikleri suyu kaybetmeleri sağlanmıştır. Etüvde kurutulan numuneler tekrar kür havuzunda 24 saat bekletilerek suya doygun hale getirilmiştir. Yüzeyleri kurulanan numunelerin yüzey kuru suya doygun ağırlıkları belirlenmiştir ve daha sonra hacimce su emme değerleri ölçülmüştür. Bulunan değerler Çizelge 5.7'de görülmektedir. AKAH numunelerinde hacimce su emme oranları numunenin içerdiği AKA miktarı arttıkça azalmaktadır. Bu durum AKA'nın sahip olduğu bitümlü yapının su emme değerinin normal agregaya göre daha düşük olması ile açıklanabilir.

Deneysel sonuçlar incelendiğinde en yüksek hacimce su emme oranı % 0 AKAH serilerinde % 10.51, en düşük hacimce su emme oranı ise % 40 AKAH serisinde 5.83 olarak ölçülmüştür. Donma-çözülme deneyleri 100 çevrim olarak uygulanmış ve bu çevrimler sonucunda ölçülen ağırlık kayıpları incelendiğinde en yüksek kayıp % 40 AKAH serilerinde % 4.48 belirlenirken, en düşük değerler ise % 0 AKAH serilerinde % 1.71 olarak belirlenmiştir (Şekil 5.22). Harç numunelerinde kullanılan çimento çeşidi değişmediğinden, dayanım azaldıkça ağırlık kayıpları artmaktadır. Ultrases geçiş hızı ve basınç dayanımı değerleri ilk okumalarda aşırı farklılıklar göstermemekle birlikte son okumalarda oldukça değer kaybına uğramıştır. Bunda hem donma-çözülme çevrimlerinin hem de numunelerde kullanılan artan AKA oranlarının etkisi büyüktür. Ultrases geçiş hızı ilk okumaları ile son okumaları arasında genelde yaklaşık olarak 3.0-3.50 km/sn arasında farklar görülmüştür (Şekil 5.23). Son okumalarda en yüksek ultrases geçiş hızı % 0 AKAH numunelerinde 1.758 km/sn olarak görülürken, en düşük değeri 0.644 km/sn olarak belirlenmiştir.

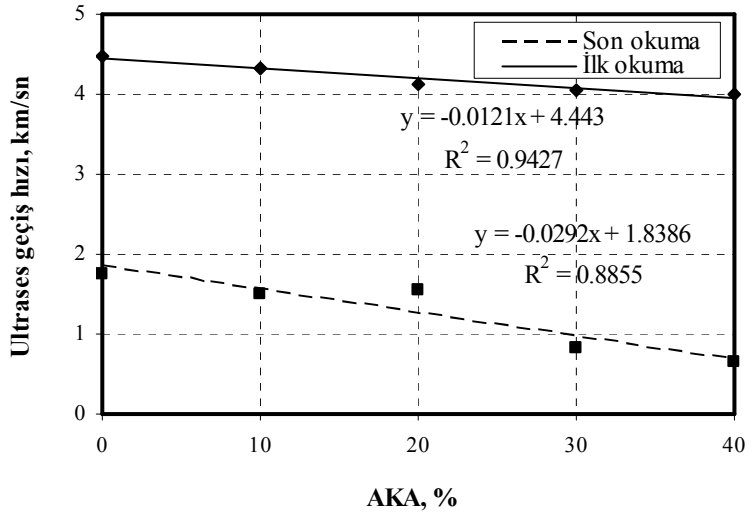
Harç numunelerinin basınç dayanımı son okumalarında ise en yüksek değer % 0 AKAH serilerinde 42.73 MPa olarak belirlenirken, en düşük değer % 40 AKAH serilerinde 26.24 MPa olarak belirlenmiştir. Donma-çözülme çevrimlerinin basınç dayanımları açısından olumsuz etkileri gözlemlenmiştir (Şekil 5.24).



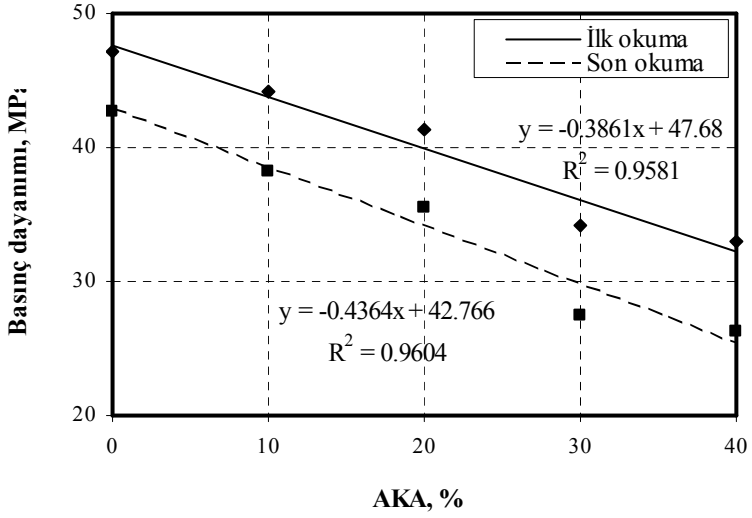
Şekil 5.22. AKAH numunelerinde donma-çözülme etkileri

Çizelge 5.7. AKAH donma-çözülme deney sonuçları

Numune Kodu, % AKAH	Hacimce Su Emme Oranı, %	Ağırlık Kaybı, %	Ultrases Geçiş Hızı, km/sn		Basınç Dayanımı, MPa	
			İlk	Son	İlk	Son
0	10.51	1.71	4.481	1.758	47.18	42.73
10	10.17	1.92	4.323	1.512	44.25	38.17
20	9.65	2.28	4.135	1.539	41.29	35.54
30	7.21	4.13	4.055	0.817	34.14	27.51
40	5.83	4.48	4.009	0.644	32.93	26.24



Şekil 5.23. Donma-çözülme deneyinde ultrases geçiş hızı ilk ve son okumaları



Şekil 5.24. Donma-çözülme deneyinde basınç dayanımı ilk ve son okumaları

5.11.4 Yüksek sıcaklık etkisi

Üretilen harç numunelerinde yüksek sıcaklık etkisi, yüksek sıcaklık fırınında yapılan deneylerle araştırılmıştır. AKAH numunelerinde farklı AKA oranları için değişik sonuçlar elde edilmiştir. AKA'nın içerdiği bitüm nedeniyle sıcaklıktan etkilenmesi kaçınılmaz bir sonuçtur, fakat bu etkinin derecesi AKA'nın beton ve harçlarda kullanılabilmesi bakımından çok önemli bir unsurdur. Deneysel çalışmalarda, sabit çimento çeşidi ve S/Ç oranında üretilen harç numunelerinde değişken olarak sadece farklı oranlarda AKA kullanılmıştır. standart kür koşullarında 28 gün boyunca bekletilen harç numuneleri daha sonra 3 saat süreyle 100 ºC, 300 ºC, 450 ºC ve 600 ºC sıcaklıklarda bekletilerek yüksek sıcaklık fırınından çıkarıldıktan 24 saat sonra numunelerin fiziksel ve mekanik özelikleri araştırılmıştır (Şekil 5.25, Şekil 5.26, Şekil 5.27 ve Şekil 5.28). Çizelge 5.8 incelendiğinde 3 saat süreyle 100 ºC, 300 ºC, 450 ºC ve 600 ºC sıcaklıkta bekletilen numunelerin tümünde birim ağırlık, ultrases geçiş hızı, eğilmede çekme dayanımı ve basınç dayanımı değerlerinde azalmalar gözlenmiştir.

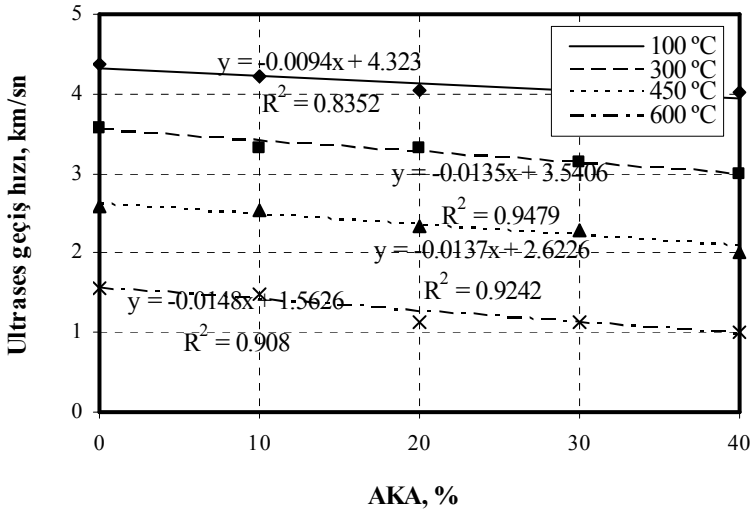
Numunelerin yüksek sıcaklık etkisi altında kalması sonucunda ultrases geçiş hızı değerlerinin düşüş göstermesinin nedeni, beton numunelerinin artan sıcaklıkla gözenekli yapılarının büyümesi ve yapılarındaki suların buharlaşarak meydana gelen kütle kaybı ile ilave boşluklu yapıların oluşmasıdır. Birim ağırlık kayıpları genellikle numunelerin bünyesinde meydana gelen su kaybı ile açıklanabilir. Çizelgelerde görüldüğü gibi 100 ºC sıcaklıkta bekletilen numunelerde oluşan kayıplar daha az iken 600 ºC sıcaklıkta bekletilen numunelerde oluşan kayıplar oldukça fazladır. Bitümlü malzemeler sıcaklık etkisi altında daha kolay şekil değiştirme eğiliminde olduklarından beton veya harç içerisindeki homojen yapıyı bozacak yönde etki gösterirler. Bu nedenden dolayı sıcaklık etkisi, yüksek asfalt kırığı agregası oranı içeren numunelerde daha belirgindir.

Çizelge 5.8'e göre, 100 ºC sıcaklıkta bekletilen numunelerde en yüksek basınç dayanımı % 0 AKAH numunelerinde 47.54 MPa olarak elde edilirken en düşük değer % 40 AKAH numunelerinde 30.19 MPa olarak; 300 ºC sıcaklıkta bekletilen numunelerde en yüksek basınç dayanımı % 0 AKAH numunelerinde 41.39 MPa olarak elde edilirken en düşük değer % 40 AKAH numunelerinde 27.92 MPa olarak; 450 ºC sıcaklıkta

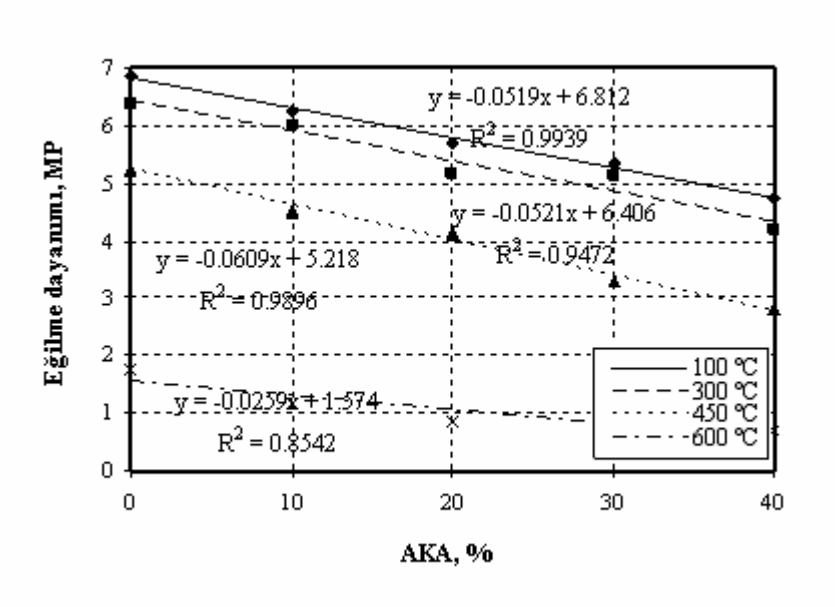
bekletilen numunelerde en yüksek basınç dayanımı % 0 AKAH numunelerinde 39.21 MPa olarak elde edilirken en düşük değer % 40 AKAH numunelerinde 22.43 MPa olarak; 600 ºC sıcaklıkta bekletilen numunelerde en yüksek basınç dayanımı % 0 AKAH numunelerinde 21.63 MPa olarak elde edilirken en düşük değer % 40 AKAH numunelerinde 10.23 MPa olarak elde edilmiştir.

Çizelge 5.8. AKAH numunelerinin 100, 300, 450, 600 ºC sıcaklıktaki özelikleri

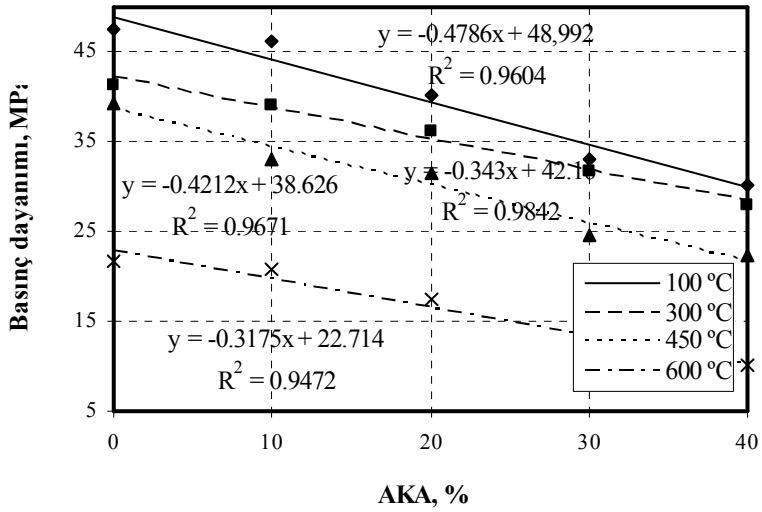
Numune Kodu, %	**Birim Ağırlık, kg/dm^3**	**Ultrases Geçiş Hızı, km/sn**	**Eğilmede Çekme Dayanımı, MPa**	**Basınç Dayanımı, MPa**
100 ºC				
0	2.158	4.381	6.87	47.54
10	2.139	4.223	6.25	46.12
20	2.127	4.035	5.69	40.29
30	2.085	4.027	5.32	32.96
40	2.053	4.009	4.74	30.19
300 ºC				
0	2.037	3.577	6.36	41.39
10	1.981	3.324	5.98	39.17
20	1.945	3.315	5.17	36.21
30	1.933	3.142	5.13	31.81
40	1.912	2.991	4.18	27.92
450 ºC				
0	1.871	2.581	5.24	39.21
10	1.942	2.528	4.52	33.18
20	1.884	2.325	4.14	31.57
30	1.833	2.297	3.29	24.62
40	1.831	2.011	2.81	22.43
600 ºC				
0	1.832	1.566	1.77	21.63
10	1.819	1.489	1.19	20.77
20	1.811	1.142	0.88	17.37
30	1.783	1.127	0.74	11.82
40	1.774	1.005	0.70	10.23



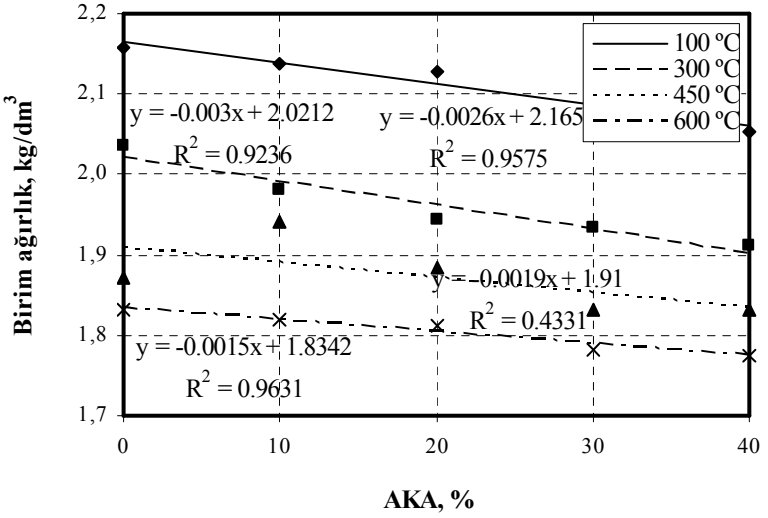
Şekil 5.25. Yüksek sıcaklık etkisi altında AKAH numunelerin ultrases geçiş hızı



Şekil 5.26. Yüksek sıcaklık etkisi altında AKAH numunelerin eğilme dayanımı



Şekil 5.27. Yüksek sıcaklık etkisi altında AKAH numunelerin basınç dayanımı



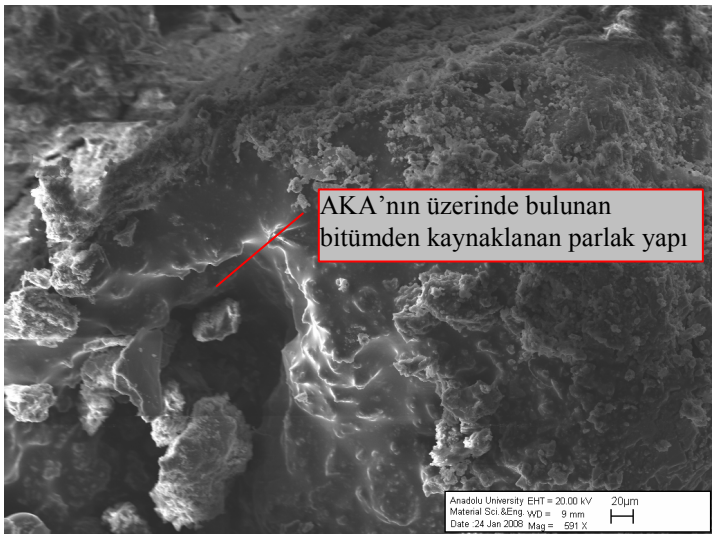
Şekil 5.28. Yüksek sıcaklık etkisi altında AKAH numunelerin birim ağırlıkları

5.12 Mikroyapı İncelemesi

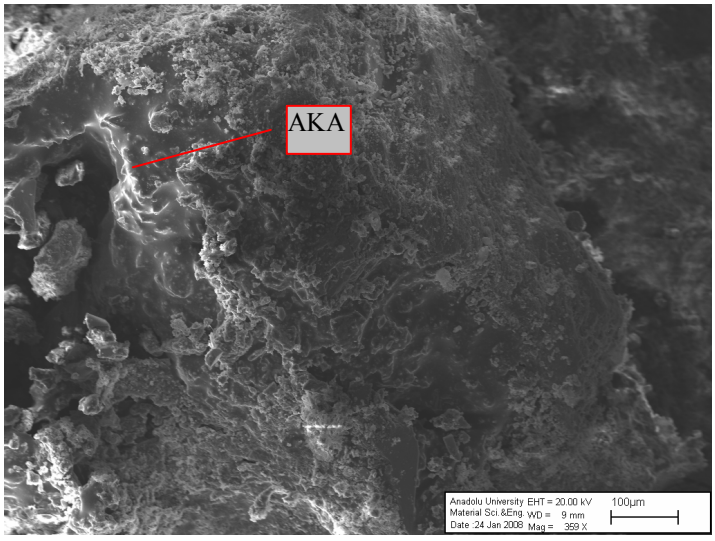
Numune kaplama işlemi kapalı argon gazı ortamında 0.2 mm Hg negatif basınç altında numune yüzeyinde yaklaşık 200 ºA kalınlığında altın tabakası ile sağlanmıştır. SEM görüntüleri incelendiğinde AKA ve harç arasında parlak yüzeyli ve pürüzlülük düzeyi düşük olan bir yapı gözlenmektedir. Bu durumun AKA'nın sahip olduğu bitüm miktarı ile değiştiği gözlenmiştir (Şekil 5.29, Şekil 5.30). Çalışmada incelenen diğer SEM görüntüleri çalışmanın ekler bölümünde görülmektedir. Deneylerde üretilen asfalt kırıklı küçük harç numunelerinin SEM ile ikincil elektronlar kullanılarak 100X, 150X, 250X, 350X, 500X, 600X aralıklarındaki boyutlarda fotoğrafları çekilmiş ve SEM fotoğraflarında görülen yapıların atomsal içeriği EDX kullanılarak belirlenmiştir. Fotoğraflarda harçlardaki normal agregalar ve asfalt kırıklı harçlardaki asfalt kırığı agregası AKA olarak işaretlenmiştir. Ayrıca fotoğraflarda agregalar belirlendikten sonra harç bölgesi belirlenerek agrega ile harcın birleşim bölgesi olan arayüzler oklar ile işaretlenmiştir. İşaretlenen bölgelerde alınan SEM fotoğrafları ile bu arayüzlerdeki değişimler ve oluşan çimento jel yapısı görülmeye çalışılmıştır. Daha sonra farklı agrega bölgelerinden alınan noktaların EDX analizi yapılarak bu noktalardaki atomsal içerikler yüzdesel olarak belirlenmiştir. Harç bölgesinde yapılan EDX analizlerin bazıları elverişli durumlar gözetilerek normal agregalı harç numunesinden bazıları da asfalt kırıklı harç numunesi üzerinden yapılmıştır. Böylece asfalt kırığı agregasının iç yapısında meydana getirdiği değişimler sayısal olarak görülmeye çalışılmıştır.

Üretilen harçlarda SEM için numune hazırlanırken yapılan kesme işlemlerinde gerek normal agregaların ve gerekse asfalt kırıklı agregaların yapı içinde farklı büyüklüklerde ve düzenli bir şekilde dağıldıkları görülmüştür. Harç ve agrega arasında sıkı bir bağlanma görülmüştür. Normal agreganın yüzeyinde 100 büyütmede herhangi bir boşluk ve çatlak bulunmazken harçlarda küçük boşluklar ve kılcal çatlaklar görülmüştür. Asfalt kırığı yüzeyinde ise sadece ufak boyutlu boşluklar görülmüştür. Bu boşluklar asfalt kırığı agregasının kırılma işlemi sonucunda oluşabilmesinin yanında asfalt kırığının köşeli ve pürüzlü agrega olmasından kaynaklanmaktadır. Normal agrega ile harç arasındaki arayüzeyin

oldukça iyi bir yapıya sahip oldukları daha iyi görülmektedir. Hidratasyon ürünleri arayüz bölgesinde daha iyi dağılmıştır. Asfalt kırıklı agrega ile harç arasındaki bağın oldukça iyi olduğu görülmektedir. Normal agrega, harç ve asfalt kırığı agregasının üzerindeki işaretlenen spektrumlardaki atomsal içerikleri, ortaya çıkan elementler EDX ile belirlenmiştir. EDX analizi sonucu Ca, C, O, Mg ve Si'den oluşan elementler görülmüş, değerlendirmeler ve ekler bölümünde gösterilmiştir.



Şekil 5.29. AKAH SEM görüntüsü, 590X



Şekil 5.30. AKAH SEM görüntüsü, 360X

BÖLÜM 6

ASFALT KIRIĞI AGREGALI BETONLARDA YSA VE BM KULLANIMI

Taze beton ve sertleşmiş beton özelikleri betonun ömrü boyunca kazanacağı tüm özeliklere etki etmektedir. Sertleşmiş beton özeliklerinden en önemlileri dayanım, dayanıklılık ve rötre olarak belirlenebilir. Sertleşmiş betonda birim ağırlık, basınç, eğilme ve çekme dayanımı ve ultrases geçiş hızı deneyleri ile beton özelikleri ile ilgili fikir edinilebilir. Sertleşmiş beton deneylerine malzeme özelikleri, miktarları ve çevre koşulları gibi birçok faktör etki etmektedir. Yapılan deneyler çok zaman almakta ve ekonomikliğini kaybetmektedir. Günümüzde bilim dünyasının üzerinde çalıştığı yapay zeka yöntemleri, pek çok problemin çözümünde başarı ile kullanılmış ve sorunlara pratik bir yaklaşım sağlamıştır (Sarıdemir, 2008; Topçu and Sarıdemir, 2008 a). Başlangıçta tıp alanında, uydu fotoğraflarının okunması ve belirlenmesi, strateji belirleme gibi askeri amaçlı uygulamalarda, optimizasyon ve kontrol problemlerinde, endüstriyel uygulamalarda kullanmak için geliştirilen bu teknikler günümüzde dünyanın her yerinde hemen her alanda daha da çok artarak kullanılmaya başlamıştır. Özellikle, yapay sinir ağları (YSA) ve bulanık mantık (BM) birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır (Şen, 2004; Topçu and Sarıdemir, 2008 b; Sarıdemir, 2008).

Bilgisayar teknolojisindeki gelişmelere paralel olarak ortaya çıkan sayısal hesap yöntemleri, analitik çözümün yapılamadığı durumlarda büyük avantaj sağlamaktadır. Yeter yaklaşıklıkta çözümler veren; sonlu farklar, sonlu elemanlar, sınır elemanlar gibi sayısal yöntemler günümüzde etkin olarak kullanılmaktadır. Bu yöntemler; sürekli bir sistemi, çeşitli noktalarda birbirine bağlı olan düğümlerden oluştuğunu kabul etmektedir. Ayrıca bu yöntemler, polinom ya da seri yaklaşımla, türev denklemlerinin doğrusal denklem takımı veya çözümü kolayca elde edilebilen bir duruma indirgenmesine dayanmaktadır. Günümüzde sıklıkla kullanılan bu yöntemlerin hepsinde de geleneksel programlama teknikleri kullanılmakta ve belirli kabuller yapılmaktadır (Sarıdemir, 2008; Topçu and Sarıdemir, 2008 c; Şen, 2004). Bilgisayar teknolojisindeki gelişmeler teorik ve pratik çalışmalar yapan inşaat mühendislerinin de

ilgisini çekmiş ve yapay zeka genel adıyla bilinen YSA, BM, genetik algoritma yöntemleri geleneksel yöntemlere alternatif olmuşlardır. Bu yöntemler inşaat mühendisliğinde bir çok tasarım parametreleri arasından etkin çözüme ulaşmada, beton teknolojisindeki deneysel çalışmalarda, taşıyıcı sistem seçmede, standartların kontrolünde, deprem riski altındaki yapılarda, zemin özelliklerinin belirlenmesi ve sınıflandırılmasında, şevlerde stabilite analizinde, şantiye yönetimi ve organizasyonunda, malzeme kalite kontrolünde, su yapılarında, şehir içi trafik sinyalizasyonu ve optimum sinyal sürelerinin belirlenmesinde, üst yapı malzeme karışım hesabında, hava trafik kontrolünde, ulaşım sistemlerinin planlanmasında, trafik akışının kontrolü ve kaza analizinde, yol alt yapısı sırasında tahmini maliyet gibi bir çok alanlarda kullanılmaktadırlar (Topçu and Sarıdemir, 2008 d). YSA genelde, betonun karmaşık davranışının modellenmesi, deneysel çalışmaların modellenmesi, yapıların statik ve dinamik analizi, risk analizi, plak ve kabukların çözümü, depreme dayanıklı yapı tasarımı, hasarların belirlenmesi, köprülerin dinamik analizinde kullanılır.

BM özellikle, betonun karmaşık davranışının modellenmesi, deneysel çalışmaların modellenmesi, yapıların statik ve dinamik analizi, depreme dayanıklı yapı tasarımı, zemin sıvılaşması ve parametrelerinin analizi, şehir içi trafik sinyalizasyonu ve optimum sinyal sürelerinin belirlenmesi, risk analizi, optimizasyon ve kontrol gibi uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır (Topçu ve Sarıdemir, 2008 a). Beton teknolojisinde de, betonun fiziksel ve mekanik özeliklerinin belirlenmesi için deneysel ve analitik yöntemlerden başka birçok yöntem kullanılmaktadır (Sarıdemir, 2008). Bu yöntemler arasında son zamanlarda çok kullanılan YSA ve BM yöntemleri de bulunmaktadır. Beton özeliklerinin bir takım deneysel çalışma ve bazı kabullerle kesinlik kazandırıldığı bilinmektedir. Ancak gerçekte kesin gibi görünen bazı kabullerin bir takım yaklaşıklık içerdiği ve belirli sınırlar içersinde olduğu da bilinen bir gerçektir. Dolayısıyla genel anlamda, bu tür yaklaşıklıklara her zaman gereksinim duyulmaktadır ve günümüzde gelişen bir şekilde üzerinde çalışılmaktadır. Deneysel çalışmalar kullanılarak YSA ve BM yöntemlerinde oluşturulan modeller eğitildikten sonra, yapılan testlerle kısa sürede başarılı sonuçlar elde edilebilmektedir (Sarıdemir, 2008). Ancak, deneysel çalışma verileri kısıtlı sayıda ise modellerin eğitilmesi ve testlerin gerçekleştirilmesi bazen hedeflenen değerlere ulaşmayı zorlaştırmakta ve çok

fazla deney yapmakta bazen ekonomik olmamaktadır. Böyle durumlarda da, yine YSA ve BM yöntemleri kullanılabilmekte ve veri sayısı arttırıldığı zaman önceden yapılan modeller güncelleştirilebilmektedir. YSA ve BM yöntemlerinde oluşturulan modellerde kullanılan veri sayısı yeterli sayıda ise hedeflenen sonuçlara ulaşmak o kadar kolay olmaktadır. YSA ve BM yöntemlerinin bu gibi avantajları betonun fiziksel ve mekanik özeliklerinin belirlenmesinde bu yöntemlerin kullanabilirliğini arttırmaktadır.

6.1 Farklı Agregalarla Üretilen Betonların Modellenmesi

Yıllardır betonun özeliklerini tahmin etmek için çeşitli yöntemler kullanılarak araştırmalar yapılmaktadır. Genellikle, bu yöntemlerde de deneysel çalışmalardan yararlanılmaktadır. Son 20 yıldan beri de, YSA ve BM yöntemlerine dayanan farklı modelleme yöntemleri popüler olmuştur ve çeşitli inşaat mühendisliği uygulamaları için birçok araştırmacı tarafından kullanılmaktadır. Akıllı sistemlerin kurulmasında YSA ve BM yöntemleri doğal tamamlayıcı araçlardır (Sarıdemir, 2008). YSA ham verilerle ilgilendiğinden düşük düzeydeki sayısal yapıları iyi bir şekilde temsil ederken; BM ise uzmanların çalışma alanlarından elde ettikleri sözel bilgileri kullanarak yüksek düzeyde değerlendirme yapmak için uğraşır (Sarıdemir, 2008; Topçu and Sarıdemir, 2008 d).

Malzeme davranışı için YSA ve BM yöntemlerle model geliştirmenin temel stratejisi, bu malzemeyi kullanarak deney sonuçlarından YSA ve BM yöntemlerinin eğitilmesidir. Eğer deneysel sonuçlar malzeme davranışı hakkında bilgi içeriyorsa, o zaman eğitilen YSA ve BM yöntemleri malzeme modeli olarak malzemenin davranışını nitelendirmek için yeterli bilgiyi içerecektir. Böyle eğitilen YSA ve BM yöntemleri sadece deneysel sonuçlar üretmeyecek, aynı zamanda da genelleştirme yetenekleriyle diğer deneylerdeki sonuçlara yaklaşabileceklerdir (Topçu and Sarıdemir, 2008 d).

Bu çalışmada da birçok deneysel çalışmalardan yararlanarak, deneysel sonuçları tahmin edebilmek için YSA ve BM yöntemlerinden yararlanılmıştır (Sarıdemir, 2008). Deneysel sonuçları tahmin etmek için YSA yönteminde kullanılan modeller çok katmanlı, ileri beslemeli ve hatanın geriye dağılım algoritmasının kullanıldığı modellerdir. BM yönteminde kullanılan modeller ise, Sugeno tipi bulanık sonuç

çıkarma sistemleridir. Sugeno tipi bulanık sonuç çıkarma sistemleri Takagi, Sugeno ve Kang tarafından geliştirilen ve giriş çıkış uzayından sistematik olarak bulanık kurallar çıkartan modellerdir. YSA ve BM yöntemlerinde oluşturulan modellerde belirli sayıdaki deney girdi ve çıktı değerleri ile modeller eğitilmiş daha sonra sadece deney girdi değerleri kullanılarak modellerin performansı istatistiksel parametrelerle değerlendirilmiştir. Her iki yöntemde oluşturulan modellerde de deneysel sonuçlara çok yakın sonuçlar elde edilebileceği çalışmalarda gözlenmiştir (Sarıdemir, 2008).

6.2 AKAB Taze Beton Özeliklerinin YSA ve BM ile Tahmini

Bu çalışmada AKAB taze beton deneylerinden yararlanarak, deney yapmadan taze betonun birim ağırlık ve çökme değerlerini tahmin edebilmek için YSA ve BM yöntemlerinden yararlanılmıştır. YSA ve BM yöntemlerinde kullanılan taze beton özelikleri daha önce deneysel çalışmalar ile elde edilmiş özeliklerdir. Bu yöntemlerde oluşturulan modellerin eğitilmesi için çimento (C), su (S), kum (K), ince kırmataş (KI), iri kırmataş (KII), ince asfalt kırığı agregası (AKAI) ve iri asfalt kırığı agregası (AKAII) girdi olarak; taze betonun birim ağırlık (BA) ve çökme (Ç) değerleri çıktı olarak girilmiştir. Modeller eğitildikten sonra deney sonuçlarını girmeden deney girdi değerleriyle testler yapılmış, gerçek değerlere yakın değerler bulunmuştur.

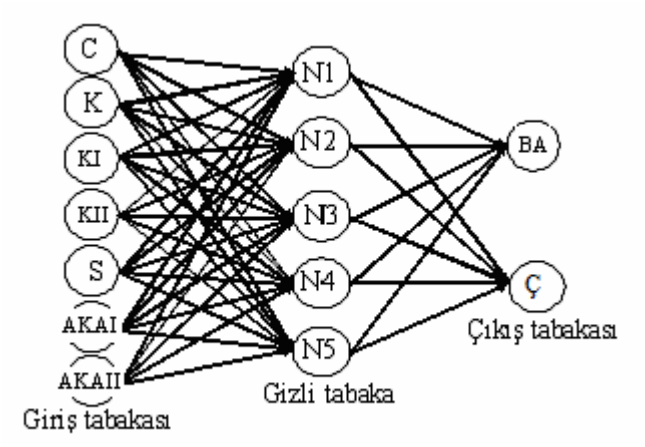
6.3 AKAB Taze Beton Özeliklerinin YSA ile Modellenmesi

Çalışmada 36 adet AKAB taze beton deney sonucu YSA yöntemindeki işlemlerde kullanılmıştır. Deneysel çalışmalardan elde edilen 29 adet BA ve Ç değerleri modelin eğitilmesi için, geri kalan 7 tanesi de eğitilen modelin testi için kullanılmıştır. Deneysel çalışmalarda karışım malzemeleri olarak kullanılan C, K, KI, KII, S, AKAI ve AKAII miktarları olmak üzere toplam 7 özelik modelin giriş tabakasında, AKA'lı taze betonun BA ve Ç değerleri modelin çıkış tabakasında kullanılmıştır. YSA yönteminde geliştirilen modelin mimarisinde Şekil 6.1'de görüldüğü gibi bir adet gizli tabaka seçilmiş ve gizli tabakada 5 hücre belirlenmiştir. Mimaride belirlenen bir adet gizli tabaka ve gizli tabakada 5 hücrenin belirlenmesi AKAB taze betonun BA ve Ç değerlerinin tahmin edilmesi için en iyi öğrenmenin sağlandığı yapıdır.

Bu mimari seçilirken değişik mimari yapılar ve gizli tabaka sayıları farklı öğrenme döngüleri ile denenmiştir. Gizli tabaka ve çıkış tabakasındaki hücre çıkışlarında doğrusal olmayan Sigmoid fonksiyonu kullanılmıştır. Momentum oranı ve öğrenme oranı değerleri bulunarak belirlenen öğrenme döngüsü ile model eğitilmiştir. Eğitilen model sadece girdi değerleri kullanılarak test edilmiş ve deney sonuçlarına çok yakın değerler elde edilmiştir. AKAB taze betonun BA ve Ç değerleri için YSA yönteminde oluşturulan modelin eğitiminde kullanılan parametre değerleri Çizelge 6.1'de görüldüğü gibi belirlenmiştir ve yorumlanmıştır (Sarıdemir, 2008).

Çizelge 6.1. AKAB için model parametreleri

Parametreler	**YSA**
Girdi tabakası hücre sayısı	7
Gizli tabaka sayısı	1
Gizli tabaka hücre sayısı	5
Çıktı tabakası hücre sayısı	2
Momentum oranı	0.86
Öğrenme oranı	0.93
Eğitim sonundaki hata	0.000014
Öğrenme döngüsü	5000



Şekil 6.1. AKAB taze beton için sinir ağı modelinde kullanılan sistem

6.4 AKAB Taze Beton Özeliklerinin BM ile Modellenmesi

Çalışmada 36 adet AKAB taze beton deney sonucu BM yöntemindeki Sugeno tipi bulanık sonuç çıkarma sisteminde kullanılmıştır. Deneylerden 29 tanesi Sugeno tipi bulanık sonuç çıkarma sistem modellerinin eğitilmesi için, 7 tanesi de eğitilen modellerin testi için kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan C, K, KI, KII, S, AKAI ve AKAII karışım miktarları olmak üzere toplam 7 özellik modellerin giriş katmanında, taze betonun BA ve Ç değerleri modellerin çıkış katmanında ayrı ayrı kullanılmıştır. Sugeno tipi sonuç çıkarma sistem modellerinde üçgensel tip üyelik fonksiyonları kullanılmıştır. AKAB taze beton özeliklerinden BA ve Ç değerlerini elde etmek için iki ayrı model oluşturularak yarıçapa göre kümeler belirlenmiş ve 100 öğrenme döngüsü ile modeller eğitilmiştir (Topçu and Sarıdemir, 2008 d).

6.5 AKAB Sertleşmiş Beton Özeliklerinin YSA ve BM ile Tahmini

Bu çalışmada, AKAB sertleşmiş beton özeliklerini tahmin edebilmek için YSA ve BM yöntemlerinden yararlanılmıştır. YSA ve BM yöntemlerindeki modellerde kullanılan AKAB sertleşmiş beton özelikleri daha önce deneysel çalışmalarda bulunmuş sonuçlardır. Modellerin eğitilmesinde gün (G), çimento (C), su (S), kum (K), ince kırmataş (KI), iri kırmataş (KII), ince asfalt kırığı agregası (AKAI) ve iri asfalt kırığı agregası (AKAII) girdi olarak; sertleşmiş birim ağırlık (BA), silindir basınç dayanımı (f_c) ve ultrases geçiş hızı (UGH) değerleri çıktı olarak kullanılmıştır. Modeller eğitildikten sonra deney sonuçlarını girmeden sadece deney girdi değerleri ile testler yapılmış gerçek değerlere yakın değerler elde edilmiştir. Modellerden elde edilen sonuçlar AKAB sertleşmiş beton özeliklerinden olan BA, f_c ve UGH değerlerinin YSA ve BM yöntemleriyle tahmin edilebileceğini göstermiştir (Topçu and Sarıdemir, 2007).

YSA yönteminde kullanılan model çok katmanlı, ileri beslemeli ve hatanın geriye dağılım algoritmasının kullanıldığı bir modeldir. BM yönteminde kullanılan model ise, Sugeno tipi bulanık sonuç çıkarma modelidir. Sugeno bulanık modeli Takagi, Sugeno ve Kang tarafından geliştirilen ve giriş-çıkış uzayından sistematik olarak kural çıkartan bir modeldir (Topçu and Sarıdemir, 2008 c).

6.6 AKAB Sertleşmiş Beton Özeliklerinin YSA ile Modellenmesi

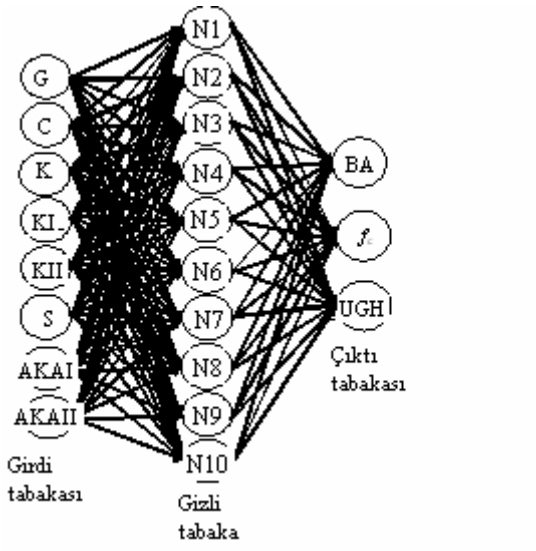
Çalışmada 64 adet deney sonucu YSA modelindeki işlemlerde kullanılmıştır. Deneylerden 32 tanesi modellerin eğitilmesi için, 32 tanesi de eğitilen modellerin testi için kullanılmıştır. YSA yönteminde oluşturulan modelin giriş tabakasında G, C, K, KI, KII, S, AKAI ve AKAII değerleri olmak üzere toplam 8 özelik, sertleşmiş beton özeliklerinden BA, f_c ve UGH değerleri modelin çıkış tabakasında kullanılmıştır.

YSA modelinde Şekil 6.2'de görüldüğü gibi bir adet gizli tabaka seçilmiş ve gizli tabakada 10 hücre belirlenmiştir. Gizli tabaka ve çıkış tabakasındaki hücre çıkışlarında doğrusal olmayan Sigmoid fonksiyonu kullanılmıştır.

Momentum oranı ve öğrenme oranı değerleri bulunarak öğrenme döngüleri ile model eğitilmiştir. Eğitilen model sadece girdi değerleriyle test edilmiş ve deney sonuçlarına yakın değerler bulunmuştur. Oluşturulan modelde kullanılan parametre değerleri Çizelge 6.2'deki gibi belirlenmiştir (Topçu and Sarıdemir, 2008 b).

Çizelge 6.2. AKAB setleşmiş beton için model parametreleri

Parametreler	YSA
Girdi tabakası hücre sayısı	8
Gizli tabaka sayısı	1
Gizli tabaka hücre sayısı	10
Çıktı tabakası hücre sayısı	3
Momentum oranı	0.78
Öğrenme oranı	0.4
Eğitim sonundaki hata	0.000155
Öğrenme döngüsü	15.000



Şekil 6.2. AKAB sertleşmiş beton için sinir ağı modelinde kullanılan sistem

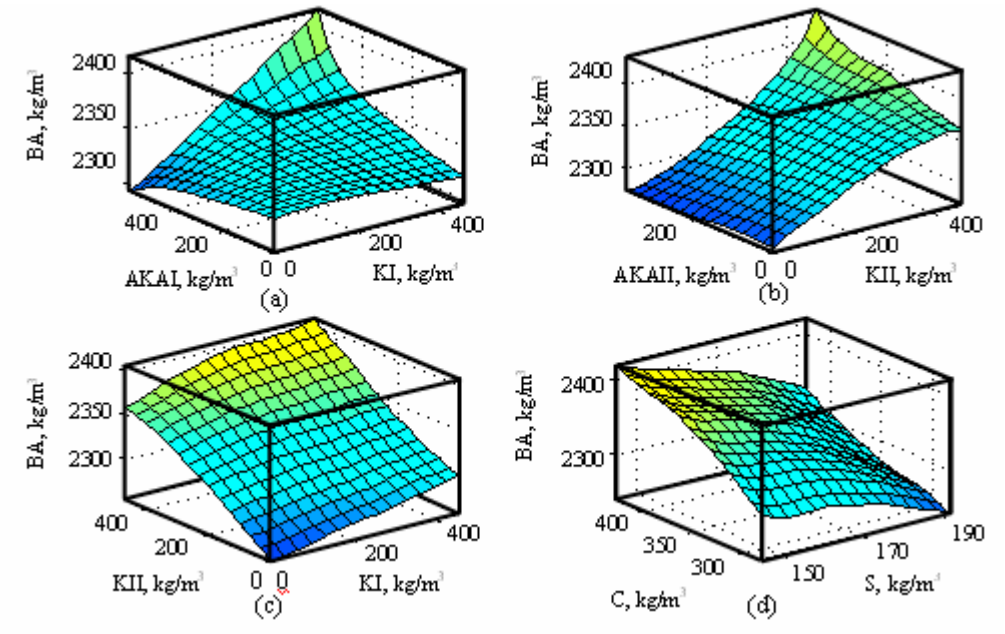
6.7 AKAB Sertleşmiş Beton Özeliklerinin BM ile Modellenmesi

Çalışmada 64 adet deney sonucu BM yöntemindeki Sugeno tipi sonuç çıkarma sisteminde oluşturulan modellerdeki işlemlerde kullanılmıştır. Deneylerden 32 tanesi modellerin eğitilmesi için, 32 tanesi de eğitilen modellerin testi için kullanılmıştır. Modellerde girdi olarak G, C, K, KI, KII, S, AKAI ve AKAII miktarları olmak üzere toplam 7 özellik; çıktı olarak ise sertleşmiş beton özeliklerinden BA, f_c ve UGH değerleri kullanılmıştır. BM yönteminde, Sugeno tipi bulanık sonuç çıkarma sistemlerinde sertleşmiş betonun BA, f_c ve UGH değerlerini tahmin etmek için yarıçapa göre kümeler oluşturulmuş ve öğrenme döngüleri ile modeller eğitilmiştir. Eğitilen modellerin testi için sadece girdi değişkenleri kullanılarak sertleşmiş AKAB'ın BA, f_c ve UGH değerleri bulunmuştur. Bu değerler şekiller ile detaylı olarak yorumlanmıştır. Sugeno tipi sonuç çıkarma sistemine ait kural tabanında, bulanık veriler "prod" (bulanık ve) operatörü ile bağlantılıdır ve kurallar "max-min" ayrışma tekniği kullanılarak birleştirilmiştir. Buna ek olarak her çıktı değişkeni için 100 öğrenme döngüsü sürdürülmüş ve işlemler gözlemlerdeki hata azalması sabitlenince sonlandırılmıştır.

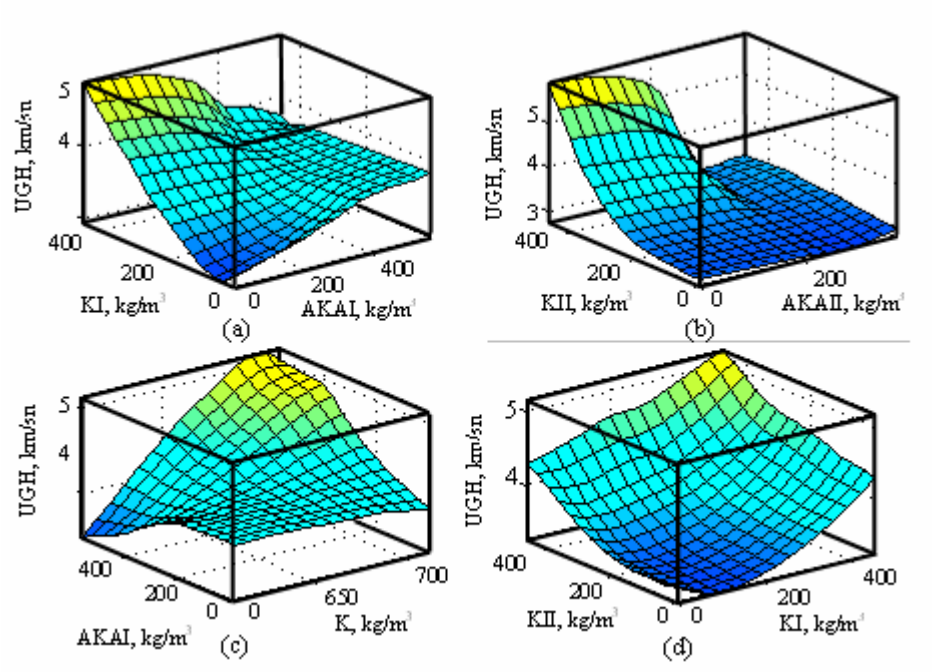
Sugeno tipi sonuç çıkarma sisteminde BA, f_c ve UGH değerlerinin girdi verileri için eğitim veri seti üyelik fonksiyonları üçgensel tiptir ve parametre terimi alt-uzay eğitim veri seti kümelemesi kullanılarak belirlenmiştir (Sarıdemir, 2008). Böylece, AKAB'ın sertleşmiş beton özeliklerinden olan BA, f_c ve UGH değerleri için sırasıyla 10, 26 ve 23 kural aşağıdaki gibi elde edilerek uygulanmıştır. Bu çalışmadaki asfalt kırığı agregası ile üretilen betonların BA, f_c ve UGH değerlerinin üyelik fonksiyonlarının hepsi 8 girdi ve 1 çıktıdan oluşmaktadır.

Sugeno tipi bulanık sonuç çıkarma modelinin tahmini sonuçlarına dayanarak, iki faktörün her bir yüzey haritası üzerinde BA değerlerine etkisi Şekil 6.3'te görülmektedir. AKAB BA değerleri Şekil 6.3a ve 6.3b'de görüldüğü gibi AKAI ve AKAII miktarı arttıkça azalmış, KI ve KII miktarı arttıkça ise artmıştır. AKAB BA değerleri Şekil 6.3c'de görüldüğü gibi, KI ve KII miktarı arttıkça artmıştır. AKAB BA değerleri Şekil 6.3d'de görüldüğü gibi S miktarı arttıkça azalmış, C miktarı arttıkça ise artmıştır. Kısacası, AKAI ve AKAII agregalarının kullanılması BA değerlerini azaltmıştır. BM yöntemindeki Sugeno tipi bulanık sonuç çıkarma modelinin tahmini sonuçlarına dayanarak, iki faktörün her bir yüzey haritası üzerinde AKAB UGH değerlerine etkisi Şekil 6.4'te görülmektedir. Yapılan çalışmalar sonucunda, AKAB UGH değerleri Şekil 6.4a, 6.4b ve 6.4c'de görüldüğü gibi AKAI ve AKAII miktarı arttıkça azalmış, KI, KII ve K miktarı arttıkça kademeli olarak artmıştır.

AKAB'ın UGH değerleri Şekil 6.4d'de görüldüğü gibi, KI ve KII miktarı arttıkça kademeli olarak artmıştır. Normal agrega yerine kullanılan AKAI ve AKAII agregalarının miktarlarının artması AKAB'ın UGH değerleri üzerinde olumsuz etki göstermektedir. Bu etki deneysel sonuçlardan da görülebilmektedir. Sugeno tipi bulanık sonuç çıkarma sistemlerinden elde edilen üç boyutlu şekillerden de görüldüğü gibi agrega yerine hacimce kullanılan AKAI ve AKAII miktarlarının artması AKAB BA, f_c ve UGH değerlerini kademeli olarak azaltmıştır. Şekillerden de görüldüğü gibi, AKAB BA, f_c ve UGH değerlerinin azalmasına AKAI agregalarına göre AKAII agregaları daha fazla etki etmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda, AKA boyutlarının AKAB'ın BA, f_c ve UGH değerlerini etkileyebildiği açıkça görülmüştür.



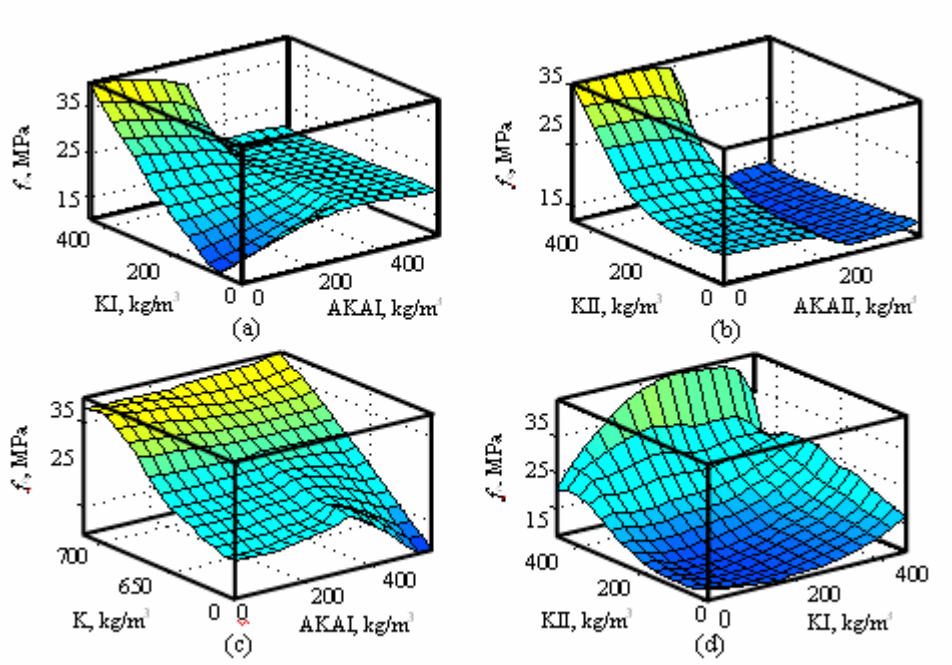
Şekil 6.3. AKAB BA değerlerine: a) ince AKA ve ince kırmataşın, b) iri AKA ve iri kırmataşın, c) iri ve ince kırmataşın, d) çimento ve suyun etkisi



Şekil 6.4. AKAB UGH değerlerine: a) ince AKA ve ince kırmataşın, b) iri AKA ve iri kırmataşın, c) ince AKA ve kumun, d) ince ve iri kırmataşın etkisi

Sugeno tipi bulanık sonuç çıkarma modelinin tahmini sonuçlarına dayanarak, iki faktörün her bir yüzey haritası üzerinde AKAB'ın f_c değerlerine etkisi Şekil 6.5'te görülmektedir. AKAB'ın f_c değerleri Şekil 6.5a, 6.5b ve 6.5c de görüldüğü gibi AKAI ve AKAII miktarı arttıkça azalmış, KI, KII ve S miktarı arttıkça ise artmıştır.

AKAB f_c değerleri Şekil 6.5d'de görüldüğü gibi, KI ve KII miktarı arttıkça artmıştır. Agrega yerine AKAI ve AKAII'nin kullanılması AKAB'ın f_c değerlerini azaltmıştır. Bulanık yaklaşım yöntemindeki Sugeno tipi bulanık sonuç çıkarma sistemlerinden elde edilen iki girdi değişkeninin üç boyutlu grafiksel sonuçları, kesin olarak AKAB BA, f_c ve UGH değerlerini vermemektedir.



Şekil 6.5. AKAB f_c değerlerine: a) ince AKA ve ince kırmataşın, b) iri AKA ve iri kırmataşın, c) ince AKA ve kumun, d) ince ve iri kırmataşın etkisi

6.8 Model Sonuçlarının Değerlendirilmesi ve İrdelenmesi

Bu çalışmada, YSA ve BM yöntemlerinde oluşturulan modellerdeki eğitim ve test sırasında oluşan hataları ortaya çıkarmak için karesel ortalamanın kare kökü (RMS) belirlenmiştir ve Denklem (6.1) kullanılarak hatalar hesaplanmıştır. Mutlak kesir varyansı (R^2) ve ortalama mutlak yüzdelik hata (MAPE) sırasıyla Denklem (6.2) ve (6.3) kullanılarak hesaplanmıştır (Topçu and Sarıdemir, 2008 a).

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{p}\sum_i |t_i - o_i|^2} \tag{6.1}$$

$$R^2 = 1 - \left(\frac{\sum_i (t_i - o_i)^2}{\sum_i (o_i)^2} \right) \tag{6.2}$$

$$MAPE = \left| (\frac{t_i - o_i}{o_i}) \right| * 100 \tag{6.3}$$

(Sarıdemir, 2008)

Denklemlerde t hedef değerleri, o modellerden elde edilen çıktı değerlerini, p ise modellerde kullanılan çıktı değerlerinin sayısını göstermektedir. İstatistiksel parametrelerle YSA ve BM yöntemlerinde oluşturulan modellerin performansı değerlendirilmektedir. RMS istatistiksel değeri ne kadar küçük ise modellerden elde edilen sonuçlar hedeflenen sonuçlara daha yakındır. RMS istatistiksel değeri büyük ise elde edilen sonuçlar hedeflenen sonuçlardan uzaktır. R^2 değerleri 0.8'in üzerinde ve 1 değerine ne kadar yakınsa modellerden elde edilen sonuçlar ile hedeflenen sonuçlar birbirine yakındır. MAPE istatistiksel değeri ile hedeflenen sonuçlar ve modellerden elde edilen sonuçlar arasındaki mutlak hatalar belirlenmeye çalışılmıştır. Bu değerler sıfıra yakın ise model sonuçları ile hedeflenen sonuçlar birbirine yakındır.

6.8.1 AKAB taze beton model sonuçlarının değerlendirilmesi ve irdelenmesi

Deneylerde C, K, KI, KII, S, AKAI ve AKAII miktarlarına göre deneylerden, modellerin eğitim ve testinden AKAB taze betonun BA ve Ç değerleri bulunmuştur. Modellerden bulunan değerlerin deney sonuçlarına yakın değerler olduğu görülmüştür.

Çizelge 6.3. AKAB taze beton için modellerin BA istatistiksel değerleri

İstatistiksel parametreler	YSA		BM	
	Eğitim kümesi	Test kümesi	Eğitim kümesi	Test kümesi
RMS	11.4322	103.2371	3.2756	74.5562
R^2	0.9999	0.9978	0.9999	0.9985
MAPE	0.4762	4.2449	0.1285	3.1902

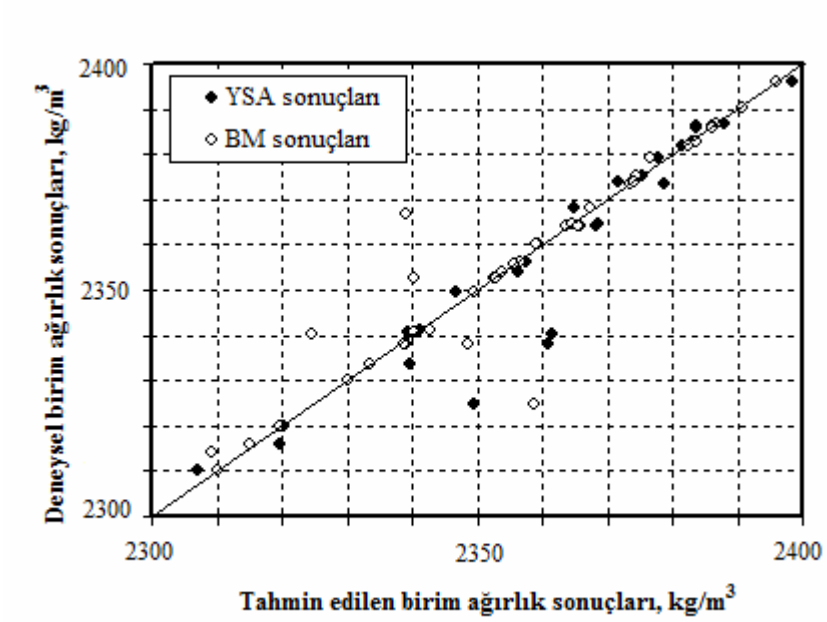
Çizelge 6.4. AKAB taze beton için modellerin Ç istatistiksel değerleri

İstatistiksel parametreler	YSA		BM	
	Eğitim kümesi	Test kümesi	Eğitim kümesi	Test kümesi
RMS	4.3561	10.3413	1.6238	12.1674
R^2	0.9999	0.9973	0.9999	0.9989
MAPE	0.4967	3.5928	0.1873	2.7260

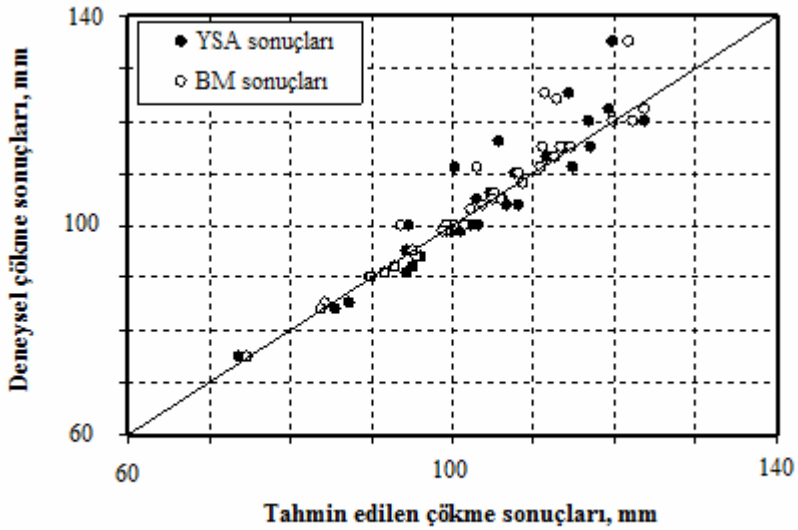
YSA ve BM modellerinden elde edilen BA ve Ç değerlerinin yüzdelik mutlak hata ortalamaları Çizelge 6.3 ve 6.4'te görüldüğü gibi % 10'dan küçük değerlerdir. İstatistiksel hata ortalamalarından da anlaşıldığı gibi deney sonuçları ile YSA ve BM modellerinden elde edilen sonuçlar arasında küçük farklar vardır. YSA modelinden elde edilen sonuçların hata ortalamaları ile BM modelinden elde edilen sonuçların hata ortalamaları karşılaştırılırsa BM sonuçlarının hata ortalamaları daha düşüktür. Bu durum da BM sonuçlarının deney sonuçlarına daha yakın olduğunu göstermektedir.Deneysel çalışmalar ile YSA ve BM modellerindeki eğitim ve testten elde edilen BA değerleri Şekil 6.6'da görüldüğü gibi karşılaştırılmıştır. Deneysel sonuçlar ile YSA ve BM sonuçları karşılaştırıldığında şekilden de görüldüğü gibi birbirlerine çok yakın değerlerdir. Bu durum, deney sonuçları ile YSA ve BM sonuçlarının uyum içinde olduğunu göstermektedir. Aynı zamanda YSA ile BM

değerleri de birbirlerine çok yakın değerlerdir ve aralarında çok küçük farklar bulunmaktadır. Bu durum YSA yönteminde ve BM yöntemindeki Sugeno tipi bulanık sonuç çıkarma sisteminde oluşturulan modellerin uygun olduğunu göstermektedir. Deneysel çalışmalardan elde edilen Ç değerleri ile YSA ve BM modellerinden elde edilen Ç değerleri Şekil 6.7'de görüldüğü gibi birbirine çok yakın değerlerdir. Bu durum deney sonuçlarının YSA ve BM sonuçlarıyla uyum içinde olduğunu gösterir.

AKAB taze beton özeliklerinden olan BA ve Ç değerlerinin YSA ve BM yöntemlerinde oluşturulan modellerle elde edilebileceğini Şekil 6.6 ve 6.7 açıkça ortaya koymaktadır. AKAB taze beton özeliklerinden olan BA ve Ç değerlerini belirlemek için oluşturulan YSA ve BM modellerinde kullanılan BA ve Ç değerleri az sayıdadır. AKAB taze beton BA ve Ç değerleri daha fazla olsaydı YSA ve BM modellerinden elde ettiğimiz BA ve Ç değerleri hedeflenen değerlere daha yakın olacaktır. YSA ve BM yöntemlerinde bu modeller veri sayısı arttırıldığı zaman yeniden güncellenebilmektedir. Bu durumda YSA ve BM yöntemlerinde modeller oluşturmanın avantajını ortaya çıkarmaktadır (Sarıdemir, 2008; Topçu and Sarıdemir, 2008 c).



Şekil 6.6. AKAB taze beton BA deney ve model sonuçlarının karşılaştırılması



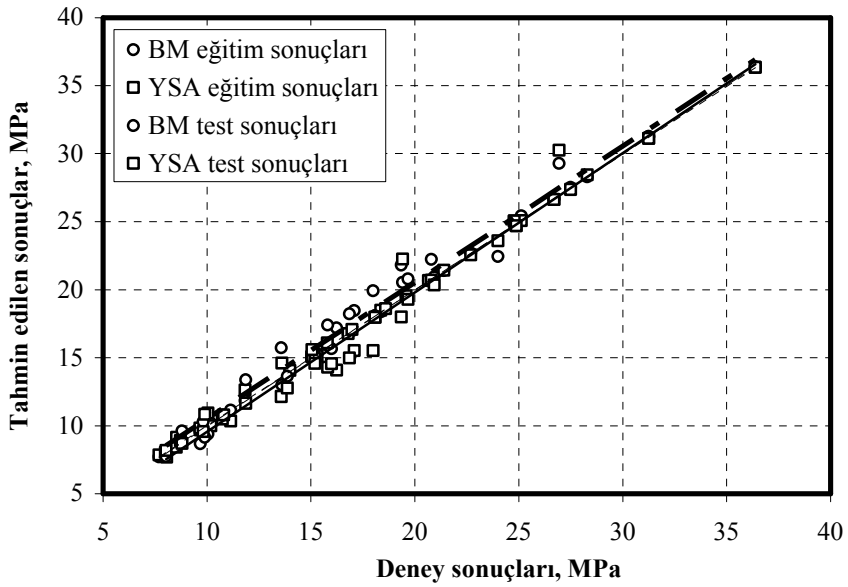
Şekil 6.7. AKAB taze beton Ç deney ve model sonuçlarının karşılaştırılması

6.8.2 Yapay sinir ağları ve bulanık mantık basınç dayanımı sonuçları

Deneysel çalışmalar ile YSA ve BM modellerindeki eğitim ve testlerden elde edilen f_c değerleri Çizelge 6.5 ve Şekil 6.8'de verilmiştir. Ayrıca, YSA ve BM modellerinden elde edilen f_c değerleri ile deneylerden elde edilen f_c değerleri karşılaştırılmıştır. f_c eğitim ve test verileri için ayrı ayrı olarak doğrusal en küçük kareler çizgisi, denklemi ve R^2 değerleri belirlenmiştir (Şekil 6.8). Bu değerlerden görüldüğü gibi YSA ve BM model sonuçları ile deney sonuçları uyum içerisindedir. RMS, R^2 ve MAPE olarak YSA ve BM modellerindeki eğitim ve testlerden bulunan f_c değerlerinin istatistiksel değerleri Çizelge 6.5'te verilmiştir. Hatalardan görüldüğü gibi YSA ve BM model sonuçları deney sonuçlarına yakındır (Sarıdemir, 2008).

Çizelge 6.5. AKAB için önerilen modellerin f_c istatistiksel değerleri

İstatistiksel parametreler	YSA		BM	
	Eğitim kümesi	Test kümesi	Eğitim kümesi	Test kümesi
RMS	0.2217	1.5801	0.0073	1.0027
R^2	0.9993	0.9947	0.9995	0.9959
MAPE	1.3218	4.9713	0.0174	5.2089



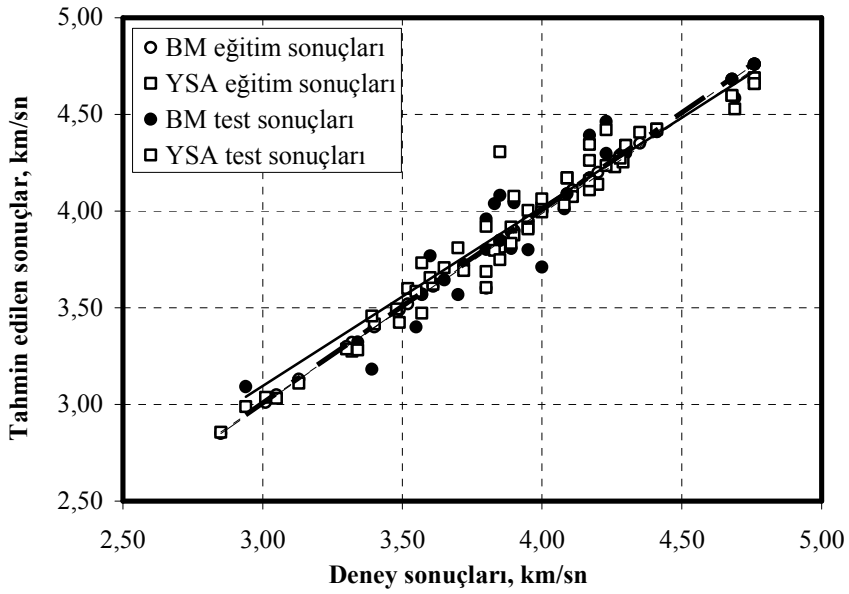
Şekil 6.8. AKAB f_c deney ile model sonuçlarının karşılaştırılması

6.8.3 Yapay sinir ağları ve bulanık mantık ultrases geçiş hızı sonuçları

Deneysel sonuçlar ile YSA ve BM model sonuçları karşılaştırıldığında Şekil 6.9'da görüldüğü gibi birbirlerine çok yakın değerlerdir. Bu durum, deney sonuçları ile YSA ve BM sonuçlarının uyum içinde olduğunu göstermektedir. UGH eğitim ve test verileri için ayrı ayrı olarak doğrusal en küçük kareler çizgisi, denklemi ve R^2 değerleri gösterilmiştir. Ayrıca, RMS, R^2 ve MAPE olarak YSA ve BM modellerindeki eğitim ve testlerden bulunan UGH değerlerinin istatistiksel değerleri Çizelge 6.6'da verilmiştir. İstatistiksel değerlendirmelerden de görüldüğü gibi YSA ve BM model sonuçları deney sonuçlarına yakındır. Bu durumda YSA ve BM yöntemleri ile UGH değerlerinin tahmin edilebileceğini göstermektedir (Topçu and Sarıdemir, 2008 d).

Çizelge 6.6. AKAB için önerilen modellerin UGH istatistiksel değerleri

İstatistiksel parametreler	YSA		BM	
	Eğitim kümesi	Test kümesi	Eğitim kümesi	Test kümesi
RMS	0.0429	0.1123	0.0011	0.1438
R^2	0.9995	0.9993	0.9997	0.9982
MAPE	1.0129	2.2718	0.0179	2.6244



Şekil 6.9. AKAB UGH deney ile model sonuçlarının karşılaştırılması

Sonuç olarak, AKAB sertleşmiş betonların birim ağırlık, silindir basınç dayanımı ve ultrases geçiş hızı değerlerini deney yapmadan tahmin edebilmek için deneylerde sertleşmiş birim ağırlıklar ölçülerek çalışmaya dahil edilmiş, yapay sinir ağları ve bulanık mantık yöntemlerinde modeller oluşturulmuştur. Modeller girdi ve çıktı verileriyle eğitilmiştir. Eğitilen modellerde sadece girdi verileri kullanılarak sertleşmiş betonun birim ağırlık, silindir basınç dayanımı ve ultrases geçiş hızı değerleri tahmin edilmiştir. Tahmin edilen değerler deney sonuçlarına yakındır. Sonuçlar deney yapmadan AKAB sertleşmiş betonların birim ağırlık, basınç dayanımı ve ultrases geçiş hızı değerlerinin, yapay sinir ağları ve bulanık mantık modellerinde çok küçük hata oranlarıyla kısa sürede belirlenebileceğini göstermiştir (Çizelge 6.7, Çizelge 6.8). Asfalt kırığı agregası ile üretilen taze ve sertleşmiş beton numuneler üzerinde gerçekleştirilen deney sonuçları ile model test sonuçları karşılaştırmaları Çizelge 6.7 ve Çizelge 6.8'de görülmektedir. Sonuçlara göre deneysel ve test sonuçlarının birbiriyle uyumlu olduğu ve hata oranlarının uygun sınırlar içerisinde olduğu görülmektedir.

Çizelge 6.7. AKAB taze beton deney sonuçları ile model test sonuçları

Deney Sonuçları		**YSA Sonuçları**		**YSA Hataları**		**BM Sonuçları**		**BM Hataları**	
BA	Ç	BA	Ç	BA %hata	Ç % hata	BA	Ç	BA % hata	Ç % hata
2375	138	2405	133	1.26	3.62	2263	136	4.93	1.79
2353	118	2392	114	1.66	3.39	2295	115	2.52	2.39
2345	102	2378	95	1.41	6.86	2291	99	2.34	2.62
2325	91	2391	86	2.84	5.49	2177	89	6.82	2.35
2301	82	2333	79	1.39	3.66	2228	79	3.27	3.29
2351	71	2389	67	1.62	5.63	2310	69	1.78	3.34
2312	65	2378	62	2.85	4.62	2285	63	1.17	3.17

Çizelge 6.8. AKAB sertleşmiş beton deney sonuçları ile modellerin test sonuçları

Deneysel	**YSA**	**BM**		**Deneysel**	**YSA**	**BM**		**Deneysel**	**YSA**	**BM**
BA				f_c				UGH		
2403	2412	2371		30.94	34.24	33.27		4.11	4.30	4.34
2281	2240	2264		20.24	18.08	21.19		3.77	3.71	3.69
2422	2483	2422		40.38	40.35	40.38		4.24	4.57	4.64
2356	2333	2360		23.41	26.24	24.54		3.88	3.94	3.59
2468	2491	2479		29.13	29.08	29.44		4.27	4.41	4.46
2393	2450	2412		19.05	19.59	18.95		3.73	4.19	3.96
2515	2512	2515		35.25	35.11	35.25		4.14	4.54	4.64
2459	2440	2480		23.35	21.99	25.81		4.17	4.13	4.18
2364	2351	2404		15.87	15.64	17.37		3.71	3.68	3.92
2437	2426	2437		22.09	21.96	22.08		3.97	4.05	3.97
2350	2283	2311		17.57	16.13	19.73		3.60	3.57	3.61
2128	2134	2156		13.82	13.58	14.28		3.22	3.16	3.20
2273	2248	2263		24.80	24.70	26.23		3.68	3.57	3.68
2123	2120	2059		19.20	18.58	19.17		3.27	3.34	3.06
2433	2461	2528		28.00	27.60	26.44		4.05	4.22	4.27
2343	2272	2281		19.80	20.07	19.92		3.53	3.59	3.52
2327	2324	2324		23.67	23.29	24.80		3.96	3.91	3.89
2175	2211	2186		17.87	16.76	17.63		3.48	3.54	3.65
2401	2401	2401		30.69	30.65	30.69		4.18	4.22	4.18
2262	2257	2275		19.81	18.28	21.41		3.73	3.63	3.73

BÖLÜM 7

SONUÇ VE ÖNERİLER

Deneylerde, AKAB'ın mekanik ve fiziksel özeliklerini değerlendirmek için çalışmalar yapılmıştır. Deney sonuçlarına göre taze betonun işlenebilirliğindeki iyileşme dikkati çeken bir durumdur. Sonuçlara göre AKAB'ın yol betonlarında kullanımı AKA'nın düşük su emme kapasitesi nedeniyle uygun olacaktır. Bilindiği gibi beton yol yapımında kayar kalıpların kullanılması nedeni ile AKA'nın sağlayabileceği düşük su/çimento oranları tercih edilmektedir. Bu nedenle, ileriki çalışmalarda daha düşük S/Ç oranları (0.3) ile AKAB üretimleri önerilebilir. Elde edilen verilere göre AKAB'ın 20 MPa ve 40 MPa dayanımları arasında üretilebileceği ve yol betonlarında AKA'nın agrega yerine % 25-50 oranları arasında kullanılarak değerlendirilebileceği görülmüştür. Ayrıca AKAH'ın tokluk ve eğilme dayanımlarındaki iyileşmeler beton üretimi açısından dikkate değerdir, betona kullanım sürecinde destek sağlamaktadır. Eğilme deneylerinde AKA'nın içerdiği bitüm nedeni ile ilk çatlak oluşumunun geciktiği görülmüştür. AKAH'ta oluşan rötre, çatlakların oluşum hızı ve sayısı bu konuyu destekleyici yöndedir. Harç numunelerinin mikroyapıları SEM ile incelendiğinde AKA'nın yapısı parlak ve düzgün olarak tanımlanmıştır. AKA'nın bir agrega olarak bitümlü yapısı nedeniyle doğal agregaya göre daha düşük elastisite modülüne sahip olduğu belirlenmiştir. Bu nedenle rötre deneylerinde AKAH'ta çatlak oluşumunun gecikmesi ve gerilme kapasitesinin artması sağlanmıştır. Asfalt kırıkları ile üretilen harç numunelerinde kısıtlanmış rötre deneyleri ilgili yapılabilecek ileriki çalışmalarda % 0, 10, 20, 30, 40, 50 AKA oranları kullanılarak araştırılmaların yapılması önerilebilir.

AKAB düşük su emme kapasitesinden dolayı beton yollar için uygun bir alternatif olarak kabul edilebilir niteliktedir. Ayrıca AKA miktarının artması sonucunda üretilen betonların birim ağırlıklarında önemli azalmalar gözlemlenmiştir. AKA kullanım oranının artması AKAB'ı mekanik açıdan olumsuz etkilese de düşük AKA oranları (% 25-50) ile üretilen numunelerin yeterli dayanımları sağladığı görülmüştür. Bu değerler 30 MPa ve 40 MPa'lar arasında olup, çeşitli yol betonları ve yapılar için kabul edilebilir sınırlar içerisindedir. Ayrıca AKAB için elde edilen aşınma

değerlerinin, düşük AKA oranları ile üretilen numunelerde, çeşitli yapılar için kabul edilebilir sınırlar içerisinde olduğu görülmüştür. Deneylerde AKAB ve AKAH için en uygun AKA yerine kullanım oranı % 25 ve % 50 değerleri arasında belirlenmiştir. Deneysel sonuçlara göre, en düşük çimento dozajı olan 300 kg/m^3 ile % 25 ve % 50 AKAB serilerinde C20/C25 ve C25/30 betonların üretilebildiği görülmüştür. AKAH'ın kısıtlanmış rötre sonuçlarına göre yüksek AKA miktarı mekanik özeliklerde olumsuz etkiler oluşturmasına karşın rötre değerleri açısından uygun olarak nitelendirilebilir. Fakat serbest rötre ölçümlerinin kısıtlanmış rötre davranışı ile tamamen zıt olduğu dikkate değer bir konudur. Serbest rötrede bu durum, düşük elastisite modülünün çimento hamurunda daha düşük iç gerilme oluşturması ile açıklanmaktadır. Halka deneyleri ile elde edilen kısıtlanmış rötre çatlak genişliklerinin tüm seriler için kabul edilebilir değerler olduğu belirlenmiştir. Çatlak genişliği artan AKA oranı ile azalmakta ve ilk çatlak oluşum süresi gecikmektedir. Çatlak genişliği oluşum hızı tüm serilerde elverişli olarak gözlenmiştir. Benzer davranış çatlak uzunluğu için de geçerlidir. Genellikle, betonlar ve harçlarda yüksek oranlarda atık malzeme kullanımı deneysel sonuçların sağlıklı bir şekilde elde edilememesine neden olmaktadır. Bu tip çalışmalarda en çok % 30-40 gibi düşük oranlar tercih edilmektedir. Bu çalışmada dayanımda oluşan azalmalara rağmen yüksek oranlarda AKA kullanımı lastikli beton gibi diğer çalışmalara göre daha iyi sonuçlar vermiştir. Bunun nedeni AKA'nın doğal agregaya yakın davranışı ile açıklanabilir. Beton ve harçların içerisinde agrega yerine asfalt kırıkları kullanımı çatlak oluşumunu ve çatlak açıklık artışını geciktirmektedir.

Karayollarında yol malzemelerinin taşınması, maliyetin artmasında önemli etkenler arasındadır. Finansal yönden incelenecek olursa, yol yapım maliyetlerini arttıran en önemli etkenlerden birisi agreganın inşaat alanına nakliyesidir. Malzeme kaynağı ve inşaat sahası arasındaki uzaklıklar inşaat maliyetlerine ilave bir yük getirmektedir. AKA istenilen boyutlarda kırıldıktan sonra inşaat sahasına yakın yerde bulunabilecek mobil beton santrallerinde değerlendirilerek doğal agrega için gerekli ulaşım maliyetini düşürebilecek niteliktedir. Bu durumda hem doğal agrega tüketimi hem de bu malzemelerin taşınması için gerekli harcama azaltılabilir. Bunun sonucunda ise yol yapımı ve tamiri için gerekli maliyetler çeşitli durumlarda azalarak çevre kirliliği büyük ölçüde önlenmiş olacak ve ülke ekonomisine büyük katkılar sağlanacaktır.

KAYNAKLAR DİZİNİ

AASHTO T22, 1997, Standard test method for compressive strength, American Association of State Highway and Transportation Officials.

Aitcin, P.C., 2000, Cements of yesterday and today concrete of tomorrow, Cement and Concrete Research, 30, 1349-1359.

Akman, M.S., 2001, Betonarme yapılarda yangın hasarı ve yangın sonucunda taşıyıcılığın belirlenmesi, Sika Teknik Bülten, 4, 3-13.

Aköz, F., Türker, F., Koral, S. and Yüzer N., 1995, Effects of sodium sulfate concentration on the sulfate resistance of mortars with and without silica fume, Cement and Concrete Research, 25, 1360-1368.

Akpınar, A.F., 2005, Asfalt kırığı agregalı betonların mekanik özelikleri, Yüksek lisans tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, 79s.

Asphalt Institute, 1983, Asphalt cold mix recycling manual, 121 p.

Asphalt Institute, 2006, Asphalt concrete cold recycling user guide, 55 p.

ASTM C 260-00, 2000, Standard specification for air-entraining admixtures for concrete, ASTM International.

ASTM C 349-02, 2002, Standard test method for compressive strength of hydraulic-cement mortars using portions of prisms broken in flexure, ASTM International.

ASTM C 469-02, 2002, Standard test method for static modulus of elasticity and Poisson's ratio of concrete in compression, ASTM International.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

ASTM C 1012-04, 2004, Standard test method for length change of hydraulic cement mortars exposed to a sulfate solution, ASTM International.

ASTM C 1157-00, 2000, Standard performance specification for hydraulic cement, ASTM International.

ASTM C 1260, 2007, Standard test method for potential alkali reactivity of aggregates (mortar bar method), ASTM International.

ASTM C1581-04, 2009, Standard test method for determining age at cracking and induced tensile stress characteristics of mortar and concrete under restrained shrinkage, ASTM International.

Bansci, J.J., Benedek, A., Emery, J.J. and Lawrence, J., 1980, The leaching of toxic organic compounds from solid wastes, EPA National Conference on Management of Uncontrolled Waste Sites, 173 p.

Baradan, B., Yazıcı, H. ve Ün, H., 2002, Betonarme yapılarda kalıcılık, Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Yayınları, 282 s.

Bazant, Z.P., Zi, G. and Meyer, C., 2000, Fracture mechanics of ASR in concretes with waste glass particles of different sizes, Journal of Engineering Mechanics, 126, 226-232.

Craig, P., Steven, M.C. and Rodolfo, V., 1998, Potential for using waste glass in Portland cement concrete, Journal of Materials Civil Engineering, 10, 210-219.

Decker, D.S. and Young, T.J., 1996, Handling RAP in an HMA facility, Proceedings of the Canadian Technical Asphalt Association, 187 p.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Demir, A., 2008, Kiremit kırığı agregalı betonlarda yüksek sıcaklık etkisinin incelenmesi, Doktora tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, 197 s.

Eldin, N.N. and Senouci, A.B., 1993, Rubber-tire practices as concrete aggregate, Journal of Materials Civil Engineering, 5, 478-496.

Erdoğan, T.Y., 2003, Beton, ODTÜ Yayıncılık, 741 s.

Fuchs, F., 2002, Avrupa ve dünyada beton yol yapım çalışmaları, Ulusal Beton Yollar Kongresi, CD.

Hanks, A.J. and Magni, E.R., 1989, The use of bituminous and concrete material in granular base and earth, Materials Information Report, 68 p.

Huang, B., Li, G., Pang, S.S. and Eggers, J., 2004, Investigation into waste tire rubber-filled concrete, Journal of Materials Civil Engineering, 16, 187-194.

Huang, B., Shu, X. and Li, G., 2005, Laboratory investigation of Portland cement concrete containing recycled asphalt pavements, Cement and Concrete Research, 35, 2008-2013.

Jon, A., Little, D.N., O'Neal, R.J. and Gallaway, B.M., 1977, Mixture properties of recycled central plant materials, American Society for Testing and Materials. Special Technical Publication, 662 p.

Jon, A., 1990, Cold recycled bituminous concrete using bituminous materials, Synthesis of Highway Practice, 160 p.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Karakurt, C., 2008, Çimento üretiminde doğal zeolit ve volkanik tüflerin endüstriyel atıklarla birlikte kullanılmasının beton performansı üzerine etkileri, Doktora tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, 179 s.

Kocataşkın, F., Özturan, T. and Ersoy, H.Y., 1993, A composite material approach for the prediction of the concrete properties, Bulletin of the ITU, 41, 333-347.

Kocataşkın, F., 1998, Analysis of concrete properties with composite material rules, ITU Faculty of Civil Engineering, Materials of Construction Seminars, 41-46.

Kolias, S., 2001, Mechanical properties of flexible pavement material recycled with cement, 1st International Symposium of Subgrade Stabilization and in Situ Pavement Recycling using Cement, 659-673.

Krietch, A.J., 1991, Evaluation of RAP as clean fill. Asphalt Institute, 8 p.

Li, V.C., and Maalej, M., 1996, Toughening in cement based composites, Cement and Concrete Research, 18, 223-237.

Li, G., Zhao, Y., Pang, S.S. and Huang, W., 1998, Experimental study of cement-asphalt emulsion composite, Cement and Concrete Research, 28, 635-641.

Li, G., Stubblefield, M.A., Garrick, G., Eggers, J., Abadie, C. and Huang, B., 2004, Development of waste tire modified concrete, Cement and Concrete Research, 34, 2283-2289.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Lie, T.T. and Irwin, R.J., 1993, Method to calculate the fire resistance of reinforced concrete columns with rectangular cross section, American Concrete Institute Structural Journal, 90, 52-60.

Malhotra, V.M., Zhang, M.H., Read, P.H. and Ryell, J., 2000, Long-term mechanical properties and durability characteristics of high-strength/high-performance concrete incorporating supplementary cementing materials under outdoor exposure conditions, Journal of ACI Materials, 97, 518-525.

Massazza, F., 1993, Pozzolanic cements, Cement and Concrete Composites, 15, 185-214.

Mathias, V., Sedran, T. and Larrard, F., 2005, Recycling reclaimed asphalt pavement in concrete roads, LCPC, 10 p.

Nagataki, S., Gökçe, A., Saeki, T. and Hisada, M., 2004, Assessment of recycling process induced damage sensitivity of recycled concrete aggregates, Cement and Concrete Research, 34, 965-971.

Neville, A.M., 2004, The confused world of sulfate attack on concrete, Cement and Concrete Research, 34, 1275-1296.

Olivares, F.H., Barluenga, G., Bollati, M. and Witoszek, B., 2002, Static and dynamic behavior of recycled tyre rubber-filled concrete, Cement and Concrete Research, 32, 1587-1596.

Sarıdemir, M., 2008, Farklı agregalarla üretilmiş beton özeliklerinin yapay sinir ağları ve bulanık mantık ile tahmin edilmesi, Doktora tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, 191 s.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Sakai, K., Watanabe H., Suzuki M. and Hamazaki K., 1993, Properties of granulated blast-furnace slag cement concrete, ACI Special Publication, 132, 1367-1383.

Senior, S.A., Szoke, S.I. and Rogers, C.A., 1994, Ontario's experience with reclaimed materials for use in aggregates, The International Road Federation Conference, 212 p.

Shannag, M.J., 2000, High strength concrete containing natural pozzolan and silica fume, Cement and Concrete Composites, 22, 399-406.

Swamy, R.N., Ali, A.R.S. and Theodorakopoulos, D.D., 1983, Early strength fly ash concrete for structural applications, Journal of ACI, 80, 414-423.

Şen, Z., 2004, Yapay sinir ağları ilkeleri, Su Vakfı Yayınları, 183 s.

Tikalsky, P.J., Roy, D., Scheetz, B. and Krize, T., 2002, Redefining cement characteristics for sulfate-resistant Portland cement, Cement and Concrete Research, 32, 1239-1246.

Topçu, İ.B., 1995, The properties of rubberized concrete, Cement and Concrete Research, 25, 34-310.

Topçu, İ.B. and Kocataşkın, F., 1995, A two-phase composite materials approach to the workability of concrete, Cement and Concrete Composite, 17, 319-325.

Topçu, İ.B., 1996, Fracture toughness of a solidified composite residual material, Cement and Concrete Research, 26, 521-527.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Topçu, İ.B. and Avcular, N., 1997, Analysis of rubberized concrete as a composite material, Cement and Concrete Research 27, 1135-1139.

Topçu, İ.B. and Işıkdağ, B., 2005, Utilization of waste asphalt aggregate in concrete highways, 12th Annual International Conference on Composites/Nano Engineering, Tenerife, CD.

Topçu, İ.B., Işıkdağ, B. ve Akpınar, F., 2005, Atık asfalt kırıklarının altyapı betonlarında değerlendirilmesi, 4. Kentsel Altyapı Sempozyumu, Eskişehir, 385-398.

Topçu, İ.B., 2006, Beton, İMO Eskişehir Şubesi Yayın No: 2, 260 s.

Topçu, İ.B. ve Işıkdağ, B., 2006, Atık asfalt kırıklarının agrega olarak beton yollarda değerlendirilmesi, 7th International Congress on Advances in Civil Engineering, İstanbul, CD.

Topçu, İ.B. ve Işıkdağ, B., 2006, Atık asfalt kırıklarının agrega olarak beton yollarda değerlendirilmesi, TÇMB Çimento ve Beton Dünyası, 11, 72-85.

Topçu, İ.B. ve Demir, A., 2007, Yüksek sıcaklık uygulama süresinin harç özeliklerine etkisi, 7. Ulusal Beton Kongresi, İstanbul, 455-463.

Topçu, İ.B. and Sarıdemir, M., 2007, Prediction of properties of waste AAC aggregate concrete using ANN, Computational Materials Science, 41, 117-125.

Topçu, İ.B., Boğa, A.R. and Bilir, T., 2008, Alkali-silica reactions of mortars produced by using waste glass as fine aggregate and admixtures such as fly ash and Li_2CO_3, Waste Management, 28, 878-884.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Topçu, İ.B. and Sarıdemir, M., 2008, Prediction of rubberized concrete properties using artificial neural networks and fuzzy logic, Construction and Building Materials, 22, 532-540.

Topçu, İ.B. and Sarıdemir, M., 2008, Prediction of mechanical properties of recycled aggregate concretes containing silica fume using artificial neural networks and fuzzy logic, Computational Materials Science, 42, 74-82.

Topçu, İ.B. and Sarıdemir, M., 2008, Prediction of rubberized mortar properties using artificial neural networks and fuzzy logic, Journal of Materials Processing Technology, Journal of Materials Processing Technology, 199, 108-11.

Topçu, İ.B. and Sarıdemir, M., 2008, Prediction of compressive strength of concrete containing fly ash using artificial neural networks and fuzzy logic, Computational Materials Science, 41, 305-311.

Topçu, İ.B. ve Sarıdemir, M., 2008, Yapay sinir ağları ile beton özeliklerinin önceden tahmini, Yapı Dünyası, 152, 7-13.

TS 699, 1987, Tabii yapı taşları-muayene, deney metotları, Türk Standartları Enstitüsü.

TS EN 196-1, 2002. Çimento deney yöntemleri-dayanım tayini, Türk Standartları Enstitüsü.

TS EN 197-1, 2002, Genel çimentolar, Türk Standartları Enstitüsü.

TS 706 EN 12620, 2003, Beton agregaları, Türk Standartları Enstitüsü.

TS EN 1363-1, 2001, Yangına dayanıklılık deneyleri, Türk Standartları Enstitüsü.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

TS 707, 1980, Beton agregalarından numune alma ve deney numunesi hazırlama yöntemi, Türk Standartları Enstitüsü.

TS 1247, 1984, Beton yapım, döküm ve bakım kuralları, Türk Standartları Enstitüsü.

TS 2717 EN 13139, 2005, Agregalar-harç yapımı için, Türk Standartları Enstitüsü.

TS 2824 EN 1338, 2005, Zemin döşemesi için beton kaplama blokları-gerekli şartlar ve deney metotları, Türk Standartları Enstitüsü.

TS 3449, 1980, Çabuk donma ve çözülme koşulları altında betonda dayanıklılık faktörü tayini, Türk Standartları Enstitüsü.

TS 3456, 1984, Betona hava sürükleyici katkı maddeleri, Türk Standartları Enstitüsü.

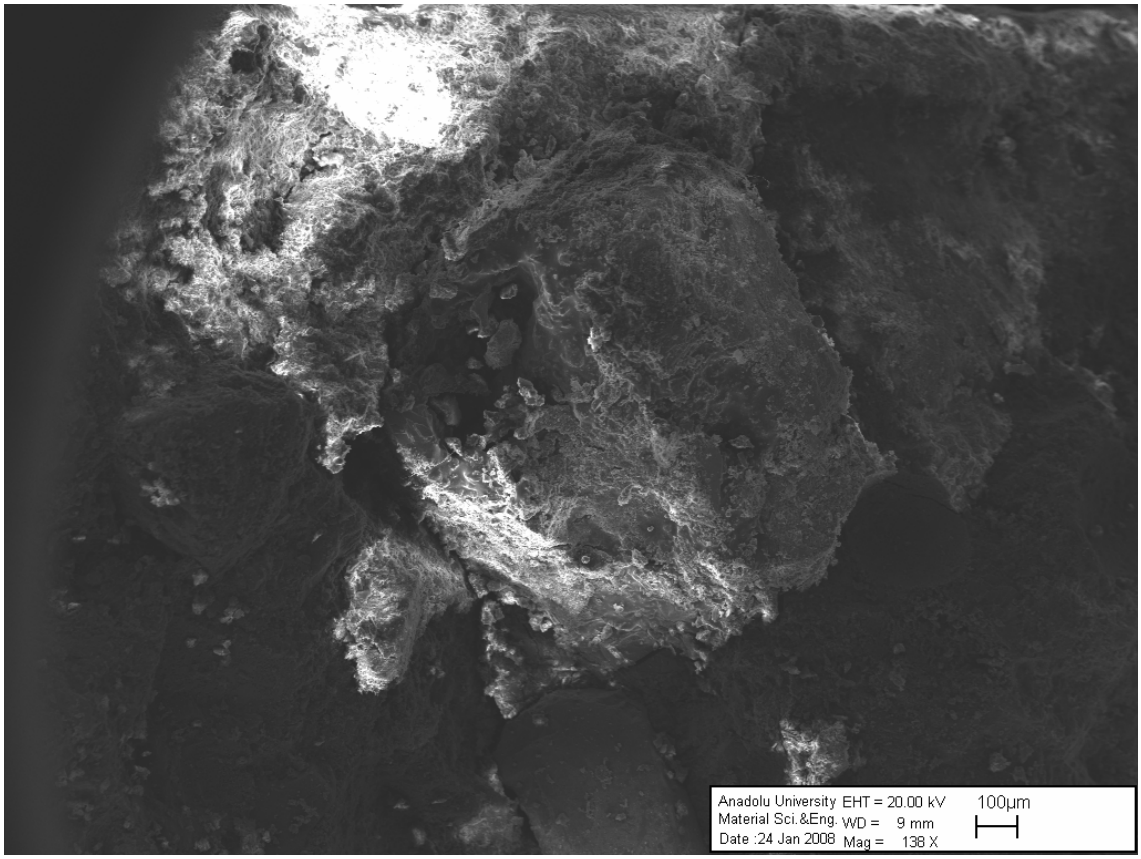
TS EN 12350, 2002, Beton-taze beton deneyleri, Türk Standartları Enstitüsü.

TS EN 12390, 2002, Beton-sertleşmiş beton deneyleri, Türk Standartları Enstitüsü.

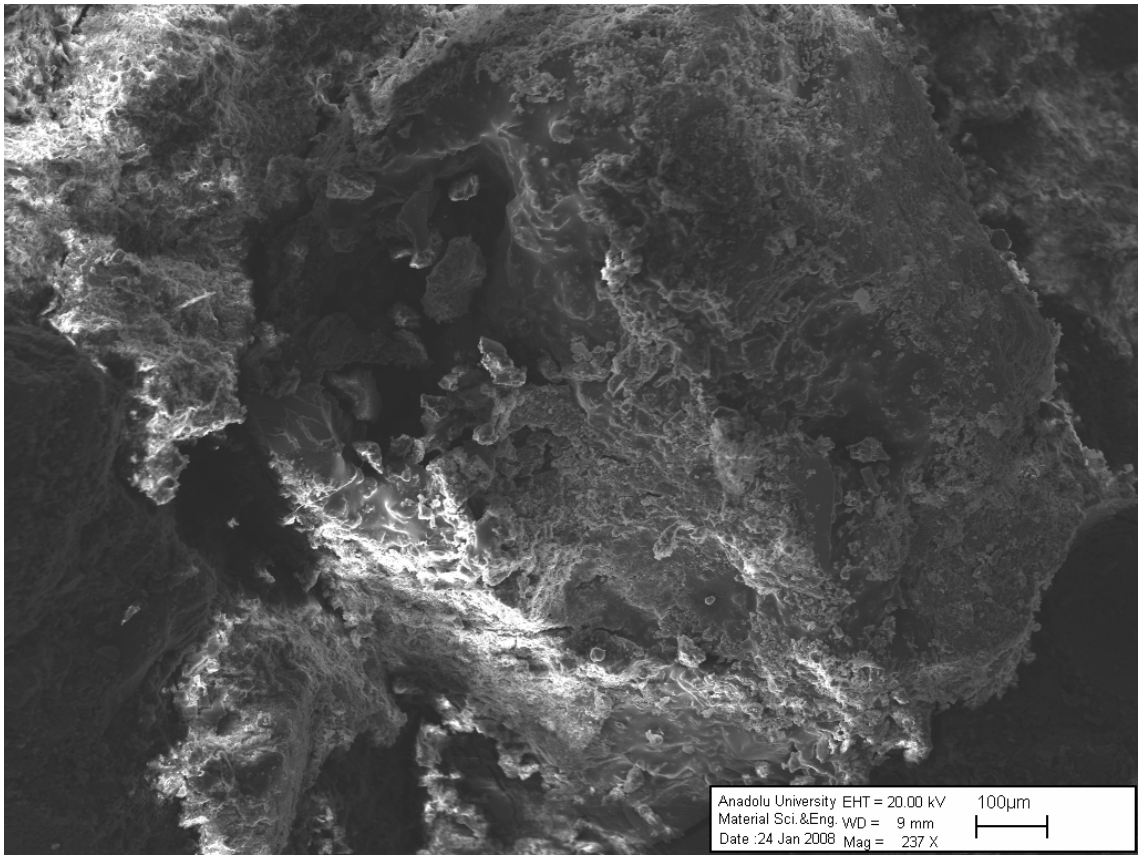
Umar, F. ve Ağar, E., 1985, Yol Üstyapısı, İTÜ İnşaat Fakültesi, 339 s.

EKLER

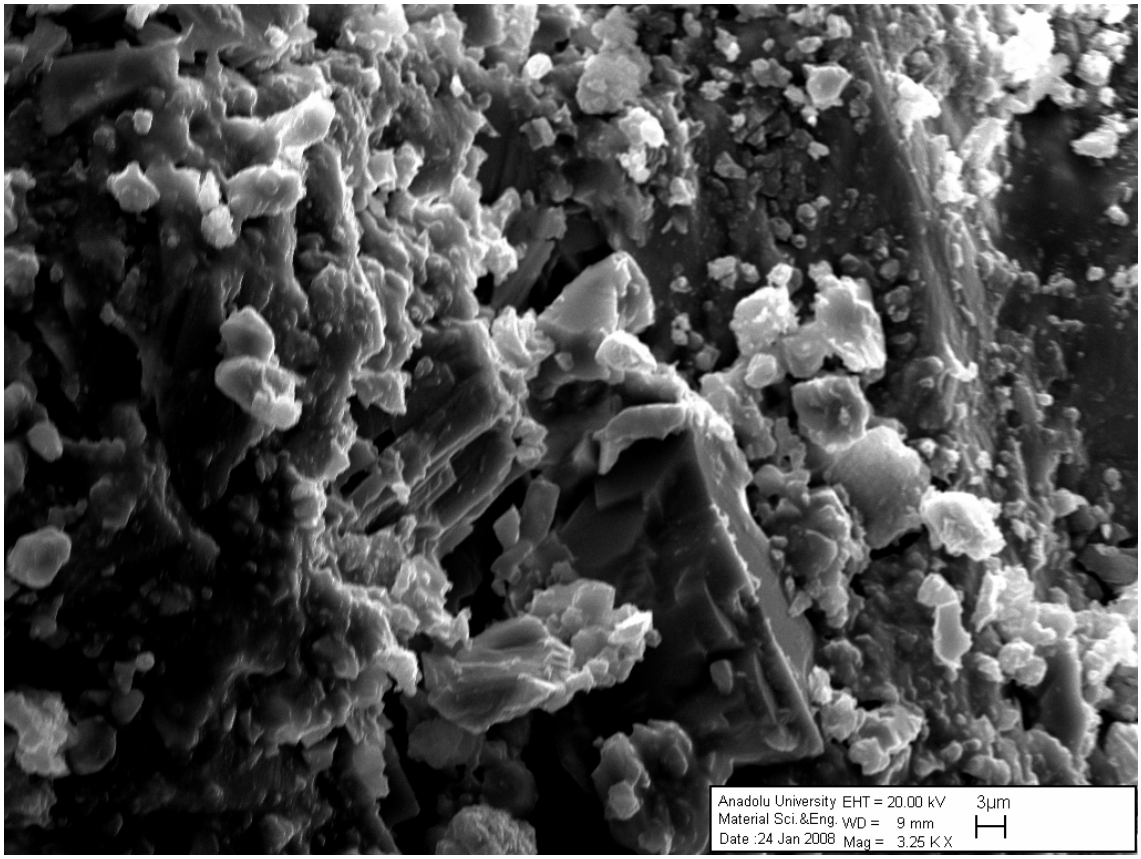
Şekil Ek 1. SEM 1, 138X
Şekil Ek 2. SEM 2, 237X
Şekil Ek 3. SEM 3, 325KX
Şekil Ek 4. SEM 4, 612X
Şekil Ek 5. SEM 5, 345X
Şekil Ek 6. SEM 6, 429X
Şekil Ek 7. SEM 7, 420X
Şekil Ek 8. SEM 8, 528X
Şekil Ek 9. SEM 9, 623X
Şekil Ek 10. SEM 10, 247X
Şekil Ek 11. Halka kalıbı
Şekil Ek 12. Halka numunesi
Şekil Ek 13. Halka numunesi çatlak görünümü
Şekil Ek 14. Çatlak genişliği dürbün görünümü
Şekil Ek 15. Prizmatik numunelerde AKAB kesit görünüşü
Şekil Ek 16. Eğilme AKAB numuneleri
Şekil Ek 17. Küp AKAB numuneler
Şekil Ek 18. Basınç presi
Şekil Ek 19. Eğilme deneyi
Şekil Ek 20. AKAB % 50 silindir numune kesiti
Şekil Ek 21. AKAB % 75 silindir numune kesiti



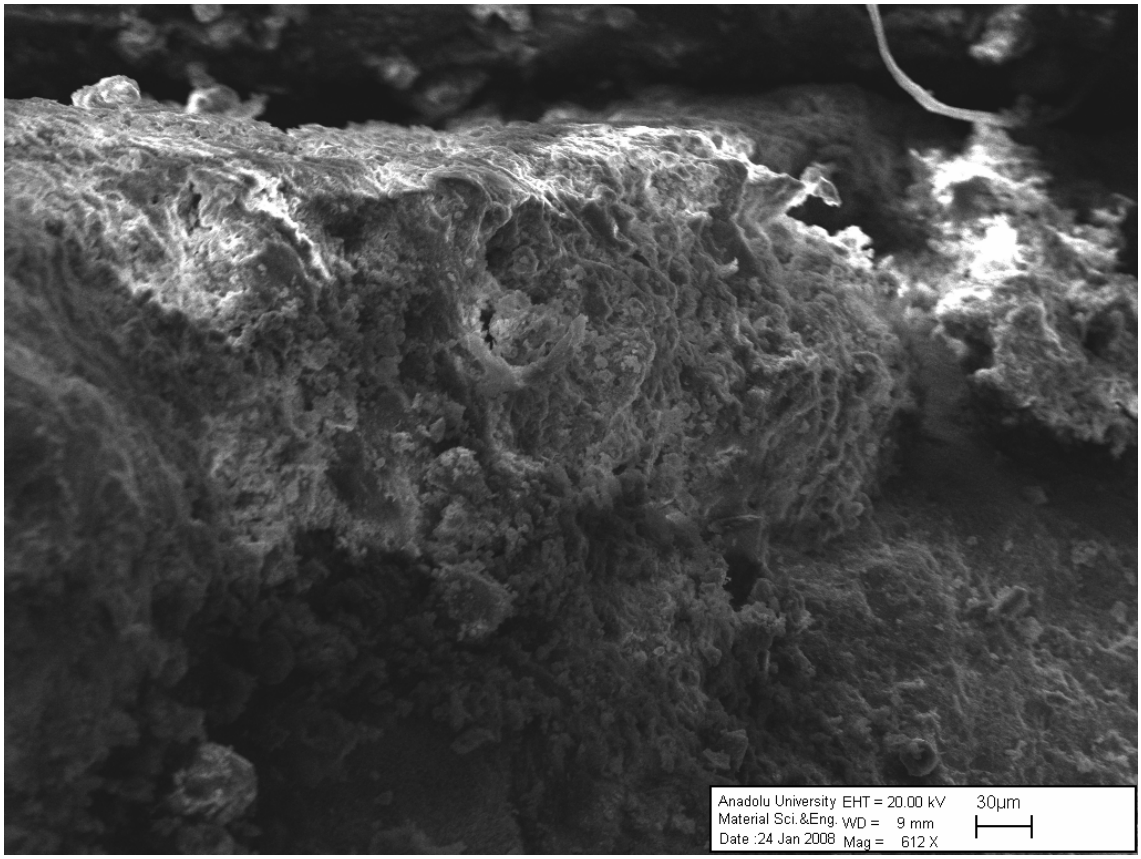
Şekil Ek 1. SEM 1, 138X



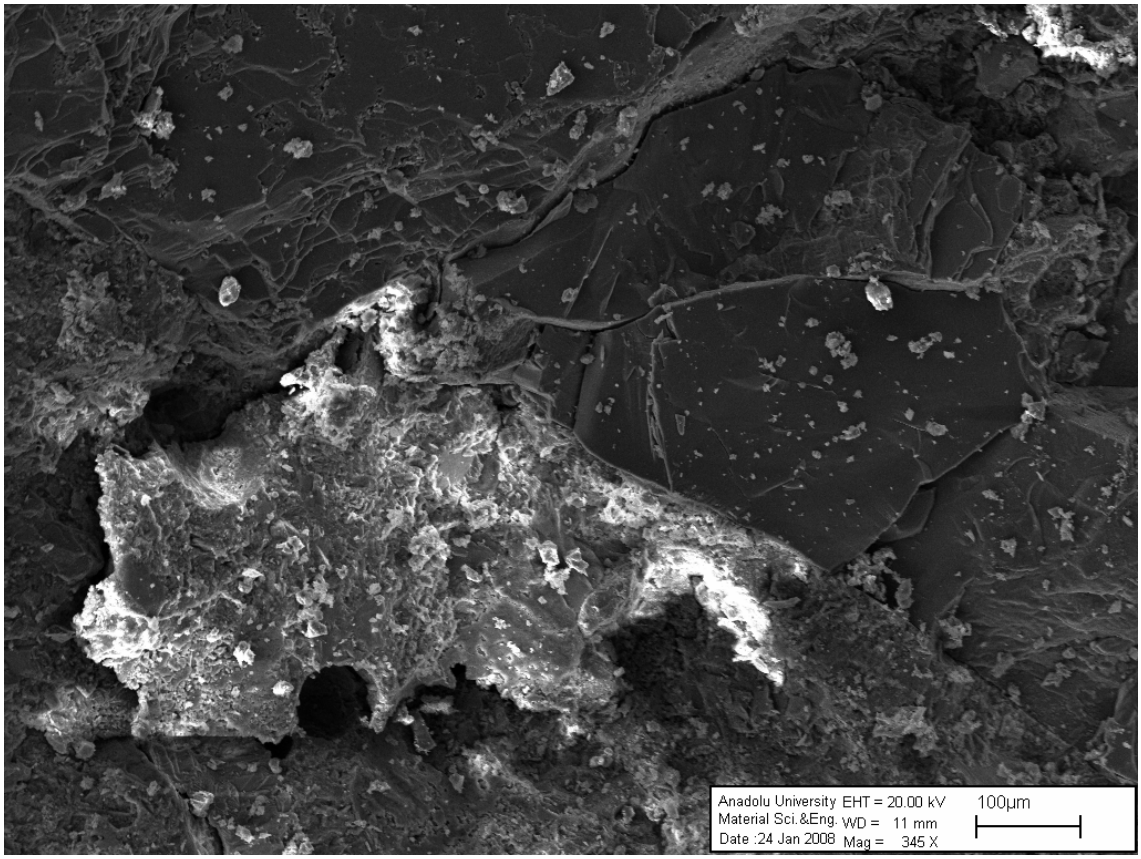
Şekil Ek 2. SEM 2, 237X



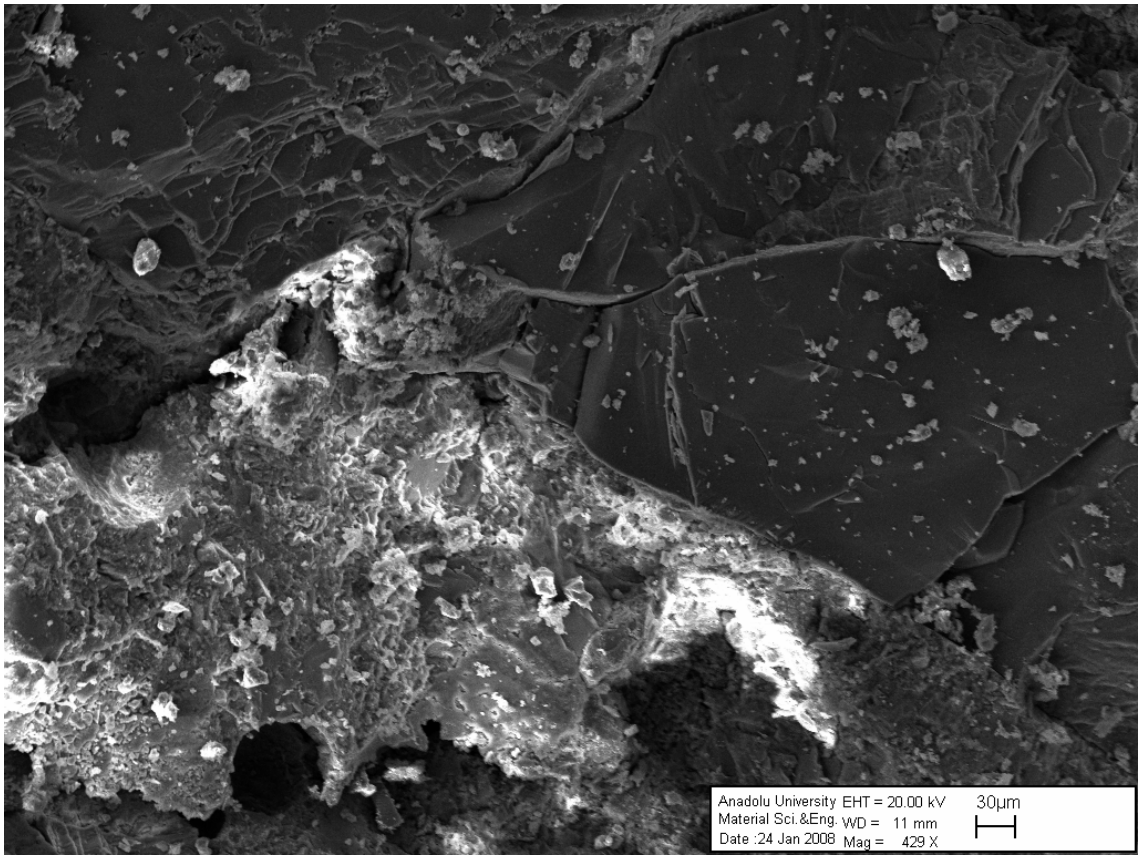
Şekil Ek 3. SEM 3, 325KX



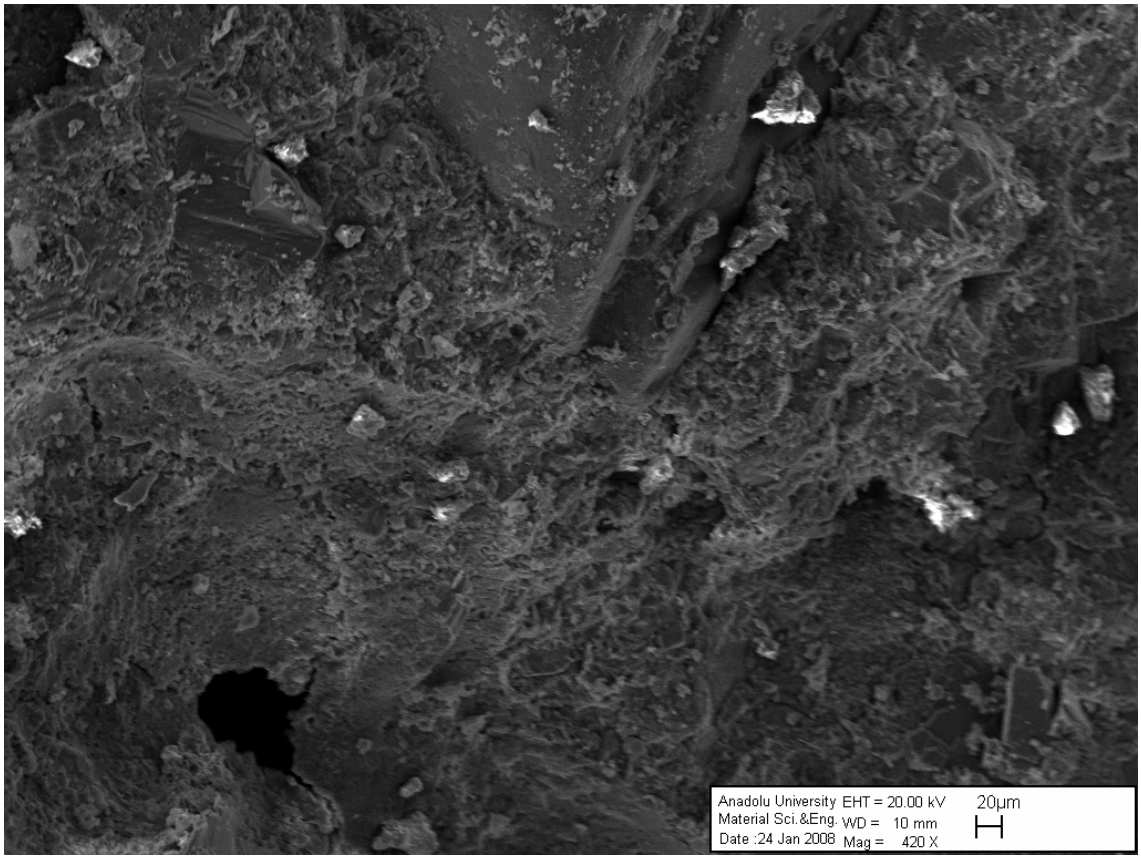
Şekil Ek 4. SEM 4, 612X



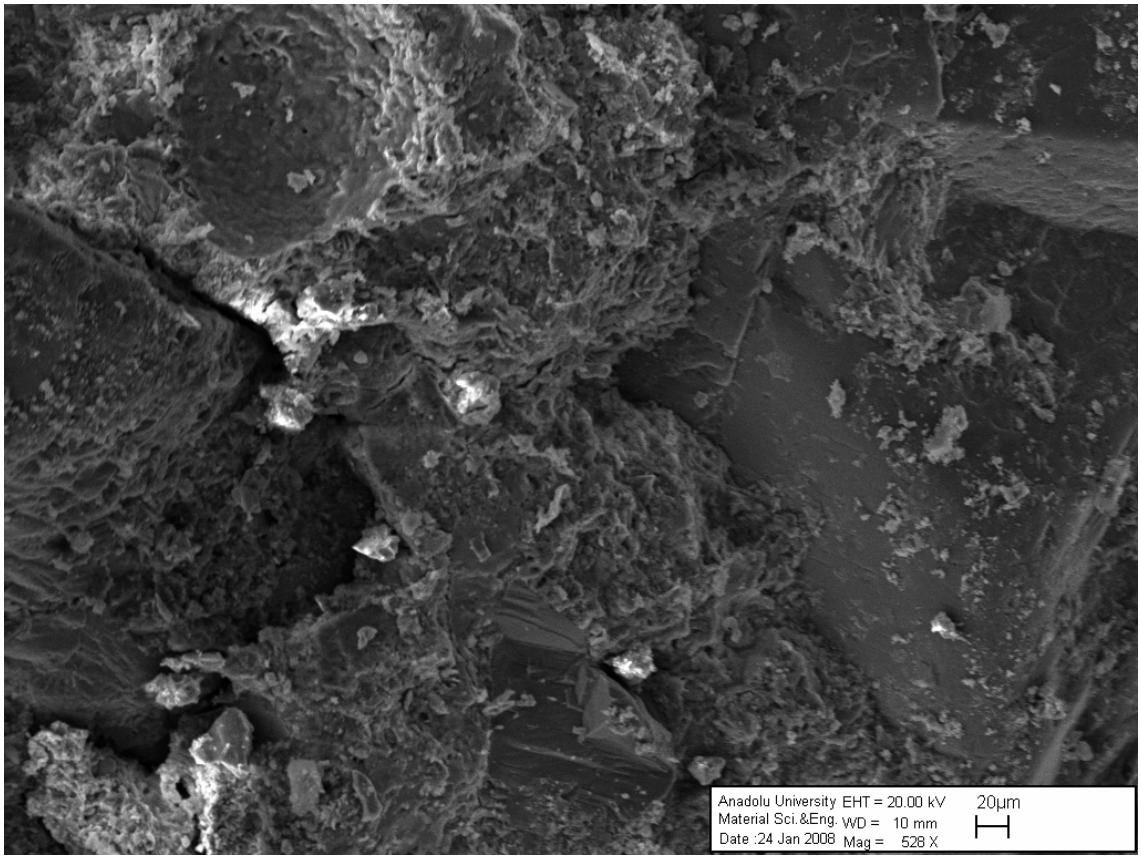
Şekil Ek 5. SEM 5, 345X



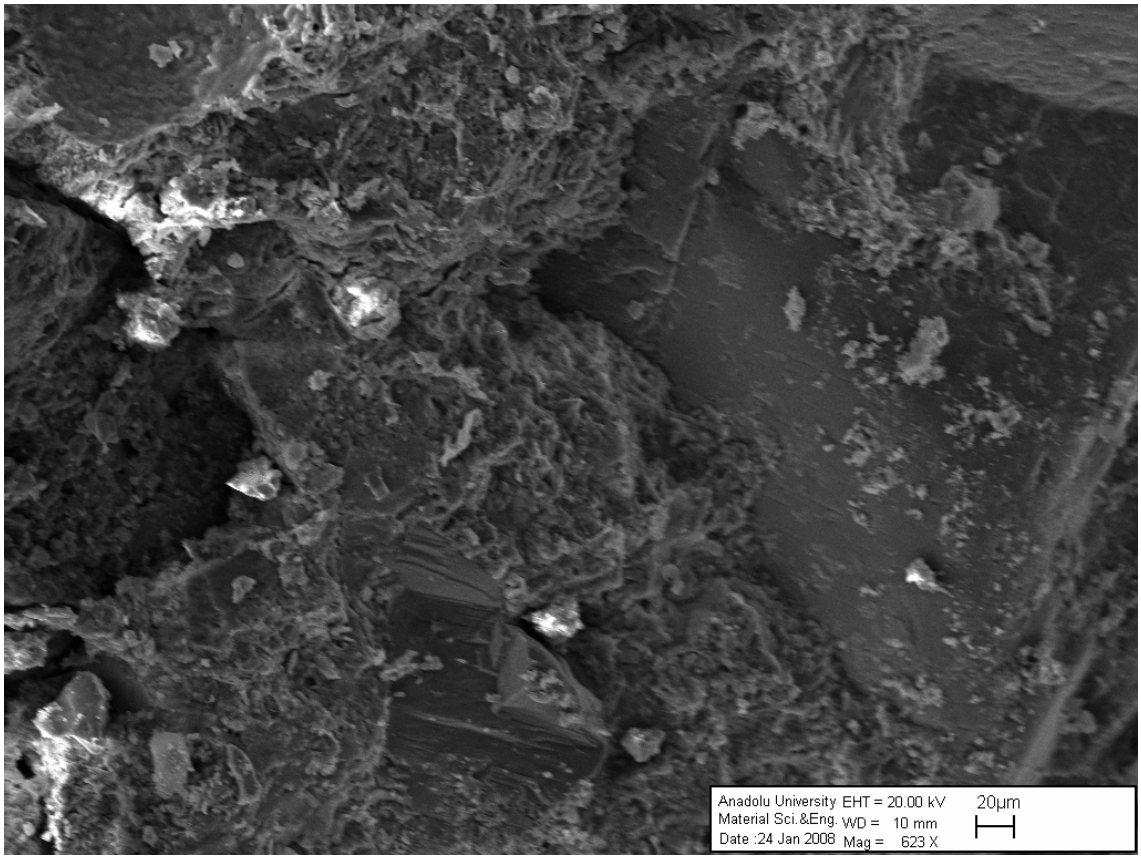
Şekil Ek 6. SEM 6, 429X



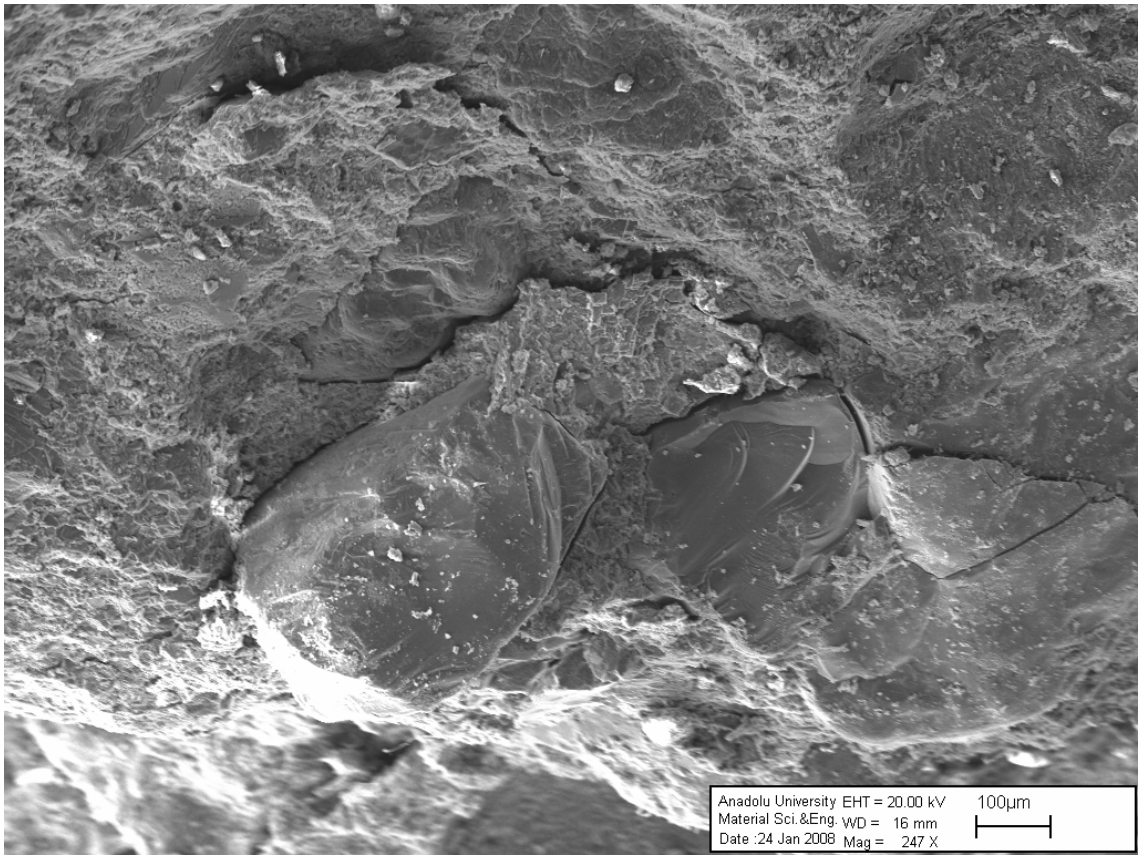
Şekil Ek 7. SEM 7, 420X



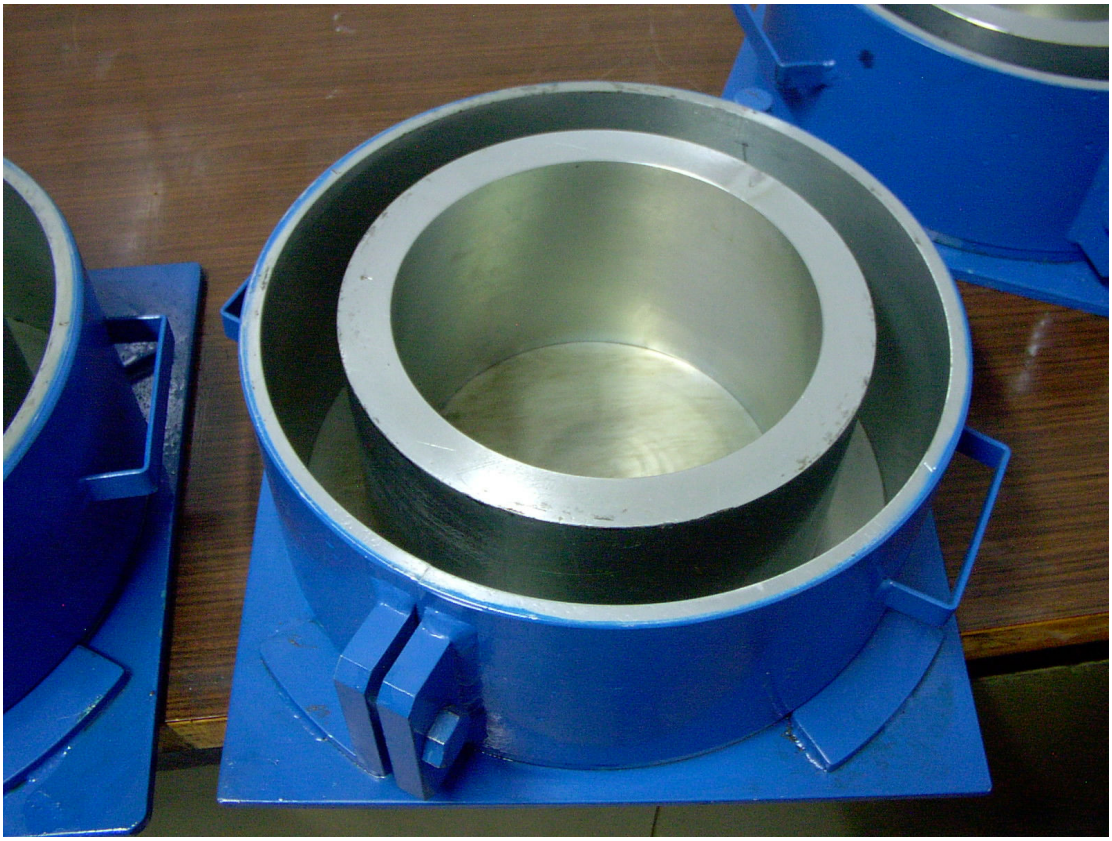
Şekil Ek 8. SEM 8, 528X



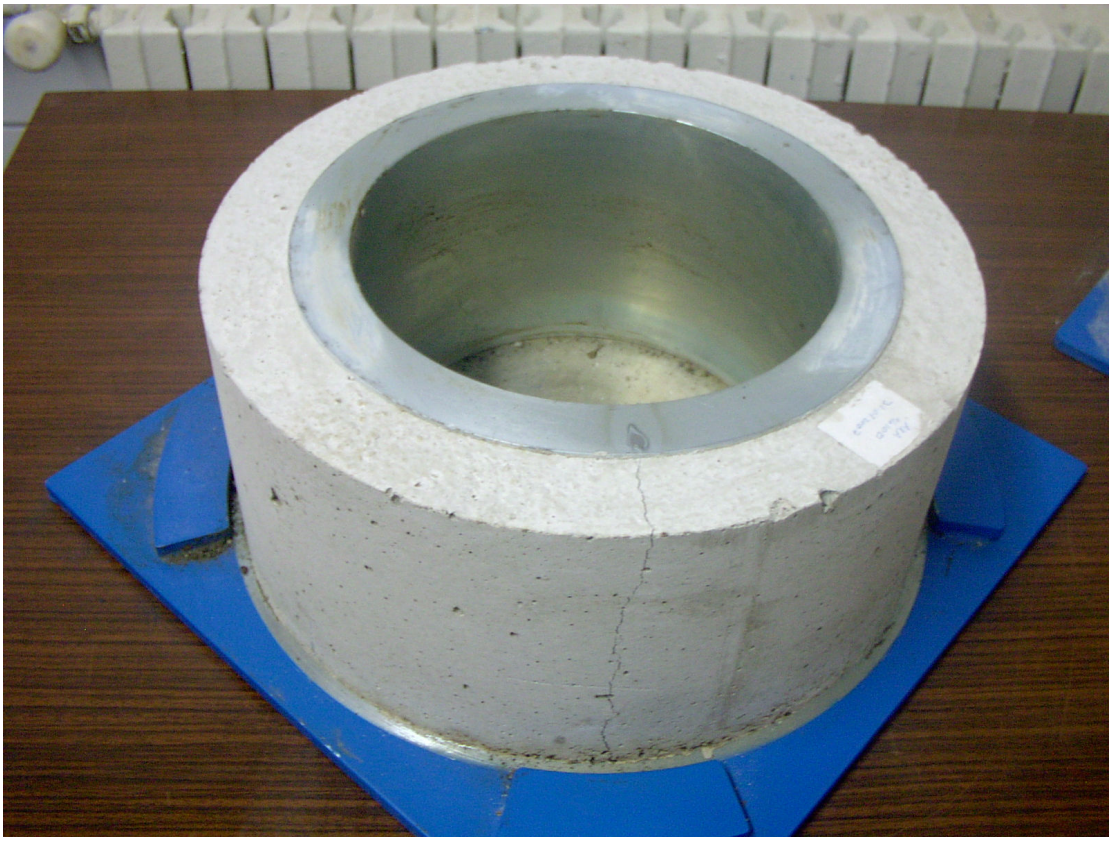
Şekil Ek 9. SEM 9, 623X



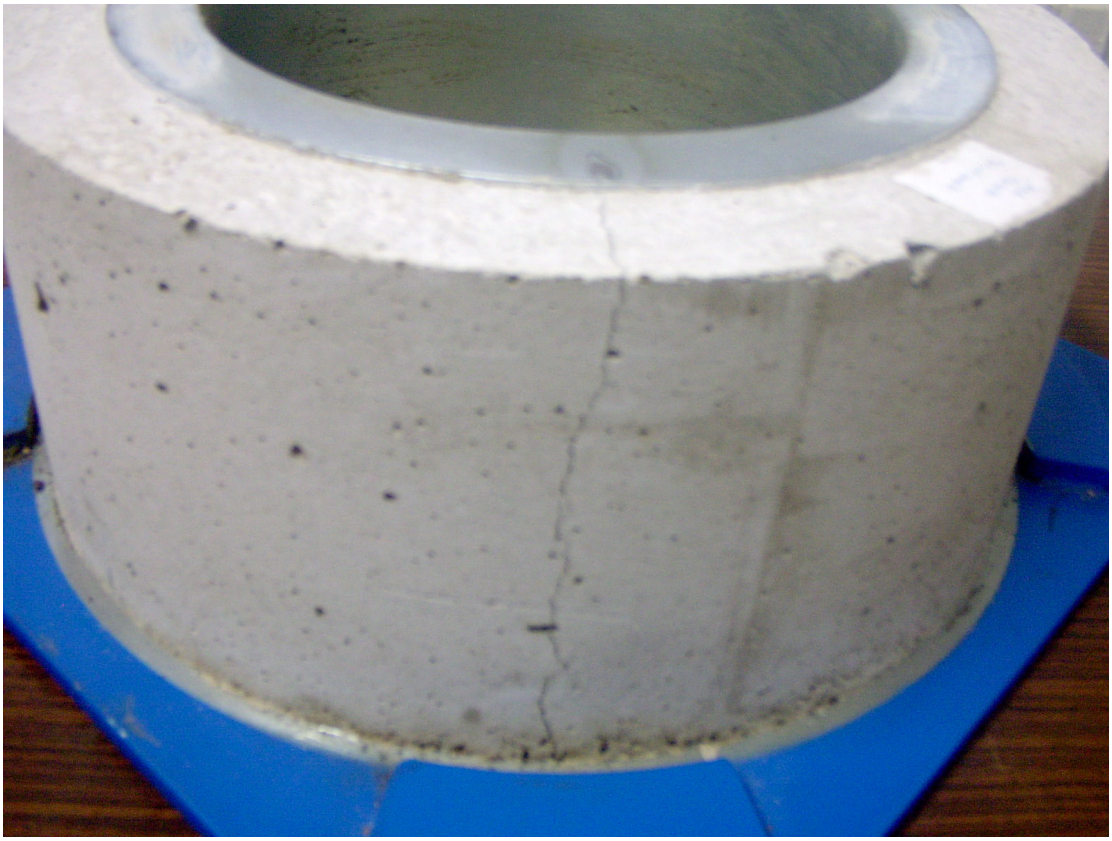
Şekil Ek 10. SEM 10, 247X



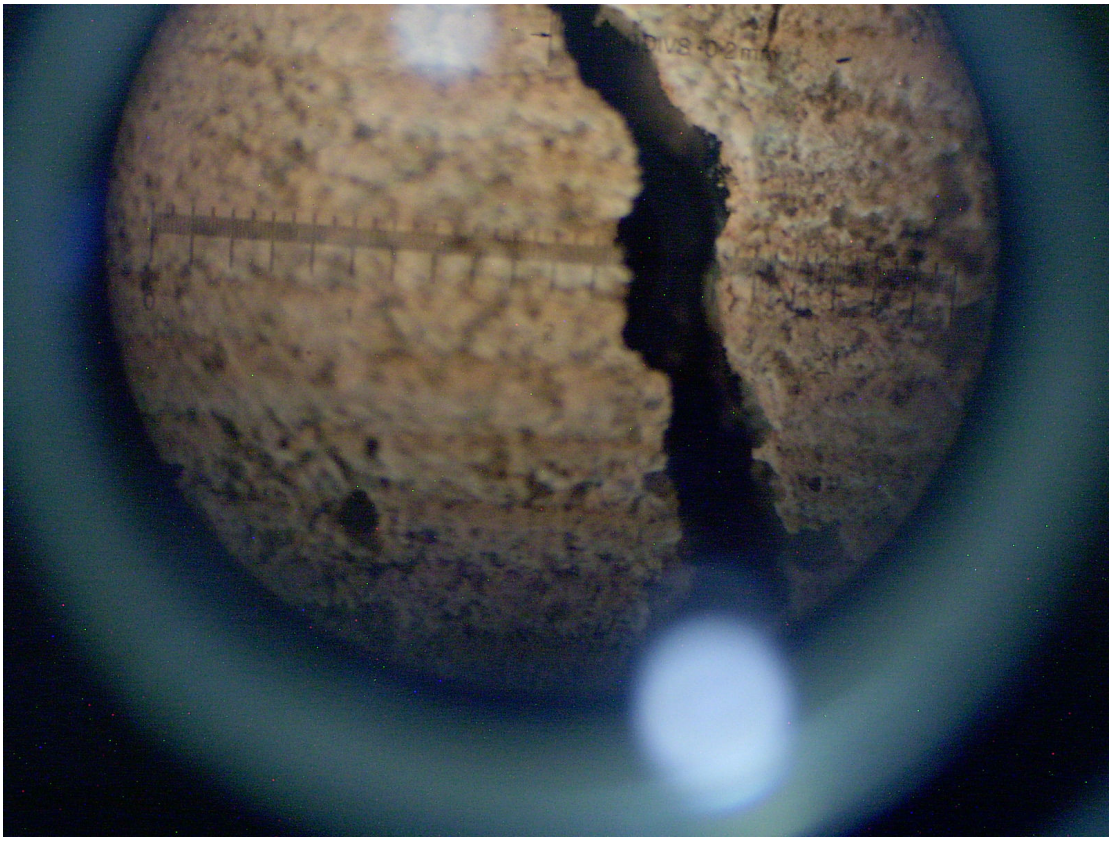
Şekil Ek 11. Halka kalıbı



Şekil Ek 12. Halka numunesi



Şekil Ek 13. Halka numunesi çatlak görünümü



Şekil Ek 14. Çatlak genişliği dürbün görünümü

Şekil Ek 15. Prizmatik numunelerde AKAB kesit görünüşü

Şekil Ek 16. Eğilme AKAB numuneleri

Şekil Ek 17. Küp AKAB numuneleri

Şekil Ek 18. Basınç presi

Şekil Ek 19. Eğilme deneyi

Şekil Ek 20. AKAB % 50 silindir numune kesiti

Şekil Ek 21. AKAB % 75 silindir numune kesiti

Öğr.Gör. Burak Işıkdağ
Anadolu Üniversitesi, Porsuk Meslek Yüksekokulu,
26470 ESKİŞEHİR
Tel: (222) 224 1391 / 5132
Fax: (222) 224 1390
e-posta: bisikdag@anadolu.edu.tr

BURAK IŞIKDAĞ'IN ÖZGEÇMİŞİ

1977 yılında Eskişehir'de doğdu. İlk öğrenimini Yunusemre İlköğretim Okulu'nda, orta öğrenimini Kılıçoğlu Anadolu Lisesi'nde olmak üzere Eskişehir'de tamamladı. 2000 yılında Osmangazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü'nden mezun oldu. 2001 yılında Anadolu Üniversitesi, Porsuk Meslek Yüksekokulu'nda öğretim görevlisi olarak göreve başladı. "Trafik yönetiminde karşılaşılabilecek teknik, idari ve finanssal sorunların belirlenmesi ve çözüm yollarının bulunması" isimli yüksek lisans tezini 2003 yılında Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü'nde tamamladı ve aynı yıl Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü'nde doktoraya başladı, ulaştırma ve yapı bilim dallarında dersler aldı. "Atık Asfalt Kırıklarının Beton Yollarda Agrega Yerine Kullanılmasının Araştırılması" isimli doktora çalışmasını 2009 yılında Prof. Dr. İlker Bekir Topçu danışmanlığında Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü'nde tamamladı. Araştırma konuları; malzeme, yapı malzemeleri ve betondan oluşmaktadır. Uluslararası ve Ulusal hakemli dergilerde 6 makalesi, ulusal ve uluslararası sempozyumlarda 5 bildirisi bulunmaktadır. Halen Anadolu Üniversitesi Porsuk Meslek Yüksekokulu'nda öğretim görevlisi olarak görevini sürdürmektedir.