

165923

**SİLİS DUMANI KATKILI
BİMSBETONLARIN ÖZELLİKLERİ**

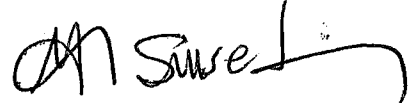
Emre SANCAK

**DOKTORA TEZİ
(YAPI EĞİTİMİ ANABİLİM DALI)**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**OCAK 2005
ANKARA**

Emre SANCAK tarafından hazırlanan SİLİS DUMANI KATKILI BİMSBETONLARIN ÖZELLİKLERİ adlı bu tezin Doktora tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.



Yrd. Doç. Dr. Osman ŞİMŞEK
Tez Yöneticisi

Bu çalışma, jürimiz tarafından Yapı Eğitimi Anabilim Dalında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. Mustafa TOKYAY

Üye : Prof. Dr. M. Haluk ÇELİK

Üye : Doc. Dr. H. Yılmaz ARUNTAS

Üye : Yrd. Doç. Dr. İ. Özgür YAMAN

Üye : Yrd. Doç. Dr. Osman ŞİMŞEK

Bu tez, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygundur.



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	iii
TEŞEKKÜR.....	v
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	vi
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	ix
RESİMLERİN LİSTESİ.....	xi
EKLERİN LİSTESİ.....	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	xiv
1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	4
2.1. Hafif Agregalar ve Hafif Betonlar	4
2.1.1. Hafif agregaların tanımı, türleri ve özellikleri	4
2.1.2. Hafif betonun tanımı ve sınıflandırılması	7
2.1.3. Hafif agregalı beton.....	9
2.2. Silis Dumanı (SD) ve Beton Özelliklerine Etkisi.....	14
2.3. Donatı – Beton Aderansı	15
2.3.1. Donatı - beton aderansı ile ilgili araştırmalar	16
2.3.2. Aderansı etkileyen faktörler.....	18
2.3.3. Aderans dayanımı deneyleri.....	21
2.4. Yüksek Isının Betona Etkisi.....	21
2.5. Betonun Dayanıklılığı	31
2.6. Korozyon.....	33

2.7. Betonarme Donatısının Korozyonu ve Etkileyen Faktörler	35
2.7.1. Betonun pH değerinin etkisi	40
2.7.2. Karbonatlaşma ve ölçümü.....	41
2.7.3. Klorit iyonlarının (deniz suyunun) etkisi.....	44
2.7.4. Nem (rutubet) etkisi	47
2.7.5. Donatı Korozyonuna beton karışımının etkisi.....	48
2.8. Betonarme donatı korozyonunu tespit, ölçüm ve değerlendirme yöntemleri	55
2.8.1. Rezistivite ölçümleri	55
2.8.2. Potansiyel haritaları.....	55
2.8.3. Ağırlık kaybı deneyleri.....	57
2.9. Beton İçindeki Donatının Korozyonu ile İlgili Araştırmalar.....	58
2.9.1. Hafif beton içindeki donatının korozyonu.....	58
2.9.2. Normal beton içindeki donatının korozyonu	62
3. MATERYAL VE METOT	65
3.1. Materyal	65
3.1.1. Agregalar.....	65
3.1.2. Çimento.....	67
3.1.3. Karışım suyu	68
3.1.4. Silis dumanı (SD)	69
3.1.5. Süper akışkanlaştırıcı (SA) katkı	70
3.1.6. Donatı çeliği	70
3.1.7. Üretilen numunelerin boyut ve sayıları	71
3.2. Metot	73

3.2.1. Betonların üretimi ve kürü	73
3.2.2. Taze beton deneyleri.....	74
3.2.3. Sertleşmiş beton deneyleri.....	74
3.2.4. Hızlandırılmış korozyon kürü.....	77
3.2.5. Yarı-hücre (half-cell) potansiyel ölçümleri	79
3.2.6. Donatıda korozyondan kaynaklanan ağırlık kaybının belirlenmesi.....	79
3.2.7. Klorür miktarı tayini	80
3.2.8. Karbonatlaşma derinliğinin belirlenmesi.....	81
4. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA.....	83
4.1. Taze Beton Özellikleri	83
4.2. Sertleşmiş Beton Özellikleri.....	84
4.2.1. Bazı fiziksel özellikler	84
4.2.2. Basınç dayanımı	86
4.2.3. Aderans dayanımı	93
4.2.4. Yüksek sıcaklık etkisinde beton davranışları.....	98
4.3. Donatı Korozyonu	117
4.3.1. Yarı-hücre (half-cell) potansiyel ölçümleri	117
4.3.2. Donatı çeliğinde ağırlık kaybı	122
4.4. Klorür Miktarı Tayini	125
4.5. Karbonatlaşma Derinliği	128
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	134
5.1. Sonuçlar.....	134
5.1.1. Birim ağırlık.....	134

5.1.2. Basınç dayanımı	134
5.1.3. Aderans dayanımı	135
5.1.4. Yüksek sıcaklık etkisinde betonların davranışı.....	135
5.1.5. Yarı hücre potansiyeli.....	136
5.1.6. Donatıda ağırlık kaybı	137
5.1.7. Klorür miktarı.....	137
5.1.8. Karbonatlaşma derinliği.....	137
5.2. Öneriler	138
KAYNAKLAR.....	139
EKLER.....	153
ÖZGEÇMİŞ.....	164

SİLİS DUMANI KATKILI BİMSBETONLARIN ÖZELLİKLERİ

(Doktora Tezi)

Emre SANCAK

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

Ocak 2005

ÖZET

Doğal bir hafif agregası olan bims agregasının, Türkiye’de geniş rezervleri bulunmaktadır. Bu çalışmada, bims agregası ile üretilen taşıyıcı bimsbeton (BB) ve normal yoğun agregası ile üretilen normal betonların (NB) karşılaştırmalı olarak: 1) betonların, içerisindeki donatıyı korozyona karşı koruma etkinliği, 2) donatı - beton kenetlenme (aderans) özellikleri ve 3) yüksek ısıya (20 °C, 100 °C, 400 °C, 800 °C, 1000 °C) maruz kaldıktan sonraki bazı fiziksel ve mekanik özellikleri araştırılmıştır. Bu amaçla, 12 farklı beton karışımı hazırlanmıştır. Silis Dumanı (SD), mineral katkı olarak % 0, % 5 ve % 10 oranlarında çimento ile ağırlıkça yer değiştirilerek kullanılmıştır. Süper akışkanlaştırıcı (SA) katkı ise betona, çimento ağırlığının % 2’si oranında katılmıştır.

Sonuç olarak; BB’ların birim ağırlıkları, NB’lara göre % 23 daha düşüktür. Basınç dayanımları, SD veya SA katkıya bağlı olarak, NB’ların % 48’i ile % 65’i arasında değişen değerler almıştır. BB’larda ve NB’larda, SD ve SA katkının birlikte kullanılması ile donatı – beton aderansı artmaktadır. NB ve BB’lar, 20 °C, 100 °C ve 400 °C sıcaklıklara maruz bırakıldıklarında, NB’ların daha dayanıklı oldukları görülmüştür. Yarı-hücre potansiyel verilerine göre NaCl çözeltisinde, 17 ıslatma-kurutma çevrimine maruz kalan, % 10 SD - % 2 SA’lı BB ve NB’lar, en olumlu sonucu vermişlerdir (sırasıyla; -511,2 ve -485,8). BB ve NB’larda, % 10 SD – % 2 SA’nın birlikte kullanılması durumunda, 0-10 mm

derinlikte klorür miktarı sırasıyla; % 2,24 ve % 1,76 olmuştur. Donatı ağırlığında en az kayıp, % 10 SD - % 2 SA'lı BB ve NB'larda elde edilmiştir (sırası ile % 0,87 ve % 0,85). NB ve BB'larda, SD'nın tek başına kullanımı ile karbonatlaşma derinliği artmıştır. En düşük karbonatlaşma derinliğini % 5 SD - % 2 SA'lı BB ve NB'lar sağlamışlardır (sırası ile 1,40 ve 1,61 mm).



Bilim Kodu : 714
Anahtar Kelimeler : Bimsbeton, Aderans dayanımı, Donatı korozyonu, Yüksek sıcaklık etkisi
Sayfa Adedi : 164
Tez Yöneticisi : Yrd. Doç. Dr. Osman ŞİMŞEK

**PROPERTIES OF SILICA FUME ADDED PUMICE-CONCRETE
(PhD. Thesis)**

Emre SANÇAK

**GAZI UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY
January 2005**

ABSTRACT

Large deposits of Pumice, a natural lightweight aggregate, are found in Turkey. In this study, the following properties of structural concrete produced by Pumice and normal-weight aggregate are investigated: 1) the ability to protect the embedded reinforcement against corrosion, 2) the bond strength between concrete and reinforcement, and 3) compressive strength and weight loss of Concrete with Pumice Aggregate (PAC) and Normal-weight Aggregate (NAC) after being exposed to high temperatures (20, 100, 400, 800, 1000 degrees C). To achieve these objectives, 12 different types of concrete mixtures were produced. In producing the NAC and PAC mixtures, a mineral additive, Silica Fume (SF), was used to replace the Portland cement in the ratios of 0 %, 5 % and 10 % by weight. The remaining six types of mixtures were obtained by adding Super Plasticizers (SP) to the above mixtures in the ratio of 2 % by weight.

In conclusion; unit weight of PAC was 23 % lower than that of NAC. When compared to NAC, compressive strength reductions in PAC were observed to change between 48 % and 65 %. Use of SF and SP together, increased the bonding between concrete and the reinforcement in both PAC and NAC. When exposed to the temperatures of 20 °C, 100 °C and 400 °C, NAC performed better than

the PAC. PAC containing 10 % SF- 2 % SP, exposed to 17 cycles of wetting-drying in 7 % NaCl solution, gave the most suitable results (-511,2 and -485,8 mV respectively) according to the half-cell potential data. The use of 10 % SF- 2 % SP together in PAC and NAC, amount of Cl^- ion became 2,24 % and 1,76 % respectively at a depth of 0-10 mm. The minimum loss of reinforcement weight was obtained by the addition of 10 % SF- 2 % SP to PAC and NAC, which was determined as 0,87 % and 0,85 %, respectively. When SF is used alone in NAC and PAC, carbonation depth increased. The minimum carbonation depth was obtained by the addition of 5 % SF and 2 % SP to PAC and NAC, which was determined as 1,40 mm and 1,61 mm, respectively.



Science Code	: 714
Key Words	: Pumice-concrete, Bond strength, Reinforcement corrosion, High temperature effect
Page Number	: 164
Adviser	: Assist. Prof. Dr. Osman ŞİMŞEK

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım süresince, ilgi ve teşviklerini esirgemeyen ve değerli bilgilerinden istifade ettiğim Tez Danışmanım, Sayın Y. Doç. Dr. Osman ŞİMŞEK'e,

Değerli katkıları ile tezimi yönlendiren ve çalışmalarımı teşvik eden, Sayın Prof. Dr. Mustafa TOKYAY ve Doç. Dr. H. Yılmaz ARUNTAŞ'a,

Deneysel çalışmalarımdayardımlarını esirgemeyen, Arş. Gör. Mustafa DAYI, Arş. Gör. Serkan SUBAŞI, Arş. Gör. Mürsel ERDAL ve diğer çalışma arkadaşlarıma,

Çalışmalarımda, malzeme desteği sağlayan, Antalya Elektroferrokrom İşletme Müd.'ne, ISBAŞ Isparta Belediyesi Bims Yapı Elemanları San. ve Tic. A.Ş.'ne, SET ÇİMENTO-Ankara Fabrikası'na, SİKA Ankara Bölge Müd.'ne, bununla birlikte, Kimya laboratuvarlarından yararlanma imkanını veren, DSİ TAKK Dairesi Başkanlığı'na,

Ayrıca teşviklerinden ve desteklerinden dolayı Yapı Eğitimi Bölüm Başkanı Sayın Prof. Dr. M. Haluk ÇELİK'e ve Yapı Eğitimi Bölümü'nün değerli öğretim üyelerine en içten teşekkürlerimi sunarım.

Meslek hayatım ve çalışmalarım boyunca her türlü desteğini esirgemeyen, eşime, kızıma ve aileme teşekkürü borç bilirim.

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Türkiye bims rezerv dağılımı	6
Çizelge 2.2. Çeşitli standartlara göre HB ağırlık ve dayanım sınırları	8
Çizelge 2.3. ASTM C 876'ya göre potansiyel kriterleri	56
Çizelge 2.4. Arup'un Potansiyel Kriterleri	57
Çizelge 3.1. Normal agregalara ait fiziksel özellikler	66
Çizelge 3.2. Bims agregasına ait fiziksel özellikler	67
Çizelge 3.3. PÇ 42,5R'nun kimyasal bileşenleri, fiziksel ve mekanik özellikleri	68
Çizelge 3.4. Karışım suyuna ait bazı özellikler	69
Çizelge 3.5. SD ve Bims agregasının kimyasal bileşimleri	69
Çizelge 3.6. Donatı çeliğine ait fiziksel ve mekanik özellikler	70
Çizelge 4.1. Taze NB'u oluşturan malzeme miktarları (1m ³) ve bazı özellikleri	83
Çizelge 4.2. Taze BB'u oluşturan malzeme miktarları (1 m ³) ve bazı özellikleri	83
Çizelge 4.3. Sertleşmiş betonlara ait bazı fiziksel özellikler	84
Çizelge 4.4. Betonlarda basınç dayanımlarının ortalama ve standart sapma değerleri	86
Çizelge 4.5. NB'larda katkı kullanımının beton yaşı ile değişimi için iki faktörlü varyans analizi (ANOVA) sonuçları	88
Çizelge 4.6. BB'larda katkı kullanımının beton yaşı ile değişimi için iki faktörlü varyans analizi (ANOVA) sonuçları	89
Çizelge 4.7. 28 günlük NB basınç dayanımlarının çoklu karşılaştırma testi sonuçları	89
Çizelge 4.8. 28 günlük BB basınç dayanımlarının çoklu karşılaştırma testi sonuçları	90

Çizelge 4.9. Eksenel çekme-çıkarma deney sonuçları.....	94
Çizelge 4.10. Donatıdaki maksimum aderans yükünün beton tiplerine göre tek yönlü varyans analizi (ANOVA) sonuçları	94
Çizelge 4.11. NB'larda çoklu karşılaştırma (Scheffe) testi sonuçları	95
Çizelge 4.12. BB'larda çoklu karşılaştırma (Scheffe) testi sonuçları	95
Çizelge 4.13. NB'ların farklı sıcaklıklara göre basınç dayanımı değerleri ..	101
Çizelge 4.14. NB'da farklı sıcaklık uygulamasına göre basınç dayanımlarının varyans analizi (ANOVA)	102
Çizelge 4.15. NB'lara farklı sıcaklık uygulamasının basınç dayanımına etkisinin çoklu karşılaştırma (Scheffe ^a) testi sonuçları.....	103
Çizelge 4.16. BB'ların farklı sıcaklıklara göre basınç dayanımı değerleri...	108
Çizelge 4.17. BB'da farklı sıcaklık uygulamasına göre basınç dayanımlarının varyans analizi (ANOVA)	109
Çizelge 4.18. BB'lara farklı sıcaklık uygulamasının basınç dayanımına etkisinin çoklu karşılaştırma (Scheffe ^a) testi sonuçları.....	109
Çizelge 4.19. NB'larda basınç dayanımı ve sıcaklık arasındaki regresyon denklemleri	114
Çizelge 4.20. BB'larda basınç dayanımı ve sıcaklık arasındaki regresyon denklemleri	116
Çizelge 4.21. Betonlarda yarı –hücre potansiyel ölçüm sonuçlarının ortalama ve sapma değerleri.....	118
Çizelge 4.22. Yarı hücre potansiyeli değerlerinin ANOVA sonuçları.....	119
Çizelge 4.23. Yarı-Hücre Potansiyel ölçümlerinin çoklu karşılaştırma (Scheffe) testi sonuçları (17.çevrim sonunda)	120
Çizelge 4.24. NB'larda klorür içeriğinin derinliğe bağlı olarak değişimi (beton ağırlığınca-%).....	125
Çizelge 4.25. BB'larda klorür içeriğinin derinliğe bağlı olarak değişimi (beton ağırlığınca-%).....	127
Çizelge 4.26. Beton tiplerine göre karbonatlaşma derinliği (D _c) değerleri ..	128
Çizelge 4.27. Beton tipine bağlı karbonatlaşma derinliklerinin varyans analizi (ANOVA) sonuçları.....	129

Çizelge 4.28. Beton tiplerinde karbonatlaşma derinliklerinin (D_c) çoklu karşılaştırması (Scheffe) testi sonuçları.....	129
---	-----



ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Nervürlü donatı kullanılması durumunu karakterize eden gerilmeler.....	19
Şekil 2.2. Aderansta göçüş mekanizmaları.....	20
Şekil 2.3. Beton içindeki donatının korozyonu ve elektrokimyasal aşamaları.....	38
Şekil 2.4. Betonarme donatısı pas ürünlerinin hacimsel artışı.....	39
Şekil 2.5. Bakır-bakır sülfat yarı hücre devresi.....	56
Şekil 3.1. Normal agreganın standart ve karışım eğrisi.....	66
Şekil 3.2. Bims agregasının karışım ve sınır eğrileri.....	67
Şekil 3.3. Nervürlü çelik donatının kesit ve profili.....	71
Şekil 3.4. Donatı çeliğinin gerilme- uzama yüzdesi eğrisi.....	71
Şekil 3.5. Orta noktasından donatılmış silindirik korozyon numunesi.....	78
Şekil 4.1. NB'larda beton yaşına bağlı basınç dayanımı-numune tipi ilişkisi.....	91
Şekil 4.2. BB'larda beton yaşına bağlı basınç dayanımı-numune tipi ilişkisi.....	91
Şekil 4.3. Beton yaşına bağlı basınç dayanımı-numune tipi ilişkisi.....	93
Şekil 4.4. Betonlarda aderans gerilmesi –katkı oranı ilişkisi.....	96
Şekil 4.5. Betonlarda aderans gerilmesi –SD katkı oranı ilişkisi.....	97
Şekil 4.6. Fırının ısınma – zaman ilişkisi.....	98
Şekil 4.7. NB'larda katkı kullanımına bağlı ağırlık kaybı-sıcaklık ilişkisi.....	99
Şekil 4.8. BB'larda katkı kullanımına bağlı ağırlık kaybı-sıcaklık ilişkisi.....	100
Şekil 4.9. NB'larda katkı kullanımına bağlı basınç dayanımı-sıcaklık ilişkisi.....	114
Şekil 4.10. BB'larda katkı kullanımına bağlı basınç dayanımı - sıcaklık ilişkisi.....	115

Şekil 4.11. NB'larda yarı hücre potansiyeli - hızlandırılmış korozyon ortamı ilişkisi.....	121
Şekil 4.12. BB'larda yarı hücre potansiyeli-hızlandırılmış korozyon ortamı ilişkisi.....	121
Şekil 4.13. Donatı çeliğinde beton tipine bağlı ağırlık kaybı	123
Şekil 4.14. NB'larda beton tipine bağlı klorür içeriği – derinlik ilişkisi	126
Şekil 4.15. BB'larda beton tipine bağlı klorür içeriği – derinlik ilişkisi.....	127
Şekil 4.16. Betonlarda karbonatlaşma derinliği-beton tipi ilişkisi	132



RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 2.1. Kırıldıktan sonra yüzeyine fenolfetalin çözeltisi püskürtülmüş beton.....	44
Resim 3.1. Aderans dayanımını belirlemek üzere kullanılan deney düzeneğinin çekme ünitesi.....	76
Resim 4.1. 1100 kodlu numunelerin, 800 ve 1000°C sıcaklık uygulanmasından sonraki durumları	105
Resim 4.2. 1102 kodlu numunelerin, 800 ve 1000°C sıcaklık uygulanmasından sonraki durumları	105
Resim 4.3. 1000 kodlu numunelerin 1000°C sıcaklığa maruz bırakıldıktan sonraki durumu	106
Resim 4.4. 1002 kodlu numunelerin 1000°C sıcaklığa maruz bırakıldıktan sonraki durumu	106
Resim 4.5. 1050 kodlu numunelerin 1000°C sıcaklığa maruz bırakıldıktan sonraki durumu	107
Resim 4.6. 1052 kodlu numunelerin 1000°C sıcaklığa maruz bırakıldıktan sonraki durumu	107
Resim 4.7. Farklı sıcaklıklara maruz bırakılan BB (2000 kodlu) numunelerin basınç dayanımı deneyinden önceki toplu görünümü	110
Resim 4.8. 400°C ve 1000°C sıcaklıklara maruz kalan BB'ların (2000 kodlu) basınç deneyi öncesi görünümleri	111
Resim 4.9. 2002 ve 2050 kodlu BB numunelerin 1000°C sıcaklık uygulandıktan sonraki görünümleri	111
Resim 4.10. 2052 kodlu BB numunelerin 1000°C sıcaklık uygulandıktan sonraki görünümleri	112
Resim 4.11. 2100 kodlu BB numunelerin 1000°C sıcaklık uygulandıktan sonraki görünümleri	112
Resim 4.12. 2102 kodlu BB numunelerin 1000°C sıcaklık uygulandıktan sonraki görünümleri	113

Resim 4.13. NB korozyon numunelerinden çıkarılan donatıların görünümü	123
Resim 4.14. BB korozyon numunelerinden çıkarılan donatıların görünümü	124
Resim 4.15. 1100 kodlu numunede fenolfetalin çözeltisi uygulandıktan sonraki görünümü	130
Resim 4.16. 1050 kodlu numuneye fenolfetalin çözeltisi uygulandıktan sonraki görünümü	130
Resim 4.17. 2052 kodlu numuneye fenolfetalin çözeltisi uygulandıktan sonraki görünümü	131
Resim 4.18. 1052 kodlu numuneye fenolfetalin çözeltisi uygulandıktan sonraki görünümü	131



EKLERİN LİSTESİ

Ek	Sayfa
Ek-1. Deneylerde kullanılan bazı numunelerin ve cihazların görünümü.	153
Ek- 2. Betonlarda basınç dayanımı - beton yaşı ilişkisi.....	156
Ek- 3. Betonlarda basınç dayanımı - sıcaklık ilişkisi.....	158
Ek- 4. Betonlarda yarı hücre potansiyelleri.....	159
Ek- 5. Donatı çeliğinde ağırlık kaybı.....	161
Ek- 6. Betonlarda klorür içeriği değişimi.....	162
Ek-CD. İnternet Kaynakları	Arka Kapak İçi

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
P_1	Maksimum eksenel çekme yükü (kN)
τ_b	Ortalama maksimum aderans gerilmesi(MPa)
$\emptyset$	Numune Çapı(mm)
ℓ_b	Donatının betonla temas eden boyu (kenetlenme boyu-mm)
γ	Yoğunluk (kg/dm ³)
d_{maks}	En büyük agregatane çapı (mm)
$f_{\bar{c}}$	Ortalama beton basınç dayanımı (MPa)
f_{yk}	Akma dayanımı (MPa)
f_{su}	Kopma dayanımı (MPa)
β	Donatı eksenini ile nervür arasındaki açı (°)
bs	Enine nervür genişliği (mm)
hs	Enine nervür yüksekliği (mm)
a	Boyuna nervür yüksekliği (mm)
b	Boyuna nervür genişliği (mm)
S	Kesit alanı (cm ²)
G	1 m. uzunluğundaki çelik donatının ağırlığı (kg/m)
E_{corr}	Yarı hücre (half-cell) potansiyeli (mV)
D_c	Karbonatlaşma derinliği (mm)
K	Sabit (≈ 4 mm / yıl)
t	Karbonatlaşma süresi (yıl)
W_L	Ağırlık kaybı (g)
P	Penetrasyon miktarı (cm/yıl)
W_K	Metalin korozyonla ağırlık kaybı (g),

Δ	Metalin yoğunluğu (g/cm ³)
W	Ağırlık
V	Hacim
E -modülü	Elastikiyet modülü
N	Örnek sayısı
$\bar{X}$	Ortalama
p	Anlamlılık düzeyi
F	F testi için değer
R^2	Determinasyon katsayısı

Kısaltmalar

Açıklama

NB	Normal Beton
BB	Bimsbeton
HB	Hafif Beton
SA	Süper Akışkanlaştırıcı
SD	Silis Dumanı
PÇ	Portland çimentosu
UK	Uçucu kül
YFC	Yüksek fırın cürufu
DYK	Doygun yüzey kuru
AAC	Hava sürüklenmiş otoklav beton/gazbeton
EPS	Genleştirilmiş polistren köpük
SEM	Taramalı elektron mikroskop
S/Ç	Su / çimento oranı
s/b	Su / bağlayıcı oranı
TBHA	Taze Beton Birim Hacim Ağırlığı (kg/m ³)
ANOVA	Varyans analizi
KT	Kareler Toplamı
KO	Kareler Ortalaması

sd	Serbestlik Derecesi
Std S.	Standart Sapma
YDB	Yüksek Dayanımlı Beton
ASKİ	Ankara Su ve Kanalizasyon İdaresi
DSİ TAKK	Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü Teknik Araştırma ve Kalite Kontrol Dairesi Başkanlığı
G.Ü.T.E.F.	Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi



1. GİRİŞ

Yapı sektöründe, betonun önemi her geçen gün artmaktadır. Araştırmacıların, yaptıkları çalışmalarda; betonarme taşıyıcı sistemlerde kullanılmak üzere çok değişik beton karışımları ortaya konulmaktadır. Bu çalışmaların bir çoğunda; yapının servis ömrü ve farklı şartlara karşı davranışları üzerinde durulmaktadır. Aynı zamanda, depremin olumsuz etkisinin en aza indirilmesi de yaygın olarak araştırılmaktadır.

Depremin, betonarme yapılarda, atalet momenti açısından, taşıyıcı elemanların öz ağırlıkları ile paralel olarak etkili olduğu bilinmektedir. Bu yüzden araştırmacıların üzerinde durduğu temel konulardan biri de taşıyıcı sistemde hafif beton (HB) kullanılması ve bu suretle öz ağırlıkların en aza indirgenmesidir. Böylece temel, kiriş ve kolon kesit boyutlarında ve donatı ihtiyacında önemli oranda azalma olacaktır. HB'lar, normal betona (NB) göre yüksek sıcaklıklara karşı daha dayanıklıdır. Ayrıca daha iyi ısı ve ses yalıtımı sağladığı yapılan araştırmalarda belirtilmiştir. Ancak, bu avantajlarının yanında, işlenebilirliğinin düşük olması nedeni ile kalifiye işçilik gerektirmesi, gözenekliliğinin ve rötresinin fazla olması, üretim sırasında bazı önlemler alınmasını gerektirmesi gibi olumsuz özelliklere de sahiptir.

HB'ların betonarme taşıyıcı sistem elemanlarının üretiminde kullanılmasında bilinmesi gereken en önemli konulardan birisi; betonarmenin temel konularından olan; donatı – beton yapışma (aderans) özelliğidir.

“Ülkemizde ve dünyada en yaygın kullanılan betonun, standartlara uygun olarak, üretilmiş olması ve kuralına uygun olarak işlenmesi, o yapının dayanıklılık ve güvenliği açısından son derece önemlidir. Bu durum 17 Ağustos Marmara ve 12 Kasım 1999 Düzce depremleri ile bir kez daha görülmüştür. Kurallara uygun yapılamayan, yapıların hemen hemen tamamı yıkılırken, birçok komşu parseldeki bina, hiçbir hasar görmeksizin ayakta kalabilmiştir. Yapı ve yapı elemanları, yapım ve kullanım süresi içinde yapıyı etkileyebilecek tüm yük ve şekil değiştirmeler altında belli bir güvenliği sağlayacak ve kullanımı bozmayacak biçimde tasarlanmalıdır. Topraklarının tamamına yakını deprem kuşağında bulunan ülkemizde, yapıların zemin –

proje – malzeme ve uygulama aşamalarında depreme dayanacak şekilde tasarlanıp, inşa edilmeleri zorunludur” (1).

“Türkiye’de normal yoğun agregalar kullanılarak üretilen NB’lar, maliyetinin ucuz olması, yüksek dayanımı, kolay işlenebilme özelliği ve monolitik yapısı gibi özelliklerinden dolayı diğer yapı malzemelerine göre daha fazla kullanılmaktadır. Ancak bu betondan inşa edilen yapı elemanlarının birim ağırlıklarının nispeten fazla olması, kendi öz ağırlıklarını taşıyabilmeleri için oldukça fazla enerjiye ihtiyaç duymalarına sebep olmaktadır” (2).

“Normal agregadan yapılmış betonarmenin birim ağırlığı $2300-2500 \text{ kg/m}^3$ civarında olup, hesaplarda genelde 2400 veya 2500 kg/m^3 olarak alınmaktadır” (3).

Bu beton türü ile yapılan yapılar yüksek taşıyıcı özellikler gösterebilmektedirler. Ancak birim ağırlıklarının fazla olması, yüksek binaların inşasında problem oluşturmakta, özellikle zemini zayıf olan yapıların temellerinin maliyeti artmaktadır. Ayrıca NB kullanılarak inşa edilen yapılarda depremden kaynaklanan, yatay kuvvetler nedeni ile yer kabuğunda oluşan ötelemeler, çok ani olmakta ve yapılarda şok etkisi yapmaktadır. Yapı, zeminden ayrı bir kitle olduğundan, yapı içinde, yer hareketine ters yönde atalet (eylemsizlik) kuvvetleri meydana gelmektedir. Atalet kuvvetleri, yapıda hasara yol açabilecek boyutlara ulaşabilmektedir. Atalet kuvvetlerinden kaynaklanan bu yükler, deprem yükleri olarak adlandırılırlar. Deprem esnasında oluşan zemin titreşimi sonunda, yapının ağırlığı ile doğru orantılı olarak yapıya etki ederler (2, 4-6).

“Dolayısı ile NB’larla aynı işlevi sağlayabilen, yapılarda bölme elemanı oluşturmak amacı ile kullanılabildiği bilinen, HB’ların, betonarme betonunda taşıyıcı amaçlı olarak kullanılabildikleri de yapılan araştırmalarla belirlenmiştir” (7).

Bu tür betonun hafif birim ağırlığı yanında gözenekli yapısından kaynaklanan ses yutuculuğu ve ısı yalıtkanlık özellikleri, avantajlarından bazılarıdır. Bu yönüyle, HB’ların, günümüzdeki enerji sorunu nedeni ile de konut yapımında kullanılması enerji tasarrufu açısından olumlu olacaktır. HB’ların termik özelliklerinin de yüksek olması, yüksek sıcaklıklara karşı dirençli olmalarını

ve yangın riski olan yapılarda tercih edilmelerini sağlamaktadır (2, 5, 8, 9).

“HB’ların üstünlüklerinden bir diğeri de birim hacimdeki toplam malzeme ağırlığının azalması nedeni ile beton kalıbında daha düşük basınç oluşacağından üretim ve yerleştirme işlemlerinin kolaylaşmasıdır” (9).

HB’lar, üretim yöntemlerine göre sadece iri agreganın kullanıldığı kumsuz betonlar, doğal veya yapay hafif agregaların kullanıldığı hafif agregalı betonlar ve çeşitli kimyasal katkılarla gözeneklerin hacminde fazla yer kaplaması sağlanan, gazbeton veya köpük betonlar olarak sınıflandırılırlar (10-12).

“Bunlar arasında en ekonomik olanı, ülkemizde de çok geniş rezervlerinin bulunduğu bilinen doğal hafif agregaların kullanılması ile bu betonların üretilmesidir” (7).

“HB’ların bu üstünlükleri yanında sakıncaları da vardır;

Boşluklu olmaları nedeni ile mukavemetleri düşüktür. Bundan dolayı yüksek mukavemetli beton uygulamalarında tercih edilen bir malzeme değildir.

Aşınmaya karşı dayanıksızdır.

Rutubete karşı yalıtılmaları gerekir.

HB’ların elastikiyet modüllerinin düşük olması nedeniyle sünme bir dereceye kadar yüksektir, ancak bu durum tam olarak doğrulanmış değildir.

Sabit yük altındaki uzun süreli davranış özellikle kullanılan agreganın rijitliği ile ilgilidir.

Bileşimleri aynı olan HB’un rötresi NB’a göre daha fazladır” (9, 13).

“Bununla beraber, HB düşük elastiklik modülüne ve yüksek değerlerde ‘çekme mukavemeti / basınç mukavemeti’ oranına sahip olması nedeni ile rötre süresince çatlama meydana gelme olasılığı daha düşüktür” (9).

2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Hafif Agregalar ve Hafif Betonlar

2.1.1. Hafif agregaların tanımı, türleri ve özellikleri

Özgül ağırlıkları, 2400 kg/m^3 'ten küçük olan agregalar "hafif agregalar" olarak anılmaktadır (14).

"Hafif agregalar; doğal, yapay veya organik kökenli oluşlarına ve kırılma, elenme, yıkanma dışında bir işlem görüp görmediklerine göre sınıflandırılabilirler.

Doğal hafif agregalar: Kırma ve eleme işleminde başka işlemde geçirilmeyen, tuf (sedimente, volkanik), bims (pomza, sünger taşı), lav cürufu (skorya vb.), diatomit (su yosunları sınıfından tek hücreli mikroskopik alglerin fosilleşmiş silisli kavkılarında meydana gelmiş bir çökeldir) gibi doğal oluşumlu agregalardır.

Yapay hafif agregalar: Genellikle ısıtma ve bazı hallerde sinterleşme yolu ile elde edilen hafif hücreli ve granüle inorganik elemanlardan meydana gelen YFC'ü, kil, uçucu kül (UK), perlit, obsiden, vermikülit, veya arduvaz maddelerden yapılmış agregalardır.

Hafif agregaların aşağıdaki gibi genel bir sınıflandırılması da yapılabilir:

- 1- Bims agregası, volkanik tuf, volkanik cüruf ve diatomit gibi "doğal hafif agregalar",
- 2- Genleştirilmiş kil, şist, perlit, arduvaz ve vermükilit gibi doğal malzemelerden üretilen yapay agregalar,
- 3- YFC'ü ve UK gibi bir üretim sonucu yan ürün olarak elde edilen hafif agregalar,

4- Genleştirilmiş cüruf, genleştirilmiş UK, sinterlenmiş UK gibi endüstriyel artıkların işlenmesiyle elde edilen hafif agregalar.

5- Hızar talaşı ve ahşap yongası gibi ağaç kökenli, strafor gibi polimer kökenli organik agregalar” (15-17).

Bims (Pomza):

Bims; birbirine bağlantısız boşluklu, sünger görünümlü silikat esaslı, birim hacim ağırlığı genellikle 1000 kg/m^3 ’ten küçük, sertliği Mohs skalasına göre yaklaşık 6 olan ve camsı doku gösteren volkanik bir maddedir. Türkiye’de bol miktarda rastlanan bims agregasına, pomza ve sünger taşı da denilmektedir. (18, 19).

“Kimyasal olarak % 75’e varan silis içeriği bulunabilmektedir. Bims agregasının genel kimyasal bileşimi; % 60-75 SiO_2 , % 13-17 Al_2O_3 , % 1-3 Fe_2O_3 , % 1-2 CaO , % 7-8 $\text{Na}_2\text{O} - \text{K}_2\text{O}$ ve eser miktarda TiO_2 ve SO_3 ’den oluşmaktadır” (20).

“Bimsin, bağlayıcı maddesi amorf bir silikattır. Isparta bims agregasının birim hacim ağırlığının $400-1000 \text{ kg/dm}^3$ arasında değişmesi, jeoteknik özelliklerinin çok farklı davranışına sebep olmaktadır. Homojen, izotrop ve küçük gerilmeler dışında elastik olmayan bir davranışa sahiptir” (21).

Bims, boşluklu, süngerimsi, volkanik olaylar neticesinde oluşmuş, fiziksel ve kimyasal etkenlere karşı dayanıklı, gözenekli camsı volkanik bir kayadır. Oluşumu sırasında bünyedeki gazların ani olarak bünyeyi terk etmesi ve ani soğuması nedeniyle, makro ölçekten mikro ölçğe kadar sayısız gözenek içerir. Bims agregası; %75 boşluklu, boşlukları yassı ve birbirine paralel, bazen de birbirleri ile bağlantılıdır. Gözenekler arası genelde bağlantısız boşluklu olduğundan permeabilitesi düşük, ısı ve ses yalıtımı oldukça yüksektir. Bims, kendisine özgü bazı özellikleri ile benzer volkanik camsı kayalardan (perlit, obsidyen, peks-tayn) ayrılır. Bunlardan rengi, gözenekliliği ve kristal suyunun olmaması ile pratik olarak ayrılmaktadır (15, 20, 21). Isı iletkenlik katsayısı, yüzeyler arası sıcaklık farkının 20°C olması

durumunda; 0,16 -0,18 kcal/m.h°C arasında değişmektedir (22, 23). Bims agregasının, frekansı yüksek olması durumunda ses absorpsiyon yeteneği; % 60 iken, düşük frekanslı sesler karşısına etkili değildir. Tek eksenli basınç dayanımı değerleri; Nevşehir-Ürgüp yöresi bims agregası için; 2,8-4,6 MPa arasında değişmektedir. Civalı porozimetre yardımı ile oda sıcaklığındaki ölçüme göre etkin porozite değeri; % 52'dir (23).

“Bimsin, yurdumuzda yaygın olan özel kullanımı daha çok beton duvar blokları ve asmolon blok şeklindedir. Bims agregası ile üretilen farklı nitelikteki betonlar yapının taşıyıcı sisteminde kullanılabileceği gibi yapı fiziği sorunlarının çözümünü de sağlayabilirler” (15).

“Ülkemizde bims madenciliği, bims yataklarının oluşum şekli ve örtü/dekapaj oranları dahilinde açık işletme metodu şeklinde yürütülmektedir. Cevher nakliyatı uzun mesafelerde karayolu taşımacılığı ile yapılmakta, bu nedenle taşıma maliyeti cevher üretim maliyetinden çok daha fazla olmaktadır. Bu nedenle ülkemizde gerek kalite ve gerekse rezerv bakımından oldukça kaliteli Doğu Anadolu Bims Yataklarından gerektiği gibi istifade edilememektedir” (20).

“Ülkemiz bims rezervleri açısından oldukça zengin olup yaklaşık 3 milyar m³’lük potansiyele sahiptir” (20). Çizelge 2.1’de ülkemizdeki, illere göre bims rezervleri verilmiştir.

Çizelge 2.1. Türkiye bims rezerv dağılımı

Yeri	Rezerv Miktarı (m ³)
Nevşehir-Avanos-Ürgüp	404.412.834
Derinkuyu	48.660.500
Kayseri-Gömeç	13.250.000
Kayseri-Develi	58.500.000
Kayseri-Talas-Tomarza	241.000.000
Kayseri-Talas-Tomarza	284.000.000
Bitlis- Tatvan	1.100.000.000
Van-Erciş-Kocapınar	154.625.000
Van-Mollakasım	5.950.000
Ağrı-Patnos	27.812.000
Ağrı-Doğubeyazıt	26.875.000
Kars-Iğdır-Kavaktepe	40.156.250
Kars-Digor	11.718.750
Kars-Sarıkamış	1.875.000
Ankara-Güdül-Tekköy	8.070.000
Isparta-Gölcük	30.983.250

Bims rezervlerinin; Dünyada $9,46 \times 10^9$ ton olduğu tahmin edilmektedir. Bunun da $1,93 \times 10^9$ tonunun Türkiye’de bulunduğu belirtilmektedir (24).

Bu rezervin $1.479.556.876 \text{ m}^3$ ’lük görünür –muhtemel kısmı iyi kaliteli olarak sınıflandırılmıştır. Dünyada, bims ile ilgili malzemelerin üretim miktarı; 2001 yılında; $12,8 \times 10^6$ ton iken, 2002 yılında $12,5 \times 10^6$ ton olacağı tahmin edilmektedir (24).

Bims kullanım alanları:

İnşaat sektörü,

- Çeşitli sanayi sektörleri (toz olarak),
- Tarım sektöründe kullanılmaktadır.

“Bims ülkemizde ve dünyada, perlitin kullanıldığı bütün alanlarda kullanılabilir. Perlit gibi genişletmek için enerji ve yatırım gerektirmediğinden inşaat sektöründeki kullanımı hızla artmaktadır (20).

2.1.2. Hafif betonun tanımı ve sınıflandırılması

“Birim ağırlıkları NB’lardan belirgin şekilde düşük olan betonlara “hafif beton” denilmektedir. Genel olarak birim ağırlığı 1800 kg/m^3 ’ten küçük olan betonlar; HB sınıfına girerler” (7).

HB’lar, birim ağırlıklarına, mukavemetlerine ve kullanım amacına göre gruplandırılabilirler (9).

HB’ların birim ağırlık sınırları genellikle $300-1800 \text{ kg/m}^3$ arasında değişmektedir (13). ASTM C 330-02a’ya (25) göre birim ağırlıkları en fazla 1850 kg/m^3 ve 28 günlük silindirik basınç mukavemeti en az 17 MPa olan betonlar da HB olarak nitelendirilmektedir.

TS 2511’e göre (26); HB’ların birim ağırlığının en fazla 1900 kg/m^3 olması istenmektedir. Basınç dayanımları 10 MPa’a kadar ve birim ağırlıkları $700-1400 \text{ kg/m}^3$ arasında olan betonlar; yalıtım betonu olarak değerlendirilirken

10-17 MPa arasında ise orta dayanımlı, 17 MPa'dan büyük ise Taşıyıcı HB olarak gruplandırılmaktadırlar. Orta dayanımlı hafif betonların birim ağırlıkları $1400-1600 \text{ kg/m}^3$ arasındadır (13, 25).

Perlit ve vermikülit ile yalıtım HB'u, bims ve volkanik cüruf lar ile hem taşıyıcı hem yalıtım HB'ları, genleştirilmiş kil, şist, cüruf ve arduvaz ile ise taşıyıcı HB'lar üretilmektedir (13).

Değişik standartlara göre HB'larda dayanım ve birim ağırlık sınırları Çizelge 2.2.'de görülmektedir.

Çizelge 2.2. Çeşitli standartlara göre HB ağırlık ve dayanım sınırları

Standart	En Küçük 28 Günlük Basınç Dayanımı (MPa)	En Büyük Kuru Birim Ağırlık (kg/m^3)
ASTM C 330	17	1850
ACI 213 R-79	17	1900
DIN 1045	15	2000
TS 2511	16	1900

Üretim yöntemine göre; kumsuz (ince agregasız), havalı (gaz-köpük) ve hafif agregalı beton olmak üzere üç sınıfa ayrılabilir.

Kumsuz (ince agregasız) beton: İnce agrega içermeyen HB, iri agreganın, çimento ve su ile karıştırılması sonucu elde edilir. Agregası normal veya hafif olabilir ve tek büyüklükteki tanelerin baskın olması sağlanmalıdır. Gerçekten agrega taneleri birbirine değme noktalarında, saf çimento hamuru ile tutturulmuştur (7,10).

Gaz - köpük beton: Çimento, kireç, öğütülmüş kuvarsit karışımının alüminyum metal tozları katılarak gözeneklendirilmesi yolu ile üretilir. Birim ağırlıkta azalma, çimento ve kirecin alkalileri ile alüminyum tozu arasında oluşan kimyasal tepkime sonucunda ortaya çıkan hidrojen gazının, beton yapısını (pasta gibi) kabartması ile sağlanır. Gazbeton teknik özelliklerinin,

iyileştirilmesi amacı ile yüksek basınçta buhar kürüne (otoklav gibi) tutulduktan sonra piyasaya sürülür (7, 10, 19).

2.1.3. Hafif agregalı beton

Betonda agreganın bir bölümü veya tümünün doğal veya yapay, birim ağırlığı düşük hafif agreg ve normal agregadan meydana getirilmesi ile elde edilir. Agreg a karışımında hafif agreg miktarının artırılmasıyla, birim ağırlığı daha düşük olan betonlar elde edilmektedir (7,10).

Hüsem ve Durmuş (5) yaptıkları çalışmada, Doğu Karadeniz Bölgesi doğal hafif agregalarından biriyle üretilen taşıyıcı HB-donatı aderansı ile geleneksel beton-donatı aderansını karşılaştırmalı olarak incelemiştir. Üretilen betonlarda, taşıyıcı HB-donatı aderansı, düz yüzeyli donatılarda, geleneksel beton-donatı aderansından ortalama olarak %35 daha büyüktür. Ancak bu sonucun bu çalışmaya konu olan özel petrografik yapıya sahip hafif ve geleneksel agregalarla üretilen betonlar ve bu betonlar üzerinde gerçekleştirilen deney koşullarına ait olduğunu, bu nedenle bu sonuçları genellemeden önce, nervürlü donatı gibi daha değişik geometrik ve mekanik özelliklere sahip donatılarla da yapılması gerektiğini belirtmektedirler.

“Doğal hafif agregalarla yapılan bir çalışmada; % 15 SD katkısı ile birim ağırlığı 2000 kg/m^3 , basınç dayanımı yaklaşık 50 MPa olan HB’lar üretilmiştir” (10).

“Taşıyıcı hafif agregalı betonların çimento miktarını artırarak veya bir miktar normal agreg (genellikle ince agreg) kullanarak dayanımlarını artırmak mümkündür. Taşıyıcı HB’ların, yalıtım betonlarına göre, birim ağırlıkları daha yüksek, ısı yalıtım özellikleri ise daha düşük olur” (12).

“HB, ısı izolasyonu niteliği yönünden aranan bir malzemedir. Doğal ve özellikle yapay hafif agregalarla üretilen HB’lar, kimyasal ve mineral katkı maddelerinin geliştirilmesi sonucunda yüksek dayanımlı taşıyıcı betonlar olarak da kullanılmaya başlanılmıştır. Bunların elde edilmesi için yüksek dayanımlı hafif agregalardan yararlanmak zorunlu bir koşuldur. Bir araştırmada, hafif beton yapı elamanı üretmek için Karaman-Madenşehir

ponza taşı agregası ile Soma B termik santrali uçucu külü kullanılmıştır. Karışıma giren çimento miktarı ağırlıkça (%) olarak 0, 10, 20, 30 ve 40 oranlarında azaltılarak çimento yerine uçucu kül ilave edilmiştir. Deney sonuçlarına göre karışımlardan en uygun olanı %10 uçucu küllü hafif beton karışımı olmuştur.” (27).

Genellikle, HB'un NB'dan; % 20-40 daha hafif olması, yapının ölü yüklerini azaltabilir, temel maliyetini düşürebilir, beton ve donatı tüketimini azaltabilir. Taşıyıcı HB, daha düşük ısı iletkenliği ve termal genleşme katsayısı nedeni ile yangına NB'dan daha iyi bir direnç gösterir (28). Gürültülü büyük şehir alanlarında, çevresel etkilerin önemli olduğu soğuk iklimli ülkelerde HB'un kullanımı, kolayca benimsenir. Ancak normal yoğun betonlarla aynı basınç dayanımını sağlayabilmek için yaklaşık; 2/3 daha fazla çimento gerekebilir. Ayrıca, HB'lar, NB'ların iki katı su emme değerlerine sahiptir. Fakat, mutlaka, daha yüksek su emme oranı, kesinlikle daha yüksek geçirgenlik (permeability) değerlerine işaret etmez. Çünkü, bu özellik, temel olarak, çimento pastasının kalitesine bağlıdır. HB'larda, yorulma davranışının, NB için elde edilen davranışa benzer olduğu da belirtilmektedir (29).

“Bugün dünyada en yaygın olarak kullanılan hafif agrega genleştirilmiş kil ve genleştirilmiş şist'lerdir. Bu suni agregalar, kuru olarak öğütülen kilin ve şist'in nemlendirme, şekil verme, sınıflandırma genleştirme ve pişirme işlemlerinden sonra elde edilirler. Bu nedenle pahalıdırlar. Birçok ülkede birkaç tane agrega üreticisinin bulunması ulaşım mesafesinin artmasına sebep olmakta buna karşılık tabii agrega her yerde kolaylıkla temin edilmektedir. Bu tür suni agrega ile yapılmış HB'un maliyeti, NB'un 2-4 katıdır.” (30).

1680 kg/m³ birim ağırlığa sahip taşıyıcı HB'un, 2320 kg/m³ birim ağırlığındaki daha ağır NB'un yerine kullanımından dolayı Chicago'daki Water Tower Place (WTP) binasının temelini, kaya zemin yatağına oturmamasına rağmen bina, 74 kat olarak inşa edilmiştir. Burada, temel kesonlarının sert zemine sadece 24,4 m indiği belirtilmektedir. Döşeme ölü yükleri, 1/3'den daha fazla azalmaktadır. Bu belirgin özelliğin ölçülerini, WTP'in hemen kuzeyindeki, John Hancock Building ile elde edilen deneyim göstermektedir. HB kullanılmaması durumunda, sert kaya yatağına ulaşmak için 36,6 m, ve yatak içinde de 1,5-1,8 m daha derine inmek gerektiği düşünüldüğünde,

sağlanan tasarrufun büyüklüğü ortaya çıkmaktadır. Yüksekliği; 265 m 'ye ulaşan o zaman, dünyanın en yüksek betonarme yapısı rekorunu kırmıştır. Bu hafiflikle birlikte, taşıyıcı HB 'ların daha düşük ısı iletkenlik katsayıları nedeni ile NB'a göre daha yüksek yangın direncine sahiptirler. Daha düşük ısı genleşme katsayıları ve agreganın öz yangın direnci, 1100 °C 'nin üstündeki sıcaklıklara dayanmasına izin verir. Düşük iletkenlik, ısıya maruz kalan elemanların, sabit bir sıcaklık durumuna ulaşması için, zaman gereksinimini uzatır ve bu direnç, geçici şartlar altında iç sıcaklık değişimlerini azaltır. Böyle bir geciktirme, gündüz-gece nedeni ile ısınma-soğuma etkilerini en aza indirir. Yüksek yapılarda, kaplamasız HB kolonlar için düşük ısı genleşme katsayıları, hacim değişimlerinde ve onlarla birlikte meydana gelen gerilmelerde bir azalma anlamına gelmektedir (31).

Topçu (32) ve Al-Khaiat and Haque'a (33) göre, taşıyıcı HB'ların daha yüksek dayanım / ağırlık oranı, daha iyi çekme deformasyon kapasiteleri, daha düşük ısı genleşme katsayısı, daha yüksek ısı ve ses izolasyon özelliklerini, hafif agregaların sahip oldukları, hava boşlukları nedeni ile sağlarlar. Topçu'ya göre hafif agregalar kullanılarak üretilen betonlarda, kiriş, kolon, döşeme ve temellerde kesitlerde küçülme ve bu nedenle ölü yükte azalma meydana gelmektedir. Böylece, donatı çeliği tüketimi de azalmaktadır (32).

Gül, vd. (30) yaptıkları çalışmada dayanımı artırıp taşıyıcı HB elde etmek için hafif agregalar ile normal agregayı değişik oranlarda birbirlerine karıştırarak optimum agregalar miktarı ile sabit dozajda üç farklı çökmeye sahip karışım üzerinde araştırmalar yapmışlardır. % 75 normal, % 25 hafif agregalı karışımlarda da çimento dozajının etkisini araştırmışlardır. Sonuç olarak, elde edilen betonlarda, hafif agregalar kullanımına bağlı olarak birim ağırlıkta bir azalma ile birlikte basınç dayanımının da azaldığını belirtmişlerdir.

Hammer (34), hafif agreganın su içeriğinin silis dumanı (SD) içeren yüksek mukavemetli betonun mukavemet ve hacim değişikliği özelliklerine etkisini incelemiştir. Genleştirilmiş kil hafif agregasının betonda başlangıçta emdiği

su miktarı betonun mukavemet kazanmasını, elastisite modülünü ve hacim değiştirme özelliklerini etkilemektedir.

Hossain (35), katkılı çimento üretiminde volkanik kül (VA) ve bims tozu (VPP), kullanımının uygunluğunu değerlendirmek için yaptığı çalışmada, VA ve VPP'nin % 0-50 arasında kullanarak, taze ve sertleşmiş PÇ pastaları üzerinde deneyler yapmıştır. Sonuçlara göre, volkanik küllü ve bims agregalı karışımların, UK'lü çimentolar (UKÇ) ile karşılaştırılabilir nitelikte olduklarını belirtmektedir. VA katkılı PÇ ve VPP katkılı PÇ'nun, katkının % 20 oranlarında kullanılması halinde daha yüksek priz süresi ve düşük hidratasyon ısıları verdiklerini belirtmektedir. Karışımdaki VA ve VPP içeriğinin artışı ile çimentonun azalmasından dolayı, basınç dayanımında bir azalma olmaktadır (35). Böylece VA ve VPP puzalonik davranışı, katkılı çimentodaki, çimentonun yerine kullanıldıklarında dayanımı azaltmasına rağmen uzun dönem dayanıklılığını (durability) geliştirmeye katkıda bulunur (36). Başka kaynaklarda, VPP ve VA katkılı çimento ile üretilen betonların uzun süreli dayanıklılığa faydalı etkisi rapor edilmektedir (37, 38). Çalışmanın sonuçlarına göre, VA ve VPP ~%20 oranlarında kullanılması ile üretilen çimento, UKÇ ile benzer özellikler sergilemektedir. Ayrıca elde edilen, yeni katkılı çimento ile üretilen, kütle beton inşaatlarında; hidratasyon ısısının daha düşük olmasını ve daha uzun priz tamamlama süresini sağlayacağı belirtilmiştir.

Hossain (39), yaptığı araştırmada, volkanik bimsin (VP), HB üretiminde, iri agrega olarak ve (volkanik bims tozunun) çimento ile yer değiştirilerek, kullanımının uygunluğu ile ilgili sonuçlar rapor edilmiştir. Deneyler, çimentoda % 0-25 arasında çimento ağırlığınca ve betonda hacimce, iri agreganın % 0-100 oranlarında, yer değiştirilmesi ile yürütülmüştür. VP betonlarının özellikleri, işlenebilirlik, dayanım, kuruma büzülmesi, yüzey su emmesi ve su geçirgenliği deneyleri ile geniş kapsamlı olarak değerlendirmiştir. VPC'nin yeterli dayanıma ve taşıyıcı HB gibi kabul edilecek uygun yoğunluğa sahip olduğu vurgulanmıştır. Bununla beraber, kontrol betonu ile

karşılaştırıldığında, daha düşük elastiklik modülüne, daha fazla geçirgenlik ve ilk yüzey su emme değerlerine sahip olduğu görülmüştür. Elastisite modülü ise %100 VP'lı betonlardan, her iki karışım için yaklaşık aynı, ancak kontrol betonundan % 42 daha azdır. Silindir ve küp basınç dayanımları, % 10 VP betonlarda kontrol betonlarından yaklaşık; % 40-45 daha düşüktür. Su emme değeri % 100 VP agregalı betonlarda % 35 daha yüksektir.

Yaşar et al. (40), bazaltik bims ve UK kullanarak ürettikleri taşıyıcı HB'lar üzerinde, taze halde, yoğunluk, işlenebilirlik, sertleşmiş halde iken, basınç ve eğilme dayanımı özelliklerini araştırmışlardır. Kullanılan hafif agreganın kuru birim ağırlığı; 1518 kg/m^3 , basınç dayanımı; 28,3 MPa ve elastiklik modülü, 11,3 GPa'dır. Laboratuvarda elde edilen basınç ve eğilme dayanımı deney sonuçlarına göre; taşıyıcı HB, bazaltik bims kullanılarak üretilebilir.

Kılıç et al. (41), mineral katkılı ve katkısız taşıyıcı yüksek dayanımlı HB'ların, bazaltik bims (skorya) kullanılarak üretilmesi ile elde edilen numunelerde; basınç, eğilme dayanımı ve taze betonda, işlenebilirlik özelliklerini belirlemişlerdir. Kontrol HB karışımlarının, %20 oranında UK'ün, çimento ile yer değiştirilmesi ile özellikleri geliştirilmiştir. SD katkılı numuneler, çimentonun % 10'u yerine SD kullanarak ve üçlü HB karışımlarını % 20 UK ve % 10 SD katkılı olarak üretmişlerdir. Aynı zamanda karşılaştırma amaçlı iki NB karışımı da üretilmiştir. Kontrol hafif skorya betonun, karışım oranları, normal PÇ ve skorya, sırası ile; 1/2,5 (ağırlıkça) oranlarında kullanılarak üretilmiştir. Araştırmacılara göre, bütün yaşlarda, % 10 SD katkılı HB'un (M3), kontrol HB'undan (M1), UK katkılı HB'dan (M2) ve üçlü karışımdan üretilen (M4) HB'dan daha yüksek basınç dayanımına sahip olduğunu belirtmişlerdir. M1 ve M2 betonlarının 7 gün ve diğer yaşlarda; 0,55, s/b oranına sahip NB'a benzemektedir. Ancak, bütün yaşlarda, diğer bütün numunelerin basınç dayanımlarının, 0,45 s/b oranına sahip NB'un basınç dayanımından düşük olduğunu da açıklamaktadırlar.

Hüsem'in (42) yaptığı araştırmada, normal ve HB'un mekanik özelliklerine,

agrega – harç (H) ve agrega-Çimento Pastası (ÇP) arasındaki aderans dayanımının etkilerini araştırmıştır. Sonuçlara göre, NA'lı karışımın eğilme dayanımı, HA'lı karışımlardan % 18; basınç dayanımı da % 58 daha fazladır. HA-ÇP aderans dayanımı, NA-ÇP'ndakinden 2,5 kat büyüktür. Araştırmacı, buna sebep olarak; HA yüzeyindeki boşlukların, NA'ya göre daha fazla olması ve bu boşlukların içine ÇP'nın daha kolay penetre olabildiğini göstermektedir. Diğer taraftan, HA-H aderansı, NA-H aderans dayanımından % 38 daha düşüktür. HA-H aderansı dayanımı, HA-ÇP'ninkinden % 20 daha düşüktür. NA –H aderans dayanımı, NA-ÇP'ninkinden % 64 daha düşüktür.

2.2. Silis Dumanı (SD) ve Beton Özelliklerine Etkisi

Literatürde, SD'nın betonda kullanımı ile ilgili birçok yayın bulunmakla birlikte, SD'nın betona etki mekanizması ve optimum miktarının ne olacağı konuları tam olarak belirgin değildir. Bhanja and Sengupta (43), betonda SD kullanımının, SD'nı ayrı bir bileşen olarak değerlendirilmesi ve optimum SD miktarları üzerine bir çalışma yapmışlardır. Bununla ilgili olarak, su/bağlayıcı (s/b) oranını; 0,26-0,42 ve SD / bağlayıcı oranını; 0,0 - 0,3 olarak birçok deney yapılmıştır. Sonuçta, 28 günlük dayanım için optimum ikame oranının sabit olmadığı, s/b oranına göre değiştiği ve bu ikame oranının % 15-25 arasında olduğu bulunmuştur. SD'nın, puzolanik ve fiziksel özelliklerini miktar olarak değerlendirince, bu çalışmada seçilen değerlerin betonun dayanımına katkıda bulunduğu açıklanmıştır.

Lindgard et al., 6 değişik agrega kullandıkları bir çalışmada; yüksek mukavemetli SD betonunda, agrega mukavemetinin etkisinin, sınırlı kaldığını ileri sürmektedirler. Öte yandan yüksek mukavemetli, sert ve rijid agrega kullanıldığında ara yüzde gerilme yığılmaları oluşmaktadır (44).

“Gonçalves, bağlayıcı miktarı 200, 300 ve 400 kg/m³ olan betonlarda %50'ye kadar çimentonun SD ile yer değiştirdiğinde sabit işlenebilirlik için gerekli su miktarının arttığını gözlemiştir” (44).

“Alfes, %20 SD içeren yüksek mukavemetli betonlarda statik elastisite modülünün yaklaşık 85 GPa değerine ulaştığını gözlemlemiştir” (44).

Halilov (45), yaptığı araştırmada, SD ile süper akışkanlaştırıcı (SA) bir katkının lifli beton özelliklerine etkisini araştırmıştır. En yüksek basınç dayanımına; % 1,5 SA katkılı ve %10 SD ikameli betonlarda ulaşıldığı belirtilmiştir.

Çelik vd. (46) yaptıkları araştırmada, çimento ağırlığının % 5-10-15'i oranlarında SD ile yer değiştirilmesi sureti ile elde edilen çimento pastalarının priz sürelerini incelemişlerdir. Sonuçta, % 5 SD ikame oranında priz başlama ve bitiş sürelerinin etkilenmediği, % 10-15 oranlarında ise belirgin olarak geciktiği belirtilmiştir.

2.3. Donatı – Beton Aderansı

“Çelik donatı ve betondan oluşan malzemenin, betonarme olabilmesi için bu iki malzemenin birbirleri ile kaynaşmış olarak birlikte çalışmaları gerekir. Başka bir deyişle donatı etrafındaki beton kütleyle o şekilde kenetlenmelidir ki; donatının çevresindeki betonun deformasyonu farklı olmasın. Beton ve donatının birlikte çalışmasını sağlayan bu olay “kenetlenme” veya “aderans” olarak tanımlanmaktadır. İki malzeme arasında oluşan kenetlenme gerilmeleri, donatının betondan sıyrılmasını önler. Kenetlenme betonarme davranışının temel koşuludur” (3, 47).

“Betonarme, bilindiği gibi kendisini oluşturan malzemelerden; beton ve çeliğin (donatının) aralarında sürekli bir kuvvet aktarımı sağlanacak şekilde birlikte çalışması amacına uygun ve kompozit bir yapı malzemesi olarak kullanılması ile mümkündür. Burada kuvvet aktarımı, donatıların etraflarını sarmalayan betonun, donatı eksenine paralel olarak kaymasına engel olmaya çalışan bağ kuvvetleri tarafından sağlanmaktadır. Aderans adı verilen bu olgu, betonarmenin varlığının direk olarak bağlı olduğu bir konu olmanın yanında, betonun çatlamasını belirleyen, betonun çatlamaya başlayıp, devam ettiği süreçte birlikte çalışmayı sağlayan bir etken olması nedeniyle sınır durum ve kırılma gücünde, temel faktörlerden biri olarak ayrı bir öneme sahiptir” (48).

“İki tür aderans söz konusu olmaktadır. Beton içindeki donatı çubuğunun çekme veya basınç tesiri oluşturan yük durumunda betondan sıyrılmasını önleyen aderansa ankraj aderansı veya dış aderans adı verilmektedir.

Donatı, sıyrılmaya maruz olmamakla birlikte çekme veya eğilmeye çalışan betonarme elemanlardaki beton ile donatının birlikte çalışmasını sağlayan ve elemanın, çatlama durumunu belirleyen aderans ise iç aderans olarak adlandırılmaktadır. Aderans olayının nedenleri olarak ise şu üç ana sebep gösterilmektedir” (48):

- 1) Kimyasal adezyon safhasını tanımlayan ve donatı ile beton arasında yapışmaya neden olan moleküler ve kapiler bağ kuvvetleri.
- 2) Donatı ile beton arasındaki sürtünme kuvveti.
- 3) Eğer yüzeyinde, nervürler bulunuyorsa, bu nervürler ile beton dişler arasında oluşan diş kuvvetleri ve kenetlenme.”

2.3.1. Donatı - beton aderansı ile ilgili araştırmalar

Cengizkan ve Ersoy (9) yaptıkları çalışmada; Nevşehir'in belli bir bölgesine ait bims agregası kullanılarak üretilen BB'ların, deney sonuçlarında, 0,25 mm'lik sıyrılmaya denk düşen donatı gerilmesinin, bütün çaplar ve donatı tipleri için 200 MPa olduğu belirtilmekte ve bu sonucun, aderans davranışı bakımından BB'da, düz ve nervürlü donatıların kullanımı arasında bir farkın olmadığı sonucuna varılmaktadır. Aynı çalışmada, BB ve NB deney sonuçlarının karşılaştırılması ile düz donatıların aderans davranışlarının, biraz yüksek olmakla beraber birbirlerine yakın sonuçlar verdiği açıklanmaktadır. Ayrıca nervürlü donatılardan beklenen üstün aderans dayanımı elde edilemediği belirtilmekle beraber, bunun, agrega dayanımından kaynaklandığı vurgulanmaktadır.

HB'larda yapılan donatı-beton aderansı özelliklerine ilişkin araştırmalarda; bu betonların yeterli saha performansını gösterdikleri, ancak aynı basınç dayanımı için hafif agregalı betonların, yapışma dayanımı (bond strength), düz ve yuvarlak donatıların kullanıldığı durumlarda, çakıl-kum betonlarının dayanımlarından düşük olduğu belirtilmiştir. Bununla birlikte, nervürlü donatılar için, kenetlenme dayanımı genellikle normal yoğunluklu betonlarla aynıdır (29).

Karakoç (48), yaptığı araştırma çalışmasında, betonarme bir yapıda elemanların beton ile nervürlü donatı arasında ve çoğu kez yarılma çatlakları ile birlikte oluşan, mekanik etkileşim olayını incelemiştir. Böylece yarılma çatlaklarını (splitting cracks) ve enine basıncın etkisini inceleyerek konuyu araştırmıştır. Bununla birlikte mekanik etkileşim ve agrega kenetlenmesi konularını da araştırmıştır.

Mineral katkıların kullanıldığı, yüksek dayanımlı betonların (YDB) aderans davranışlarını, Yerlici vd. yaptıkları çalışmada ele almışlardır. Araştırma, nervürlü BÇ III-a çeliği ile yüksek ve normal dayanımlı betondan üretilmiş aksel ve dışmerkezli olarak donatılmış elemanlar üzerinde gerçekleştirilmiştir. Bu deneylerde kenetlenme boyu, donatı çapı, beton örtü kalınlığı ve etriye miktarı değişkenler olarak alınıp, uygulanan kuvvet ile elemanların çekilen ve serbest uçlarındaki donatı sıyrılmaları ölçülmüştür. Çalışmalarında, aderans gerilmesini, elemanın yarılmasına neden olan yük değerini kullanarak belirlemişlerdir. Çalışmanın sonuçlarına göre; YDB'ların gerekli kenetlenme boylarının NB'larinkinden daha kısa, oluşacak çatlak genişliklerinin de daha küçük olduğunu belirlemişlerdir (49).

Yerlici ve Özturan'ın (50) yaptıkları YDB elemanlarda aderans dayanımı adlı çalışmada, donatı çapı, basınç dayanımı, beton örtü kalınlığı ve gövde sarma donatısı miktarının, YDB'lardaki aderans dayanımı ve gerekli minimum kenetlenme boyu üstündeki etkisini araştırmışlardır. Çalışmanın kapsamı içinde, ürettikleri, tek donatılı ve çift donatılı beton elemanlar üzerinde, dışmerkezli, tek yüklemeli çekme-çıkarma aderans deneyi yapmışlardır. Beton basınç dayanımı, beton örtü kalınlığı ve gövde donatısı miktarındaki artışların aderans dayanımını arttırdığı, donatı çapındaki artışın ise düşürdüğünü gözlemlemişlerdir. Ayrıca YDB elemanlarda aderans kırılmasının ani ve gevrek olduğunu belirtmişlerdir.

"Hafif agregalı betonlarda SD katkı miktarına bağlı olarak donatı aderansını 3-5 kat artırabilmektedir" (51).

SD terlemeyi azalttığı, çimento hamurunu daha sıkı ve kuvvetli yaptığı için betonun donatı ile olan aderansını arttırmaktadır. Bu olumlu etki % 20'nin üzerindeki katkı oranları ile daha da belirgindir (54, 52).

SD gibi çok ince taneli bir puzolan, PÇ'nun % 10'u yerine kullanıldığında, agrega-harç arayüzeyinin aderansı % 100'den fazla artar (53).

Cox et al. (54), yaptıkları araştırmada, A.B.D. Deniz Kuvvetleri'nin halen, deniz kıyısı betonarme yapılarında, yüzer yapılarda, uygulamakta olduğu önerilmeli veya donatılı HB'larda, geliştirme amaçlı, lif takviyeli polimerlerin (FRP's) uygulamalarını incelemiştir. HB'larda 4 karbon lif takviyeli polimerin aderans dayanımına etkisini birleşik aderans deneyi ile belirlemiştir. Çalışmada, genellikle tasarımla ilgili olan; kenetlenme boyları ve aderans gelişimi araştırılmıştır. Deneylerde, hem radyal hem de teğet tepki çiftleri sağlamak üzere Malvar (1995) tarafından geliştirilen birleşik deney modeli kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan HB'ların üretiminde ince ve iri agrega olarak, genişletilmiş şeyl agregası kullanılmışlardır(54).

2.3.2. Aderansı etkileyen faktörler

"Bu faktörler :

1) Donatı ile ilgili faktörler:

Çelik donatının çapı, akma veya elastiklik sınırı, varsa özel profil şekli, yüzeyinin niteliği.

2) Betonla ilgili faktörler:

Betonun çekme ve basınç dayanımları, bileşimi, yaşı, sıkıştırılması, korunması.

3) Betonarme kesitin geometrik özellikleri ile ilgili faktörler:

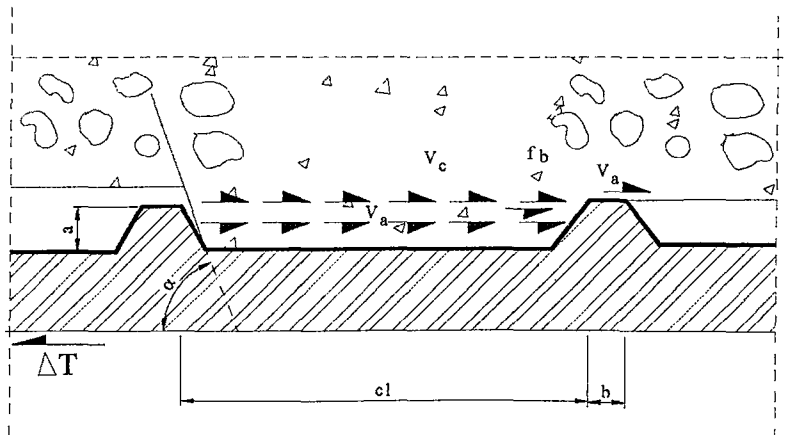
Kenetlenme boyu, donatıyı örten betonun kalınlığı (pas payı), donatının beton dökümü sırasındaki konum doğrultusu, beton üst yüzeyine göre

düzeyi, boyuna donatının kesit alanına veya çekme bölgesi alanına göre yüzdesi, betonarme kesitin şekil ve boyutları ile betonarme taşıyıcı sistemin türü, donatının kesitteki diğer donatılara göre konumu ve enine donatı.

4) Kesitin mekanik özellikleri ile ilgili faktörler:

- Donatıdaki çekme veya basınç gerilmelerinin büyüklüğü, çubuğu saran betonun çubuk eksenini doğrultusundaki ve bu eksene dik doğrultudaki gerilme durumları.
- Zamanla ilgili faktörler:
Gerilmelerin etki süresi ve yükleme hızı.
- Yorulma etkeni.
- Elektrokimyasal etken (48).

Ayrıca aderans ve aderans mekanizmalarını etkileyen faktörler arasında; donatı yüzeyinde radyal hidrostatik basınç gerilmeleri oluşturan, betondaki rötre ve betonun, dökülme yönünün, donatı çubuğuna göre durumu (örneğin, betonun akması (bleeding) ve çöküm yerleşmesi (settlement) olayları nedeniyle betonun dökümü, çekme kuvveti yönüne zıt bir yönde olduğu durumda; aderans dayanımı en yüksek olmaktadır) büyük öneme sahiptir. Diğer taraftan, agrega tane dağılımının, aderans olayına etkisi sınırlı olmaktadır; çünkü donatı yüzeyleri granülometrik özelliklerden bağımsız olarak daima en ince agregalarla temasa geçmektedir. Burada söz konusu edilen gerilmeler, donatının iki nervürü arasındaki bölge için Şekil 2.1'de gösterilmektedir" (48).



Şekil 2.1. Nervürlü donatı kullanılması durumunu karakterize eden gerilmeler

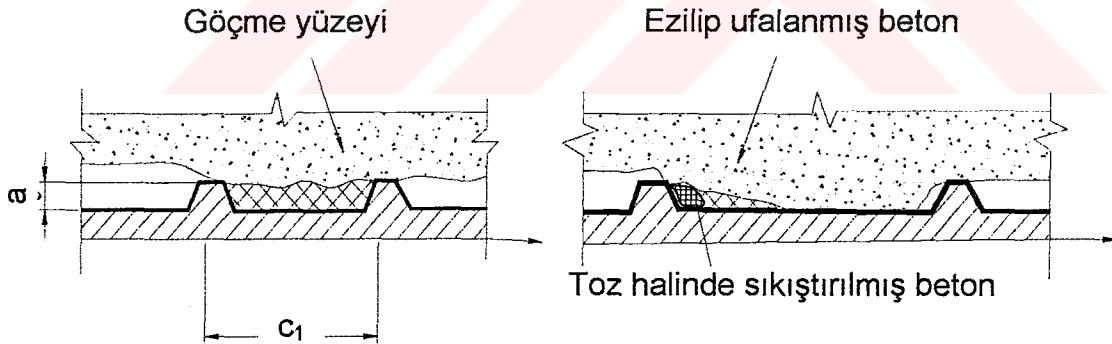
Aderans direncini etkileyen ve yukarıdaki şekilde gösterilmiş olan gerilmeler şunlardır:

1. Kimyasal adezyon nedeniyle donatı yüzeyinde oluşan v_a kayma gerilmesi,
2. İki nervür arasındaki silindirik beton yüzeyi üzerindeki v_c kayma gerilmesi,
3. Nervür yüzüne etkiyen f_b basınç gerilmesi.

Verilen geometrik özelliklere göre ve yatay denge koşulundan yararlanarak aşağıdaki bağıntı "Eş 2.1" elde edilmiştir (48);

$$v_c = \frac{a}{c_1} f_b \quad [2.1]$$

Rehm, aderans probleminin birçok yönlerinin a/c_1 geometrik parametresine göre ele alınabileceğini göstermiştir. Park ve Paulay, Rehm'in bulguları ışığında ve a/c_1 değerine göre aderans göçüşünü veren iki türlü mekanizma önermişlerdir (48). Bu iki farklı göçüş durumu a/c_1 parametresine bağlı olarak aşağıda verilmiştir. (Şekil 2.2.a-b).



a) $a/c_1 > 0,15$

b) $a/c_1 < 0,10$

Şekil 2.2. Aderansta göçüş mekanizmaları (48)

Görüleceği gibi Şekil 2.2.a'daki durum için aderans göçmesi, donatının, arasındaki parçalanmış beton ile birlikte sıyrılıp çıkması ile olmaktadır. Şekil 2.2.b'de ise parçalanıp ufalanan betonun, nervürünün önünde, daha büyük kayma değerlerinde yarılma çatlağına neden olabilecek bir "kama" oluşturduğu görülmektedir. Ayrıca, söz konusu bu kamanın üst yüzeyi boyunca sıyrılma olabileceğinden yarılma çatlağı oluşabilmesi için Şekil

2.1'de gösterilen α açısının 40° den büyük olması koşulunun sağlanması zorunludur (48).

2.3.3. Aderans dayanımı deneyleri

“Aderans ile ilgili olarak genellikle çekme- çıkarma ve kiriş deneyleri yapılmaktadır. Kullanımı daha az olan itip-çıkarma deneyleri de yapılmaktadır. “Teksas” ve “Belçika” deneyi olmak üzere iki tip halinde geliştirilen kiriş deneylerinin yanı sıra çekme-çıkarma deneylerinin de değişik uygulama teknikleri ile geliştirilmiş türleri vardır.

Kiriş deneyleri daha gerçekçi olmasına rağmen, bu deneylerin henüz giderilmemiş olan olumsuz nitelikleri vardır. Çekme-çıkarma deneyleri en yaygın bir şekilde uygulanmaktadır. Çekme-çıkarma deneylerinin yaygınlığının en önemli nedeni, deney düzeni bakımından kullanışı basit ve ekonomik olmasıdır” (48).

2.4. Yüksek Isının Betona Etkisi

Bazı özel yapılarda, beton, normal sıcaklığın üstünde bir ortam içinde bulunur. Örneğin, betonarmeden yapılmış bir fabrika bacasında, beton yaklaşık; 400°C 'lik bir sıcaklık ile temas halindedir. Sıcaklığın, mevsimlere göre büyük ölçüde değişmesi durumunda hiperstatik yapılar üzerinde meydana getirdiği etkilerin göz önünde bulundurulması gereklidir. Meydana gelen yangınlarda, beton, $600-900^\circ\text{C}$ 'ye kadar yükselebilen bir sıcaklık ile karşı karşıyadır (7).

“Bu konudaki ilk çalışmalar 1920'lerde Lea ve Stradling tarafından başlatılmış ve dönemin yayınlarında yüksek sıcaklıklarda betonun basınç mukavemetine etki eden faktörleri belirtmişlerdir. Muhtemelen, agregası ile çimento hamuru arasındaki termal uyumsuzluğun bozucu etkisini ilk olarak Lea ve Stradling tarafından ortaya konulmuştur. Küresel bir toprak parçasını çimento hamuru ile sarma temeline dayalı olarak yaptıkları elastik gerilme analizi sonucu betonun, 100°C civarında bozulacağını fakat bununla beraber 300°C ye kadar mukavemette artış olabileceğini belirtmişlerdir. Sonraki çalışmalarda, kullandıkları teorik modelin gerçek davranışı yansıtmadığı açıklanmıştır. Bunun sebebinin, ‘modelde ilk olarak 1950'lerde ortaya çıkarılan geçici termal sünme kısmının hesaba katılmaması’ olduğu belirtilmiştir. Geçici termal sünme, betonda belirgin olarak gerilmelerin yeniden bozulması eğiliminde olduğu için ilk defa ısıtılan yapılarda, elastik gerilme analizlerini uyumsuz hale getirmiştir. Lea ve Stradling ayrıca, kalsiyum hidroksitinin $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$ kirece

(CaO) dönüştüğünü ve soğutulduktan sonra kirecin rehidratasyonda genişlemesiyle, ısıtma süresinde, suyun, betonda ciddi zararlara yol açabileceğini belirtmişlerdir. Ayrıca soğutma süresince çatlak gelişimine ve agrega ile çimento hamuru arasında ayrışma olabileceğine dikkat çekmişler ve soğutma hızının etkisini ortaya koymuşlardır” (56).

“Lea ve Stradling'i takiben, yüksek sıcaklık uygulamalarında betonun en zayıf noktasının, kalsiyum hidroksit problemi olduğu anlaşılmıştır. Bu olay, sıradan uygulamalarda PÇ'nun, ateşe dayanıklılık gerektiren uygulamalarda da alüminli çimentonun kullanılmasına sebep olmuştur. Çünkü beton için problem teşkil eden kalsiyum hidroksit, alüminli çimentolarda hidratasyonun bir ürünü değildir. Bunlarla fırın kaplamaları gibi ateşe dayanıklı beton yapılabilmektedir” (56). Rostacy et al., yüksek sıcaklıklardaki reaksiyonların gözenek yapısında, su kaybını başlattığını ve sıcaklık artışının hidratasyon ürünlerinde bozunma ve CSH yapısının parçalanması ile sonuçlandığını ileri sürmüşlerdir. YFC'ü katkılı çimento, daha az serbest Ca(OH)_2 içermesinden dolayı, yüksek ısılarda yeniden hidratlaşma tehlikesini azaltır.” (57, 58). “Özellikle refraktör beton için puzolan malzemeler kullanılarak, serbest kireç problemi kısmen azaltılabilir” (59). Çimento dozajının düşük olduğu betonlarda yangının zararlı etkisi daha az görülür” (7, 60).

Kalsiyum hidroksitin ayrışması $350-400^\circ\text{C}$ 'nin altında gerçekleşmez. Daha yüksek sıcaklık etkilerinde serbest kirecin rehidratasyonuna bağlı olarak soğutmadan sonra problem ortaya çıkar” (56).

“Beton, birçok yapı malzemesine kıyasla yüksek sıcaklık ve yangın etkisine karşı daha dayanıklı bir malzemedir. Yüksek sıcaklığa maruz beton, belirli bir süre için önemli bir zarar görmez ve zehirli gaz veya duman çıkarmaz. Ayrıca betonarme yapılarda, termik iletkenlik katsayısının nispeten düşük olması sebebiyle, beton, donatıyı yüksek sıcaklıklara karşı korur. Fakat bu dayanıklılık sınırlı süreler ve belirli sıcaklık dereceleri için geçerlidir. Yalnız, beton olarak bakıldığında, yüksek sıcaklığın, dış yüzeylerde ayrışmaya, kabuk halinde dökülmeye neden olduğu görülmektedir” (60).

“Beton bir bütün olarak düşünüldüğünde, genellikle içindeki bileşenlerin (agrega ve çimento pastası) termal genişlemelerinin birbirinden farklı olduğu bilinir. Bu nedenle betonda sıcaklık değişimleri, içindeki bileşenlerde, birbirinden farklı hacim değişmelerine, çatlak oluşumuna ve betonun dayanıklılığının azalmasına sebep olur. Bu olay "betondaki bileşenlerin termal uyumsuzluğu" olarak bilinmektedir. Isıl deformasyonlar sonucunda mikro ve makro bileşenlerin sınır bölgelerindeki değişimler betonun yapısında önemli hasarlara sebep olurlar” (66).

“Betonda agreganın etrafında çimento hamurunun kütesinden farklı özellikleri olan bir bağlantı tabakası oluşur. Yüksek sıcaklığa karşı, agreganın

ve çimentonun ayrı ayrı dayanıklı olmaları ve oda sıcaklığında iyi bağlantı yapmaları yeterli değildir. Bu bağlantının da yüksek sıcaklık etkisinde iyi olması gerekir. Burada agrega ve çimentonun kimyasal yapısı kadar agreganın porozitesi, yüzey özellikleri, karışımın S/Ç oranı gibi parametreler etkili olmaktadır. Araştırmalar, ısınma sırasında kimyasal olaylar veya termal uyumsuzluk sonucu, agrega ve onu çevreleyen matris, bütünüyle zarar görmese de arayüz elemanında, mikro çatlaklar meydana geldiğini ve betonun dayanımında önemli düşüş olduğunu göstermiştir" (62).

"Isıtma süresince çatlamlar, parçalanmalar ve soğutma esnasındaki dağılmalar, yangın esnasında betonda gözlenen yaygın davranışlardır. Lin et al (63), betonda kusurlu davranışlara sebep olan faktörleri şu şekilde sıralamaktadırlar:

- Termal değişimlerin sebep olduğu termal gerilmeler,
- Çimento hamuru içindeki kalsiyum hidroksit [$\text{Ca}(\text{OH})_2$] in ayrışması,
- Kireçtaşı agregalarının kireçlenmesi,
- Yüksek sıcaklıklarda kuvars agregalarının faz değişimi."

Bu genişlemenin, kuvarslı agrega içeren betonda, özellikle 573°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda meydana gelen şiddetli çatlak oluşumundan sorumlu olduğu düşünülür. Kalkerli ve dolomitli agregalarda ise karbonatlar, 800-900°C'lerde CaO veya MgO 'ya dönüşür. Sıcaklık yükseldikçe, kalker ve dolomit genişir, CO_2 'in ayrışması ve CaO 'in veya MgO 'in meydana gelmesi ile büzülme başlar. Kalker, 900°C sıcaklığa kadar yavaş biçimde genişir ancak bu sıcaklık civarında kalkerin parçalanması ve CO_2 çıkışı meydana gelir (60, 61).

Genellikle silis içermeyen agregalarla, örneğin kalker kökenli, püskürük kökenli agregalarla üretilen betonların yangına karşı davranışı daha iyidir. Özellikle, dolomit esaslı kalkerleri, agrega olarak kullanmakla, yangına karşı daha dayanıklı betonlar elde edilir. Bunun nedeni; karbonatın kalsinasyonunda (olayın endotermik olması) ısının emilmesinin, sıcaklık artışını geciktirmesidir (7, 13, 60, 61).

"Yüksek sıcaklık etkisinin araştırıldığı çalışmalarda; 400°C ye kadar yüksek sıcaklık etkilerinden sonra soğutulan betonların, ısıtılmamış tanık numunelere göre nispi bir hasar işareti göstermediği fikri ortaya çıkmıştır. Örneğin Abrams

427°C ve daha düşük sıcaklıklara ısıtılan karbon agrega betonlarının, petrografik incelemesini yapmış ve sonuçların ısıtılmamış betonlara benzer olduğunu belirtmiştir. Lankard da çakıl betonları için 260°C ye kadar numuneleri ısıtarak yavaşça oda sıcaklığına kadar soğutmuş ve çatlak numunelerin, ısıtılmamış numunelerden, malzeme olarak farklı olmadığını ifade etmiştir” (56).

Abrams, (13) yaklaşık 430 °C'nin üstündeki sıcaklıklarda, silis agregalı betonların, hafif agrega ile yapılan betonlara oranla, dayanımlarının büyük bir kısmını kaybettiklerini belirtmiştir. Ancak, sıcaklık bazen, bir kez 800°C'ye ulaşmaktadır. Bu durumda, hafif ve NB arasındaki dayanım kaybındaki fark ortadan kalkmaktadır. Bütün agregalar için, dayanım kaybı oranı orijinal dayanım seviyesinden bağımsızdır. Ancak ısınma ve yükleme sıklığı kalan dayanıma etkir. Özellikle yüksüz ısıtılıp ardından soğutulan betonlar, daha düşük dayanım gösterirken, yük altında ısıtılan betonlar, dayanımlarının daha büyük bir oranını korurlar.

“Betonun direnç göstermesinde, içerdiği bileşenlerin bazı özellikleri (termal genleşme katsayısı, ısı iletkenlik vs.) etkin rol oynamaktadır. Betonların özgül ısısı, başka bir deyimle cismin sıcaklığını artırmak için sarf edilmesi gereken ısı miktarı, 200-280 k.kalori/kg/°C arasında değişir. Betonun, su içeriğinin artması, özgül ısının artmasına neden olur. Rutubet içeriğinin fazla olması da yangına karşı dayanıklılığı önemli ölçüde azaltır. Betonun, birim ağırlığının azalması halinde ise bu özellik bir artış göstermektedir” (7).

“Betonun yüksek sıcaklıklara karşı direncinde, sıcaklığın derecesi, artış hızı ve etki süresi de rol oynar. Bilindiği gibi betonda sıcaklık, 100°C iken; serbest, 200°C civarında iken; kristal suyu buharlaşmaya başlar” (51).

Buharın başlangıçtaki tipik etkisi basınçtır ve çekme gerilmelerini etkiler. Basıncın değeri; ısınmaya, sıvının viskozitesine, boşluklarda buharlaşabilecek durumdaki suyun miktarına bağlıdır. Boşluklardaki su, C-S-H tabakaları arasındaki kohezif (van der Waals) kuvvetin azalması, jelin yüzey enerjisinin azalması ve kolay ayrılabilen suyun birikmesi ile artar. Bir çalışmada; çimento hamurunun diferansiyel termal analizinden (DTA) 65-80°C ve 90-105°C'lerde olmak üzere iki tepe nokta görülmüştür. Bunlardan

birincisi endotermiktir ve adsorbe edilen suyun kaybını, ikincisi ise tabakalar arasındaki suyun kaybını gösterir (59).

Betondaki boşluk oranı arttıkça ısı iletkenlik katsayısı azalmakta dolayısıyla da yangın dayanıklılığı artmaktadır. Yapı elemanının kesit boyutlarının büyümesi, yangın dayanımını artırmaktadır. Diğer bir deyişle; kütlesi büyük elemanlar, yangından daha az zarar görmektedir. Araştırmalar betondaki nem oranının artmasının 100°C 'a kadar ısı iletkenlik katsayısını artırdığını, daha yüksek sıcaklıklarda ise giderek azaldığını göstermektedir (54, 58).

“Genel olarak beton, kısa süren (birkaç saat) ve sıcaklık derecesi 600°C 'yi geçmeyen yangınlarda donatılardan daha iyi bir dayanıklılık gösterir. 600°C 'de beton dayanımının yarısını kaybedebilir. Sıcaklık derecesinin 800°C 'ye çıktığı durumlarda, hidratların içinde bulundurdıkları suyu kaybetmeleri sonunda dayanımdaki azalma %80'e varabilir ki; bu da yapının yıkılmasına neden olur” (7).

“Çimento pastası, ısıtıldığı zaman, öncelikle normal genleşme niteliğinde bir genleşme gösterir; ancak bu arada hidratlar da içerdikleri suyu kaybederek yapıda büzülme meydana gelmesine sebep olurlar. Bu şekilde birbirine zıt etkileşim, betonda gerilim meydana getirir. Hidratlardan biri olan, kalsiyum hidroksit; $400-450^{\circ}\text{C}$ 'de suyunu kaybeder ve kalsiyum oksit haline geçer. Kalsiyumoksit ortamdaki su veya nem ile karşılaştığında tekrar hidrate olur; bu da sertleşmiş çimento pastasında, hacim genleşmesi oluşturarak, çatlak oluşumuna yol açabilir. Bu durum, % 44 oranında bir hacim artışına neden olur. Lin et al., kalsiyum silikat hidratların (C-S-H) 500°C ve daha üzerindeki sıcaklıklarda kısmi olarak buharlaştıkları ve yaptıkları SEM incelemelerinde; çimento hamuru ile agrega parçacıkları arasında çok önemli çatlaklar oluştuğu üzerinde durmuşlardır (63). Bir başka çalışmada ise (59) silikat hidrate elemanlarda (C-S-H) bağ kuvvetlerinin kopması ve kimyasal yapı değişikliğinin ise $600-700^{\circ}\text{C}$ 'lerde meydana geldiği belirtilmektedir.

Volkanik kökenli tuf, bims (pomza), köpüksü cüruf ve genleşmiş kil ürünleri gibi hafif agregalar ile yapılan betonlar, yüksek sıcaklıklarda hacim genleşmesi ve bozunma gibi durumlara karşı yüksek dirence sahiptirler. Termik iletkenlik katsayısı düşük beton, yani HB'lar (birim ağırlığı 1600 kg/m^3 'den küçük olanlar), NB'lara göre yangından daha az zarar görürler (7, 13, 60).

“HB’un, yüksek düzeydeki ısı tutucu özelliği yüksek ısıya dayanım değerini %30-50 oranında artırmaktadır. Düşük ısı iletkenlik değeri ile HB, betonarme donatısını, erken ve kritik ısınmalardan NB’a kıyasla daha iyi korur. Bununla beraber, HB yapılarda, ateşe karşı dayanım süresi; % 20-40 daha düşük ısısal genleşme göstermeleri nedeni ile daha uzun olmaktadır” (64).

“Yapılan bir başka araştırmada, hafif, yalıtkan betonların yangın dayanımları ile ilgili olarak; 500-1600 kg/m³’lük birim ağırlığa sahip betonların yangın dayanımı incelenmiş; numunelerin nem içeriği ve bağıl rutubet arasındaki ilişkiler belirtilmiştir. Deney programında boşluklu HB, perlit betonları, vermikülit betonları kullanılmıştır. Döşeme kalınlığı ile yangın dayanımı arasındaki ilişki; değişik birim ağırlığa sahip betonlar için incelenmiştir. En önemli sonuç olarak; birim ağırlıktaki artışın, her beton türü için yangın dayanımında azalmaya sebep olduğunu göstermişlerdir” (56).

“Zoldners ve Wilson’un, yaptıkları deneysel çalışmada genleşmiş şist ve cüruf agregaları ile iki grup beton karışımı hazırlamışlardır. Bu karışımlar 300°C-1000°C arasında sıcaklık etkilerine maruz bırakılmıştır. Bazı karışımlarda çimento yerine %25-40 arasındaki oranlarda UK, SD, şist külü gibi mikro filler malzeme kullanılarak bu malzemelerin beton davranışına etkisi incelenmiştir. Sonuçlara göre; farklı sıcaklık etkilerinde, tam HB’lar, yarı HB’lara göre daha iyi dayanım göstermişlerdir. PÇ yerine mikro filler malzeme kullanımı 500°C’ye kadar HB’un, ısıl dayanımını iyileştirmiştir. SD, basınç mukavemetinde % 20, eğilme mukavemetinde %10 artış sağlayarak en belirgin iyileştirmeye sebep olmuştur” (56).

Aköz vd. (59) yaptıkları çalışmada, yüksek sıcaklığın harcın fiziksel ve mekanik özelliklerine etkilerini araştırmak için, normal ve % 10 SD katkılı harçları, 100°, 200°, 300°, 600°, 900°, 1200 °C’ye kadar yüksüz olarak ısıtmışlardır. Sıcaklık etkisinden sonra soğutma işlemi; havada yavaş, suda hızlı olmak üzere iki grupta gerçekleştirmişlerdir. Soğutulan numunelerde, elastisite modülü, eğilme ve basınç dayanımları, birim ağırlık, ağırlık kaybı, ağırlıkça su emme ve özgül ısı değerlerini belirlemişlerdir. Sonuçlara göre yüksek sıcaklık, normal ve SD katkılı harçlarda, fiziksel özellikler bakımından benzer etki göstermiştir. Mekanik özellikler bakımından SD katkılı harçlarda, 600 °C’den sonraki sıcaklıklarda dayanım kaybı, normal harçlardan daha fazla olmuştur. Suda soğutma, bütün sıcaklıklar için havada soğutmaya göre daha olumsuz sonuçlar vermiştir.

Cülfik ve Özturan'ın (55) çalışmasında, 250°C 'ye kadar olan sıcaklık artışlarında düşük ve yüksek S/Ç oranlarına sahip betonlarda SD kullanımının çimento hamuru agrega arayüzeyindeki iyileştirici etkisi ile betonun mekanik özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Sonuç olarak, normal dayanımlı beton numuneler üzerinde yapılan mekanik deneyler ve SEM analizlerine göre 250 °C'ye kadar olan sıcaklıklar normal dayanımlı betonlarda agrega ve çimento hamuru fazları arasında farklı termal özelliklerden kaynaklanan çatlaklar oluşturmakta ve bu da betonun mekanik özelliklerine olumsuz etkilemektedir. SEM incelemelerine göre betonda düşük S/Ç oranı ve SD kullanımının 250°C'ye kadar olan sıcaklıklarda agrega çimento hamuru arayüzeyinde çatlak oluşma riskini azalttığı belirtilmiştir. SD kullanımı, 250°C sıcaklığa kadar, yüksek dayanımlı beton numunelerinin mekanik özelliklerinin de normal dayanımlı numunelere göre daha iyi olmasını sağlamıştır.

"Son yıllarda süper ve hiper akışkanlaştırıcı katkıların kullanımı ile çok yüksek dayanımlı ve dayanıklılık özellikleri çok iyi betonlar üretilmektedir. Bu şekilde üretilen betonların 250°C 'ye kadar davranışları olumludur. Soğuduktan sonraki dayanımları, NB'larinkine oranla yüksektir. Ancak sıcaklık 300°C ye yükseldiğinde çeperde bir patlama ile birlikte yarılmalar ve kapak atmalar meydana gelmektedir. Yüksek performanslı betonlarda geniş kılcal boşluklar yoktur. Serbest su ise çok az miktarlardadır. Sıcaklık 300°C'yi aşınca jel boşluklarında serbestlik kazanan su buhara dönüşmekte ve içinde bulunduğu dar boşluklar nederi ile büyük basınçlar oluşturmaktadır. Ortaya çıkan yüksek basınç etkisi betonda dökülmelere yol açmaktadır" (60).

Türker vd.'nin çalışması, yangına maruz kalan betonlarda mikroyapı ve dayanım değişikliklerini belirlemek için yapılmıştır. Bu amaçla normal PÇ ve 3 tip farklı agrega içeren harçlar hazırlanmıştır. Kullanılan agregalar; kuvarsit, kireçtaşı ve bimsitir. Basınç dayanımı ve SEM incelemeleri için harç numuneleri, sıcaklık artış periyodu da dahil olmak üzere 4 saat süreyle 100°, 250°, 500°, 700° ve 850°C sıcaklıklara tabi tutulmuştur. SEM incelemeleri için aynı numunenin aynı bölgeleri sıcaklığa tâbi tutulmadan önce ve sonra incelenmiştir. Böylelikle CSH, CH, agrega ve çatlak gelişmeleri net olarak incelenebilmiştir (66).

Akman'ın yaptığı çalışmada, yangınların betonarme yapıların taşıyıcı malzemeleri olan beton ve donatıda oluşturduğu hasarlar yüksek sıcaklıkların fonksiyonu olarak ele alınmış, hasar biçimleri, görünüşleri ve şiddetleri fiziksel ve mekanik yönden incelenmiştir. Yüksek performanslı betonların, yangında hasar riskini azaltmadığı belirtilmiştir (65).

Hammer (66) yaptığı araştırmada % 0-5 oranlarında SD kullanarak ürettiği yüksek dayanımlı hafif ve NB'larda uyguladığı, 20°-100°-200°-300°-450° ve 600°C sıcaklıklarda elde ettiği verileri, ısıya maruz bırakılmayan betonlara bağlı dayanım yüzdeleri olarak değerlendirmiştir. Buna göre; en az dayanım kaybı 200°C'ye kadar yaklaşık olarak aynı iken 300°C'de SD katkısız NB (80 MPa dayanıma sahip) ve ikinci olarak 115 MPa dayanımlı NB (%5 SD) betonu diğerlerine nazaran daha iyi bir davranış sergilemiştir. 450°C de ise en iyi davranışı 80 MPa (% 0 SD) NB gösterirken diğerleri yaklaşık aynı davranışı göstermişlerdir. 600°C'de ise % 5 SD'lı HB ile SD katkısız NB, birbirleri ile aynı ve 20°C'deki referans betona göre ~%48 dayanım kaybı ile en iyi davranışı göstermişlerdir. Betonda ölçülen sıcaklık yaklaşık 200°-300°C arasında iken (S/Ç; 0,36 ve SD çimento ile değiştirme oranı; %5) basınç dayanımı ve E-modülünün azalışı % 25-35'tir. Aynı azalışlar, yaklaşık 600°C de basınç dayanımı için % 50 ve E-modülü için %60'dır. NB'lar için gözlenen, E-modülü azalışları bir dereceye kadar HB'lardan daha yüksektir.

Yangın dayanımı, ancak ve ancak yangın başladığı ve donatıya ulaştığı kritik sıcaklığa kadar olan süreler arasındaki zaman olarak tanımlanabilir. Buna göre; HB yapılar, daha düşük ısı iletkenlikleri nedeni ile NB yapılardan daha yüksek yangın dayanımına sahiptirler. Böylece, donatı pas payının daha iyi izole (yalıtkan) olmasına neden olur. Bu, normal dayanımlı ve S/Ç oranlı, HB'larda yapılan testlerle gösterilmiştir. Birçok çeşitli yangın yükleri, hidrokarbon yangını gibi yangın esnasında beton örtü çatlayıp, patlayarak dökülebilir. Bunun ana sebebi muhtemelen, buhar basıncının, ilave gerilmeleri artırması nedeni ile dış yüklerin, betonun çekme dayanımını aşması olarak görülmektedir. Buhar basıncı çoğunlukla, buharlaşabilir suyun

bir miktarı ile betonun geçirgenliği ve yangın yükleri (ısınma oranı ve maksimum ısı) arasındaki ilişki olarak tanımlanabilir. Hafif agregalı betonda, agregaların absorbe suyu, NB'lardan daha fazla olabilir. HB'larda daha fazla parça atma riski olabilir. Hidrokarbon yangınına maruz kalmış, yüksek dayanımlı hafif agregalı betonlar, testlerde bunu göstermişlerdir. HB yapılar, sık sık şiddetli yangın yüklerine maruz kaldıklarında, NB'lardan daha düşük yangın dayanımına sahip olabilirler. Selüloz yangınında, yüksek dayanımlı HB'lar kadar, hidrokarbon yangında normal dayanımlı HB'un davranışları hakkında yetersiz bilgi olduğu görünmektedir (67).

Kong et al. (68) ve Abeles and Bardhan-Roy, (69)'a göre hafif agregalı beton yaklaşık 500°C'ye kadar dayanımını korur. NB için bu sınırlar 300°C (silis esaslı agregası) ve 350 °C'dir. HB'un yangın etkisinden sonra kalan dayanımı, sıcaklığın yaklaşık 500°C'den 800°C'ye yükselmesi sonucunda yaklaşık % 100'den %40'a lineer olarak azaldığı belirtilmiştir. NB'un kalan dayanımının; 800°C'de yaklaşık % 20 olduğu belirtilmektedir. Aynı araştırmacılar, NB'daki, donatının 550°C'de önerilmeli beton donatısının ise 400°C de dayanımının yaklaşık % 50'sini kaybettiğini de belirtmektedirler.

Schneider'a (70) göre HB'un, gerilme-şekil değiştirme eğrisi yaklaşık 300°C'ye kadar hemen hemen hiç değişmez. Hidrokarbon yangın testlerinden sonra hafif agregalı betonların soğutulmaları sonunda ölçülen kalan dayanımlar, ilk dayanımları ortalama silindir basınç dayanımı olarak; 45 ve 65 MPa olan numunelerde yaklaşık 0 (sıfır)'dır. Bir yangından sonra gözle görülebilen hasar az olmasına rağmen, betonun yük taşıma kapasitesi oldukça azalabilir. Hidrokarbon yangınları sırasında hafif agregalı betonlarda, NB'lardan daha büyük parça atmalar olur (71, 72, 73). Bunun üç ana sebebi vardır (74): hafif ve normal yoğunluklu betonlar karşılaştırıldığında;

- Daha yüksek nem içeriği (hafif agregalar su depoları gibi hareket ederler, böylece, buharlaşabilir su miktarı daha fazladır)
- Düşük geçirgenlik (hafif agregalı betonlardaki daha yüksek buhar basıncı)

- Düşük ısı iletkenliği (daha yüksek ısı eğilimi) (67)

Parça atmanın ana sebepleri olarak, aşağıdakiler önerilmektedir (74, 75, 76):

- Geçirgenlik ve nem içeriğine bağlı olarak buhar basıncı
- Kapilar gözeneklere bağlı nem (glogging moisture)
- Kopan tabakanın ilk basınç gerilmesi

Hafif agregalı beton, daha düşük çekme dayanımına sahiptir. Normal yoğunluklu beton ile karşılaştırıldığında, (eşit S/Ç oranında) HB'un parça atma eğiliminin daha fazla olmasına neden olarak önerilebilecek sebeplerden biri olarak da gösterilebilir (67, 71).

YDB'un mekanik özellikleri, Phan and Carino yaptıkları çalışmada, 100x200 mm silindirler, 600 °C'de 5 °C/dak ısınacak şekilde ölçülmüştür. Isı sürekli bir gerilme olmaksızın uygulanmış, özellikler hem yüksek ısıda, hem de oda sıcaklığına soğutulduktan sonra ölçülmüştür. Sonuç olarak, SD kullanımının önemli bir etkiye sahip olmadığı belirtilmiştir. Isı üç farklı şartta uygulanmış; (yükli, yüksüz ve yüksüz kalan özelik testi), SD ağırlıkça %0-10 oranlarında çimentonun yerine kullanılmıştır. SD kullanılan numunelerdeki dayanım kaybı, yüksüz test şartlarında, SD kullanılmayan karışımlardaki dayanım kaybından daha fazladır. 100°C'de ise kalan özelik deneylerinde, SD'lı karışımlarda, SD kullanılmayan karışımlara göre daha az bağıl dayanım kaybı olmuştur. Daha yüksek ısılarda, farklar istatistiksel olarak anlamlı değildir. Patlayarak kabuk atma için SD'nın varlığı açık olarak etkili görülmemektedir. s/b oranının, düşüşüne bağlı olarak, kabuk atma eğiliminde bir artış vardır. Oda sıcaklığındaki dayanımının, %40'ına eşit basınç gerilmesi ile yüklü durumdaki deneylerde, kabuk /parça atma ile ilgili olarak azalma eğilimi olduğu belirtilmiştir (77).

HB'larda, yangın dayanımı için gerekli kalınlık, NB'lardan %20 daha azdır. Bu yüzden, beton kabuk gereksinimleri, NB'lardan daha düşüktür. Ayrıca, HB,

oda sıcaklığındaki dayanımının çoğunluğunu, yüksek ısılarda kaybetmez. Numune olarak, 650°C de HB numuneler, orijinal dayanımlarının yaklaşık % 85'ine sahipken, NB'lar, agrega tipine bağlı olarak %35-75'ini korur (29).

2.5. Betonun Dayanıklılığı

Beton dayanıklılığı, "hava koşullarından, sülfatlı veya asitli sulardan veya betonun kullanıldığı ortam koşullarından kaynaklanan yıpratıcı kimyasal ve fiziksel olaylar karşısında, hizmet süresi boyunca gösterebileceği direnme kabiliyeti" olarak tanımlanmaktadır. Bir başka tanım olarak; yapı malzemelerinin ve yapıların işlevlerini, uzun yıllar boyu bozulmadan yerine getirmelerine dayanıklılık, kalıcılık veya durabilite denilmektedir. Betonarme yapıların kalıcılığını etkileyen kimyasal ve fiziksel işlemlerin hemen hepsinde iki ana faktör vardır: su ve beton bünyesindeki boşluklar ile çatlaklar içindeki taşınım. Gazların, suyun ve zararlı maddelerin beton içine taşınımı (transferi) ve bunların beton ile etkileşimi, bozulma sürecinin gelişimi açısından çok önemlidir (14, 60).

"Taşıyıcı bir malzeme olan betonun günümüzde dayanım niteliğinden çok, durabilite (dayanıklılık) özelliğine önem verilmektedir. Durabilite, betonun bileşimi ve üretim süreci ile birlikte çevre koşullarına da büyük oranda bağlıdır. Binanın tasarımı ve inşaatı sırasında bu faktörlerin dikkate alınması zorunludur. Durabilite probleminin çözümünde, kimyasal ve mineral katkılardaki gelişmeler büyük olanaklar sağlamıştır" (78).

"Betonun içerisine sızan su, karbon dioksit, oksijen, sülfat, asit ve klor gibi maddeler, betonda değişik türlerdeki kimyasal olayların yer almasına neden olmaktadır. Betonun içerisindeki alkalilerle reaktif agregalar arasında gelişen ve sertleşmiş betonun, genişterek yıpranmasına yol açan reaksiyonlar da kimyasal olaylar sonucunda yer almaktadır."

"Betonda yer alan kimyasal ve fiziksel olaylar sonucunda, beton daha boşluklu bir malzeme durumuna gelebilmekte, içerisindeki demir donatılar paslanabilmekte, beton aşınabilmekte ve betonun içerisinde çok büyük gerilmeler oluşabilmektedir. Bütün bu olaylar, betonun hasar görmesine, hizmet edemez duruma gelmesine yol açmaktadır. Bilindiği gibi, yapıların tasarımında, betonun hedeflenen dayanımdan daha düşük dayanıma sahip

olmaması istenmektedir. Ancak, betonun, hizmet gördüğü süre boyunca karşılaştığı kimyasal ve fiziksel olaylar karşısında yeterli direnci gösterebilmesi, yani, yeterince dayanıklı olması, en az, betonun dayanımı kadar, hatta çoğu zaman beton dayanımından daha da önemlidir" (14).

"Betonda, yüksek dayanım ile erken yaşta çatlama arasında yakın, ters bir ilişki vardır; şiddetli ortam koşullarına maruz beton yapıların bozulması ve çatlama arasında çok yakın bir ilişki vardır. Genellikle, çimento hamuru ile iri agrega ya da donatı arasındaki aderans bölgesinde, ortalamadan daha yüksek bir su-bağlayıcı oranı olduğu için porozite; daha yüksek, dayanım; daha düşük ve gerilme altında çatlama karşı hassasiyet daha yüksektir. Böylece, bir yapı ya da yapının bir kısmı şiddetli hava koşulları ve yükleme çevrimlerine maruz kaldığında beton içinde yoğun bir mikroçatlaklar ağı gelişebilir. Bu koşullar altında, görünüşte birbirleriyle bağlantısız geniş olmayan, az sayıdaki yüzey çatlağı bile zararlı iyonların ve gazların betonun içine girişine olanak sağlayabilmektedir" (79).

"Shah et al.'a göre; beton numunelerin hızlı klor geçirimliliği, S/Ç ile doğrudan ilişkili değildir. Basınç dayanımı ile geçirimlilik arasında basit bir ilişki yoktur. Bazı yüksek dayanımlı numuneler yüksek klor geçirimliliğine sahipken, bazı düşük dayanımlı numuneler de düşük klor geçirimliliğine sahiptir. Bu sonuçlar, "dayanım arttıkça, klor geçirimliliği daima azalır" inancına uymamaktadır. Klor geçirimliliği, su muhtevassından önemli miktarda etkilenir. Bileşimlerde kullanılan su muhtevassının, maksimum agrega boyutu ile ilişkili olduğunu göstermektedir. Küçük agregalı betonlar, genellikle büyük agregalı betonlardan daha fazla miktarda karışım suyuna gereksinim duyarlar. Agrega hacim oranı ve su muhtevası arasında, nispeten lineer bir ilişki vardır. Maksimum, agrega boyutu daha büyük olan betonların dayanımları ve klor geçirimlilikleri diğerlerinden az da olsa düşüktür. Dayanımın daha düşük olması, arayüzey geçiş bölgesinin etkisinden, düşük klor geçirimliliği de öncelikle karışımlardaki su muhtevassının düşük olmasından kaynaklanabilir. Bu araştırmanın sonuçları, S/Ç oranının beton basınç dayanımı için birincil faktör olduğunu, fakat klor geçirimliliği için aynı şeyin söylenemeyeceğini ortaya koymaktadır. Klor geçirimliliğinin, betonun mikro yapısı tarafından etkilendiği ve beton bileşimindeki maksimum agrega boyutu ve su muhtevası ile ilişkili olduğu görülmektedir. Bu nedenlerle, karışım oranı kriterleri olarak sadece dayanım ve S/Ç'yu kullanan bazı şartnameler, dayanıklılığa hitap etmeyebilirler" (80).

"Betonarme donatısının paslanması için betonun doğal koruma yeteneğinin azalması (karbonatlaşma) veya koruyucu tabakanın klor iyonu tarafından "delinmesi" ile gerçekleşir. Bu gelişmenin çabukluğu, betonun dayanımının (mukavemetinin), dayanıklılığının önünde görülüp tutulması ile yapılan inşaatlarda daha da artmaktadır. Yapının üzerine gelen yükleri taşıyabilme özelliği olan dayanımdan önce; yapının kullanım (servis) ömrünü dikkate alarak, yük dışındaki etkilere karşı dayanıklılığı sağlanmalıdır" (81).

2.6. Korozyon

“Korozyon, metallerin içinde bulundukları ortam ile kimyasal veya elektrokimyasal reaksiyonlara girerek metalik özelliklerini kaybetmeleri olayıdır. Metallerin büyük bir kısmı su ve atmosfer etkisine dayanıklı olmayıp normal koşullar altında bile korozyona uğrayabilir. Bütün metaller doğada mineral olarak bulundukları hale dönüşmek eğilimindedirler” (82).

“Doğa yasalarına göre maddeler, en düşük enerjili doğal konumlarına geçmeye eğilimlidirler. Demirin paslanması olayında olduğu gibi, bu; “termodinamik” denge halidir” (60).

“Doğada bulunan mineraller, söz konusu metalin en düşük enerji taşıyan bileşiği, yani en stabil halidir. Bu mineraller özel metalurjik yöntemlerle ve enerji harcanarak metal haline getirilir. Ancak metallerin çoğu element halinde, termodinamik olarak stabil değildir. Uygun bir ortamın bulunması halinde üzerinde taşımış oldukları kimyasal enerjiyi geri vererek yeniden minimum enerji taşıyan stabil bileşikler haline dönüşmek isterler. Bu nedenle korozyon olayları enerji açığa çıkararak kendiliğinden yürür. Demirin doğada en çok rastlanan minerali; hematit adı ile bilinen Fe_2O_3 dır. Bu mineral yüksek fırınlarda kok kömürü ile yüksek sıcaklıkta reaksiyona sokularak metalik demir haline dönüştürülür. 1 ton demir üretmek için yaklaşık 1 ton kok kömürü harcanır. Elde edilen demir, sulu çözeltiler içinde veya atmosfer etkisinde, kendiliğinden korozyona uğrayarak pas denilen korozyon ürünlerini oluşturur. Pasın bileşimi de esas olarak hematit mineraline benzer şekilde demir hidroksit ve demir oksitten oluşur. Korozyon reaksiyonunun yürütücü kuvveti, reaksiyon sırasında açığa çıkan enerjidir. Ancak bazı hallerde metalin termodinamik açıdan korozyona uğraması beklendiği halde, pratikte reaksiyonun yürümediği veya önemsiz derecede yavaş yürümekte olduğu görülür. Bu durum kabuk oluşumu ve pasifleşme gibi nedenlerle reaksiyon hızının azalmasından kaynaklanır” (82).

“Korozyon olayı; özde elektrokimyasal bir olaydır. Korozyon tepkimeleri ile elektrokimyasal bir pilde yürüyen tepkimeler arasında hiçbir fark yoktur. Korozyonu söz konusu olan metal anot olup, iyonları sulu ortama geçer. İyonları değişik yükseltgenme basamaklarında (Fe^{+2} , Fe^{+3}) olabilir. Bu iyonlar ortamda bulunan anyonlarla koşullara bağlı olarak katı, sıvı veya gaz bileşikler oluşturabilirler. Korozyonda önemli olan metalik halin kaybolmasıdır. Oluşabilecek bileşiklere, ancak korozyon hızının zamana bağlılığı etken olabilir. Korozyon hücresinin katodunda herhangi bir maddenin indirgenmesi gerekir. Anottaki yükseltgenme tepkimesi sonucu oluşan elektronlar katoda ancak metalik bağlantı ile gelebilirler. Bu nedenle katot ve anot her zaman için metalik bağlantılı bölgeler arasında oluşur” (83).

“Dış kaynaklı akımın olmadığı durumda, elektrokimyasal reaksiyon için, elektronların açığa çıktığı anodik reaksiyon ve korozyonun sürekliliği için açığa çıkan elektronların tüketildiği katodik reaksiyonun olması gerekir” (84).

Özellikle altyapı sistemlerinin başlıca hasar nedeni, onarım masrafları 1 – 3 trilyon dolar olarak tahmin edilen betonarmede korozyon olayıdır (85).

“Korozyon kayıpları ülkelerin gayri safi milli hasılasının yaklaşık % 3,5 -4,5 ‘ u kadardır. Gerçekte korozyon kayıplarının ancak belli bir yüzdesini (yaklaşık % 30’unu) önleyebilmek mümkün olabilir” (82). “Türkiye’deki korozyon kayıplarının GSMH’nin % 4,36’sına eşit olduğu araştırmalar sonucu elde edilmiştir. 1997 yılında eğitime ayrılan payın, GSMH’nin % 1,76’sı, 1998 yılında % 2,53’ü olduğu dikkate alınırsa konunun önemi açıkça görülmektedir” (86).

Konut ve iskele yapıları, transit sistem tünelleri, otopark yapıları köprüler gibi yapıların bozulmasına neden olan en önemli etken; beton içindeki donatı korozyon hasarıdır. Bu, büyük ölçüde, atmosferdeki CO₂ ‘den betonun karbonatlaşması kadar, deniz çevrelerinde bulunan kloritler ve otoyol yapılarında, buz çözücü tuzların kullanımı ile ilgilidir. Altyapılarda, korozyon kontrolünde, gerekli dikkat gösterilmediğinden sadece A.B.D. ‘de 20 milyar dolardan fazla bir maliyet rapor edilmektedir (31).

“Beton üzerinde de korozyon araştırmaları yapılmaktadır. Akkaya ve Akyüz (87) tarafından yapılan çalışmada, piyasada yaygın olarak kullanılan katkıli portland çimentoları ile ürettikleri beton elemanların, zararlı kimyasal maddeler içeren eriyikler nedeni ile maruz kaldığı korozyonu incelemişlerdir. Çalışmada S/Ç oranı ve çimento dozajını değişken olarak seçmişlerdir. Betonda kimyasal korozyona sıklıkla rastlanılan gübre fabrikaları ve depolarındaki şiddetli hasara neden olan ortamları temsilen, amonyum sülfat ve amonyum nitrat çözeltilerini kullanmışlardır. Sonuç olarak, betonun korozyona karşı dayanımında; S/Ç oranının oldukça açık bir etkisinin olduğunu ve çimento dozajının etkisinin de S/Ç oranına bağlı olarak değiştiğini belirtmişlerdir. Betonun fiziksel ve mekanik özelliklerinin, korozif ortamda kaldığı süreye bağlı olarak zayıfladığı, amonyum nitrat ortamında, çözme etkisi sebebi ile korozyon hızlı bir şekilde ilerlerken, amonyum sülfat ortamında ilk başta gördükleri şişme etkisinin korozyonu geciktirdiğini belirlemişlerdir” (87).

2.7. Betonarme Donatısının Korozyonu ve Etkileyen Faktörler

“Betonda korozyon, son yıllarda çok gündeme gelen bir konu haline gelmiştir. Bunun sebebi muhtelif kara ve deniz yapıları, karayolu ve demiryolu köprülerinin, viyadüklerinin çevre etkileri sonucu yıpranması olmuştur. Bu tür beton yapılarda, korozyona sebep olabilecek etkenler, daha tasarım aşamasından kendilerini gösterip yapı ömrü boyunca etkili olurlar. Çevre etkileri (Mikro İklim), kötü malzeme, kötü işçilik, rutin bakımların aksatılması bu hasar mekanizmasının işleyişinde önemli rol oynamaktadır” (88).

“Betonun bir diğer işlevi de donatıyı paslan korumaktır. Bu şekilde donatı için önceden bir tedbir almayı veya daha sonra bir bakım yapmayı gerektirmez” (47).

Beton, normalde donatıya mükemmel bir koruma sağlar. Betondaki, yüksek alkalinitedeki ortam, donatıyı pasifleştiren ve onu korozyondan koruyan sıkıca yapışan bir oluşumu meydana getirir. Buna ilaveten beton, korozyon oluşturan maddelerin girişini azaltacak şekilde, düşük geçirimsiliğe sahip olarak üretilir (82, 89).

“Başka bir deyişle; beton içinde, pH=12-13 arasında iken, donatı çubuğu yüzeyinde çok ince gamma ferri oksit ($\gamma\text{Fe}_2\text{O}_3$) bileşiminde koruyucu bir film tabakası oluşur. Korozyonun tekrar başlayabilmesi için donatı yüzeyinde oluşan bu oksit tabakasının bozulması ve pasifliğin kırılması gerekir. Pasifliğin kırılması karbonatlaşma sonucu, donatı-beton ara yüzeyinde, alkaliliğin azalması ile klor iyonlarının betona girerek donatı yüzeyine ulaşması ile mümkün olur” (90).

“Beton dayanıklı bir malzemedir. Çevreden genellikle gelebilecek yıpratıcı etkilere karşı iyi direnç gösterir, paspayının yeterli olması kaydı ile donatıyı korozyondan korur. Ancak, 1950’lerden başlayarak bazı yapılarda gözlenen yıpranmalar bu konuda kuşkulara yol açmıştır. Durum bir çok araştırmacı tarafından ayrıntılı olarak incelendiğinde dayanıksızlığın nedenleri olarak şu faktörler belirlenmiştir:

- çok yüksek S/Ç orantısı
- çok düşük çimento dozajı
- yetersiz pas payı” (91).

“Donma – çözülme, genleşen alkali reaksiyonu ve kimyasal etki gibi yıpratıcı mekanizmaların da problem çıkardığı bilinmekle beraber, beton yapıların

uzun süreli performans ve ömürlerine karşı en büyük ve kritik tehdit betonun parçalanmasından çok, içinde gömülü donatının elektrokimyasal korozyonundan gelmektedir. Burada hem betonun karbonatlaşması, hem de klorürler rol oynamaktadır. Son 25-30 yıl içinde birçok beton binada donatının aşırı korozyonuna rastlanmıştır. Buna sebep olarak, karbonatlaşmaya karşı direnci zayıf beton kullanılması, pas paylarının yeterli olmayışı ve kötü işçilik gösterilebilir” (92).

“Beton içindeki donatının korozyonu elektro-kimyasal süreç ile açıklanabilir. Donatı yüzeyinde oluşan farklı elektro-kimyasal potansiyele sahip anodik ve katodik bölgeler, çimento hidratlarındaki tuz çözeltilerinin oluşturduğu elektrolit ile birleşir, donatının kendisi de elektronları ileten elektronik iletkeni teşkil eder” (84, 93).

“Son on yıl içerisinde betonarme yapılar üzerinde korozyonun yapmış olduğu hasarlar hakkında önemli bilgiler elde edilmiştir. Ancak, korozyon oluşumunun özel mekaniği ve onun, yapısal sisteme nasıl zarar verdiği konusunda yeterli bilgi bulunmamaktadır. Devam eden korozyon ile donatı, kendisini betondan serbest hale getirme özelliğine ulaşır (aderans zayıflar). Mevcut gerilmeler ve donatının hacim genişletmesinden dolayı paspayı durumunda bulunan beton kabuğun koparak ayrılması (lift-off) nedeniyle betonda kesit daralması problemi ortaya çıkar” (94).

“Hafif agregalı betonların, betonarmede kullanılması durumunda, agregaların ve dolayısı ile betonun gözenekli bir yapıya sahip olması nedeni ile su ve rutubeti, hacimlerinde uzun süre tutabilmeleri, korozyon yönünden bir sorun oluşturmaktadır. Donatıyı pastan korumanın en iyi yolu maksimum geçirimsiz olan beton üretmektir”

“Betonun, su geçirimsizliği nedeni ile çatlaması ve parça atması, donatı korozyonuna neden olan agresif çözeltilerin donatıya daha kolay ulaşmasına neden olur. Korozyona uğrayan donatı yüzeyindeki pas ürününde meydana gelen hacim artışı, çekme dayanımı düşük, gevrek bir malzeme olan betonun çatlamasının ve parça atmasının önemli nedenlerinden biridir” (86).

Yapılarda, korozyonun baş göstermesi için ortam çok önemlidir. Korozyon olayının yer alabilmesi için üç ana elemana ihtiyaç vardır; Anot, katot, ve elektrolit. Korozyon için elektrolitik iletkenlik yanında elektron akışını sağlayacak bir elektriksel iletkenliğin de bulunması gereklidir. Donatının etrafını saran beton tabakası, çubuk üzerindeki anot ve katot bölgeleri arasında, elektron akımının yer alabildiği, elektrolit görevini yapmaktadır. Elektrik iletkenliği sağlayan, betonarme donatısının kendisidir. Böyle bir

ortamda, betonarme donatısındaki demir, elektron vererek ayrılır. Böylece korozyon başlamış olur. Demirin elektron verdiği bölge anottur. Demirden kopan elektronların gideceği yer katottur. Katot oksijen ve su bakımından zengin bölgedir. Oksijen ve su buraya pas payına kadar ulaşan çatlaklar ve izole olmayan yani birbirlerine kılcal olarak bağlı olan boşluklar sayesinde dışarıdan gelir. Betonun içindeki su da oksijen içermekle beraber, olayın ilerlemesi bakımından yetersizdir. Bu yüzden, dışarıdan bir etki gerekir. Kötü bir betonda bu gibi çatlaklar ve boşluklar fazla olacağı için anot ve katot birbirlerine çok yakın olabilir. Hatta anodun hemen yanında oluşabilir. Biraz daha iyi bir beton daha az çatlaklı ve az boşlukludur. Böyle bir betonda anot ve katot yakın olabileceği gibi birbirlerinden uzakta da olabilir. Bu, korozyonun biraz daha yavaş ilerlemesine sebep olur (14, 88).

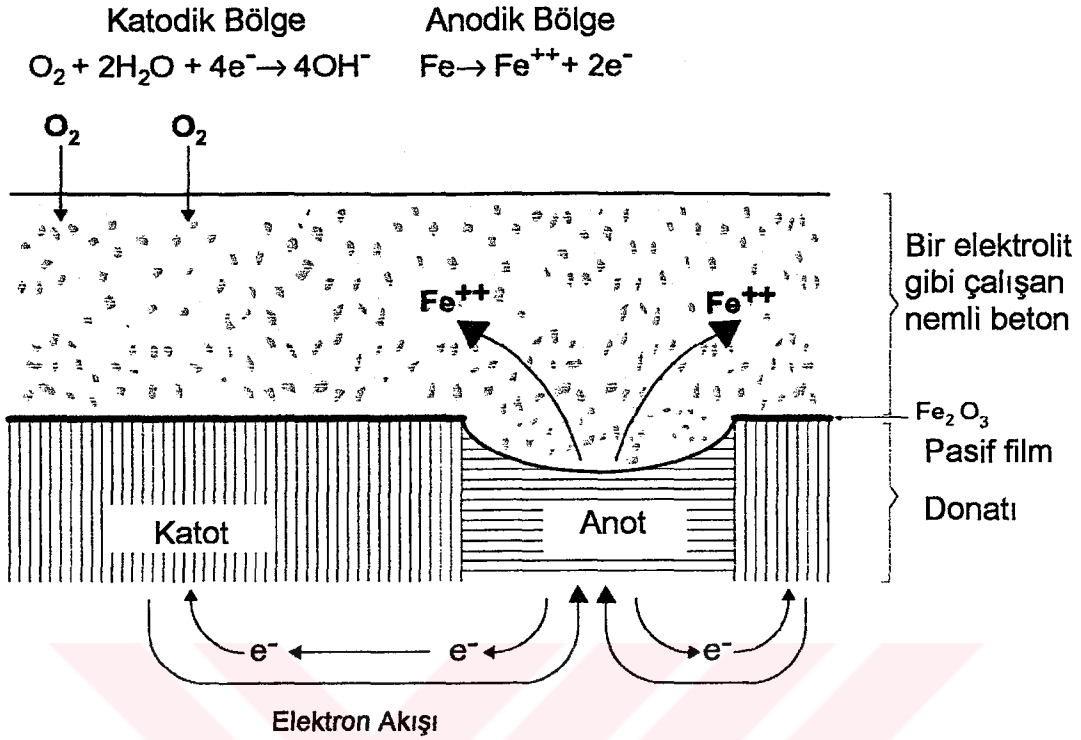
“Anodik bölgede yer alan reaksiyon aşağıdaki gibidir:



Bu reaksiyon sonucunda ortaya çıkan Fe^{++} iyonları, elektrolit solüsyonun içerisine girmektedir. Elektronlar ise, donatı boyunca hareket ederek, katodik bölge tarafından kazanılmaktadır (Şekil 2.3).

Katodik bölgede, önce, hidroksil iyonlarının ortaya çıktığı reaksiyon yer almaktadır. Daha sonra da, bu hidroksil iyonları ile elektrolit solüsyonun içerisinde Fe^{++} iyonları reaksiyona girerek ferros hidroksit “Eş.2.4” oluşturmaktadır(Şekil 2.3):

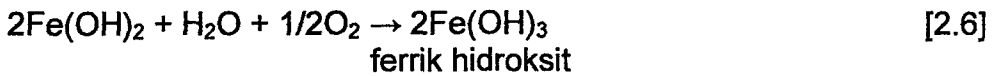




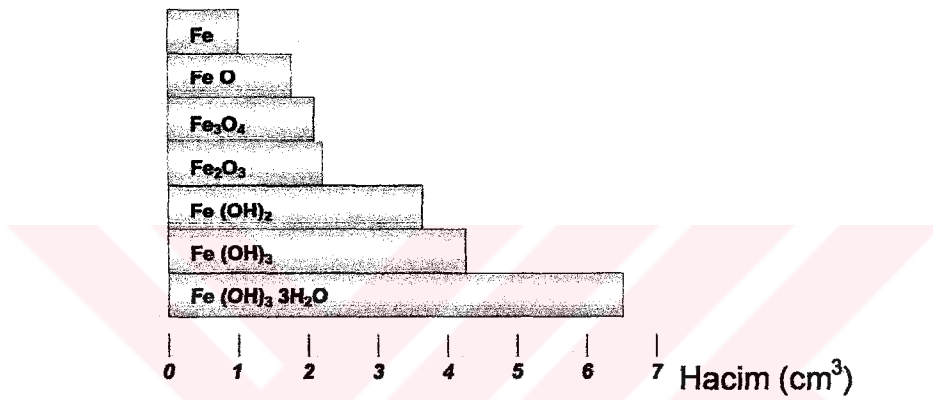
Şekil 2.3. Beton içindeki donatının korozyonu ve elektrokimyasal aşamaları (95)

Ferros hidroksit “Eş.2.4”, beton ortamında mevcut olan su ve oksijenle birleşerek ferrik hidroksit oluşmasına yol açmaktadır (14, 88). Bu da donatı hacminin genişlemesine sebep olur (96). “Eş. 2.3” ve “Eş.2.4” tepkimeleri ile demir yüzeyi belirli bir süre sonra hidroksit çökelmeleri ile kapatılır. Betonun yüksek alkali özelliği nedeni ile de beton içindeki donatı pasifleşmektedir (83, 97, 98).

Ferrik hidroksit ise “Eş.2.7”deki ferrik oksit (Fe_2O_3) ve su durumuna dönüşebilmektedir. Buradaki su, korozyon olayının devamına yardımcı olabilmektedir:



Korozyon olayında yer alan reaksiyonlardan görülebileceği gibi anodik bölgenin Fe^{++} iyonlarının solüsyon içerisine girmesiyle bu bölgedeki demirde azalma olmaktadır. Katodik bölge üzerinde ise ferros hidroksit “Eş.2.4” ve ferrik hidroksit “Eş.2.5” ve Eş.2.6” gibi korozyon ürünleri yerleşmiş olmaktadır. Bu reaksiyonlar sonucunda ilk demir hacminin 6-7 misli bir hacim artışı olabilir (Şekil 2.4). Betonarme donatısını koruyan paspayı tabakası bu sebepten dolayı çatlayarak yapıdan ayrılabilir (14, 88).



Şekil 2.4. Betonarme donatısı pas ürünlerinin hacimsel artışı (95)

Karma suyunda bulunan veya çevresel kaynakların içerdiği klorür, beton içine mikro çatlak veya kapiler gözeneklerden nüfuz edebilir. Derine nüfuz edebilmesinin ana faktörleri; çözelti konsantrasyonu, tuz çözeltisi ile temasta bulunduğu süre, klorür iyonlarının katyonlarının türü, S/Ç oranı, kür süresi ve koşulları, sıcaklık ve çimento tipi olarak belirtilmektedir (83).

Betonunun içerisindeki donatıların korozyonu çok sakıncalı durumlara yol açmaktadır:

(1) Korozyona uğrayan donatının kesitinde küçülme olduğu için belirli bir çekme yükü, daha küçük kesitli bir çubuk üzerine binmiş olmaktadır. Yani, donatıların üzerindeki çekme gerilmesi artmış olmaktadır.

(2) Korozyon ürünlerinin (pasın) hacmi, korozyonda rol alan demirin hacminden yaklaşık 2,5 – 3 kat daha büyüktür. Bu artış; 6-7 kat olabilmektedir (Şekil 2.9) (88, 86, 95). Bu ürünler donatıların yüzeyine yerleştiği için, sertleşmiş betonun içerisinde çok büyük gerilmeler oluşmaktadır. Artan iç gerilmeler karşısında, sertleşmiş beton çatlayıp parçalanmaktadır.

(3) Donatıların korozyonunun ilk safhalarında, betonun yüzeyinde paslı noktalar oluşmaktadır. Korozyon ilerledikçe pas lekeleri, donatının boyunca beton yüzeyinde görülmektedir. Korozyonun ileri safhasında ise beton yüzeyinde parçalanma olmaktadır. Donatının korozyonunun çok ilerlemiş olmadığı durumda dahi, beton yüzeyinde pas lekelerinin oluşmuş olması, betonun görünümünü bozmaktadır (14, 99).

“Temel yapılarında beton kesitinin büyütülmesi ve paspayının arttırılması, donatı aralığı büyük tutularak taze betonun bu kısımlardan kolayca geçmesinin sağlanması çoğu zaman en ekonomik, bazı hallerde ise tek çözüm yolu olabilir” (100)

2.7.1. Betonun pH değerinin etkisi

Metalik malzemeler, genel olarak asitli ortamlarda korozyona uğrarlar. Bazik ortamlarda ise metal yüzeyi hidroksit veya oksit tabakası ile kaplandığından korozyona karşı daha dayanıklıdır. Bu nedenle pH'ın yüksek olduğu koşullarda metal korozyonunun çok önemli olmadığı varsayılır. Diğer taraftan pH'ın yeterince yükselmesi durumunda metallerin alkali korozyonu söz konusu olabilir. Normal koşullarda beton pH'ın 10-12 arasında iken betonun bileşimine, çimento ve agrega yapısına bağlı olarak pH'ının 13'e kadar yükselmesi olasıdır. Genellikle betonun pH değeri 12,5'den daha büyüktür (14, 83, 101). Çimento + su reaksiyonu sonucu kalsiyum hidroksit oluşur ve beton oldukça yüksek bir alkali özellik kazanır. Betondaki yüksek alkalinite PÇ'ndaki C_3S ve C_2S ana bileşenlerinin hidratasyonu sonucunda ortaya çıkan kalsiyum hidroksitler tarafından sağlanmaktadır. Yüksek alkalinite

ortamında, donatıların yüzeyi çok ince bir oksit tabakası ile kaplanmakta, böylece donatı korozyona karşı pasif durum kazanmaktadır. Beton içine gömülü donatı çubuklarının çevresindeki pH değeri yüksek ortam donatının yüzeyinde korozyonu önleyici pasif bir demiroksit tabakası bulunmasını sağlar. Bu tabaka klor iyonlarının etkisi veya pH değerinin yaklaşık 11,5 'un altına düşmesi ile parçalanır ve donatıda korozyon devam eder (14, 52, 83, 88, 102-104).

Diğer taraftan betonun geçirgenliğinin düşük oluşu, korozyona neden olan bileşenlerin beton içine girmesini ve betonarme donatılarının yüzeyine kadar ulaşmasını güçleştirir. Ancak, betonun içerisine sızan sulardaki tuzların, karbonatlaşmanın etkisiyle, zamanla, betondaki pH değerinde azalma olabilmektedir. Bu maddelerin başında klor iyonları gelir. Betonun pH değerinin 8-9-10 gibi değerlere düşmesiyle, donatı üzerindeki koruyucu oksit filmi kırılmakta beton, içerisindeki donatıyı korozyona karşı koruyamaz duruma gelmektedir (14, 88).

“Beton hazırlanırken kullanılan suyun, suda çözünmüş olan çeşitli iyonlar içermesi suyun pH'ını değiştirir. Beton içinde zararlı etki yapmayan suların pH değeri 6,5'dan büyük olmalıdır. Zararlı etki, pH'ın 6,5 değerinin altına düşmesi ile ortaya çıkar. pH değeri 6-3 arasında ise beton bu tür suların etkisi ile hızlı bir şekilde tahrip olur. Genellikle asit karakteristiğinde bulunan bütün sular betondaki bazik tuzlar ile suda çözünebilen tuzlar oluşturarak betonun kolayca parçalanmasını sağlar” (83).

2.7.2. Karbonatlaşma ve ölçümü

Betonarme yapılarda, karbonatlaşmadan ve klor iyonu girişi sonucu donatının depasifasyonu, korozyonun başlamasını sağlayabilmektedir (85).

“Karbonatlaşma olayı sonucunda, betondaki kalsiyum hidroksit miktarı azalmakta, betonun pH değeri düşmektedir. Böyle bir ortamdaki donatı donatıların korozyonu daha kolay gerçekleşebilmektedir. Karbonatlaşma olayı beton yüzeyinde başlamakta, ve yüzeyden biraz içerilerde bulunan bölgede etkili olmaktadır. Betonun geçirimsizliği arttıkça, ve betondaki mikro çatlaklar çoğaldıkça, karbonatlaşmanın etki ettiği derinlik daha fazla olmaktadır. S/Ç oranı düşük olan ve iyi kür edilen betonlarda,

karbonatlaşmanın etkisi yüzeyden 25 mm'den daha içerideki bölgeyi etkilememektedir" (14).

"Havadaki CO₂, rutubetli ortamlarda hidrate olmuş çimentoyla reaksiyona girer. Söz konusu etki, CO₂ konsantrasyonu % 0,03 civarında olan "temiz bir havada" dahi meydana gelebilir. Büyük kentlerde havadaki CO₂ konsantrasyonunun % 0,3-1,0 arasında olduğu göz önünde bulundurulursa, sorunun kentsel alanlarda daha büyük boyutlu olduğu görülür. Teorik olarak, çimento hamurundaki tüm kalsiyumlu bileşenler CO₂'den etkilenir. Ancak, pratikte sorunun ana nedeni; çimentonun kalsiyum silikat bileşenlerinin hidratasyonu ile ortaya çıkan Ca(OH)₂'dir" (99).

Bu reaksiyon, boşluk suyunda (OH⁻) iyonlarının azalmasına ve betonun pH'nın önemli ölçüde düşmesine neden olmakta ve bu olay betonun koruyuculuk niteliğinin kaybolmasına neden olmaktadır (105, 106).

Atmosferde ve doğal sularda bulunan CO₂ gazı, beton pas payının hava boşlukları içine girerek betonun pasifleşme fonksiyonunu sağlayan, alkalin kalsiyum hidroksiti, kalsiyum karbonata dönüştürür ve ortamı nötrleştirir (88, 107).

"Karbonatlaşmanın en hızlı olduğu ortam, bağıl nem oranının; % 50-70 arasında olduğu durumlarda sağlanır. Donatı paslanması için karbonatlaşma ve klor etkisi bir arada ele alındığında, klor etkisi için daha fazla rutubet gerektiği, dolayısıyla, hem karbonatlaşma hem de klor etkisinin birlikte en fazla zararı meydana getirdiği durumların, tekrarlı ıslanma kuruma koşullarında olduğu görülür" (13, 99).

Karbonatlaşmanın, betona önemli bir olumsuz etkisi yoktur. Karbonatlaşma beton yüzeyinden başlayarak iç kısımlara doğru ilerler. İlerleyiş hızı havadaki CO₂ yoğunluğu ile betonun geçirgenliğine ve rutubet durumuna bağlı olarak değişir. Ancak alkalin bir madde olan betonun pH değerini 12-13'den 8-9'a düşürerek daha asidik bir ortam oluşturur. Böylece beton içindeki donatının paslanmasını kolaylaştırıcı olumsuz bir etki oluşturabilir (108, 109).

Ozyildirim and Halstead, yaptığı araştırmada; az miktarda SD ilave edilmiş UK'lü betonların, S/Ç oranı % 40-45 arasında değiştiğinde, 28 günlük

dayanımları, tatmin edici ve karbonatlaşma etkisine karşı dayanımının iyi olduğunu belirtmişlerdir (110).

“Nötr ortam ise agresif klorun donatıya ulaşmasını engelleyemez ve korozyon başlar. Betonun rutubeti arttıkça, CO₂ gazının geçmesini sağlayan boşluklar azalır ve beton yapı su altında ise CO₂ gazının geçme ihtimali çok düşük olur. Karbonatlaşma olayının hızı, klor penetrasyonundan daha düşüktür. Beton içine 10 mm nüfuz edebilmesi, belki 10 yıl sürer. Su içindeki klorürler betona, rutubetle birlikte, difüzyon ile veya hidrostatik basınç ile girer. Bu penetrasyon, 10 seneden daha kısa bir sürede yüzeyden 50 mm içeride arzu edilmeyen kritik seviyeye erişebilir” (107).

Betonda oluşan reaksiyonları aşağıdaki şekilde göstermek mümkündür (13, 88, 99):



“Betonun içerisindeki kalsiyum hidroksitin, karbon dioksitle reaksiyonu sonucunda, su ve kalsiyum karbonat oluşmaktadır” (14).

“Betondan alınmış karot numuneler üzerine, baz indikatörü püskürtülmesiyle ortaya çıkan renk değişimi ile karbonatlaşma saptanır. Beton yüzeye sürülen baz indikatörü, pH değeri; 11-12,5 olan karbonatlaşmamış betonu koyu pembe renge dönüştürür. Karbonatlaşma sonucu pH değeri 8-9'a düşmüş betonda renk değişimi göstermez (Resim 2.1). pH değeri 11'den büyük olan betonlarda; donatı, alkaline pasivasyonla korunduğu için, bu değer düşmesi korozyon varlığını belirtir. Baz indikatörü olarak kullanılan çözelti fenolfetalin çözeltisidir” (13,14, 60, 111).

Oldukça kompleks olan karbonatlaşma prosesinin zamana bağımlılığının;

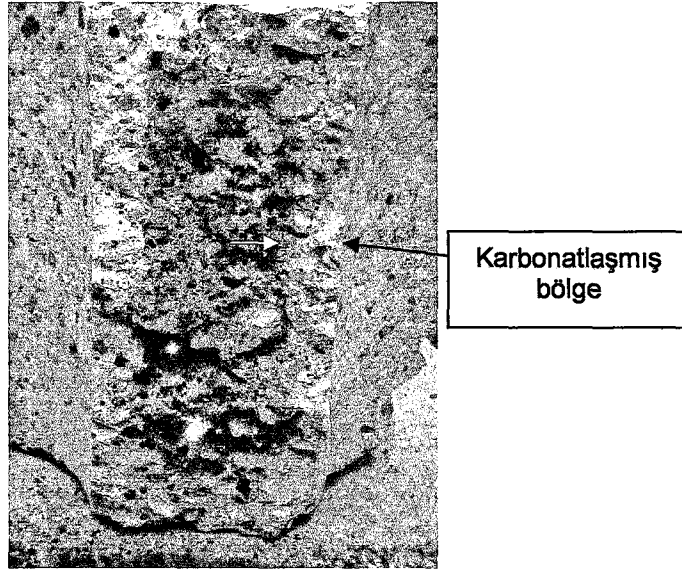
$$D = K\sqrt{t} \quad [2.10]$$

D = karbonatlaşma derinliği (mm)

K ≈ 4 mm / yıl (sabit)

t = karbonatlaşma süresi (yıl)

“Eş. 2.10” formülü ile basit olarak ifade edilebildiği göz önünde bulundurulmalıdır (13, 99).



Resim 2.1. Kırıldıktan sonra yüzeyine fenolfetalin çözeltisi püskürtülmüş beton (111)

2.7.3. Klorit iyonlarının (deniz suyunun) etkisi

Betonarme köprü tabliye ve alt yapısı, rıhtım iskeleleri, dalga kıranlar ve balıkçı barınaklarının yapımında yoğun bir şekilde kullanılmaktadır. Dalga etkisi altında olan bölgelerde yüksek klor konsantrasyonu, devamlı rutubetin varlığı ve oksijenin kolayca girebilmesi korozyonu kolaylaştırır ve hızlandırır (94, 107).

Virmani and Clemena'ya göre beton içindeki donatının korozyonunu başlatan kritik klor içeriği eşiği beton ağırlığınca % 0,025 çözülebilir klorürdür. Bunun anlamı; $0,59 \text{ kg/m}^3$ değerine ulaşabilir. FHWA laboratuvarlarının yaptıkları araştırmalarda bu eşik; beton ağırlığınca % 0,033 toplam klorür değerine ulaşabilir (112). Perenchio'ya göre ise bu değer, beton ağırlığınca % 0,04-0,05'e ulaşması korozyonu başlatabilecek eşik değerdir (113).

Baradan vd., beton içindeki klorür iyonu miktarının $0,6-0,9 \text{ kg/m}^3$ veya beton gözenek suyunda 300-1200 mg/litre değerini aşması halinde pasif tabakanın

çözülme riskinin olduğu belirtilmektedir (60). Bu kritik değer, Erdoğan'a göre 0,6-1,2 kg/m³ aralığındadır (14).

"Betonarme yapı elemanlarının erken yapısal bozulmasına neden olan donatı korozyonu yönünden, deniz şartlarının en etkili ortam olduğu anlaşılmaktadır. Deniz suyunda bulunan yüksek klorür miktarı, deniz suyunun sürekli olarak beton yüzeyini ıslatması ve yüzeyin kuruması dönüşümü ve yüksek permeabiliteye sahip beton yüzeyinin mevcut olması gibi şartların bir araya gelmesi durumunda korozyon için en uygun ortam hazırlanmış olur" (94).

"Beton karışımına giren doğal kum, çakıl ve su gibi bileşenler, normal halde çok küçük konsantrasyonlarda klorür içerirler. Bu kadar az klorür, betonarme donatılarının korozyonuna neden olmaz. Klorür iyonunun zararlı etkisi ancak beton içinde % 0,2 den fazla (4,5 kg Cl⁻ /m³) klorür bulunması halinde söz konusu olabilir. Korozyon için zararlı sayılan bu klorür konsantrasyonu, sınır değeri tartışmalıdır. Literatürde farklı sınır değerleri verilmektedir. Bunun nedeni betonarme donatılarının korozyonunun, klorür konsantrasyonundan başka, betonun mukavemetine, geçirimsizliğine, boşluk yüzdesine, rutubetine ve pH derecesine de bağlı oluşundan kaynaklanmaktadır. Düşük pH derecelerinde, daha az klorürün etkili olduğu belirlenmiştir. Bu nedenle bir çok araştırmacı, yalnız klorür konsantrasyonu için sınır değer vermek yerine, [Cl⁻] / [OH⁻] oranının verilmesinin daha doğru olacağını ileri sürmektedir" (82).

"Donatı yüzeyinde klor iyonu birikimi ya da karbonatlaşma etkisi, koruyucu pasif zırhın yok olmasına neden olur. Çünkü, klorürler, betonun gözenekli yüzeyindeki nem sebebiyle kolaylıkla klor iyonlarına dönüşür ve donatıya erişirler. Kloritler, ayrıca klor iyon geçirgenliğini de artırır. Bu bağlamda, elektrik özgül direncinin ölçümü, beton yapıda mevcut nem miktarını ve klor iyonlarının geçirgenlik oranını saptamakta yardımcı olabilir. Genellikle beton boşluklarındaki oksijen, korozyon olayının başlaması için yeterlidir. Mesela sıcak kuru iklimde klorür içeren agrega kullanılarak inşa edilmiş bir binada, yapımından 25 yıl sonra korozyon hasarları yalnız, kısa kış aylarında ıslanan bölgelerde oluşmuştur. Her ıslanmada betonun rutubeti hayli artmış ve betonun elektriksel direncini düşürerek elektrokimyasal korozyonu başlatmıştır" (107).

"Klorür gibi etkin iyonlarla temas edildiği koşullarda kaliteli bir beton dahi yeterli koruma sağlayamaz ve demir yüzeyinde oluşan pasif film tabakası bozulur" (83, 114).

Betonarme donatılarında korozyon olayına, genellikle deniz suyu veya atmosferi etkisinde kalan yapılardan başka, klorür tuzlarının kullanıldığı bazı

kimyasal fabrikalarda ve özellikle buzlanmaya karşı tuzlama yapılan karayolu köprüleri ve viyadüklerde rastlanmaktadır (82, 94, 104).

Deniz suyu etkisine maruz kalan betonlar, sülfat hücumunun yanısıra, gözeneklerinde (boşluklarında) çökelen (biriken) tuzların kristalleşmesinden dolayı artan basınç nedeniyle de genişli, yıpranabilmektedirler. Sertleşmiş betonun gözeneklerinde tuz birikmesi, betonun içerisine giren deniz suyunun –kapiler hareketle yukarı çıkması ile en yüksek su seviyesinin üst bölgesinde-buharlaştırması sonucunda oluşmaktadır. Bu olay, betonun, su seviyesi üzerinde kalan bölgelerinde gelişmektedir. Deniz sularının gel-git hareketiyle yükselip alçalması sonucunda beton yüzeyinin bir bölümü, ıslanma-kuruma devirlerinin etkisinde kalmaktadır. Bu tür ıslanma-kuruma durumu ile karşı karşıya kalan beton devamlı olarak su içerisinde bulunan betona göre daha çok hasar görmektedir. Deniz suyu şartlarına maruz kalan bu yapılarda korozyon ve deniz suyunun diğer tahrip edici etkileri görülmektedir. En şiddetli etkinin deniz suyunun yükselme alçalma ve sıçrama bölgesinde gerçekleştiği bilinmektedir. Bazı durumlarda beton içerisindeki deniz suyunun hareketinin donmanın, dalga çarpmasının ve aşınmanın tahrip edici etkisi ile birleştiği görülür” (94, 107).

“Öte yandan, deniz suyunun içerisinde bulunan magnezyum sülfat, betondaki bağlayıcı özellikteki kalsiyum-silika-hidrat jelinin çözünmesine neden olmakla birlikte, bu çözünme oldukça yavaş tempoda yer almaktadır. O nedenle, gözeneklerde biriken magnezyum sülfat kristalleri, gözeneklerin bir ölçüde tıkanmasına ve böylece dışarıdan daha az su sızabilmesine yol açmaktadır. Deniz suyunun etkisine maruz kalacak betonların üretiminde kullanılan S/Ç oranı 0,45’i geçmemelidir. Şayet, eşiklerde, denizliklerde ve kaldırım betonlarında olduğu gibi beton kesiti ince ise, veya betonarme betonlarındaki donatının pas payı 2,5 cm’den az ise, S/Ç oranı 0,40’dan yüksek olmamalıdır” (14, 94).

“Ortamda klorür iyonu varsa demir yüzeyinde oluşan poröz tabaka içerisine girerek çukur korozyonu başlatır ve gerekli koşulları sağlayarak korozyonu, oluşan koruyucu tabakanın altından devam ettirir. Herhangi bir nedenle bir noktada metalin çözünme hızı bir an için yüksekse klorür iyonları bu noktaya göç eder. Klorür iyonları metal çözünmesini arttırdığından değişim bu noktada daha hızlı çözünme koşullarını oluşturma eğilimindedir” (83, 115).

“Donatı korozyonunun başlaması her şeyden önce pasifliği kıracak miktarda klor iyonunun ve devamı için katodik reaksiyonu besleyecek yeterlilikte oksijenin ve suyun donatı-beton ara yüzeyindeki alkaliliğin azalması sonucu pasifliğin kırılması için CO₂ ‘in pas payını geçerek donatı yüzeyine ulaşması gerekir. Bunların gerçekleşmesi, betonun fiziksel yapısı ile yakından ilişkili olup, betonun geçirimsizliği son derece önemlidir. Donatı korozyonu süreci, betonun fiziksel yapısı gereği, meydana gelen farklı oksijen, nem ve klor

iyonu içeriği nedeni ile veya bir köprü tabliyesinde olduğu gibi alt ve üst donatılar arasında ortaya çıkış biçimi ile daha çok makro hücre tipindedir” (79).

Klorür tayini, deneysel olarak, klorür miktarı belirlenecek beton, matkap ile delinmek suretiyle elde edilen toz numuneler üzerinde yapılabilir. Alınan toz numuneler, klor çözücü bir çözelti içine konularak bir müddet karıştırılır. Daha sonra klor iyonunu seçici bir elektrot yardımı ile bir potansiyel okunur. Bu potansiyel ile çözeltideki klor iyonu miktarı arasındaki korelasyondan sonuca varılır. Ancak toplam klorür olduğu için dışarıdan gelen klorür olarak değerlendirilemez. Son araştırmalar, gümüş nitrat çözeltisini beton yüzeyine sıkarak elde edilen renk değişiminden, serbest Cl^- miktarının tespit edilebildiğini göstermektedir (81).

2.7.4. Nem (rutubet) etkisi

Beton içine oksijen yayınma (diffusion) hızı, yalnız S/Ç oranına değil, betonun rutubet (beton boşluklarının su ile doluluk) derecesine de bağlıdır. Beton kuru halde iken beton içindeki boşluklar hava ile doludur. Bu durumda atmosferden katot yüzeyine gaz halinde oksijen transferi son derece kolaydır. Beton boşluklarının su ile dolu olması halinde, oksijen önce boşluk suyu içinde çözünecek ve daha sonra çözelti içinde yayınarak betonarme donatılarına ulaşacaktır. Beton rutubet derecesinden kaynaklanan bu olay, korozyon açısından büyük önem taşır. Yukarıda belirtildiği üzere, betonarme donatılarının korozyonu için hem oksijene ve hem de suya ihtiyaç vardır. Beton, kuru halde iken su eksikliğinden, beton su ile tam doymuş halde iken de oksijen eksikliğinden betonarme donatılarının korozyonu son derece yavaştır. Ortamdaki bağıl nem oranı % 60'ın altında kaldığı takdirde pratik açıdan bir donatı paslanması olmayacağı söylenebilir. Donatı paslanması için en elverişli bağıl nem oranı % 70-80'dir (82, 99).

“En şiddetli korozyon olayı; periyodik olarak ıslanan ve kuruyan betonlarda görülür. Atmosferde bulunan betonların, büyük bir kısmı kuru halde bulunur.

Bu durumdaki betonların içindeki betonarme donatıları pasif haldedir. Diğer taraftan sürekli su altında kalan betonlarda da korozyon hızı son derece düşüktür. Bu durum su içinde çözünmüş halde olan oksijenin beton içinden yayınarak demir yüzeyine kadar taşınmasının güçlüğünden ileri gelir” (82).

2.7.5. Donatı Korozyonuna beton karışımının etkisi

Betonarme yapılarda dayanıma etki eden etmenler (karma suyu, çimento türü, agrega bileşimi, betonarme yapının bulunduğu çevre vb.) aynı zamanda betonarme donatısının korozyonuna da etki etmektedir. Bu konuda yapılan çalışmalar, ayrı başlıklar altında incelenmiştir. Olumsuz koşullar oluşmadığı sürece betonarme donatısının korozyonu ihmal edilecek düzeydedir (114).

2.7.5.1. Su / çimento oranı

“Betonun, zararlı kimyasal etkilere dayanıklılığı, zararlı etkili maddelerin betonun içine sızarak girebilme derecelerine bağlı olarak değişir. Bu ise betonun geçirimliliği ile yakından ilgili bulunduğundan, zararlı kimyasal etkilere dayanıklılığın sağlanabilmesi için betonun geçirimliliğinin sınırlandırılması yoluna gidilir” (100).

“S/Ç oranı ve kürleme, betonun geçirgenliğinin başlıca nedenlerindendir. Yüksek permeabiliteye sahip beton, nem, klor, oksijen ve karbondioksitin, beton içindeki donatıya ilerlemesine izin vermeye hazırdır. Karbondioksit serbest kireçle reaksiyona girerek, pH değerini azaltır ve kalsiyum karbonat oluşmasına neden olur” (116).

Karbonatlaşma derinliği, S/Ç oranındaki artış ile artmaktadır (106, 117).

S/Ç oranı; yaklaşık 0,50 olan ve iyi kür edilmiş betonun, geçirgenliği çok düşük ve hemen hemen sabittir. Betonun S/Ç oranı; 0,50 değerinden arttıkça, boşluklar arasındaki bağlantı tamamen kapanamamakta, böylece geçirimlilik daha fazla olmaktadır (14, 116).

S/Ç oranı arttıkça betonun porozitesi artmakta ve buna paralel olarak oksijen difüzyon hızında da artış olmaktadır. Örneğin, S/Ç oranı 0,40 dan 0,60' a

çıkarılacak olursa oksijen difüzyon hızında yaklaşık iki kat artış olmaktadır. Bu durumda betonarme donatılarının korozyon hızında da iki kata varan bir artış olması beklenebilir (4, 14, 82).

“Çok düşük S/Ç oranlarında da betonun yerleştirilmesi ve sıkıştırılması zorlaşacağından boşluk miktarı artabilir. TS EN 206-1’e göre karbonatlaşma nedeni ile korozyon riski altında bulunan kuru veya sürekli ıslak betonarme elemanlar için şart koşulan en yüksek S/Ç oranı 0,65 iken, tekrarlı ıslanma-kurumaya maruz elemanlar için bu değer 0,50’ye indirilmektedir” (60).

“Kapiler porozite, S/Ç oranı ve hidratasyon derecesinden etkilendiği için çimento hamurunun permeabilitesi bu parametrelere bağlıdır. Düşük S/Ç oranına sahip çimento hamuru için permeabilitenin düşük olduğu bilinmektedir. Kapileritenin kesintiye uğramasının permeabilite üzerinde geniş etkiye sahip olması; permeabilitenin, porozitenin basit bir fonksiyonu olmadığını gösterir. Boşluklu iki malzeme, (porozite bakımından yakın değerlere sahip olan iki malzeme) permeabilite bakımından farklı değerlere sahip olabilmektedir. Eğer karışım; toplam su içeriği düşük, yerleştirme için akışkanlık bakımından iyi özelliklere sahip ve doğru olarak sıkıştırılmış ise permeabilite düşük olacaktır” (94).

2.7.5.2. Çimento

“Betonu oluşturan malzemeler içinde çevresel etkilere en duyarlı olanı çimentodur. Bu nedenle betonun agresif ortamlardaki davranışını, büyük ölçüde, kullanılan çimentonun tipi ve özellikleri belirler. Çimentonun dayanıklılık bakımından önemi iki boyutludur. Birinci boyut sertleşmiş çimento hamurunun gözenek yapısıyla, ikinci boyut ise çimento hamuru-agrega ara yüzeyiyle ilgilidir” (13, 99).

Çimento performansındaki gelişmelerin yapıların ömrünü uzatmak yerine yapı maliyetini düşürmeye yönelik oluşu da burada rol oynamıştır. Bugün betonarme yapıların yıpranmasına neden olan faktörler ve bunlara karşı alınacak önlemler çok iyi bilinmektedir. Ancak, uygulamada çoğu kez kalite kontrol sistemlerindeki yetersizlikler problem olmaktadır. Yüksek performanslı betonla yapılmış yapıların önem ve maliyetleri itibara alınırsa dayanıklı olmaları önemli bir koşul olarak ortaya çıkar. NB’a oranla yüksek performanslı beton özellikle sıkı yapısından dolayı, çeşitli fiziksel ve kimyasal yıpratıcı etkilere karşı daha dirençlidir. Bu nedenle NB’a oranla

karbonatlaşmaya karşı daha iyi korunur. Klor iyonlarının yayınmasını azaltır. Ancak bu durumda portland yerine katkılı çimentolar kullanılmalıdır (91).

“Betonun geçirimsizliği, yalnızca beton gözenekliliğinin bir fonksiyonu olmayıp, gözeneklerin boyutlarına, dağılımına ve şekillerine de bağlıdır. Kapılar boşluklar, büyük boyutları nedeniyle, daha küçük ve daha çok sayıda bulunan jel boşluklarından daha geçirgendir. Bu bağlamda, bütün olarak sertleşmiş çimento pastasının yalnızca jele göre 20-100 kat daha geçirgen olduğu tespit edilmiştir. Betonda, su geçirimsizliğinin istendiği durumlarda mikrosilis katkılı çimento ya da beton kullanılması; yaygın ve etkinliği kesin olarak kabul görmüş bir uygulamadır. Mikrosilis uygulamasıyla, betondaki kapiler boşluk miktarı azalır şeklinde bir kesinlik yoktur. Fakat, bu uygulamayla büyük boyutlu boşlukların daha küçük boyutlu boşluklara bölünmesi, mümkün olmaktadır. Yani mikrosilisin, beton geçirimsizliğine olumlu etkisi, esas olarak boşluk miktarını azaltmaktan çok, boyutlarını kısıtlanmasından ve sürekliliklerini bozmasından kaynaklanmaktadır. Puzolan katkılı çimentolar kullanıldığında genel olarak, erken yaşlarda saf PÇ ile ulaşılandan daha düşük seviyelerde geçirimsizlik muhtemeldir. Fakat zamanla uygun kürlenme neticesinde puzolanlı çimentolarla daha iyi sonuçlar elde edilebilir. Çimento özelliklerinin beton geçirimsizliğine etkisinin incelendiği bir araştırmada ise kaba çimento kullanımının aynı S/Ç oranında, ince çimentoya oranla beton geçirgenliğini arttırdığı tespit edilmiştir. Yine aynı araştırmanın sonuçlarına göre PÇ’nun bileşenlerindeki farklılıklar genel olarak hidratasyon hızını etkilediği ölçüde; geçirimsizliği dönemsel olarak etkilemektedir. Fakat sonuç olarak; uzun vadede betonda elde edilen gözeneklilik ve geçirimsizlik, PÇ bileşenlerinden etkilenmemektedir. Pratik düşüncede, çimentonun korozyona en çok etkisi olan özeliği, trikalsiyumalüminat (C_3A) içeriğidir. Diğer bütün faktörler eşit iken, C_3A içeriğinin artışı ile birlikte, korozyonun ortaya çıkış eğilimi azalır. Bunun sebebi, sertleşmiş çimento pastasında hidrate trikalsiyum alüminat hidratla, klorür iyonlarının reaksiyonu sonucu; trikalsiyum kloroalüminat oluşturmasıdır. Böylece, normal tip I PÇ (tipik olarak % 12 C_3A içerir) klor iyonlarının kaldırılmasında, sülfata dayanıklı tip V PÇ (tipik olarak %4 C_3A içerir)’dan 3/5 kez daha etkilidir” (13, 116).

C_4AF ile olan benzer bir reaksiyonla ise kalsiyum kloroferrit oluşur. Dolayısıyla, C_3A miktarı yüksek çimento kullanılmasıyla ya da yüksek dozajlı beton üretilmesiyle (yüksek dozajla daha çok C_3A ortama katılacağı için) daha çok klorür iyonunun, bağlanacağı anlaşılır. Bu durum ilk bakışta, yüksek C_3A içeren çimento kullanılmasıyla donatıya zarar veren serbest klorürün ortamdaki uzaklaştırılıp, klorür etkisinin azaltılacağı izlenimini vermektedir. Klorür iyonlarının, betona, kullanılan karışım malzemelerinden gelmesi

halinde bu doğrudur. Fakat dış kaynaklı klorür iyonları, yalnızca çok az miktarda kalsiyum kloroalüminat oluşumuna imkan verir. Kaldı ki, ilerleyen zaman içinde, sistemde bağlı klor iyonları serbest kalmakta ve zararlı etkilerini göstermektedir. Öte yandan, deniz suyu içindeki sülfat iyonlarının meydana getirebileceği zarar da göz önünde bulundurularak yüksek C_3A içeren çimentoların kullanılması önlenmelidir. Tras, UK, SD, YFC'ü gibi mineral katkıları içeren çimentolar donatı paslanmasını yavaşlatırlar (99).

“Betonun içerisindeki klor iyonunun düşük seviyede olması için çimentoda yer alacak klor iyonu miktarının, % 0,1'den az olması istenmektedir” (14).

2.7.5.3. Agregası

“Betonda agreganın, betonarme donatısının korozyonuna başlıca etkisi, onun geçirgenliği ile ilgilidir. Yüksek kompakteye sahip ve dolayısı ile su geçirimsizliği düşük olan agregalar kullanıldığında; beton içerisine sızacak sıvılar, agregası dolaşarak hareket etmek zorunda kalırlar. Diğer bütün faktörler sabit kaldığında mineral agregaların pek çoğunda, iri agreganın maksimum büyüklüğünün artışıyla geçirgenlik de artar. Bunun sebebi, mineral agregaların pek çoğunun geçirgenlik katsayısının S/Ç oranının, normal aralıklarda olması durumunda; çimento pastasından; 10-1000 kez daha büyük olmasıdır. Çünkü; betonun yaklaşık %70 hacmini agregalar oluşturur. Bu da betonun geçirgenliğinde baş rolü oynar. Bununla birlikte, nem, klorür iyon, oksijen ve karbondioksitin serbest yüzeyden, donatı çevresine taşınması, agregaların, permeabiliteye gösterebilecekleri etkilerinden daha az önemlidir. Bunun nedeni, çimento harç fazında, az çok sürekli kapiler porozitenin, genellikle agregalarınkinden daha küçük çaptaki gözeneklerden oluşmasıdır. Eğer tane dağılımları, beton karışımının terlemesine ve ayrışmasına neden oluyorsa, donatının korozyonuna önemli bir etkisi olabilir. Ayrışma ve terleme kanalcıkları oluşturarak, suyun, klorürlerin, oksijen ve karbondioksitlerin girişini artıracaktır ve donatı çubuklarının etrafında boşluklar oluşmasına neden olabilirler. Bu boşluk bölgelerinde çoğunlukla aktif korozyon gözlenir” (116).

Beton agregası, tane şekli, yapısı, boşluk durumu ve tane dağılımı özelliklerinden dolayı taze betonun sıkıştırılması işleminde, önemli etkiye sahiptir. Bu nedenle beton agregalarının cinsi ve yapısı, permeabilite bakımından da üzerinde durulması gereken bir tasarım faktörü niteliği taşımaktadır (94, 118).

2.7.5.4. Katkılar

Kimyasal katkılar, betonun fiziksel ve mekanik özelliklerini iyileştirebilirler. Yüksek akışkanlığa, yüksek dayanıma ve kendi kendine yerleşebilme özelliklerine sahip yüksek performanslı beton, ancak kimyasal ve puzolanik katkılarla yapılabilir (119, 120).

Beton karışımlarına, bazı özelliklerini değiştirmek ve ilave özellik kazandırmak için eklenen çok çeşitli maddeler vardır. Bunların birçoğu korozyona etkisi olmayan organik maddelerdir. Bununla birlikte, su azaltıcılar, akışkanlaştırıcılar ve hava sürükleyici katkılar, düşük S/Ç oranlarında yeterli işlenebilirlik ve sıkıştırılma kolaylığını, istenilen süre sağlayabildikleri için tercih edilmektedir. Böyle betonlarda, aynı çökme değeri elde edebilmek için, katkı kullanılmayan betonlara nazaran, daha az su ihtiyacı olmaktadır. Böylece daha sıkı bir beton elde edilmesi sağlanır ve betonun geçirimsizliği azaltılmış olur. Bu şekilde CO₂ yayılımını (difüzyonunu) önledikleri için betonun karbonatlaşma direncini büyük ölçüde artırır (14, 60, 116).

“CaCl₂ bazen, özellikle soğuk havalarda beton dökümünde priz hızlandırıcı olarak kullanılır. Böylece, kloritlerin, betona ilavesi nedeni ile donatı korozyonunun artması beklenebilir. Bir kaynakta, çimento ağırlığının %0,5’inden fazla CaCl₂ ilavesinin korozyon direncine ciddi zarar verici olduğu rapor edilmiştir” (116).

“Khayat and Aitcin’e göre SD, çimento taneleri arasındaki çok küçük boşlukları doldurarak, hapsolmuş suyun, serbest suya dönüşmesini sağlar. Ancak, çok yüksek yüzey alanı nedeniyle absorbe olan su miktarı da artmaktadır. SD’nın, betonun su ihtiyacına net etkisi; s/b oranı, SD ve çimento oranı, SA katkı kullanılması gibi faktörlere bağlıdır. SD, çimento hamurunun geçirimsizliğini azaltmaktadır ve özellikle düşük mukavemetli betonlarda bu etki daha açık görülmektedir. Ayrıca, SD betonun kuruma hızını ve difüzyon katsayısını azaltmaktadır. SD, pH değerini biraz düşürse de karbonatlaşma ve betonun çok daha geçirimsiz olması nedeniyle donatı korozyon riski artmamaktadır” (52).

“Yamato et al. % 10, % 20 ve % 30 oranlarında SD içeren 0,27 ve 0,55 S/Ç oranlarındaki betonlarda yaptıkları hızlandırılmış karbonatlaşma ve klor penetrasyonu deneylerinde SD ilavesi ile betonda pH değerinin ve klor

penetrasyonu derinliğinin düştüğünü, SD'nın % 20 ve % 30 değerlerinde donatı korozyonunun yüksek S/Ç oranında arttığını, düşük S/Ç oranında ise azaldığını belirtmektedirler" (44).

Ortamdaki kalsiyum hidroksitin, CSH jeli olarak puzolanlar tarafından bağlanması veya beton yüzeyinden sızan hava içindeki CO₂ ile karbonatlaşması pH değerinin düşmesine yol açmaktadır. Bu konuda puzolanların etkisi kalsiyum etkisini azaltması ile de olumlu olabilmektedir. Araştırma sonuçlarına göre SD katkısı dolayısı ile artan geçirimsizlik donatı çevresindeki betonda oksijen yayınmasını azaltmakta, elektrik direncini yükseltmektedir. Betonda % 30 oranında katılan SD ile bile pH değerinin 12'nin altına düşmediği belirtilmektedir. SD katkısı, karbonatlaşmanın ilerleme hızını da fazla etkilememekte hatta SA katkı ile birlikte kullanıldığında azaltmaktadır (54, 52, 102, 103).

"Carette and Malhotra, S/Ç; 0,25 ile 0,40 arası değişen ve %10 SD içeren betonların 3,5 yıl boyunca havada kür edilmesi durumunda düşük S/Ç oranlarında, karbonatlaşmanın çok önemsiz olduğunu, ancak S/Ç'nun artışıyla karbonatlaşmanın arttığını gözlemişlerdir" (44).

"TS EN 206-1; kalsiyum klorür ve klorür esaslı katkıların çelik donatı, resimli çelik donatı vb. gömülü metal ihtiva eden betonlarda kullanılmaması hükmünü getirmiştir" (60).

Puzolanların, beton permeabilitesinde bir azalma sağladığı, yumuşak veya hafif asidik sular tarafından, çözünebilir bileşenlerin taşınmasını hissedilir düzeyde azalttığı belirtilmektedir (116).

"Al-Amoudi et al., mineral katkılı betonların yüksek konsantrasyonlu sülfat ve klor içeren ortamlardaki davranışlarını incelemişler ve Tip I çimentosu ile UK karışımlarının en iyi sonuçları verdiğini, SD ve cüruf içeren betonların yüzeylerinde ise daha çok hasar oluştuğunu gözlemişlerdir. Sülfat-klorür solüsyonu etkisine maruz bırakılan SD ve YFC'ü betonlarında donatı korozyon hızının UK ve Tip I çimentosu ile yapılan betonlardan daha az olduğunu ve tüm mineral katkıların, donatı korozyon hızını düşürdüklerini rapor etmektedirler" (44).

Türkmen et al., betonun mekanik özelliklerini geliştirmek ve beton içindeki donatının, korozyon direncini artırmak için farklı oranlarda SD ve YFC'ünü, çimentonun yerine kullanmışlardır. Donatısız numunelerin ultrasonik ses geçiş hızları, basınç dayanımları ve kuru birim ağırlıklarını belirlemişlerdir. Donatı çubuğu kullanılarak üretilen numunelerin korozyon akım yoğunluğu, % 5 NaCl çözeltisinde, 28-75-150 ve 250. günlerde lineer polarizasyon tekniği ile ölçülmüştür. Beton üretiminde, % 10-20-40 oranlarında çimentonun yerine SD ve YFC katarak hazırladıkları karışımları kullanmışlardır. Sonuçta, en yüksek basınç dayanımını % 10 SD - % 20 YFC katkılı numunelerde elde etmişler, en düşük korozyon akım yoğunluğuna ise 0,35 s/b oranı ile üretilen %10 SD-% 40 YFC katkılı numunelerde ulaşmışlardır (121).

"Torii and Kawamura, UK, YFC'u ve SD'nin betonun boşluk yapısı ve klor geçirgenliğine etkilerini inceledikleri çalışmalarında; kür ve ortam şartlarına bağlı olmaksızın, mineral katkılı betonların daha geçirimsiz olduklarını gözlemişlerdir" (44).

"Atlassi, S/Ç oranı 0,3 ile 0,6 arasında değişen ve % 0 ile % 25 SD içeren betonlarda, ortam rutubetinin % 80'in altına düşmesi durumunda SD'nin, betonun içinde rutubet hareketlerini çok azalttığını belirtmektedirler" (44).

"Berke et al.'in yaptıkları çalışmada; SD'nin elastisite modülünü önemli oranda arttırdığını belirtmektedirler. Hızlandırılmış korozyon testinde SD'nin klor geçirgenliğini oldukça azalttığını gözlemişlerdir" (44).

"Hızlandırılmış deneylerde % 10- % 20 olarak katılan SD ile korozyon başlangıcının önemli ölçüde geciktirildiği gözlenmiştir" (51).

"Jacobsen and Sellevold, hava sürüklenmemiş SD betonlarında, buz çözücü tuzların etkisinde, donma-çözülme deneyleri yapmışlar ve SD kullanımıyla dayanıklılığın arttığını gözlemişlerdir" (44).

"Otsuki et al., değişik korozif ortamlarda saklanan harç numunelerinde YFC'u, SD, UK'ün, klor geçirgenliğini ve donatı korozyonunu azalttığını gözlemişlerdir" (44).

2.8. Betonarme donatı korozyonunu tespit, ölçüm ve değerlendirme yöntemleri

Betonarme altyapılarda, konut ve işyeri yapılarında donatı korozyonu şiddetini tespit etme imkanları ve onların kalan ömürlerinin belirlenmesi, hem ekonomik kayıpların büyüklüğü, hem de hayati tehlikeye sebep olabilirliği bakımından önemi gittikçe artmaktadır. Bu amaçlarla geliştirilmiş birçok elektro kimyasal ölçüm tekniği vardır. Bunlar iki ana kategoriye ayrılabilir: Birincisi; asıl yapısal donatı korozyon ölçümleri, ikincisi; stratejik pozisyonda gömülü donatı sondaları ile yapılabilen ölçümlerdir. Bu tekniklerin hepsi, kesin avantajlara ve sınırlılıklara sahip olduğundan, bunların birlikte kullanıldığı uygulamalar desteklenir. Elektro kimyasal donatı korozyonu ölçüm teknolojisinin uygulamasından önemli faydalar çıkarılabilir, sağlanan kesinlik ile sapmalardan kaçınılabilir (31).

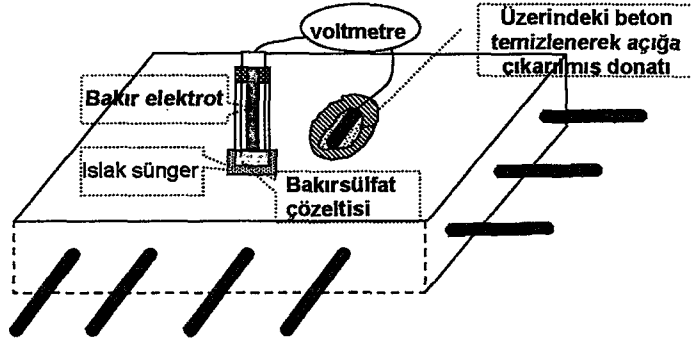
2.8.1. Rezistivite ölçümleri

“Betonun elektrolitik direncini (rezistivitesini) ölçmek için kullanılır. Bulunan değerler, yapının korozyon durumu hakkında bilgi verebilir. Betonun elektrolitik direncini etkileyen faktörler; rutubet, tuz içeriği, sıcaklık, betonun yapım sırasında karıştırma özellikleri ve S/Ç oranıdır. Bu yöntemde, 6 mm derinliğinde 50 mm aralıklarla yerleştirilmiş dört sonda kullanılır. Dıştaki sondadan alternatif akım geçer. İçteki sondalarla potansiyel farkları okunur. Rezistivite değeri, 12000 ohm cm'den büyükse korozyon görülmez, 12000-5000 ohm cm arasında ise korozyon olasıdır. 5000 ohm cm'den küçükse bunu yarı hücre testleri de destekliyorsa korozyon kesinlikle vardır” (122).

2.8.2. Potansiyel haritaları

Yapının, korozyona uğrama ihtimalinin çok arttığı aktif bölgelerin gösterildiği potansiyel haritalarından çok sık yararlanır. Bu deney metodu, donatının korozyon aktivitesini belirlemek amacıyla yerinde veya laboratuvarında donatının elektriksel yarı hücre potansiyelinin belirlenmesini amaçlar (84). Bu, kolay ve hızlı elektrokimyasal korozyon izleme yöntemidir ve korozyon potansiyelinin (E_{corr}) ölçülmesine dayanır. Şekil 2.5'te görüldüğü gibi referans

elektrotu beton yüzeyine değdirilir, beton içindeki donatı ile referans elektrotu arasında meydana gelen potansiyel farkı, yüksek empedanslı bir voltmetre ile ölçülür.



Şekil 2.5. Bakır-bakır sülfat yarı hücre devresi (123)

Betonun elektriksel direnci yüksek olduğundan, iletkenliği sağlamak amacı ile referans elektrot ile beton arasına özel bir sıvı ile nemlendirilmiş sünger konulur. Bu metot, donatı üzerindeki beton kalınlığını dikkate almaz, beton elemanın herhangi bir servis süresinde kullanılabilir. Yarı-hücre potansiyeli değerine göre olası korozyon durumunu veren değerlendirmeler; Çizelge 2.3. ve Çizelge 2.4.'de verilmiştir.

Çizelge 2.3. ASTM C 876'ya (123) göre potansiyel kriterleri

Yarı-hücre potansiyel değerleri, CSE (SCE)	Korozyon Olasılığı
$E < -350 \text{ mV} (-270 \text{ mV})$	%90 güvenirlikle donatının korozyona uğrama olasılığı vardır
$-350 \text{ mV} < E < -200 \text{ mV} (-120 \text{ mV})$	Belirsizlik vardır, kesin bir şey söylenemez
$-200 \text{ mV} < E$	%90 güvenirlikle korozyon yoktur

“Referans elektrotu olarak en fazla kullanılanlar; bakır-bakır sülfat (CSE), gümüş-gümüş klorür veya kalomel elektrottur. Kalomel, KCl eriğine daldırılmış $\text{Hg}/\text{Hg}_2\text{Cl}_2$ elektrotudur, KCl çözeltisinin normalitesine bağlı olarak 0,1 N; 1 N veya doymuş kalomel elektrot adlarını alır. Yapılması ve muhafazasının kolaylığı bakımından ve 1mV'luk hassasiyet yeterli olduğundan doymuş kalomel elektrot (SCE) daha yaygın olarak kullanılır ($E=0,2425 \text{ Volt}$). Sharp et al., yukarıda belirtilen üç farklı referans elektrotu

karşılaştırdıkları deneysel çalışmada; bakır-bakır sülfat elektrotunun beton boşluk suyuna benzeyen sodyum hidroksit çözeltisinde kararsız olduğunu, deniz suyunda ise elektrot potansiyelinin 150 mV'a varan salınımlar yaptığını, diğer iki elektrotun iyi sonuçlar verdiğini görmüşlerdir" (84).

Çizelge 2.4. Arup'un Potansiyel Kriterleri (84)

Yarı-hücre potansiyel değerleri (SCE)	Ortam	Korozyon Durumu
+100 mV < E < +200 mV	Cl iyonu yok, pH=13	Pasif Durum
-200 mV < E < +100 mV	Normal koşullardaki betonarme eleman	
-500 mV < E < -200 mV	Ortamda Cl iyonu var	Çukurcuk Korozyonu
-600 mV < E < -450 mV	Karbonatlaşma ve Cl iyonu nedeni ile depasivasyon	Genel Korozyon
-1000 mV	Oksijen girişinin sınırlandırıldığı ve pasif filmin korunamadığı ortam	Aktif Durum

"ASTM C 876'nın (123) verdiği daha yüksek negatif potansiyel değeri, her zaman daha hızlı korozyon olduğu anlamına gelmez, çünkü potansiyelin negatif yönde artışı, gerçekte örneğin; Fe iyon konsantrasyonundaki azalmanın göstergesi olabilir. Bu nedenle korozyon hızının, yarı-hücre potansiyeli yerine diğer elektro-kimyasal tekniklerle elde edilmesi daha doğrudur" (84).

2.8.3. Ağırlık kaybı deneyleri

Donatıda korozyonun oluşturduğu hasarı araştırmak için ağırlık kaybından yararlanılarak penetrasyon derinliği belirlenebilir. Malzemenin ortalama yıllık penetrasyon miktarı, belirli süreler sonunda metalin yüzeyindeki malzeme kaybı tespit edilerek "Eş.2.11" bağıntısı ile hesaplanır. Bu ifadede P; cm/yıl olarak penetrasyon miktarını, W_k ; metalin korozyonla ağırlık kaybını (g), S; korozyona maruz kalan yüzeyi (cm²), t; deney süresini (saat), Δ ise metalin yoğunluğunu göstermektedir (84).

$$P = \frac{W_k}{\Delta \cdot S \cdot t} \times 24 \times 365$$

[2.11]

“Korozyon nedeni ile birim zamanda yüzeyden taşınan tabakanın kalınlığını ifade eden ve literatürde korozyon hızı olarak tanımlanan bu bağıntı, mpy (mil/yıl) cinsinden ASTM G1-90 (125) standardında da yer almaktadır. Korozyon hızı, ağırlık kaybının oranı olarak (%) veya yüzeyden ağırlık kaybı olarak (mg/cm^2) ya da ortalama kesit kaybı (mikron) (84) olarak ifade edilmektedir. Ancak literatürde hem zamanı hem de yüzeyi dikkate alan ve en sık kullanılan ifade mpy'dir.”

$$\text{Korozyon Hızı (mpy)} = \frac{3,45 \times 10^6 W_L}{\Delta.S.t} \quad [2.12]$$

Korozyon Hızı (mpy : mil/yıl): 1mil= 0,001 inç; 1 mil/yıl = 25,4 $\mu\text{m}/\text{yıl}$;

W_L : Ağırlık kaybı (g) A : Yoğunluk (g/cm^3)

S : Alan (cm^2) t : Zaman (saat)

“Korozyon nedeni ile oluşan ağırlık kaybı, pas tabakasının Clarke Çözeltisi olarak bilinen kimyasal sıvı (1000 ml HCl, 24 g Sb_2O_3 ve 71,3 g $\text{SnCl}_2.2\text{H}_2\text{O}$) ile temizlenmesinden sonra belirlenir” (84).

2.9. Beton İçindeki Donatının Korozyonu ile İlgili Araştırmalar

Betonda donatı korozyonu testlerinde, herhangi bir hızlandırma uygulanmaksızın bir yapısal hasarın ortaya çıkması en az 5 yıl (126) veya bazı durumlarda yaklaşık 12 yılı bulmaktadır (127). Böylece betonda donatı korozyonunun deneysel araştırılmasında hızlandırılma sürecinin uygulanması zorunluluğu ortaya çıkmaktadır (128).

2.9.1. Hafif beton içindeki donatının korozyonu

Batis et al., bims agregalı HB'da donatı korozyonuna yıpratıcı, olumsuz çevrenin etkilerini incelemişlerdir. Bu çalışmada değişkenler, çimento tipi, agrega/çimento ve S/Ç oranlarıdır. Numunelere, iki farklı koruyucu kaplama yaparak, donatı korozyonunu azaltabilme yeteneğini araştırmışlardır. Korozyonu arttırabilen yüksek porozite, HB'un olumsuzluğudur. Çok yakın zamanlardan beri bims, ikinci bir işleme tabii tutulmaksızın, hafif agrega olarak beton üretiminde kullanılabilmektedir. Bims agregalı betonun düşük

yoğunluğu, yapıların ağırlığını bağıl olarak azaltırken, temellerde de olumlu etki göstermektedir. Ayrıca ısı yalıtımı ile enerji tasarrufu sağlamaktadır. Porozite, taşıyıcı HB üretiminde, bimsin kullanımı için öncelikle göz önüne alınmalıdır. BS 8110 ve RİLEM şartnamelerine göre, ince ve iri agregası bims olan çimento dozaj aralığı ($300-400 \text{ kg/m}^3$) dayanım tavanı 30-35 MPa olan taşıyıcı ve hem taşıyıcı hem yalıtım betonları üretilebilir. Düşük S/Ç oranı, donatı korozyonunu azaltır. Kompozit PÇ ile yapılan numuneler, (olumsuz çevre şartlarına karşı) optimum dayanıklı karışımları sağlamaktadırlar. BB'da donatı korozyonu, NB'daki donatının pasifleşmesi için gerekenden daha yüksek seviyede bulunmaktadır. Agrega/çimento oranları, korozyon penetrasyon oranına etkilidir. Bims agregalı HB'da koruyucu kaplama kullanımı korozyon oranını azaltmaktadır. Koruyucu kaplama/boyaların kullanımı, BB numunelerde, donatı korozyonunu geleneksel betonda elde edilen değerlerden daha düşük veya benzer duruma getirmektedir (129).

Al-Khaiat and Haque, yaptıkları çalışmada hafif ve normal ağırlıktaki betonlarda; dayanıklılık ve dayanım özelliklerini araştırmışlardır. Bu araştırmada, sıcak kuru ve sıcak nemli sahil şartlarında, 9 ay boyunca kür ettikleri, HB'ların su geçirimsizliğine, başlangıç kürü sonunda NB'lardan daha duyarlı olduğu görülmüştür. Aynı betonlarda yapılan karbonatlaşma derinliği araştırmalarında, 7 günlük sudaki küründen sonra NB'un, HB'a nazaran daha az karbonatlaştığı, deniz kıyısındaki açık hava küründen sonra iki betonun da benzer özellik gösterdiği belirtilmektedir. Bununla beraber sülfat ve klorür içeriği HB'larda, NB'lara göre daha fazladır (33).

Batis et al., yaptıkları deneysel çalışmada, Yunan ince bims agregası ile birlikte, donatı korozyonunu azaltmak için ilave edilen korozyon engelleyicileri (inhibitor) içeren takviyeli harç numuneleri üreterek, klorür içeren bir ortamda değerlendirmişlerdir. Numunelerin, durabiliteleri; korozyon potansiyeli ölçülerek, poroziteleri, karbonatlaşma derinlikleri, donatının zamana bağlı ağırlık kayıpları ve numunelerin basınç dayanımlarını belirleyerek değerlendirmişlerdir. Sonuçlara göre, korozyon önleyici / engelleyici katkıların

kullanılması. yapılan testlerin korelasyonu ile elde edilen verilere göre; donatıyı koruyucu bir etkiye sahiptir ve rölatif hafif harçların mekanik dayanımlarının değişiminde anlamlılık yoktur (130).

Zhang and Gjrv, yüksek dayanımlı hafif agregalı betonlar üzerinde bir dizi çalışma yapmış, imento dozajları 400-600 kg/m³ arasında değişen, SD, ağırlıkça; % 10'a varan oranlarda katılmış, olan numunelerde bağlayıcı miktarlarının, dayanım üzerindeki etkileri çok fazla olmamıştır. Aynı beton karışımları üzerinde yapılan çalışmalarda; betonların su ve klor geçirgenliği araştırılmıştır. Yüksek dayanımlı hafif agregalı betonlarda geçirgenlik çok düşük olmakla beraber aynı dayanımdaki NB'lardan biraz fazla olabilmektedir. Geirgenlikte hafif agregala gözeneklerinden çok, harç fazının gözenek yapısı etkilidir. Çimento dozajında fazla artış geçirgenliği arttırmaktadır (131).

Hossain yaptığı çalışmada, imento ile % 0-15-30 oranlarında bims (VP) 'in yer değiştirilmesi ile su-bağlayıcı oranı; 0,55 olan (VP) katkılı çimentolu harçlar üretmiştir. Bir yıla kadar ulaşan değişik kr sürelerinde, korozyon direnci ve klor yayınımlı (diffusion) araştırmalarının sonuçlarına göre; VP katkılı çimentonun, uzun dönem klor geçirgenliğinin önemli oranda azaldığı ve bu nedenle, harçların uzun dönem korozyon direncinin arttığı belirtilmektedir. % 30 VP katkılı harçlar, klor iyon taşınımlı, klor geçirgenliği ve gömülü donatının pasifleşmesi bakımlarından, katkısız kontrol harçlarından, daha iyi performans gösterdiğini belirtmektedir (132).

Başka bir çalışmada, bims agregası ile üretilen taşıyıcı hafif betonların, içerisindeki donatıyı, korozyona karşı koruma etkinliği araştırılmıştır. Bimsbetonların retiminde, % 0-5-10 oranlarında (imento ağırlığınca) silis dumanı (SD), imento ile yer değiştirilerek kullanılmıştır. Ayrıca %2 süperakışkanlaştırıcı (SA) bir katkının da kullanıldığı seriler üretmişlerdir. Mekanik zellikler bakımından normal betonların, hafif betonlara göre daha

iyi sonuçlar vermelerine rağmen, donatı korozyonu açısından, bimsbetonların yaklaşık aynı koruyucu özelliği gösterebilecekleri belirtilmiştir (133).

Batis and Pantazopoulou, yaptıkları araştırmada, kloritlerin varlığında, organik ve inorganik kaplamaların koruyucu etkisini karşılaştırılmalı olarak incelemek amacıyla, bims agregası kullanarak, (35 MPa dayanımlı) karışımlar hazırlamışlardır. Numuneler, 7 günlük kürden sonra korozyon oranını hızlandırmak için % 3,5 NaCl çözeltisinde, üst yüzeyi 20 mm çözelti içerisinde kalacak şekilde daldırılmıştır. Bu şekilde 10 ay korozyon ortamına maruz bırakılan numunelerin, karbonatlaşma derinliği yaklaşık; 8 mm; donatı ağırlık kaybı; 850 mg, korozyon potansiyeli 6-10 ay arasında sabit yaklaşık; -600 mV, 1. ayda; -430 mV, 2. ayda; -520 mV, 3. ayda; -560 mV olmuştur. Klorür miktarı ise 24 saatte; % 1,56 (W / V) 'ya ulaşmıştır (134).

Batis and Rakanta, yaptıkları çalışmada, katkı veya emdirme katkısı olarak, korozyon önleyici içeren harç numunelerde, donatı çubuklarının korozyonuna karşı koruyucu etkisini araştırmışlardır. Korozyon göçü etkinliği, Yunan bims agregası ile üretilen HB'larda ve yaygın olarak kullanılan harç numunelerinde araştırılmıştır. HB numunelerin yarısı, normal kumla yapılırken, diğer yarısı bims agregası ile üretilmiştir. Korozif ortam oluşturmak üzere; % 3,5 (ağırlıkça) NaCl çözeltisi ve açık atmosfer şartlarında donatıda korozyon oluşmasına izin verilmiştir. Korozyon aktivitesini ve engelleyici katkıların etkisini belirlemek üzere donatılarda ağırlık kaybı, yarı-hücre potansiyeli karbonatlaşma derinliği ve elektrokimyasal ölçümler kullanılmıştır. Deney sonuçlarına göre; genel harç numuneleri, HB'lardan, daha düşük korozyon hızı sağlamaktadırlar. Bims agregasının geçirgen olması, porozitenin artışına neden olmaktadır. Bu da çelik donatının kullanılması durumunda korozyonuna neden olabilecektir. Elde edilen yarı-hücre potansiyellerine göre en yüksek negatif potansiyel değerini bims agregalı harçlar vermiştir. Donatı çubuğunun ağırlık kaybı değerleri de aynı şekilde, hafif harçlar için, normal harçlardan % 26 daha fazladır. Karbonatlaşma derinlikleri ise genel harçlar, hafif agregalı numunelere göre 12 kat daha iyidirler. Beklenen korozyon hızı

ise hafif agregalı numunelerde, % 24,73 oranında, normal numunelere göre daha hızlıdır (135).

2.9.2. Normal beton içindeki donatının korozyonu

“Mineral katkıların en etkili olduğu husus, betonun durabilitesinin iyileştirilmesidir. Yoğun hamur yapısının oluşmasıyla geçirimsizlik azalmakta, bunların sonucu olarak da asit ve sülfatlara dayanıklılık, donma- çözülme tekrarlarına dayanıklılık artmakta, donatı korozyonu riski azalmaktadır” (44).

“Tras, UK, SD gibi mineral katkıları içeren çimentolar donatı paslanmasını yavaşlatırlar. Özellikle sıcak havalarda normal PÇ kullanılmamalıdır. Yüksek sıcaklıklarda paslanma hızı artar. 10 °C'lik bir artış paslanmayı 1,6 kat hızlandırmaktadır” (13, 99).

Yüzer, SD ile yaptığı çalışmada; geçirimsizlik özelliği farklı numuneler üreterek, geçirimsiz betonların donatı korozyonunu nasıl etkilediği deneysel olarak araştırmıştır. Betonun geçirimsiz olması, donatı korozyonuna neden olan en önemli faktörlerden biridir. Araştırmacıya göre; donatı korozyonunda alınacak ilk önemli tedbir, minimum boşluklu, akışkan geçirimsizliği düşük, dayanıklı bir beton üretmektir. SD betonun geçirimsizliğini önemli ölçüde azaltmakta, elektriksel direncini arttırmaktadır (86).

Silis dumanı (SD) katkısı ile üretilen normal betonların, içerisindeki donatıyı korozyona karşı koruma etkinliğinin araştırıldığı başka bir çalışmada SD, % 0-5-10 oranlarında ağırlıkça, çimento ile yer değiştirilerek kullanılmış, süper akışkanlaştırıcı (SA) bir katkı, %2 oranında (çimento ağırlığınca) eklenerek, hem SD hem de SA katkılı ve katkısız normal betonlar üretilmiştir. Çimento yerine belirli oranlarda SD kullanımı, mekanik özelliklerde, %2 SA katkı ile birlikte oldukça iyi sonuçlar vermekte, dayanıklılık bakımından da olumlu etkiler göstermektedir (111).

Yüzer vd., yaptıkları çalışmada, farklı özelliklere sahip beton ile üretilmiş betonarme numunelere hızlandırılmış korozyon deneyi uygulamış, donatıda

örtü betonunun çatlamasına neden olan kritik kaybı, deneysel olarak belirlemişlerdir. Korozyon ürününün donatı çapında neden olduğu artış sonlu elemanlar metodu ile nümerik olarak hesaplamış, deneysel ve nümerik yöntemle belirlenen kritik kayıpların çok yakın değerler vermesi nedeni ile kritik kesit kaybının sonlu elemanlar metodu ile nümerik olarak belirlenebileceği görüşüne varmışlardır (136).

Aköz vd., yaptıkları araştırmada normal ve % 10 SD katılan betonarme elemanlara, farklı konsantrasyonlarda (1500, 10000, 40000 mg/L) klorür içeren NaCl çözeltilerinin etkilerini araştırmışlardır. Bu amaçla karma suyuna NaCl katılarak elde edilen numuneler havada, diğerleri ise NaCl çözeltilerinde saklanmıştır. Her iki grupta 0, 28, 90, 180 ve 300. günlerde numuneler kırılmış, havada bekleyen harçların karbonatlaşma derinliğine bakıldıktan sonra harçlardaki Cl^-/OH^- oranı araştırılmıştır. Aynı günlerde harç içinden çıkarılan donatılarda ağırlık değişimi ölçülmüştür. Elde ettikleri sonuçlara göre SD ile üretilmiş betonun, klorür difüzyonuna karşı iyi bir performans gösterdiği, ancak harcın klorür içermesi durumunda SD'nın olumsuz etkidiğini belirtmişlerdir (137).

Allyn and Frantz yaptıkları araştırmada lolipop ve döşeme numunelerinde 48 haftalık süreçte, NaCl çözeltisinde ıslatma – kurutma çevrimleri esnasında doğrusal polarizasyon metodu ile korozyon oluşumu takip edilmiştir. Çalışmada iki adet ticari markalı korozyon önleyici katkı kullanılmış ve katkı kullanılmamış beton karışımları karşılaştırılmalı olarak incelenmiştir. Kesilerek kontrollü olarak korozyon oluşmasına izin verilen numunelerde, kimyasal katkı kullanılmış ve kullanılmamış numuneler karşılaştırıldığında, katkılı betonlarda korozyonun önemli oranda azaldığı, sağlam bırakılan numunelerde ise katkı kullanımının korozyonu engellediği belirlenmiştir. Silindirik numuneler, 28 gün sonra ıslanma/ kuruma çevrimlerine alınmıştır. Bir haftalık çevrim 4 gün % 15 NaCl çözeltisinde ıslatma, 3 gün 38 °C'de kurutma şeklindedir (138).

Brown et al.'nin yaptığı çalışmada, genellikle elle dökülen betonda, piyasada ticari olarak temin edilebilen korozyon önleyici katkıların, betonun performansına, korozyon önlemiyle ilişkili olmayan kalıcılık (durability) özelliklerine etkisini belirlemiştir. Bu amaçla elde edilen beton ve karışımlar üzerinde çökme (slump), hidratasyon ısı, hava içeriği, basınç dayanımı, klorür yayılımı (diffusion) ve klor geçirgenliği özellikleri araştırılmıştır. Betonlar döküldükten yaklaşık 60 gün sonra, elektrokimyasal deneylerin ilk turuna tabi tutulmuşlar. Deneylerin tamamlanmasından sonra numuneler, % 6 (ağırlıkça) NaCl çözeltisi içerisine 3,5 gün daldırma, 3,5 gün havada (laboratuvar şartlarında) kurutulmuşlardır. Klor içeriklerini derinliğe bağlı olarak belirlemek üzere basınç dayanımı deneyine tâbi tutulan numunelerden, çıkan parçalardan toz numuneler alınmıştır (139).

Flick and Lloyd çalışmalarında, statik ve tekrarlı yükler altında, eğilme çatlakları oluşan elemanlara, % 3 NaCl çözeltisinin püskürtülmesi ile korozyon oluşturmaya çalışmışlardır. Sonuç olarak, NaCl çözeltisi içerisindeki beton numunelerde, 417 gün sonunda, 22 mm'nin ötesine klorit girişi olmamaktadır. Donatı korozyonunu belirlemek için yarı-hücre ölçümlerinden yararlanmışlardır (140).

3. MATERYAL VE METOT

3.1. Materyal

Araştırma materyali, normal ve hafif agrega ile üretilen beton numunelerdir. Beton üretiminde değişik oranlarda, silis dumanı ve % 2 süper akışkanlaştırıcı kullanılmıştır. Beton üretiminde bağlayıcı olarak, PÇ 42,5R çimentosu kullanılmıştır. Bu malzemeler ile üretilen betonların, fiziksel, mekanik, yüksek sıcaklık, donatı korozyonu ve karbonatlaşma özelliklerini kıyaslamak için değişik boyutlarda numuneler hazırlanmıştır.

3.1.1. Agregalar

Araştırmada, normal kırma agrega ve bims agregası olmak üzere iki tip agrega kullanılmıştır.

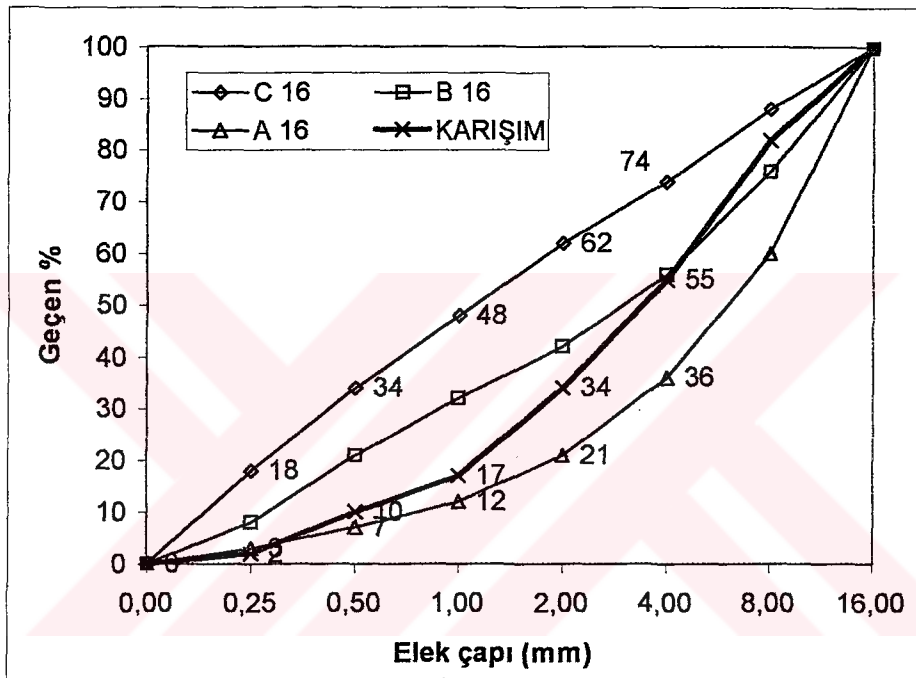
3.1.1.1. Normal kırma agrega

Normal Beton (NB)'ların üretiminde, Ankara-Elmadağ taş ocağından getirilen kırma agrega kullanılmıştır. TS 802 (141)'ye göre en büyük tane çapı 16 mm ($d_{maks.}=16$ mm) seçilmiştir. Agrega üzerinde elek analizi, TS 3530 EN 933-1 (142)'e, yoğunluğu ve su emme oranı TS 3526 (143)'ya, hafif madde oranı TS 3528'e (144), organik madde tayini de TS EN 1744-1'e (146) göre yapılmıştır. Karışımda kullanılan agreganın elek analizi eğrisi ve standart eğri Şekil 3.1'de görülmektedir.

NB'ların üretiminde kullanılan agregalara ait fiziksel özellikler, Çizelge 3.1'de verilmiştir. Agregalar, beton karışımlarında toplam agrega hacminin % 55'i kum (0-4 mm), % 45'i çakıl (4-16 mm) olacak şekilde kullanılmıştır.

Çizelge 3.1. Normal agregalara ait fiziksel özellikler

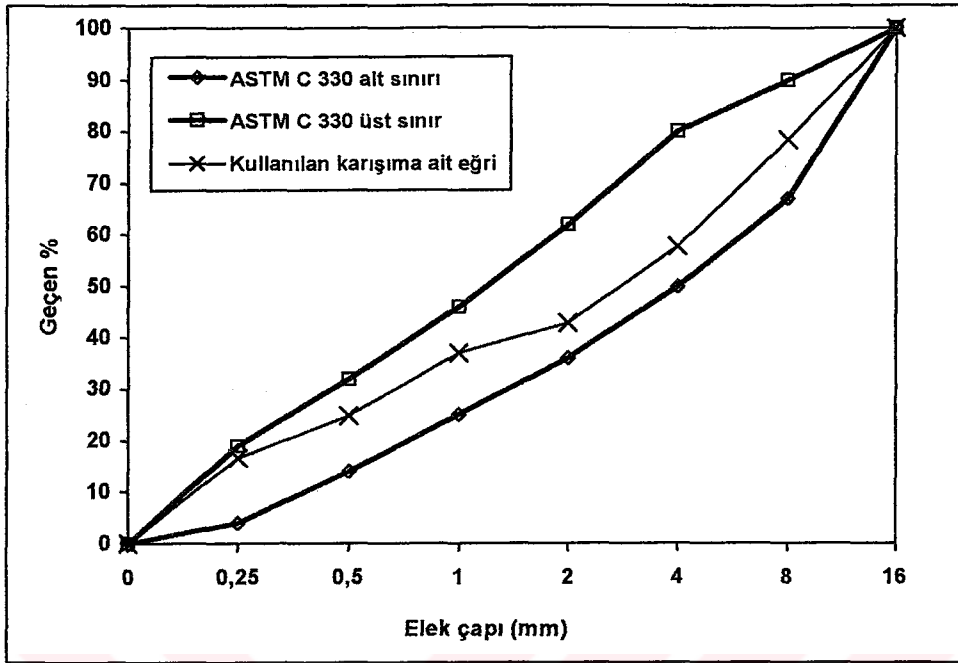
Tane Sınıfı (mm)	Su emme oranı (%)	Yoğunluk (Kg/dm ³)			Hafif madde oranı (%)	Organik madde oranı (%)
		Kuru γ_k	Doygun γ_d	Görünen γ_g		
0-4	2,73	2,39	2,46	2,57	yok	yok
4-16	0,55	2,66	2,68	2,70	yok	yok



Şekil 3.1. Normal agreganın standart ve karışım eğrisi

3.1.1.2. Hafif agregası

Çalışmada kullanılan hafif agregası, Isparta – Gölçük yöresinden temin edilen bims agregasıdır. Bims agregası, yıkanmış, elenmiş, 0-4, 4-8 ve 8-16 mm sınıflandırılarak kullanılmıştır. Bims agregası üzerinde elek analizi, TS 1114 EN 13055-1 (145)'e ve TS 3530 EN 933-1 (142)'a göre yapılmıştır. Şekil 3.2'de bims agregasına ait elek analizi eğrisi ve ASTM C 330'a (25) göre sınır değerler verilmektedir. Bims agregalarına ait fiziksel özellikler Çizelge 3.2'de, kimyasal özellikler de Çizelge 3.5'de verilmiştir.



Şekil 3.2. Bims agregasının karışım ve sınır eğrileri

Çizelge 3.2'de verilen özgül ağırlık faktörü değerleri, karışım hesaplarında kullanılmak üzere TS 2511'e (26) göre belirlenmiştir.

Çizelge 3.2. Bims agregasına ait fiziksel özellikler

Tane Sınıfı (mm)	Tabii Nem (%)	Özgül Ağırlık Faktörü (Kg/dm ³)	Birim Hacim Ağırlık (Kg/dm ³)		Organik madde oranı (%)
			Gevşek	Sıkışık	
0-4	0,33	2,09	1,220	1,364	yok
4-8	0,48	1,75	0,688	0,754	yok
8-16	0,32	1,50	0,605	0,653	yok

3.1.2. Çimento

Çalışmada bağlayıcı olarak Portland Çimentosu (PÇ 42,5R) kullanılmıştır. Çimentonun fiziksel ve mekanik özellikleri ile kimyasal bileşimi, SET Çimento Ankara Fabrikasından alınmış, Çizelge 3.3'de verilmiştir.

Çizelge 3.3. PÇ 42,5R'nun kimyasal bileşenleri, fiziksel ve mekanik özellikleri

Bileşenler (%)	PÇ 42,5	TS EN 197-1
CaO	63,98	---
SiO ₂	20,64	---
Al ₂ O ₃	5,06	---
Fe ₂ O ₃	3,14	---
MgO	1,20	≤ 5,00
SO ₃	2,38	≤ 4,00
K ₂ O	0,8	---
Na ₂ O	0,31	---
Cl	0,035	≤ 0,10
Kızdırma kaybı	1,72	≤ 5,00
Çözünmeyen kalıntı	0,46	≤ 5,00
Anabileşenler		
C ₃ S	52,48	---
C ₂ S	19,63	---
C ₃ A	8,02	---
C ₄ AF	9,15	---
S.CaO	1,12	---
Fiziksel ve mekanik özellikler		
Yoğunluk (kg/dm ³)	3,15	---
Özgül yüzey (cm ² /g)	3350	≥ 2800
Priz (saat: dakika)	başlangıcı	2:30
	sonu	3:16
Basınç dayanımı (MPa)	7 Gün	41,3
	28 Gün	51,2

3.1.3. Karışım suyu

Karışım suyu olarak, Ankara şehir içme suyu şebekesinden sağlanan su kullanılmıştır. Karışım suyu, ASKİ'den sağlanan kimyasal analiz raporuna (Çizelge 3.4) göre TS 500'de (147) beton karışım suyu olarak kullanılabilirliği için sınır değer olarak belirtilen pH ≥7 değerini sağlamaktadır (148).

Çizelge 3.4. Karışım suyuna ait bazı özellikler

Parametre	Ortalama Değer
pH	7,54
Bulanıklık	0,4
Tortu	Tortusuz
Renk	5
Toplam Çözünmüş Madde (mg/l)	141
Sertlik(° fr derece)	8,5
Klorür	14,0
Toplam Demir (mg /l)	0,1
Alüminyum (mg/l)	0,05
Amonyak ve Nitrit	Yok
Organik Madde	1,3
Bakiye Klor	0,8

3.1.4. Silis dumanı (SD)

Beton üretiminde kullanılan SD, Antalya Etibank Elektroferrokrom İşletmesi'nden temin edilmiştir. SD'nın kimyasal bileşimi, SET Ankara Çimento Fabrikasında belirlenerek Çizelge 3.5'de verilmiştir.

Çizelge 3.5. SD ve Bims agregasının kimyasal bileşimleri

Bileşenler (%)	SD	Bims
SiO ₂	80,9	59,0
CaO	0,44	4,60
Al ₂ O ₃	0,34	16,6
Fe ₂ O ₃	0,55	4,80
MgO	5,23	1,80
SO ₃	---	0,40
K ₂ O	4,50	5,40
Na ₂ O	0,35	5,20
Cl	0,13	---
Kızdırma kaybı	2,70	1,60

3.1.5. Süper akışkanlaştırıcı (SA) katkı

Karışımlarda, istenilen işlenebilirliği sağlamak amacıyla yüksek oranda su azaltıcı ve yüksek erken mukavemet sağlayan SA beton katkı malzemesi olarak tanımlanan ve piyasadan temin edilen katkı kullanılmıştır. Rengi, kahverengi-likit, yoğunluğu (20°C'de) 1,21-1,22 kg/lt'dir. Önerilen kullanım oranları; çimento ağırlığının % 0,8-3'üdür. ASTM C 494 (149) Tip F' ye uygun olarak üretildiği belirtilmektedir (150).

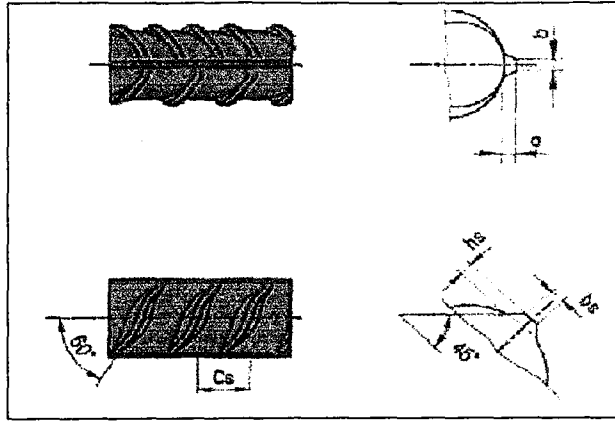
3.1.6. Donatı çeliği

Aderans ve korozyon deneyleri için üretilen beton numunelerde kullanılan donatılar, nervürlü Ø 14'lük, TS 708'e (151) uygun BÇIII-a sınıfıdır (TS 500'de (147) karşılığı– S 420a çeliği). Donatının kesit ve nervür özelliği, Şekil 3.3'de verilmiştir. Donatının, çekme deneyi 6 numune üzerinde TS 138'e (152) göre yapılmıştır. Deney sonunda elde edilen donatıya ait teknik özellikler, Çizelge 3.6'da, gerilme – uzama oranı Şekil 3.4' de verilmektedir.

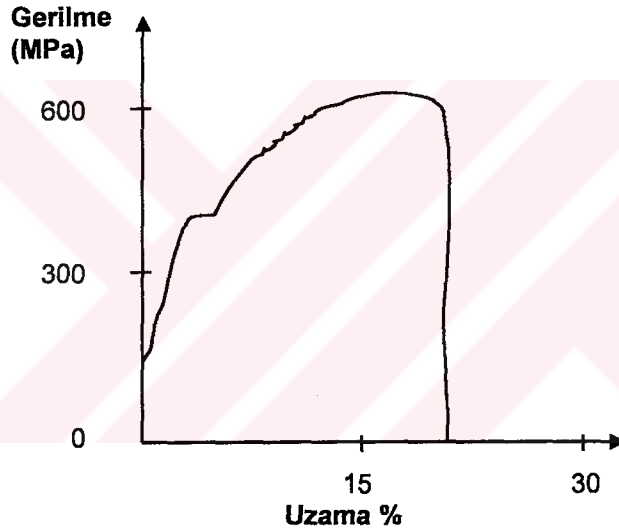
Çizelge 3.6. Donatı çeliğine ait fiziksel ve mekanik özellikler

Anma çapı	β (°)	f_{yk} (MPa)	f_{su} (Mpa)	Kopma uzaması %	Boyutlar					Kesit	Ağırlık
					hs	bs	cs	a	b	S	G
					mm	mm	mm	mm	mm	cm ²	kg/m
14	60	104,33	678,8	23,69	0,98	1,4	9,7	1,4	1,4	1,54	1,21
f_{yk} ; akma dayanımı, f_{su} ; kopma dayanımı, β ; donatı eksenine ile nervür arasındaki açı, bs; enine nervür genişliği, hs; enine nervür yüksekliği					a; boyuna nervür yüksekliği b; boyuna nervür genişliği, S; kesit alanı, G; 1m. Uzunluğundaki çelik donatının ağırlığıdır.						

Donatı çeliği ile ilgili bazı teknik özellikler Şekil 3.3'de gösterilmektedir.



Şekil 3.3. Nervürlü çelik donatının kesit ve profili



Şekil 3.4. Donatı çeliğinin gerilme- uzama yüzdesi eğrisi

3.1.7. Üretilen numunelerin boyut ve sayıları

Araştırmada kullanılan numune boyutları ve sayıları Çizelge 3.7'deki deneme planında verilmiştir. Numuneler sayısal olarak kodlandırılmıştır. Kodları oluşturan sayılarda, binler basamağındaki sayı; 1 ise NB'u, 2 ise BB'u, yüzler ve onlar basamağındaki sayılar SD'nın çimento ile yer değiştirme oranını; (05 ise % 5, 10 ise %10 SD), birler basamağı ise SA katkı oranını ifade etmektedir (0-2). Örneğin; 2102 kodlu numune; BB % 10 SD ve % 2 SA ile üretilen betondur.

Çizelge 3.7. Deneme planı

Deney ve Numune boyutları	Basınç dayanımı 100x100 mm küp	Korozyon araştırması				Aderans Numuneleri 150x150x150 mm küp									
		Yarı-hücre potansiyeli	Karbonatlaşma derinliği a)	Klorür içeriği b)	Ağırlık kaybı c)	Yüksek sıcaklık etkisi Ø 50x100 mm karot									
Açıklama	*	Aynı numune üzerinde her aşamada 5 ölçüm yapılmıştır				20 °C	100 °C	400 °C	800 °C	1000 °C					
	a)	Silindirik numunelerden donatının çekip-çıkarma deneyi ile çıkarılmasından sonra yarılan numunelerden çıkan parçalar üzerinde													
	b)	Silindirik numunelerden donatının çekip-çıkarma deneyi ile çıkarılmasından sonra yarılan numunelerden, yüzeyden itibaren 0-10; 10-20; 20-35 mm derinliklerden alınan toz numuneler üzerinde çalışılmıştır.													
	c)	Çekip-çıkarma yöntemi ile silindirik numunelerden hizalandırılmış korozyon sürecinden sonra çıkarılan donatılar üzerinde													
Numune yaşı	7. gün	28. gün	90. gün	28. gün	%7 NaCl çözeltisinde 17 çevrim sonunda	%7 NaCl çözeltisinde 17 çevrim sonunda	%7 NaCl çözeltisinde 17 çevrim sonunda	90. gün	90. gün	90. gün	90. gün	90. gün			
				TS EN 990 (160)				%7 NaCl çözeltisinde 10 çevrim	%7 NaCl çözeltisinde 17 çevrim						
	1000	5	5	5				20*	3	5	5	5	5	5	5
	1002	5	5	5				20*	3	5	5	5	5	5	5
	1050	5	5	5				20*	3	5	5	5	5	5	5
	1052	5	5	5				20*	3	5	5	5	5	5	5
	1100	5	5	5				20*	3	5	5	5	5	5	5
	1102	5	5	5				20*	3	5	5	5	5	5	5
	2000	5	5	5				20*	3	5	5	5	5	5	5
	2002	5	5	5				20*	3	5	5	5	5	5	5
	2050	5	5	5				20*	3	5	5	5	5	5	5
	2052	5	5	5				20*	3	5	5	5	5	5	5
2100	5	5	5	20*	3	5	5	5	5	5	5				
2102	5	5	5	20*	3	5	5	5	5	5	5				

3.2. Metot

Deney numunelerinin üretimi, G.Ü.T.E.F. Yapı Eğitimi Bölümü Beton Laboratuvarında yapılmıştır. Betonların üretiminde, SD çimento ile % 0, % 5 ve % 10 oranlarında yer değiştirilerek (ikame olarak) kullanılmıştır. Bundan sonraki bölümlerde “SD ikameli” yerine “SD katkılı” ifadesi kullanılmıştır. SA katkı ise çimento ağırlığının yüzdesi cinsinden % 2 oranında karma suyuna karıştırılarak ilave edilmiştir. Taze ve sertleşmiş beton deneyleri aynı laboratuvarında, klorür tayini deneyi DSİ TAKK Dairesi Kimya Laboratuvarında yapılmıştır.

3.2.1. Betonların üretimi ve kürü

Beton karışımlarının üretimi 75 dm³ kapasiteli düşey zorlamalı betonyerde 40 dm³ 'lük harmanlar halinde yapılmıştır. NB karışım hesabı, TS 802'ye (141) göre C 20 betonu hedeflenerek s/b; 0,53 seçilerek yapılmıştır. NB'ların üretiminde agregalar, önceden belirlenmiş olan su emme oranlarındaki su miktarı ile ön nemlendirmeye tabii tutulmuştur. BB'ların üretiminde TS 2511 (26) esas alınmıştır. Betonların üretiminde çökme (slamp) değerinin sabit tutulması hedeflenmiştir. BB'ların üretiminde kullanılan karışım suyu miktarının tespitinde, bims agregasının ilk 30 dakikalık su emme oranına bağlı miktar da göz önüne alınmıştır. Bu su miktarı, agreganın nemlendirilmesinde kullanılmış ve karışım suyunu emmesi, dolayısı ile işlenebilirliği olumsuz etkilemesi önlenmiştir. Bu şekilde istenilen işlenebilirlik sağlanabilmiştir. Bu durum, SA katkı kullanılan karışımlarda da aynı tutulmuştur.

Numunelerin üretiminde sıkıştırma yöntemi olarak, ASTM C 192'ye (153) göre şişleme metodu kullanılmıştır. Kalıplar, betonların yerleştirilmesinden önce piyasadan temin edilen (Separol S-3 isimli) kalıp yağı ile yağlanmıştır. Numuneler, TS EN 12390-2'ye (154) uygun olarak kirece doymun su dolu kür havuzunda, 7 ve 28 gün kür edilmiştir. 90 günlük numuneler, 28 günden

sonra kür havuzundan çıkarılarak, $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ sıcaklık ve % 60 ± 5 bağıl neme sahip laboratuvar ortamında bekletilmiştir.

3.2.2. Taze beton deneyleri

Betondan taze halde iken kıvamını ve birim ağırlığını belirlemek üzere TS EN 12350-1'e (155) uygun olarak alınan numuneler üzerinde, TS EN 12350-2'ye (156) göre çökme (slamp) deneyi yapılmıştır. Buna göre taze beton, çökme hunisine üç tabaka halinde, tüm yüzeye homojen yayılmak şartı ile 25'er defa şişlenerek yerleştirilmiştir. Çökme hunisinin çekilmesi ile konik bir şekil alması beklenen taze beton yığını kendisini bırakmış ve yükseklikte meydana gelen değişim en yakın 5 mm ye yuvarlanarak ters çevrilen huninin üst yüzünden tutulan şişleme çubuğu yardımı ile ölçülmüştür.

Taze beton birim hacim ağırlık değerleri TS 2941'e (157) uygun olarak belirlenmiştir. Taze betondan alınan numuneler, 100x100x100 mm boyutlarındaki küp kalıplara iki eşit tabaka halinde, her tabakanın şişleme çubuğu ile 25'er defa şişlenmesi suretiyle sıkıştırılarak yerleştirilmiş ve yüzeyi çelik düzeltme çubuğu ile düzeltilmiştir. Elde edilen taze beton dolu kalıplar, 50 gr. hassasiyetli 25 kg kapasiteli terazide tartılmış ve boş kalıp ağırlığı elde edilen bu değerlerden çıkarılarak taze betonlara ait net BHA değerleri belirlenmiştir. Yapılan on ölçümün aritmetik ortalaması BHA değeri olarak Bölüm 4.1'de verilmiştir.

3.2.3. Sertleşmiş beton deneyleri

3.2.3.1. Basınç dayanımlarının belirlenmesi

Basınç dayanımı değerleri, 100x100x100 mm'lik küp numuneler üzerinde, 7, 28 ve 90 günde TS EN 12390-3'e (158) göre belirlenmiştir. Her seride en az 5 numune üzerinde deney yapılmıştır. Bütün yaşlarda yükleme hızı; 3 kN/s olarak uygulanmıştır. Basınç dayanımı değerleri, "Eş. 3.1" ifadesi yardımı ile

hesaplanmıştır.

$$f_c = \frac{F}{A_c} \text{ (MPa)} \quad [3.1]$$

Buradaki; f_c ; deney numunesi basınç dayanımı (MPa), F ; kırılma anındaki yük (N), A_c ; deney yükü uygulama yönüne dik deney numunesi kesit alanıdır (mm^2).

3.2.3.2. Aderans (çekme-çıkarma) deneyi

Aderans deneyleri arasında en yaygın olarak kullanılanı, en basit ve en pratik olan, 'eksenel çekme-çıkarma deneyi'dir. Bu deneyde, Resim 3.1 'de gösterildiği gibi, tabandan mesnetlenmiş bir beton prizma veya silindirin içine yerleştirilmiş donatı, alttaki serbest ucundan çekilip, betondan çıkartılmaya çalışılır. Bazı araştırmacılar (3, 9) ve ASTM C 234-91a (159), serbest uçtaki sıyrılmanın 0,25 mm olduğu yükte hesaplanan ortalama aderans gerilmesini, güvenli aderans gerilmesi olarak kabul etmektedirler. Bu yöntem, aderans dayanımının veya kenetlenme boyunun belirlenmesi amacına uygun olmamakla beraber, iki tür donatının aderans ve kenetlenme özelliklerinin belirlenip karşılaştırılmasında uygundur (3).

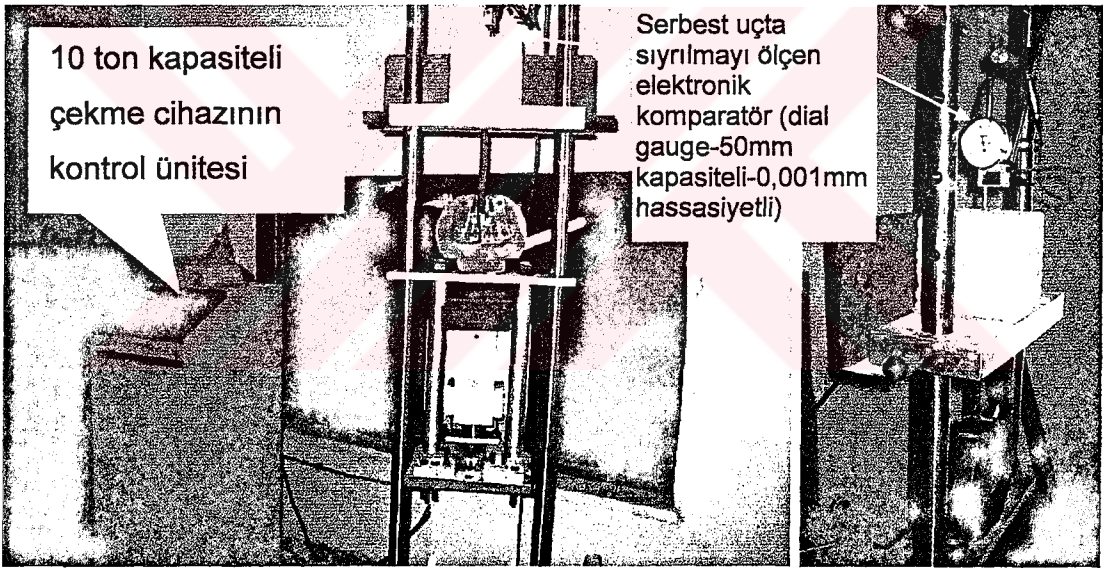
Aderans gerilmesinin belirlenmesinde;

$$\tau_b = \frac{P_1}{\ell_b (\phi \cdot \pi)} \quad [3.2]$$

"Eş. 3.2" ifadesinden yararlanılmıştır (3, 50. Burada, τ_b ; ortalama maksimum aderans gerilmesi (MPa), P_1 ; Maksimum eksenel çekme yükü (kN), ϕ ; donatı çapı (mm), ℓ_b ; donatının betonla temas eden boyudur (kenetlenme boyu; bu çalışmada 150 mm'dir).

Kalıpların içerisinde, donatının dik tutulmasını sağlayan askı sistemi ile birlikte, betonun yerleştirilmesinden önce numune kalıpları Ek 1'de gösterilmiştir. Ek 1' de ayrıca, kalıplardan çıkarılan aderans numuneleri de görülmektedir.

Aderans dayanımı, 150x150x150 mm küp kalıpların orta noktalarında bir askı sistemi yardımı ile yerleştirilmiş olan Ø 14 mm çaplı nervürlü donatı ile donatılmış, beton dökümünün düşey konumda yapıldığı numuneler üzerinde ASTM C 234-91a'ya göre belirlenmiştir (Resim 3.1). Yükleme hızı olarak; 0,075 kN /s uygulanmıştır. Verilerin kaydedildiği data logger Ek 1'de görülmektedir.



Resim 3.1. Aderans dayanımını belirlemek üzere kullanılan deney düzeneğinin çekme ünitesi

3.2.3.3. Yüksek ısıнын beton özelliklerine etkilerinin belirlenmesi

Numune betonlar üzerinde, yüksek ısıнын etkilerini belirlemek üzere TS EN 12390-2'ye (154) uygun olarak, 100x100x500 mm boyutlarında prizma numuneler üretilmiştir. Bunlardan Ø50x100 mm boyutunda karotlar alınmıştır. Elde edilen karotlar, ısınma hızı 5 °C/ dak olan 2000°C kapasiteli Ek 1'de

görülen SFL Advanced High Temperature & Environmental Systems markalı fırında, G.Ü.T.E.F. Metalurji Eğitimi Bölümü Laboratuvarında, 100°C, 400°C, 800°C ve 1000°C sıcaklıklara maruz bırakılmıştır. Her bir sıcaklıkta beşer numune fırın dışına alınmış ve desikatörde oda sıcaklığına kadar soğumaya bırakılmıştır.

Daha sonra numuneler üzerinde, ağırlık değişimi ve TS EN 12390-3'e göre (158) 0,5 kN/s yükleme hızı ile basınç dayanımı deneyleri yapılmıştır. Elde edilen veriler, 20±2°C'de laboratuvarda bekletilen karot numunelerinden elde edilen kontrol değerleri ile karşılaştırılmıştır. Sıcaklıklara maruz bırakılmadan hemen önce 4000 gr. kapasiteli 0,01 gr. hassasiyetli DI-4K marka hassas terazi ile ağırlıkları belirlenen numuneler, belirtilen sıcaklıklara maruz bırakıldıktan ve oda sıcaklığına kadar soğutulduktan sonra aynı terazide tekrar tartılmıştır. İlk ve son ağırlıklar arasındaki farklar, ilk ağırlığın yüzdesi olarak belirlenmiştir. Elde edilen verilerden, yüksek sıcaklık etkisinde NB ve BB'larda ağırlık değişimleri incelenmiştir.

3.2.4. Hızlandırılmış korozyon kürü

Betonarme donatısını temsil eden, Ø14'lük donatı numuneler ile Şekil 3.5'de gösterildiği gibi orta noktasından donatılmış silindirik, Ø100x200 mm boyutlarındaki numuneler, TS EN 12390-2'ye uygun olarak üretilmiş ve 28. güne kadar kirece doymun suda kür edilmiştir. Numuneler, karışıklığı engellemek üzere Ek 1'de görüldüğü gibi etiketlenmiştir. Bu numuneler üzerinde, betonların içindeki donatının korozyona uğramasını sağlamak ve bunu tespit edebilmek için hızlandırılmış korozyon süreci uygulanmıştır.

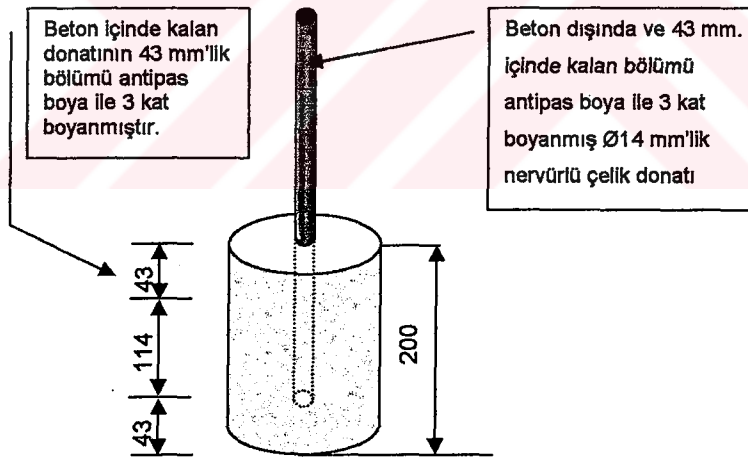
Birinci hızlandırılmış korozyon süreci :

Bunun için 28 günlük kirece doymun su kürü uygulandıktan sonra, ilk olarak, donatıyı korozyona uğratması beklenen, TS EN 990'da (160) önerilen (II.

Metot) uygulanmıştır. Bu metoda göre; deney numuneleri 20 ± 5 °C olan musluk suyuna 2 saat süre ile daldırılmış ve ıslatma işleminden sonra 40 ± 5 °C ortam sıcaklığında 2 saat süre ile kurutulmuştur. Bu ıslatma-kurutma işlemi, standarda göre 30 çevrim yapılmıştır. Fazladan üretilerek bu metoda göre korozyona maruz bırakılan numunelerden çıkarılan donatılarda henüz korozyon oluşmadığı gözlenmiştir. Bu durumda bir çok araştırmacının da uyguladığı ikinci yöntemle geçilmiştir.

İkinci hızlandırılmış korozyon süreci :

Bu hızlandırılmış korozyon süreci ile ıslatma – kurutma çevrimine, daha şiddetli bir ortam olarak önerilen, % 7 NaCl çözeltisi kullanılarak devam edilmiştir (82, 89). Bu şekilde bir çevrim; 3 gün ıslatma, 4 gün 40 ± 5 °C' de etüvde kurutma olacak şekilde toplam, 27 çevrim uygulanmıştır.



Şekil 3.5. Orta noktasından donatılmış silindirik korozyon numunesi
Ölçüler: mm.'dir.

3.2.5. Yarı-hücre (half-cell) potansiyel ölçümleri

BB ve NB'lardan oluşturulan katkılı ve katkısız beton tipleri arasında, beton içindeki donatıyı korozyondan koruma etkinliklerini belirleyerek, karşılaştırmak üzere, ASTM C-876-91'e (123) göre, referans elektrot olarak, Cu /CuSO₄ kullanılan yarı hücre potansiyel aleti ile mV olarak ölçülmüştür. Ölçümler yapılırken, numunelerin NaCl çözeltisinde çıkarılmasından sonra musluk suyu ile yıkanarak, numune yüzeylerinde tuz çözeltisi kalması engellenmiştir. Ayrıca numune yüzeylerinin nemli olması sağlanmış ve yarı-hücre potansiyel ölçüm aletinin sünger kaplı ölçüm ucu betona temas ettirilmeden önce iletkenliği sağlamak üzere ASTM C-876 tarafından önerilen şekilde sabunla köpürtülmüştür.

Yarı-hücre potansiyel ölçümlerinin birincisi; beton numunelerin kirece doymun suda 28 gün kür edilmelerinden sonra, ikincisi; birinci hızlandırılmış korozyon süreci sonunda ve üçüncüsü, ikinci hızlandırılmış korozyon sürecinin 10 çevrimi sonunda yapılmıştır.

Dördüncü ölçüm olan son ölçümler ise ikinci hızlandırılmış korozyon sürecinin 17. çevrimi sonunda yapılmıştır. Her deneyde en az beş numune kullanılmış ve bunlar üzerinde istatistik değerlendirmeler yapılmıştır (123).

3.2.6. Donatıda korozyondan kaynaklanan ağırlık kaybının belirlenmesi

Donatıda ağırlık kaybının belirlenmesinde ASTM G1-90 (125) standardı tarafından önerilen metot kullanılmıştır. Bu metot, birçok araştırmacı tarafından da kullanılmıştır (84, 126, 129, 130, 134, 136, 161, 162). Korozyon numunelerinin üretimi sırasında, donatıların ağırlıkları betonun kalıplara yerleştirilmesinden önce 0,01 g hassasiyetle 4000 gr. kapasiteli DI-4K markalı hassas terazide tartılarak belirlenmiştir. Yarı-hücre potansiyel ölçümleri tamamlandıktan sonra, çekme-çıkarma yöntemi ile beton içerisinden çıkarılan çelik donatı numuneleri, 1000 ml HCl, 24 g Sb₂O₃ ve

71,3 g $\text{SnCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 'dan oluşan Clarke (84) çözeltisi ile temizlendikten sonra aynı hassasiyetle tartılarak, son ağırlıkları belirlenmiştir. İlk ve son ağırlıklar arasındaki farktan, korozyondan kaynaklanan kayıp hesaplanmıştır(Eş. 3.3).

$$W_L = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100 \quad [3.3]$$

Formüldeki simgeler;

W_L : Ağırlık kaybı (%)

m_1 : ilk ağırlık (g)

m_2 : son ağırlık (g) 'tır.

3.2.7. Klorür miktarı tayini

Betonların içerisindeki donatıların çekilip çıkarılmasından sonra elde edilen parçalardan, yüzeyden itibaren, 0-10 mm, 10-20 mm ve 20-35 mm derinliklerinden alınan toz numuneler üzerinde TS EN 1744-1'e (146) göre klorür miktarı tayini deneyi yapılmıştır.

Deneyde kullanılmak üzere; 0,05 N gümüşnitrat (AgNO_3) bir miktar suda çözündürülerek, balon jodede litreye tamamlanmıştır. Ayar çözeltisi olarak; 140°C 'de etüvde kurutulmuş; 0,05 N sodyum klorür (NaCl), bir miktar damıtık suda çözündürülerek balon jodede litreye tamamlanmıştır. Potasyumkromat indikatörü (K_2CrO_4), 50 g olarak suda çözölmüştür. Hafif kırmızı renk verinceye kadar AgNO_3 çözeltisi konmuştur. Bu çözelti, en az 12 saat bekletilerek süzülmüş, 1 litrelik balon jodaye alınmış ve damıtık su ile litreye tamamlanmıştır.

Buna göre; Argentometrik metotla titrasyon yapılmak üzere, alınan toz numuneler, $105 \pm 5^\circ\text{C}$ 'de etüv kurusu durumuna getirilerek; 0,09 mm göz açıklıklı tel elekten elendikten sonra, 0,0001 g duyarlılıkla tartılarak, 1 gramı deney için ayrılmıştır. Bundan sonra, 1 g'lık toz numune, 200 ml damıtık su

bulunan 400 ml'lik beher içinde, ağzı kapatılarak 1 saat kaynatılmış ve sonra çökmesi için bekletilmiştir. Çözelti, beyaz bant süzgeç kağıdından süzdürülmüş, süzgeç kağıdı üzerinde kalan çökelek, 250 ml'lik damıtık su ile 500 ml'ye tamamlanmıştır. Bu çözeltinin 50 ml'si bir kaba alınarak, potasyumkromat indikatörü ilave edilmiş, 0,05 N gümüşnitrat çözeltisi ile renk sarıdan, pembemsi sarıya dönüşene kadar titre edilmiştir. Tüketilen gümüşnitrat çözeltisinin hacmi büretten okunmuştur. Elde edilen değer,

$$Cl^{-} = 1.772 \frac{(S - B)}{A} (\%) \quad [3.4]$$

“Eş. 3.4”de yerine konarak, beton ağırlığının yüzdesi olarak klorür miktarı belirlenmiştir. Burada;

Cl^{-} = Betonun klorür miktarı (Beton ağırlığının yüzdesi olarak, $105 \pm 5^{\circ}C$ 'da kurutulmuş betonun, ağırlığının yüzdesi olarak) (%)

S = 50 ml için harcanan 0,05 N gümüşnitrat hacmi (ml)

B = 50 ml damıtık su için harcanan 0,05 N gümüşnitrat hacmi (ml)

A = Etüv kurusu durumuna getirilmiş ve öğütülmüş deney numunesinin 0,09 mm göz açıklıklı elekten geçen yaklaşık 1 g'lık kısmın ağırlığıdır.

3.2.8. Karbonatlaşma derinliğinin belirlenmesi

Beton yüzeyine püskürtülen baz indikatörü, pH değeri 11-12,5 olan karbonatlaşmamış betonu koyu pembe renge dönüştürür. Karbonatlaşma sonucu pH değeri 8-9'a düşmüş beton, renk değişimi göstermez. Baz indikatörü olarak kullanılan çözelti fenolfetalin çözeltisidir (14, 111). Karbonatlaşma derinliğinin belirlenmesi deneyi, Baradan vd. (60) ve Hearn et al. (163)'de de belirtilen metoda göre yapılmıştır. pH'ı 8,2-9,8 olan

fenolfetalin'in % 1 olarak kullanıldığı, etil alkol ile hazırlanan çözeltinin püskürtülmesinden hemen sonra kırık beton yüzeyinde kırmızı-mor renge dönüşen karbonatlaşmamış ve yüzeyden itibaren rengi değişmeyen iki bölge oluşmuştur. Kumpas yardımı ile 0,01 mm hassasiyetle yapılan çok sayıda ölçümden elde edilen veriler istatistik analize tabi tutulmuşlardır.



4. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Taze Beton Özellikleri

NB üretiminde kullanılan malzeme miktarları ve bazı taze beton özellikleri Çizelge 4.1'de verilmiştir. % 2 SA ilave edildiğinde çökme 7 ± 2 cm sabit tutulmaya çalışılmıştır. % 2 SA katıldığında çökmede 2,0 cm'lik bir artış görülmüştür. Bundan dolayı karışım suyu çökmeye bağlı olarak azaltılmıştır. SD ilave edildiğinde su miktarı artmıştır. taze NB ağırlığında katkı maddesine bağlı olarak belirli bir artış veya azalma görülmemiştir. Bu karışımların, s/b oranı 0,53 ile 0,47 arasında değişmiştir. Bu değişimi sağlayan SA katkısıdır. BB üretiminde kullanılan malzeme miktarları ve bazı taze beton özellikleri, Çizelge 4.2'de verilmiştir. BB üretiminde s/b oranının yaklaşık; 1,0 olduğu görülecektir. Ancak buradaki su miktarının içinde, bims agregasının ilk 30 dakikalık su emme oranına bağlı miktar da göz önüne alınmış, bu şekilde istenilen kıvam sağlanabilmektedir.

Çizelge 4.1. Taze NB'u oluşturan malzeme miktarları (1m^3) ve bazı özellikleri

Numune Kod No	Çimento (kg)	Su (lt)	Agrega (kg)		SA (kg)	SD (kg)	Slump (cm)	Taze Beton Birim Ağırlığı (kg/m^3)
			0-4 mm	4-16 mm				
1000	386	205	788	962	---	---	5,50	2367
1002	386	174	788	962	7,72	---	7,70	2385
1050	367	214	783	957	---	19,32	10,9	2347
1052	367	164	788	962	7,72	19,30	9,80	2365
1100	347	224	782	957	---	38,67	10,2	2325
1102	348	164	788	962	7,73	38,62	9,20	2342

Çizelge 4.2. Taze BB'u oluşturan malzeme miktarları (1 m^3) ve bazı özellikleri

Numune Kod No	Çimento (kg)	Su (lt)	Agrega (kg)			SA (kg)	SD (kg)	Slump (cm)	Taze Beton Birim Ağırlığı (kg/m^3)
			0-4 mm	4-8 mm	8-16 mm				
2000	430	415	730	550	52	---	---	8,4	1809
2002	430	390	730	550	52	8,6	---	6,4	1840
2050	408,5	420	729	549	52	---	21,50	7,2	1792
2052	408,5	393	729	549	52	8,6	21,51	7,1	1811
2100	387	420	729	549	52	---	43	6,8	1772
2102	387	391	730	550	52	8,6	43	6,2	1787

NB'larda ve BB'larda, SD kullanım oranına bağılı olarak karışım suyunda bir artış olmaktadır. Küçük kürecikler halindeki SD taneleri, daha büyük çimento tanelerinin arasındaki su ile yer değiştirerek granülometriyi iyileştirir ve serbest su miktarını artırırlar. Bu olumlu etkiye rağmen SD tanelerinin ıslanması gereken toplam yüzey alanından dolayı, su ihtiyacının SD miktarı ile orantılı olarak artmasına neden olmakta ve kıvamı olumsuz etkilemektedir (45, 51). SA katkı kullanılan karışımlarda ise Çizelge 4.1'den de görüldüğü gibi istenilen çökme (slump) değeri, SD kullanılan karışımlar da dahil olmak üzere kolaylıkla sağlanılabilmektedir. TBHA değerlerine bakıldığında, tek başına SD kullanım oranının artışına bağılı olarak düşük bir azalma eğilimi varken, SA ile birlikte kullanılması durumunda bu eğilim çok değişmemiştir. Burada verilmiş olan TBHA değerleri, yapılan 10 ölçümün aritmetik ortalamasıdır.

4.2. Sertleşmiş Beton Özellikleri

4.2.1. Bazı fiziksel özellikler

Betonlarda, 28 günlük numuneler üzerinde elde edilen bazı fiziksel özelliklerin aritmetik ortalamaları Çizelge 4.3'de verilmiştir.

Çizelge 4.3. Sertleşmiş betonlara ait bazı fiziksel özellikler

Beton Tipi	Birim Ağırlık (kg/m ³)	Yoğunluk (kg/m ³)	Su Emme Oranı (%)
1000	2297	2445,11	5,82
1002	2325	2448,89	5,13
1050	2273	2370,43	4,63
1052	2302	2445,36	4,27
1100	2248	2333,74	5,06
1102	2277	2380,24	2,84
2000	1678	1782,16	5,90
2002	1722	1872,28	5,83
2050	1665	1781,00	6,42
2052	1711	1861,73	5,97
2100	1656	1767,61	8,25
2102	1696	1821,68	8,11

Çizelge 4.3'den görüleceği gibi BHA bakımından en yüksek değerleri; SA katkılı numuneler vermişlerdir. BHA değerlerinde, SD oranına bağlı olarak zayıf bir azalma eğilimi vardır. Sertleşmiş betonlarda, katkı oranı – birim ağırlık ilişkisinde, taze beton BHA değerleri ile bir paralellik olduğu söylenebilir. En yüksek birim ağırlık, NB'larda; % 2 SA katkılı (1002) numunelerde (2325 kg/m^3) iken, BB'larda; % 2 SA katkılı (2002) serilerde görülmüştür (1722 kg/m^3).

Su emme oranlarına bakıldığında ise; NB'larda; SA katkı kullanılan ve SA ile SD'nin birlikte kullanıldığı karışımlarda, katkısız NB'lara (1000) göre bir azalma gözlenmiştir. Bunların içinde, en düşük su emme oranı 1102 kodlu numunelerde görülmektedir (% 2,84). BB'larda ise; en yüksek su emme oranı değeri, 2100 kodlu numunelerde rastlanırken, 2000 kodlu numunelerle bir karşılaştırma yapıldığında, kesin olmamakla birlikte SD ve SA katkı kullanımının su emme oranını olumsuz etkilediği söylenebilir.

BB'larda SD, birim ağırlığı ve yoğunluğu azaltırken, su emme oranında bir artış sağlamaktadır. SA katkı kullanıldığında ise betonda su emme oranında bir azalma ve yoğunlukta SD'li betonlara göre artış söz konusudur. Buna neden olarak; SA katkının betonun sıkışmasında olumlu etkisi olduğu söylenebilir.

Betonların BHA'ları birbirleri ile karşılaştırıldığında; NB'lardan, en düşük birim ağırlık değerine sahip olan 1100 kodlu numunelerin, 2248 kg/m^3 olduğu göz önüne alındığında, taşıyıcı BB'lardan en yüksek birim ağırlığa sahip olan 2002 kodlu numunelerde (1722 kg/m^3) bile ~% 23 hafiflik sağladığı söylenebilir. Hüsem, benzer sonuçlara, % 33 oranında azalma ile ulaşmıştır (6).

4.2.2. Basınç dayanımı

Basınç dayanımı deneyi sonunda, her seride en az 5 numuneden alınan NB ve BB'lara ait ortalama ve standart sapma değerleri Çizelge 4.4'de verilmiştir.

Çizelge 4.4. Betonlarda basınç dayanımlarının ortalama ve standart sapma değerleri

Beton Yaşı (Gün)	Beton Tipi	N	$f_{\bar{\alpha}}$ (MPa)	*)	Std. S. (MPa)	1)	Beton Tipi	N	$f_{\bar{\alpha}}$ (MPa)	†)	Std. S. (MPa)	1)
7	1000	4	31,79	81	0,73	100	2000	5	18,80	77	0,98	100
	1002	5	45,49	116	0,60	143	2002	5	20,58	84	1,09	109
	1050	5	29,23	75	0,60	92	2050	5	18,93	77	0,47	101
	1052	5	42,96	110	0,87	135	2052	5	20,18	83	0,81	107
	1100	5	23,66	60	0,53	74	2100	5	18,69	77	0,74	99
	1102	5	43,93	112	1,29	138	2102	5	22,22	91	0,68	118
28	1000	4	39,18	100	2,01	100	2000	5	24,43	100	1,04	100
	1002	5	47,08	120	1,80	120	2002	5	25,60	105	2,07	105
	1050	5	41,12	105	2,03	105	2050	5	23,50	96	1,54	96
	1052	5	55,01	140	3,52	140	2052	5	26,21	107	3,35	107
	1100	5	34,09	87	1,74	87	2100	5	22,26	91	0,95	91
	1102	5	58,62	150	2,14	150	2102	5	28,26	116	2,62	116
90	1000	4	40,34	103	2,09	100	2000	5	25,40	104	1,24	100
	1002	5	51,70	132	5,97	128	2002	5	25,28	103	3,24	100
	1050	5	45,74	117	5,54	113	2050	5	24,31	100	0,70	96
	1052	5	61,01	156	5,24	151	2052	5	26,23	107	2,44	103
	1100	5	36,78	94	7,92	91	2100	5	24,42	100	2,36	96
	1102	5	66,47	170	6,54	165	2102	5	28,58	117	3,02	113
*) : Parantez içindeki değerler; basınç dayanımı değerlerinin 28 günlük katkısız NB basınç dayanımına göre yüzdeleridir. †) : Parantez içindeki değerler; basınç dayanımı değerlerinin 28 günlük katkısız BB basınç dayanımına göre yüzdeleridir. 1) : Betonlarda her yaş için 1000 ve 2000 numunelerin yüzdesi olarak basınç dayanımı değişimi												

NB'larda; 7 günlük en yüksek basınç dayanımını 1002 kodlu numune vermiştir. Burada, 1000 kodlu NB'a göre % 16'lık bir artış söz konusudur. En düşük dayanım; 1100 kodlu numunelerde görülmüştür. Burada ise 28 günlük 1000 kodlu NB'ların % 60'ı oranında bir dayanım elde edilmiştir. 28 günlük dayanımlarda, en yüksek değere, 1102 kodlu numunelerde, şahit 1000 kodlu NB'a göre % 50 artış oranı ile ulaşılmıştır. Bu, SD'nın SA katkı ile birlikte kullanılması durumunda basınç dayanımının arttığını gösteren, Malhotra vd. (51) ve Neville (164)'in çalışması ile de uyum göstermektedir. En düşük

dayanım ise 1100 kodlu numunelerde (% 13 azalma) görülmüştür. Aynı durum, 90 günlük dayanımlarda da söz konusudur. Bu yaşta en yüksek dayanıma yine 1102 kodlu numunelerde ulaşılmıştır. Buradaki artış oranı şahit 1000 kodlu NB'a göre % 70 olmuştur. Genel olarak; bütün yaşlarda SD ve SA katkının birlikte kullanıldığı numunelerde, SD kullanım oranının artışına bağlı olarak basınç dayanımlarında bir artış eğilimi vardır. SD'nın belirli oranlarda çimento ile değiştirilmesinin, betondaki boşlukları doldurması ve puzolanik aktivitesi sayesinde beton basınç dayanımını az da olsa olumlu yönde etkilediği söylenebilir (14).

BB'larda basınç dayanımı değerleri için 7. günde en yüksek basınç dayanımı 2102 kodlu numunelerde elde edilmiştir. Burada elde edilen dayanım, 28 günlük şahit 2000 kodlu numunenin % 91'ine ulaşmıştır. En düşük dayanımı, 2100 / 2000 / 2050 kodlu numuneler vermişlerdir.

28 günlük dayanımlarda ise; 2102 kodlu numune bütün numuneler içinde en yüksek değeri vermiştir. Buradaki artış oranı 2000 kodlu numuneye göre % 16 olmuştur. 2052 kodlu BB'lar ise 2000 numunelerine göre % 7'lik bir artış sağlamışlardır. Bu numuneler arasında, SD'nın yalnız başına kullanım oranı artarken, basınç dayanımı azalmaktadır. 90 günlük dayanımlarda; 7 ve 28 günlük dayanımlara benzer bir şekilde en yüksek sonuç; 2102 kodlu numunelerde elde edilmiştir. Artış oranı 2000 kodlu numuneye göre % 17 olmuştur. 2052 kodlu numunelerde ise % 7 artış görülmüştür. Diğer beton serileri arasında, belirgin bir değişim olmamıştır.

BB'larda, bütün yaşlarda en iyi basınç dayanımını 2102 kodlu numune vermektedir. Kesin olmamakla birlikte, SD'nın tek başına kullanımının, basınç dayanımını azalttığı söylenebilir. Bunun sebebi; SD kullanılarak üretilen betonların yüksek miktarda karışım suyuna ihtiyaç duymasıdır. SD'nın su gereksiniminin karşılanmasında SA katkı kullanılması önerilmektedir (14). Çünkü beton dayanımını etkileyen en önemli etken s/b oranıdır ve bu oran; dayanım ile ters orantılıdır (119).

SD katkı kullanılarak üretilen betonların 28 günden sonraki dayanımlarında artış oranı azalmaktadır. 90 günlük dayanımları, 28 günlük dayanımlarından çok az miktarda yüksektir. Sonuçlar, Zhang and Gjörv (165)'un elde ettikleri sonuçlarla paralellik göstermektedir.

NB'ların, basınç dayanımı değerlerinin, anlamlı değişip değişmediğini belirlemek amacı ile sonuçları Çizelge 4.5'de verilen iki faktörlü varyans analizi yapılmıştır. Buna göre sonuçlar, hem beton tiplerinin [$F_{(5,23)}=129,622$; $p<0,05$], hem ölçüm yaşının değişimi [$F_{(2,46)}=97,172$; $p<0,05$] hem de her ikisinin ortak etkisine bağlı olarak, $\alpha=0,05$ anlamlılık düzeyinde fark göstermektedir [$F_{(10,46)}=3,754$; $p<0,05$].

Çizelge 4.5. NB'larda katkı kullanımının beton yaşı ile değişimi için iki faktörlü varyans analizi (ANOVA) sonuçları

Varyansın kaynağı	KT	sd	KO	F	p
Numune tipleri arası	7608,487	28			
Numune(1000/1002/1100/1050/1102/1052)	7347,733	5	1469,547	129,622	,000
Hata	260,754	23	11,337		
Numuneler içi	4144,129	58			
Ölçüm(7 / 28 / 90. gün)	2898,235	2	1449,118	97,172	,000
Numune tipi * Ölçüm	559,902	10	55,99	3,754	,001
Hata	685,992	46	14,913		
Toplam	11752,616	86			

BB numunelerin basınç dayanımlarına ait istatistiksel değerlendirmede iki faktörlü varyans analizi yapılmış, sonuçları Çizelge 4.6'da verilmiştir.

BB tipleri arasında rakamsal olarak önemli bir değişiminden bahsedilmese de istatistiksel değerlendirmede $\alpha=0,05$ düzeyinde anlamlı fark olduğu görülmektedir. Bu durum, iki faktörlü varyans analizi sonucunda belirlenmiştir [$F_{(5,24)}=9,101$; $p<0,05$]. Farklı yaşlarda elde edilen basınç dayanımı değerleri arasında da $\alpha=0,05$ düzeyinde anlamlı fark vardır [$F_{(2,48)}=73,281$; $p<0,05$]. Ancak iki faktörün ortak etkisi anlamlı değildir [$F_{(10,48)}=0,716$; $p<0,05$].

Çizelge 4.6. BB'larda katkı kullanımının beton yaşı ile değişimi için iki faktörlü varyans analizi (ANOVA) sonuçları

Varyansın kaynağı	KT	sd	KO	F	p
Numune tipleri arası	247,026	29			
Numune(2000/2002/2100/2050/2102/2052)	161,731	5	32,346	9,101	,000
Hata	85,295	24	3,554		
Numuneleriçi	715,492	60			
Ölçüm(7 / 28 / 90. gün)	519,831	2	259,915	73,281	,000
Numune tipi * Ölçüm	25,413	10	2,541	0,716	,705
Hata	170,248	48	3,547		
Toplam	962,518	89			

NB'larda, 28 günlük basınç dayanımlarında oluşan, anlamlı farkın hangi altgruplarda olduğunu belirlemek üzere Scheffe çoklu karşılaştırma testi yapılarak, sonuçları Çizelge 4.7'de verilmiştir.

Çizelge 4.7. 28 günlük NB basınç dayanımlarının çoklu karşılaştırma testi sonuçları

	Numune Tipi	N	Alt gruplar (MPa)				
			1	2	3	4	5
Scheffe ^a	1100	5	34,09				
	1000	4		39,18			
	1050	5		41,12			
	1002	5			47,08		
	1052	5				55,01	
	1102	5					58,62
	p		1,000	0,101	1,000	1,000	1,000

a Anlamlılık düzeyi $\alpha = 0,05$.

Buna göre, şahit 1000 ve 1050 kodlu numuneler arasında $\alpha=0,05$ düzeyinde anlamlı bir fark yok iken, diğer beton tipleri arasında, anlamlı bir fark vardır. En yüksek dayanıma, 1102 kodlu numunelerde ulaşılırken (58,62 MPa), en düşük sonuçlar; 1100 kodlu numunelerde elde edilmiştir (34,09 MPa). Bunun sebebi; SD'nın tek başına kullanılması ile belirli bir işlenebilirlik için karışım suyu ihtiyacını artırmaları olabilir. Bu durumda, ya SA katkı kullanmak ya da s/b oranını artırmak gerekecektir. s/b oranını arttırmak dayanımın düşmesine neden olacaktır. Maage'ye göre; % 5-10 SD kullanımı, erken yaşlarda

dayanımı artırırken, 28. günden itibaren, bakım yapılsa dahi dayanımlarında azalma olmaktadır (51).

BB'larda anlamlı fark olan beton tiplerini belirlemek amacı ile çoklu karşılaştırma için, sonuçları Çizelge 4.8'de verilen Scheffe testi uygulanmıştır. Çoklu karşılaştırma sonuçlarına göre 2102 kodlu BB'lar (28,26 MPa) diğerlerine göre $\alpha=0,05$ düzeyinde anlamlı olarak farklıdır. 2052 ve 2002; 2002 ve 2000; 2000, 2050 ve 2100 kodlu numuneler ise birbirlerine göre anlamlı olarak fark göstermemişlerdir.

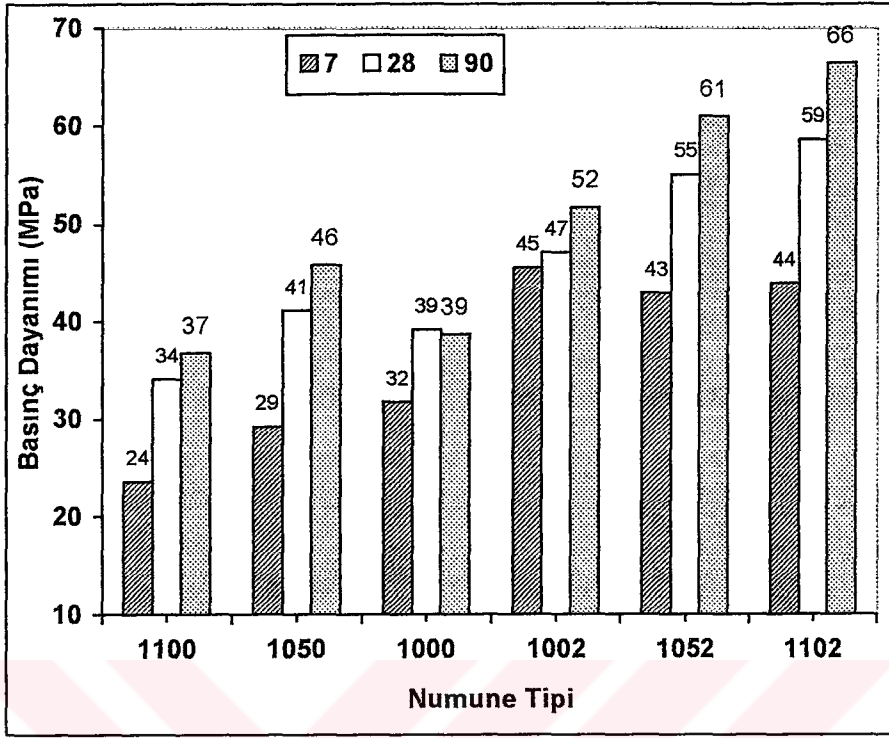
Çizelge 4.8. 28 günlük BB basınç dayanımlarının çoklu karşılaştırma testi sonuçları

	Numune Tipi	N	Altgruplar (MPa)			
			1	2	3	4
Scheffe ^a	2100	5	22,26			
	2050	5	23,50			
	2000	5	24,43	24,43		
	2002	5		25,60	25,60	
	2052	5			26,21	
	2102	5				28,26
	p		,062	,187	,107	,096

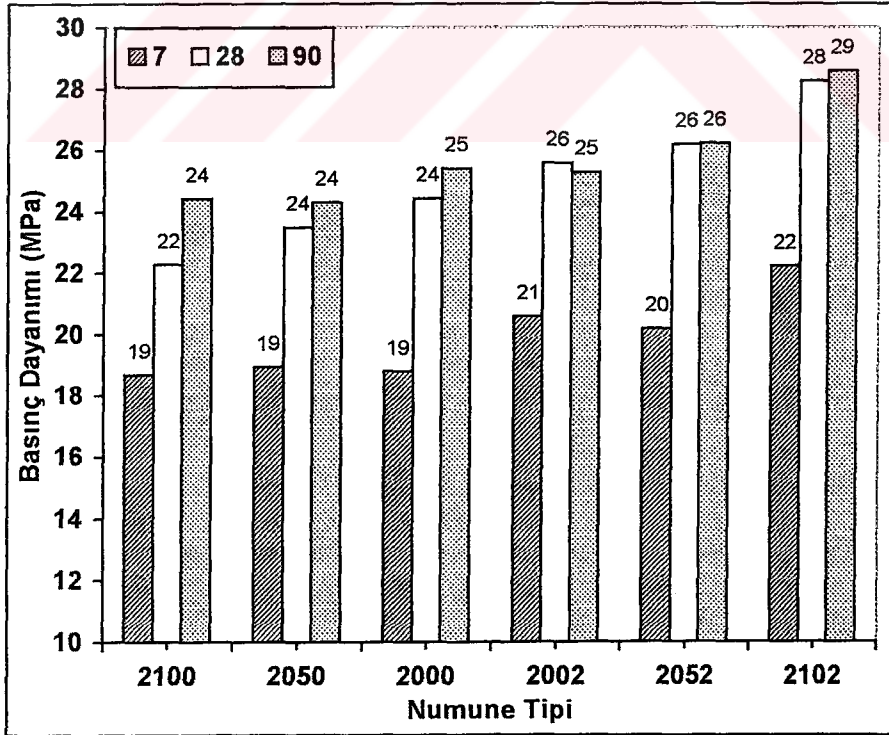
a Anlamlılık düzeyi $\alpha = 0,05$.

Elde edilen ortalama basınç dayanımlarına ait sütun grafikler, beton yaşına bağlı olarak Şekil 4.1 ve Şekil 4.2'de verilmektedir.

Şekil 4.1'e göre, sadece SD kullanılarak üretilen NB'larda, 7 günlük basınç dayanımlarında bir artış eğilimi olduğu söylenebilir. Ancak, 28 ve 90 günlük dayanımlar için bunu söylemek mümkün değildir. Aynı şekilde, SD ve SA katkının birlikte kullanıldığı betonlarda, 7 günlük dayanımlarda bir artış eğilimi olduğu söylenemez. 1050 kodlu betonlarda, 1000 kodlu şahit betonlara göre ~% 5 artış olurken, SD oranının %10 olduğu 1100 kodlu numunelerde; ~% 13 azalma ortaya çıkmıştır.



Şekil 4.1. NB'larda beton yaşına bağlı basınç dayanımı-numune tipi ilişkisi



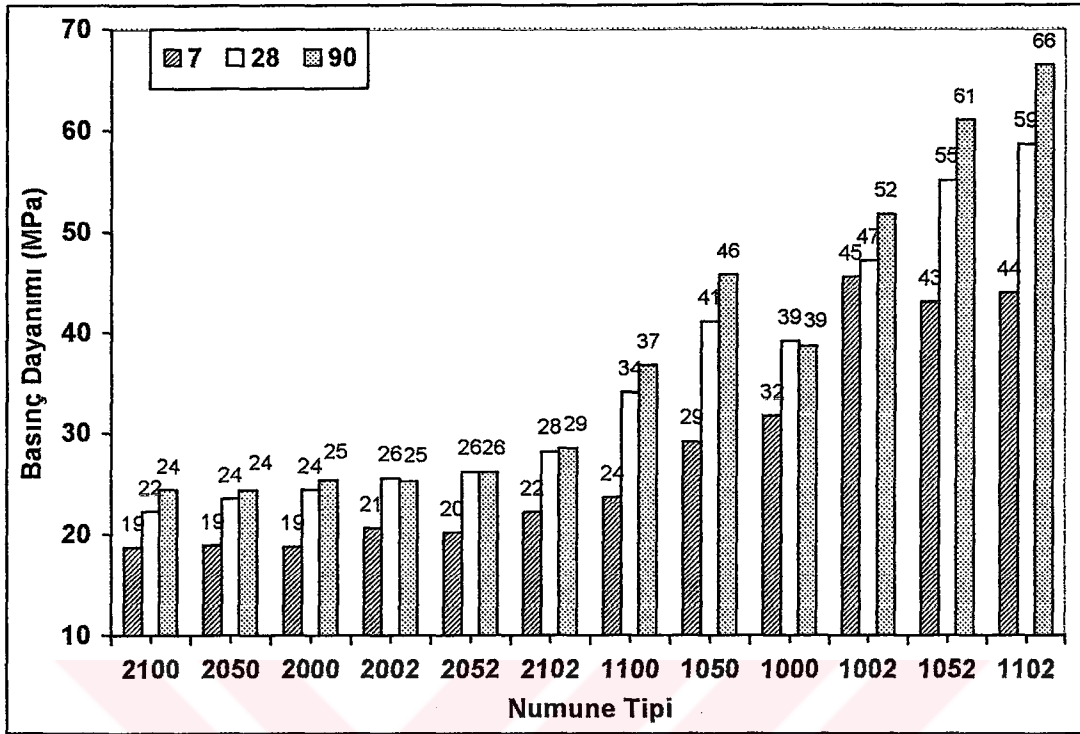
Şekil 4.2. BB'larda beton yaşına bağlı basınç dayanımı-numune tipi ilişkisi

Şekil 4.2 incelendiğinde; BB'larda 7 günlük basınç dayanımlarına SD katkının tek başına kullanılmasının etkisi olmadığı gözlenirken, SA katkı ile birlikte kullanıldığında da aynı durum söz konusudur. 28 ve 90 günlük betonlarda ise SD'nın tek başına kullanımında, dayanımlar az da olsa olumsuz etkilenmiştir. SD ve SA'nın birlikte kullanımında ise % 5 SD için bir değişiklik görülmezken, % 10 SD için az da olsa bir artış olmuştur.

Şekil 4.3'te beton basınç dayanımlarının SD-SA kullanılma durumu ile beton yaşına göre oluşturulan grafik, toplu bir değerlendirme için yardımcı olacaktır.

NB ve BB'lar birlikte göz önüne alındığında, 2000 kodlu BB'ların çimento dozajının; 430 kg/m^3 (Çizelge 4.1) 1000 kodlu NB'un 386 kg/m^3 (Çizelge 4.2) olmasına rağmen, 2000 kodlu BB'lar ile 1000 kodlu NB'lar arasında, bütün serilerde, NB'un açık üstünlüğü söz konusudur. Bunun sebebi, BB'un üretildiği bims agregasının tabii olarak gözenekli olan yapısından kaynaklanan basınç dayanımlarının, kalker agregasına göre çok düşük olmasıdır (9, 166). Çimento dozajının bir dereceye kadar artışı ile BB'ların basınç dayanımları arttırılabilmekte ancak, harç fazının göçmesi ile agregaya aktarılan gerilmeler, yetersiz agrega tepkisi nedeni ile karşılanamamaktadır (10, 12).

Cengizkan ve Ersoy'un çalışmalarında; 430 kg/m^3 çimento dozajı ile 16 MPa silindir basınç dayanımına ulaşıldığı belirtilmiştir (9). Hüsem'in çalışmasında, katkısız HB numunelerden ($S/\bar{C}=0,50$ için) elde edilen, standart silindir basınç dayanımlarının; NB'ların, ~%51'i olduğu bildirilmiştir (6).



Şekil 4.3. Beton yaşına bağlı basınç dayanımı-numune tipi ilişkisi

Ek 2'de sırası ile NB ve BB'larda, numune tipine bağlı basınç dayanımı-beton yaşı ilişkisi görülmektedir. Buna göre beton yaşı arttıkça basınç dayanımında çoğunlukla lineer bir artış olmaktadır. Bu durum literatürle paralellik göstermektedir.

4.2.3. Aderans dayanımı

Çekme – çıkarma deneyleri sonucunda elde edilen verilerin, istatistik analizleri sonucunda elde edilen ortalama ve standart sapma değerleri ile aderans dayanımlarına ait bilgiler, Çizelge 4.9'da verilmiştir. Bu çizelge incelendiğinde; katkı olarak sadece SD'nın kullanıldığı numunelerde elde edilen değerlerde bir azalma veya çok az bir artış görülürken, SD ve SA katkının birlikte kullanılması durumunda, aderans gerilmesinde artış görülmektedir.

Çizelge 4.9. Eksenel çekme-çıkarma deney sonuçları

Beton Tipi	Maksimum Eksenel Yük		Maksimum Aderans Gerilmesi
	P ₁ (kN)	Std.Sapma (kN)	τ_b (Mpa) *
1000	63	1,14	9,55 (100)
1002	76	1,48	11,52 (121)
1050	65	4,16	9,85 (103)
1052	85	3,65	12,88 (135)
1100	58	1,58	8,79 (92)
1102	94	2,70	14,25 (149)
2000	48	2,55	7,28 (100)
2002	49	2,55	7,43 (102)
2050	46	2,17	6,97 (96)
2052	52	1,30	7,88 (108)
2100	44	2,24	6,67 (92)
2102	56	2,24	8,49 (117)

*: Parantez içindeki değerler, 1000 ve 2000 kodlu numunelerin yüzdeleri cinsindendir.

NB'larda ve BB'larda, donatıdaki eksenel yüke ait tek yönlü varyans çözümlemesi Çizelge 4.10'da verilmiştir.

Çizelge 4.10'dan görüleceği üzere maksimum aderans yükleri, beton tiplerine göre, $\alpha = 0,05$ düzeyinde hem NB'larda [$F_{(5,24)}=19,185$; $p<0,05$], hem de BB'larda [$F_{(5,24)}=11,288$; $p<0,05$] anlamlı olarak fark göstermektedir.

Çizelge 4.10. Donatıdaki maksimum aderans yükünün beton tiplerine göre tek yönlü varyans analizi (ANOVA) sonuçları

	Varyansın kaynağı	KT	sd	KO	F	p
NB	Beton tipleri arası	701,867	5	140,373	19,185	,000
	Beton tipleri içi	175,600	24	7,317		
	Toplam	877,467	29			
BB	Beton tipleri arası	276567	5	55,313	11,288	,000
	Beton tipleri içi	117,600	24	4,900		
	Toplam	394,167	29			

Ortaya çıkan anlamlı farkın hangi beton tipleri arasında olduğunun araştırıldığı çoklu karşılaştırma testleri de Çizelge 4.11 ve Çizelge 4.12'de gösterilmiştir.

NB'larda çoklu karşılaştırma testi sonuçları incelendiğinde en düşük yük; 1100 kodlu numunelerde (58 kN) görülürken, en yüksek yük 1102 kodlu numunelerde (94 kN) elde edilmiştir. 1050 ve 1000 kodlu numuneler dışındaki bütün numuneler arasında anlamlı fark vardır (anlamlılık düzeyi $\alpha = 0,05$ için).

Çizelge 4.11. NB'larda çoklu karşılaştırma (Scheffe) testi sonuçları

Beton Tipi	N	$\alpha = 0,05$ için altgruplar (kN)				
		1	2	3	4	5
1100	5	58				
1000	5		63			
1050	5		65			
1002	5			76		
1052	5				85	
1102	5					94
p		1,000	,055	1,000	1,000	1,000

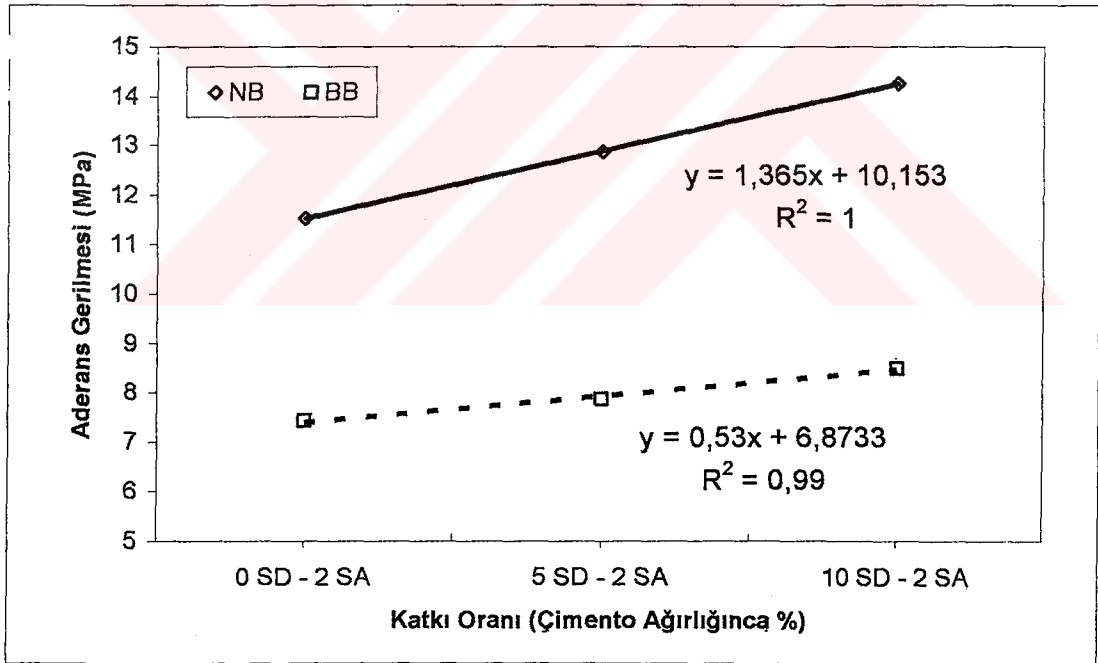
Çizelge 4.12'den görüleceği gibi 2100 / 2050 / 2000 / 2002 numuneleri ve 2002 / 2052 numuneleri arasında anlamlı bir fark yok iken bu iki grup arasında ve 2102 serisi ile bu iki grup arasında anlamlı fark vardır. Taşıyıcı BB'lar içinde en düşük yük 2100 kodlu numunelerde (44 kN) iken, en yüksek yüke 2102 kodlu BB numunelerde ulaşılmıştır (56 kN).

Çizelge 4.12. BB'larda çoklu karşılaştırma (Scheffe) testi sonuçları

Beton Tipi	N	$\alpha = 0,05$ için altgruplar(kN)		
		1	2	3
2100	5	44		
2050	5	46		
2000	5	48		
2002	5	49	49	
2052	5		52	
2102	5			56
p		,057	,277	1,000

Aderans gerilmesi – katkı oranı ilişkisine ait grafik, Şekil 4.4'de verilmiştir. NB'larda ve BB'larda, SA ve SD'nın birlikte kullanımına bağlı bir artış eğilimi olduğu söylenebilir(sırasıyla, $R^2=1$; $R^2= 0,99$). Her iki tip betonda da (NB ve

BB) en yüksek aderans gerilmesine 1102-2102 kodlu betonlarda ulaşılmıştır. Ancak, BB'un aderans dayanımı, NB'dan belirgin olarak düşüktür. Bunun sebebi, basınç dayanımında olduğu gibi bims agregasının gözenekli yapısından dolayı düşük mekanik özelliğidir (3). SD'nın aderans dayanımına olan katkısını X-Ray yardımı ile araştıran GjØrv et al. (167), SD'nın donatı-çimento hamuru arayüzeyinde etkili olduğunu açıklamıştır. SD, çok ince oluşu nedeni ile betonun yerleştirilmesi sırasında arayüzdeki serbest suyu adsorbe ederek suyun birikmesini azaltmakta, kalsiyum hidroksit ile yaptığı puzolanik reaksiyon sonucu da geçiş bölgesinin yoğunluğunu arttırmaktadır. Yüzer, yapmış olduğu çalışmada; 0,45 s/b oranı ile % 10 SD - % 4 SA katkılı olarak ürettiği numunelerde % 3 SA kullanarak ürettiği SD katkısız beton numunelere göre % 50 artış kaydetmiştir (84).

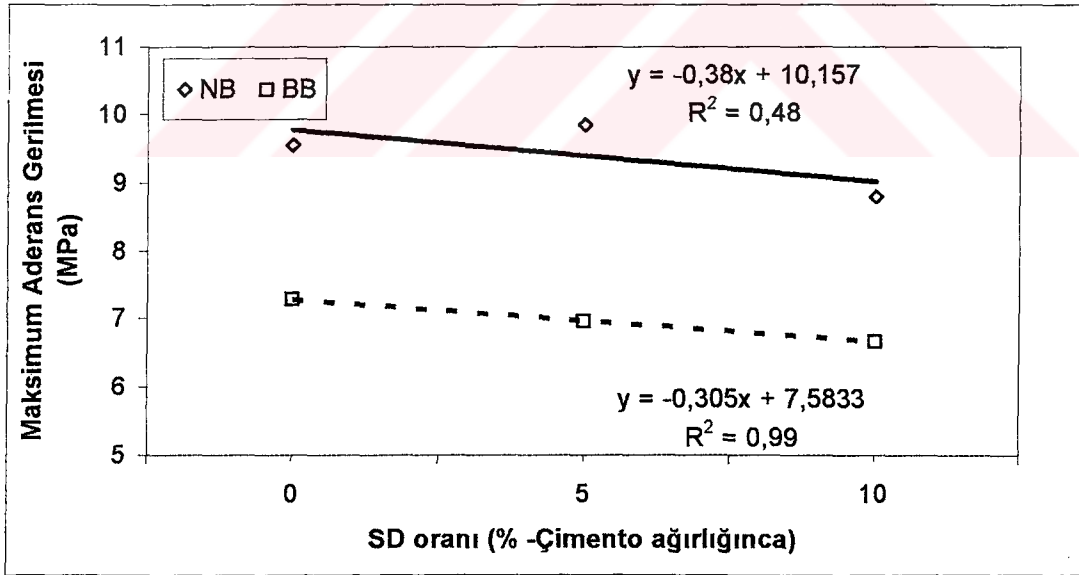


Şekil 4.4. Betonlarda aderans gerilmesi –katkı oranı ilişkisi

Aderans gerilmesi – SD katkı oranı ilişkisi grafiği Şekil 4.5'de verilmektedir. Sadece, SD katkı kullanım oranı artışına bağlı olarak bir azalma eğilimi vardır. Bu durum, NB numunelerde çok belirgin değildir ($R^2=0,48$). BB'larda

ise düşük de olsa bir azalma eğilimi vardır ($R^2=0,99$). Bu eğilimin sebebi; SD kullanımı ile gerekli karışım suyu ihtiyacının artması dolayısı ile yeterli işlenebilirliği sağlayabilmek için s/b oranının artırılmasının bir sonucu olabilir (14). Ayrıca, puzalonlu katkı maddeleri aderansı olumsuz etkileyebilmektedir (3). Bu durum, basınç dayanımı deney sonuçları ile paralellik göstermektedir. Basınç dayanımı, betonun diğer özelliklerinde olduğu gibi aderans dayanımını da etkileyen en önemli etkenlerden birisidir (84).

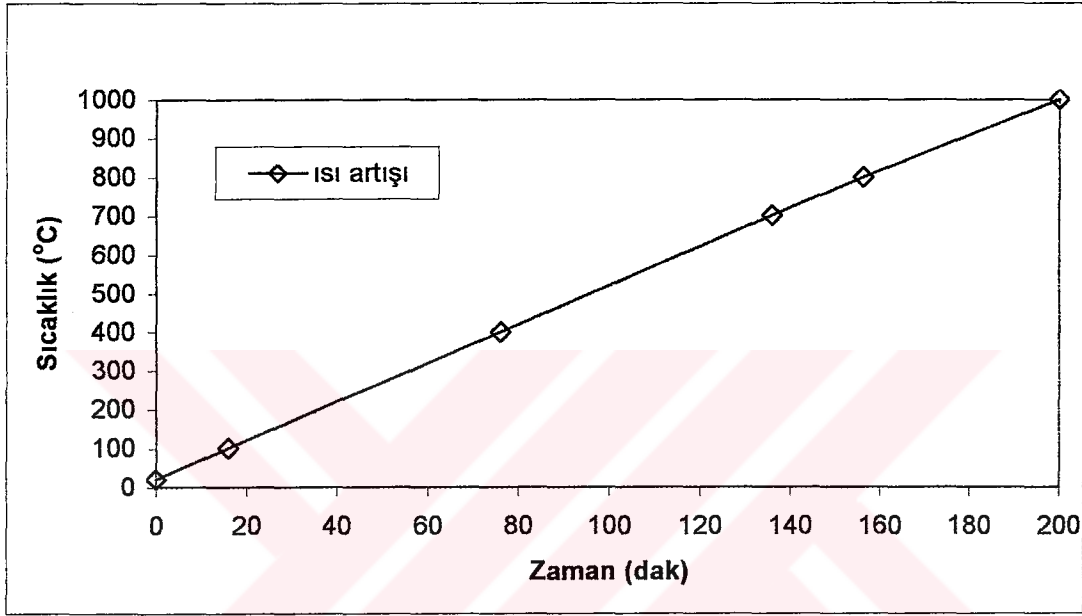
Hüsem, düz donatı ile HB numunelerde yapılan aderans deneylerinde maksimum aderans gerilmesinin, 2,45 MPa olduğunu belirtmiştir (6). Nervürlü donatı ile çalışılan bu çalışmada BB'larda en yüksek maksimum aderans gerilmesi, % 10 SD ve % 2 SA katkılı numunelerde, 8,49 MPa'dır. Cengizkan ve Ersoy'un (9) çalışmasında, düz donatı ile yapılan şahit BB aderans numunelerinde maksimum aderans gerilmesinin, Ø 12 nervürlü donatı için, 3,33 MPa, Ø 16 nervürlü donatı için, 3,14 MPa olduğu belirtilmiştir.



Şekil 4.5. Betonlarda aderans gerilmesi –SD katkı oranı ilişkisi

4.2.4. Yüksek sıcaklık etkisinde beton davranışları

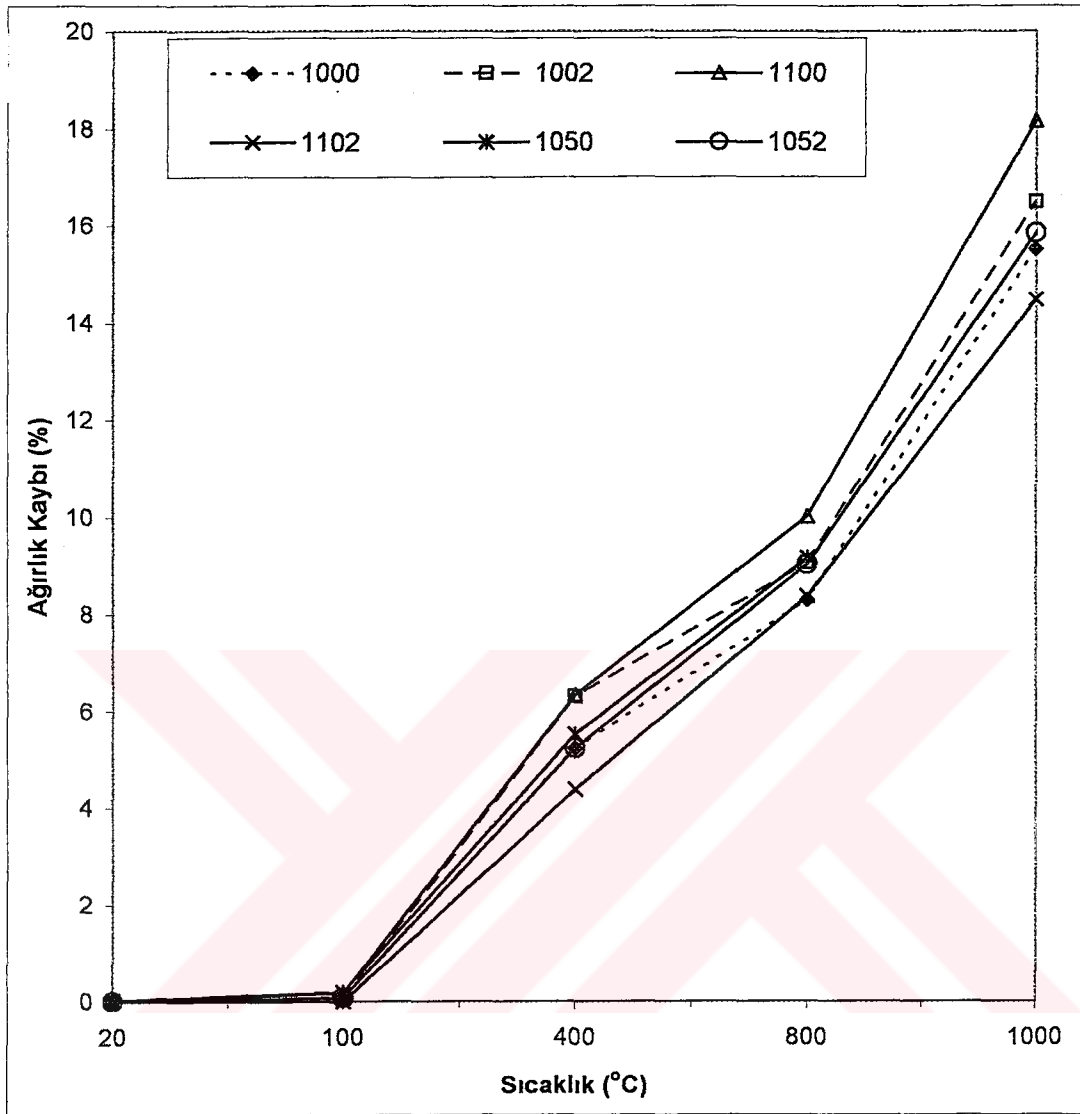
Farklı sıcaklıklara maruz bırakılan numunelerin bazı davranışlarını belirlemek üzere kullanılan fırının zamana bağlı ısınma grafiğinde, Şekil 4.6'da görüldüğü gibi 200 dakika içinde 1000°C'ye ulaştığı saptanmıştır.



Şekil 4.6. Fırının ısınma – zaman ilişkisi

Yüksek sıcaklıklara maruz bırakılan numunelerde ağırlık kayıpları belirlenmiş ve NB'larda elde edilen sonuçlar Şekil 4.7'de, BB'lardan elde edilen sonuçlar ise Şekil 4.8'de görülmektedir.

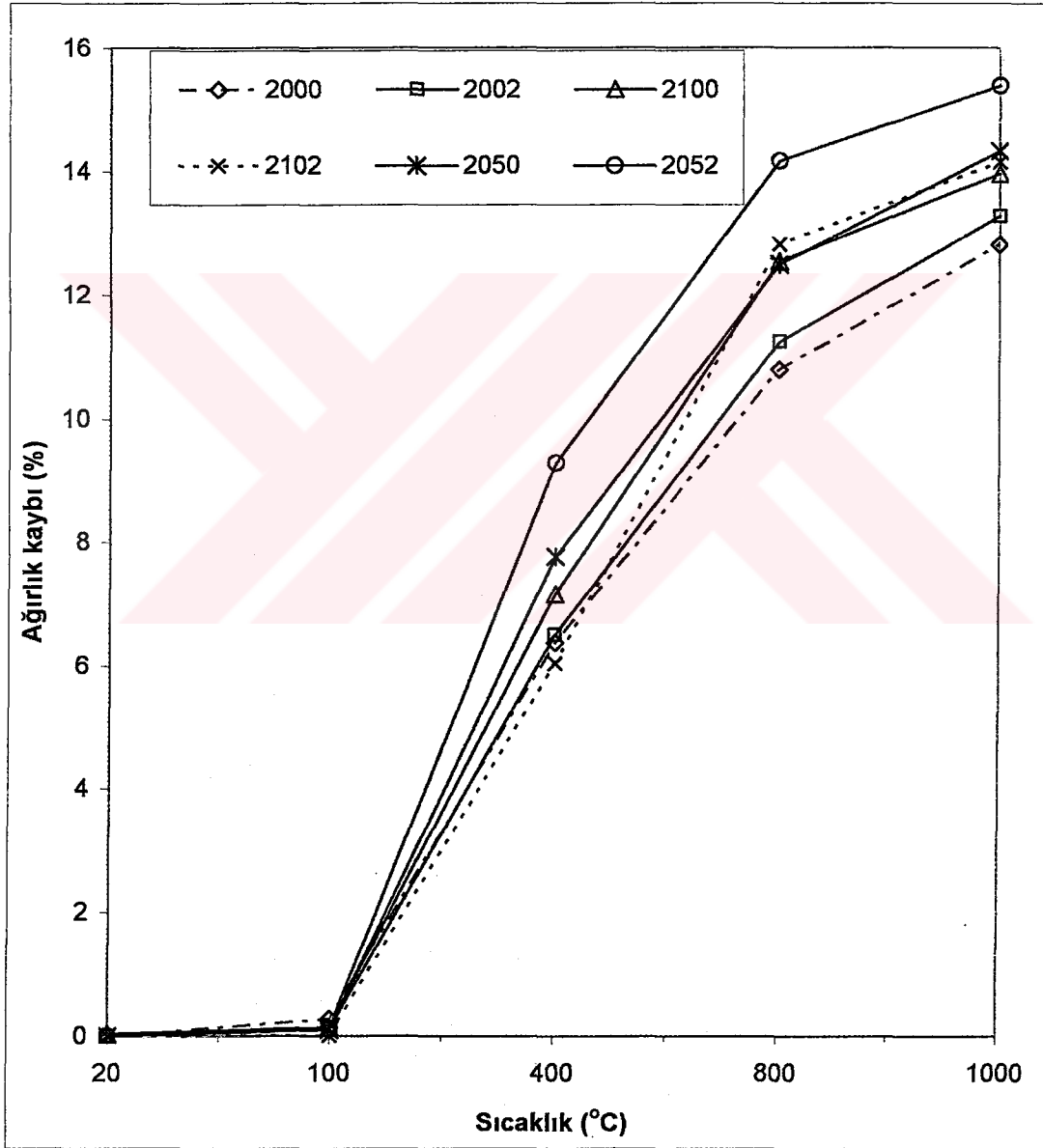
NB'larda en büyük ağırlık kaybı; 1100 kodlu numunelerde olurken, diğerleri sırası ile 1002 / 1052 / 1000 / 1102 şeklinde takip etmektedir.



Şekil 4.7. NB'larda katkı kullanımına bağlı ağırlık kaybı-sıcaklık ilişkisi

BB'larda en fazla ağırlık kaybı; 400°C, 800°C ve 1000°C sıcaklıklarda, 2052 kodlu numunelerde görülmektedir (Şekil 4.8). En düşük ağırlık kaybı ise özellikle, 800°C ve 1000°C'lerde 2000 kodlu numunelerde görülmektedir. 2002 kodlu numunelerin davranışı da, 2000 kodlu numunelerle benzerlik göstermektedir. 2102 / 2100 / 2050 kodlu numuneler de birbirlerine yakın bir davranış sergilemektedirler. 400°C sıcaklığa kadar, en düşük ağırlık kaybı 2102 kodlu numunelerde meydana gelmiş, ancak 800 °C ve 1000 °C'lerde 2100 / 2050 numuneleri ile benzer bir şekilde, 2052 numunelerinden sonra en fazla ağırlık kaybı değerlerine ulaşmışlardır. Grafiklerde, dikkat çeken

nokta, 800°C'den, 1000°C'ye geçişte, taşıyıcı BB'larda, azalan bir ağırlık değişimi olurken, bu sıcaklık aralığının eğimi NB'larda artmaktadır. Elde edilen bu sonuçlar, Aköz vd. (59)'in SD katkılı ve katkısız harçları yüksek sıcaklık etkisine maruz bıraktıkları çalışmalarında elde ettikleri, SD katkılı harçlardaki ağırlık kaybının, katkısız harçlardan fazla olduğu sonucu ile de uyumludur.



Şekil 4.8. BB'larda katkı kullanımına bağlı ağırlık kaybı-sıcaklık ilişkisi

Numuneler üzerinde yüksek sıcaklık uygulamaları tamamlandıktan sonra; NB numuneler üzerinde yapılan, basınç dayanımı deney sonuçlarına ait tanımlayıcı istatistik bulgular Çizelge 4.13'te verilmiştir.

Çizelge 4.13. NB'ların farklı sıcaklıklara göre basınç dayanımı değerleri

Beton Tipi	Sıcaklık (°C)	N	f _c (MPa)	*) (%)	Std. Sapma (MPa)	% 95 Güven aralığı	
						Alt değer	Üst değer
1000	20	5	36,36	100	1,55	34,79	37,92
	100	5	41,94	115	2,73	40,37	43,50
	400	5	29,16	80	2,98	27,60	30,73
	800	5	5,89	16	1,11	4,32	7,45
	1000	5	1,56	4	0,21	0,00	3,12
1002	20	5	55,08	100	3,57	53,52	56,65
	100	5	52,23	95	2,34	50,67	53,80
	400	5	32,10	58	2,24	30,54	33,67
	800	5	6,98	13	0,77	5,41	8,54
	1000	5	1,58	3	0,08	0,01	3,14
1050	20	5	43,31	100	2,53	41,74	44,87
	100	5	42,55	98	0,56	40,99	44,11
	400	5	31,54	73	2,93	29,97	33,10
	800	5	3,82	9	0,60	2,26	5,39
	1000	5	0,87	2	0,05	0,00	2,43
1052	20	5	58,60	100	3,41	57,03	60,16
	100	5	49,40	84	2,34	47,83	50,96
	400	5	46,03	79	0,64	44,47	47,60
	800	5	5,77	7	0,68	4,20	7,33
	1000	5	2,56	1	0,38	0,99	4,12
1100	20	5	30,55	100	1,15	28,99	32,12
	100	5	27,13	89	2,44	25,56	28,69
	400	5	20,06	66	1,82	18,50	21,63
	800	5	0,90	3	0,03	0,00	2,46
	1000	5	0,00	0	0,00	0,00	0,00
1102	20	5	53,38	100	0,88	51,82	54,95
	100	5	52,00	97	1,20	50,44	53,57
	400	5	41,99	79	1,66	40,42	43,55
	800	5	4,03	8	0,65	2,46	5,59
	1000	5	0,00	0	0,00	0,00	0,00
Anlamlılık düzeyi $\alpha = 0,05$.							
*) : 20°C'de elde edilen dayanımların yüzdesi olarak kalan dayanımlar							

NB numunelerde, 400°C için 20°C'de elde edilen basınç dayanımlarına göre kalan dayanımlara bakıldığında; bütün numunelerde yaklaşık aynı kayıp

oluşurken, bağıl olarak en fazla dayanım kaybını; 1002 kodlu numuneler vermişlerdir (32,10 MPa). Böyle olmasına rağmen, bu numuneler, 400°C sıcaklıkta 1000 kodlu numunenin (29,16 MPa) basınç dayanımından daha yüksek bir dayanım sağlamaktadır. Yalnızca basınç dayanımı değerlerine bakıldığında; bütün katkı miktarlarında, NB'ların, 400°C'deki basınç dayanımları, BB'ların, 20°C'deki dayanımlarını aşmaktadır. 800°C ve üstündeki sıcaklıklarda, SD kullanım oranına bağlı olarak basınç dayanımı kaybının arttığı görülmüştür. Bu, SA katkının, SD ile birlikte kullanıldığı durumlarda da geçerlidir. Bu durumda, en düşük basınç dayanımını ise; 1100 kodlu numuneler vermişlerdir. Bu sonuç, Aköz vd. (59)'nin çalışmasında 600 °C'den sonraki sıcaklıklarda, SD katkılı harçların basınç dayanımı kayıp oranının, katkısız harçlara göre daha fazla olduğu sonucu ile de desteklenmektedir.

Beton tiplerine ve uygulanan sıcaklıklara göre basınç dayanımlarının anlamlı farklılık gösterdikleri Çizelge 4.14'de görülmektedir [$F_{(20-120)} = 47,896$, $p < ,05$]. Başka bir anlatımla; beton tiplerinin ve sıcaklık uygulamasının ortak etkisi, basınç dayanımını anlamlı olarak değiştirmektedir. Sıcaklığın ve beton tipi değişiminin kendi başlarına etkileri incelendiğinde; $\alpha = 0,05$ düzeyinde anlamlı olarak farklı oldukları görülmüştür [Sırası ile $F_{(4-120)} = 4510,46$, $p < ,05$; $F_{(5-120)} = 304,84$, $p < ,05$].

Çizelge 4.14. NB'da farklı sıcaklık uygulamasına göre basınç dayanımlarının varyans analizi (ANOVA)

Varyansın Kaynağı	Kareler Toplamı	sd	Kareler Ortalaması	F	p
Beton Tipi	4754,597	5	950,919	304,839	,000
Sıcaklık	56279,832	4	14069,958	4510,455	,000
BT x S	2988,168	20	149,408	47,896	,000
Hata	374,329	120	3,119		
Toplam	64396,926	149			

Anlamlılık düzeyi $\alpha = 0,05$.

İki faktörlü varyans analizi sonucunda görülen anlamlı farklılığın hangi gruplar arasında olduğunu belirlemek üzere yapılan çoklu karşılaştırma testi sonuçları Çizelge 4.15'te verilmektedir.

Çizelge 4.15. NB'lara farklı sıcaklık uygulamasının basınç dayanımına etkisinin çoklu karşılaştırma (Scheffe^a) testi sonuçları

Beton tipi / Sıcaklık	N	Alt gruplar (Mpa)								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
1100 / 1000°C	5	0,00								
1102 / 1000°C	5	0,00								
1050 / 1000°C	5	0,87								
1100 / 800°C	5	0,90								
1000 / 1000°C	5	1,56								
1002 / 1000°C	5	1,58								
1052 / 1000°C	5	2,56								
1050 / 800°C	5	3,82								
1102 / 800°C	5	4,03								
1052 / 800°C	5	5,77								
1000 / 800°C	5	5,89								
1002 / 800°C	5	6,98								
1100 / 400°C	5		20,06							
1100 / 100°C	5		27,13	27,13						
1000 / 400°C	5			29,16	29,16					
1100 / 20°C	5			30,55	30,55					
1050 / 400°C	5			31,54	31,54					
1002 / 400°C	5			32,10	32,10					
1000 / 20°C	5				36,36	36,36				
1000 / 100°C	5					41,94	41,94			
1102 / 400°C	5					41,99	41,99			
1050 / 100°C	5					42,55	42,55			
1050 / 20°C	5					43,31	43,31			
1052 / 400°C	5						46,03	46,03		
1052 / 100°C	5						49,40	49,40	49,40	
1102 / 100°C	5							52,00	52,00	52,00
1002 / 100°C	5							52,23	52,23	52,23
1102 / 20°C	5							53,38	53,38	53,38
1002 / 20°C	5								55,08	55,08
1052 / 20°C	5									58,60
p		,136	,117	,882	,093	,142	,056	,070	,624	,243

a Anlamlılık düzeyi $\alpha = 0,05$.

1100/400 °C (20,06 MPa) ve 1100/100 °C (27,13 MPa) arasında $\alpha=0,05$ düzeyinde anlamlı bir farklılık yoktur. Yine 1000/400 °C (29,16 MPa) – 1100/20 °C (30,55 MPa) – 1050/400 °C (31,54 MPa) – 1002/400 °C (32,10 MPa) kodlu numuneler, 1100/100 °C (27,13 MPa) kodlu numune ile anlamlı fark göstermezken; 1100/400 °C ile $\alpha=0,05$ düzeyinde anlamlı olarak farklıdır. 400 °C'de en iyi sonuç; 1052 kodlu numunelere aittir (46,03 MPa). Ancak, 1000/20 °C (36,36) – 1000/100 °C – 1102/400 °C -1050/100 °C – 1050/20 °C – 1052/400 °C – 1052/100 °C birbirleri arasındaki fark, $\alpha=0,05$ düzeyinde

anlamalı değildir. Aynı zamanda; 400°C'de 1052 kodlu numunelerde elde edilen basınç dayanımları; 100°C'de 1052 / 1102 / 1002 kodlu numunelerden (sırası ile; 49,40; 52,00; 52,23 MPa) ve 20°C'de 1102 kodlu numunelerden (53,38 MPa), anlamalı olarak farklı değildir.

Numunelerin görünüşleri, genellikle Çizelge 4.15'te verilen karşılaştırma sonuçları ile uyumludurlar. En yüksek dayanımlara; beklenildiği gibi 20°C sıcaklıkta saklanan, 1102-1002 ve 1052 kodlu numunelerde rastlanılmıştır (sırası ile; 53,38; 55,08; 58,60 MPa). 1000°C sıcaklığa maruz bırakılan numunelerden en iyi sonucu 1052 kodlu numuneler verirken (2,56 MPa), en düşük basınç dayanımı da 1100 ve 1102 kodlu numunelerde görülmüştür (ikisi de yük almamıştır). Resim 4.1 ve 4.2'de verilen numunelerde, agrega yüzeylerinden, ince kabuk şeklinde (~1mm kalınlığında) parçalar döküldüğü görülmüştür. Özellikle 1000°C'ye maruz bırakılan numuneler, çatlamış ve harç; bağlayıcı özelliğini kaybetmiştir. Bu sonuç; Yüzer vd (168)'nin yaptığı, % 10 SD katkılı harç deneylerinde, basınç dayanımındaki kayıp oranının, 600°C'den sonraki sıcaklıklarda katkısız grupların dayanımından daha fazla olduğu sonucu ve ayrıca; Phan ve Carino (77)'nin çalışmalarındaki, %10 SD kullanılan harç numunelerinin 600°C'den daha yüksek sıcaklıklarda, dayanım kaybının katkı kullanılmayanlara göre daha fazla olduğu sonucu ile de uyum göstermektedir. 800°C sıcaklık sonrası numunelerde, agregaların yüzeyinde çok ince tabaka şeklinde kabuk atmış, ancak silindirik numuneler, formlarını çok fazla kaybetmemişlerdir. 1000 °C sıcaklıktan sonra ise agregalarda kabuk atma haricinde bir bozulma görülmezken, harç fazında büyük genişliklerde çatlaklar oluşmuş, hatta bu çatlaklar agregaların harç fazı ile birleştiği arayüzde de görülmüştür. 1000 °C sıcaklık sonrasında numuneler silindirik formlarını koruyamamışlardır. Bunun sonucu olarak 1000°C sıcaklıkta numunelerin yük taşıma özelliklerini kaybettikleri söylenebilir.



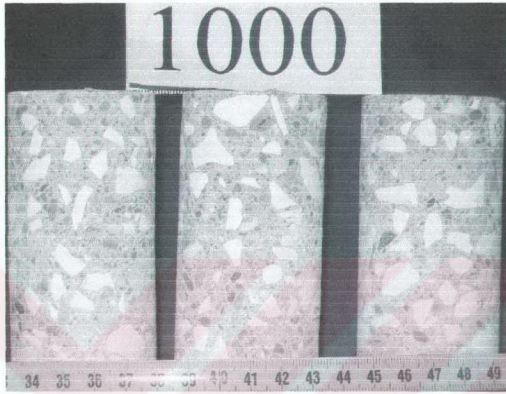
Resim 4.1. 1100 kodlu numunelerin, 800 ve 1000°C sıcaklık uygulanmasından sonraki durumları



Resim 4.2. 1102 kodlu numunelerin, 800 ve 1000°C sıcaklık uygulanmasından sonraki durumları

Resim 4.3-Resim 4.6 arasındaki fotoğraflarda, 1000-1002-1050-1052 kodlu numunelerin, 1000°C sıcaklığa maruz bırakıldıktan sonraki durumları görülmektedir. Bu numuneler, 1100 ve 1102 kodlu numunelerden daha iyi durumda görünmektedirler. Bu numunelerde, renk değişiklikleri haricinde, örneğin; silindirik formlarında bir bozulma görülmemektedir. Betonun rengi

maruz kaldığı sıcaklık derecesine bağlı olarak değişir. Griyi aşan renklerde ise beton ufalanabilir, gözenekli yapıdadır (60).



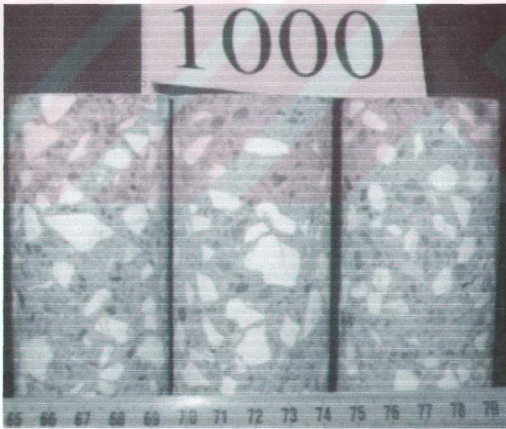
Resim 4.3. 1000 kodlu numunelerin 1000°C sıcaklığa maruz bırakıldıktan sonraki durumu



Resim 4.4. 1002 kodlu numunelerin 1000°C sıcaklığa maruz bırakıldıktan sonraki durumu



Resim 4.5. 1050 kodlu numunelerin 1000°C sıcaklığa maruz bırakıldıktan sonraki durumu



Resim 4.6. 1052 kodlu numunelerin 1000°C sıcaklığa maruz bırakıldıktan sonraki durumu

BB'larda, yüksek sıcaklık uygulamasının ve katkı kullanım durumunun, basınç dayanımına etkileri ile ilgi tanımlayıcı istatistik bulgular Çizelge 4.16'da verilmiştir.

BB'lardan, 2102-2052-2002-2050 kodlu numunelerin dayanımları 400°C'ye kadar önemli değişiklik göstermemektedir. 2100 ve 2000 kodlu numunelerde, 400°C'deki dayanım düşüşü daha fazla olmuştur.

Çizelge 4.16. BB'ların farklı sıcaklıklara göre basınç dayanımı değerleri

Beton Tipi	Sıcaklık (°C)	N	f _c (Mpa)	a ¹⁾ (%)	Std.	% 95 Güven aralığı	
					Sapma (MPa)	Alt değer	Üst değer
2000	20	5	18,51	100	1,49	17,58	19,43
	100	5	18,24	99	0,41	17,32	19,16
	400	5	14,57	79	1,56	13,64	15,49
	800	5	5,20	28	0,31	4,28	6,12
	1000	5	0,00	0	0,00	0,00	0,00
2002	20	5	17,41	100	1,41	16,49	18,33
	100	5	17,53	101	1,20	16,60	18,45
	400	5	17,07	98	0,08	16,15	17,99
	800	5	6,62	38	1,18	5,70	7,54
	1000	5	0,00	0	0,00	0,00	0,00
2050	20	5	16,64	100	0,15	15,72	17,57
	100	5	17,26	104	1,93	16,34	18,18
	400	5	16,15	97	2,49	15,23	17,08
	800	5	5,45	33	0,66	4,53	6,37
	1000	5	0,54	3	0,04	0,00	1,46
2052	20	5	22,59	100	1,28	21,67	23,51
	100	5	18,37	81	1,08	17,45	19,29
	400	5	19,33	86	1,06	18,41	20,25
	800	5	4,70	21	0,74	3,77	5,62
	1000	5	0,56	2	0,04	0,00	1,48
2100	20	5	19,41	100	0,57	18,49	20,33
	100	5	14,52	75	0,73	13,60	15,44
	400	5	7,52	39	0,17	6,59	8,44
	800	5	3,03	16	0,20	2,11	3,95
	1000	5	0,00	0	0,00	0,00	0,00
2102	20	5	22,47	100	2,21	21,55	23,39
	100	5	22,37	100	1,05	21,44	23,29
	400	5	20,43	91	0,98	19,51	2,36
	800	5	4,48	20	0,31	3,55	5,40
	1000	5	0,00	0	0,00	0,00	0,00

a¹⁾: 20°C'de elde edilen dayanımların yüzdesi olarak kalan dayanımlar

BB'larda yüksek sıcaklık ve beton tipi değişiminin basınç dayanımına etkisinin araştırıldığı iki faktörlü varyans analizi sonuçları (ANOVA), Çizelge 4.17'den görüleceği gibi anlamlıdır[F_{20,120}=23,24, p<,05]. Tek başına incelendiğinde de; beton tipi değişiminin, basınç dayanımını anlamlı olarak etkilemektedir[F₍₅₋₁₂₀₎=70,64, p<,05]. Aynı şekilde, Sıcaklık değişimi de tek başına, basınç dayanımını anlamlı olarak etkilemektedir[F₍₄₋₁₂₀₎=2056,2, p<,05].

Çizelge 4.17. BB'da farklı sıcaklık uygulamasına göre basınç dayanımlarının varyans analizi (ANOVA)

Varyansın Kaynağı	Kareler Toplamı	sd	Kareler Ortalaması	F	p
Beton Tipi	382,771	5	76,54	70,64	,000
Sıcaklık	8913,46	4	2228,365	2056,203	,000
BT x S	503,719	20	25,186	23,24	,000
Hata	130,047	120	1,084		
Toplam	9929,997	149			

Anlamlılık düzeyi $\alpha = 0,05$.

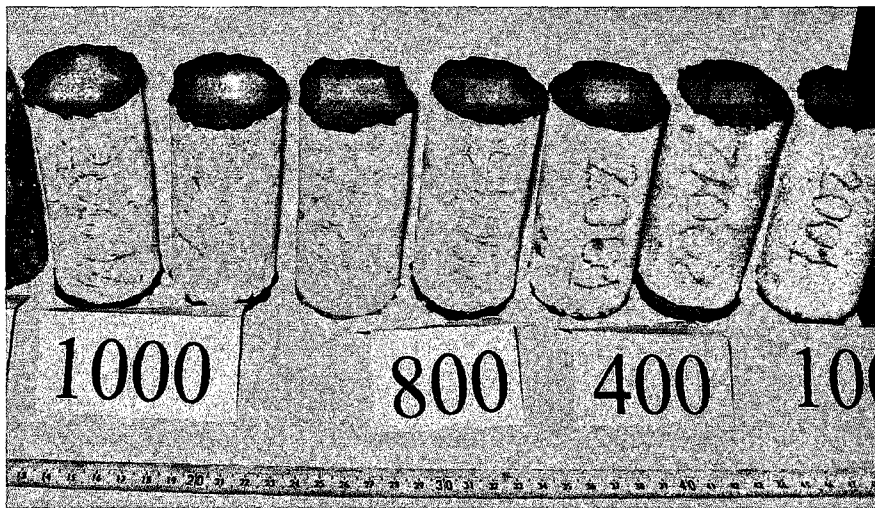
Beton tiplerindeki farklılıkların, hangi sıcaklıklar arasında olduğu, çoklu karşılaştırma testleri ile belirlenmiş ve Çizelge 4.18'de verilmiştir.

Çizelge 4.18. BB'lara farklı sıcaklık uygulamasının basınç dayanımına etkisinin çoklu karşılaştırma (Scheffe^a) testi sonuçları

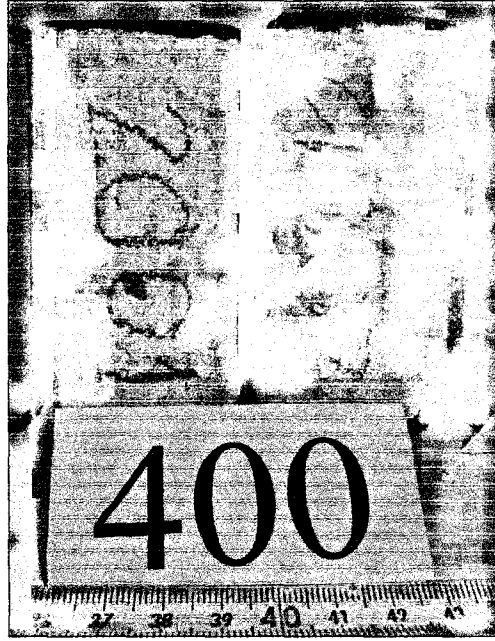
Beton tipi / Sıcaklık	N	Alt gruplar (MPa) ($\alpha = 0,05$)						
		1	2	3	4	5	6	7
2000 / 1000°C	5	0,00						
2002 / 1000°C	5	0,00						
2100 / 1000°C	5	0,00						
2102 / 1000°C	5	0,00						
2050 / 1000°C	5	0,54	0,54					
2052 / 1000°C	5	0,56	0,56					
2100 / 800°C	5	3,03	3,03	3,03				
2102 / 800°C	5		4,48	4,48	4,48			
2052 / 800°C	5		4,70	4,70	4,70			
2000 / 800°C	5			5,20	5,20			
2050 / 800°C	5			5,45	5,45			
2002 / 800°C	5			6,62	6,62			
2100 / 400°C	5				7,52			
2100 / 100°C	5					14,52		
2000 / 400°C	5					14,57		
2050 / 400°C	5					16,15	16,15	
2050 / 20°C	5					16,64	16,64	
2002 / 400°C	5					17,07	17,07	
2050 / 100°C	5					17,26	17,26	
2002 / 20°C	5					17,41	17,41	
2002 / 100°C	5					17,53	17,53	
2000 / 100°C	5					18,24	18,24	18,24
2052 / 100°C	5					18,37	18,37	18,37
2000 / 20°C	5					18,51	18,51	18,51
2052 / 400°C	5						19,33	19,33
2100 / 20°C	5						19,41	19,41
2102 / 400°C	5						20,43	20,43
2102 / 100°C	5							22,37
2102 / 20°C	5							22,47
2052 / 20°C	5							22,59
p		,835	,119	,442	,830	,191	,082	,066

Yüzer vd (168)'in çalışmasında, %10 SD katkılı normal agregalı betonlarda, 20°C'de katkısız normal agregalı betonlara göre % 20 fazla basınç dayanımı elde edilmişken, 100°C'ye kadar bu değerin değişmediği, 100°C'den itibaren düşüş gösterdiği ve 600°C'de 20°C'deki dayanımının % 50'sini kaybettiği belirtilmiştir. 2102 kodlu numuneler 400°C'ye kadar, 20°C'de verdikleri basınç dayanımı değerlerini korumuşlar, ancak, 800°C'de en düşük değerlere yakın sonuçlar vermişlerdir. Benzer şekilde; Hammer (66) tarafından yapılan çalışmada, % 5 SD ikameli HB'un 600°C'ye maruz bırakıldığında; 20°C'deki referans beton dayanımına göre en iyi davranışı gösterdiğini belirtmiştir.

Resim 4.7'de görüldüğü gibi farklı sıcaklıklara maruz bırakılan 2000 kodlu BB'lar 1200°C sıcaklığa maruz bırakıldığında, rengi; koyu kahverengiye dönüşmüş ve silindirik formunu kaybetmiştir. Bundan dolayı, betonlara 1000°C'den fazla sıcaklık uygulanmamıştır. 800°C-1000°C sıcaklığa maruz bırakılan betonlarda agregat taneleri etrafındaki harç kısmında, çatlak şeklinde, bozulmalar oluşmuştur. Bu çatlaklar nedeni ile bazı numunelerde beton ayrılmış ve silindirik formunu kaybetmiştir. Bu yüzden, bu numunelere basınç dayanımı testi uygulanamamıştır. Resim 4.8'de 2000 kodlu BB'ların 400°C ve 1000°C sıcaklığa maruz kaldıktan sonraki durumları verilmiştir.

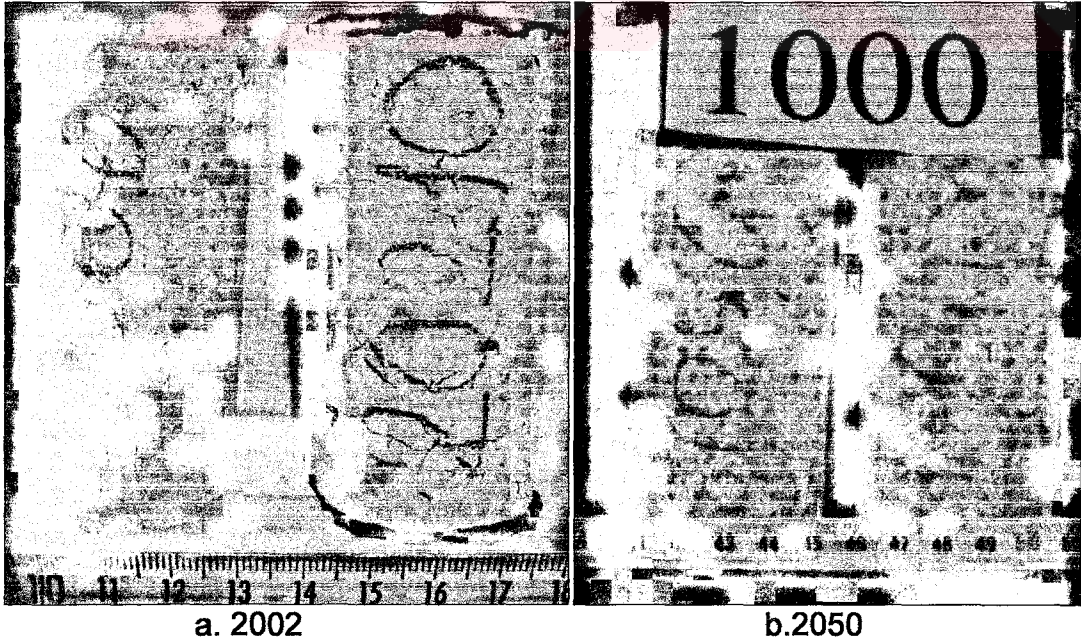


Resim 4.7. Farklı sıcaklıklara maruz bırakılan BB (2000 kodlu) numunelerin basınç dayanımı deneyinden önceki toplu görünümü



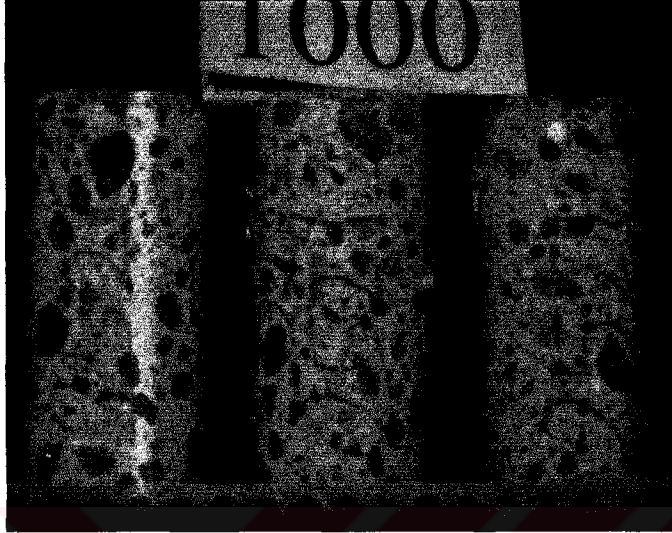
Resim 4.8. 400°C ve 1000°C sıcaklıklara maruz kalan BB'lerin (2000 kodlu) basınç deneyi öncesi görünüşleri

Resim 4.9'da, 2002 ve 2050 kodlu numunelerin 1000°C sıcaklık uygulandıktan sonraki durumları görülmektedir.



Resim 4.9. 2002 ve 2050 kodlu BB numunelerin 1000°C sıcaklık uygulandıktan sonraki görünüşleri

Resim 4.10'da 2052 kodlu numuneler, 1000°C sıcaklık uygulamasından sonra görülmektedir.



Resim 4.10. 2052 kodlu BB numunelerin 1000°C sıcaklık uygulandıktan sonraki görünüşleri

Resim 4.11'de 2100 kodlu ve Resim 4.12'de 2102 kodlu numuneler 1000°C sıcaklık uygulandıktan sonra görülmektedirler. Bu numunelerde de sertleşmiş beton harcı, çatlayarak büyük parçalar halinde kopmuş ve silindirik formunu kaybetmiştir.



Resim 4.11. 2100 kodlu BB numunelerin 1000°C sıcaklık uygulandıktan sonraki görünüşleri

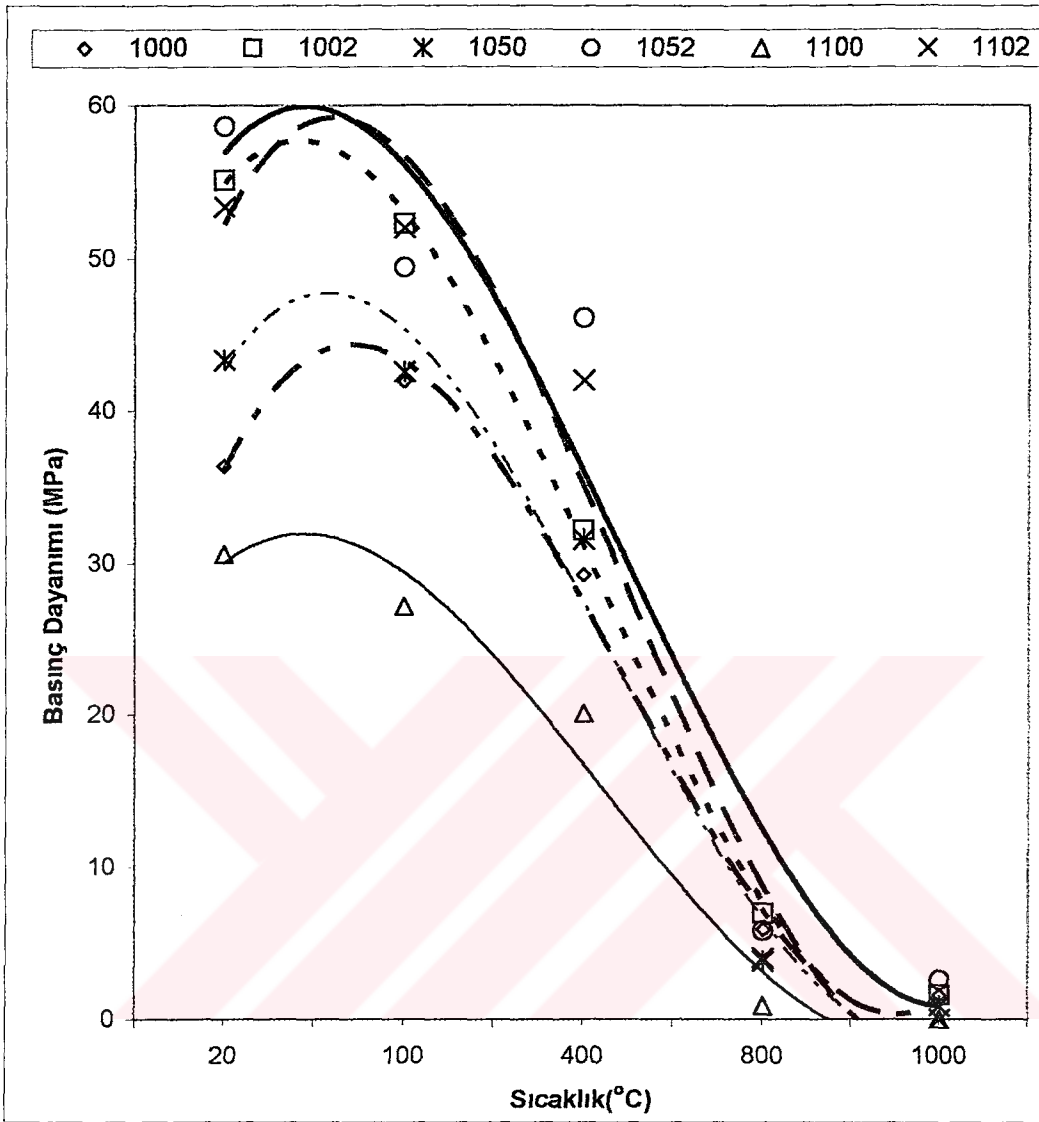


Resim 4.12. 2102 kodlu BB numunelerin 1000°C sıcaklık uygulandıktan sonraki görünüşleri

Yüksek sıcaklığın basınç dayanımına etkisi ile ilgili grafikler, NB'lar için Şekil 4.9'da taşıyıcı BB'lar için; Şekil 4.10'da verilmiştir.

Şekil 4.9'da NB'da sıcaklık ve basınç dayanımı arasındaki ilişki incelendiğinde; 100°C hariç, sıcaklık arttıkça basınç dayanımında bir azalma görülmektedir. Grafiğe göre bu azalma; 400°C ve 800 °C arasındaki sıcaklıklarda çok hızlı olmaktadır. En hızlı dayanım azalması, 1100 kodlu numunelerde görülmüştür.

Çizelge 4.19'da NB'larda katkı kullanımına bağlı basınç dayanımı - sıcaklık ilişkine ait regresyon denklemleri verilmiştir. Regresyon denklemleri incelendiğinde R^2 değerlerinin 0,92'den yüksektir. Bu da ilişkinin kuvvetli olduğunu göstermektedir. En yüksek determinasyon katsayısı 1002 kodlu ($R^2=0,9991$), en düşük de 1052 kodlu numunelerde görülmüştür ($R^2=0,9296$).

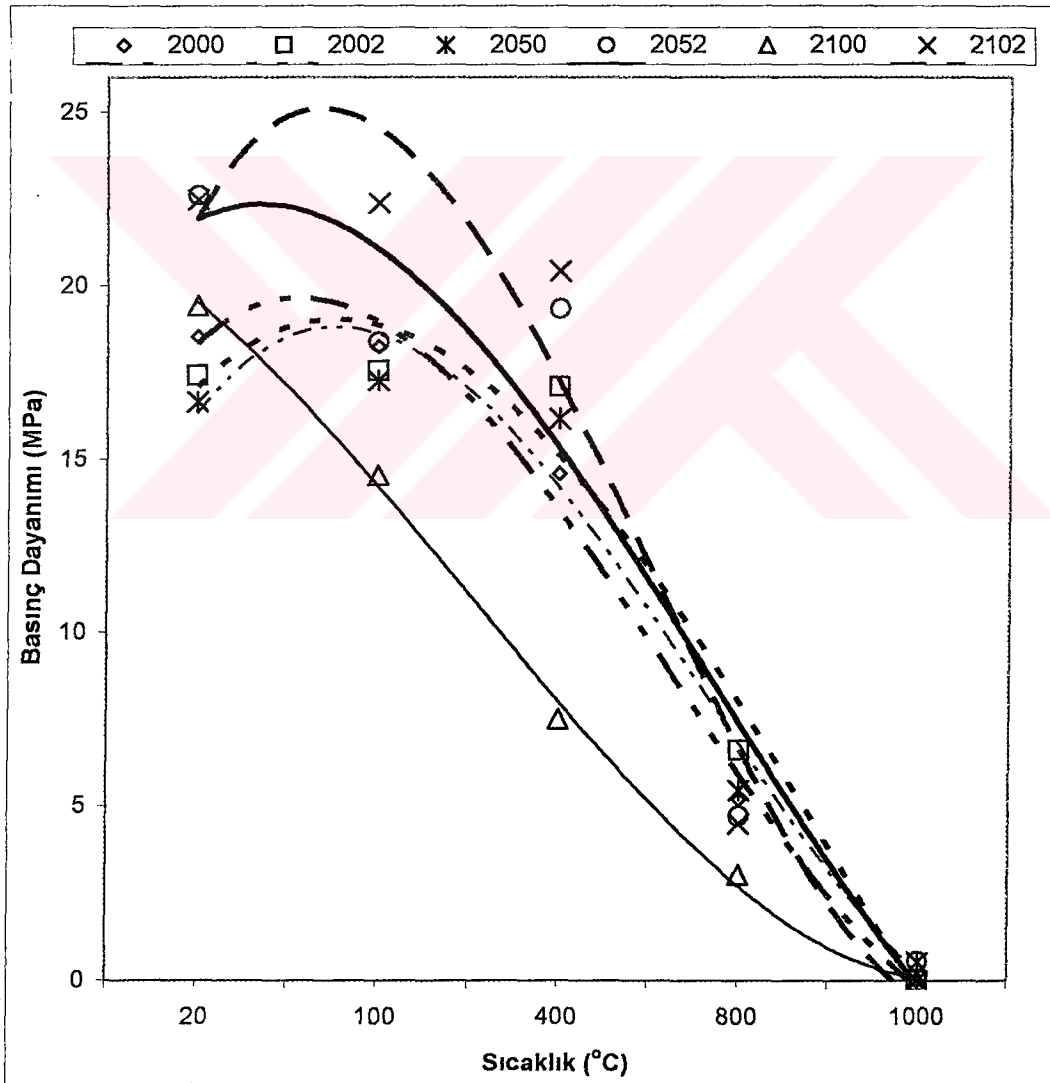


Şekil 4.9. NB'larda katkı kullanımına bağlı basınç dayanımı-sıcaklık ilişkisi

Çizelge 4.19. NB'larda basınç dayanımı ve sıcaklık arasındaki regresyon denklemleri

Beton tipi	Regresyon denklemi	R ²
1000	$y = 3,1104x^3 - 30,158x^2 + 75,827x - 12,732$	0,9950
1002	$y = 3,0828x^3 - 28,466x^2 + 61,853x + 18,436$	0,9991
1050	$y = 2,9172x^3 - 27,762x^2 + 65,525x + 1,9465$	0,9809
1052	$y = 2,6001x^3 - 25,183x^2 + 56,48x + 23,035$	0,9296
1100	$y = 1,8273x^3 - 16,952x^2 + 37,429x + 7,6884$	0,9742
1102	$y = 3,5478x^3 - 34,305x^2 + 82,504x + 0,4688$	0,9657

Şekil 4.10'da gösterilen BB'larda sıcaklık ve basınç dayanımı arasındaki ilişkinin NB'larla benzer, ancak 800°C'de BB'ların kalan dayanımlarının, NB'lardan daha fazla olduğu görülmektedir. Bunun sebebi, HB'un düşük termik genleşme katsayısından dolayı yüksek sıcaklığa karşı daha dayanıklı olması olabilir (60). BB'lar, 100 °C ve 400 °C sıcaklıklarda, 20 °C'de elde edilen dayanımlara yakın bir değere ulaşmışlardır. NB'lara benzer şekilde, en hızlı dayanım kaybı eğrideki eğimden de görüleceği üzere 2100 kodlu numunede görülmektedir.



Şekil 4.10. BB'larda katkı kullanımına bağlı basınç dayanımı - sıcaklık ilişkisi

Çizelge 4.20'de BB'ların katkı kullanımına bağlı basınç dayanımı-sıcaklık ilişkine ait regresyon denklemlerinde R^2 değerleri 0,91'in üzerindedir. Buradan basınç dayanımı ve sıcaklık arasındaki ilişkinin kuvvetli olduğu söylenebilir. En yüksek determinasyon katsayı 2100 kodlu numunede ($R^2=0,9982$) görülürken, en düşük değer 2052 kodlu numunede görülmüştür ($R^2=0,9185$).

Çizelge 4.20. BB'larda basınç dayanımı ve sıcaklık arasındaki regresyon denklemleri

Beton tipi	Regresyon denklemi	R^2
2000	$y = 0,6316x^3 - 6,7962x^2 + 16,57x + 7,9301$	0,9923
2002	$y = 0,3666x^3 - 4,9758x^2 + 14,139x + 7,5489$	0,9702
2050	$y = 0,6268x^3 - 7,1177x^2 + 19,252x + 3,5445$	0,9676
2052	$y = 0,4416x^3 - 5,0767x^2 + 11,263x + 15,293$	0,9185
2100	$y = 0,2972x^3 - 2,2293x^2 - 0,6921x + 22,12$	0,9982
2102	$y = 1,1083x^3 - 11,601x^2 + 29,634x + 2,7924$	0,9569

NB'lar ve BB'lar için basınç dayanımı-sıcaklık ilişkisini gösteren çizgi grafikler Ek 3'de verilmiştir.

4.3. Donatı Korozyonu

4.3.1. Yarı-hücre (half-cell) potansiyel ölçümleri

Donatı korozyonunu belirlemek üzere, beton tipleri üzerinde yapılan yarı-hücre ölçümlerinden elde edilen potansiyel değerlerinin (E_{corr}); aritmetik ortalaması ve standart sapması; Çizelge 4.21'de verilmiştir.

İlk ölçümlerde en düşük potansiyel, 1102 kodlu betonlara aittir (-145,6 mV). TSE EN 990'daki (160) 2. metoda göre hızlandırılmış korozyon sürecine maruz bırakıldıktan sonra yapılan ölçümde, bütün numuneler içerisinde en olumlu potansiyel değeri, 1102 kodlu numunelere aittir (-136,0 mV). Bu değerler, ASTM C 876 (123) ve ACI 222'de (89) belirtilen Çizelge 2.3'de gösterilen -200 mV'dan daha pozitif olduklarından, % 90 güvenirlilikle korozyonun oluşmadığı bölgeye geçmiştir.

Yüzer (84), %10 -20 SD kullanarak yaptığı araştırmada, suda 28 günlük kür uygulaması sonrası elde ettiği yarı-hücre potansiyel değerlerinin ASTM C 876'ya (123) göre belirsiz bölgede kaldığını belirtmiştir.

Bu çalışmada, iki aşama sonunda yapılan potansiyel ölçümlerinde elde edilen verilerin bir kısmı, -200 mV'dan daha pozitif değerler olarak pasif (%90 güvenirlilikle korozyon olmayan) bölgede kalırken, bir kısmı da -200 mV ile -350 mV arasındaki belirsiz bölgeye girmiştir. Bu aşamada kontrol amaçlı olarak fazladan üretilmiş numunelerden çekme-çıkarma yöntemi ile çıkarılan donatılar üzerinde yapılan görsel değerlendirmede ve ASTM C 876'ya göre yarı hücre potansiyel ölçümlerinde, belirsiz bölgeye giren değerler nedeni ile donatı korozyonunun oluşmadığı belirlenmiştir. Bu nedenle ortam, daha şiddetli korozif hale getirilmesi amacı ile % 7 NaCl çözeltisi ile değiştirilmiştir.

Çizelge 4.21. Betonlarda yarı –hücre potansiyel ölçüm sonuçlarının ortalama ve sapma değerleri

Kür	Beton tipi	N	E _{corr} (mV)	Std. Sapma (mV)
Korozyona maruz bırakmadan önce	1000	5	-200,2	15,71
	1002	5	-185,0	8,69
	1050	5	-214,4	29,25
	1052	5	-161,2	38,55
	1100	5	-210,6	39,68
	1102	5	-145,6	15,16
	2000	5	-328,0	39,40
	2002	5	-301,6	12,62
	2050	5	-296,0	14,44
	2052	5	-275,2	30,94
	2100	5	-386,0	29,62
	2102	5	-264,4	4,88
TSE EN 990 2.metoda göre hızlandırılmış korozyona bırakıldıktan sonra	1000	5	-251,4	23,07
	1002	5	-183,2	24,01
	1050	5	-210,2	7,85
	1052	5	-140,2	29,79
	1100	5	-213,2	21,70
	1102	5	-136,0	39,20
	2000	5	-342,4	10,01
	2002	5	-297,0	21,47
	2050	5	-244,0	10,46
	2052	5	-434,8	30,40
	2100	5	-239,0	27,09
	2102	5	-411,0	36,32
%7 NaCl çözeltisinde ıslatma ve 40±5°C kurutma (10 çevrim sonunda)	1000	5	-614,2	39,13
	1002	5	-573,0	38,54
	1050	5	-578,4	32,43
	1052	5	-488,0	32,82
	1100	5	-555,2	32,53
	1102	5	-485,8	27,24
	2000	5	-552,0	23,91
	2002	5	-546,2	19,66
	2050	5	-537,4	17,10
	2052	5	-528,2	21,03
	2100	5	-540,0	12,75
	2102	5	-511,2	22,32
%7 NaCl çözeltisinde ıslatma ve 40±5°C kurutma (17 Çevrim sonunda)	1000	5	-663,2	19,82
	1002	5	-639,0	39,79
	1050	5	-629,2	30,53
	1052	5	-516,0	33,66
	1100	5	-640,6	38,68
	1102	5	-474,0	31,45
	2000	5	-532,2	19,21
	2002	5	-523,2	32,48
	2050	5	-525,0	14,45
	2052	5	-511,2	29,67
	2100	5	-530,8	27,53
	2102	5	-501,0	9,68

3. kür şartı ile ifade edilmiş olan % 7 NaCl çözeltisinde, 10 çevrim sonunda yapılan potansiyel ölçümünde ise en iyi değerler; BB'larda; 2102 kodlu numunelerde (-511,2 mV) iken, NB'larda; 1102 kodlu numunelerde görülmüştür (-485,8 mV). En olumsuz değerler ise; NB'larda; 1000 kodlu numunelere, BB'larda; 2000 kodlu numunelere aittir (sırası ile; -614,2 mV; -552,0 mV). Buna göre; SA ve SD katkılarının kullanımı, korozyona karşı beton direncini olumlu etkileyebilmektedir. Ancak yine de elde edilen veriler, ASTM C 876'ya göre aktif korozyon bölgesi olan -350 mV sınırının altında kalmıştır. Yarı hücre potansiyel değerlerine göre bütün numunelerdeki çelik donatılar korozyona uğramıştır. Sadece 1102 kodlu numuneler daha iyi bir değer vermiştir (-485,8 mV). Bu değer de ASTM C 876'ya göre korozyon bölgesinde kalmaktadır. BB'larda ise katkı kullanımına bağlı olarak anlamlı fark göstermeyen potansiyel değerleri vermişlerdir.

Dört farklı korozyon süreci uygulandıktan sonra yapılan potansiyel ölçümlerinde, numunelerde beton tiplerine bağlı olarak ortaya çıkan değişimlerin anlamlı bir farklılık gösterip göstermediğine ilişkin; iki faktörlü ANOVA sonuçları Çizelge 4.22'de görülmektedir. Buna göre, dört ayrı zamanda yapılan ölçümün, farklı betonlardaki değişiminin ortak etkilerinin anlamlı olduğu görülmüştür [$F_{(33,48)}=23,462$, $p<,05$]. Ayrıca, beton tiplerine göre yarı-hücre değerleri, anlamlı olarak değişmektedir [$F_{(11,48)}= 13,574$, $p<,05$].

Çizelge 4.22. Yarı hücre potansiyeli değerlerinin ANOVA sonuçları

Varyansın Kaynağı	KT	sd	KO	F	p
Gruplar arası	304028,183	59			
Beton tipleri arası	230068,6	11	20915,33	13,574	,000
Hata	73959,6	48	893,09		
Gruplar içi	6418033,0	84			
Ölçüm (Korozyon süreci;1-2-3-4)	5355461,5	3	1708757,60	1475,659	,000
Beton tipi*Ölçüm	895940,3	33	27149,70	23,462	,000
Hata	166631,2	48	3471,48		
Toplam	6722061,183	143			

Anlamlılık düzeyi $\alpha = 0,05$.

Ölçüme göre yani korozyona uğratma sürecine göre de sonuçlar anlamlı olarak değişmektedir [$F_{(3,48)}=1475,659$, $p<,05$]. Anlamlı farkın hangi gruplar arasında olduğunu belirlemek üzere, korozyonun en şiddetli olduğu; 17 çevrim sonra yapılan, 4.ölçümden elde edilen veriler arasında yapılan, çoklu karşılaştırma için Scheffe testi sonuçları da Çizelge 4.23'de verilmiştir.

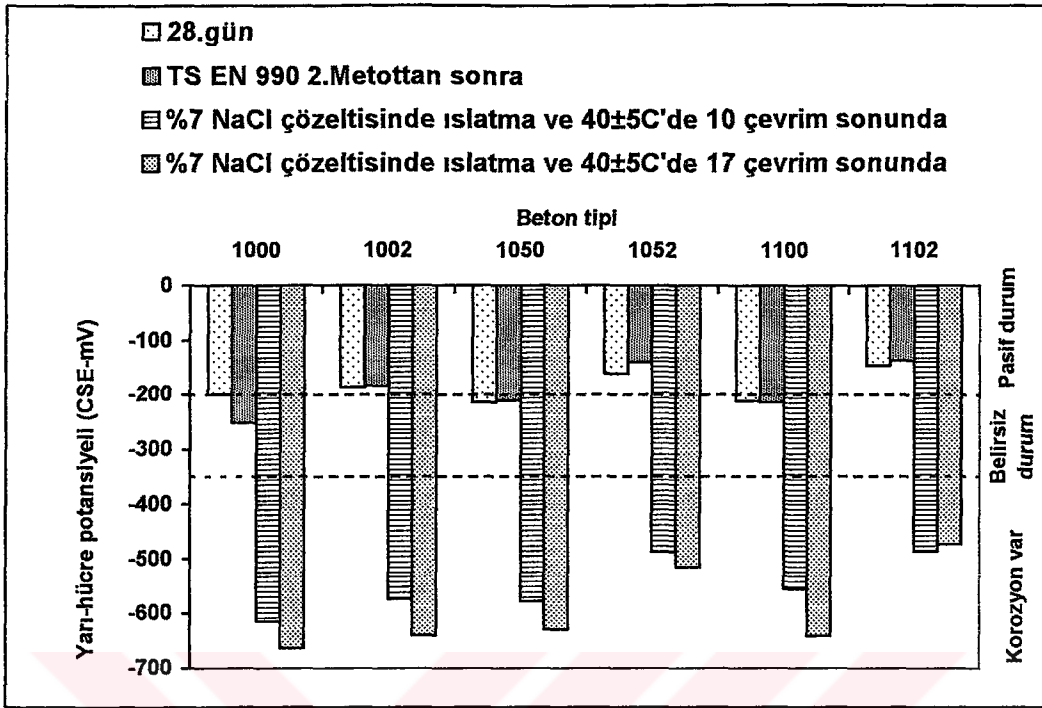
Çizelge 4.23. Yarı-Hücre Potansiyel ölçümlerinin çoklu karşılaştırma (Scheffe) testi sonuçları (17.çevrim sonunda)

Beton Tipi	N	Alt gruplar (mV – $\alpha = ,05$)		
		1	2	3
1000	5	-663,20		
1100	5	-640,60		
1002	5	-639,00		
1050	5	-629,20		
2000	5		-532,00	
2100	5		-530,80	
2050	5		-525,00	
2002	5		-523,20	
1052	5		-516,00	
2052	5		-511,20	
2102	5		-501,20	-501,20
1102	5			-474,00
p		,657	,998	,876

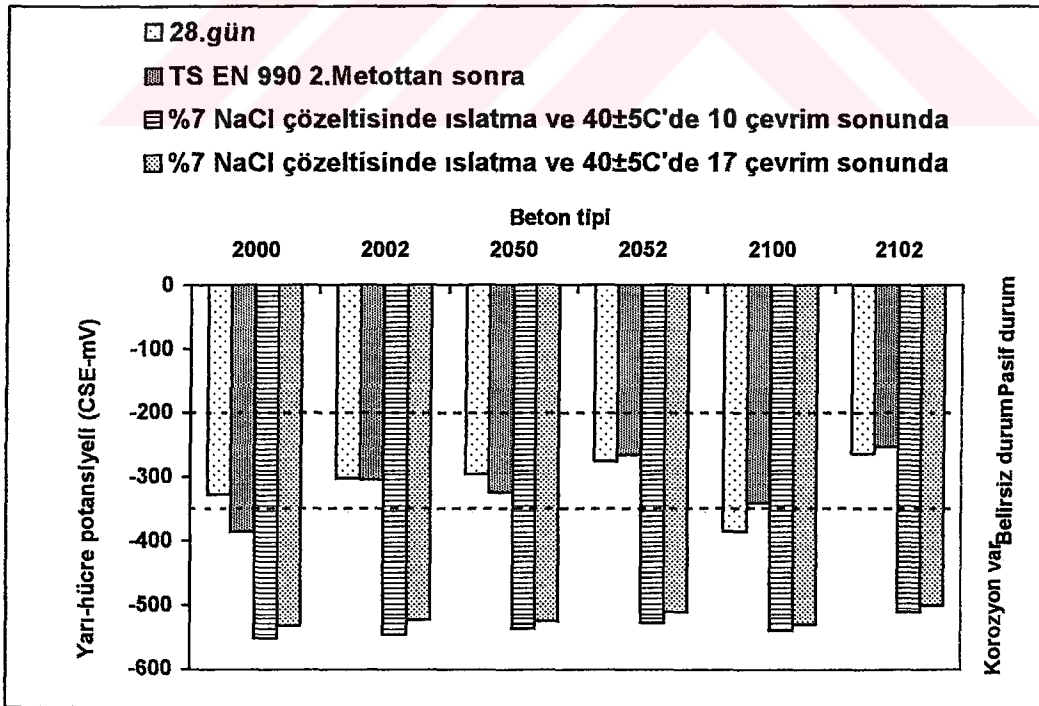
Anlamlılık düzeyi $\alpha = 0,05$.

Çizelgeden görüleceği gibi 17 çevrim sonunda yapılan 4. ölçümlerin, Scheffe testi sonuçlarına göre en olumsuz değerler; 1000- 1100- 1002- 1050 kodlu numunelerde elde edilmiştir (sırası ile -663,2; -640,6; -639,0; -629,2 mV). En iyi sonuçlar da 1102-2102 kodlu numunelerde (sırası ile -474,0; 501,2 mV) elde edilmekle beraber, 2102-2052-1052-2002-2050-2100-2000 kodlu (sırası ile -501,2; 511,2; 516,0; -523,2; -525,0; -530,8; -532,0 mV) numunelerle, 2102 kodlu numunenin aralarında $\alpha = 0,05$ anlamlılık düzeyinde fark yoktur.

Ortalama yarı-hücre potansiyel değerlerinin beton tiplerine ve kür şartına bağlı olarak değişimini gösteren grafikler; Şekil 4.11 ve Şekil 4.12'de görülmektedir. Her aşama sonrasında yapılan yarı-hücre potansiyel ölçümlerine ait grafikler Ek 4'de ayrı ayrı verilmiştir.



Şekil 4.11. NB'larda yarı hücre potansiyeli - hızlandırılmış korozyon ortamı ilişkisi

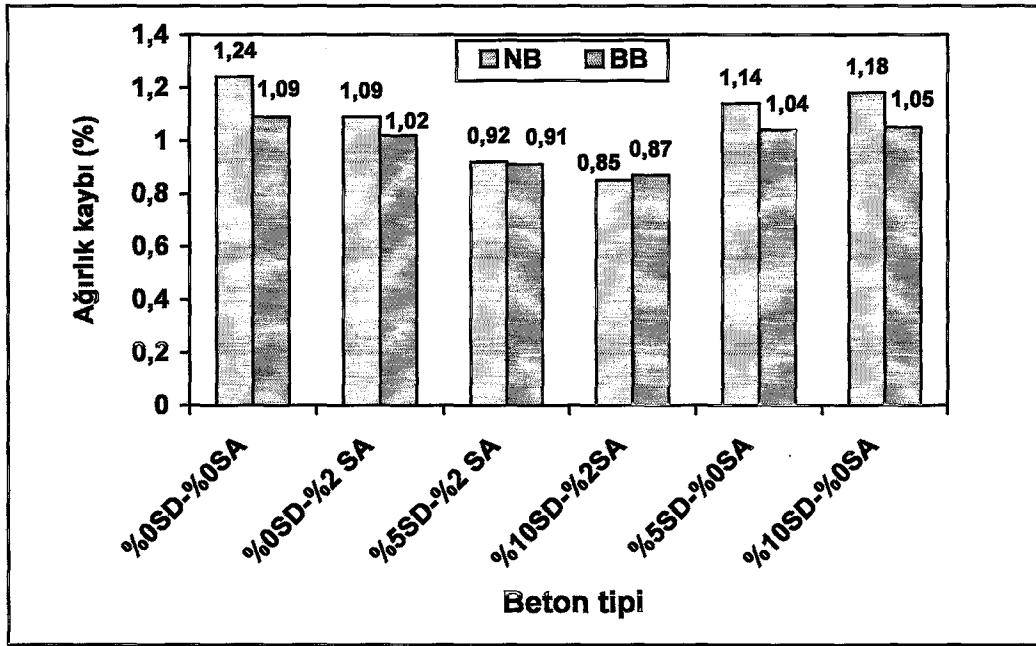


Şekil 4.12. BB'larda yarı hücre potansiyeli-hızlandırılmış korozyon ortamı ilişkisi

Yüzer (84), SD katkılı numunelerin 180 gün boyunca ~%4 NaCl çözeltisinde kür edildiğinde, donatının yarı hücre potansiyel değerlerinin ASTM C 876'ya (123) göre % 90 güvenirlikle korozyon bölgesinde kalarak korozyona uğradığını belirtmiştir.

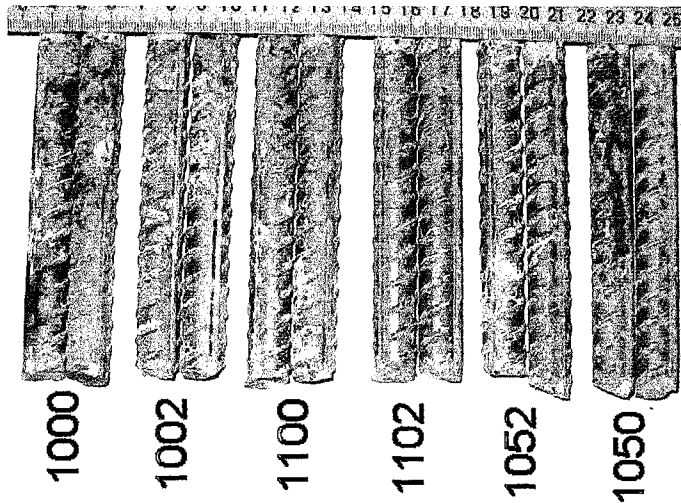
4.3.2. Donatı çeliğinde ağırlık kaybı

Hızlandırılmış korozyon süreçleri sonunda, yarı hücre potansiyel sonuçlarına paralel olarak, değerlendirmede kolaylık sağlaması için donatı çeliğinde yapılan ağırlık kaybı deneyinden elde edilen sonuçlara ait grafikler, Şekil 4.13'de verilmiştir. Ağırlık kayıpları, kesin olmamakla birlikte yalnızca SA kullanımı ile NB'larda azalmakta, BB'larda çok fazla değişmemektedir. SD katkılı numunelerde, şahit numunelere nazaran düşük olmakla beraber, SD kullanım oranının artışı ile artış eğilimi göstermiştir. Buna sebep olarak; basınç dayanımlarında olduğu gibi SD katkı kullanılan karışımların, işlenebilirliklerinin sabit tutulabilmesi için (SA katkı kullanılmadığından dolayı) s/b oranının arttırılması ve bunun da geçirimli betonlar elde edilmesine neden olması gösterilebilir. Ancak, hem SA kullanılan hem de SD kullanım oranının arttığı numunelerde ağırlık kaybı da azalmıştır. Yüzer (84)'ün çalışmasında da benzer sonuçlara işaret edilmiştir. Yarı hücre potansiyel deneyi sonuçlarına bakıldığında ve betondan çıkarılan donatıların görsel değerlendirmesi sonucunda, bu çevrimlerde kullanılan ıslatma ortamının yeterince şiddetli koroziv bir ortam olduğu söylenebilir.

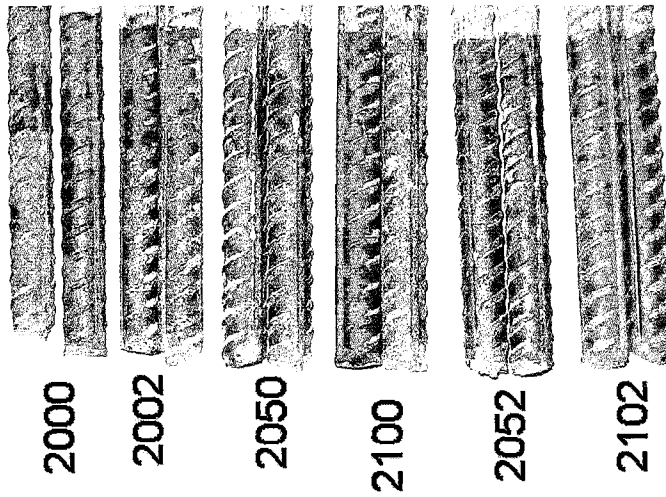


Şekil 4.13. Donatı çeliğinde beton tipine bağlı ağırlık kaybı

Hızlandırılmış korozyon sürecine maruz bırakıldıktan ve donatılar betondan çıkarıldıktan sonra temizlenmeden önceki görünümü, Resim 4.13 ve 4.14'de görülmektedir. Burada, 1000, 1050 ve 1100 kodlu numunelerden çıkarılan donatılar üzerinde korozyon gözlenmektedir.



Resim 4.13. NB korozyon numunelerinden çıkarılan donatıların görünümü



Resim 4.14. BB korozyon numunelerinden çıkarılan donatıların görünümü

BB içinde bulunan donatılar üzerinde herhangi bir renk değişimi görülmemektedir. BB'lardan çıkarılan bütün donatılarda, yarı hücre potansiyel değerlerine göre korozyon gözlenmesi beklenirken, görsel değerlendirmede herhangi bir korozyon oluşumu görülmemiştir. Bu yüzden, niteliksel bir değerlendirme yöntemi olan yarı hücre potansiyel değerleri ile görsel değerlendirme arasında bir tutarsızlık olduğu, standartlardaki yarı hücre potansiyel değerlerinin sınırlarının gözden geçirilmesi gerektiği söylenebilir. Bu nedenle kullanım kolaylığı, ekonomiklik ve hızlı sonuç veren bu yöntemin güvenilirliğinin düşük olduğu dikkate alınarak, donatı korozyonu araştırmalarında değerlendirme için tek başına kullanılmaması yerinde olacaktır. BB'lardan çıkarılan donatılarda korozyon oluşmamasının sebebi; taşıyıcı hafif beton elde edilebilmek için NB'lardan daha fazla miktarda çimento kullanılması olabilir. Aynı şiddetli ortama maruz kalmasına rağmen, BB numuneler içerisinde NaCl çözeltisinin çok fazla ilerleyemediği söylenebilir. BB'larda bu olumlu sonuç, Zhang and Gjörv (131)'un hafif agreganın gözenekliliğinden çok, harç fazının gözenek yapısının etkiliği olduğu görüşleri ile uyushmaktadır. Ek 5'de SD oranına bağlı ve SD ile SA katkı oranına bağlı ağırlık kaybı değişimi ayrı ayrı verilmiştir.

4.4. Klorür Miktarı Tayini

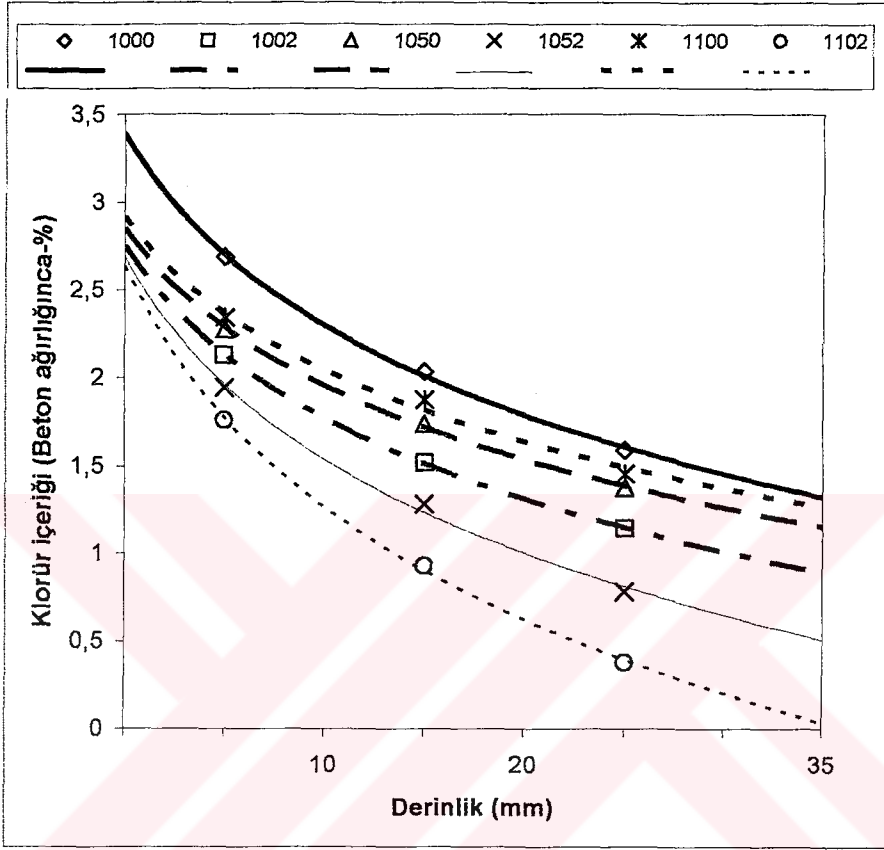
Hızlandırılmış korozyon süreci sonunda, korozyon numunelerinden, yüzeyden itibaren 0-10 mm, 10-20 mm ve 20-35 mm derinliklerden alınan toz numuneler üzerinde yapılan klorür miktarı tayini deneyinden elde edilen NB'lara ait veriler Çizelge 4.24'de görülmektedir. Görüldüğü gibi bütün beton tiplerinde derinlik arttıkça klorür içeriği azalmaktadır.

Çizelge 4.24. NB'larda klorür içeriğinin derinliğe bağlı olarak değişimi (beton ağırlığınca-%)

Beton Tipi	Yüzeyden itibaren derinlik (mm)			Regresyon denklemi	R ²
	0-10	10-20	20-35		
1000	2,6909	2,0377	1,5900	$y = -0,9957\ln(x) + 3,391$	0,9982
1002	2,1300	1,5194	1,1431	$y = -0,8964\ln(x) + 2,7543$	0,9998
1050	2,2791	1,7380	1,3750	$y = -0,8184\ln(x) + 2,8534$	0,9986
1052	1,9454	1,2800	0,7800	$y = -1,0499\ln(x) + 2,69$	0,9953
1100	2,3450	1,8770	1,4550	$y = -0,7956\ln(x) + 2,919$	0,9856
1102	1,7608	0,9301	0,3763	$y = -1,2536\ln(x) + 2,64$	0,9988

0-10 mm derinlikte en yüksek klorür içeriğine; şahit 1000 kodlu numunelerde rastlanmıştır (% 2,69). Bu derinlik için en düşük klorür içeriği ise 1102 kodlu numunededir (% 1,76). 20-35 mm derinlikte, 1000-1100-1050 ve 1002 kodlu numuneler en yüksek klorür içeriği oranına sahiptirler (sırası ile; % 1,59; 1,455; 1,375; 1,143). Aynı derinlikte, en düşük klorür içeriği oranını; 1102 ve 1052 kodlu numuneler sağlamaktadır (sırası ile; % 0,376 ve % 0,780). SD ve SA'lı numuneler birbirleri ile karşılaştırıldığında, SD-SA'lı numunelerdeki klorür miktarının daha az olduğu görülmektedir. SD ve SA katkının birlikte kullanımı ile daha az gözenekli bir beton elde edilmesi nedeni ile klorürün beton içerisinde ilerlemesi azalmaktadır. Hussain ve Rasheeduzzafar da korozyon başlangıç safhasını esas alarak, klorürlerin beton içine difüzyonunu araştırdıkları çalışmalarında; SD içeren betonun, katkısız betona göre 3 kat daha iyi koruma sağladığını belirtmişlerdir (84).

NB'lardan elde edilen verilere göre yüzeyden derinlere inildikçe klorür içeriğinin azaldığı Şekil 4.14'den görülmektedir.



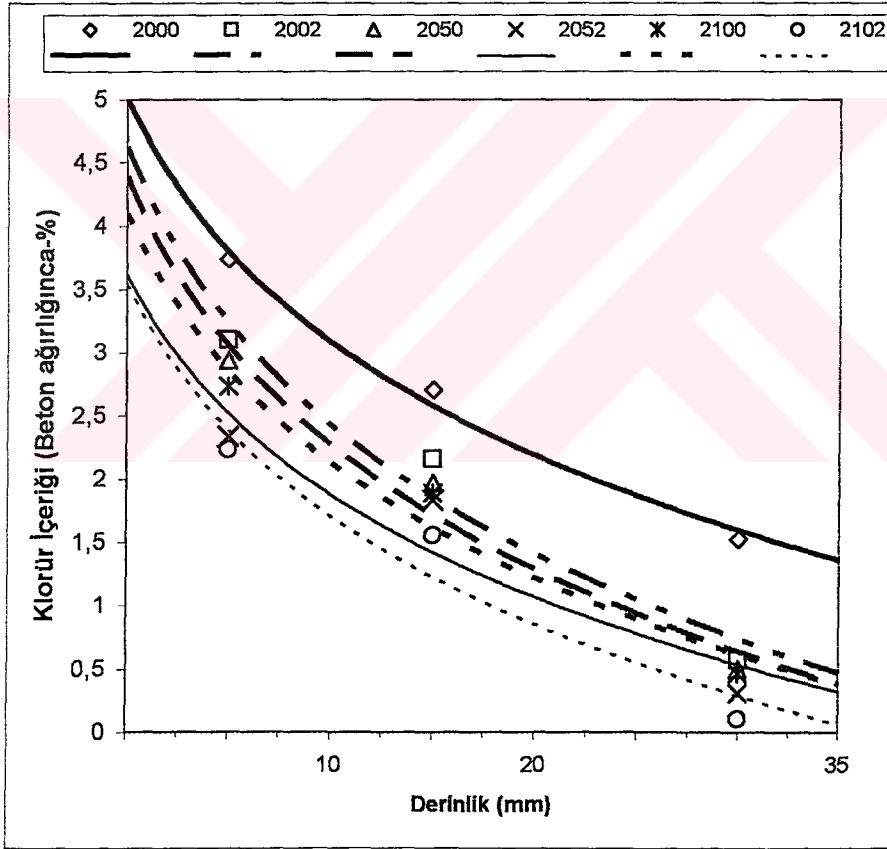
Şekil 4.14. NB'larda beton tipine bağlı klorür içeriği – derinlik ilişkisi

Çizelge 4.25'den görüleceği gibi BB'lardan, 2000 kodlu numune, 0-10 mm derinlikte en yüksek klorür içeriği oranına sahiptir (% 3,74). Aynı derinlik için en düşük klorür içeriği; 2102 kodlu numuneye aittir (% 2,2365). 20-35 mm derinliğe bakıldığında ise en düşük klorür içeriği; 2102 kodlu numunede (% 0,1065) iken en yüksek klorür; % 1,5265 oranı ile 2000 kodlu numunelerde görülmüştür. Yüzer (84)'in çalışmasında, % 10 SD katkılı numunelerde, yüzeyden itibaren 10 mm derinlikte serbest klorür miktarı yaklaşık 2 kat, % 20 SD katkılı numunelerde yaklaşık 4 kat azaldığı belirtilmiştir. SD'nın çimento ağırlığının % 10'u kadar kullanımı ile sistemin porozitesi azalmakta ve betonun klorür iyon geçirimliliğine karşı direncin artmasına katkıda bulunmaktadır.

Çizelge 4.25. BB'larda klorür içeriğinin derinliğe bağlı olarak değişimi (beton ağırlığına-%)

Beton Tipi	Yüzeyden itibaren derinlik (mm)			Regresyon denklemi	R ²
	0-10	10-20	20-35		
2000	3,7417	2,7051	1,5265	$y = -1,7576\ln(x) + 5,016$	0,9903
2002	3,1027	2,1584	0,5680	$y = -1,9974\ln(x) + 4,6231$	0,9575
2050	2,9400	1,9700	0,4970	$y = -1,9285\ln(x) + 4,39$	0,968
2052	2,3359	1,8318	0,3053	$y = -1,5859\ln(x) + 3,6189$	0,886
2100	2,7335	1,8886	0,4615	$y = -1,7903\ln(x) + 4,0967$	0,9572
2102	2,2365	1,5549	0,1065	$y = -1,6722\ln(x) + 3,543$	0,9307

BB'lara ait derinliğe bağlı klorür içeriği eğrileri Şekil 4.15'de görülmektedir.



Şekil 4.15. BB'larda beton tipine bağlı klorür içeriği – derinlik ilişkisi

Bu çalışmada serbest klorür miktarında, % 10 SD- %2 SA katkılı NB numunelerinde yüzeyden 10 mm derinlikte, katkısız NB numunelere göre

~1,5 kat, aynı derinlikte %10 SD-%2 SA katkılı BB numunelerde ise katkısız BB numunelere göre ~1,7 kat azalma görülmüştür.

Ek 6'da yüzeyden itibaren derinliğe bağlı klorür içeriği –SD katkı oranı ilişkisi ve SD - SA katkı oranı ilişkisi ayrı ayrı verilmiştir. Bu grafikler incelendiğinde SD – SA katkılı numunelerin SD oranının artışına bağlı olarak klorür miktarının azalma eğiliminde olduğu görülmüştür. Yalnız SD'lı olarak üretilen NB numuneler, SD-SA katkılı numuneler kadar belirgin bir eğilim sergilememişlerdir. BB'larda ise hem SD'lı hem de SD-SA'lı olarak üretilen numuneler paralel bir davranış göstererek klorür içeriğinde bir azalma eğilimine sahiptirler.

4.5. Karbonatlaşma Derinliği

Fenolfetalin çözeltisinin püskürtülmesinden sonra renk değiştirmeyen bölge sınırının kumpas yardımı ile yapılan çok sayıda ölçümünden elde edilen karbonatlaşma derinliğine (D_c) ilişkin ortalama ve sapma değerleri; Çizelge 4.26'da verilmiştir.

Çizelge 4.26. Beton tiplerine göre karbonatlaşma derinliği (D_c) değerleri

BETON TİPİ	N	D_c (mm)	Std. Sapma
1000	42	2,48	0,800
1002	20	2,16	0,156
1050	21	3,70	0,823
1052	12	1,61	0,559
1100	12	6,26	1,613
1102	18	1,91	0,558
2000	11	2,79	0,832
2002	12	2,33	0,886
2050	39	3,13	0,670
2052	19	1,40	0,421
2100	20	3,24	0,978
2102	26	1,85	0,401

Anlamlılık düzeyi $\alpha = 0,05$.

Beton tipinin ve katkı kullanım durumunun karbonatlaşma derinliği üzerindeki etkisinin araştırıldığı, iki faktörlü varyans analizi sonuçları (ANOVA) Çizelge 4.27'de görülmektedir. Varyans analizi sonuçlarına göre; betonlarda katkı kullanımının, karbonatlaşma derinliğine etkisi anlamlı bulunmuştur [$F_{(5,240)}=25,291$, $p<,05$].

Çizelge 4.27. Beton tipine bağlı karbonatlaşma derinliklerinin varyans analizi (ANOVA) sonuçları

Varyansın Kaynağı	KT	sd	KO	F	p
Grup (Şahit; % 2 SA- %10 SD; % 10 SD- %2 SA; %5 SD; %5 SD- %2 SA katkılı)	168,972	5	33,794	25,291	,000
Beton tipi (NB/BB)	39,876	1	39,876	29,842	,000
Beton tipi * Grup	143,995	5	28,799	21,552	,000
Hata	320,697	240	1,336		
Toplam	617,365	251			

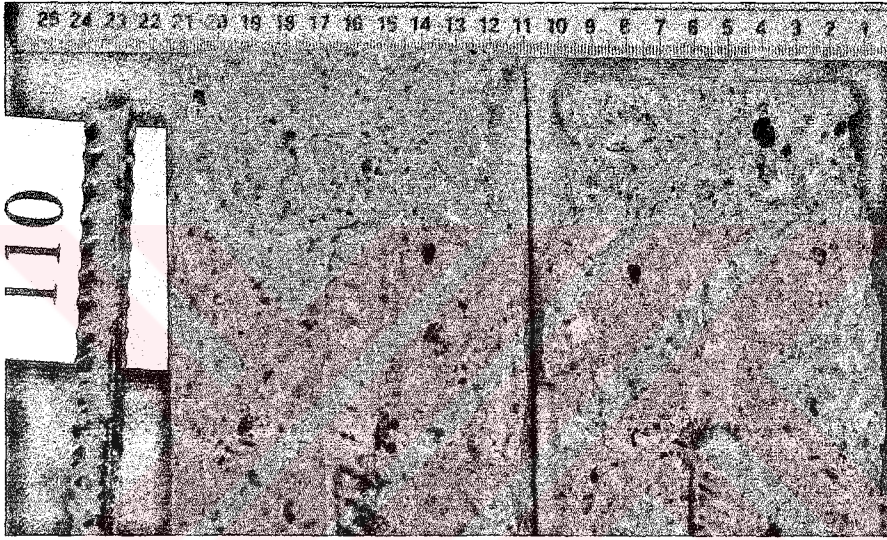
Anlamlılık düzeyi $\alpha = 0,05$.

Aynı şekilde; beton tipi olarak isimlendirilen (BB / NB) değişken de karbonatlaşma derinliğini anlamlı olarak değiştirmektedir [$F_{(1,240)}=29,842$, $p<,05$]. Ayrıca, bu iki değişkenin karbonatlaşma derinliğine ortak etkileri de anlamlıdır [$F_{(5,240)}=21,552$, $p<,05$]. Varyans analizi sonucunda ortaya çıkan farkın hangi gruplar arasında olduğu, yapılan çoklu karşılaştırma testi ile belirlenmiş ve Çizelge 4.28'de verilmiştir.

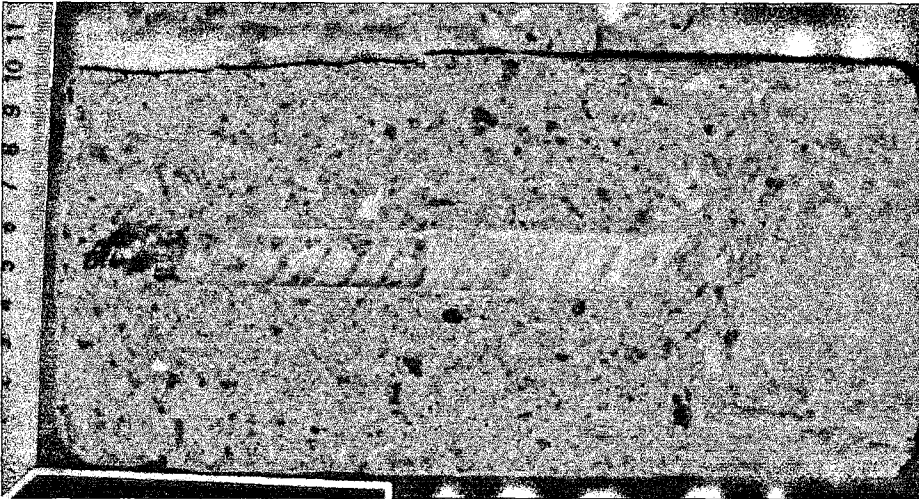
Çizelge 4.28. Beton tiplerinde karbonatlaşma derinliklerinin (D_c) çoklu karşılaştırması (Scheffe) testi sonuçları

Beton Tipi	N	Alt gruplar (mm – $\alpha = ,05$)			
		1	2	3	4
2052	19	1,40			
1052	12	1,61			
2102	26	1,85	1,85		
1102	18	1,91	1,91		
1002	20	2,16	2,16	2,16	
2002	12	2,33	2,33	2,33	
1000	42	2,48	2,48	2,48	
2000	11	2,79	2,79	2,79	
2050	39		3,13	3,13	
2100	20		3,24	3,24	
1050	21			3,70	
1100	12				6,26
p.		,153	,149	,107	1,000

Bütün numuneler içinde; en olumsuz sonuçları, 1100 kodlu numuneler (6,26 mm), sonra; 1050 kodlu numuneler vermektedirler (3,70 mm). NB'larda en olumlu sonuç; 1052 kodlu numunelerde iken (1,61mm), BB'lar içerisinde, en olumlu değer; 2052 kodlu numunede (1,40 mm), en yüksek değer ise; 2100 kodlu numunelerde görülmüştür (3,24 mm). En olumsuz sonuçların elde edildiği; 1100 ve 1050 kodlu numunelere ait fotoğraflar, Resim 4.15'de ve 4.16'da verilmiştir.

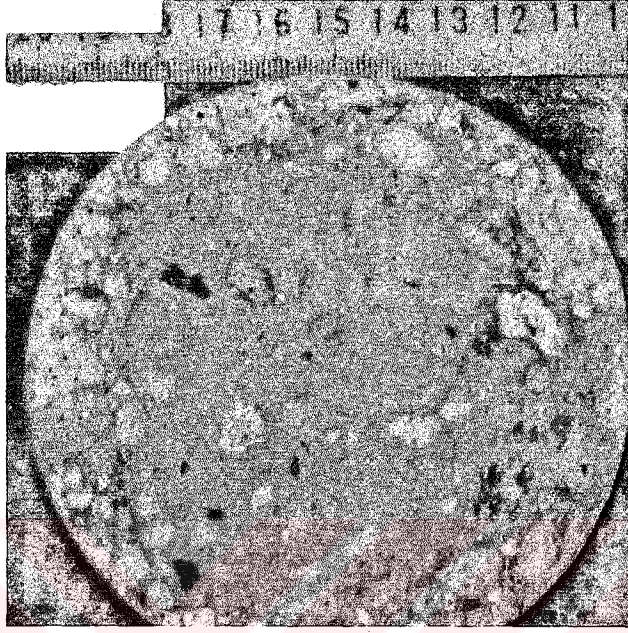


Resim 4.15. 1100 kodlu numunede fenolfetalin çözeltisi uygulandıktan sonraki görünümü

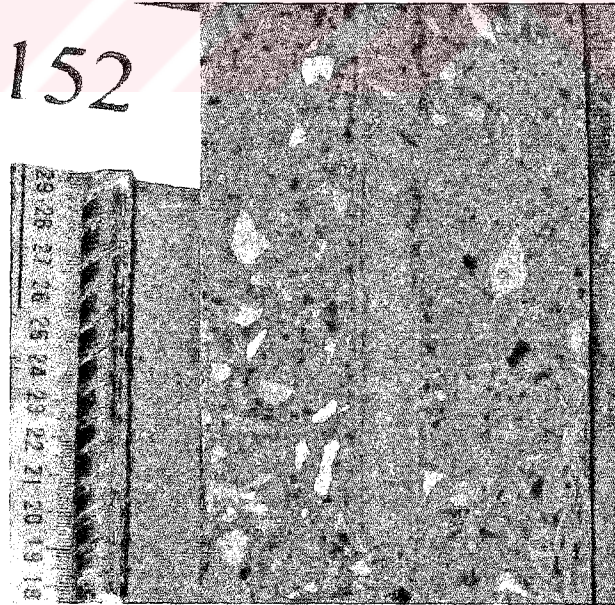


Resim 4.16. 1050 kodlu numuneye fenolfetalin çözeltisi uygulandıktan sonraki görünümü

En olumlu sonuçların elde edildiği 2052-1052 kodlu numunelerin fotoğrafları, Resim 4.17-4.18'de görölmektedir.

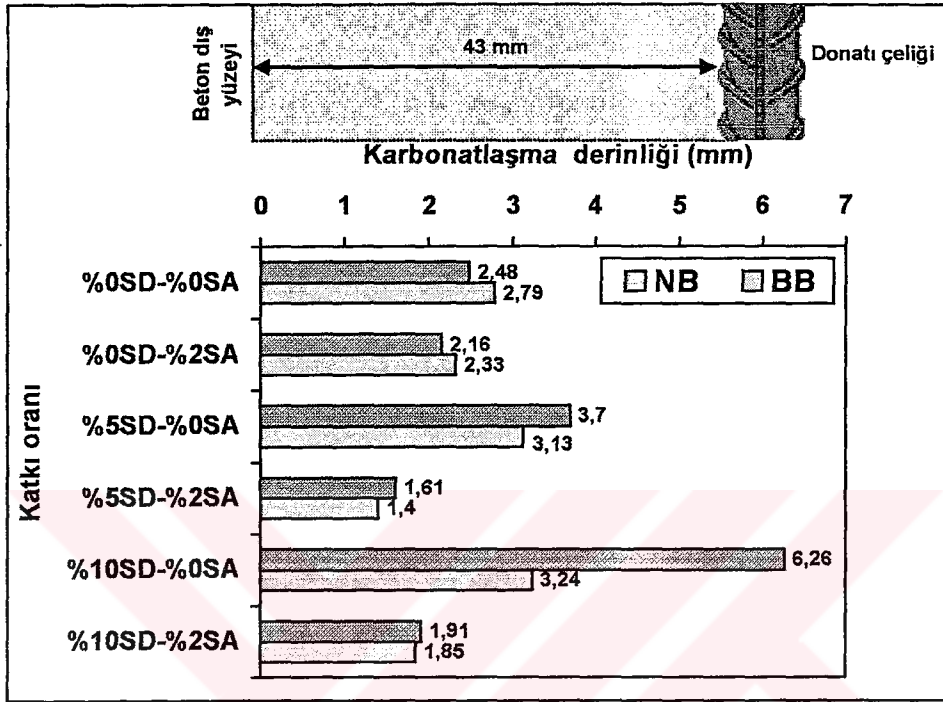


Resim 4.17. 2052 kodlu numuneye fenolfetalin çözeltisi uygulandıktan sonraki görünümü



Resim 4.18. 1052 kodlu numuneye fenolfetalin çözeltisi uygulandıktan sonraki görünümü

Karbonatlaşma derinliğinin, betonlara ve katkı kullanım durumuna göre değişim grafiği, Şekil 4.16'da verilmiştir.



Şekil 4.16. Betonlarda karbonatlaşma derinliği-beton tipi ilişkisi

Sonuçlar toplu olarak incelendiğinde; NB'larda ve BB'larda, SA ve SD katkıların birlikte kullanılması durumunda yaklaşık aynı olumlu sonuçlar elde edilmiştir. Bütün beton tiplerinde; en iyi sonuçları % 5 SD- % 2 SA katkıli numunelerin vermesine rağmen, % 10 SD - % 2 SA katkıli numunelerden elde edilen sonuçlar da bunlarla $\alpha = 0,05$ düzeyinde anlamlı fark göstermemiştir. En olumsuz sonuçlar, % 10 SD katkıli numunelerde görülmüştür. Buna göre, önce suda ve $40 \pm 5^\circ\text{C}$ 'de, sonra % 7 NaCl ve $40 \pm 5^\circ\text{C}$ 'de yapılan ıslatma-kurutma çevrimleri, SD katkıli numunelerde, karbonatlaşmanın artmasını sağlamıştır. Bunun sebebi, SD'nın beton içindeki Ca(OH)_2 bağlamış olması nedeni ile CO_2 'in daha derine nüfuz etmesi olabilir (84).

Grimaldi et al., klorürün karbonatlaşma derinliğini az da olsa arttırmasını, Cl^- iyonlarının elektriksel denge sağlanıncaya kadar, boşluk suyu bileşenlerinden OH^- iyonları ile yer değiştirmesine bağlamış ve OH^- içeren bu olayı karbonatlaşma olarak isimlendirmiştir. Ayrıca SD içeren harçlarda görünen karbonatlaşma derinliğinin, normal harçlardan daha fazla olduğunu açıklamıştır (84).



5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, NB ve BB'larda SD ve SA katkı kullanımının,

- Birim ağırlıklarına,
- Basınç dayanımlarına,
- Donatı-beton aderansı özelliklerine,
- Yüksek sıcaklığa maruz kaldıktan sonraki bazı fiziksel ve mekanik özellikleri ile
- Çelik donatı korozyonuna karşı etkileri,

NB'la karşılaştırmalı olarak araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıda başlıklar halinde sıralanmaktadır:

5.1. Sonuçlar

5.1.1. Birim ağırlık

Bu çalışmadaki, en ağır BB olan; % 2 SA katkılı BB'ların birim ağırlıkları dahi, en hafif NB olan; % 10 SD katkılı NB'lardan, ortalama % 23'e varan oranlarda daha düşüktür.

5.1.2. Basınç dayanımı

NB'lardan aynı işlenebilirlikteki betonlarda, SD kullanım oranının % 10 olması durumunda, basınç dayanımı düşmüştür. SD ve SA katkının birlikte kullanıldığı numunelerde ise SD kullanım oranının artışına bağlı olarak basınç dayanımları da % 50'ye varan oranlarda artmıştır.

Şahit BB'larda, 430 kg/m³ çimento dozajı ile 28. günde; 24 MPa basınç dayanımı elde edilmiştir. BB'larda, katkı olarak yalnızca, SD kullanıldığında, kullanım oranının artışına bağlı olarak, NB'larda olduğu gibi basınç

dayanımında bir azalma meydana gelmiştir. SD ve SA katkının birlikte kullanımı; SD kullanım oranına bağlı olarak belirgin olmamakla birlikte, bir artışa neden olmuştur.

NB'lar ve BB'ların 28 günlük basınç dayanımları karşılaştırıldığında; katkısız numunelerde; BB'ların dayanımlarının, NB'ların; % 62'si kadar olduğu görülmüştür. BB ve NB'lardan, en yüksek dayanıma ulaşılan, % 10 SD- % 2 SA katkılı numunelerde; BB dayanımları, NB'ların dayanımlarının, % 48'i kadar olmuştur.

5.1.3. Aderans dayanımı

NB'larda, SD'nin tek başına % 10 oranında kullanımı; donatı-beton aderansını azaltmıştır. SD ve SA katkının birlikte kullanılması durumunda, SD oranının artışına bağlı olarak; donatı-beton aderansı artmıştır. BB'larda ise SD'nin tek başına kullanımında, kullanım oranının artışına bağlı olarak bir azalma eğilimi vardır. SD'nin, SA katkı ile birlikte kullanımına bağlı olarak belirgin olmamakla birlikte bir artış olmuştur. Katkısız BB numunelerin aderans gerilmelerinin, katkısız NB numunelerinkinden, yaklaşık % 24 daha az olduğu görülmüştür. BB ve NB'lar; SD ve SA katkılı olarak üretildiklerinde katkılı BB'lar, katkılı NB'ların, % 60'ı kadar bir maksimum aderans dayanımı sağlamışlardır.

5.1.4. Yüksek sıcaklık etkisinde betonların davranışı

NB'ların, yalnızca basınç dayanımı değerlerine bakıldığında; bütün katkı miktarlarında, NB'ların, 400°C'deki basınç dayanımları, BB'ların, 20°C'deki dayanımlarını aşmıştır. 800°C ve üstündeki sıcaklıklarda, SD kullanım oranına bağlı olarak basınç dayanımı kaybının arttığı görülmüştür. Bu, SA katkının, SD ile birlikte kullanıldığı durumlarda da geçerlidir. En düşük basınç dayanımını; % 10 SD katkılı betonlar vermişlerdir.

Yüksek sıcaklık uygulaması sonrası ağırlık kaybına ilişkin olarak; NB'larda,

bütün sıcaklıklar için en fazla kayıp; % 10 SD katkılı betonlarda, en az kayıp ise % 10 SD -% 2 SA katkılı betonlarda görülmüştür. BB'larda en fazla ağırlık kaybına; % 5 SD -% 2 SA katkılı betonlarda rastlanırken, en az kayıp; katkısız betonlarda elde edilmiştir. % 2 SA katkılı betonlardaki ağırlık kaybı da yaklaşık katkısız BB'lar ile aynıdır.

Yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakılan BB'larda, basınç dayanımı bakımından, 400°C sıcaklık uygulaması sonrasında %10 SD kullanılan ve hiç katkı kullanılmayan betonlar, en fazla dayanım kaybına uğrayan betonlardır. BB'lardan, % 2 SA katkılı, % 10 SD - % 2 SA katkılı ve % 5 SD -% 2 SA katkılı betonlar; 400°C'den sonra 20 °C'deki dayanımlarını ~% 86-99'u arasında değişen değerlerde korumuşlardır. 800°C sıcaklık uygulamasından sonra ise; %10 SD katkılı betonlar, % 10 SD - % 2 SA katkılı ve % 5 SD - %2 SA katkılı betonlar, ilk dayanımlarının yaklaşık % 20'sini koruyabilmişlerdir. % 5 SD katkılı betonlar; % 33'ünü, % 2 SA katkılı betonlar; % 38'ini, katkısız BB'lar ise %28'ini korumuşlardır. Böylece, BB'larda 800°C sıcaklık uygulaması sonrası optimum SD katkı oranı; % 5 olmuştur.

5.1.5. Yarı hücre potansiyeli

Donatı korozyonu ile ilgili olarak yapılan yarı-hücre potansiyel deneyinden elde edilen değerler, hızlandırılmış korozyon süreci sonunda hem normal hem de BB'da, SD ve SA katkı kullanımına bağlı olarak; standartların '% 90 olasılıkla korozyon var' şeklinde değerlendirdiği bölgede kalmıştır. Burada, en olumlu sonucu; % 10 SD - % 2 SA katkının birlikte kullanıldığı betonlar vermiştir.

Katkısız betonlar arasında bir karşılaştırma yapıldığında; BB'lar, NB'lara göre korozyona karşı daha iyi potansiyel değerlerine ve dolayısı ile daha az koroziif ortam sağlama olasılığına sahiptirler. NB ve BB'larda, yarı hücre potansiyel değerlerinde en negatif sonuçlar; SD katkının tek başına kullanıldığı ve şahit numunelerde görülmüştür.

Korozyon numunelerinin, % 7 NaCl çözeltisinde ıslatma ve $40\pm5^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta kurutma çevrimlerine; 10 çevrim veya 17 çevrim maruz bırakılması arasında belirgin bir potansiyel değişikliği olmamıştır. Betonlar, 10 çevrim sonunda - 350 Mv olan ‘% 90 olasılıkla korozyona uğramış olma’ sınırını aşmışlardır.

5.1.6. Donatıda ağırlık kaybı

Hızlandırılmış korozyon çevrimleri sonucunda, donatıların beton içinden çıkarılması ile bunlar üzerinde görsel değerlendirme yapılmıştır. Buna göre, SD ve SA katkıların birlikte kullanıldığı hem normal hem de BB’larda, donatı korozyonu oluşmadığı görülmüştür. Ancak, NB’larda katkı kullanılmadığı durumda ve SD’nın tek başına kullanımında, çelik donatılarda korozyon olduğu görülmüştür.

SD oranının artışına bağlı olarak, donatı ağırlık kaybı azalmaktadır. En az ağırlık kaybı, hem BB’lar hem de NB’larda, % 10 SD - % 2 SA katkılı numunelerde elde edilmiştir.

5.1.7. Klorür miktarı

Klorür miktarı tayini deneyinde, SD’nın, SA ile birlikte kullanımında, SD oranının artışına bağlı olarak klorür oranı azalmıştır. En iyi sonucu; NB’larda; % 10 SD - % 2 SA katkılı numuneler vermişlerdir. BB’larda; SD oranının artışına bağlı olarak klorür oranı azalmakta, en olumlu sonucu ise SA katkı ile birlikte kullanımında vermiştir.

5.1.8. Karbonatlaşma derinliği

NB ve BB’larda, tek başına kullanılan SD’nın kullanım oranının artması ile karbonatlaşma derinliği artmaktadır. SD ile % 2 SA katkının birlikte kullanımı ile katkısız betonlardan daha olumlu sonuçlara ulaşılmıştır.

5.2. Öneriler

BB'lar betonarme yapıların taşıyıcı elemanlarında kullanıldıklarında, yapıdaki ölü yükleri NB'lara göre azaltabileceklerdir. Çimento gereksiniminin fazla olması, maliyetleri yükselten bir dezavantaj gibi gözükse de deprem gibi yatay kuvvetlerle doğru orantılı olarak değiştiği bilinen; birim ağırlığın azalması, uzun vadede avantaj sağlamaktadır.

Bu çalışmada hafif agrega olarak Isparta – Gölcük yöresi bims agregası kullanılmıştır. Bir genelleme yapmadan önce, farklı bölgelerden sağlanan agregalarla araştırma yapılması uygun olacaktır.

BB'larda çimento sarfiyatını azaltabilmek için bims agregasının ince kısmını, şartnamelerdeki taşıyıcı hafif beton birim ağırlığı sınırlarını aşmadan kum ile değiştirilebilir. Bu şekilde, hem basınç dayanımları, hem de aderans dayanımları arttırılabilir. Üretilen bimsbetonlarda, donatı korozyonunu araştırmakta yarar görülmektedir.

Ayrıca donatının korozyondan kaynaklanan kesit kaybını hesaplayabilmek için, ıslatma-kurutma yöntemi yerine, sadece NaCl çözeltisinde bekletme yöntemi kullanılabilir.

KAYNAKLAR

1. Akyüz, S., vd., "Betonda kalite deklarasyonu", **Hazır Beton Dergisi**, 8(46): 12-14 (2001).
2. Şimşek, O., "Yapı Malzemeleri Cilt 2", **Ankara Üniversitesi Basımevi**, Ankara. 33-47 (2000).
3. Ersoy, U. Ve Özcebe, G. "Betonarme", **Evrım Yayınevi**, 50-51, 721-728 (2001).
4. Tuna, M., E., "Betonarme, Cilt:1", **Gazi Üniversitesi İletişim Fakültesi Matbaası**, Ankara, 24-25 (1993).
5. Hüsem, M. Ve Durmuş, A., "Hafif beton-donatı aderansının geleneksel beton-donatı aderansı ile karşılaştırmalı olarak incelenmesi" **Türkiye İnşaat Mühendisliği XIII. Teknik Kongresi**, Ankara, 341-354 (1995).
6. Hüsem, M., "Doğu Karadeniz Bölgesi doğal hafif agregalarından biriyle yapılan hafif betonun geleneksel bir betonla karşılaştırmalı olarak incelenmesi", Doktora Tezi, **K.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü**, Trabzon, 1-12 (1995).
7. Postacıoğlu, B., "Beton Cilt 2 (Agregalar ve Beton)", **Matbaa Teknisyenleri Basımevi**, İstanbul, 233-234, 344-345, 397-401 (1987).
8. Cengizkan, K. Ve Ersoy, U., "Betonarmede Bims Kullanımı", **İMO İzmir Şubesi**, İzmir, 5, 14-21, 25-29 (1999).
9. Taşdemir, M. A., "Taşıyıcı hafif agregalı betonların elastik ve elastik olmayan davranışları", Doktora Tezi, **İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü**, İstanbul, 2-14 (1982).
10. Yeğınobalı, A., "Hafif ve yüksek dayanımlı hafif beton" **Çimento ve Beton Dünyası Dergisi**, 2(8): 20-30 (1997).
11. Öztok, İ. Ve Yeğınobalı, A., "Silis dumanı ve uçucu kül içeren taşıyıcı bimsbetonlar" **Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu**, İstanbul, 73-94 (1997).
12. Tokyay, M. Ve Şatana, O. A., "Hafif beton özelliklerine çimento miktarının etkileri" **Çimento ve Beton Dünyası Dergisi**, 2(8): 31-39 (1997).
13. Neville, A. M., "Properties of Concrete", 4. Baskı, **Longman Group Ltd.**, 303-306, 391-394, 504-505, 581-585, 605-609, 610-624 (1995).

14. Erdoğan, T. Y., "Beton", **METU Press**, I. Baskı, Ankara, 66-67, 191-198, 652-677 (2003).
15. Karagüler, M. E., "Isıl işlem parametrelerinin hafif beton özelliklerine etkisi" Doktora Tezi, **İ.T.Ü. Fen Bil. Enstitüsü**, İstanbul, 6-10 (1988).
16. Aruntaş, H. Y., "Diyatomit, özellikleri, kullanım alanları, inşaat sektöründeki yeri" **Çimento ve Beton Dünyası**, 1(4): 27-32 (1996).
17. Çelik, M. H. ve Çelik, A., "Straforun taşıyıcı hafif beton üretiminde kullanılabilirliğinin araştırılması" **Politeknik Dergisi**, 7(3):251-257 (2004).
18. Demirkol, V., Akbay, K. Ve İçemer, Ö., "Yapı Malzemeleri" **Başbakanlık Basımevi**, Yayın No:4, Ankara, 248s. (1985).
19. Urhan, S., "Hafif ve çok hafif betonların karakteristik özellikleri ve teknik kapasiteleri" **Çimento ve Beton Dünyası**, (7):19-22 (1997).
20. DPT, "Yapı Malzemeleri III (Pomza-Perlit-Vermikülit-Flogopit-Genleşen Killer)" Madencilik Özel İhtisas Komisyonu Raporu Endüstriyel Hammaddeler Alt Komisyonu Çalışma Grubu Raporu, **DPT: 2617 – ÖİK: 628**, Ankara, 1, 4, 6, 18 (2001).
21. Keskin, N., "Sünger taşının strüktürel incelenmesi" **İMO, Antalya Şubesi Bülteni**, (13):23-24 (1986).
22. Ünal, O., Çankıran, O. ve Sancak, E., "Hafif blok elemanların üretiminde kullanılan malzemelerin özellikleri ve teknik kapasiteleri" **I. Isparta Pomza Sempozyumu**, Isparta, 89-96 (1997).
23. Erdoğan, M., "Nevşehir –Ürgüp dolay süngertaşı yatakları ve özellikleri" **I. Isparta Pomza Sempozyumu**, Isparta, 213-218 (1997).
24. Yıldız, N., "Madencilliğimize bakış: 2003" 3, 7 (2003) <http://www.maden.org.tr/yeni3/yayinlar/kitaplar/Madenciligimizebakis2003/Madenciligebakis2003.pdf>
25. ASTM C 330-02a "Standard specification for lightweight aggregates for structural concrete", Annual Book of ASTM Standards, Vol 04.02, **ASTM**, West Conshohocken, PA. (2003).
26. TS 2511, "Taşıyıcı hafif betonların karışım hesap esasları", **Türk Standartları Enstitüsü**, Ankara (1977).
27. Şimşek, O., Aruntaş, H., Y. ve Eroltekin, V., "Uçucu külün hafif beton yapı elemanı üretiminde kullanımı ve mekanik özelliklerine etkisi" Z.K.Ü. Karabük Teknik Eğitim Fakültesi, **Teknoloji Dergisi**, 2(3-4):15-23 (1999).

28. Harding, M. A., "Structural lightweight aggregate concrete" **Concrete Construction**, July, 618-623 (1995).
29. Slate, F. O., Paksoy, A. S. and Lokmanoğlu, C. M. "Lightweight concrete" **ASP, C.&E. E. Materials Project G 757**, 27-31 (1976).
30. Gül, R., "Hafif agregalı betonun kullanılabilirliği" **DSİ Teknik Bülteni**, (81):31-36 (1994).
31. Tullmin, M. A. A., Hansson, C. M. and Roberge P. R. "Electrochemical techniques for reinforcing steel corrosion" <http://www.corrosionsource.com/events/intercorr/techsess/papers/session1/tullmin> (09/05/2002)
32. Topçu, İ. B., "Semi-lightweight concretes produced by volcanic slags" **Cement and Concrete Research**, (27): 15-21 (1997).
33. Al-Khaiat, H., and Haque, N., "Strength and durability of lightweight and normal weight concrete" ASCE, **J. of Materials in Civil Engineering**, 11(3): 231-235 (1999).
34. Hammer, T. A., "High strength LWA concrete with silica fume- effect of water content in the LWA on the mechanical properties", **Proc. Fourth Int. Conf. On the use of Fly Ash, Silica Fume, Slag and Other Mineral By-products in Concrete**, Supplementary Papers, Istanbul, Turkey, 313-330 (1992).
35. Hossain, K. M. A., "Blended cement using volcanic ash and pumice" **Cement and Concrete Research**, 33: 1601-1605 (2003).
36. Hossain, K. M. A., "Performance of volcanic ash concrete in marine environment", **Proc. Of the 24th OWICS Conference**, 21st Century Concrete and Structures, CI-Premier Pte. Ltd., Singapore, XVIII, 209-214 (1999).
37. Hossain, K. M. A., "Corrosion of reinforcement in volcanic ash and pumice based concrete", **Proc. Of the first Asia/Pacific Conference on Harmonisation of Durability Standards and Performance Tests for Component in Buildings and Infrastructure**, Bangkok, Thailand, (1999).
38. Hossain, K. M. A. "Durability of volcanic ash and pumice concrete in marine environment", **Proc. Of the first Asia/Pacific Conference on Harmonisation of Durability Standards and Performance Tests for Component in Buildings and Infrastructure**, Bangkok, Thailand, (1999).

39. Hossain, K. M. A., "Properties of volcanic pumice based cement and lightweight concrete" **Cement and Concrete Research**, 34: 283-291 (2004).
40. Yaşar, E., et al., "Strength properties of lightweight concrete made with basaltic pumice and fly ash" **Materials Letters**, 53: 2267-2270 (2003).
41. Kılıç, A., et al., "High-strength lightweight concrete made with scoria aggregate containing mineral admixtures" **Cement and Concrete Research**, 33: 1595-1599 (2003).
42. Hüsem, M., "The effect of bond strengths between lightweight and ordinary aggregate-mortar, aggregate-cement paste on the mechanical properties of concrete" **Materials Science and Engineering A363**: 152-158 (2003).
43. Bhanja, S. and Sengupta, B. "Optimum silica fume content and its mode of action on concrete", **ACI Materials Journal**, 100 (5): 407-412 (2003).
44. Özturan, T., "Uluslararası IV. CANMET-ACI uçucu kül, silis dumanı, cüruf ve doğal puzolanların kullanımı konferansının değerlendirilmesi" **Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu**, TMMOB İnş. Müh. Odası, Ankara, 57-78 (1993).
45. Halilov, S. "Silis dumanı ve süper akışkanlaştırıcı katkıli lifli betonların özellikleri" Doktora Tezi, **Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 1 (2003).
46. Çelik, M., H., Şimşek, O. ve Sancak, E., "Silis dumanı kullanımının çimentonun priz başlama ve bitiş sürelerine etkisi" **Politeknik Dergisi**, 4 (4): 55-60 (2001).
47. Aka, İ., Keskinel, F. ve Arda S. T. "Betonarmeye Giriş", **Birsan Yayınevi**, İstanbul, 48-56 (1990).
48. Karakoç, C., "Aderansta mekanik etkileşim olayı" Doktora Tezi, **İ.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü**, İstanbul, 1-14 (1985).
49. Yerlici, V. Ersoy, U., vd. "Yüksek dayanımlı beton elemanlarda donatı kenetlenmesi" **İMO Teknik Dergi**, 6 (3):1007-1026 (1995).
50. Yerlici, V. ve Özturan, T, "Yüksek dayanımlı beton elemanlarda aderans dayanımı" **İMO Teknik Dergi**, 13 (1):2527-2554 (2002).
51. Yeğınobalı, A., "Silis dumanı ve çimento ile betonda kullanımı" **TÇMB**, 2. Baskı, Ankara, 18-19, 28-34, 45-46 (2002).

52. Khayat, K. H. and Aitcin, P. C., "Silica fume in concrete-an overview" **ACI SP-132**, 835-865 (1992).
53. Aquino, M.J., "Mechanical properties of the aggregate and cement interface" **Advanced Cement Based Materials**, 2: 211-223 (1995).
54. Cox, J. V., Bergeron, K. and Malvar, J. "A combined experimental and numerical study of the bond between lightweight concrete and CFRP bars" **Sessions on Interface Degradation 14th ASCE Engineering Mechanics Conference**, The University of Texas at Austin (2000).
55. Clfik, M. S. ve zturan, T., "Yüksek sıcaklığın normal ve yüksek dayanımlı betonlarda agrega çimento hamuru arayzeyine etkileri" **Türkiye İnşaat Mhendisliği XVI. Teknik Kongresi**, Bildiriler Kitabı, Ankara, 40 (2001).
56. Gl, R. Ve Bingl, F., "Betonun yangın dayanımına genel bir bakış" **DSİ Teknik Bülteni**, (99): 3-18 (2002).
57. Rostacy, F. S., Weiş, R. and Wiedemann, G., "Changes of pore structure of cement mortars due to temperature" **Cement and Concrete Research**, 10(2):157-164 (1993).
58. Ataman, R., "Beton yapıların yangın dayanımlarının incelenmesi" Yüksek Lisans Tezi, **K.T.. Fen Bilimleri Enstitüsü**, Trabzon, 20-24, 38-51 (1991).
59. Aköz, F., Yüzer, N. Ve Koral, S., "Portland imentolu ve silis dumanı katkılı harçların fiziksel ve mekanik özelliklerine yüksek sıcaklığın etkileri", **İMO Teknik Dergi**, 6 (1): 919-931 (1995).
60. Baradan, B., Yazıcı, H. ve n, H., Betonarme Yapılarda Kalıcılık (Durabilite), **D.E.. Müh. Fak. Yayınları**, I.Basım, Yayın No:298, İzmir, 67-73, 152-153, 158-170, 176-198 (2002).
61. Türker, P. ve Erdoğdu, K., Erdoğan B., "Farklı tiplerde agregalar içeren yangına maruz kalmış harçların incelenmesi" **imento ve Beton Dünyası Dergisi**, 6 (31): 52-69 (2001).
62. Riley, M.A., "Possible new method for the assessment of fire damaged concrete" **Magazine of Concrete Research**, 43 (155): 87-92 (1991).
63. Lin, W. M., Lin T. D. and Powers C. P., "Microstructures of fire damaged concrete" **ACI Materials Journal**, 93(3):199-205 (1996).
64. şimşek, O. ve Kılıç, R., "Madenşehri (Karaman) doğusundaki ponza taşı ile üretilen hafif beton dayanımına uçucu kül oranının etkisinin

incelenmesi" *Doğa, Tr. J. Of Engineering and Enviromental Sciences TÜBİTAK*, Ankara, 15:283-295 (1991).

65. Akman, S. "Betonarme yapılarda yangın hasarı ve yangın sonunda taşıyıcılığın belirlenmesi" *Sika Teknik Bülten*, 3: 1-7 (2001).
66. Hammer, T.A., "Compressive strength and e-modulus of elevated temperatures", *Report 6.1, High Strength Phase 3.SINTEF-repport nr STF70 A 95023*, Trondheim, 16 pp (1995).
67. Lingard, J. and Hammer, T. A., "Fire resistance of structural lightweight aggregate concrete a literature survey with focus spalling", <http://www.itn.is/ncr/publications> (04/04/2004).
68. Kong, F.K., Evans, R.H., Cohen, E. and Roll, F. "Handbook of structural concrete" *Pitman Books Limited*, London, 7 pp (1983).
69. Abeles, P.W. and Bardhan-Roy, B.K. "Prestressed concrete designer's handbook", 3rd Edition, A Viewpoint Publication, *Cement and Concrete Association, Wexham Springs*, 556 pp (1981).
70. Hammer, T.A. "Spalling reduction through material design", *Report 6.2, HSC Phase 3. SINTEF-rapport nr STF70 A95024*, Trondheim, 13 pp (1995).
71. Jahren, P. "Fire resistance of high strength / dense concrete, with particular reference to the use of condensed silica fume – A Review". *Third CANMET/ACI International Conference on the Use of Fly Ash, Silica Fume and Natural Pozzolans in Concrete*, Trondheim, 21 pp. (1993).
72. Hansen, P.A. and Jensen, J.J. "Fire resistance and spalling behavior of LWA beams" Report 6.3, High Strength Concrete phase 3, *SINTEF-rapport nr STF70 A95004*, Trondheim, 13 pp. (1995).
73. Jensen, J.J., et al. "Fire resistance of lightweight aggregate concrete" *International Symposium on Structural Lightweight Aggregate Concrete*, Sandefjord, 192-203 (1995).
74. Justnes, H. and Hansen, E. A., "LWA concrete for floaters", SP4 Hydrocarbon fire resistance, Report 4.1 – A theoretical evaluation based on material technology, *SINTEF report no STF65 F90009*, Trondheim, 42 pp. (1990).
75. Malhotra, H. L. "Spalling of concrete in fires", *CIRIA technical note 118*, London, 35 pp. (1984).

76. Copier, W. J. "The spalling of normal and lightweight concrete exposed to fire", **Proceedings published in "Fire Safety of Concrete Structures"**, Fall Convention of the American Concrete Institute, Detroit, MI, USA, 219-236 (1983).
77. Phan, L. and Carino N., "Effect of test conditions and mixture proportions on behavior of high-strength concrete exposed to high temperatures" **ACI Materials Journal**, 99 (1): 54-66 (2002).
78. Akman, S. "Binaya uygun beton üretimi ve seçiminde kriterler" TMMOB Mimarlar Odası, İstanbul Büyükşehir Şubesi, **Yapı Malzemesi ve Deprem Semineri**, Bildiriler Kitabı, İTÜ, Taşkılla, İstanbul, 65-72 (2001).
79. Mehta, P.K. and Burrows, R.W., "21. Yüzyılda dayanıklı beton inşası" Çeviren: Erdoğan, Ş., **THBB, Hazır Beton Dergisi**, (57): 40-47 (2003).
80. Shah, S.P., Wang, K. and Weiss, J., "Mixture proportioning for durable concrete: challenges and changes" Çeviren: Kurbetçi, Ş., **THBB Hazır Beton Dergisi**, 55:61-68 (2003).
81. Balta, İ. ve Cilason, N., "Betonda Kanser: Teşhis, Tedavi" **IV. Korozyon Sempozyumu**, İstanbul, 81-88 (1994).
82. Yalçın, H. ve Koç, T., "Katodik Koruma", **Palme Yayınları**, Ankara, 1-2, 269-287 (1999).
83. Bağlan, B. "Katodik koruma altındaki betonarme demirinin potansiyel-pH ilişkisinin araştırılması" Yüksek Lisans Tezi, **Çukurova Üniv. Fen Bilimleri Enstitüsü**, Adana, 1-15 (1999).
84. Yüzer, N., "Silis dumanı katkılı betonarme elemanlara klorür etkisinin hızlandırılmış korozyon deneyi ile araştırılması" Doktora Tezi, **Yıldız Teknik Üniv. F.B.E.**, İnşaat Müh. A.B.D., İstanbul, 3-51 (1998).
85. Kurtis K. E., Meyer-Ilse, W. and Monteiro, P. J. M., "Soft X-ray spectromicroscopy for in situ study of corrosion" **Corrosion Science**, 42: 1327-1336 (2001).
86. Yüzer, N., "Su geçirimsizliğinin donatı korozyonuna etkisi" TMMOB Makine Müh. Odası, **Yapıda Yalıtım Konferansı**, İstanbul, 105-118 (1999).
87. Akkaya Y. ve Akyüz S., "Betonda kimyasal korozyon" **IV. Korozyon Sempozyumu**, İstanbul, 125-132 (1994).
88. Cilason, N., Kocagil, F. ve Aksöz, B., "Betonda korozyon", **XIII. TMMOB İnşaat Müh. Teknik Kongresi**, Ankara, 123-134 (1995).

89. ACI 222-R96 "Corrosion of metal in concrete" **American Concrete Institute**, 9-15, 21-22 (1997).
90. Erdoğan, Ş., "Betonarme yapılarda çelik donatı korozyonu" **THBB, Hazır Beton Dergisi**, (52): 46-50 (2002).
91. Massazza, F., "Evaluation of cements and cementitious systems: history and prospects" **Cement and Concrete Technology in the 2000s** Istanbul, Turkey, 3-28 (2000).
92. Gjörv, O. E., "Durability of concrete structures in resource and environmental perspective" **Proc. of Cement and Concrete Technology in the 2000s**, Istanbul, Turkey, 1: 73-86 (2000).
93. Akman, M. S., "Deniz Yapılarında Beton Teknolojisi", **İTÜ, Matbaası**, İstanbul, 47-48 (1992).
94. Arslan M., "Beton (Dökümü, Kalıpları, Kusurları, Dayanıklılığı)", **Atlas Yayınevi**, İstanbul, 155-166 (2001).
95. Mehta, P. K. and Monteiro P. J. M., "Concrete: Microstructure, Properties and Materials" **Printice-Hall**, USA, 152-158 (2001).
96. ACI 201.2 R-01, "Guide to durable concrete", **American Concrete Institute**, 41pp. (2001).
97. Cao, H. T., Baweja, D. and Roper, H., "Corrosion characteristics of steel in solutions derived from cements and blended cements", **Cement and Concrete Res.**, 20 (3): 325-334 (1990).
98. Boah, J. K., "Electrochemical behavior of steel in saturated calcium hydroxide solution containing Cl^- , SO_4^{2-} and CO_3 ions", **Corrosion**, 46 (2): 153-158 (1990).
99. Tokyay, M., "Agresif ortamlarda çimentolu sistemler" **Çimento ve Beton Dünyası Dergisi**, 2(8):13-19 (1997).
100. TS 3440 "Zararlı kimyasal etkileri olan su, zemin ve gazların etkisinde kalacak betonlar için yapım kuralları" **Türk Standartları Enstitüsü**, Ankara (1982).
101. Gani, M. S. J., Cement and Concrete, **Chapman-Hall**, 146-159 (1997).
102. Gjörv, O. E., "Durability of concrete containing condensed silica fume" **First Int. Conf. On the use of Fly Ash, Silica Fume, Slag and Other Mineral By-products in Concrete**, ACI SP-79, 695-708 (1983).

103. Hooton, R. D., "Influence of silica fume replacement of cement on physical properties and resistance to sulfate attack, freezing and thawing and alkali-silica reactivity" **ACI, Materials Journal**, 90 (2):143-151 (1993).
104. Locke, C.E. and Siman, A., "Electrochemistry of reinforcing steel in salt contaminated concrete" Corrosion of Steel in Concrete, **ASTM STP 713**, Eds.: D.E. Tonini and J.M. Gaidis, 3-16 (1980).
105. Maslehuddin, M., Page, C. L. and Rasheeduzzafar, "Effect of temperature and salt contamination on carbonation of cements" **Journal of Materials in Civil Engineering**, 8 (2): 63-69 (1996).
106. Güneyisi, E., Özturan T. ve Gesoğlu M., "Çimento tipinin havada kür edilen betonda basınç dayanımı ve karbonatlaşmaya etkileri" **Hazır Beton Dergisi**, 58: 68-73 (2003).
107. Cilason, N. ve Aksoy N., "Beton Yapı Hasarları Onarımı, Korunması ve Sıcak İklimlerde Beton" **Birsen Yayınevi**, İstanbul, 15-20, 91-93 (2000).
108. Soroushian, P. and Ravanbakhsh, S., "Caused and troubleshooting of concrete problems", Diagnosis and Cure of Concrete Problems: State of the Art, Concrete Technology Seminar VI, Edited by: Soroushian, P. and Ravanbakhsh, S., **Michigan State University**, Michigan, 1-33 (1992).
109. Yeğınobalı, A., "Betonda çelik donatı korozyonu", **T.H.B.B. Hazır Beton Dergisi**, 41: 54-57 (2000).
110. Ozyildirim, C. and Halstead, W., J., "Improved concrete quality with combination of fly ash and silica fume" **ACI Materials Journal**, 91 (6):587-594 (1994).
111. Sancak, E. ve Şimşek, O., "The effect of the use of silica fume in concrete on steel reinforcement corrosion" **IV. ICCP 2004 International Corrosion and Concrete Protection Symposium**, Ankara, Türkiye, 441-452 (2004).
112. Virmani, Y. P. and Clemena, G. G., "Corrosion protection- concrete bridges" **FHWA-RD-98-088, Final Report**, Virginia Transportation Research Council, September, 1-7 (1998).
113. Perenchio, W. "Corrosion of reinforcing steel" Concrete and Concrete-Making Materials, Edited by: Klieger, P. and Lamond, J., **ASTM STP 169C**, 164-172 (1994).
114. Goñi, S. and Andrade, C., "Synthetic concrete pore solution chemistry and rebar corrosion rate in the presence of chlorides", **Cement and Concrete Res.**, 20(4): 525-539 (1990).

115. Üneri, S., "Korozyon Mühendisliği", **SEGEM Yayınları**, Yayın No:88, Ankara, 405-412 (1981).
116. Yılmaz, M., "The Corrosion of steel in autoclaved aerated concrete" Master of Science Thesis, **METU, Graduate School of Natural and Applied Sciences**, 15-33 (1998).
117. Özkul, M. H., ve Yıldırım, H., "Kimyasal katkıların uzun süreli davranışları" **4. Ulusal Beton Kongresi**, İstanbul, 133-148 (1996).
118. Şimşek, O., "Beton ve Beton Teknolojisi", **Seçkin Yayıncılık**, Ankara, 155-167 (2004).
119. Aruntaş, H., Y., "Süper akışkanlaştırıcı bir katkının betonun fiziksel ve mekanik özelliklerine etkisi" **Çimento ve Beton Dünyası**, 2(9): 33-38 (1997).
120. Hanehara, S. and Yamada, K., "Interaction between cement and chemical admixture from the point of cement hydration, absorption behavior of admixture and paste rheology" **Cement and Concrete Research**, 29 (1): 1159-1165 (1999).
121. Türkmen, İ., Gavgalı, M., and Gül, R. "Influence of mineral admixtures on the mechanical properties and corrosion of steel embedded in high strength concrete" **Materials Letters**, 57: 2037-2043 (2003).
122. Sevük, F., "Yapı hasarları ve hasarların iyileştirilmesi üzerine bir inceleme" Doktora Tezi, **Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enst.**, İnşaat Müh., A. B. Dalı, İstanbul, 26-27, 99-107 (2000).
123. ASTM C 876, "Standard test method for half-cell potentials of uncoated reinforcing steel in concrete", **ASTM** (1991).
124. Çelik, M. H., "Deney Düzenleme ve Çözümleme Metotları" Lisansüstü Ders Notları, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Yapı Eğitimi A.B.D., Ankara (1996).
125. ASTM G1-90, "Standard practice for preparing, cleaning, and evaluating corrosion test specimens," **ASTM, Annual Book of ASTM Standards** Vol. 03.02 Wear and Erosion, Metal Corrosion (1990).
126. Liu, Y. and Weyers, R. E., "Modeling the time-to-corrosion cracking in chloride contaminated reinforced concrete structures", **ACI-Materials-Journal**, 95 (6): 675-681 (1998).

127. Francois, R. and Arliguie, G., "Effect of microcracking and cracking on the development of corrosion in reinforced concrete members" **Magazine of Concrete Research**, 51 (2):143-150 (1999).
128. ASTM E 632, "Standard practice for developing accelerated tests to aid prediction of the service life building components and materials," **ASTM** 346-351 (1996).
129. Batis, A., et al., "Corrosion and corrosion protection of steel in lightweight pumice concrete" **Proceedings of the International Conference on Corrosion and Corrosion Protection of Steel in Concrete**, Sheffield, England, 1094-1103 (1994).
130. Batis, G., Kouloumbi, N. and Katsiamboulas, A. "Durability of reinforced lightweight mortars with corrosion inhibitors", **Cement, Concrete and Aggregates**, 18 (2): 118-125 (1996).
131. Zhang, M. H. and Gjrv, O. E., "Permeability of high strength lightweight concrete", **ACI Materials Journal**, 88 (5): 463-469 (1991).
132. Hossain, K.M.A. "Effect of volcanic pumice on the corrosion resistance and chloride diffusivity of blended cement mortars" **Journal of Advanced Concrete Technology**, 1 (1): 54-62 (2003).
133. Sancak, E. ve Şimşek, O. "The effect of the use of silica fume in pumice concrete on steel reinforcement corrosion" **IV. ICCP 2004 International Corrosion and Concrete Protection Symposium**, Ankara, Türkiye, 272-283 (2004).
134. Batis, G., and Pantazopoulou, P., "Advantages of the simultaneous use of corrosion inhibitors and inorganic coatings" **Cement and Concrete Technology in the 2000s Second International Symposium**, Istanbul, Turkey, 474-483 (2000).
135. Batis, G., and Rakanta, E., "Effect of migrating corrosion inhibitors on reinforced lightweight and common mortars" www.cortecvi.com/publications/Papers/MCIPProducts/Batis-Rakanta/batis-ra.pdf (15/04/2004).
136. Yüzer, N., Aköz, F. ve zhendeki, N., "Korozyon nedeniyle beton örtüyü çatlatan donatıdaki kesit kaybının belirlenmesi" **İMO Teknik Dergi**, C.14, (2):2923-2934 (2003).
137. Aköz, F., Yüzer, N. ve Koral S., "Silis dumanı katkılı ve katkısız harç içindeki çeliğe farklı konsantrasyonlardaki sodyum klorürün etkisi" **Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması**, Bildiriler Kitabı, TMMOB, İnş. Müh. Odası, Ankara, 185-199 (1995).

138. Allyn, M. and Frantz, G., "Corrosion tests with concrete containing salts of alkenyl-substituted succinic acid" **ACI Materials Journal**, 98 (3): 224-232 (2001).
139. Brown, M. C., Weyers R. E. and Sprinkel, M. M., "Effect of corrosion – inhibiting admixtures on materials properties of concrete" **ACI Materials Journal**, 98 (3): 240-250 (2001).
140. Flick, L. D. and Lloyd, J. P. "Corrosion of steel in internally sealed concrete beams under load" Corrosion of Steel in Concrete, **ASTM STP 713**, Eds.: D. E. Tonini and J. M. Gaidis, 93-101 (1980).
141. TS 802, "Beton karışım hesapları" **Türk Standartları Enstitüsü**, Ankara (1985).
142. TS 3530 EN 933-1, "Agregaların geometrik özellikleri için deneyler- Bölüm 1: Tane büyüklüğü dağılımı tayini - Eleme metodu", **Türk Standartları Enstitüsü**, Ankara (1999).
143. TS 3526, "Beton agregalarında özgül ağırlık ve su emme oranı tayini", **Türk Standartları Enstitüsü**, Ankara (1980).
144. TS 3528, "Beton agregalarında hafif madde oranı tayini", **Türk Standartları Enstitüsü**, Ankara (1980).
145. TS 1114 EN 13055-1, "Hafif agregalar- Bölüm 1: Beton, harç ve şerbette kullanım için", **Türk Standartları Enstitüsü**, Ankara (2004).
146. TS EN 1744-1, "Agregaların kimyasal özellikleri için deneyler- Bölüm 1: kimyasal analiz", **Türk Standartları Enstitüsü**, Ankara (2000).
147. TS 500, "Betonarme yapıların hesap ve yapım kuralları", **Türk Standartları Enstitüsü**, Ankara (2000).
148. Ankara Su ve Kanalizasyon İdaresi. <http://www.aski.gov.tr>
149. ASTM C 494, "Standard specification for chemical admixtures for concrete", Annual Book of ASTM Standards, **ASTM** (1994).
150. SİKA DETEKS, "Yapı Kimyasalları Ürün Klavuzu", **SİKA**, 27-28 (2004).
151. TS 708, "Beton çelik çubukları" **Türk Standartları Enstitüsü**, Ankara (1996).
152. TS 138, "Metalik malzemeler- Çekme Deneyi Bölüm 1: Ortam sıcaklığında deney metodu" **Türk Standartları Enstitüsü**, Ankara (1996).

153. ASTM C 192, "Practice for making and curing concrete test specimens in the laboratory", Annual Book of ASTM Standards", Vol 04.02, **ASTM** (2003).
154. TS EN 12390-2, "Beton-Sertleşmiş beton deneyleri-Bölüm 2 : dayanım deneylerinde kullanılacak deney numunelerinin yapımı ve küre tâbi tutulması", **Türk Standartları Enstitüsü**, Ankara (2002).
155. TS EN 12350-1, "Beton-Taze beton deneyleri-Bölüm 1: Numune alma" **Türk Standartları Enstitüsü**, Ankara (2002).
156. TS EN 12350-2, "Beton - Taze beton deneyleri-Bölüm 2: Çökme (slamp) deneyi", **Türk Standartları Enstitüsü**, Ankara (2002).
157. TS 2941, "Taze betonda birim hacim ağırlık, verim ve hava miktarının ağırlık yöntemi ile tayini" **Türk Standartları Enstitüsü**, Ankara (1978).
158. TS EN 12390-3, "Beton-Sertleşmiş beton deneyleri- Bölüm 3: Deney numunelerinde basınç dayanımının tayini", **Türk Standartları Enstitüsü**, Ankara (2003).
159. ASTM C 234-91a "Standard test method for comparing concretes on the basis of the bond developed with reinforcing steel" **ASTM** (2000).
160. TS EN 990, "Gaz ve köpük beton ve hafif agregalı beton- Teçhizatın korozyondan korunmasını değerlendirme deney metodu" **Türk Standartları Enstitüsü**, Ankara (1995).
161. Batis, G. and Pantazopoulou, P. "Protection of steel rebars in lightweight concrete with surface barrier coatings" **Proc. of the International Conference Corrosion and Corrosion protection of Steel in Concrete**, Sheffield, England, 1104-1113 (1994).
162. Batis, G., Pantazopoulou, P. and Routoulas, A., "Corrosion protection investigation of reinforcement by inorganic coating in the presence of alkanolamine-based inhibitor" **Cement & Concrete Composites**, 25: 371-377 (2003).
163. Hearn, N., Hooton, R. D., and Mills, R. H., "Pore Structure and Permeability" Concrete and Concrete-Making Materials, Edited by: Klieger, P. and Lamond, J., **ASTM STP 169C**, 240-262 (1994).
164. Neville, A. M., "Properties of Concrete", Fourth and Final Edition Standards, **Pearson, Prentice Hall**, 18-119, 670-674 (2002).
165. Zhang, M.H. and Gjörv, O. E., "Characteristics of lightweight aggregates for high strength concretes", **ACI Materials J.**, 88 (2): 150-158 (1991).

166. Topçu, İ., B., "Hafif beton özelliklerinin kompozit malzeme olarak incelenmesi" Doktora Tezi, *İ.T.Ü., Fen Bilimleri Ens.*, İnşaat Müh. A.B.D., 32-33 (1988).
167. Gjørv, O., Monteiro, P. J. M. and Mehta, P.K., "Effect of condensed silica fume on the steel-concrete bond" *ACI Materials J.*, 87(6) (1990).
168. Yüzer, N. Aköz, F. ve Öztürk, L. "Yangına maruz yapılarda betonun basınç dayanımı-renk değişimi ilişkisi" *Y.T.Ü Dergisi*, 4: 51-60 (2001).





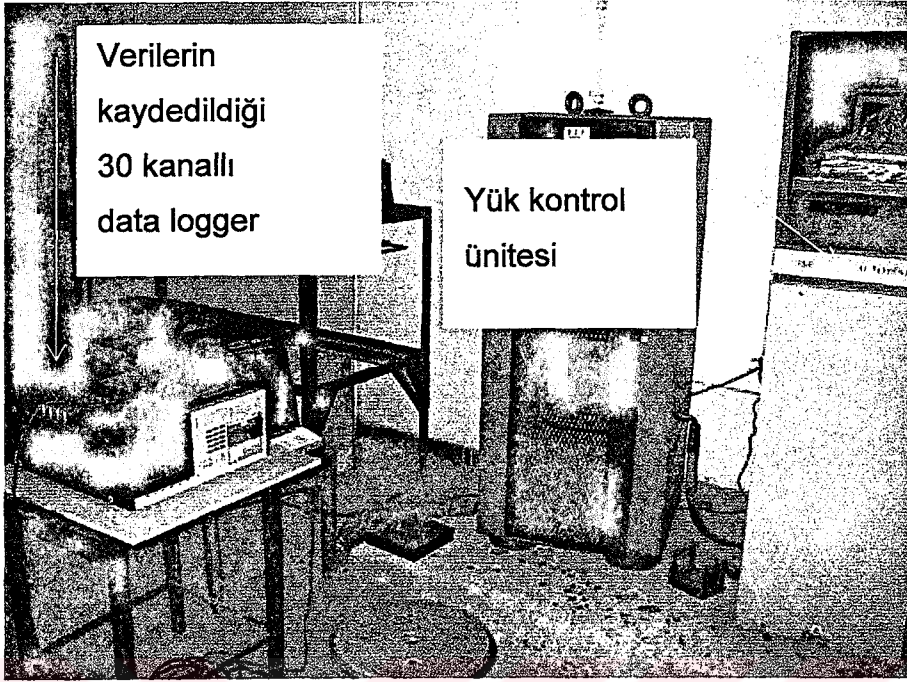
Ek 1



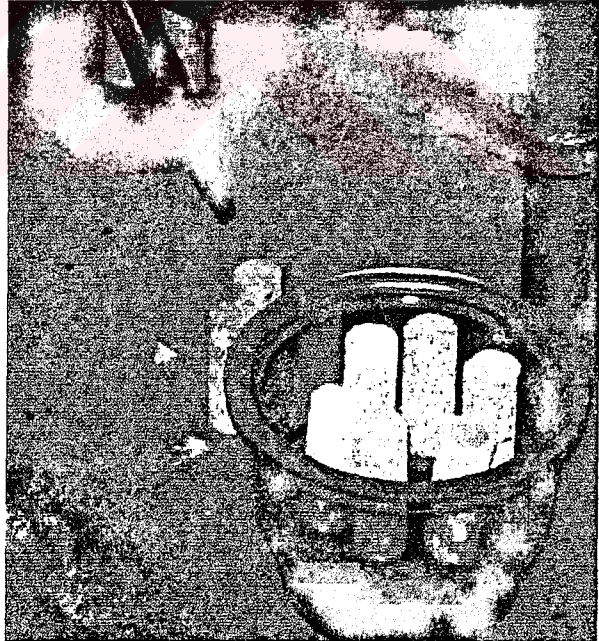
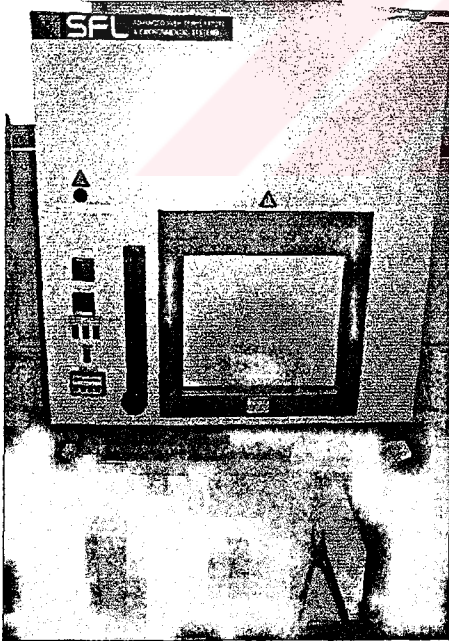
Beton yerleştirmek üzere hazırlanan askı sistemi ve kalıpların görünümü



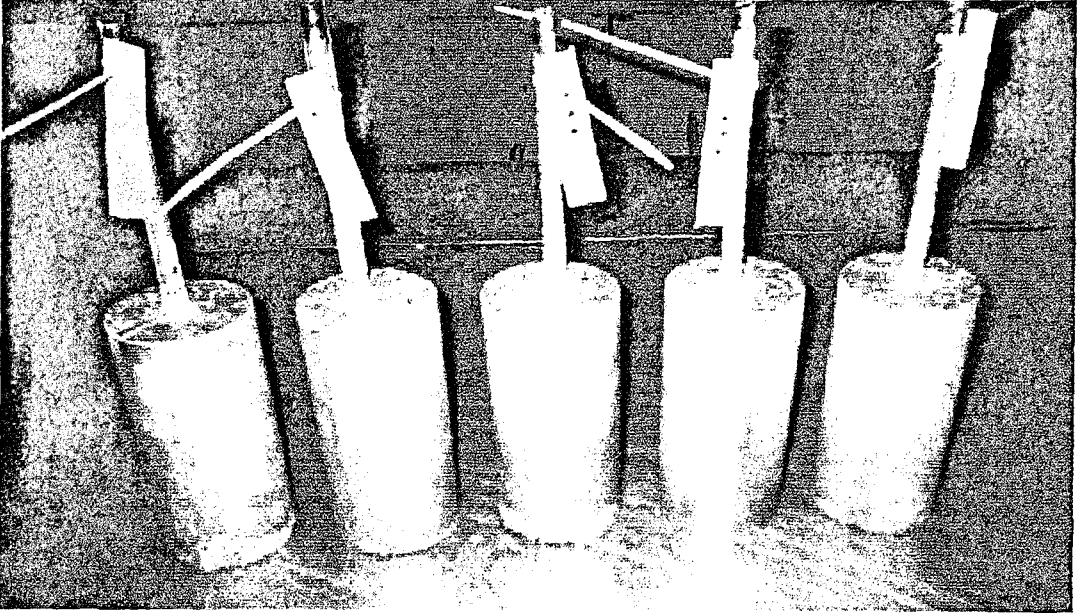
Aderans numuneleri



Aderans dayanımını belirlemek için kullanılan yük – deformasyon verilerini kaydeden data logger cihazı

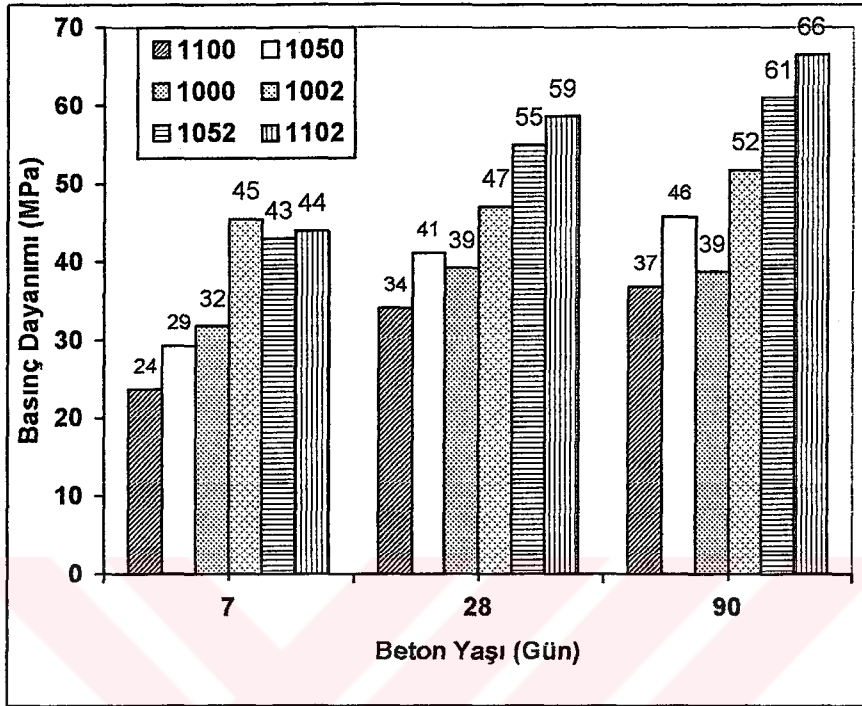


Yüksek kapasiteli fırın ve numunelerin fırından desikatöre alınması

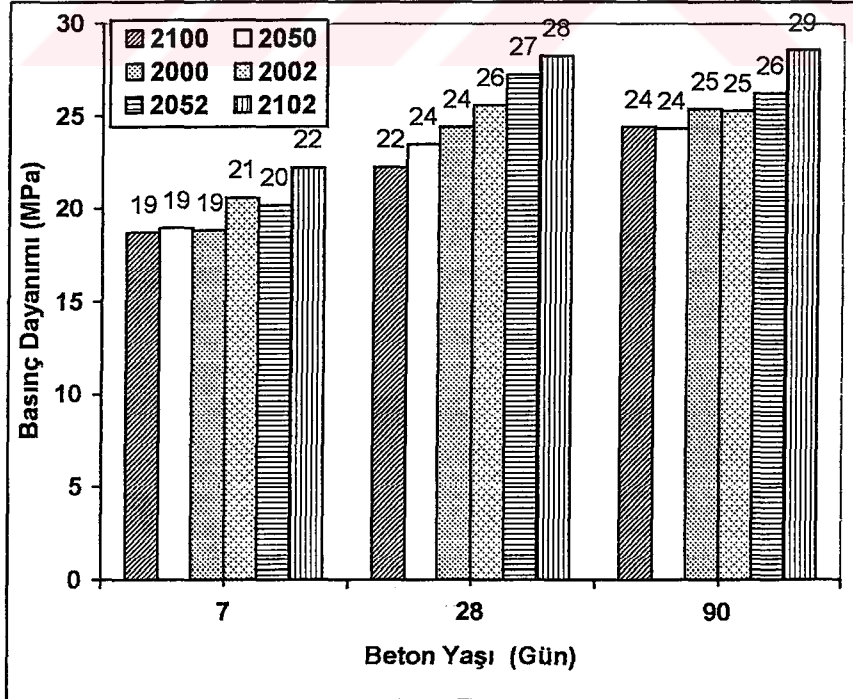


Ø100x200 mm korozyon numunelerinin kalıplardan çıkarıldıktan sonraki görünümü

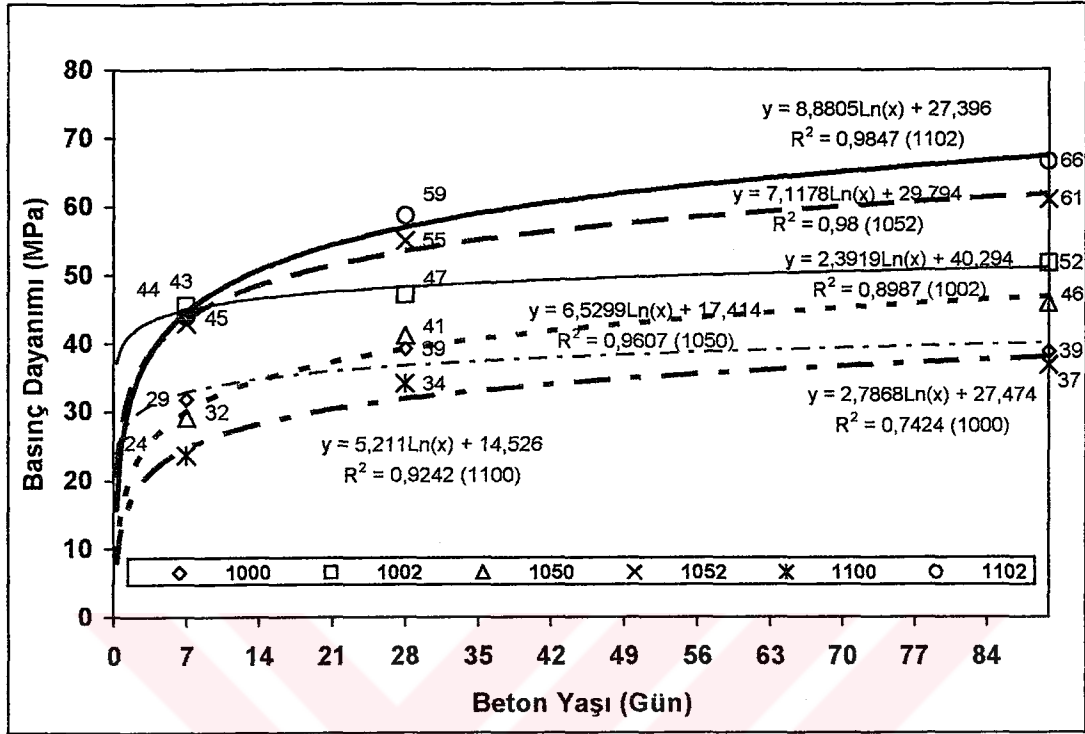
Ek 2



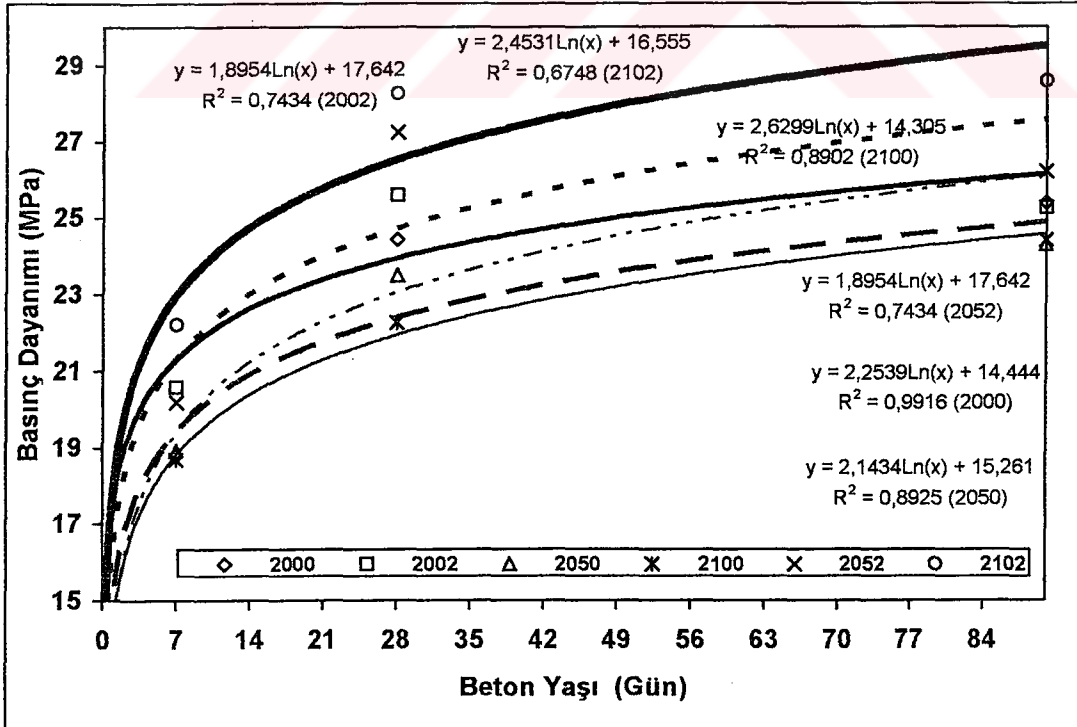
NB'larda basmaç dayanımı-beton yaşı ilişkisi



BB'larda basmaç dayanımı-beton yaşı ilişkisi

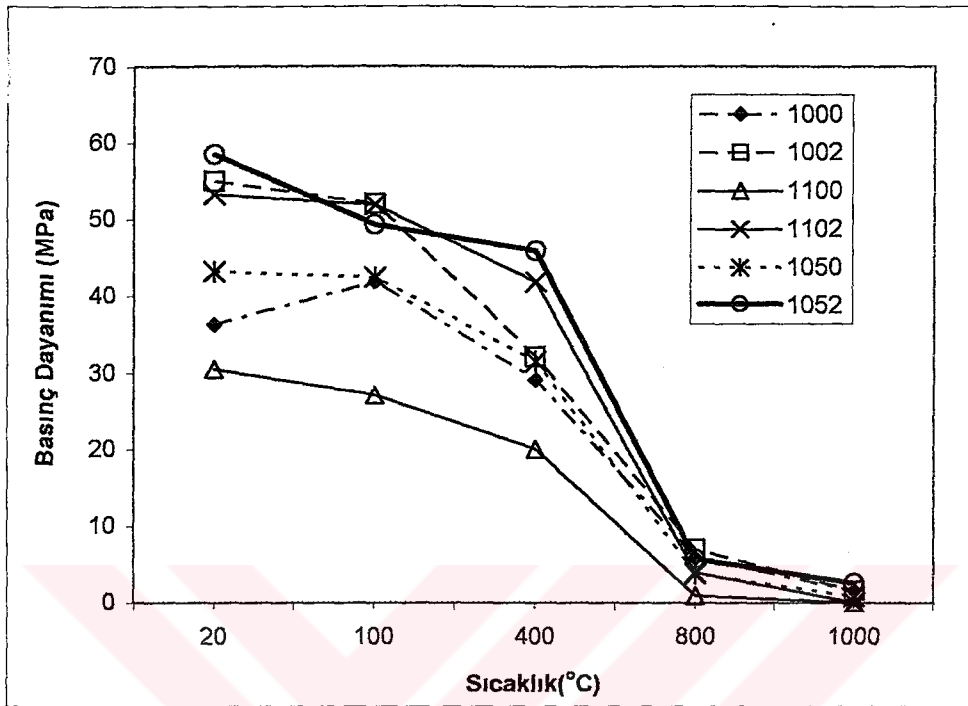


NB'larda basınç dayanımı – beton yaşı ilişkisi

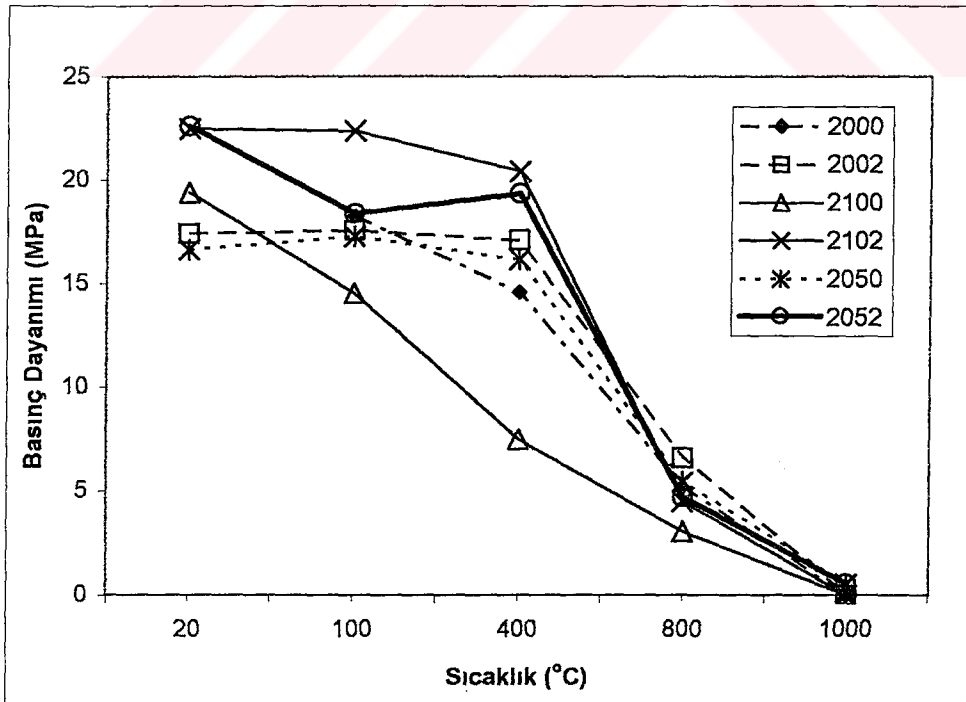


BB'larda basınç dayanımı – beton yaşı ilişkisi

Ek 3

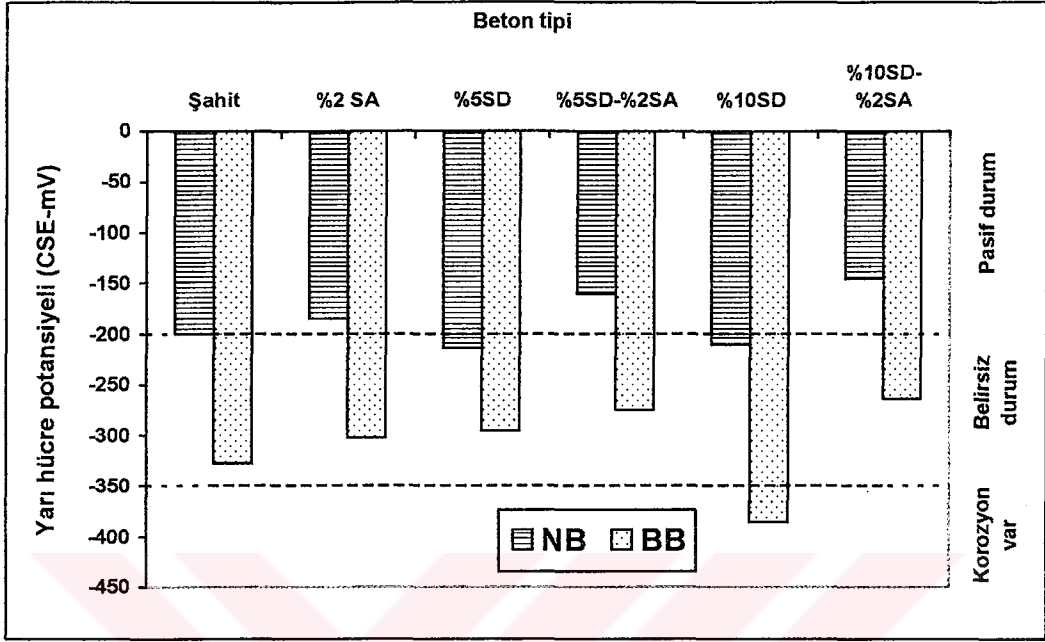


NB'larda katkı kullanımına bağlı basınç dayanımı-sıcaklık ilişkisi

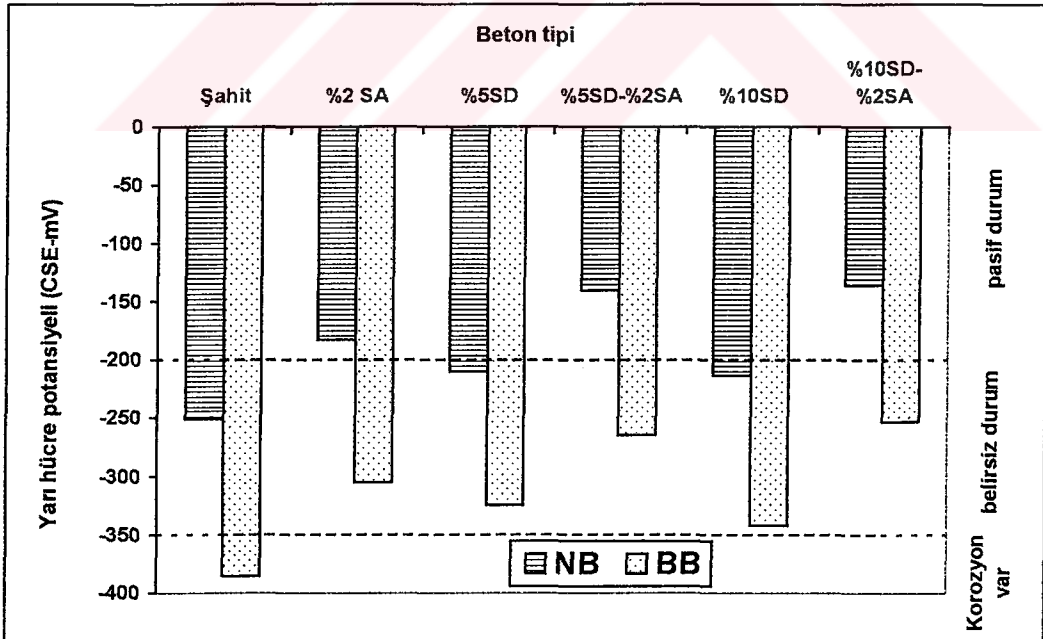


BB'larda katkı kullanımına bağlı basınç dayanımı-sıcaklık ilişkisi

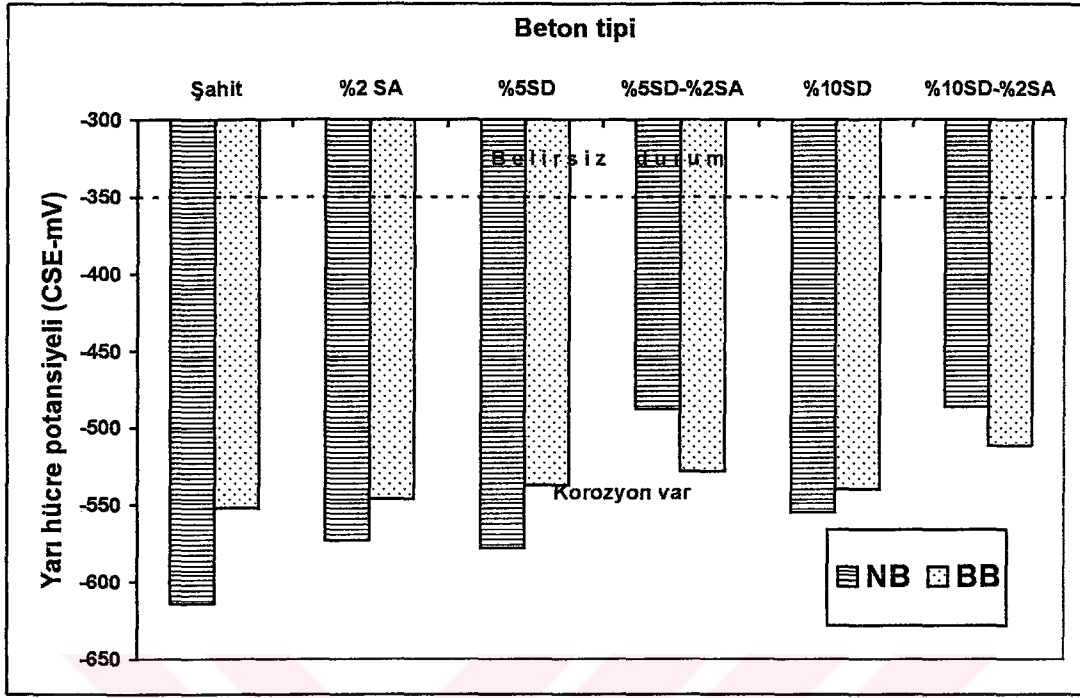
Ek 4



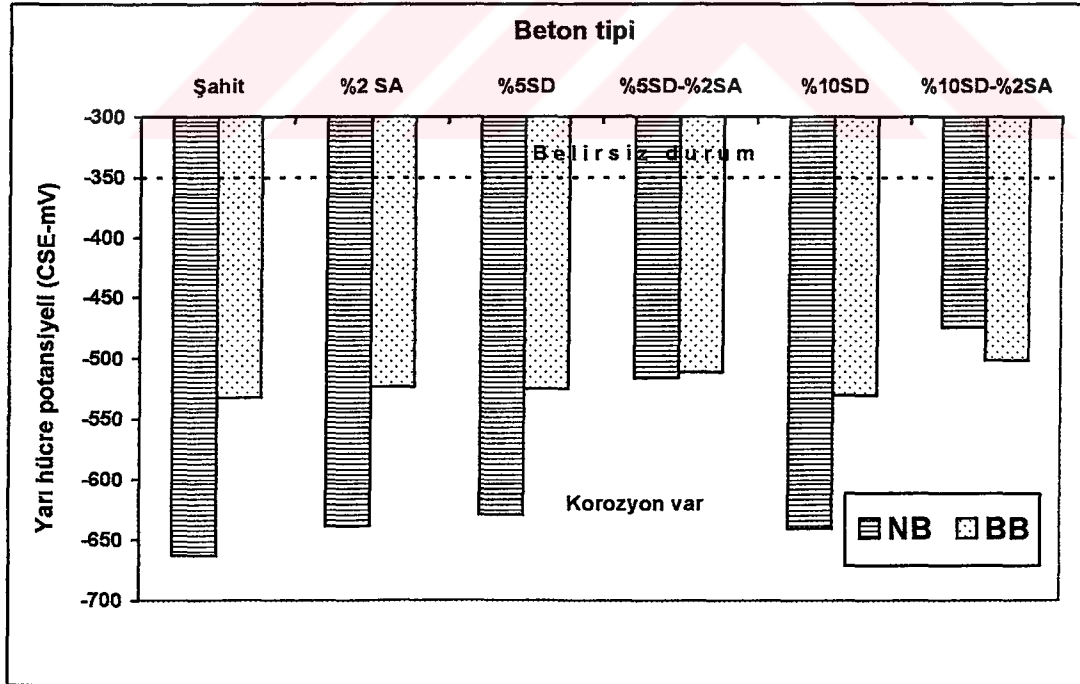
Betonlarda 28 günlük kür sonrası yarı hücre potansiyeli-beton tipi ilişkisi



Betonlarda TS EN 990'daki 2.Metot uygulandıktan sonra yarı hücre potansiyeli - beton tipi ilişkisi

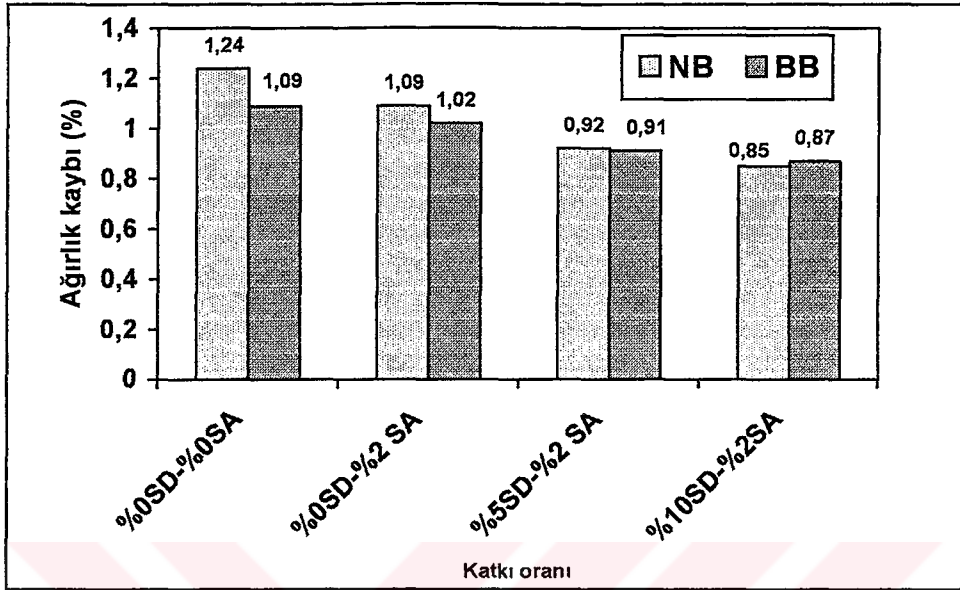


Betonlarda %7 NaCl çözeltisinde ıslatma ve $40\pm 5^{\circ}\text{C}$ 'de 10 çevrim sonunda yarı hücre potansiyeli-beton tipi ilişkisi

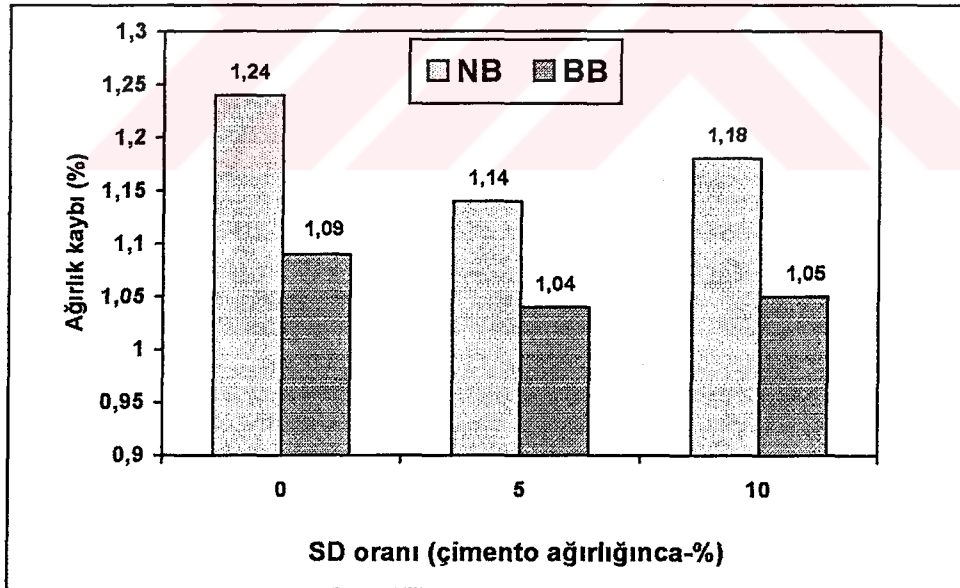


Betonlarda %7 NaCl çözeltisinde ıslatma ve $40\pm 5^{\circ}\text{C}$ 'de 17 çevrim sonunda yarı hücre potansiyeli-beton tipi ilişkisi

Ek 5

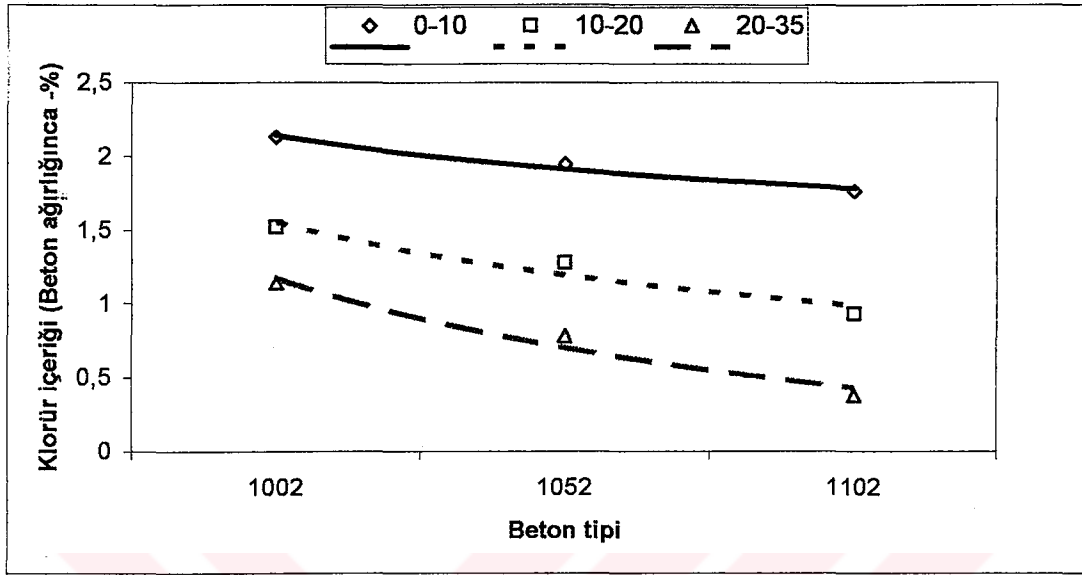


Donatı çeliğinde ağırlık kaybı - katkı oranı ilişkisi

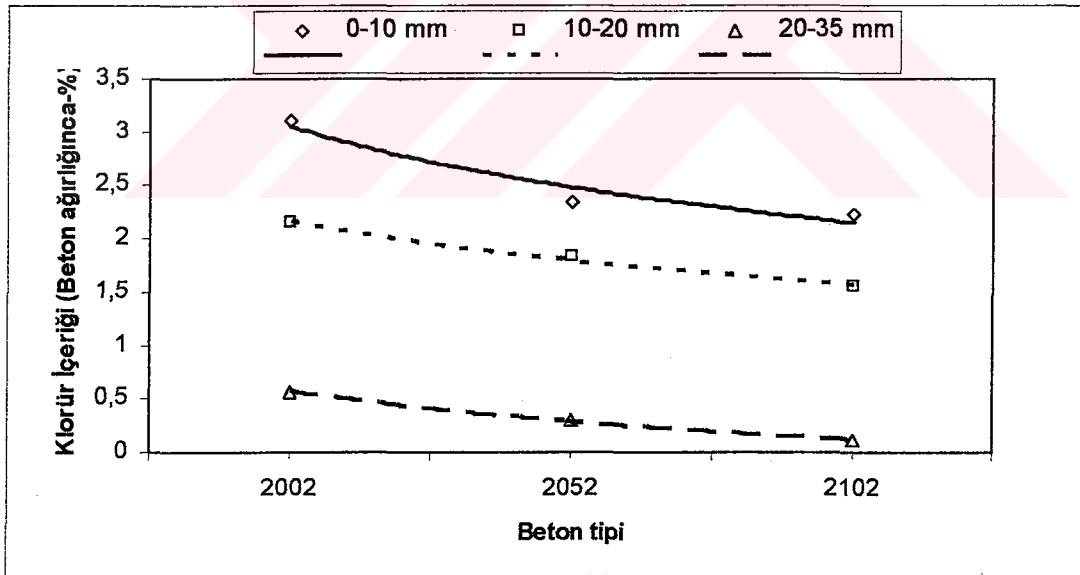


Donatı çeliğinde ağırlık kaybı - SD oranı ilişkisi

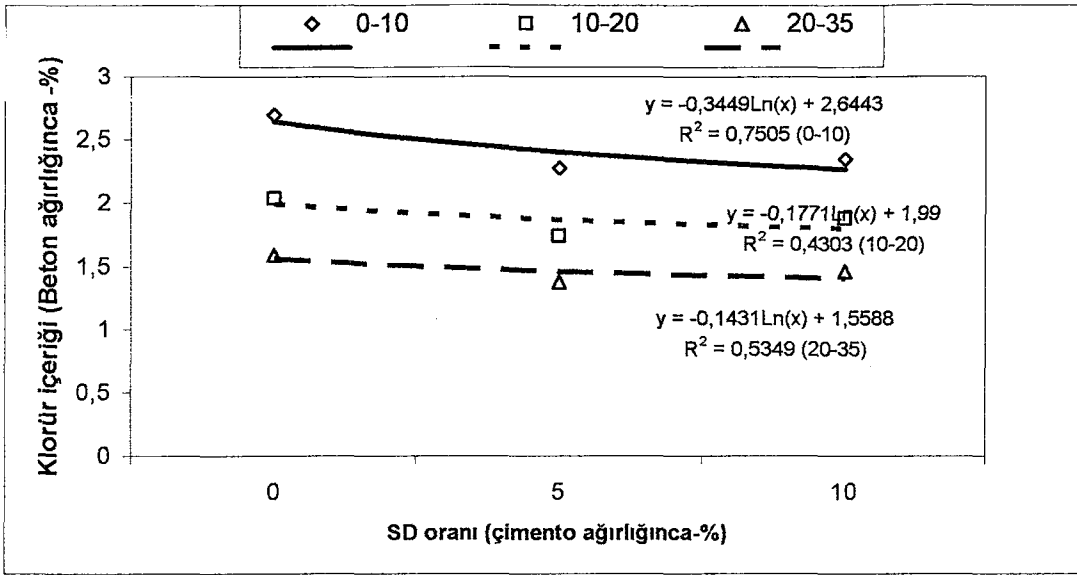
Ek 6



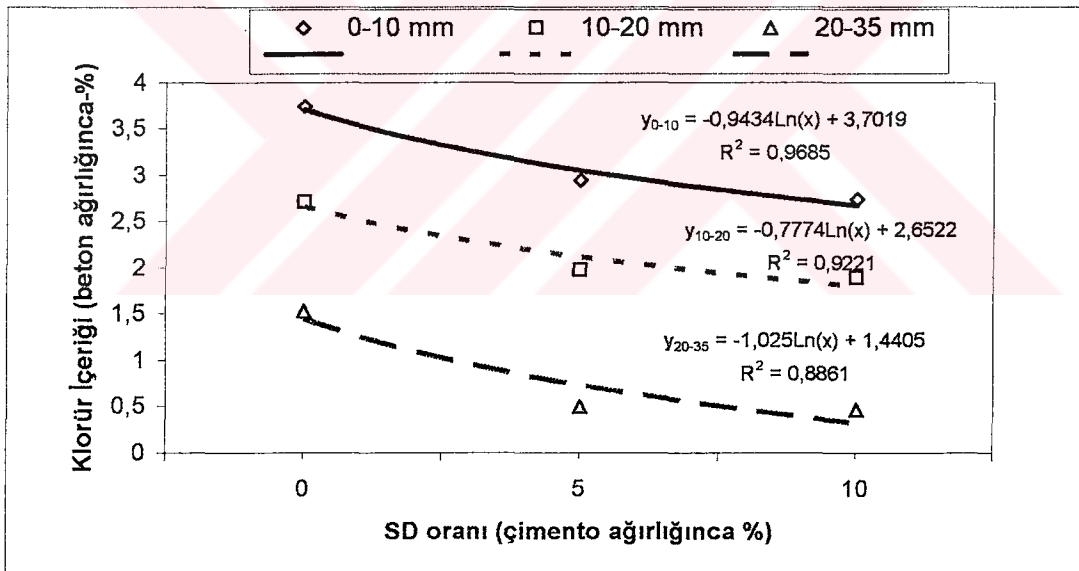
NB'larda derinliğe bağlı klorür içeriği –beton tipi ilişkisi



BB'larda derinliğe bağlı klorür içeriği –beton tipi ilişkisi



NB'larda derinliğe bağlı klorür içeriği -SD oranı ilişkisi



BB'larda derinliğe bağlı klorür içeriği -SD oranı ilişkisi

ÖZGEÇMİŞ

1974'de Ankara, Sincan'da doğdu. İlk öğrenimini; 1988'de, Sincan'da, orta öğrenimini; Ankara Yapı Meslek ve İnşaat Teknik Lisesi Yapı Ressamlığı Bölümü'nde, Haziran 1991'de tamamladı.

Yüksek öğrenimine, 1991-1992 eğitim-öğretim yılında Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Yapı Eğitimi Bölümü'nde başladı. Lisans öğrenimini 1996 yılında tamamladıktan sonra aynı yıl, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yapı Eğitimi Anabilim Dalı'nda yüksek lisans öğrenimine başladı.

Aralık 1996'da Süleyman Demirel Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi Yapı Eğitimi Bölümü'nde Araştırma Görevlisi olarak göreve başladı. Şubat 1997'de Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yapı Eğitimi Anabilim Dalı'nda, Yüksek Lisans Programı açılması nedeni ile öğrenimine burada devam etti ve "Hafif Agregalı Beton Blokların Mekanik Özellikleri Üzerine Çelik Lif Kullanımının Etkisi" tezi ile Ocak 1999'da tamamladı.

Ağustos 2000'de Doktora öğrenimi için YÖK tarafından, 2547 sayılı kanunun 35. maddesi gereğince, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yapı Eğitimi Anabilim Dalı'nda görevlendirildi.

Evli ve bir çocuk babasıdır.