

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**SÜLFAT ETKİSİNE MARUZ MİNERAL KATKILI BETON VE HARÇLARIN
PERFORMANSININ İNCELENMESİ**

İnş. Yük. Müh. İlker USTABAŞ

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
“Doktor (İnşaat Mühendisliği)”
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

**Enstitüye Verildiği Tarih: 25/04/2008
Tezin Savunma Tarihi : 09/05/2008**

**Tez Danışmanı: : Prof. Dr. Şakir ERDOĞDU
Jüri Üyesi : : Prof.Dr. Hulusi ÖZKUL
Jüri Üyesi : : Prof.Dr. Ayşe DALOĞLU
Jüri Üyesi : : Prof.Dr. Asiye PEHLEVAN
Jüri Üyesi : : Yard.Doç.Dr. Şirin KURBETÇİ**

Enstitü Müdürü: Doç.Dr. Salih TERZİOĞLU

Trabzon 2008

ÖNSÖZ

Sülfat etkisine maruz mineral katkılı betonların performansını inceleyen bu çalışma Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda doktora tezi olarak hazırlanmıştır.

1999 yılında yüksek lisansımı bitirdiğimde bir karar aşamasına geldim. Ya doktora öğrenimime devam edecektim ya da askere gidecektim. Artık yeter diyerek askere gitme kararı aldım. Bundan sonraki hayatımda yüksek lisans öğrenimimde başlamış olduğum inşaat sektöründe çalışmaya karar verdim. Askerden dönüşte bir yıl piyasada çalıştıktan sonra Rize Meslek Yüksekokulu'nda öğretim görevlisi olarak çalışmaya başladıktan sonra tekrar doktora yapmaya karar verdim. Doktora sınavı için gerekli şartları sağlayıp, doktora sınavını da kazanmamla birlikte öğrenimime başladım. Bu aşamada hem Rize Meslek Yüksekokulunda öğretim görevlisi olarak derse girmekte hem de K.T.Ü.'de öğrenci olarak dersleri takip etmekteydim. Doktora ders safhası bittikten sonra deneysel çalışmaya başlamamla birlikte maddi sorunlarda baş gösterdi. Bu sorunları da dışardan gelen yardımlarla aştım.

Bu çalışmada agrega temininde Ritaş beton santraline, çimento temininde Naiboğlu beton santraline, kimyasal katkı temininde Şar beton santraline, mineral katkılardan silis dumanı ve uçucu kül temininde okul arkadaşım Alaaddin Üste'ye, yüksek fırın cürufu temininde Karçimsa'ya, kaynak kitap teminde Ulaş Sunar'a, elektron mikroskobunda çalışmalarım için Zafer Türkmen'e ve Rize Meslek Yüksekokula'na teşekkürü bir borç bilirim.

Çalışmamın her safhasında göstermiş olduğu ilgiden dolayı hocam Prof. Dr. Şakir Erdoğdu'ya teşekkür ederim.

Bu çalışma zor şartlar ve yetersiz imkanlar altında yürütülüp istenilen aşamaya getirilmiş bir eserdir. Bu eserde betonun kimyasal bozulma mekanizmalarından sülfat atağı hakkında kapsamlı olarak araştırmada bulunulmuştur.

İlker USTABAŞ
Trabzon 2008

İÇİNDEKİLER

	Sayfa No.
ÖNSÖZ	II
İÇİNDEKİLER	III
ÖZET	VII
SUMMARY	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ	IX
TABLolar DİZİNİ	XII
SEMBOLLER DİZİNİ	XIV
1. GENEL BİLGİLER	1
1.1. Giriş	1
1.2. Beton	3
1.2.1. Betonda Kullanılan Bağlayıcılar	3
1.2.1.1. Çimento	3
1.2.1.2. Uçucu Küller	8
1.2.1.3. Silis Dumanı	9
1.2.1.4. Yüksek Fırın Cürufu	10
1.3. Betonun Dayanımı ve Dayanımı Etkileyen Faktörler	11
1.4. Betonun Dayanıklılığı	14
1.4.1. Betonun Bozulma Mekanizmaları	14
1.4.1.1. Betonun Fiziksel Bozulma Nedenleri	14
1.4.1.2. Betonun Kimyasal Bozulma Nedenleri	16
1.4.2. Sülfat Etkisi	19
1.4.2.1. İç Kaynaklı Sülfat Etkisi	19
1.4.2.1.1. İç Kaynaklı Sülfat Etkisinin Oluşum Türleri	20
1.4.2.1.2. Normal Sıcaklık Altında İç Kaynaklı Sülfat Etkisi	20
1.4.2.1.3. Yüksek Sıcaklıkta Kür Gören Betonlarda İç Kaynaklı Sülfat Etkisi	21
1.4.2.2. Dış Kaynaklı Sülfat Etkisi	26
1.4.2.2.1. Sodyum Sülfat (Na ₂ SO ₄) Etkisi	28
1.4.2.2.2. Magnezyum Sülfat (MgSO ₄) Etkisi	32
1.4.2.2.3. Betonda Sodyum Sülfat ve Magnezyum Sülfat Etkisinin Karşılaştırılması	34

1.4.2.3.	SiO ₂ ve CO ₂ Mevcudiyetinde Sülfat Etkisi.....	35
1.4.3.	Betona Deniz Suyu Etkisi	38
2.	DENEYSEL ÇALIŞMALAR	43
2.1.	Çalışmanın Gerekçesi ve Amacı	43
2.2.	Çalışmada Kullanılan Malzemeler	45
2.2.1.	Agrega.....	45
2.2.2.	Çimento.....	46
2.2.3.	Su.....	48
2.2.4.	Mineral Katkı Maddeleri.....	48
2.2.5.	Kimyasal Katkı Maddeleri	49
2.3.	Üretilen Numunelerin Karışım Tasarımı	49
2.4.	Numunelerin Hazırlanması ve Saklanması	49
2.5.	Beton Numuneler Üzerinde Gerçekleştirilen Deneyler	52
2.5.1.	Taze Beton Deneyleri	52
2.5.2.	Sert Beton Deneyleri.....	52
3.	DENEYSEL SONUÇLAR.....	55
3.1.	Beton Numuneler.....	55
3.1.1.	Numunelerin Basınç Dayanımları	60
3.1.2.	Beton Numunelerin Ultrases Değerleri.....	63
3.1.3.	Beton Numunelerin Yüzey Sertliği Değerleri.....	65
3.1.4.	Beton Numunelerin Kılcal Su Emme ve Su Emme Değerleri	66
3.1.5.	Sodyum Sülfat, Magnezyum Sülfat ve Deniz Suyuna Maruz Beton Numunelere Ait Görüntüler	68
3.2.	Harç Numuneler	71
3.2.1.	Harç Numunelere İlişkin Birim Hacim Ağırlıkları.....	71
3.2.2.	Harç Numunelere İlişkin Eğilmede Çekme Dayanımları	72
3.2.3.	Farklı Sıcaklıklardaki Magnezyum Sülfatlı Çözeltideki Harç Numuneler	63
3.2.4.	Magnezyum Sülfat Çözeltisine Maruz Harç Numunelerin Mikro Yapısal İncelenmesi.....	83
3.2.4.1.	40°C'de Magnezyum Sülfat Çözeltisine Maruz Silis Dumanı Katkılı Harç Numuneler	83
3.2.4.2.	Oda Sıcaklığında Magnezyum Sülfat Çözeltisine Maruz Silis Dumanı Katkılı Harç Numuneler	85
3.2.4.3.	5°C'deki Magnezyum Sülfat Çözeltisine Maruz Silis Dumanı Katkılı Harç Numuneler	85

3.2.4.4.	40°C’de Magnezyum Sülfat Çözeltisine Maruz Uçucu Kül Katkılı Harç Numuneler	85
3.2.4.5.	Oda Sıcaklığında Magnezyum Sülfat Çözeltisine Maruz Uçucu Kül Katkılı Harç Numuneler	86
3.2.4.6.	5°C’de Magnezyum Sülfat Çözeltisine Maruz Uçucu Kül Katkılı Harç Numuneler	87
3.2.4.7.	40°C’de Magnezyum Sülfat Çözeltisine Maruz Mineral Katkı İçermeyen Harç Numuneler	88
3.2.4.8.	Oda Sıcaklığında Magnezyum Sülfat Çözeltisine Maruz Mineral Katkı İçermeyen Harç Numuneler	89
3.2.4.9.	5°C’de Magnezyum Sülfat Çözeltisine Maruz Mineral Katkı İçermeyen Harç Numuneler	90
3.2.4.10.	40°C’de Magnezyum Sülfat Çözeltisine Maruz Yüksek Fırın Cürufu Katkılı Harç Numuneler	91
3.2.4.11.	Oda Sıcaklığında Magnezyum Sülfat Çözeltisine Maruz Yüksek Fırın Cürufu Katkılı Harç Numuneler	92
3.2.4.12.	5°C’de Magnezyum Sülfat Çözeltisine Maruz Yüksek Fırın Cürufu Katkılı Harç Numune	92
3.2.5.	Harç Numunelerde XRD ile Mineral Tespiti	93
3.2.5.1.	Oda Sıcaklığında Magnezyum Sülfat Çözeltisine Maruz Mineral Katkısız Harç XRD Ölçüm Sonuçları	93
3.2.5.2.	5°C’de Magnezyum Sülfat Çözeltisine Maruz Mineral Katkısız Harç XRD Ölçüm Sonuçları	94
3.2.5.3.	40°C’de Magnezyum Sülfat Çözeltisine Maruz Mineral Katkısız Harç XRD Ölçüm Sonuçları	95
3.2.5.4.	Numune Dış Yüzeyindeki Beyaz Maddeye Uygulanan XRD Ölçüm Sonuçları	96
3.3.	Kür Havuzlarının pH, Sıcaklık ve mV Değerleri	97
4.	SONUÇLARIN İRDELENMESİ VE YORUMU	99
4.1.	Beton Numuneler	99
4.1.1.	Basınç Dayanımı Ölçümlerinin Değerlendirilmesi	99
4.1.2.	Ultrases Ölçümlerinin Değerlendirilmesi	108
4.1.3.	Beton Test Çekici Okumalarının Değerlendirilmesi	112
4.1.4.	Sülfat Ortamındaki Beton Numunelerin Görüntülerinin İrdelenmesi	117
4.2.	Harç Numuneler	119
4.2.1.	Eğilmede Çekme Dayanımları	119
4.2.2.	Elektron Mikroskobu Görüntülerinin İrdelenmesi	122

4.2.3.	Harç Numune Havuzlarının pH Değerleri	123
5.	SONUÇLAR	125
6.	ÖNERİLER	129
7.	KAYNAKLAR	130
ÖZGEÇMİŞ		

ÖZET

Gerçekleştirilen deneysel çalışmada mineral katkı maddeleriyle üretilen betonların ve harçların farklı sülfat ortamlarındaki performansları araştırılmıştır. Bu kapsamda %10 silis dumanı, %20 uçucu kül ve %20 yüksek fırın cürufu ilaveli üç seri beton üretilmiştir. Karşılaştırma yapmak amacıyla mineral katkı içermeyen karışımlar da üretildi. Toplam 250 adet 15 cm küp beton numune hazırlanmış ve sırasıyla %2 sodyum sülfat ve magnezyum sülfat çözeltisinde, Karadeniz'den temin edilen suda ve musluk suyunda bekletilmiştir. Sülfat etkisine maruz beton numunelerin belli aralıklarla yüzey sertlikleri, ultrases değerleri ve basınç dayanımları ölçülmüş ve aynı zamanda numunelerde meydana gelen yüzeysel bozulmalar periyodik olarak gözlemlenmiştir. Deney programı kapsamında aynı zamanda mineral katkısız, silis dumanı ilaveli, uçucu kül ilaveli ve yüksek fırın cürufu ilaveli harç karışımlar üretilmiş ve 4×4×16 cm harç numuneler hazırlanmıştır. Mineral katkı harca %20 oranında ilave edilmiştir. Üretilen harç numuneler deney süresince 5°C ve 40°C'deki %2 MgSO₄ çözeltisinde ve oda sıcaklığında bekletilmiştir. Karşılaştırma yapmak amacıyla bir seri harç numune de standart kür ortamında tutulmuştur. 21 ay süre boyunca farklı ortamlarda bekletilen harç numuneler üzerinde taramalı elektron mikroskopuyla mikro yapısal ölçümler gerçekleştirilmiştir.

Çalışma sonucunda standart küre maruz betonlarda en yüksek dayanıma yüksek fırın cürufu ilaveli betonlarda rastlanmıştır. Bunu sırasıyla ilk yaşlarda silis dumanı ilaveli betonlar, ilerleyen yaşlarda uçucu kül ilaveli betonlar takip etmiştir. En düşük dayanımı veren betonlar mineral katkı içermeyen betonlar olmuştur. Magnezyum sülfat atağına maruz betonlarda yüzey yumuşamasıyla birlikte çatlak oluşumu türünde bozulmalara rastlanırken sodyum sülfat çözeltisine maruz betonlarda yüzey yumuşaması olmaksızın benzer bozulmalara rastlanmıştır. 5°C, oda sıcaklığı ve 40°C'de magnezyum sülfat çözeltisine maruz harç numunelerden oda sıcaklığında bekletilenler çamurumsu bir yapı gösterecek şekilde dağılmışlardır. Mineral katkıların betonun sülfat ortamında performansını artırdığı, sıcaklık etkisinin harçlarda farklı bozulma mekanizmalarına neden olduğu araştırma sonucunda tespit edilen bulgulardan birkaçıdır.

Anahtar Kelimeler: Uçucu kül, Yüksek fırın cürufu, Silis dumanı, Sülfat atağı, Deniz suyu, Performans, Tobermorit, Etrenjit, Tomasit.

SUMMARY**Performance Of Minarel Incorporated Concrete And Mortar Exposed To Sodium And Magnesium Sulfate**

The performance of concretes and mortars produced using different mineral additives is investigated in this study. In this context, three series of concrete mixtures containing of 10% silica fume, 20% fly ash and 20% granulated blast furnace slag were produced. Mixtures without mineral additives were also produced for making comparisons. Totally 250 specimens of 15 cm cubes were prepared and they were kept in 2% sodium sulfate and magnesium sulfate solutions, seawater provided from Karadeniz and in the tap water, respectively. At certain intervals, concrete specimens exposed to sulfates were examined for surface hardness, ultrasound measurements and compressive strength. Meanwhile, the specimens were periodically monitored for surface deterioration. Within the context of experimental program, mortars without mineral additives, with silica fume, with fly ash and with granulated blast furnace slag were produced and 4x4x16 cm prisms were prepared. The addition rate of mineral admixtures to mortar was 20% in all cases. The mortar prisms prepared were kept in 2% magnesium sulfate solution at room temperature, at 5°C and at 40°C throughout the testing program.

Concretes with blast furnace slag cured in standard curing condition yielded the highest strength. This is followed by concretes with silica fume at early ages and concretes with fly ash at later ages. Concretes without mineral additives yielded the lowest strength throughout experimentation. The deterioration pattern of concretes subjected to magnesium sulfate was a combination of surface softening and cracking, while concretes subjected to sodium sulfate solution have indicated a similar deterioration pattern without surface softening. The mortar prisms immersed in magnesium sulfate solution at room temperature have indicated a deterioration pattern of disintegration. In addition to findings given above, some additional findings obtained from the study may be underlined that mineral admixtures have increased the performance of concrete subjected to sulfate solutions and the deterioration mechanism observed in the mortar prisms has indicated a different pattern depending on the temperature.

Key words: Fly ash, Granulated blast furnace slag, Silica fume, Sulfate attack, Seawater, Performance, Tobermorite, Ettrengite, Thauasite.

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No.</u>
Şekil 1. J. Naubauer'e göre etrenjit kristali yapısı (Stark, Bollmann, 2002)	7
Şekil 2. pH değerine göre etrenjit kristallerinin boy ve kalınlık oranları	7
Şekil 3. Beton dayanımı ile su/çimento oranı arasındaki ilişki (Erdoğan, 2003).....	13
Şekil 4. Betonun fiziksel bozulma nedenleri (Baradan vd., 2002).....	15
Şekil 5. Betonun kimyasal bozulma nedenleri (Baradan vd., 2002)	17
Şekil 6. Normal sıcaklıkta (~20 °C) ve 12 saat 100 °C'de kür gören betonlarda zamanla meydana gelen hacim artışı (Yang vd., 1999)	22
Şekil 7. Betonun yüksek ısıya maruz kalmasıyla monosülfatın C-S-H jelleri arasına yerleşmesi ve soğurken çevreden gelen nemin etkisiyle etrenjit oluşumunun şematik gösterimi	25
Şekil 8. Etrenjit oluşumuyla agrega çevresinde ve hamurda çatlak oluşumu	25
Şekil 9. SO ₃ ve Al ₂ O ₃ oranına göre etrenjit oluşumu (M=Monosülfat, E= Etrenjit)	26
Şekil 10. Deniz suyuna maruz bir betonarme yapının bozulma mekanizması	41
Şekil 11. Katkı içermeyen 15 cm küp beton numunelerin 3 aylık görüntüleri. (a) Standart kür havuzu, (b) Sodyum Sülfat çözeltisi, (c) Magnezyum Sülfat çözeltisi, (d) Deniz suyu.....	68
Şekil 12. 13 ay sodyum sülfat çözeltisinde bekletilmiş mineral katkı içermeyen beton numune görüntüsü.....	69
Şekil 13. 20 ay sodyum sülfat çözeltisinde bekletilmiş mineral katkı içermeyen beton numune görüntüsü. (a) (b) birbirinden farklı iki numunenin görünüşü, (c) beton köşe görüntüsü.	69
Şekil 14. 13 ay magnezyum sülfat çözeltisinde bekletilmiş mineral katkı içermeyen beton numune görüntüsü.	70
Şekil 15. 20 ay magnezyum sülfat çözeltisinde bekletilmiş mineral katkı içermeyen beton numune görüntüsü. (a) (b) birbirinden farklı iki numunenin görünüşü, (c) beton köşe görüntüsü.	70
Şekil 16. 7 ay oda sıcaklığında magnezyum sülfat çözeltisinde bekletilmiş harç numune görüntüleri. (a) Mineral katkısız harç numuneler, (b) Uçucu kül katkılı harç numuneler, (c) Silis dumanı katkılı harç numuneler, (d) Yüksek fırın cürufu katkılı harç numuneler.....	74
Şekil 17. 7 ay 40°C'deki magnezyum sülfat çözeltisinde bekletilmiş harç numune görüntüleri. (a) Mineral katkısız harç numuneler, (b) Uçucu kül katkılı harç numuneler, (c) Silis dumanı katkılı harç numuneler, (d) Yüksek fırın cürufu katkılı harç numuneler.....	75

Şekil 18.	7 ay 5°C'deki magnezyum sülfat çözeltisinde bekletilmiş harç numune görüntüleri. (a) Mineral katkısız harç numuneler, (b) Uçucu kül katkılı harç numuneler, (c) Silis dumanı katkılı harç numuneler, (d) Yüksek fırın cürufu katkılı harç numuneler.....	76
Şekil 19.	7 ay standart kür havuzunda bekletilmiş harç numune görüntüleri. (a) Mineral katkısız harç numuneler, (b) Uçucu kül katkılı harç numuneler, (c) Silis dumanı katkılı harç numuneler, (d) Yüksek fırın cürufu katkılı harç numuneler.....	77
Şekil 20.	13 ay oda sıcaklığında magnezyum sülfat çözeltisinde bekletilmiş harç numune görüntüleri. (a) Mineral katkısız harç numuneler, (b) Uçucu kül katkılı harç numuneler, (c) Silis dumanı katkılı harç numuneler, (d) Yüksek fırın cürufu katkılı harç numuneler.....	78
Şekil 21.	13 ay 40°C'deki magnezyum sülfat çözeltisinde bekletilmiş harç numune görüntüleri. (a) Mineral katkısız harç numuneler, (b) Uçucu kül katkılı harç numuneler, (c) Silis dumanı katkılı harç numuneler, (d) Yüksek fırın cürufu katkılı harç numuneler.....	79
Şekil 22.	13 ay 5°C'deki magnezyum sülfat çözeltisinde bekletilmiş harç numune görüntüleri. (a) Mineral katkısız harç numuneler, (b) Uçucu kül katkılı harç numuneler, (c) Silis dumanı katkılı harç numuneler, (d) Yüksek fırın cürufu katkılı harç numuneler.....	80
Şekil 23.	18 ay oda sıcaklığında magnezyum sülfat çözeltisinde bekletilmiş harç numuneler.....	80
Şekil 24.	18 ay 40°C'de magnezyum sülfat çözeltisinde bekletilmiş harç numune görüntüleri.....	81
Şekil 25.	18 ay 5°C'de magnezyum sülfat çözeltisinde bekletilmiş harç numune görüntüleri.....	82
Şekil 26.	Taramalı elektron mikroskobu görüntüleri. (SEM) (a) SEMx800, (b) SEMx800, (c) SEMx1500.....	83
Şekil 27.	Taramalı elektron mikroskobu görüntüleri. (a) SEMx60, (b) SEMx1500, (c) SEMx250.....	84
Şekil 28.	Taramalı elektron mikroskobu görüntüleri. (a) SEMx60, (b) SEMx800, (c) SEMx1500.....	85
Şekil 29.	Taramalı elektron mikroskobu görüntüleri. (a) SEMx800, (b) SEMx250.....	85
Şekil 30.	Taramalı elektron mikroskobu görüntüleri. (a) SEMx60, (b) SEMx250, (c) SEMx1500, (d) SEMx800.....	86
Şekil 31.	Taramalı elektron mikroskobu görüntüleri. (a) SEMx60, (b) SEMx250, (c) SEMx800, (d) SEMx1500.....	87
Şekil 32.	Taramalı elektron mikroskobu görüntüleri. (a) SEMx60, (b) SEMx45, (c) SEMx1500.....	88
Şekil 33.	Taramalı elektron mikroskobu görüntüleri. (a) SEMx1500, (b) SEMx1500.....	89
Şekil 34.	Taramalı elektron mikroskobu görüntüleri. (a) SEMx60, (b) SEMx800, (c) SEMx1500, (d) SEMx800.....	90

Şekil 35. Taramalı elektron mikroskobu görüntüleri. (a) SEMx60, (b) SEMx1500, (c) SEMx800, (d) SEMx150.....	91
Şekil 36. Taramalı elektron mikroskobu görüntüleri. SEMx800.....	92
Şekil 37. Taramalı elektron mikroskobu görüntüleri. (a) SEMx160, (b) SEMx100.....	92
Şekil 38. X ışınları difraktogramı.....	93
Şekil 39. X ışınları difraktogramı.....	94
Şekil 40. X ışınları difraktogramı.....	95
Şekil 41. X ışınları difraktogramı.....	96
Şekil 42. Standart kür havuzundaki beton numunelere ait basınç dayanımı ölçümleri.....	99
Şekil 43. Sodyum sülfat çözeltisine maruz beton numunelere ait basınç dayanımı ölçümleri.....	100
Şekil 44. Magnezyum sülfat çözeltisine maruz beton numunelere ait basınç dayanımı ölçümleri.....	101
Şekil 45. Deniz suyuna maruz beton numunelere ait basınç dayanımı ölçümleri.....	103
Şekil 46. Mineral katkı içermeyen beton numunelere ait basınç dayanımı ölçümleri.....	104
Şekil 47. Uçucu kül ilaveli beton numunelere ait basınç dayanımı ölçümleri.....	105
Şekil 48. Silis dumanı ilaveli beton numunelerin basınç dayanımı ölçümleri.....	106
Şekil 49. Yüksek fırın cürufu ilaveli betonların basınç dayanımı ölçümleri.....	107
Şekil 50. Standart kür havuzunda tutulan beton numunelerin ultrases geçiş hızı (m/s)...	108
Şekil 51. Sodyum sülfat çözeltisine maruz beton numunelerin ultrases geçiş hızları (m/s).....	109
Şekil 52. Magnezyum sülfat çözeltisine maruz beton numunelerin ultrases ölçümleri ...	110
Şekil 53. Deniz suyuna maruz beton numunelerin ultrases geçiş hızları (m/s).....	111
Şekil 54. Standart kür havuzunda tutulan beton numunelerin test çekici ölçümleri.....	112
Şekil 55. Sodyum sülfat çözeltisine maruz beton numunelerin test çekici okumaları.....	113
Şekil 56. Magnezyum sülfat çözeltisine maruz beton numunelerin test çekici okumaları.....	114
Şekil 57. Deniz suyuna maruz beton numunelerin test çekici okumaları.....	115
Şekil 60. Beton numune havuzlarının pH değerlerinin grafiksel gösterimi.....	118
Şekil 61. Oda sıcaklığında magnezyum sülfat çözeltisine maruz numunelerin eğilmede çekme dayanımları.....	119
Şekil 62. 40°C'de magnezyum sülfat çözeltisine maruz numunelerin eğilmede çekme dayanımları.....	120
Şekil 63. 5°C'de magnezyum sülfat çözeltisine maruz numunelerin eğilmede çekme dayanımları.....	121
Şekil 64. Standart kür havuzundaki numunelerin eğilmede çekme dayanımları.....	122
Şekil 65. Harç numune havuzlarının pH değerlerinin grafiksel gösterimi.....	123

TABLOLAR DİZİNİ

	<u>Sayfa No.</u>
Tablo 1. Türkiye denizlerinde iyon konsantrasyonları	40
Tablo 2. Beton üretiminde kullanılan agregalara ilişkin granülometrik değerler ve fiziksel özellikler	46
Tablo 3. Kullanılan çimentoya ait bazı fiziksel ve mekanik özellikler	47
Tablo 4. Çimento ve mineral katkılara ait kimyasal bileşimler (ağırlıkça %)	47
Tablo 5. Beton karma suyu analiz raporu	48
Tablo 6. Beton karışımları için malzeme miktarları.....	49
Tablo 7. Harç karışımları için malzeme miktarları.....	49
Tablo 8. Standart kür havuzundaki beton numune grupları.....	50
Tablo 9. Sodyum sülfat çözeltisine maruz bırakılan beton numune grupları	51
Tablo 10. Magnezyum sülfat çözeltisine maruz bırakılan beton numune grupları	51
Tablo 11. Deniz suyuna maruz bırakılan beton numune grupları	52
Tablo 12. Standart havuzda bekletilen mineral katkı içermeyen 15 cm küp beton numunelere ilişkin sonuçlar.....	55
Tablo 13. Standart havuzda bekletilen uçucu kül ilaveli 15 cm küp beton numunelere ilişkin sonuçlar.....	55
Tablo 14. Standart havuzda bekletilen silis dumanı ilaveli 15 cm küp beton numunelere ilişkin sonuçlar.....	56
Tablo 15. Standart havuzda bekletilen yüksek fırın cürufu ilaveli 15 cm küp beton numunelere ilişkin sonuçlar.....	56
Tablo 16. Sodyum sülfat çözeltisinde bekletilen mineral katkı ilavesiz 15 cm küp beton numunelere ilişkin sonuçlar.....	56
Tablo 17. Sodyum sülfat çözeltisinde bekletilen uçucu kül ilaveli 15 cm küp beton numunelere ilişkin sonuçlar.....	57
Tablo 18. Sodyum sülfat çözeltisinde bekletilen silis dumanı ilaveli 15 cm küp beton numunelere ilişkin sonuçlar.....	57
Tablo 19. Sodyum sülfat çözeltisinde bekletilen yüksek fırın cürufu ilaveli 15 cm küp beton numunelere ilişkin sonuçlar	57
Tablo 20. Magnezyum sülfat çözeltisinde bekletilen mineral katkısız 15 cm küp beton numunelere ilişkin sonuçlar.....	58
Tablo 21. Magnezyum sülfat çözeltisinde bekletilen uçucu kül ilaveli 15 cm küp beton numunelere ilişkin sonuçlar.....	58

Tablo 22. Magnezyum sülfat çözeltisinde bekletilen silis dumanı ilaveli 15 cm küp beton numunelere ilişkin sonuçlar.....	58
Tablo 23. Magnezyum sülfat çözeltisinde bekletilen yüksek fırın cürufu ilaveli 15 cm küp beton numunelere ilişkin sonuçlar	59
Tablo 24. Deniz suyunda bekletilen mineral katkı ilavesiz 15 cm küp beton numunelere ilişkin sonuçlar.....	59
Tablo 25. Deniz suyunda bekletilen uçucu kül ilaveli 15 cm küp beton numunelere ilişkin sonuçlar.....	59
Tablo 26. Deniz suyunda bekletilen silis dumanı ilaveli 15 cm küp beton numunelere ilişkin sonuçlar.....	60
Tablo 27. Deniz suyunda bekletilen yüksek fırın cürufu ilaveli 15 cm küp beton numunelere ilişkin sonuçlar.....	60
Tablo 28. Standart kür havuzunda tutulan numunelerin basınç dayanımları.....	60
Tablo 29. Sodyum sülfat çözeltisine maruz numunelerin basınç dayanımları.....	61
Tablo 30. Magnezyum sülfat çözeltisine maruz numunelerin basınç dayanımları	61
Tablo 31. Deniz suyuna maruz numunelerin basınç dayanımları.....	62
Tablo 32. Mineral katkı içermeyen numunelerin basınç dayanımları	62
Tablo 33. Standart kür gören numunelere ait ultrases ölçümleri.....	63
Tablo 34. Sodyum sülfat çözeltisine maruz beton numunelere ait ultrases ölçümleri	63
Tablo 35. Magnezyum sülfat çözeltisine maruz beton numunelere ait ultrases ölçümleri ..	64
Tablo 36. Deniz suyuna maruz beton numunelere ait ultrases ölçümleri	64
Tablo 37. Standart kür havuzunda tutulan numunelere ait beton test çekici ölçümleri.....	65
Tablo 38. Sodyum sülfat çözeltisine maruz numunelere ait beton test çekici ölçümleri.....	65
Tablo 39. Magnezyum sülfat çözeltisine maruz numunelere ait beton test çekici ölçümleri.....	66
Tablo 40. Deniz suyuna maruz numunelere ait beton test çekici ölçümleri	66
Tablo 41. Standart küre maruz beton numunelerin kılcal su emme ve su emme değerleri (%).....	67
Tablo 42. Beton numunelerin kılcal su emme katsayıları.....	67
Tablo 43. Harç numunelerin birim hacim ağırlıkları.....	71
Tablo 44. Magnezyum sülfat çözeltisine maruz numunelere ait eğilmede çekme dayanımları	72
Tablo 45. 4×4×16 cm harç numunelerin bulunduğu ortamdaki pH, sıcaklık ve mV değerleri.....	97
Tablo 46. 15 cm küp beton numunelerin bulunduğu havuzların üç aylık pH, sıcaklık ve mV değerleri	98

SEMBOLLER DİZİNİ

C_2S	: Dikalsiyum silikat ($2CaOSiO_2$)
C_3S	: Trikalsiyumsilikat ($3CaOSiO_2$)
C_3A	: Trikalsiyum alüminat ($3CaOAl_2O_3$)
C_4AF	: Tetrakalsiyum alüminoferrit ($4CaOAl_2O_3Fe_2O_3$)
$N\bar{S}$: Sodyum sülfat (Na_2SO_4)
$M\bar{S}$: Magnezyum sülfat ($MgSO_4$)
$C_6A\bar{S}_3H_{32}$: Etrenjit ($6CaO.Al_2O_3.3SO_3.32H_2O$)
$C\bar{S}H_2$: Alçıtaşı ($CaSO_4.2H_2O$)
CH	: Kalsiyum hidroksit ($Ca(OH)_2$)
C-S-H ($C_3S_2H_3$)	: Kalsiyum silika hidrat jel ($xCaOSiO_2.yH_2O$)
MH	: Brusit ($Mg(OH)_2$)
M-S-H	: Magnezyum silika hidrat ($xMgO.SiO_2.yH_2O$)
$C_3S\bar{S}\bar{C}H_{15}$: Tomasit ($3CaO.SiO_2.SO_3CO_2.15H_2O$)
NH	: Sodyum hidroksit (NaOH)
$C\bar{C}$: Kalsiyum karbonat ($CaCO_3$)
c	: Konsantrasyon
c_s	: Doygunluk konsantrasyonu
g	: Gram
lt	: Litre
kg	: Kilogram
SEM	: Taramalı elektron mikroskobu
YFC	: Yüksek fırın cürufu
XRD	: X ışını difraksiyonu

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Beton, günümüz yapı endüstrisinde ucuz maliyeti, dayanıklılığı, imalat üstünlükleri sayesinde tercih edilen bir yapı malzemesidir. Betonun bu denli çok tercih edilmesi bu yapı malzemesinin sürekli araştırılmasına ve geliştirilmesine neden olmuştur. Beton üretim yöntemleri ve malzeme bileşenlerinde de son yıllarda önemli gelişmeler kaydedilmiştir (Henrichsen, 2005). Günümüzde taşıyıcı yapı malzemelerinin dayanımı, sünekliği ve uzun süreli performansları yüksek, üretimi kolay, çevre ile uyumlu ve ekonomik olmaları beklenir. Bu bakımdan sürdürülebilirlik, kullanılabilirlik ve çok işlevsellik yapı malzemelerinin araştırma konularının en başında gelmektedir (Taşdemir vd, 2005).

Betonun en önemli bileşeni çimentodur (Erdoğan, 2003). Çimento klinkeri üretim teknolojisinin bugünkü haliyle ekolojik zararı vardır. Doğaya zararlı olan CO₂, NO₂ ve SO₃ gibi gazların portland klinkeri üretiminde yüksek miktarda açığa çıkması ve havaya yayılması çevreye büyük oranda zarar vermektedir. Çimento üretiminde mineral katkı kullanımı ekolojik açıdan olumsuzluğunu daha kabul edilebilir bir seviyeye getirmektedir (Canpolat vd, 2005).

Betonda aranan en önemli özellik basınç dayanımıdır (Arslan, 2001). Betonun basınç dayanımı yüksek ancak çekme dayanımı basınç dayanımı yanında oldukça düşüktür. Beton, çekmeye karşı dayanımını artırmak için çelik donatıyla birlikte kullanılmaktadır. Betonarme olarak isimlendirilen donatılı beton, yapı mühendisliğinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Betonarmede; beton çeliğin, çelik de betonun zayıflıklarını gidermektedir (Ersoy, 2004). Yangına ve korozyona karşı zayıf olan çelik, beton örtüsüyle korunmakta, çekme dayanımı ve sünekliği yetersiz olan beton ise çelikle donatıldığında, hem basınç hem de çekme dayanımı yüksek bir malzeme haline gelmektedir (Ersoy, 2004).

Beton, servis süresince değişik bozulma mekanizmalarının etkisindedir. Beton doğada fiziksel, kimyasal, elektro-kimyasal ve biyolojik olmak üzere dört çeşit bozulma mekanizmasına maruzdur. Betonun tasarımı bulunduğu ortamdaki çevresel etkiler dikkate alınarak yapılmalıdır. TS EN 206-1 standardı betonun maruz kaldığı çevresel etki

sınıflarını beş gruba ayırıp, su/çimento oranı, dayanım, çimento içeriği, hava miktarı ve çimento tipi gibi hususlarda öneriler ve sınırlamalar getirmektedir.

Sülfat etkisi betonda kimyasal ve fiziksel bozulmalara neden olur. Betonda biriken sülfat tuzlarının kristalleşmesi sonucu betonda fiziksel, sülfat iyonlarının çimento hidratasyon ürünleriyle reaksiyonu ile de kimyasal bozulmalar meydana gelir. Betonda kimyasal ve fiziksel bozulmalara neden olan sülfat, kaynağına göre de iç kaynaklı ve dış kaynaklı olarak iki gruba ayrılmaktadır (Skalny vd., 2002). Betonda dış kaynaklı sülfat atağına neden olan başlıca kaynaklar yeraltı suyu, deniz suyu ve sülfatlı zeminlerdir. İç kaynaklı sülfat atağına ise beton üretiminde kullanılan çimento, agrega, su ve katkılarda bulunan sülfat neden olur. İç ve dış kaynaklı sülfat betonda çimento hidratasyon ürünleriyle kimyasal reaksiyonlar neticesinde alçıtaşı, etrenjit ve tomasit gibi bağlayıcılık özelliği bulunmayan yeni ürünler oluşturur. Oluşan yeni ürünler betonda hacim artışı meydana getirir. Hacim artışı sertleşmiş betonda çatlamlara yol açar. Betonda oluşan çatlaklar betonun geçirimliliğini artırarak daha fazla maddenin beton içerisine girmesine sebep olur. Hem betondaki bağlayıcılık özelliği gösteren maddelerin başka ürünlere dönüşmesi hem de beton içerisine yeni madde girişinin hızlanması betonun servis ömrünü azaltır.

Betonun sülfat etkisine karşı direnci; geçirimlilik, su/çimento oranı, çimento tipi, sülfat katyon tipi, sülfat konsantrasyonu, sülfatın etkiye süresi gibi etkilere bağlıdır (Skalny vd., 2002; Neville, 2003; Cohen, 1991). Aynı çevresel şartlar için çimento tipi ve bileşimi ile geçirimlilik betonun sülfata dayanıklılığı açısından iki ana parametredir. Betonun geçirimliliğini azaltmak için puzolanik madde kullanımı tavsiye edilmektedir (Neville, 2003; Mehta ve Monterio, 1997). Puzolanlar sulu ortamda kalsiyum hidroksit ile birleşerek hidrolik bağlayıcılık gösteren malzemelerdir (Topçu, 2006). Beton üretiminde kullanılan mineral maddelerin homojen olmaması, kimyasal bileşimlerinde oldukça fazla bileşik bulunması, bulunan bileşiklerin oranlarının farklılığı gibi her bir unsur sülfat ortamındaki betonun performansı üzerinde farklı etkilere neden olabilmektedir. Bu husus araştırmacıları bu konuda fazla sayıda çalışma yapmaya sevk etmektedir.

Beton doğada kolaylıkla bulunabilen malzemelerin basitçe bir araya getirilmesiyle üretiliyor gibi görünmesine karşın oldukça karmaşık bir malzemedir. İstenilen tüm koşullar sağlanarak üretilen bir beton çok uzun süre özelliklerini yitirmeden hizmet verebilir (Topçu, 2006).

1.2. Beton

Beton; agregâ, çimento, su ve gerektiğinde bazı katkı maddelerinin birlikte karılmasıyla elde edilen bir yapı malzemesidir.

Beton agregaları minerallerden oluşmuş taneli malzemelerdir. Normal ağırlıklı betonlar agregâ, kum, çakıl ve kırmataştan meydana gelmektedir. TSE 706 EN 12620'ye göre 4,0 mm göz açıklıklı kare delikli elekten geçebilen boyuttaki agregâ ince agregâ; bu elek üzerinde kalan agregâ iri agregâ olarak tanımlanmaktadır. Agregâ hacim olarak betonun yaklaşık olarak %60-%70'ini oluşturmaktadır. Agregâ, çimento hamurunun beton içinde zamanla kuruyarak serbestçe büzülmesini engeller ve böylece betonun büzülme nedeniyle çatlamasını azaltır. Agregâ ayrıca hem beton dayanımına hem de dayanıklılığına katkıda bulunan betonun temel bileşenlerindedir.

Çimento, betona bağlayıcılık özelliğini kazandıran bileşendir. Çimentonun su ile reaksiyonu sonucu oluşan yeni ürünler çimentoya bağlayıcılık özelliği kazandırmaktadır. Çimentonun su ile reaksiyona girmesine hidrasyon ve hidrasyon sonucu oluşan ürünler hidrasyon ürünleri olarak bilinir.

Çimento ve suyun oluşturduğu malzeme çimento hamuru olarak adlandırılmaktadır. Betonda çimento hamurunun işlevi agregâ yüzeyini kaplamak, agregâ arasındaki boşlukları doldurmak ve agregâ tanelerini bir arada tutarak bağlayıcılık sağlamaktır. Bu bakımdan beton, çimento hamuru ve agregâdan meydana gelen kompozit bir malzeme olarak değerlendirilir (Erdoğan, 2003).

Çimento ve suyun birleşmesinden oluşan çimento hamuru başlangıçta plastik haldedir. Su ile arasında hemen başlayan ve devam eden kimyasal reaksiyonlar sonucu katılaşmakta ve zamanla tamamen sertleşerek dayanım kazanmaktadır.

1.2.1. Betonda Kullanılan Bağlayıcılar

1.2.1.1. Çimento

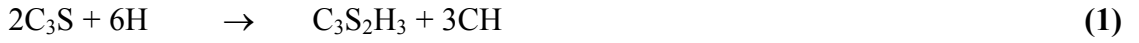
Portland çimentosu, kalker ve kil karışımı hammaddelerinin pişirilmeleri ile ortaya çıkan ve klinker olarak adlandırılan malzemenin çok az miktarda alçıtaşı ile öğütülmesi sonunda elde edilen bir üründür. Çimento, su ile birleştirildiğinde hidrolik bağlayıcılık özelliği kazanmaktadır (Erdoğan, 2003).

Portland çimentosu toz gibi ince tanelidir. Tane boyutları 1-200 µm arasında değişmektedir. Portland çimentosunun özgül ağırlığı 3,10-3,15 kadardır. Torbalanmış durumdaki çimentonun birim ağırlığı 1,5 t/m³ civarındadır (Erdoğan,2003).

Portland çimentosu hammaddeleri kireç (CaO), silika(SiO₂), alümin (Al₂O₃) ve demir oksittir (Fe₂O₃). Bu bileşenler döner fırında yüksek sıcaklıkta (1350-1450 °C) kendi aralarında birleşerek daha kompleks ürünler meydana getirirler. Karma oksit adı verilen ve çimentonun birçok özelliğini belirleyen bu bileşenlerden en önemlileri; trikalsiyum silikat (C₃S), dikalsiyum silikat (C₂S), trikalsiyum alüminat (C₃A) ve tetrakalsiyum alüminoferrit (C₄AF) olmaktadır. Tipik bir portland çimentosu klinkeri ağırlıkça % 45-65 C₃S, % 15-30 C₂S, % 6-12 C₃A ve % 6-8 C₄AF içerir. Ancak kalsiyum silikatlar az miktarda safsızlıklar da içerebilir. Safsızlık içeren C₃S alite, C₂S ise belit olarak adlandırılır. Karma oksitlerin hidrasyon hızları birbirinden oldukça farklıdır. C₃A ve C₄AF büyük oranda ilk günlerde hidrate olurken, C₃S'nin hidrasyonu C₂S'ye kıyasla oldukça hızlıdır. (Baradan vd., 2002).

Çimento su ile birleştiği zaman, çimento bileşimindeki ürünler su ile reaksiyona girerek hidrasyon ürünleri adı verilen yeni ürünler oluşur. Bu hidrasyon ürünleri çimento hamurunun zamanla sertleşerek dayanım kazanmasını sağlar. Çimento hamurunun özellikleri kimyasal reaksiyonlar sonucu ortaya çıkan farklı yapıda hidrasyon ürünlerinin çimento hamurunun içerisinde ne oranda yer almış oldukları ile sınırlıdır. Çimento ve suyun karılmasıyla elde edilen çimento hamurunun hacmi, çimento ve suyun hacimleri toplamına eşittir.

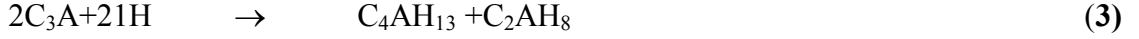
Trikalsiyum silikatlar ve dikalsiyum silikatlar arasındaki reaksiyonlar aşağıdaki gibidir.



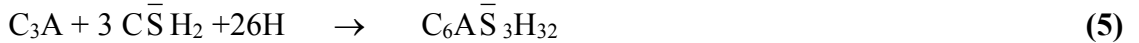
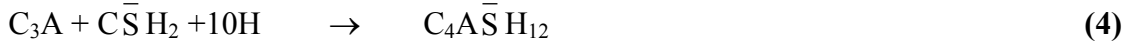
Yukarıdaki reaksiyonlardan görüldüğü gibi silikatların reaksiyonu sonucu C₃S₂H₃ ve CH ürünleri oluşmaktadır. CH kalsiyum hidroksitdir (Ca(OH)₂). C₃S₂H₃ tobermorit jelidir. Tobermorit jeli C-S-H jeli olarak adlandırılır. Doğada aynı isimle anılan minerale benzerliğinden dolayı bu ad verilmiştir. Tobermorit jeli çimento hamuruna ve betona bağlayıcılık özelliğini kazandıran üründür. CH'nin bağlayıcılık özelliği yoktur ancak dolgu malzemesi işlevi görür. Çimento hamurunun kazandığı dayanım C₃S ve C₂S ana bileşenlerinin hidrasyonu ile ortaya çıkan C-S-H jelinin miktarına bağlıdır. Doğal olarak C-S-H jellerinin tümü bir anda oluşmamaktadır. Hidrasyon olayı devam ettikçe C-S-H

jellerinin gelişimi de devam etmekte ve çimento hamurunun dayanımı artmaktadır. C_3S ana bileşenlerin hidratasyonu ilk zamanlarda C_2S ana bileşeninin hidratasyonundan daha hızlı meydana geldiği için çimentodaki dayanım artışına ilk zamanlar C_3S 'in katkısı daha fazladır.

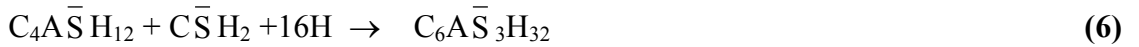
C_3A ve su arasındaki reaksiyonlar çok hızlı gelişen ve kalsiyum alimüno hidratların oluşumuna yol açan reaksiyonlardır.



Yukarıdaki kalsiyum alümino hidratlar kararlı değildir ve kısa süre sonra kararlı formdaki kübik hidrogarnet (C_3AH_6) yapısına dönüşmektedir. C_3A ile su arasındaki reaksiyonlar hızlı gelişmeleri yanında büyük miktarda ısı açığa çıkaran reaksiyonlardır. Bu durum çimentonun ani prizine yol açmaktadır. Çimento hamurunun ani prizini önlemek için çimento üretimi sırasında klinkere bir miktar (%3-%6) alçıtaşı ($C\bar{S}H_2$) katılır ve iki malzeme birlikte öğütülür. Çimento yapısındaki C_3A , alçıtaşı ve su ile birlikte reaksiyona girerek çimentonun prizini yavaşlatır. C_3A , su ve alçıtaşı arasında aşağıdaki reaksiyonlar meydana gelir.



Yukarıdaki ifadelerden de görüldüğü gibi C_3A , su ve alçıtaşının reaksiyonu sonucu $C_4A\bar{S}H_{12}$ ve $C_6A\bar{S}_3H_{32}$ ürünleri meydana gelmektedir. $C_4A\bar{S}H_{12}$ (kalsiyum-alumino-monosülfohidrat) oluşması çimento hamurunda bir miktar hacim artışına sebep olmaktadır. Plaka şekline sahip bu kristaller yarı kararlı özeliğindedir. Fazla sülfatın bulunduğu ortamlarda $C_6A\bar{S}_3H_{32}$ 'ya dönüşürler.



$C_6A\bar{S}_3H_{32}$ kalsiyum-alumino-trisülfohidrat, *Candlot tuzu*, veya daha çok bilinen ismiyle *etrenjit* olarak adlandırılır. Bu ürüne verilen etrenjit ismi, doğada aynı isimle anılan bir minerale benzerliğinden gelmektedir. Hekzagonal kesitli ve çubuk şekilli etrenjit kristalleri oldukça kararlıdır. Bünyesinde 32 molekül su bulduran etrenjitin oluşması çimento hamurunda hatırı sayılır hacim artışı yaratır.

Çimento içerisinde ne miktarda etrenjit oluşacağı ortamdaki sülfat miktarına bağlıdır. Betondaki sülfat çimento üretimi sırasındaki alçıtaşından gelebileceği gibi beton sertleştikten sonra doğal çevreden sülfat bulduran suların betonun bünyesine girmesiyle de gelebilmektedir. Bu şekilde dış ortamdan betonun bünyesine sülfatın girmesiyle de

etrenjit oluşabilir. Çimento üretimi sırasında klinkerle birlikte fazla miktarda alçıtaşı kullanılması durumunda çimento hamurunda fazla miktarda etrenjit oluşumuna ve betonun hasar görmesine sebep olunabilir.

Çimentodaki C_3A oranını belli değerin altında tutmak suretiyle sülfata dayanıklı çimento üretilmektedir. ASTM Tip V olarak bilinen çimento, betonun sülfata karşı dayanıklılığını artırmak için üretilmektedir (Erdoğan, 2003; TS EN 206-1).

C_4AF ana bileşenin hidratasyonu C_3A 'nın hidratasyon mekanizmasına benzer. C_3A 'nın yapısında bulunan bir kısım alüminanın yerini demir oksit almaktadır. Ortaya çıkan kalsiyum-alümino-sülfohidrat ürünleri $C_4(A,F) \bar{S}H_{12}$ ve $C_6(A,F) \bar{S}_3H_{32}$ bileşimine sahip olmaktadır. Bu ürünlerin yanı sıra bir miktar $(A,F)H_3$ meydana gelmektedir. Ortamdaki demir oksidin fazlalaşması reaksiyonun yavaşlamasına yol açmaktadır (Erdoğan, 2003).

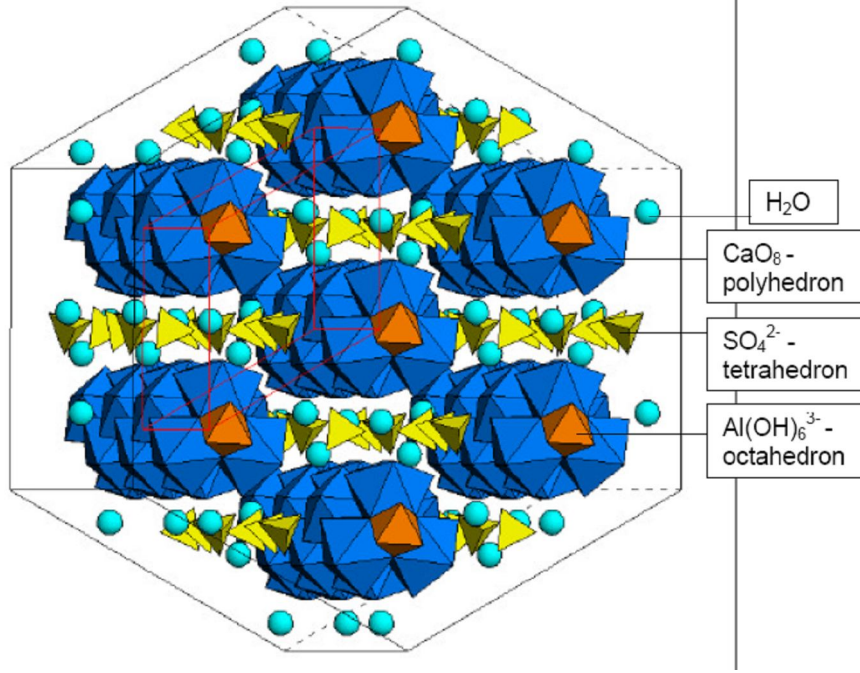
Çimento üretiminde alçıtaşı kullanılmadığı veya gereğinden az kullanıldığı taktirde C_4AF ana bileşenin göstereceği hidratasyon C_3A 'nınki kadar şiddetli olmasa bile oldukça hızlıdır ve açığa büyük miktarda ısı çıkaran türdendir. Ani prize yol açabilmektedir. C_3A oranı düşük C_4AF oranı yüksek olan çimentolarla yapılan betonların sülfat etkisine oldukça dayanıklı olduğu bilinir (Erdoğan, 2003).

Denklem 5 ve 6'da verilen etrenjit oluşumu birincil etrenjit oluşumu diye adlandırılır. Birincil etrenjit oluşumu hızlı ve homojendir. Hacim artışı meydana getirir. Fakat bu hacim artışı beton için zararlı değildir. Çimento klinkerindeki kalsiyum alümin ile öğütülen alçıtaşıdaki sülfattan kaynaklanır. Taze betondaki hacim artışı betonda meydana gelen büzülme dengeler (Colleparadi, 2003).

Etrenjit hekzagonal prizmatik kristaller biçiminde oluşur. Taylor'un modeline göre $Al(OH)_6^{3-}$ merkezde bulunmakta ve bunun çevresinde CaO_8 bulunmaktadır. Burada alüminyum iyonları kalsiyum iyonlarıyla hidroksit iyonlarını ortak kullanarak birbirine bağlanmaktadır. Kristallerin ara kanallarında da SO_4^{2-} iyonu ve H_2O molekülleri vardır (Şekil 1). Su molekülleri kristal yapı içinde sıcaklık değişimlerinden çabuk etkilenir. Bu yüzden etrenjitler farklı su molekülü bulundurlar (Stark, Bollmann, 2002).

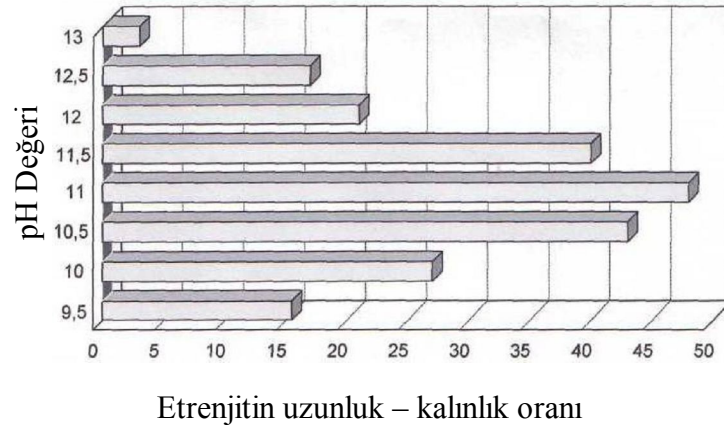
Mehta elektron mikroskopuyla etrenjit kristalleri ($3CaOAl_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$) incelemelerinde bunların küresel olarak kümelenmiş veya paralel iğne kristaller şeklinde değişik tür ve boyutlara sahip olduğunu belirledi. Değişik tür ve boyuttaki etrenjit kristallerini iki gruba ayırdı. Uzun düz şekilli, $10 \mu m$ 'dan $100 \mu m$ 'na kadar uzunluğu olan ve kalınlığı çok küçük olan kristalleri birinci grup olarak sınıflandırdı. Birinci grup etrenjit

kristallerinin düşük hidroksit iyonlu konsantrasyonda geliştiğini ve hacim artışına etkisi olmadığını belirtti. Çubuğa benzer şekilli, 1~2 µm uzunluğunda ve 0,1~0,2 µm kalınlığındaki etrenjit kristallerini ikinci grup olarak sınıflandırdı. İkinci grup kristallerin su absorbe etmesiyle hacim artışına sebep olduğunu belirtti.



Şekil 1. J. Naubauer'e göre etrenjit kristali yapısı (Stark, Bollmann, 2002)

Etrenjit boyutu betondaki gözenek çözeltisinin pH değerine göre değişmektedir. Yapılan araştırmada pH değerine göre etrenjit kristallerinin uzunluk ve kalınlık değişimi Şekil 9'daki gibi tespit edildi (Stark ve Bollmann, 2002).



Şekil 2. pH değerine göre etrenjit kristallerinin boy ve kalınlık oranları

1.2.1.2. Uçucu Küller

Uçucu kül; termik santrallerde pulverize kömürün yanması sonucu meydana gelen baca gazlarıyla taşınarak siklon veya elektrofiltrelerde toplanan bir yan üründür. Kömürün yüksek sıcaklıklarda yanması sonucu meydana gelen ergimiş malzeme soğuyarak gaz akışıyla kısmen veya tamamen küresel şekilli kül taneciklerine dönüşmektedir. Bu kül tanecikleri çok ince (0,5-150 μ) olup baca gazlarıyla sürüklenmeleri nedeniyle uçucu kül olarak adlandırılmaktadır. Uçucu külde bulunan başlıca bileşenler SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 ve CaO olup bunların miktarı uçucu külün tipini belirlemektedir. Ayrıca MgO , SO_3 , alkali oksitler de minör bileşen olarak bulunmaktadır. Uçucu küldeki temel oksitlerden SiO_2 % 25-60, Al_2O_3 %10-30, Fe_2O_3 %1-15 ve CaO %1-40 oranlarında bulunmaktadır. Bu farklı aralıktaki değerler uçucu külün tipini karakterize etmektedir. Uçucu küller ASTM C 618 standardına göre F ve C sınıflarına ayrılırlar. F sınıfı küller bitümlü kömürden üretilen ve toplam $\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3$ yüzdesi %70'den fazla olan uçucu küllerdir. Aynı zamanda bu küllerde CaO miktarı %10'un altında olduğu için düşük kireçli olarak da adlandırılırlar. C sınıfı uçucu küller ise linyit veya yarı bitümlü kömürlerden üretilen ve toplam $\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3$ miktarı % 50'den fazla olan küllerdir. Aynı zamanda C sınıfı uçucu küllerde CaO yüzdesi %10'dan fazla olduğu için bu küller yüksek kireçli uçucu kül olarak da adlandırılırlar (Türker vd., 2007).

TS EN 197-12'e göre uçucu küller silisli (V) ve kalkersi (W) olmak üzere iki gruba ayrılırlar. V sınıfı silisli uçucu küller, çoğunluğu puzolanik özelliğe sahip küresel taneciklerden meydana gelen ince bir toz olup, esas olarak reaktif silisyum dioksit (SiO_2) ve alüminyum oksitten (Al_2O_3) oluşur; geri kalanı demir oksit (Fe_2O_3) ve diğer bileşenleri içeren küllerdir. Bu küllerde, reaktif kireç (CaO) oranının %10'dan az, reaktif silis miktarının %25'den fazla olması gerekmektedir. W sınıfı uçucu küller ise hidrolik ve/veya puzolanik özellikleri olan ince bir toz olup esas olarak reaktif kireç (CaO), reaktif silisyum dioksit (SiO_2) ve alüminyum oksitten (Al_2O_3) oluşur; geri kalanı demir oksit (Fe_2O_3) ve diğer bileşenleri içeren küllerdir. Bu küllerde reaktif kireç (CaO) oranının %10'dan fazla, reaktif silis miktarının da %25'den fazla olması gerekmektedir.

Uçucu kül kullanımı taze betonun terlemesini ve hidratasyon ısısını azaltır. Taze betonun işlenebilmesini artırır. Sertleşmiş betonun geçirimsizliğini azaltır ve sülfatlara dayanıklılığını artırır. Betonda ekonomiklik sağlar. Uçucu kül kullanımı taze betonun priz

süresini uzatır. İlk günlerdeki dayanımını düşürür. Betonun kür süresini uzatır (Topçu, 2006).

1.2.1.3. Silis Dumanı

Silis dumanı; silisyum metali veya ferro silisyum alaşımlarının üretimi sırasında kullanılan elektrik ark fırınlarında yüksek saflıktaki kuvarsitin kömür ve odun parçacıkları ile indirgenmesi sonucu elde edilen çok ince taneli tozudur. Fırınların düşük sıcaklıktaki üst bölümlerinde SiO gazı hava ile temas ederek hızla okside olur ve amorf SiO₂ olarak yoğunlaşarak silis dumanı bileşiminin hemen hemen tamamını oluşturur. Bu malzeme mikrosilis, silis tozu veya silica fume gibi isimlerle de anılmaktadır. Silis dumanı amorf yapıya sahip olduğundan ve yüksek miktarda SiO₂ içerdiğinden mükemmel bir puzolanik malzemedir (Yeğınobalı, 2007).

Silis dumanı genellikle camsı, düzgün yüzeyli küresel taneciklerden oluşur. Çok ince taneli ve hafif olduğundan özgül yüzey bazında inceliği Blaine metoduyla tayin edilememektedir. Çok ince taneli cisimlerde özgül yüzey Azot Adsorpsiyon metodu ile tayin edilir. Silis dumanı tane boyu 1µ'dan küçük olup ortalama 0,1 µ civarındadır. Silis dumanının inceliği çimentodan ortalama 100 kere daha incedir (Yeğınobalı, 2007).

Silis dumanı, agrega ve çimento hamuru ara yüzeyini geliştirir ve erken puzolanik reaksiyonlar sayesinde betonun dayanımına ve geçirimsizliğine katkıda bulunur. Silis dumanı genelde betonun su gereksimini arttırır (Topçu, 2006). Yüksek dayanımlı beton üretiminde silis dumanı yaygın olarak kullanılır (Türkmen, 2002; Topçu, 2006; Erdoğan, 2003). Süper akışkanlaştırıcı katkılarla silis dumanının birlikte kullanımı betonda su/çimento oranını azaltırken kaliteli bir içyapı elde edilmesini de sağlar (Aköz, 2002).

Silis dumanı kullanılarak üretilen betonların fazla miktarda karışım suyuna ihtiyacı vardır. Bunu karşılayabilmek için su azaltıcı katkılarla birlikte kullanılmalrı gerekmektedir. Çok ince taneli olduğundan ve terlemeyi azalttığından beton yüzeyinin düzeltilmesi işlemi güçleşmektedir. Çoğu zaman plastik büzülme çatlaklarına neden olan silis dumanı genellikle betonun koyu renk kazanmasına sebep olur (Topçu, 2006).

1.2.1.4. Yüksek Fırın Cürufu

Demir elde etmek için demir cevherinin yüksek fırın adı verilen fırınlarda yüksek sıcaklıklara kadar ısıtılmaları ve böylece oksijen ve yabancı maddelerden arındırılmaları gerekmektedir. Kok kömürünün yakıt olarak kullanıldığı fırınlarda kalker taşı da ayrışma işlemine yardımcı olması amacıyla katılmaktadır. Yüksek sıcaklık etkisiyle kok kömürünün karbonuyla demir cevherinin oksijeni birleşerek karbon monoksit veya karbon dioksit olarak ortamı terk etmektedir. Geride eriyik durumda demir ve CaO, SiO₂, Al₂O₃, MgO, MnO, S gibi yabancı maddeler topluluğu kalmaktadır. Demirin yoğunluğu yabancı maddelerin yoğunluğundan daha fazla olduğundan çökelir. Ayrı çıkışlardan demir eriyiği ve yabancı maddeler dışarı alınır. Dışarı alınan yabancı maddelerin su ile ani soğutulmasıyla irili ufaklı kum taneleri şeklinde amorf yapıya sahip maddeler elde edilir. Büyük miktarda SiO₂ ve Al₂O₃'e sahip amorf yapılu bu ürün öğütülerek yüksek fırın cürufu elde edilir (Erdoğan, 2003).

Yüksek fırın cürufu yavaş soğutulduğunda kristal yapıya sahip olur. Bu haliyle bazalta benzer mekanik özelliklere sahiptir ve beton agregası olarak kullanılabilir. Öte yandan hızlı soğutma uygulaması sonucunda ise camsı yapıda cüruf elde edilir. Bu tür cüruflar granüle yüksek fırın cürufu olarak adlandırılır (Tokyay ve Erdoğan, 2007). Eriyik cürufun çok hızlı soğutma işlemi çok büyük miktarda basınçlı su püskürtülerek sağlanır. Öğütülmüş yüksek fırın cürufu hidrolik bağlayıcılık özelliği gösterir.

Granüle yüksek fırın cürufunun hidrolik bağlayıcılık özelliği belli bir sınır değere kadar CaO/SiO₂ oranının artmasıyla artar. Sınır değer aşılması durumunda yani çok yüksek miktarda CaO olması durumunda granülasyon güçleştiğinden hidrolik bağlayıcılık özelliğinde azalma görülür. Sabit bir CaO/SiO₂ oranı için Al₂O₃ miktarının artması cürufun aktivitesini artırır. Cüruf içerisindeki demir ve mangan oksitler dayanım özelliklerini olumsuz etkiler. %10'a kadar MgO bulunmasının dayanıma kötü bir etkisi bulunmaz ancak daha yüksek MgO miktarları zararlı etkiler yaratabilir (Lea, 1970).

Yüksek fırın cürufu kullanımı taze betonda terlemeyi ve hidrasyon ısını azaltır. Taze betonda işlenebilmeyi ve priz süresini uzatır. Sertleşmiş betonun geçirimsizliğini azaltır ve sülfata dayanıklılığını artırır. Betonun ilk günlerdeki dayanımını azaltır. Betonun hava sürükleyici katkı maddesi gereksimini artırır (Topçu, 2006).

1.3. Betonun Dayanımı ve Dayanımı Etkileyen Faktörler

Dayanım, betonun üzerine gelen yüklerin neden olacağı şekil değiştirmelere ve kırılmaya karşı betonun göstereceği maksimum direnme gücüdür. Beton kullanıldığı yere göre değişik karakterde yüklere maruz kalabilir. Beton, maruz kaldığı yük arttıkça bu yüke karşı direnç göstermekte ve yükün türüne, büyüklüğüne göre şekil değiştirmektedir. Beton karşı koyabileceği yükten fazlasına maruz kaldığında ise kırılmaktadır.

Basınç, çekme, eğilme ve kayma etkisi yaratacak yükler altında betonun şekil değiştirmeye ve kırılmaya karşı göstereceği direnme kabiliyeti sırasıyla basınç dayanımı, çekme dayanımı, eğilme dayanımı ve kayma dayanımı olarak tanımlanmaktadır. Tekrarlı yükler altında betonun şekil değiştirmeye ve kırılmaya karşı göstereceği direnme kabiliyetine yorulma dayanımı denilmektedir.

Betonun kullanılacağı yapının tasarımı yapılırken betonun üzerine gelebilecek değişik türdeki yüklerin büyüklükleri göz önüne alınarak betonun bu yüklere karşı yeterli dayanımı göstereceği varsayılmaktadır. Üretilen betonun dayanımının, tasarım hesabında kullanılmış olan değerlerden daha yüksek olması istenir.

Betonun dayanımı; çimento hamurunun dayanımına, agreganın dayanımına ve çimento hamuru ile agrega taneleri arasındaki aderansa bağlıdır.

Çimento hamurunun dayanımı su/çimento oranına ve çimentonun ne ölçüde hidratasyon yapmış olduğuna bağlıdır. Daha fazla miktarda hidratasyon sonucunda çimento hamuru içerisinde mevcut bağlayıcı özellikteki kalsiyum-silika-hidrat jelleri artmakta ve kapiler boşluk miktarı azalmaktadır. Bu şekilde çimento hamurunun dayanım kazanma potansiyeli artmaktadır. Düşük su/çimento oranına sahip çimento hamurunda kapiler boşluk oranı da azdır. Kapiler boşluk oranının azalması çimento hamurunun ve buna bağlı olarak betonun daha yüksek dayanım kazanması demektir.

Beton üretiminde kullanılan agregaların sert, dayanıklı ve temiz olmaları, mümkün olduğu kadar reaktif silis ve reaktif karbonat içermemeleri gerekmektedir. Normal ağırlıklı beton üretiminde kullanılan agregalar genellikle çimento hamurunun dayanımından daha yüksek dayanıma sahiptirler. Bu durum kırılma mekanizmasında çimento hamurunda kırılmanın agregalardan daha önce başlayacağı anlamına gelir. Ancak kullanılan agrega düşük dayanımlı ise kırılma çimento hamurundan önce agregada oluşabilir.

Reaktif silis ve karbonat içeren agregalar zamanla çimentodaki alkali ile reaksiyona girerek genleşme kapasitesi çok yüksek alkali-agrega jelleri oluşturabilmektedir. Bu jeller sertleşmiş betonda çatlakların ve kırılmaların oluşmasına yol açmaktadır (Erdoğan, 2003).

Sertleşmiş betondaki kırılmanın başladığı en zayıf bölgeler iri agregata taneleri ile çimento hamuru arasındaki ara bölge veya geçiş bölgesi denilen kısımdır. Çimento hamuru ile agregata taneleri arasındaki bağ kısmen Van der Waals kuvvetleri tarafından ve kısmen de iri agregata tanelerinin yüzeyleri ile çimento hamuru arasındaki aderans tarafından oluşmaktadır. Yüzey dokusu pütürlü agregalarla üretilen betonların eğilme ve çekme dayanımları düzgün yüzeyli agregalarla üretilenden daha yüksek olmaktadır.

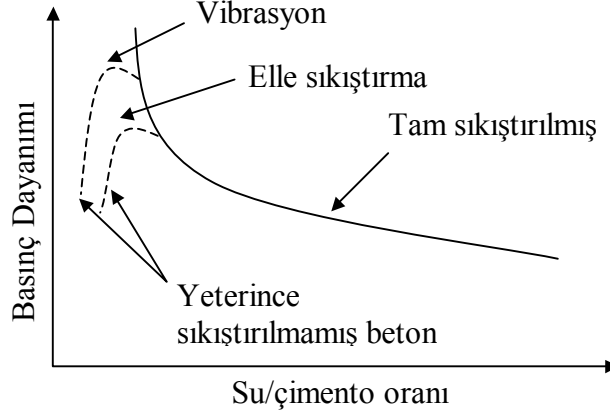
Betona yük uygulanmadan önce çimento hamuru ile iri agregata yüzeyleri arasında çok küçük boşluklar ve çatlaklar oluşmuş ise çimento hamuru ile agregata tanelerinin aderansı zayıf olmaktadır. Bu tür boşluklar taze betondaki terleme olayı ve çimento hamuru priz alırken gösterdiği hacim değişikliklerinden kaynaklanmaktadır. Taze betonda terleme olayında iri agregata ve donatının alt kısımlarında biriken su, su ceplerinin oluşmasına neden olur. Su ceplerindeki suyun bünyeden uzaklaşmasıyla sertleşen betonda boşluklar oluşur. Bu boşluklar betonda aderansın azalmasına yol açar.

Çimento hamuru priz alırken ve sertleşirken bir miktar büzülme göstermektedir. Beton içerisindeki agregata tanelerinin elastiklik modülü çimento hamurununkinden daha yüksek olduğu için agregata taneleri çimento hamurunun serbestçe büzülmesini kısıtlamaktadır. Bu durum çimento hamuru ve agregata taneleri arasındaki yüzeyde kayma ve çekme kuvvetleri oluşturmakta ve çok küçük çatlakları meydana getirmektedir. Bu kuvvetlerin etkisi agregata boyutunun büyüklüğüyle doğru orantılıdır. Betona uygulanan yükün artması çimento hamuru ile iri agregata taneleri arasındaki çatlakların daha da artmasına neden olmaktadır. Çimento hamuruyla iri agregalar arasındaki boşlukların az olması aderansının yüksek olmasına neden olur.

Beton dayanımına etkiyen faktörler; su/çimento oranı, karma suyunun kalitesi, çimento miktarı, çimento özellikleri, agregata özellikleri, granülometri, karıştırma, taşıma, yerleştirme, sıkıştırma işlemleri, kür koşulları ve beton yaşı olarak sıralanabilir.

Su/çimento oranı arttıkça betonun içerisindeki boşluk oranı artar. Betonda boşluk oranı arttıkça dayanım azalır. Su/çimento oranı ve basınç dayanımı arasındaki ilişki Şekil 3'te görülmektedir. Su/çimento oranındaki azalma çok olduğu takdirde betonu tam olarak sıkıştırılabilmek zorlaşır. Betonun iyi sıkıştırılamaması boşluk oranını artırır. O nedenle çok

düşük su/çimento oranına sahip betonların dayanımları Şekil 3'te kesik çizgilerle belirtildiği gibi azalır.



Şekil 3. Beton dayanımı ile su/çimento oranı arasındaki ilişki (Erdoğan, 2003)

Karma suyunda mevcut maddelerin türü ve miktarının betonun priz süresine, dayanımına, dayanıklılığına etkisi göz ardı edilmemelidir. Çimento tipini belirleyen faktörler, çimentonun kimyasal bileşimi ve çimento tanelerinin inceliğidir. Bu faktörler çimentonun hidrasyon hızına etkiyerek çimento hamuru içerisinde ne miktarda çimento jelinin ne kadar süre içerisinde oluşabileceği yani çimento hamurunun dayanım kazanma hızını ve nihai dayanım değerini etkilemektedir. Beton dayanımına etkileyen agrega özelliklerinin başında agreganın gradasyonu, en büyük agrega tane boyutu, tane şekli, tanelerin yüzey dokusu, dayanımı ve agregada bulunan zararlı maddelerin miktarı gelmektedir. Beton karma süresi homojen bir karışım elde edilecek kadar olmalıdır. Gereğinden az veya çok karma betonun dayanımını olumsuz etkiler. Betonun taşıma süresi çimentonun priz süresinden uzun tutulduğu takdirde işlenebilirlik azalır. İşlenebilirliği az betonun yerleştirilmesi zorlaşır. Uzun süreli taşımalar betonun segregasyonuna neden olur. Segregasyon betonda dayanım kaybına sebep olur. Betonun yerleştirilmesi sırasında uygun vibrasyon uygulaması ile betonun boşluksuz yerleşmesi sağlanmalıdır. Vibrasyon sonucu beton içerisinde mevcut hava bünyeden ayrılır ve böylece boşluk oranı azalan betonun dayanımı artar. Gereğinden fazla vibrasyon segregasyona yol açar. Taze beton kalıbına yerleştirildikten sonra çevre koşullarına bağlı olarak sıcak ortamda hidrasyon suyu taze betonun bünyesinden ayrılabilir. Soğuk havalarda çimento priz yapmaz. Yağışlı havalarda beton karışımında çimento hamurunun yıkanması gibi sorunlar yaşanabilir. Bütün bunlar betonun dayanımına olumsuz etki eden unsurlardır.

1.4. Betonun Dayanıklılığı

Değişik yapı türlerinde kullanılan beton, hizmet süresi boyunca bünyesinde yıpranmalara yol açabilecek pek çok kimyasal ve/veya fiziksel etkilere maruz kalabilir.

Betonun içerisine giren su, karbondioksit, oksijen, sülfat, asit ve klor gibi maddeler betonda farklı karakterde kimyasal olayların meydana gelmesine neden olabilir. Betonun içerisindeki alkalilerle reaktif agregalar arasında gelişen ve sertleşmiş betonun genişerek çatlamasına yol açan reaksiyonlar kimyasal olaylara tipik bir örnektir.

Islanma-kuruma, donma-çözülme, ısınma-soğuma ve aşınma gibi olaylar betonun bozulmasına yol açacak fiziksel olaylardır. Betonda yer alan fiziksel bozulma mekanizmaları sonucunda betonda boşluklar meydana gelebilir, beton aşınabilir, içerisinde hacim artışı sonucunda gerilme artışlarıyla birlikte çatlaklar ve parçalanmalar oluşabilir ve beton işlevini yapamaz duruma gelebilir.

Betonun dayanıklılığı; hava koşullarından, sülfatlı veya asitli sulardan, betonun kullanıldığı ortam koşullarından kaynaklanan yıpratıcı fiziksel ve kimyasal olaylar karşısında betonun hizmet süresi boyunca gösterebileceği direnme kabiliyeti olarak tanımlanır (Erdoğan, 2003).

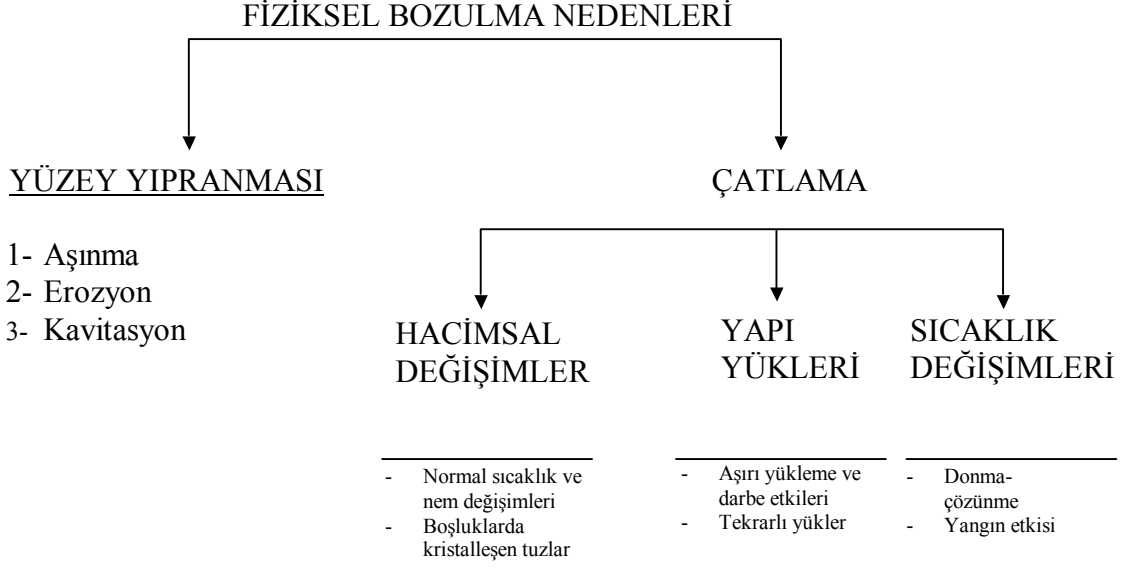
Dışarıdan yabancı madde girişiyle betonun hidratasyon ürünlerinin bünyeden ayrılması veya başka ürünlere dönüşmesi sonucu beton dayanımını etkiler. Sülfat etkisi, deniz suyu etkisi, asit etkisi, karbonatlaşma, beton içerisindeki çelik donatı korozyonu bu tür olaylara örnek verilebilir.

1.4.1. Betonun Bozulma Mekanizmaları

Malzemeler; içinde buldukları ortamlarda fiziksel, kimyasal, elektrokimyasal ve biyolojik olmak üzere dört farklı mekanizma sonucu bozulabilirler. Beton bu bozulma mekanizmaların tümüne aynı anda maruz kalabilir.

1.4.1.1. Betonun Fiziksel Bozulma Nedenleri

Betonun fiziksel bozulmasına neden olan temel faktörler şematik olarak aşağıdaki şekilde verilebilir.



Şekil 4. Betonun fiziksel bozulma nedenleri (Baradan vd., 2002)

Sertleşmiş çimento hamurunun sürtünme etkisine karşı direnci yüksek değildir. Tekrarlı sürtünme etkisi durumunda özellikle çimento hamurunun porozitesi yüksek ve/veya dayanımının düşük olması durumunda ve aşınma dayanımı düşük agrega kullanıldığında betonun ömrü oldukça kısalmaktadır. Betonda aşınmaya dayanıklı yüzeyler elde etmek için basınç dayanımının 28 MPa altına düşmemesi gerekir (Cilason ve Aksoy 2000).

Su içinde taşınan kütlelerin betona çarparak ve sürtünerek yüzeyde oluşturdukları erozyon hızı; poroziteye, betonun dayanımına, su içerisinde yüzen kütlelerin miktarına, büyüklüğüne, biçimine, yoğunluğuna, sertliğine ve taşınma hızına bağlıdır. Şiddetli erozyon ve aşınmaya maruz betonda sert agrega kullanılmalı ve basınç dayanımı 48 MPa ve üzerinde olmalıdır (Cilason ve Aksoy 2000).

Aşınma, erozyon ve kaviteasyon betonun yüzeyinde meydana gelen fiziksel bozulma mekanizmaları olduğu için beton yüzeylerinin yüzey kalitesinin iyi olmasıyla yakından ilişkilidir. Betondaki bu etkilerinin azaltılması için beton yüzey kalitesinin iyileştirilmesi gerekmektedir.

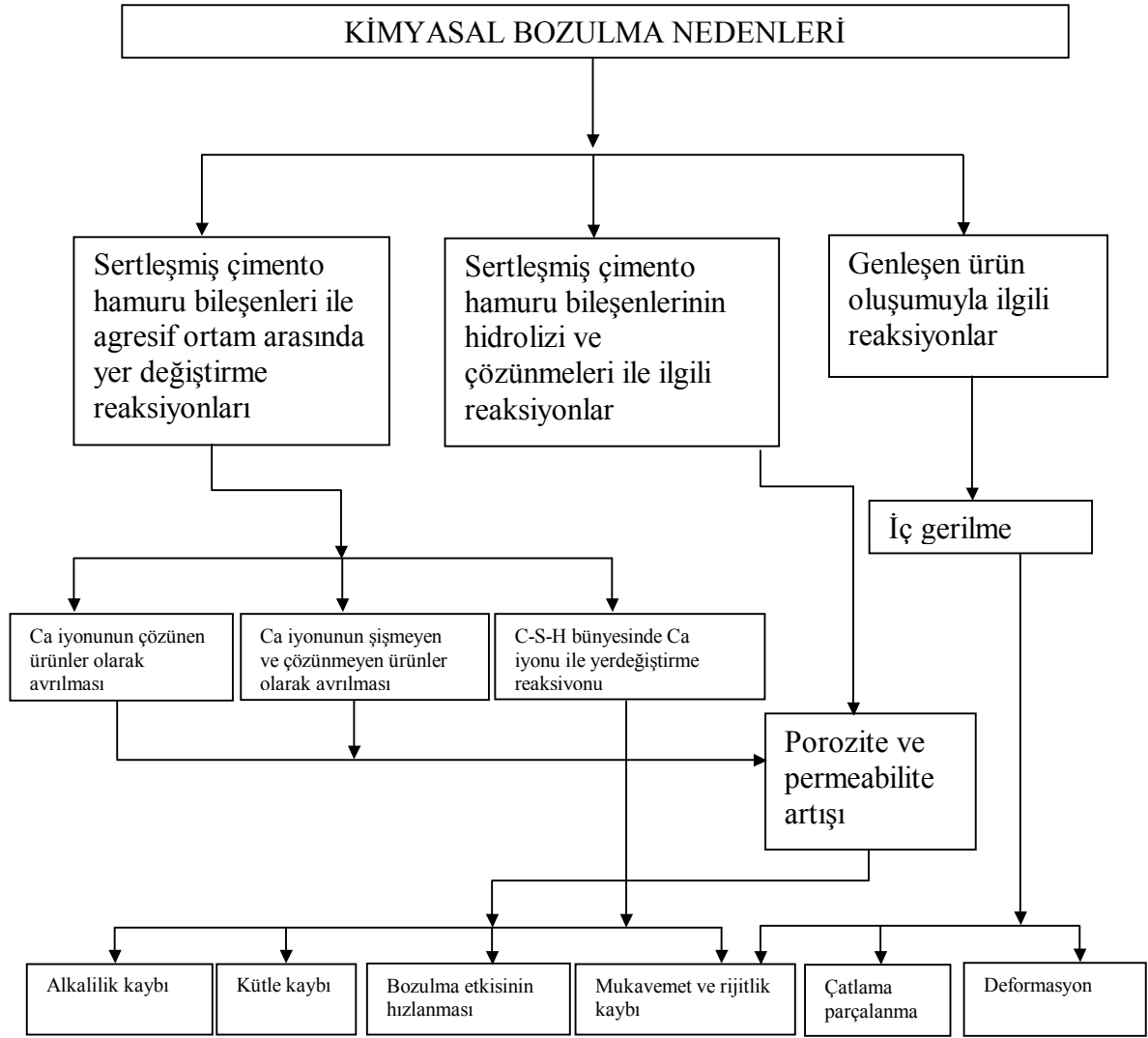
Betonun boşluklarında kristalleşen tuzlar fiziksel etki biçiminde betona önemli hasarlar verebilir. Betonun boşluklarında oluşan tuz kristallerinin meydana getirdiği hacim artışı betonun çatlamasına ve parçalanmasına sebep olabilir. Aynı don etkisinde olduğu gibi tuz kristalleşmesi de betona zarar verir. Özellikle sodyum sülfat, magnezyum sülfat, potasyum nitrat ve kalsiyum klorür tuzları bahsedilen etkilere neden olur (Cilason ve

Aksoy, 2000). Tuz çözeltilisinin kristalizasyonu sadece çözünen kısmın konsantrasyonu (c) verilen bir sıcaklıkta doygunluk konsantrasyonu (c_s) değerini aştığında meydana gelebilir. c/c_s oranı arttıkça betondaki tuz kristalizasyonu basıncı artar.

1.4.1.2. Betonun Kimyasal Bozulma Nedenleri

Betonun kimyasal olarak bozulmasında dış ortamdan gelen zararlı maddelerin çimento hidratasyon ürünleriyle kimyasal olarak reaksiyona girmesi veya beton üretimi sırasında betonun bileşenleri çimento, agrega ve suda bulunan maddelerin uygun koşullarda birbirleriyle reaksiyona girmeleri ile oluşmaktadır.

Çimento hamuru, bünyesinde yüksek miktarda Na^+ , K^+ ve OH^- iyonlarının bulunmasından dolayı bazik karakteristiğe sahiptir. Bu nedenle asidik ortamlarla karşılaştıklarında değişik kimyasal reaksiyonlara girme eğilimi gösterir. Beton pH değeri 12,5'ten düşük olan ortamlarda kimyasal reaksiyonlara girme eğilimlidir. Bu reaksiyonlar betonun bünyesindeki bağlayıcılık özelliğini sağlayan kalsiyumun bünyeden çözünüp uzaklaşmasına, bünyede hacim artırıcı ve su ile ayrışıp uzaklaşabilen ürünlerin oluşmasına neden olmak suretiyle betona zarar verirler. Kimyasal reaksiyonun ilerlemesinde betonun geçirimliliği önemli rol oynamaktadır. Geçirimliliği yüksek ve pH değeri 6'nın altındaki betonlarda kimyasal etkinin hızı oldukça yüksektir. Yumuşak sularda ve durağan suda bulunan CO_2 , yeraltı suyu ve deniz suyundaki SO_4^{2-} iyonu ve Cl^- gibi asidik sular ile bazı endüstriyel sulardaki H^+ iyonu pH değerinin 6'nın altına düşmesine neden olur. Böylece betonun kimyasal reaksiyona girme eğilimi daha da artar. Kimyasal reaksiyonlar permeabiliteyi ve poroziteyi artırarak fiziksel bozulma mekanizmalarını da harekete geçirir. Fiziksel ve kimyasal bozulma mekanizmaları birlikte hareket ederek betonun çatlamasına, parçalanmasına, dayanımının ve dayanıklılığının zamanla azalmasına neden olurlar.



Şekil 5. Betonun kimyasal bozulma nedenleri (Baradan vd., 2002)

1.4.1.3. Çimento Hamuru Bileşenlerinin Hidrolizi

Su, çimento hamuruna temas ettiğinde kalsiyum içeren ürünlerin çözünmesine ve hidrolizine neden olur. Çimento hidratasyon ürünlerinden portlandit, $(Ca(OH)_2)$, suda çözünürlüğü yüksek olan bileşendir. Kalsiyum içeriği düşük suların betonla teması sonucu betondaki $Ca(OH)_2$ 'in çözünüp bünyeden ayrılmasına neden olur. Bu olay bünyedeki kalsiyum hidroksilin tükenmesine kadar devam ederek beton bünyesinde kütle kaybına ve porozite artışıyla birlikte mukavemet kaybına neden olur.

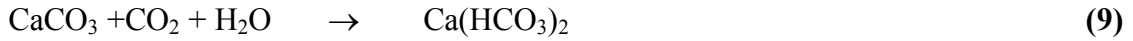
1.4.1.4. Katyon Değişirme Reaksiyonları

Katyon değişirme reaksiyonları üç gruba ayrılabilir.

Çözünmeyen kalsiyum tuzlarının oluşumu: Hidroklorik asit, sülfürik asit, asetik asit, formik asit, laktik asit, karbonik asit gibi asidik çözeltilerle çimento hamuru bileşenleri arasında meydana gelen katyon değiştirme reaksiyonları sonucu kalsiyum klorür, kalsiyum asetat, kalsiyum bikarbonat gibi yapıdan sızarak uzaklaşabilen kalsiyum tuzlarının oluşmasına neden olur. Bu asitler endüstriyel atıklarda, tarım endüstrisinde sıkça rastlanan maddelerdir. Tarım endüstrisinde gübre olarak yaygın kullanım alanı bulan amonyum klorür ve amonyum sülfat çözeltileri çimento hamuru bileşenlerini kolayca çözünebilen ürünlere dönüştürebilirler.



Yukarıdaki reaksiyon sonucunda oluşan ürünler çözünebilir özelliğe sahiptir. Karbonik asitle hidrate olmuş çimento hamurunda aşağıdaki reaksiyonlar oluşur.



Reaksiyonlar sonucu oluşan bikarbonat çözünebilir özelliktedir. İkinci reaksiyon tersinirdir. CO₂ miktarına göre bikarbonat oluşmaktadır. Bu şekilde oluşumlarla çözünebilir ürünler oluşmakta ve bu ürünler uygun ortamda çözünerek bünyeden uzaklaşırlar. Yapıda kütle kaybıyla oluşan porozite ve permeabilite artışı betonun mukavemetinin düşmesine ve dayanıklılığın azalmasına sebep olmaktadır.

Çözünmeyen ve genleşmeyen tuzların oluşumu: Agresif su ortamında mevcut belli anyonlar çimento hamuruyla reaksiyona girerek çözünmeyen kalsiyum tuzlarını oluştururlar. Bunların oluşumu reaksiyon ürünleri genleşmedikçe veya erozyon ya da sızma yoluyla bünyeden uzaklaşmadıkça beton için zarar teşkil etmez. Kalsiyum hidroksil ile okzalik, tartarik, hidroflorik ve fosforik asit arasındaki reaksiyonlar çözünmeyen ve genleşmeyen kalsiyum tuzları oluşturur.

Magnezyum tuzları içeren çözeltilerin neden olduğu kimyasal bozulma: Magnezyum klorür, magnezyum sülfat ve magnezyum bikarbonata yeraltı suyunda, deniz suyunda ve bazı endüstriyel atıklarda sıkça rastlanmaktadır. Magnezyum çözeltisi çimento hamurunda mevcut kalsiyum hidroksitle kolaylıkla reaksiyona girerek çözünebilir kalsiyum tuzları oluşturabilir. Sülfat iyonu çimento hamurundaki alüminli bileşenlerle reaksiyona girerek yeni ürünler oluşturmak suretiyle betona zarar vermektedir.

1.4.1.5. Genleşen Ürün Oluşumuyla İlgili Reaksiyonlar

Doğada pek çok kaynakta mevcut sülfatın çimento hidrasyon ürünleriyle birlikte reaksiyonu sonucu alçıtaşı, etrenjit ve tomasit gibi genleşen ürünlerin meydana gelmesine neden olur.

Çimentoda Na_2O ve K_2O gibi alkaliler mevcuttur. Bu alkaliler beton agregasında mevcut reaktif silisle karşılaşınca kimyasal olarak reaksiyona girerler. Bu olaya alkali-agrega reaksiyonu adı verilir. Alkali-agrega reaksiyonlarından en yaygın olanı alkali-silika reaksiyonudur. Bu reaksiyon sonucu betonda jel oluşur ve bu oluşumun meydana getirdiği hacim artışı betonda çatlamalara sebep olur. Bazı karbonat esaslı agregalar beton yapılarında reaktif özellik gösterirler. Agregadaki karbonatın çimentodaki alkalilerle reaksiyona girmesi olayına alkali-karbonat reaksiyonu adı verilir. Bu reaksiyonun sonucunda da betonda çatlaklar oluşur (Baradan vd., 2002).

Çimentoda önemli miktarda CaO ve MgO 'in bulunması durumunda bu ürünlerin hidrasyonu betonun genleşmesine ve çatlmasına neden olur. Bu ürünlerin hidrasyonu sonucu Ca(OH)_2 ve Mg(OH)_2 oluşur ve bu ürünler hacim artırıcı özelliğe sahiptir. CaO ve MgO 900°C 'de etkisini kaybeder. Günümüzde üretilen çimentolar bu sıcaklığın üstünde işlem gördüklerinden bu tür reaksiyonlara maruz kalmazlar (Erdoğan,2003).

Betonda donatı korozyonu betonun bozulmasına neden olan mekanizmalardan en önemlisidir. Beton içindeki donatı korozyonu sonucu donatıdaki hacim artışı betonda çatlama şeklinde hasara neden olur.

1.4.2. Sülfat Etkisi

Betondaki bozulma mekanizmalarından biri olan sülfat etkisi, fiziksel ve kimyasal olarak oluşan reaksiyonlar sonucu meydana gelip betonun servis ömrünü azaltan bir etkidir (Skalny vd., 2002; Nehdi ve Hayek, 2005). Sülfat etkisi iç kaynaklı ve dış kaynaklı olmak üzere iki gruba ayrılabilir.

1.4.2.1.İç Kaynaklı Sülfat Etkisi

Beton üretiminde kullanılan çimento, agrega, su ve katkılardan gelen sülfat iyonlarının betonun sertleşmesinden sonra uygun ortam şartlarında yeni ürünler oluşturmasıyla gelişen olaya iç kaynaklı sülfat etkisi denilmektedir. İç kaynaklı sülfat etkisinde betona dış ortamdan sülfat gelmemektedir. İç kaynaklı sülfat etkisi ile beton bünyesinde mevcut sülfat

iyonu sertleşmiş betonda etrenjit kristalleri oluşturmaktadır. Oluşan bu etrenjit kristalleri betonda hacim artışı meydana getirebilmektedir. Sertleşmiş betondaki hacim artışının meydana getirdiği iç basınç betonun çatlamasına sebep olmaktadır. Çatlak gelişimi ve betondaki fiziksel ve kimyasal bozulma mekanizmalarının birlikte hareketiyle betonun servis ömrü kısalmaktadır.

İç kaynaklı sülfat etkisine neden olan sülfat iyonu betona çimento, agrega veya karışım suyu ile girebilmektedir. Çimentonun ani prizini önlemek amacıyla çimentoya %3 ile %6 oranında katılan alçıtaşı ana sülfat kaynağıdır (Collepari, 2003; Skalny vd., 2002). Beton agregasında bulunan sülfat uygun ortam şartlarında iç kaynaklı sülfat etkisine neden olur (Casanova vd.,1997).

1.4.2.1.1.İç Kaynaklı Sülfat Etkisinin Oluşum Türleri

Oluşan iç kaynaklı sülfat etkisi iki kısma ayrılabilir. Bunlardan birincisi normal sıcaklık altındaki beton ve harçlarda meydana gelen iç kaynaklı sülfat etkisidir. İkincisi beton üretimi sırasında buhar kürü gibi yüksek sıcaklıklara maruz kalan betonlardaki iç kaynaklı sülfat etkisidir.

1.4.2.1.2. Normal Sıcaklık Altında İç Kaynaklı Sülfat Etkisi

Bu konuda çalışma yapan araştırmacılar (Collepari, 2003; Batic vd., 2000) yaptıkları mikro yapısal incelemelerde normal betonlarda değişik ortam şartları içinde betonun sertleşmesinden sonra yeni etrenjit kristallerinin oluştuklarını gözlemlediler. Betonun sertleşmesinden sonraki etrenjit oluşumundan literatürde ikincil etrenjit oluşumu olarak bahsedilmektedir.

Betonun üretimi sırasında çimento ürünleriyle suyun reaksiyonu sonucu çimentodaki alüminlerle sülfat bulunduran elemanların reaksiyonu sonucu birincil etrenjit oluştuğu bilinmektedir. Çimentonun hidratasyonu sırasında fazla gelen SO_3 ve Al_2O_3 betonun sertleşmesinden sonra uygun çevre şartları altında kimyasal reaksiyonlara girerek çimento hamurunda ve agrega arayüzeyinde etrenjit oluşturabilmektedir (Collepari, 2003; Skalny vd., 2002, Batic vd., 2000). Çevre sıcaklığı altında üretilen betonlarda aşırı miktarda sülfat veya sülfür içerikli bileşikler varsa sertleşmiş beton için zararlı durum oluşturabilir. Betona çimento ile birlikte katılan sülfatlar, alitlerle (C_3A ve CA) ve az kısmı da feritlerle (C_4AF) reaksiyona girerek tüketilirler. Aşırı miktardaki sülfat iyonları sertleşmiş beton hidratasyon

ürünü kristalleri arasında kalarak sonradan gelen suyun etkisiyle yavaşça çözünerek yeni etrenjit grupları oluşturabilir (Skalny, Marchand, Odler, 2002).

İkincil etrenjit oluşumunu araştıran bazı araştırmacılar, yavaş gelişen bir olay olduğunu ve zaman içinde yüksek oranda sülfat bulunduran betonlar için zararlı gerilme artışlarıyla genişmelere neden olduğunu belirtmektedirler (Collepardi, 2003).

Taylor vd. (Skalny vd., 2002; Taylor vd., 2001), beton üretimi sırasında yüksek ısıya maruz kalmaması durumunda iç kaynaklı sülfat atağı sonucunda betonda hacim artışı meydana gelmeyeceğini belirttiler.

Batic vd. farklı bozulma mekanizmalarına maruz iki tip çimento ile üretilmiş betonlarda mikro yapısal inceleme yaptılar (Collepardi, 2003). Çalışmalarında dış ortamdan sülfat iyonu gelmeden ıslanma-kuruma gibi dönüşümler uygulanan numunelerde ikincil etrenjit oluşumuna rastladılar.

Collepardi (2003) ve Hime (1996) ise çalışmalarında betonun, kürü sırasında yüksek sıcaklığa maruz kalmasa da yüksek sülfat içerikli çimento ile üretilmesi durumunda da ikincil etrenjit oluşumu ile hacim artışının oluşabileceğini belirttiler.

1.4.2.1.3. Yüksek Sıcaklıkta Kür Gören Betonlarda İç Kaynaklı Sülfat Etkisi

Yüksek sülfat içerikli çimentolarla yapılan ve üretimi sırasında buhar kürü veya yüksek sıcaklıkta bakım uygulanan betonlarda iç kaynaklı sülfat etkisine rastlanmaktadır (Skalny vd., 2002). Bu yüksek sıcaklık betonun imalatı sırasındaki yüksek çevre sıcaklığından veya betonun hidrasyonu ile açığa çıkan ısıdan da kaynaklanabilir. Üretimi sırasında yüksek sıcaklıkta küre maruz betonlarda kürden sonra nemli ortamlarda buldukları zaman betonda iç kaynaklı sülfat atağı ile etrenjit oluşmaktadır. Bu etrenjit oluşumu betonda hacim artışına ve çatlaklara sebep olmaktadır. Buhar kürü gibi yüksek sıcaklıkta üretilen betonlarda bünyedeki sülfattan dolayı etrenjit oluşumuyla kendini gösteren bu olay literatürde gecikmiş etrenjit oluşumu olarak adlandırılmaktadır (Collepardi, 2003; Skalny vd., 2002).

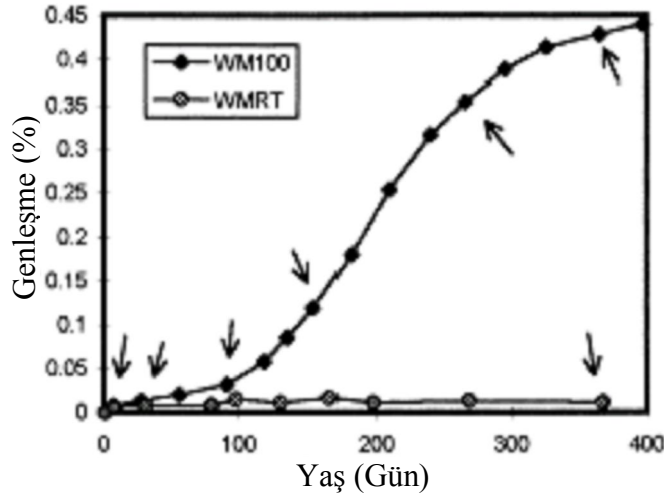
Isıl bozulmanın neden olduğu gecikmiş etrenjit oluşumu 1980'li yıllarda ön gerilmeli köprü kirişlerinde rastlanan çatlakların incelenmesi sonucunda ortaya çıkmıştır (Batic vd., 2000). Buhar kürü gibi yüksek sıcaklığa maruz kalan betonlarda, ilk zamanlarda oluşması gereken etrenjit kristalleri oluşmayıp, etrenjit oluşumuna neden olan monosülfatlar C-S-H jelinin kristalleri arasına yerleşmektedir. Yüksek ısıda üretilen beton eleman normal sıcaklık şartlarında soğumaya bırakıldığında dışardan gelen su ve nemin etkisiyle

sertleşmiş betonda etrenjit kristalleri oluşmaktadır (Divet ve Randriambololona, 1998). Bu etrenjit kristalleri sertleşmiş betonda bulunan hava boşluklarında ve çatlaklarda oluşur. Oluşan bu etrenjit, hacim artırıcı bir ürün olup betonun genişmesine ve çatlamasına neden olmaktadır. Yüksek ısı kürü uygulanan betonlarda yapılan mikroskobik inceleme sonucunda çimento hamurunda ve agreganın çevresinde 25-30 mikron genişliğinde çatlakların oluştuğu ve bu çatlakların kısmen veya tamamen sonradan oluşan etrenjitle dolu olduğu görülmüştür. Hamurdaki mikro çatlaklarda da etrenjit oluşumlarına rastlanmıştır (Skalny vd., 2002).

Isı kürü sonucunda oluşan sülfat etkisinde agregaların çevresinde dairesel çatlaklar oluşmaktadır. Bu oluşan çatlakların agreganın büyüklükleriyle orantılı olduğu tespit edilmiştir (Skalny vd., 2002).

Yang ve Lawrence (1999) ısı kürü uygulanan betonlarda kürden hemen sonra nadir olarak etrenjit kristallerine rastlandığı belirttiler. Isıl kürü takiben oda sıcaklığında suda bekletilen numunelerde dokuz gün sonra etrenjit kristallerinin hamurda ve ara yüzeylerde gelişmeye başladıkları görülmüş, 155 gün sonra da iyi gelişmiş etrenjit bantlarına rastlanmıştır.

Yang ve Lawrence (1999) yüksek ısı kürüne maruz kalmayan betonlarda hacim artışı sonucu çatlak oluşmadığını belirtmektedirler. Yaptıkları çalışmada aşağıdaki grafikteki değerleri elde ettiler.



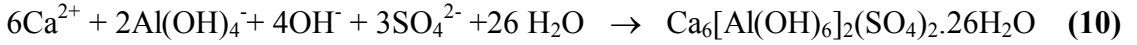
Şekil 6. Normal sıcaklıkta (~20 °C) ve 12 saat 100 °C'de kür gören betonlarda hacim artışı (Yang vd., 1999)

Şekildeki iki harç numunesinden 100°C'de kür uygulanan numunede fazla miktarda hacim artışı meydana gelirken 20°C'de bakım uygulanan numunede belirgin bir hacim

artışı olmamaktadır. 100°C’de 12 saat kür uygulanan numunelerde dokuz gün içinde hacim artışının başladığı ve bir yılda tamamlandığı görülmektedir. Oda sıcaklığında kür uygulanan numunelerde oluşan etrenjitin çoğunun hidratasyon sırasında meydana geldiği, yüksek sıcaklıkta kür uygulanan numunelerde hemen etrenjitin görülmediği tespit edildi. Yüksek sıcaklıkta kür uygulanan numunelerde yedi gün sonra oda sıcaklığında su içinde bekletildiği zaman gecikmiş etrenjit oluşumu görülmeye başlandı (Skalny vd., 2002; Taylor vd., 2001).

Yapılan araştırmalarda gecikmiş etrenjit oluşumunda sıcaklığın önemli bir faktör olduğu ve 70 °C’yi aşmayan sıcaklıklardaki kürlerde gecikmiş etrenjit oluşumunun hacim artışına neden olmadığı söylenmektedir (Skalny vd., 2002; Taylor vd., 2001; Pavoin vd., 2006).

İç kaynaklı sülfat etkisinde gecikmiş etrenjit oluşumu sırasında ana reaksiyonlar C-S-H jelinden, monosülfatlardan ve gözenek çözeltisinden kaynaklanmaktadır. C-S-H reaksiyona Ca^{2+} , SO_4^{2-} , OH^- , H_2O ; monosülfatlar reaksiyona Ca^{2+} , SO_4^{2-} , OH^- , $Al(OH)_4^-$, H_2O ; gözenek çözeltisi de H_2O ve SO_4^{2-} sağlamaktadır. Bu ürünlerle birlikte gelişen reaksiyon sonucunda etrenjit oluşmaktadır (Taylor vd., 2001).

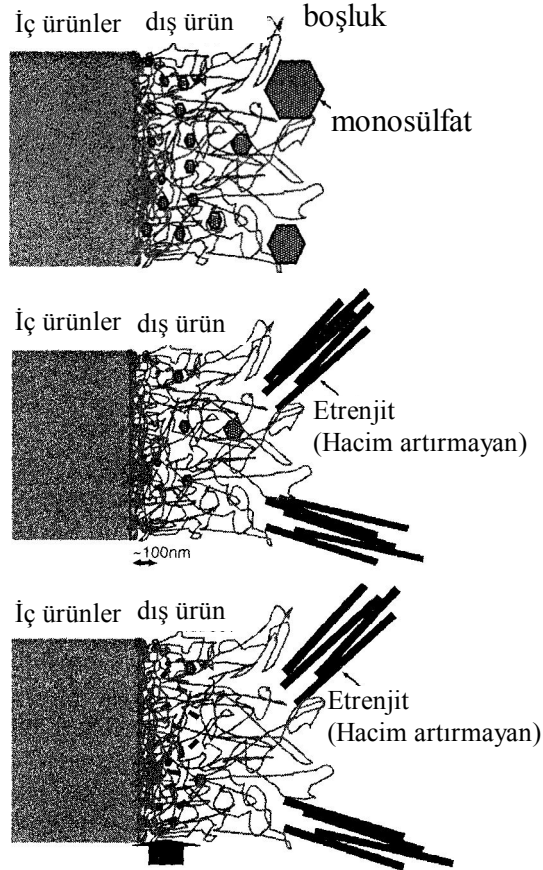


Divet ve Randriambololona (1998) yaptıkları çalışmada C-S-H jelindeki sülfat iyonunun absorbe edildiğini deneysel olarak gösterdiler.

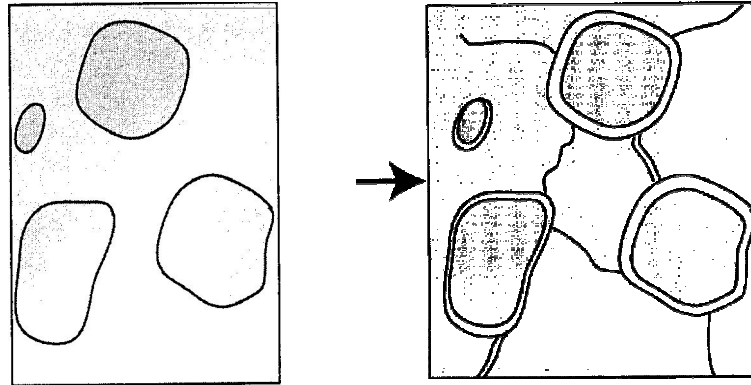
Johansen, Taylor ve bunlarla aynı görüşü paylaşan araştırmacılara göre gecikmiş etrenjit oluşumuyla beton veya harçta hacim artışının meydana gelebilmesi için hidratasyonun ilk safhasında beton ve harcın yüksek ısıya maruz kalması ve sonra normal sıcaklık şartlarında C-S-H jelleri tarafından absorbe edilen sülfat ve alümin iyonlarının tekrar yayılması şeklinde izah edilen iki koşulu sağlaması gerektiğini belirtmektedirler (Taylor vd., 2001; Skalny vd., 2002; Pavine vd., 2006).

Fu ve vd. ve Beaudoin ısı kürüne maruz kalmış ve genişleme meydana gelen betonlarda gecikmiş etrenjit oluşumunun ilk kristallerinin mikro çatlaklarda oluşmaya başladığını belirttiler (Skalny vd., 2002). Buhar kürü gibi yüksek ısıya maruz kalan betonda sülfatlar hızlı olarak C-S-H jelleri tarafından absorbe edilir. Beton soğumaya bırakıldığında çevreden gelen nem ve su sayesinde önceden var olan çatlak ve boşluklarda etrenjit kristalleri oluşmaya başlar. Bu mevcut çatlakların büyüklükleri önemlidir. Önceden mevcut büyük çatlaklar büyük hacim artışına neden olurlar. Etrenjitin gelişimi sınırlanınca kristalleşme basıncı artar ve bunun sonucunda çatlaklar genişlemektedir.

Gecikmiş etrenjit oluşumunun sebep olduğu hacim artışıyla ilgili iki ana görüş vardır (Taylor vd., 2001). Bu görüşlerin birincisinde betonun çatlak ve boşluklarında sonradan oluşan büyük etrenjit kristallerinin hacim artışına neden olduğu belirtilmektedir (Taylor vd., 2001; Yang ve Lawrence, 1999; Diamond, 1996). Diğer görüşte ise çimento hamuru içindeki mikro boşluklarda sonradan oluşan çok küçük etrenjit kristallerinin hacim artışına neden olduğu belirtilmektedir (Taylor vd., 2001). Mikroyapısal araştırmalar bu görüşlerin her ikisini de desteklemektedir. Bu iki görüş üzerine önerilen hacim artışı mekanizması şu şekildedir. Beton üretimi sırasında buhar kücü uygulanması durumunda yüksek sıcaklığa maruz kaldığında etrenjit kristallerinin oluşmasına neden olan monosülfatlar C-S-H jellerinin dış kısım ürünlerinin arasına yerleşmektedir. Beton üretimi sonrası normal sıcaklıkta dışardan gelen nemin etkisiyle C-S-H jelinin dış kısmında yerleşen monosülfatlar yavaşça harekete geçerek etrenjit kristalleri oluşturmaya başlamaktadır (Şekil 7). Bu çok sayıdaki mikro boyutlara sahip çimento hamurundaki gözeneklerdeki kristalleşme basıncı genişlemeye neden olmaktadır. Bu genişleme sonucunda betonun agrega çevresinde ve hamurunda çatlaklar meydana gelmektedir (Şekil 8). Bu oluşan çatlaklarda etrenjit ve kalsiyum hidroksit tekrar kristalleşmektedir. Ancak meydana gelen bu çatlaklar büyük olduğunda tekrar kristalleşen etrenjit bir iç basınç oluşturmamaktadır (Skalny vd., 2002; Taylor vd., 2001).

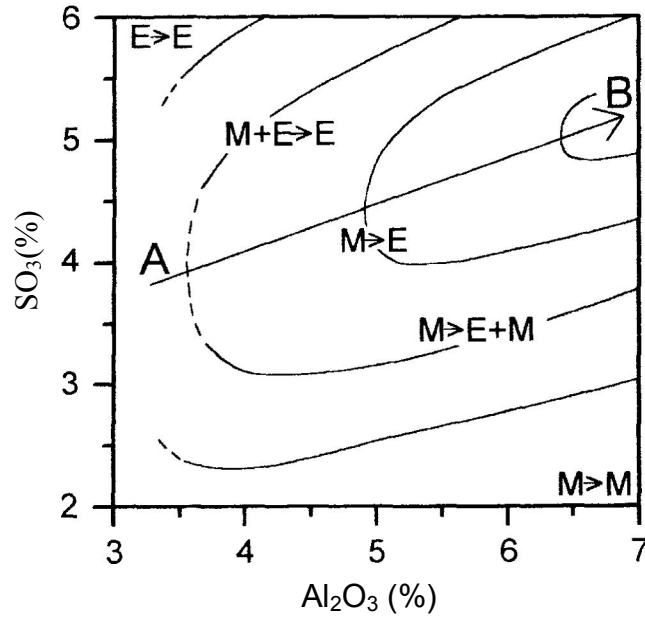


Şekil 7. Betonun yüksek ısıya maruz kalmasıyla monosülfatın C-S-H jelleri arasına yerleşmesi ve soğurken çevreden gelen nemin etkisiyle etrenjit oluşumunun şematik gösterimi



Şekil 8. Etrenjit oluşumuyla agrega çevresinde ve hamurda çatlak oluşumu

İç kaynaklı sülfat etkisini çimento tipi ve çimentoda bulunan sülfatla alüminat oranı ($\text{SO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$) etkilemektedir (Batic vd., 2000; Taylor vd., 2001). Taylor ve vd. (2001) bu etkileşimi Şekil 9'de göstermektedirler. Şekildeki halkalar oluşum sırasındaki etrenjit miktarını göstermektedir. Etrenjit oluşumu AB oku doğrultusunda artmaktadır.



Şekil 9. SO_3 ve Al_2O_3 oranına göre etrenjit oluşumu
(M=Monosülfat, E= Etrenjit)

1.4.2.2. Dış Kaynaklı Sülfat Etkisi

Dış kaynaklı sülfat etkisi, sertleşmiş betona dış kaynaklardan gelen sülfat iyonunun çimento hidratasyon ürünleriyle kimyasal olarak reaksiyona girmesi biçiminde tanımlanmaktadır. Bu reaksiyonlar sonucunda betonda yeni bazı ürünler meydana gelir. Oluşan yeni ürünler betonda hacim artışı, kohezyon kaybı, kütle kaybı gibi oluşumlara ilaveten çatlama da neden olabilmektedir (Santhanam vd., 2003; Diamond ve Lee, 1999; Skalny vd., 2002). Dış kaynaklı sülfat etkisi kimyasal bozulma mekanizması şeklinde başlar. Bu kimyasal reaksiyonlardan çıkabilecek muhtemel bozulmalara fiziksel bozulma mekanizmaları da katkı yapar. Bu mekanizmaların birlikte etkimesi sonucu beton yapı elemanlarının servis ömrü önemli derecede kısalmaktadır.

En yaygın dış sülfat kaynağı yeraltı suyudur. Göl ve nehir suları da dış kaynaklı sülfat atacağına sebep olabilecek miktarda sülfat içerebilirler. Endüstriyel atık suları da diğer bir sülfat kaynağıdır. Endüstriyel atık sularındaki sülfat miktarı genellikle göl ve nehir sularında bulunandan daha fazla miktardadır. Özellikle fosil yakıt kullanan ve arıtma üniteleri bulunmayan enerji santrallerinin yer aldığı bölgelerdeki yağış suları da yüksek miktarda sülfürik asit içerebilirler. Özellikle kurak bölgelerdeki topraklarda mevcut alçıtaşı, sülfat kaynağı bakımından zengin kil ve diğer toprak türleri de dış kaynaklı sülfat

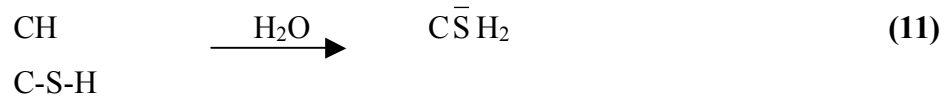
kaynağı olabilmektedir. Bu tür bölgelerdeki sülfat yağış sularının etkisiyle yeraltı ve yüzeysel sulara karışarak dış kaynaklı sülfat etkisine neden olabilmektedir. Tarım sahalarındaki toprakta kullanılan gübre de sulara karışarak betona ulaşır ve sülfat etkisine neden olabilir (Skalny vd., 2002).

Sulardaki sülfat iyonları çoğunlukla alkalilerle ve kalsiyum katyonlarıyla birleşmiş olarak bulunur. Yani sülfat iyonu, doğada sodyum sülfat, potasyum sülfat, magnezyum sülfat ve kalsiyum sülfat şeklinde bulunur. Sülfürik asit (H_2SO_4) ve amonyum sülfat ($(NH_4)_2SO_4$) sülfat atağına sebebiyet veren sülfat iyonu bulunduran diğer kaynaklardır.

Bu değişik türdeki sülfat kaynaklarında meydana gelen reaksiyonlar farklılıklar gösterir. Sülfat iyonunun bağlı olduğu iyonla göre çimento hidrasyon ürünleriyle meydana gelen reaksiyon ürünleri de farklılıklar gösterir (Nehdi ve Hayek, 2005).

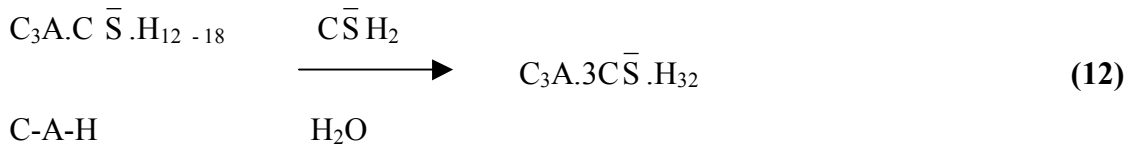
Dış ortamda mevcut sülfat çimento hidrasyon ürünleriyle kimyasal reaksiyona girerek ortam şartlarına göre alçıtaşı, etrenjit ve tomasit oluşturmaktadır. Bu üç ürünün de betonda meydana getirdiği ortak etki hacim artışıdır (Collepardi, 2003). Oluşan bu ürünler sabit kalmayarak sürekli değişimler gösterirler. Sonradan oluşan alçıtaşı, etrenjit ve tomasit oluşumuna neden olacak şekilde reaksiyonlara girer. Dış çevreden kaynaklanan bu üç ürün aşağıdaki şekilde verilebilir.

1- Sülfat etkisi sonucu CH ve C-S-H'da alçı oluşumu



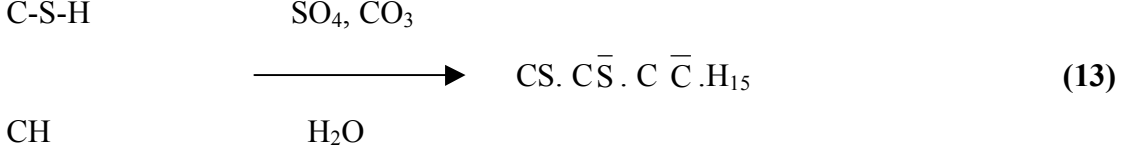
Sertleşmiş betonda sonradan alçıtaşı oluşumu hacim artışlarına sebep olur. Bu hacim artışı betonda çatlaklara ve parçalanmalara sebep olabilir. Ancak bunun daha önemli etkisi dayanım kaybı ve çimentoda meydana gelen adezyon kaybıdır. Çimento hamurunun bağlayıcılık özelliğinden sorumlu C-S-H jelinden kalsiyumun ayrılması adezyon kaybına sebebiyet vermektedir (Collepardi, 2003). Alçıtaşı betonda sülfat etkisi sonucu ilk yüzeye yakın kısımlarda özellikle de çatlak ve boşluklarda oluşur (Diamond ve Lee, 1999)

2- Sülfat etkisi sonucu kalsiyum alümin hidratla (C-A-H) ve monosülfat hidratla ($C_3A.C\bar{S}.H_{12-18}$) etrenjit oluşumu



Bu reaksiyon sonucu oluşan etrenjit hacim artışına sebebiyet vererek betonun çatlamasına neden olur (Collepari, 2003).

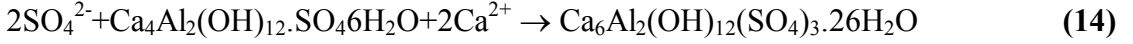
3- Karbonat iyonunun bulunduğu ortamda C-S-H ve CH'ye sülfat etkisiyle tomasit oluşumu



Tomasit oluşumu beraberinde çok ciddi mukavemet ve adezyon kaybı yaratır (Thomas vd., 2003). C-S-H jellerinde önemli bozulmalara ve betonun yumuşamasına sebebiyet verir. Bu olaya nemli ortam ve düşük sıcaklıklarda daha çok rastlanır. Sıcaklık arttıkça tomasit oluşumu yavaşlar (Irassar vd., 2000).

1.4.2.2.1. Sodyum Sülfat (Na₂SO₄) Etkisi

Dış kaynaktan betona giren sodyum sülfat hidrasyon ürünleriyle reaksiyona girerek betonda alçıtaşı ve etrenjit oluşturur. Sodyum sülfatın su tarafından betona taşınarak betonun içerisine girmesiyle monosülfatlarla reaksiyona girerek yeni ürünler oluşturur.



Yukarıdaki reaksiyon için gerekli Ca^{2+} iyonu portlanditin çözünmesiyle sağlanmaktadır.

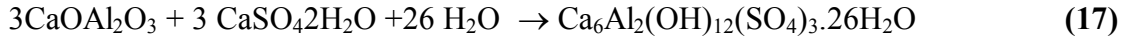


Betondaki portlanditin tükenmesinden sonra ortamda sülfat iyonu bitmemişse (14) nolu reaksiyon için gerekli Ca^{2+} iyonu C-S-H'dan sağlanmaya başlar. C-S-H'dan kalsiyum iyonlarının ayrılmasına dekalsifikasyon denir. Betonda bağlayıcılık özelliği sağlayan C-S-H'da ki bu bozulma çok önemlidir. C-S-H yapısındaki CaO/SiO_2 oranındaki azalma betonun zamanla bağlayıcılık özelliğinin kaybolmasına yol açmaktadır. C-S-H'dan mevcut tüm kalsiyum iyonlarının ayrılması çok yüksek konsantrasyonlu sodyum sülfat çözeltilerinde gerçekleşebilir (Skalny vd., 2002).

Eğer SO_4^{2-} iyonu etkisiyle ortamdaki Al^{3+} iyonu tükenirse ve halen ortamda sülfat iyonu mevcutsa etrenjitten ziyade alçıtaşı oluşur. Betonun yüzey kısmında sülfat iyonları alüminat iyonlarından fazla olduğu için alçıtaşı beton yüzeyine daha yakın yerinde oluşur.



Reaksiyona giren Al^{3+} iyonu monosülfatlardan başka hidratasyon sırasında hidrate olmayan C_3A 'dan da sağlanabilmektedir. Bu olay nadir olarak gerçekleşir (Skalny vd., 2002).



Alkali iyonlarla birleşen sülfat iyonlarının betondaki boşluk sistemi vasıtasıyla başka yerlere hareketi sağlanır. Bu durum boşluk çözeltisindeki alkali konsantrasyonu ve pH değerini artırır. Bu uygun olmayan şartlar altında betonda alkali silika reaksiyonları da oluşabilir (Skalny vd., 2002).

Alkali sülfatlarla portland çimentosundan üretilen betonun karşılıklı etkileşimiyle gözeneklerde oluşan etrenjit boşlukları doldurduğu için geçici bir dayanım artışına sebep olmaktadır. Ancak etrenjit kristalleşmesi devam ettikçe açığa çıkan iç basınç betonda hacim artışına ve çatlamaya sebep olmaktadır. Düşük Al_2O_3 ve yüksek sülfat konsantrasyonlu çimentolarla üretilen betonlarda oluşan alçıtaşı da etrenjit oluşumu kadar hacim artışına yol açmaktadır (Skalny vd., 2002).

Sodyum sülfat etkisinde betonda sodyum miktarının yüksek olması durumunda $4\text{CaO} \cdot 0,9\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 1,1\text{SO}_3 \cdot 0,5\text{Na}_2\text{O} \cdot 16\text{H}_2\text{O}$ ile formülize edilen U-oluşumu diye adlandırılan bileşikler de oluşabilir. U-oluşumu monosülfatlara sodyum eklenmesiyle oluşur. U-oluşumu betona yüksek miktarda Na_2SO_4 bulunduran suyun sızması, bir taraftan da suyun karşı yüzeyden buharlaşması sonucu sodyumun birikmesi veya beton üretimi sırasında karışıma yüksek oranda sodyum içeren suyun katılması durumunda oluşmaktadır. Bu olaya yüksek sıcaklıklarda daha çok rastlanmaktadır. U-oluşumu aşırı miktarda olması durumunda bozulmalara sebep olabilmektedir. U-oluşumu uygun şartlar altında etrenjite dönüşebilmektedir (Skalny vd., 2002).

Yüksek miktarda sodyum sülfata sahip suyun betona girmesinden sonra suyun buharlaşması sonucu gözeneklerde bulunan sodyum tuzları kristalleşebilmektedir. Bu oluşumlar genelde betonun yüzeyine yakın yerlerde oluşur. Sodyum tuzlarının kristalleşmesi sonucu hacim artışından kaynaklanan gerilmeler beton için zararlı olabilirler.



Yukarıdaki denklemde tenardite'nin mirabilite'ye dönüşümünde katı hacminde %315,4' lük artış meydana gelmektedir. Sıcaklık değişimleri durumunda yukarıdaki reaksiyon tersine dönebilmektedir. Reaksiyondaki tekrarlanma dönüşümleri betondaki

yıkıcı etkiyi artırır (Skalny vd., 2002). Betondaki çiçeklenme de mirabilitenin tenarditeye dönüşmesi sonucunda olmaktadır (Nehdi ve Hayek, 2005).

Alkali sülfat etkisi çimentonun bileşimine göre değişebilmektedir. Sülfata dayanıklı çimento üretmek için Al_2O_3 miktarı sınırlanan çimentolar üretilmektedir. Al_2O_3 miktarının sınırlanması çimento bileşimindeki C_3A miktarı belli değer altına çekilerek gerçekleştirilmektedir. C_3A miktarı düşürülen çimentonun hidrasyonunda daha az monosülfat oluşacağından alkali sülfat etkisinde etrenjit ve alçıtaşı oluşumu azalacaktır (Skalny vd., 2002). C_3A miktarı azaltılmış çimento ile üretilen betonların sodyum sülfat gibi alkali sülfatlara dayanım kazanmasına rağmen magnezyum sülfat ve sülfirik asit bulunan ortamlar beton için zararlı olabilir. Düşük pH değeri sülfat atağının doğrudan C-S-H jeline etkimesine yol açar (Santhanam vd., 2001).

Çimento üretiminde günümüzde doğal ve yapay katkıları kullanımı artmıştır. Kullanılan silis dumanı, yüksek fırın cürufu, uçucu kül ve doğal puzolanların betonun normal şartlardaki performansı üzerindeki etkileri bilinmektedir. Bu tür mineral katkılarıyla üretilen betonların sülfat atağı karşısındaki davranışları araştırılmaktadır (Irassar vd., 2000; Skalny vd., 2002; Santhanam vd., 2001; Thomas vd., 1999; Al-Amoudi, 2002)

Betonun sülfat etkisi karşısında dayanımını artırmak için sülfata dayanıklı çimento kullanımı yanında, betonun permeabilitesinin de düşük olması gerekir. Betonun sülfat dayanımını artıran birinci faktör permeabilitedir (Irassar vd., 2000). Düşük geçirimsizlik beton yapımındaki düşük su/çimento oranıyla yakından ilişkilidir. Betonun hidrasyonunun ilk zamanlarında açığa çıkan kalsiyum hidroksit (CH) miktarı da betonun sülfata karşı direncini etkilemektedir (Irassar vd., 2000). Yüksek C_3S/ C_2S oranına sahip çimentolarda, betonun hidrasyon sürecinin ilk zamanlarında açığa çıkan kalsiyum hidroksit miktarı fazladır. Betondaki kalsiyum hidroksit miktarı arttıkça dış ortamdan gelen sülfat iyonlarının reaksiyonu sonucu alçıtaşı oluşumu artar. Oluşan bu alçıtaşı etrenjit oluşumuna neden olur. Beton bünyesinde fazla miktarda sonradan oluşan bu ürünler çatlama yoluyla dışarıdan madde girişini artırır. Böylelikle kalsiyum hidroksiti fazla olan beton sodyum sülfat atağından daha fazla etkilenir. C_3S 'in hidrasyonu C_2S 'in hidrasyonundan 2,2 kat fazla CH açığa çıkarmaktadır. Sülfata dayanıklı iki tür çimento ile üretilen betonlarda, yüksek C_3S/ C_2S oranına sahip çimento ile üretilenin sülfat etkisine karşı performansının daha düşük olduğu gözlemlenmiştir (Irassar vd., 2000).

Sodyum sülfat etkisine maruz sülfata dayanıklı çimentonun bir kısmı doğal puzolanla ikame edilerek üretilen harçların performansı normal harçlara göre daha iyi olmaktadır (Irassar vd., 2000).

Silis dumanı, uçucu kül ve normal çimento birlikte kullanılarak üretilen betonlar sodyum sülfat etkisine karşı iyi performans göstermektedir (Thomas vd., 1999). Betonda kullanılan uçucu küldeki CaO miktarı da betondaki sodyum sülfat hücumunu etkilemektedir. Düşük CaO içeriğine sahip uçucu kül katkılı betonlar sodyum sülfat etkisine karşı daha dayanıklıdır ve daha az hacim artışı yaratmaktadır (Irassar vd., 2000).

Omar yapmış olduğu çalışmada değişik türde çimento, silis dumanı, uçucu kül ve yüksek fırın cürufu kullanarak betonlar hazırlayıp bunların sülfatlı ortamdaki davranışlarını inceledi (Al-Amoudi, 2002). Uçucu kül ve yüksek fırın cürufu ile üretilen betonların sodyum sülfat etkisine karşı performanslarının iyi olduğunu gözlemledi . Bunun nedenini uçucu kül ve yüksek fırın cürufunun betondaki portlanditi (CH) bağlayarak C-S-H yapısına çevirmesi sonucu, dış kaynaktan gelen sülfat iyonunun ortamda yeteri miktarda CH bulanmayışından dolayı hacim artışına neden olan gecikmiş etrenjitin fazla miktarda oluşmamasına bağladı (Al-Amoudi, 2002).

Cürufu portland çimentosu kullanılması durumunda normal çimentolara göre betondaki alkali sülfat etkisi zararları azalır. Sodyum sülfat etkisinde cürufu portland çimentolu betonlarda çatlamaya ve yumuşamaya rastlanmadığı halde normal çimentoyla üretilen betonlarda çatlak, parçalanma ve daha fazla hacim artışına rastlanmıştır (Skalny vd., 2002).

Kullanılan çimento tipi sodyum sülfat hücumunda etkilidir (Skalny vd., 2002). Düşük C₃A'ya sahip çimentolarla üretilen betonların sodyum sülfat etkisine karşı dirençli olduğu görülmektedir (Irassar vd., 2000; Thomas vd., 1999; Al-Amoudi, 2002; Santhanam vd., 2001; Nehdi ve Hayek, 2005)

Çimentodaki C₃A miktarının düşük olması hidrasyon sırasında daha az monosülfatın oluşmasına neden olduğundan sodyum sülfattan gelen sülfat iyonları daha az etrenjit oluştururlar. Bu durum, betonda etrenjit oluşumuyla meydana gelecek hacim artışının azalmasına neden olur. Yüksek miktarda C₃S'a sahip çimentolarla üretilen betonlar sülfat etkisinde erken bozulmaktadırlar (Irassar vd., 2000; Monterio ve Kurtis, 2003).

Sodyum sülfat çözeltisinin konsantrasyonu arttıkça betonda bozulmalar artmaktadır (Irassar vd., 2000; Thomas vd., 1999; Al-Amoudi, 2002).

Çözeltinin konsantrasyonu sülfat atağıyla oluşan ürünlerin miktarını da değiştirmektedir. Düşük konsantrasyondaki sodyum sülfat atağında ($< 1000 \text{ ppm SO}_4^{2-}$) ilk oluşan ürün etrenjittir. Konsantrasyon arttıkça ($>8000 \text{ ppm SO}_4^{2-}$) oluşan ana ürün alçıtaşıdır. Orta konsantrasyon değerlerinde ise ($1000-8000 \text{ ppm SO}_4^{2-}$) etrenjit ve alçıtaşının her ikisine birden rastlanmaktadır (Santhanam vd., 2001).

Betonun su/çimento oranındaki artış permeabiliteyi artırmaktadır. Permeabilitesi fazla olan betonlara dış ortamdan sülfat girişi kolay olduğundan sülfat etkisi, permeabilitesi düşük betonlara göre daha etkilidir (Brown ve Hooton, 2002). Bu bakımdan betonun geçirimsizliği dış kaynaklı sülfat etkisinde birinci derecede öneme sahiptir (Skalny vd., 2002).

Beton üretimi sırasında kullanılan silis dumanı, yüksek fırın cürufu, uçucu kül ve doğal puzolanlar sodyum sülfat etkisine karşı betonun performansını etkilemektedir. Silis dumanı ve yüksek fırın cürufu katkılı olarak üretilen betonlar sodyum sülfat etkisine karşı yüksek direnç göstermektedir (Al-Amoudi, 2002). Silis dumanı, uçucu kül ve normal portland çimentosu birlikte kullanılarak üretilen betonlar da sodyum sülfat etkisine karşı iyi performans göstermektedir (Thomas vd., 1999). Düşük C_3A 'ya sahip portland çimentosuyla doğal puzolan katkılı olarak üretilen betonda CH miktarında azalma olduğundan sodyum sülfat etkisine karşı betonun performansı iyileşme göstermektedir (Irassar vd., 2000). Kireç filleri katkılı betonun sodyum sülfat etkisine karşı direnci azalmaktadır (Irassar vd., 2000). %25 ile %45 oranında uçucu küle düşük C_3A 'ya sahip portland çimentosuyla hazırlanan betonların sodyum sülfat etkisine karşı dirençleri artmaktadır (Monterio ve Kurtis, 2003; Santhanam vd., 2001). Uçucu kül katkısı zaman içinde sodyum sülfat etkisi ile oluşan hacim artışını azaltmaktadır (Monterio ve Kurtis, 2003). Sodyum sülfat etkisinde silis dumanı, F tipi uçucu kül, yüksek fırın cürufu kullanımı betonun genişmesini azaltmaktadır (Nehdi ve Hayek, 2005).

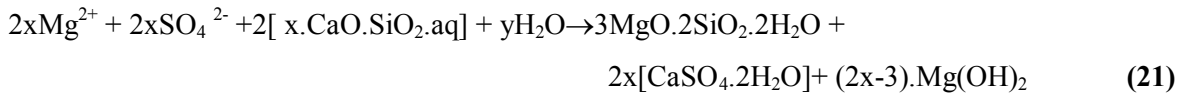
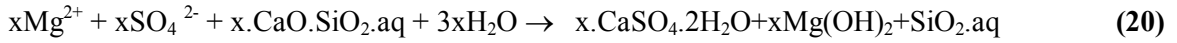
Beton üretiminden sonra uygulanacak uygun kür meydana gelebilecek çatlak türü oluşumlarını önleyeceğinden sülfat etkisine karşı betonun performansı artar.

1.4.2.2.2. Magnezyum Sülfat ($MgSO_4$) Etkisi

Betona giren magnezyum sülfat ilk olarak kalsiyum hidroksit ile reaksiyona girerek brusit ve alçıtaşı oluşturur.



Bu reaksiyon sonucu oluşan brusit ($Mg(OH)_2$) suda çözünürlüğü az olan bir ürün olup betondaki boşlukları doldurarak geçirimsizliğin azalmasına neden olur. (19) nolu ifadedeki kalsiyum sülfat ise çözünebilen bir üründür. Magnezyum sülfat atağına maruz betonda yüzeyde ve yüzeye yakın kısımda alçıtaşı tabakası oluşur (Bonen ve Cohen, 1992). Betondaki kalsiyum hidroksitin sülfat etkisi ile tükenmesi durumunda reaksiyon için gerekli Ca^{2+} iyonu C-S-H jellerinden sağlanmaya başlanır. C-S-H jelinde dekalsifikasyonun başlaması C-S-H jellerinin amorf hidrit silikaya ($SiO_2.aq$) veya zayıf kristal yapıya sahip magnezyum silika hidrata ($M_3S_2H_2$) ya da her iki ürüne birden dönüştürür. Bu ürünler yanında reaksiyon ilave alçıtaşı, brusit ve magnezyum silika hidrat oluşturur (Skalny vd., 2002).



(20) ve (21) nolu reaksiyonlar sonucunda C-S-H jelinin C/S oranında azalma olur. C/S oranı reaksiyonun ilk safhalarında betonun iç kısımlarında yüksek dış kısımlarında düşüktür. Magnezyum sülfat etkisi sürekli olarak devam etmesi durumunda C-S-H'daki Ca^{2+} iyonlarının Mg^{2+} iyonlarıyla tamamı yer değiştirerek yapıdaki C/S oranı sıfıra düşer (Skalny vd., 2002).

Magnezyum sülfatın betona etkisinde C-S-H'nin bozulması diğer sülfat etkilerinden daha hızlı olur. Magnezyum hidroksitin normal sıcaklıktaki çözünürlüğü yalnızca 0,01 g/lt'dir. Bu durum doymuş çözeltinin pH değerinin 10,5 değerinde olmasını sağlar. Bu seviyedeki pH değeri C-S-H'nin stabilitesini sürdürmesi için çok düşüktür. Serbest kalsiyum hidroksitin tamamının tükenmesinden sonra ortamın pH değerini dengelemek için C-S-H kalsiyum hidroksit üretmeye başlar. Bu kalsiyum hidroksit ortamda magnezyum sülfat olduğu sürece üretilmeye devam eder. Böylece betonun C-S-H yapısı magnezyum silika hidrata, brusite ve alçıtaşına dönüşür. Magnezyum sülfat etkisi ile pH değerinin çok düşmesi durumunda kalsiyum alüminat sülfat (CAS) kısımlarda da bozulma olur. CAS'deki Ca^{2+} ve SO_4^{2-} iyonları yapıdan ayrılır (Skalny vd., 2002).

Magnezyum sülfatın betona etkisi ile hidroksit iyonları yüzey kısımlara hareket ederek çözünmeyen brusit ve sülfat iyonları betonun iç kısımlarına hareket ederek alçıtaşı ve az miktarda da etrenjit oluşturur. Betonun dış yüzeyinde brusit ve bunun hemen altında alçıtaşı tabakası olmak üzere iki tabaka oluşur (Skalny vd., 2002).

Magnezyum sülfat etkisinde betonda kullanılan silis dumanı, uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve doğal puzolan gibi katkı maddeleri etkili olmaktadır. Omar çalışmasında sodyum sülfat etkisinde betonun direncini artıran silis dumanı ve yüksek fırın cürufunun magnezyum sülfat etkisinde betonun direncini azalttığını belirtti (Al-Amoudi, 2002). Kullanılan mineral katkıları betondaki CH'i tükettiğinden betona nüfuz eden magnezyum sülfat doğrudan C-S-H jeli ile reaksiyona girmektedir. Bu etkileşim nedeniyle magnezyum sülfat etkisinde katkılı çimentoyla üretilen betonlar normal çimentolu betonlardan daha kötü performans göstermektedir (Al-Amoudi, 2002). Santhanam, Cohen ve Olek (2001) magnezyum sülfat etkisinde üretilen betonda optimum miktarda kullanılan katkının betonun permeabilitesini azaltacağını ve bu şekilde betonun magnezyum sülfat atağına karşı direncinin artacağını belirtmektedir.

Biczok (1967) çalışmasında magnezyum sülfat konsantrasyonunun, oluşan ürünlerin miktarını etkilediğini belirtti (Santhanam vd., 2001). Düşük magnezyum sülfat konsantrasyonunda (<4000 ppm SO_4^{2-}) daha çok etrenjit oluşurken, orta magnezyum sülfat konsantrasyonunda (4000-7500 ppm SO_4^{2-}) etrenjit ve alçıtaşı birlikte oluşmakta ve yüksek konsantrasyonda (>7500 ppm SO_4^{2-}) magnezyumun neden olduğu bozulmanın etkin olduğu görülmektedir.

1.4.2.2.3. Betonda Sodyum Sülfat ve Magnezyum Sülfat Etkisinin Karşılaştırılması

Magnezyum sülfat ve sodyum sülfat etkisinde betonda ortak oluşan ürünler alçıtaşı, etrenjit ve tomasittir. Bu üç ürünün de betondaki bozucu etkisi hacim artışıyla çatlak oluşması, beton yüzeyinde pullanma ve adezyon kaybıdır (Collepari, 2003; Skalny vd., 2002). Sodyum sülfat etkisinde betonda sodyum hidroksit ürünü de oluşmaktadır. Oluşan bu sodyum hidroksit hidrate olmuş çimentonun pH değerinin yükselmesine ve yaklaşık olarak 13,5 değerine ulaşmasına sebep olur. pH değerinin yükselmesi C-S-H'nın ve etrenjitin kararlılığını sağlar. Sodyum sülfatın betona etkisiyle oluşan sodyum hidroksit bozulmaları önleyici etki yapar (Al-Amoudi, 2002). Magnezyum sülfat atağında betonda brusit, hidrate silika (SiO_2) ve magnezyum silika jeli de oluşmaktadır. Oluşan brusit betonun yüzeyine yakın bölgede biriktiğinden ve çözünürlüğünün az olmasından betonun geçirimsizliğini azaltarak sülfat etkisine karşı direncini artırmaktadır (Skalny vd., 2002; Al-Amoudi, 2002). Magnezyum sülfat etkisinde Mg^{2+} iyonunun Ca^{2+} iyonu ile kolayca yer değiştirerek betondaki C-S-H yapısı M-S-H yapısına dönüşebilmektedir. Oluşan M-S-H

betonun adezyonunu kaybettirdiği için magnezyum sülfat etkisinin sodyum sülfat etkisinden daha etkili olduğu belirtilmektedir (Skalny vd., 2002).

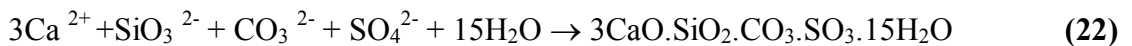
Brown ve Hooton (2002) çalışmasında iki farklı su/çimento oranına sahip normal portland çimentosu ve sülfata dayanıklı portland çimentosuyla hazırlanan numuneleri yaklaşık 21 yıl sodyum sülfat ve magnezyum sülfat çözeltilerinde beklettikten sonra elektron mikroskopuyla inceledi ve oluşan ürünleri spektral analizle teşhis etti. Bu çalışmada sodyum sülfat etkisinin betondaki yıpratıcı etkisinin daha fazla olduğunu belirtti. Bunun nedenini magnezyum sülfat etkisinde oluşan brusitin betonun geçirgenliğinde yapmış olduğu azalmaya bağladı. Bazı araştırmacılar da magnezyum sülfat etkisinde magnezyum iyonundan dolayı betonun C-S-H yapısındaki bozulmalardan dolayı magnezyum sülfat etkisinin sodyum sülfat etkisine göre daha bozucu olduğunu söylemektedirler (Rasheeduzzafer ve Al-Amoudi, 1994, Türker vd., 1997).

Silis dumanı, yüksek fırın cürufu uçucu kül ve doğal puzolanların betonun sodyum sülfat etkisine karşı direncini artırdığı ancak bu katkıların betondaki CH'i C-S-H yapısına çevirdiği için magnezyum sülfat etkisinde sülfat iyonunun direkt betonun C-S-H yapısıyla reaksiyona girmesini sağladığından betonun magnezyum sülfat etkisine karşı direncini azaltmaktadır (Al-Amoudi, 2002). Kullanılan bu tür katkıları betonun boşluk yapısında azalmaya sebep olmakta ve böylece permeabiliteyi azaltmaktadır. Magnezyum sülfat etkisine maruz betonda kullanılan optimum miktardaki katkı dayanımı artırır (Santhanam vd., 2001).

1.4.2.3. SiO₂ ve CO₂ Mevcudiyetinde Sülfat Etkisi

Sülfat etkisine maruz portland çimentosuyla üretilen betonlarda ortamda yeterli miktarda sülfat ve karbonat iyonunun olması durumunda tomasit oluşabilir. Düşük sıcaklıklarda ve pH değerinin 10,5 seviyelerinde tomasit oluşumu daha fazladır (Skalny vd., 2002; Collett vd., 2004; Crammond, 2003).

Tomasit [Ca₃[Si(OH)₆].CO₃.SO₄.12H₂O], 3CaO.SiO₂.CO₃.SO₃.15H₂O veya C₃S $\overline{\text{CS}}$ H₁₅ yapısında meydana gelebilir.



Tomasit oluşumunda ana etken dış kaynaklı sülfat etkisidir (Skalny vd., 2002). Beton üretimi sırasında karbonat içerikli agrega kullanımı ile iç kaynaklı sülfat etkisiyle de tomasit oluşabilir fakat bu durum çok nadirdir (Skalny vd., 2002). Sülfatlı yeraltı sularına

maruz toprağa gömülü betonlarda sıkça tomasite rastlanmaktadır. Tomasit oluşumunda gerekli karbonat iyonu çoğunlukla karbonat içerikli agregalardan sağlanmaktadır. Beton üretiminde dolomitik kireçtaşı ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) veya kireçtaşı (CaCO_3) içerikli agregalar kullanılması durumunda tomasit oluşumu için gerekli CO_3^{2-} sağlanmış olur. Karbonat iyonu çimentonun atmosferdeki CO_2 ile oluşturduğu kalsiyum karbonattan veya yeraltı suyundaki yüksek konsantrasyonlu çözünmüş olarak bulunan $\text{CO}_2/\text{HCO}_3^-$ dan sağlanabilir. Beton karışımında CaCO_3 bulunması durumunda tomasitin oluşması daha yaygın ve hızlıdır. Tomasit oluşumu için C-S-H kısmından gelen silikat iyonlarının bulunması gerekmektedir. Tomasit oluşumundaki silikatın (SiO_3) ana kaynağı C-S-H'dir. Bu durumda betondaki C-S-H'nin bozulmasına yol açmaktadır. Silikat beton üretimi sırasında hidrate olmayan C_3S veya C_2S 'den de karşılanabilir. Kireçtaşı fillerinin betonda bulunması tomasit oluşumunu hızlandırır (Crammond, 2003). Tomasit yapısında Al_2O_3 bulundurmamasına rağmen az miktardaki alümin iyonu tomasitin oluşmasına neden olabilmektedir (Skalny vd., 2002). Betonda kireçtaşı ve karbonat agregaları tomasit oluşumu için en baskın karbonat kaynağıdır (Collett vd., 2004). Ancak tomasit oluşumu için bu tek kaynak değildir. Beton bünyesinde hiç karbonat iyonu bulunmasa da yeraltı suyu gibi kaynaklardan tomasit oluşumu için karbonat iyonu karşılanabilir (Collett vd., 2004). Havadaki karbondioksidin betonda bikarbonat iyonları ile reaksiyonu sonucu tomasit oluşumu için gerekli karbonat iyonu temin edilebilir (Crammond, 2003; Collett vd., 2004).

Crammond (2003) etrenjitin tomasite dönüşerek tomasit oluşabileceğini belirtmiştir. Benzer şekilde Brown ve Hooton (2002) çalışmasında etrenjitin tomasite dönüşebileceğini belirtmiştir. Bu dönüşümle ilgili mekanizmayı Crammond (2003), yapıları birbirine benzeyen etrenjit ve tomasitte $[\text{Al}]$ ile $[\text{Si}]$, $[\text{SO}_4^{2-} + \text{H}_2\text{O}]$ ile $[\text{CO}_3^{2-} + \text{SO}_4^{2-}]$ topokimyasal olarak dönüşümlere girerek etrenjit tomasite dönüşebilir şeklinde açıklamıştır (Crammond, 2003). Tomasit oluşumu için etrenjit katalizör olarak kullanılır. Tomasit çekirdek oluşumunu tamamladıktan sonra alümin iyonu çözeltiliye geri döner. Tomasit bundan sonra çevreden sağladığı iyonlarla oluşumuna devam eder.

Tomasit oluşumu, gerekli iyonların sağlandığı, ortamın soğuk ve pH değerinin 10,5 'in üstünde olduğu sürece devam eder. Sülfat etkisinde etrenjit ve tomasit oluşumu için kalsiyum gereklidir. Bu gerekli kalsiyum sülfat etkisinin ilk zamanlarında portlanditten, sonraları ise C-S-H kısmından sağlanmaktadır (Crammond, 2003). C-S-H'deki dekalsifikasyon neticesinde betonun gözenek çözeltisinin 13 olan pH değeri azalarak nötr değer olan 7'ye gelmeye başlar. Eğer pH değeri 10,5 değerinin altına düşerse tomasit

oluşumu durur ve C-S-H'da magnezyum iyonu ve alkali karbonat hareketleri başlar. Sülfat atağındaki betonda pH değerinin 7 seviyelerine düşmesi durumunda tomasit stabil kalmaz. Kalsit gibi kalsiyum bulunduran ürünler oluşmaya başlar. Oluşan kalsit 100 mikron çapında kalın kristal kümeler şeklinde oluşur. Bu oluşan ürünün de tomasit gibi bağlayıcı özelliği yoktur. Nemli şartlara maruz betonlardaki bu kalsit oluştuğu bölgenin yapısını bozarak betonda bozulmalara sebep olur. Bu şekilde oluşan kalsite terminolojide kornflake kalsit, popkorn kalsit veya ikincil kalsit denilmektedir. Popkorn kalsit oluşumu tomasit oluşumunun bittiğini gösterir. Popkorn kalsitin oluşmasıyla sülfat iyonları tekrar gözenek çözeltisine dönerek betonun pH değerinin yüksek olduğu bölgelerde tekrar sülfat atağını tetikler (Crammond, 2003).

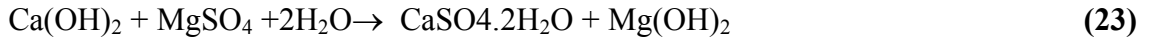
Tomasit oluşumu düşük sıcaklıklarda özellikle 5°C'de en çoktur. Sıcaklık arttıkça tomasit oluşum hızı da yavaşlar. Tomasit etrenjitten önce veya etrenjitle birlikte oluşabilir (Skalny vd., 2002). Tomasit yapısal olarak etrenjite benzemektedir (Crammond, 2003). Günümüzde X ışınları difraksiyonu (XRD) ve tarayıcı elektron mikroskobu (SEM) ile tomasit teşhisi yapılmaktadır. Tomasit ve etrenjit kimyasal yapıları birbirine çok benzer olmalarından dolayı ayırt edilmeleri zordur. XRD ile tomasit ve etrenjitin birbirinden ayırt edilmesi oldukça güçtür (Thomas vd., 2003; Yang ve Buenfeld, 2000).

Tomasitin oluşumunda C-S-H kısmındaki bozulmalar ana rol oynar. Bu durum betonun bağlayıcılık özelliğinin azalmasına ve beyaz görünümlü çamurumsu bir yapıya dönüşmesini sağlar. Tomasit alüminli bileşenler bulundurmadığından, sülfata dayanıklı çimento kullanımı zararların azaltılması bakımından bir fayda sağlamaz. Yüksek fırın cürufu katkılı çimentolarla üretilen betonlar tomasite karşı betonun dayanımını artırır (Skalny vd., 2002). %70 granüle yüksek fırın cürufu ile %30 portland çimentosu ile üretilen betonlar tomasit oluşumuna karşı yüksek direnç göstermektedir. Düşük sıcaklıktaki laboratuvar çalışmaları kireçtaşı filleri katkılı çimentolarla üretilen betonlarda tomasit oluşumuna rastlamaktadırlar. Sülfata dayanıklı çimentolarla üretilen betonlarda iki yıla kadar tomasit oluşumunun az fakat bundan sonra altı yıl içinde normal çimentolarla aynı olduğu görülmektedir. Silis dumanı ve metakaolin katkılı normal çimentolarla üretilen betonların tomasit oluşumuna karşı oldukça dirençli olduğu söylenmektedir. Uçucu kül katkılı betonların, laboratuvar çalışmasında tomasit oluşumuna karşı iyi direnç gösterdiği fakat saha çalışmalarında aynı sonucun sağlanmadığı ifade edilmektedir (Crammond, 2003).

1.4.3. Betona Deniz Suyu Etkisi

Deniz suyunda değişik türde ve miktarda tuzlar bulunmaktadır. Bu tuzların beton bünyesine girmesiyle, çimento hidratasyon ürünleriyle kimyasal reaksiyonlara girerek yeni ürünler oluştururlar. Deniz suyuna maruz betonda kimyasal reaksiyonlar yanında dalga ve gelgit hareketleriyle suda asılı halde bulunan kum veya buz parçaları gibi maddelerin çarpması ile beton yüzeyinde aşınma ve erozyon gibi fiziksel bozulmalar da meydana gelir. Deniz suyunda bir diğer fiziksel bozulma mekanizması da tuz kristalleşmesidir. Özellikle ıslanma-kuruma çevrimlerine maruz betonda deniz suyunun betona girmesi daha sonra saf suyun betondan buharlaşma yoluyla uzaklaşması sonucu biriken tuzların kristalleşmesi hacim artışı meydana getirmektedir. NaCl kristalleşmesi sırasında 0°C de 554 atmosfer, 50°C de 654 atmosfer basınç oluşur (Akman, 1992). Beton boşluklarındaki bu iç basınç hasar oluşturabilir. Sodyum sülfat gibi sülfat tuzları da kristalleşme sonucu betonda NaCl kristalleşmesine benzer etkiler gösterebilirler. Denizdeki klor iyonunun diğer bir olumsuz etkisi beton içindeki donatı üzerinde olmaktadır. Klor iyonları donatıya ulaşması sonucu donatıda korozyona neden olmaktadır. Korozyon sonucu beton içinde hacim artırıcı ürünler oluşur. Oluşan bu ürünler betonda çatlamalara neden olabilmektedir (Neville, 2003). Ancak deniz suyu, betonda genişleme esaslı hasarlara nadiren sebebiyet verir (Arslan, 2001).

Deniz suyundaki sülfatların betondaki etkisi dış kaynaklı sülfat atağına benzerdir. Denizdeki klor iyonunun bozucu etkisiyle sülfat etkisinin birleşmesinin betonda daha yıkıcı etki oluşturabileceği düşünülse de gerçekte durum böyle değildir. Betona giren deniz suyundaki magnezyum sülfat çimento hidratasyon ürünlerinden kalsiyum hidroksitle reaksiyonu sonucu alçıtaşı ve brisit oluşturur (Akman, 1992). Magnezyum sülfat, hidratasyon ürünlerinden C-S-H ve kalsiyum alüminatlarla da reaksiyonlara girmektedir (Akman, 1992; Neville, 2003).



Oluşan brisit çözünürlüğü az olan bir madde olup beton yüzeyine yakın kısımlarda birikerek buradaki beton boşluklarını doldurup geçirimsizliği düşürerek deniz suyunun betona girmesini azaltır. Betondaki Ca(OH)_2 ile CO_2 reaksiyonu sonucu beton yüzeyinde aragonit adı verilen CaCO_3 tabakası oluşur. Bu tabaka 20 ile 50 mikron kalınlığında

oluşabilir. Aragonit tamamen deniz suyuna gömülü betonlarda da oluşabilir (Neville, 2003). Yüzeyde biriken aragonitte brusit gibi betonun permeabilitesini azaltarak betonun içerisine deniz suyunun girişini azaltır.

Betonda sülfatların etkisiyle oluşan hacim artırıcı ürünler alçıtaşı ve etrenjit, deniz suyundaki klor iyonunun etkisiyle çözünerek beton içerisinden dışarıya sızar. Böylece alçıtaşı ve etrenjitin genleşmesi sonucu çatlak oluşumu önlenmiş olur. Deniz suyuna gömülü betonlarda bu tür çatlak oluşumuna rastlanmamaktadır (Akman, 1992; Neville, 2003). Tamamen deniz suyuna gömülü betonlarda bozulma, yumuşama ve çözünme şeklindedir (Akman, 1992). Tamamen deniz suyuna gömülü betonlarda difüzyon yolu ile betona iyon girişinin azalmasından dolayı da ıslanma–kuruma çevrimine maruz betona göre bozulmalar daha azdır (Neville, 2003).

Deniz suyuna maruz betonlarda en yoğun bozulma su seviyesinde yani dalga ve gelgit olayının etkili olduğu bölgede rastlanmaktadır (Akman, 1992; Martin ve Firlotte, 1995). Dalga hareketleri, süprüntü maddelerinin oluşturduğu erozyon, donma–çözünme ve alkali agrega reaksiyonlarını artırır (Akman, 1992). Bu bölgedeki yüzey yıpranması ve erozyon ile aragonit ve brusit tabakasının ortadan kaybolmasıyla magnezyum ve sülfat iyonlarının betona girişi kolaylaşmakta ve kimyasal bozulmalar hızlanmaktadır (Neville, 2003).

Deniz suyunun kimyasal etkisi, içerisinde çözünmüş tuz miktarına göre artar (Neville, 2003). Bazı denizlerdeki tuzluluk oranları şöyledir. Baltık denizi %0,7, Kuzey denizi %3,5, Atlantik ve Hint Okyanusu %3,6, Akdeniz %3,9, Kızıl deniz %4, Arap Gulflarında %4,3 değerindedir (Neville, 2003). Denizlere göre tuzluluk oranı değişmekle birlikte, aynı deniz sularındaki tuzluluk oranları arasında fazla fark olmamaktadır. Dünyanın % 80'nin deniz olması nedeniyle çok sayıda beton yapı denize maruz kalmaktadır. Bu bakımdan betona deniz suyu etkisi önem arz etmektedir. Ülkemiz denizlerindeki iyon konsantrasyonu aşağıda tabloda verilmiştir.

Tablo 1. Türkiye denizlerinde iyon konsantrasyonları

Deniz	Yöre	Toplam Salinite (%)	Mg ²⁺ (mg/l)	SO ₄ ²⁻ (mg/l)	Cl ⁻ (mg/l)	Na ⁺ (mg/l)	Ca ²⁺ (mg/l)
Karadeniz	Zonguldak	1,7	630	1270	8400	5260	250
Marmara	Erdek	2,6	960	1940	12840	8050	380
Ege	Ayvalık	3,8	1400	2830	18770	11770	560
Akdeniz	Bodrum	3,9	1440	2900	19270	12080	580

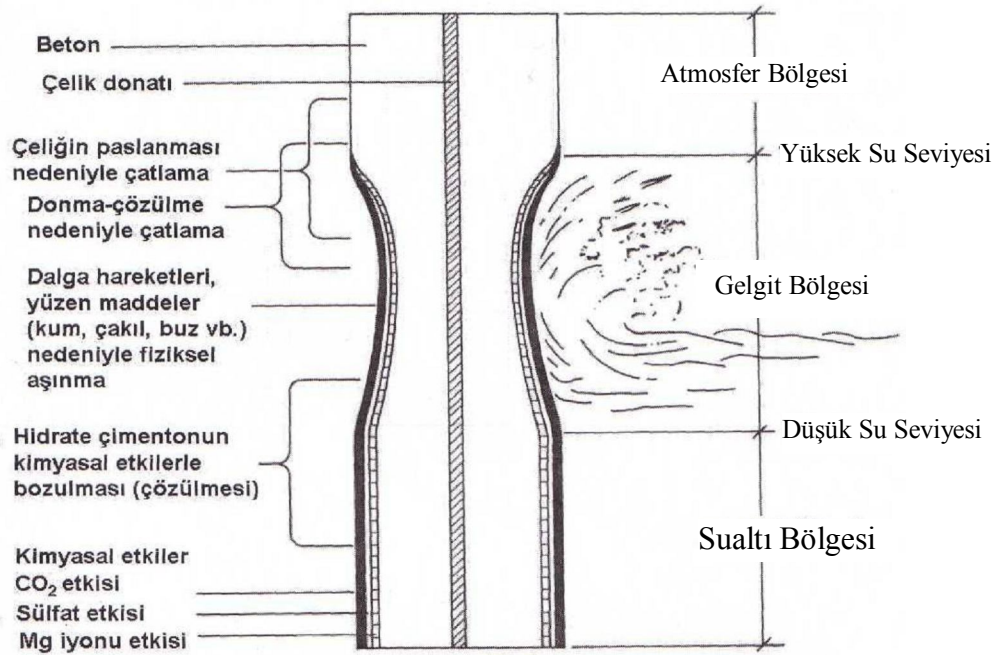
Tablodaki değerlerden görüldüğü gibi Karadeniz ve Marmara denizlerinin tuzluluk oranı dünya ortalaması kabul edilen %3,5 değerinin altında, Ege ve Marmara denizlerinin tuzluluk oranı ise dünya ortalamasının üstündedir (Akman, 1992).

Deniz suyu pH değeri 7,5 ile 8,4 arasında değişir. Havadaki CO₂ ile dengelenmiş değer ortalaması 8,2'dir. Betona giren deniz suyu, betonun boşluk suyunun pH değeri 12'nin altına düşmediği sürece tehlikeli değildir (Neville, 2003).

Sıcaklığın etkisiyle buharlaşmanın fazla olduğu bölgelerdeki betonlarda kılcallık etkisiyle suyun betonun temas etmediği bölgelere yükselmesi ve suyun buharlaşmasıyla, bu bölgelere tuz birikmektedir. Bu biriken tuz kristalleşerek betonda hacim artışı meydana getirir. Bu hacim artışı sonucu beton yüzeyinde pullanmalar; çimento hamuru ve ince agregada ayrılmalara sebep olur (Akman, 1992).

Deniz suyunun betona etkisi sadece betonla suyun temas halinde olduğu yerlerde oluşmamaktadır. Sabah akşam ısı farklılığının yüksek olduğu, ısının ve buharlaşmanın fazla olduğu bölgelerde rüzgâr yoluyla tuzların taşınıp beton yüzeylerde çığ şeklinde biriken suyla birleşerek beton içerisine sızması, havanın ısınmasıyla suyun tekrar buharlaşmasıyla betonda tuz birikmesi şeklinde de etki yapabilmektedir. Denizden uzak yerdeki betonlara da deniz suyu etkisi oluşabilir. Betonda tuz kristalleşmesi kabarmalar neticesinde çimento hamurunun ve ince agreganın koparak yapıdan ayrılmasına neden olabilir (Neville, 2003).

Deniz suyuna maruz beton yapılar üç bölgeye ayrılabilir (Şekil 10). Bunlar atmosfer bölgesi, dalga hareketi bölgesi ve gömülü bölgedir.



Şekil 10. Deniz suyuna maruz bir betonarme yapının bozulma mekanizması

Deniz suyunun kimyasal korozyonuna karşı alınacak ilk tedbir çimento türünün seçimidir (Akman, 1992). Deniz suyuna maruz betonda kimyasal etki tek değildir. Betona klor etkisinin azaltılması açısından C_3A miktarı yüksek çimento kullanılması faydalıdır. C_3A ile Cl^- iyonları reaksiyona girip kloralüminat tuzu meydana getirerek klor iyonları tutulmuş olur. Ancak C_3A miktarı yüksek olan çimentoların sülfat atağına karşı zayıf oldukları bilinmektedir. Böyle çimentoların kullanıldığı betonlarda sülfat iyonlarının etkisiyle kimyasal reaksiyonlar sonucu alçıtaşı, etrenjit ve tomasit türü ürünler oluşarak sertleşmiş betonun hasar görmesine neden olmaktadır. Bu bakımdan deniz suyuna maruz betonda kullanılacak çimento tipinin birçok etkinin düşünülerek belirlenmesi gerekir.

Deniz suyunun betona kimyasal etkisinde en önemli faktör betonun geçirimliliğidir. Geçirimliliği az beton düşük su/çimento oranıyla sağlanabilir. Geçirimliliği az beton üretimi için su / çimento oranının 0,45'in altında tutmak gerekir (Akman, 1992).

Deniz suyuna dayanıklı beton üretimi için yapılan çalışmalarda çimento ana bileşenlerine sınırlamalar getirildiği görülmektedir. Fazla $Ca(OH)_2$ oluşumuna yol açan C_3S miktarını kısıtlayarak deniz yapıları için aşağıda verilen Sadran formülü önerilmektedir (Irassar vd., 2000).

$$C_3A + 0,27C_3S < \%23,5 \quad (25)$$

Deniz suyunda sülfat bulunmasından dolayı sülfata dayanıklı çimentolar kullanılabilir. Sülfata dayanıklı çimentolarda C_3A miktarı %5 ile sınırlandırılmıştır. Bu durum sertleşmiş betonda sülfat girişiyle alçıtaşı, etrenjit ve tomasit oluşumlarında azalma sağlayacaktır. Ancak deniz yapıları için sülfata dayanıklı çimento kullanımı şart değildir. C_3A miktarı %8 ve SO_3 miktarı %3'ten az olan çimento kullanımı tavsiye edilmektedir. C_3A miktarının %10'nu aşması durumunda SO_3 miktarı %3'ü aşmamalıdır (Neville, 2003). SO_3 miktarının bu değerleri aşması sonradan hacim artışı meydana getirir.

Deniz ortamındaki betonlar hem sülfat hemde klorid iyonu atağına maruzdur. Katkılı portland çimentoları puzolanik reaksiyonlar sonucu CH kalsiyum silikat ve alüminyum silikat hidratlara dönüştüğünden kimyasal dirençleri yüksektir. Bu reaksiyonlar betondaki boşlukların dolmasına ve daha kararlı bir yapının ortaya çıkmasına yol açar. Bu yüzden katkı çimentolar belli bir süre sonra sülfat ve klorid atağına karşı betonun dayanıklılığını artırır. Deniz suyuna maruz betonlarda %30 oranına kadar yüksek fırın curufu ilavesi beton dayanıklılığını artırmaktadır (Abd El Aziz, vd., 2005). Uçucu kül deniz suyuna maruz betonda sülfat ve klorid difüzyonunu azaltmaktadır (Göktepe vd., 2006). Deniz suyunun gelgit bölgesindeki silis dumanı ve yüksek fırın cürufu katkı betonlar, mineral katkısız betonlara göre daha iyi performans göstermektedirler (Ganjian ve Pouya, 2005).

2. DENEYSEL ÇALIŞMA

Gerçekleştirilen deneysel çalışmada mineral katkı maddeleriyle üretilen betonların sülfat ortamındaki performansları araştırıldı. Bu çerçevede silis dumanı, uçucu kül ve yüksek fırın cürufu ilaveli üç seri beton üretildi. Karşılaştırma yapmak amacıyla mineral katkı içermeyen beton numuneler de üretildi. Toplam 250 adet 15 cm küp beton numune sırasıyla sodyum sülfat çözeltisinde, magnezyum sülfat çözeltisinde, deniz suyunda ve musluk suyunda saklandı. Sülfat etkisine maruz beton numunelerin belli zaman aralıklarında basınç mukavemetleri, yüzey sertlikleri ve ultrases değerleri ölçüldü.

Deney programı çerçevesinde aynı zamanda harç numuneler de üretilerek 5°C, 40°C ve oda sıcaklığında %2 MgSO₄ çözeltisinde tutuldu. Belli zaman aralıklarında numuneler üzerinde eğilme deneyi uygulandı. Numunelerde meydana gelen çatlak oluşumu ile numunelerin yüzeylerinde meydana gelen bozulmaya ilişkin kayıplar sürekli bir biçimde gözlemlendi. Taramalı elektron mikroskopuyla 21 ay süreyle farklı sıcaklıkta tutulan harç numuneler üzerinde mikro yapısal incelemeler gerçekleştirildi.

2.1. Çalışmanın Gerekçesi ve Amacı

Beton, yapı endüstrisinde en çok kullanılan malzemelerinden biridir. Betonun bu denli yaygın kullanılması, yapı malzemesinin sürekli gelişmesine neden olmaktadır. Betonu geliştirmek için yapılan çalışmaların başında dayanıklılık problemi gelmektedir. Beton servis ömrü süresince fiziksel, kimyasal, elektro-kimyasal ve biyolojik bozulma mekanizmalarının etkisi altında kalır. Betonun bu mekanizmalara karşı göstereceği direnci artırmak için beton dizaynı sırasında alınacak tedbirler önem taşımaktadır. Betonun hizmet sunacağı çevre şartlarına göre, su/çimento oranındaki düzenleme, uygun çimento tipi ve miktarı, uygun agrega kullanımı gibi unsurlar dayanıklılık üzerinde etkilidir. Betonun dayanıklılığını artıran bir diğer unsur da mineral katkı kullanımınıdır. Bozulma mekanizması çeşidine göre en uygun mineral katkının tespiti ise bu alanda bilimsel çalışmaların yapılması gerektiğini doğurmaktadır.

Günümüzde üretilen betonlarda puzolanik katkı maddesi kullanımı oldukça yaygındır. Puzolanik katkıları betona ya doğrudan ya da katkı çimento kullanılması sonucu katılmaktadır. Puzolanik maddelerin betona sağladığı faydalardan en önemlisi beton performansındaki iyileştirme. Silis dumanı, uçucu kül ve yüksek fırın cürufu betonda en

yaygın kullanılan puzolanik maddelerdir. Bu maddeler homojen bir yapıya sahip değildir. Kimyasal bileşimlerinde oldukça fazla bileşik vardır. Aynı tip mineral katkı bileşik oranları da farklılık göstermektedir. Bu farklı mineral katkıların beton üzerindeki etkileri de farklı olmaktadır. Sülfat gibi kimyasal maddelere maruz kalan betonlarda kullanılan mineral katkı türü ve miktarı da dayanıklılığı etkilemektedir.

Betona dış ortamdan gelen sülfat iyonu Na^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} gibi değişik birçok alkalilerle birlikte olmaktadır. Gerek çimentodan gerek mineral katkılardan ve gerekse sülfat tipinden dolayı oluşan reaksiyonlar betonun performansını etkilemektedir.

Yeryüzünde başlıca sülfat kaynakları deniz suyu, yeraltı suyu ve sülfatlı topraklardır. Bu üç kaynak oran olarak yeryüzünün büyük kısmını oluşturmaktadır. Bu bakımdan özellikle yapı temelleri sülfat etkisine sıkça maruz kalmaktadır. Bu çalışmanın gerekçesi sülfat etkisine maruz betonlarda mineral katkı kullanımının dayanıklılık üzerindeki etkisini belirlemektir. Bu maksatla Karadeniz suyunda, sodyum sülfat ve magnezyum sülfat çözeltisinde bekletilen uçucu kül ilaveli, silis dumanı ilaveli, yüksek fırın cürufu ilaveli ve mineral katkı içermeyen beton numunelerin belirli zaman aralıklarında basınç dayanımları, yüzey sertlikleri ve ultrases geçiş hızları ölçüldü. Betonun zaman içerisinde basınç dayanımındaki azalma dayanıklılık hakkında bizlere bilgi veren en önemli verilerden biridir. Ancak basınç dayanımı değişimi ile betonda meydana gelen bozulmaların tamamı hakkında bilgi edinilememektedir. Sülfat etkisi sonucu betonda yeni ürün oluşması sırasında çatlaklar meydana gelmektedir. Basınç dayanımı ölçülürken düşey yönde yapılan yükleme ile sonradan oluşan boşlukların sıkışması sonucu betonun basınç dayanımında yeterince değişim kaydedilememektedir. Bu yüzden ultrases ölçümleri boşluk yapısı gibi betonun içyapısı hakkında bilgi edinmemizi sağlamaktadır. Bu maksatla belirtilen ortamlardaki beton numuneler üzerinde ultrases deneylerinin de yapılmasına gerek duyulmuştur. Sülfat etkisindeki betonlarda bozulmalar ilk olarak yüzeyde ve yüzeye yakın bölgelerde olmaktadır. Sülfat etkisindeki beton yüzeyindeki bozulmaların tespiti içinde Schmidt çekici ile yüzey sertlikleri ölçülmüştür.

Harç numuneler beton numunelerle aynı özellikleri göstermemelerine rağmen beton hakkında bize genel bir bakış açısı kazandırmaktadır. Bu yüzden beton numunelerde sülfat etkisinden meydana gelen bozulmaların araştırılması için çalışmada harç numunelerden de faydalanılmıştır. Bu konuda yapılan araştırmalarda sülfat etkisindeki betonlarda yeni oluşan madde türleri ve miktarlarında sıcaklığın etkisinin olduğu belirtilmektedir. Özellikle 5°C 'de tomasit oluşumunun fazla olduğu, yüksek sıcaklıkların da gecikmiş etrenjit

oluşumunu etkilediği tespit edilen hususlardır. Bu yüzden bu araştırmada da 5°C, 40°C ve oda sıcaklığında ki harç numunelerde sülfat etkisinden dolayı meydana gelen değişimleri belirlemek için eğilmede çekme deneyi ile taramalı elektron mikroskopuyla mikro yapısal araştırma yapılmıştır.

Bu kapsamdaki araştırmalar çalışma süresini kısa tutmak amacıyla genellikle %5 ile %10 konsantrasyona sahip çözeltiler kullanarak 1 yıllık süre zarfında gerçekleştirilmektedir. Bu konsantrasyonlar doğada karşılaşılanlardan oldukça yüksektir. Betonun maruz olduğu sülfat konsantrasyonu kimyasal reaksiyonlar sonucu oluşan madde miktarını ve çeşidini etkilemektedir. Bu durum laboratuvar çalışmaları ile arazideki durum arasında çelişkiye yol açmaktadır. Bu bakımdan bu çalışmada daha gerçekçi sülfat konsantrasyonu belirlendi. Çözelti konsantrasyonunun düşük seçilmesinden dolayı çalışma iki yılda gerçekleştirildi.

Bu çalışmanın amacı %2 konsantrasyona sahip sodyum sülfat, magnezyum sülfat çözeltisi ile Karadeniz suyuna maruz silis dumanı, uçucu kül, yüksek fırın cürufu ilaveli betonların performanslarını araştırmaktır. Buna bağlı olarak magnezyum sülfat çözeltisine maruz bırakılan mineral katkı ilaveli harçlar ile mineral katkı içermeyen harçların da sıcaklığa bağlı olarak davranışları incelenmiştir.

2.2. Çalışmada Kullanılan Malzemeler

2.2.1. Agregata

Beton ve harç üretiminde kullanılan agregata Rize ilindeki bir beton santralinden temin edildi. Kullanılan iri agregata kırma taş, ince agregata ise doğal dere kumudur. Kullanılan agregata ait özellikler Tablo 2’de verilmektedir. Her bir agregata grubu iriden inceye doğru sırasıyla A, B, C ve D agregatası olarak isimlendirildi. D agregatası doğal yıkanmış dere kumudur.

Tablo 2. Beton üretiminde kullanılan agregalara ilişkin granülometrik değerler ve fiziksel özellikler

		Yüzde Geçen				
		A Agregası	B Agregası	C Agregası	D Agregası	Karışım Agregası
Elek Ebadı	31,5	100	100	100	100	100
	16	10	59	100	100	85
	8	1	1	56	100	64
	4	0	1	10	97	51
	2	0	0	5	70	36
	1	0	0	3	44	23
	0,5	0	0	2	22	12
	0,25	0	0	1	10	5
Özgül Ağırlık		2,73	2,73	2,72	2,62	
Su Emme (%)		1,02	1,14	1,46	2,3	
Karışım Oranları (%)		10	15	25	50	

Elek analizleri TS 3530 ve TSE EN 933-1'e göre yapıldı. Agregaların özgül ağırlıkları ve su emmeleri TS EN 1097-6'ya göre yapıldı. Sülfat etkisi ile harç numunelerde meydana gelen oluşumların beton numunelerle kıyaslanabilmesi için harç numunelerde D agregası kullanıldı.

2.2.2. Çimento

Beton ve harç numune üretiminde CEM I 42,5 R tipi çimento kullanıldı. Kullanılan çimentoya ait fiziksel ve mekanik özellikler ile kimyasal bileşim Tablo 3 ve Tablo 4'te özetlenmiştir.

Tablo 3. Kullanılan çimentoya ait bazı fiziksel ve mekanik özellikler

Fiziksel Özellikler		Standart Değerler	Sonuçlar
Özgül ağırlık		-	3,05
Priz süresi (Vicat)	Başlangıç, saat : dakika	Minimum 01:00	02:13
	Bitiş, saat : dakika	Maksimum 10:00	03:10
Hacim genleşmesi(mm)		Maksimum 10	1
İncelik	Özgül yüzey (Blaine)(cm ² /g)	Minimum 2800	3832
	200 mikron elek üstü (%)	-	0,00
	90 mikron elek üstü (%)	-	0,80
	45 mikron elek üstü (%)	-	10,00
Gün		Standart Değerler	Sonuçlar
Basınç Dayanımı	2	Minimum 20,0	25,9
	7	-	36,7
	28	Min-Max 42,5-62,5	46,3

Tablo 4. Çimento ve mineral katkılara ait kimyasal bileşimler (ağırlıkça %)

Kimyasal Bileşen	Portland Çimentosu	Uçucu Kül	Silis Dumanı	Yüksek fırın Cürufu
CaO	61,57	7,11	1,88	37,43
SiO ₂	19,97	53,22	83,21	37,94
Al ₂ O ₃	6,22	2,99	3,21	14,31
Fe ₂ O ₃	2,97	1,11	1,02	0,94
MgO	0,97	5,33	4,54	10,01
SO ₃	2,78	2,21	1,14	0,29
Kızdırma kaybı	4,08	1,67	3,34	1,38
İncelik Blaine(cm ² /g)	3832	4220	-	4450

2.2.3. Su

Beton karma suyu olarak Rize ili şehir şebekesi musluk suyu kullanıldı. Beton karma suyunun analiz raporu Tablo 5'te görülmektedir.

Tablo 5. Beton karma suyu analiz raporu

Analizler	Analiz Miktarı	Birim	Deney Metodu	TS EN 1008'e göre maksimum sınır değerler	
pH	7,8		ISO 4316	pH>4 olmalıdır	
Koku	yok			İçilebilir suyun sahip olduğu koku yada hidrojen sülfür kokusu haricinde olmamalı	
Renk	Berrak			Nitel olarak belirlenen renk açık sarı veya daha açık olmalıdır	
Organik madde	Çok açık sarı	mg/l		NaOH ilave edildikten sonra nitel olarak belirlenen renk sarıya dönük kahverengi veya daha açık olmalı	
Askıda katı madde	Yok	ml		Çökelti miktarı en fazla 4 ml olmalıdır. Beton harmanı içerisindeki toplam agrega kütlelerinin %1'inden kütlece daha az olmalıdır	
Zn ²⁺	Çinko	<0,01	mg/l	TS 6290	En fazla <100 mg/l
P ₂ O ₅	Fosfatlar	0,02	mg/l	TS 7886	En fazla <100 mg/l
Na ₂ O	Alkali	60	mg/l	TS EN 196-21	Normal şartlarda <1500 mg/l
Cl	Klorür	18	mg/l	TS EN 196-21	Öngerilmeli beton ve şerbette <500 mg/l
					İçinde donatı beton <1000 mg/l
					Donatısız beton <4500 mg/l
SO ₄	Sülfat	16	mg/l	TS EN 196-21	En fazla <2000 mg/l
NO ₃ ⁻	Nitrat	0,1	mg/l	ISO 7890-1	En fazla <500 mg/l
Pb ²⁺	Kurşun	<0,01	mg/l	TS 6290	En fazla <100 mg/l
Şekerler	Yok	mg/l		TS 9840 EN 1622	En fazla <100 mg/l
Sıvı ve katı yağ	Yok	mg/l			Görünür izlerden daha fazla olmamalı
Deterjan	Yok	mg/l			Herhangi bir köpük 2 dakikada kaybolmalıdır

2.2.4. Mineral Katkı Maddeleri

Çalışmada kullanılan silis dumanı ve uçucu kül Yapı Kimyasalları Sanayi A.Ş. (YKS) firmasından temin edildi. Yüksek fırın cürufu Karçimsa firmasının Karabük Demir Çelik fabrikası cürufudur. Uçucu kül, silis dumanı ve yüksek fırın cürufuna ait kimyasal özellikler Tablo 4'te görülmektedir. Çalışmada kullanılan mineral katkıların özgül ağırlıkları; uçucu külün 2,4, silis dumanının 2,2 ve yüksek fırın cürufunun 2,7'dir.

2.2.5. Kimyasal Katkı Maddeleri

Kimyasal katkı olarak betona reoplastik özellik kazandırmak için formüle edilmiş, suda çözülmüş sulfone sentetik polimer esaslı, klor içermeyen, yüksek oranda su azaltan özellikte ve ilk zamanlarda betonun mukavemetini hızlandırıp artıran süper akışkanlaştırıcı katkı malzemesi kullanıldı. Bu kimyasal katkının kullanımı çimento ağırlığının % 0,8-1,4 oranındadır. Bu çalışmada kimyasal katkı maddesi çimento ağırlığının % 1,2'si oranında kullanılmıştır.

2.3. Üretilen Numunelerin Karışım Tasarımı

Tablo 6. Beton karışımları için malzeme miktarları

Karışım	Agrega (kg/m ³)	Çimento (kg/m ³)	Su (kg/m ³)	Mineral Katkı(kg/m ³)	Kimyasal Katkı (kg/m ³)
Mineral katkısız	1880	300	180	-	3,6
%20 uçucu kül ilaveli	1828	300	180	60	3,6
%10 silis dumanı ilaveli	1858	300	180	30	3,6
% 20 yüksek fırın cürufu ilaveli	1834	300	180	60	3,6

Tablo 7. Harç karışımları için malzeme miktarları

Numune ismi	Agrega (kg/m ³)	Çimento (kg/m ³)	Su (kg/m ³)	Mineral katkı(kg/m ³)
Mineral katkı ilavesiz	1543	400	250	-
%20 uçucu kül ilaveli	1455	400	250	80
%20 silis dumanı ilaveli	1448	400	250	80
%20 yüksek fırın cürufu ilaveli	1465	400	250	80

2.4. Numunelerin Hazırlanması ve Saklanması

Deneyisel çalışmada %20 uçucu kül ilaveli, %20 yüksek fırın cürufu ilaveli ve %10 silis dumanı ilaveli üç seri beton üretildi. Ayrıca karşılaştırma yapmak amacıyla mineral katkı içermeyen bir karışım hazırlanmıştır. Her bir seri beton 120 litrelik partiler halinde iki seferde döküldü ve her seri beton için çökme ölçüldü. Bu numuneler 28 günlük standart

küre maruz bırakıldıktan sonra her parti için üç numune üzerinde test çekici okuması, ultrases ölçümü ve basınç dayanımı testi yapıldı. Geriye kalan beton numuneler sodyum sülfat çözeltisi, magnezyum sülfat çözeltisi, Karadeniz deniz suyu ve musluk suyu bulunan dört ayrı havuza yerleştirildi. Numune havuzlarının çözeltileri üçer aylık sürelerde yenilendi. Sodyum sülfat ve magnezyum sülfat çözeltileri %2 konsantrasyonlu hazırlandı. Beton numuneler Tablo 8, Tablo 9, Tablo 10 ve Tablo 11’de belirtildiği şekilde isimlendirilerek dört farklı ortamda saklandılar.

Harç numuneler %20 uçucu kül, %20 yüksek fırın cürufu ve %20 silis dumanı ilaveli olmak üzere üç seri halinde üretildi. Ayrıca karşılaştırma yapmak için mineral katkı içermeyen bir seri harç karışımı da hazırlandı. Harç numuneler karışım gruplarına göre 12 litrelik hacimde dört seferde döküldü. Bu numuneler %2 magnezyum sülfat çözeltisinde 5°C’de, 40°C’de ve oda sıcaklığında muhafaza edildi. Bir grup harç numunede standart küre maruz bırakıldı.

Tablo 8. Standart kür havuzundaki beton numune grupları

Standart Kür Havuzu					
Numune Grup No	Süre (Ay)	Mineral Katkısız	Uçucu Kül İlaveli	Silis Dumanı İlaveli	Yüksek Fırın Cürufu İlaveli
1	1	P-1/1	UK-1/1	SD-1/1	YFC-1/1
		P-1/2	UK-1/2	SD-1/2	YFC-1/2
		P-1/3	UK-1/3	SD-2/1	YFC-1/3
		P-2/1	UK-2/1	SD-2/2	YFC-2/1
		P-2/2	UK-2/2	SD-2/3	YFC-2/2
			UK-2/3		YFC-2/3
2	4	P-1/5	UK-1/5	SD-1/4	YFC-1/5
		P-1/6	UK-1/6	SD-1/5	YFC-1/6
3	7	P-1/7	UK-1/7	SD-1/6	YFC-1/7
		P-1/8	UK-1/8	SD-1/7	YFC-1/8
4	10	P-1/9	UK-1/9	SD-1/8	YFC-1/9
		P-1/10	UK-1/10	SD-1/9	YFC-1/10
5	13	P-2/3	UK-2/4	SD-2/4	YFC-2/4
		P-2/4	UK-2/5	SD-2/5	YFC-2/5
6	20	P-2/5	UK-2/6	SD-2/6	YFC-2/6
		P-2/6	UK-2/7	SD-2/7	YFC-2/7
7	23	P-2/7	UK-2/8	SD-2/8	YFC-2/8
		P-2/8	UK-2/9	SD-2/9	YFC-2/9

Tablo 9. Sodyum sülfat çözeltisine maruz bırakılan beton numune grupları

Sodyum Sülfat Çözeltisi					
Numune Grup No	Süre (Ay)	Mineral Katkısız	Uçucu Kül İlaveli	Silis Dumanı İlaveli	Yüksek Fırın Cürufu İlaveli
1	1	P-1/1	UK-1/1	SD-1/1	YFC-1/1
		P-1/2	UK-1/2	SD-1/2	YFC-1/2
		P-1/3	UK-1/3	SD-2/1	YFC-1/3
		P-2/1	UK-2/1	SD-2/2	YFC-2/1
		P-2/2	UK-2/2	SD-2/3	YFC-2/2
			UK-2/3	SD-1/11	YFC-2/3
2	4	P-1/12	UK-1/12	SD-1/12	YFC-1/12
		P-1/13	UK-1/13	SD-1/13	YFC-1/13
3	7	P-1/14	UK-1/14	SD-1/14	YFC-1/14
		P-1/15	UK-1/15	SD-1/15	YFC-1/15
4	10	P-1/16	UK-1/16	SD-1/16	YFC-1/16
		P-1/17	UK-1/17	SD-1/11	YFC-1/17
5	13	P-2/10	UK-2/11	SD-2/11	YFC-2/11
		P-2/11	UK-2/12	SD-2/12	YFC-2/12
6	20	P-2/12	UK-2/13	SD-2/13	YFC-2/13
		P-2/13	UK-2/14	SD-2/14	YFC-2/14
7	23	P-2/14	UK-2/15	SD-2/15	YFC-2/15
		P-2/15	UK-2/16	SD-2/16	

Tablo 10. Magnezyum sülfat çözeltisine maruz bırakılan beton numune grupları

Magnezyum Sülfat Çözeltisi					
Numune Grup No	Süre (Ay)	Mineral Katkısız	Uçucu Kül İlaveli	Silis Dumanı İlaveli	Yüksek Fırın Cürufu İlaveli
1	1	P-1/1	UK-1/1	SD-1/1	YFC-1/1
		P-1/2	UK-1/2	SD-1/2	YFC-1/2
		P-1/3	UK-1/3	SD-2/1	YFC-1/3
		P-2/1	UK-2/1	SD-2/2	YFC-2/1
		P-2/2	UK-2/2	SD-2/3	YFC-2/2
			UK-2/3		YFC-2/3
2	4	P-1/19	UK-1/19	SD-1/18	YFC-1/19
		P-1/20	UK-1/20	SD-1/19	YFC-1/20
3	7	P-1/21	UK-1/21	SD-1/20	YFC-1/21
		P-1/22	UK-1/22	SD-1/21	YFC-1/22
4	10	P-1/23	UK-1/23	SD-1/22	YFC-1/23
		P-1/24	UK-1/24	SD-1/23	YFC-1/24
5	13	P-2/17	UK-2/18	SD-2/18	YFC-2/18
		P-2/18	UK-2/19	SD-2/19	YFC-2/19
6	20	P-2/19	UK-2/20	SD-2/20	YFC-2/20
		P-2/20	UK-2/21	SD-2/21	YFC-2/21
7	23	P-2/21	UK-2/22	SD-2/22	YFC-2/22
		P-2/22	UK-2/23	SD-2/23	YFC-2/23

Tablo 11. Deniz suyuna maruz bırakılan beton numune grupları

Deniz Suyu					
Numune Grup No	Süre (Ay)	Mineral Katkısız	Uçucu Kül İlaveli	Silis Dumanı İlaveli	Yüksek Fırın Cürufu İlaveli
1	1	P-1/1	UK-1/1	SD-1/1	YFC-1/1
		P-1/2	UK-1/2	SD-1/2	YFC-1/2
		P-1/3	UK-1/3	SD-2/1	YFC-1/3
		P-2/1	UK-2/1	SD-2/2	YFC-2/1
		P-2/2	UK-2/2	SD-2/3	YFC-2/2
			UK-2/3	SD-1/11	YFC-2/3
2	4	P-1/26	UK-1/26	SD-1/25	YFC-1/26
		P-1/27	UK-1/27	SD-1/26	YFC-1/27
3	7	P-1/28	UK-1/28	SD-1/27	YFC-1/28
		P-1/29	UK-1/29	SD-1/28	YFC-1/29
4	10	P-1/30	UK-1/30	SD-1/29	YFC-1/30
		P-1/31	UK-1/31	SD-1/30	YFC-1/31
5	13	P-2/24	UK-2/25	SD-2/25	YFC-2/25
		P-2/25	UK-2/26	SD-2/26	YFC-2/26
6	20	P-2/26	UK-2/27	SD-2/27	YFC-2/27
		P-2/27	UK-2/28	SD-2/28	YFC-2/28
7	23	P-2/28	UK-2/29	SD-2/29	YFC-2/29
		P-2/29	UK-2/30	SD-2/30	YFC-2/30

2.5. Beton Numuneler Üzerinde Gerçekleştirilen Deneyler

2.5.1. Taze Beton Deneyleri

120 litrelik partiler halinde dökülen taze betonun her partisi için çökme deneyi yapıldı. Her seri için ölçülen çökme değeri mineral katkı içermeyen, uçucu kül ilaveli ve yüksek fırın cürufu ilaveli betonlarda 120 mm, silis dumanı ilaveli betonlarda 70 mm'dir. TS EN 206-1'de yapılan sınıflamaya göre mineral katkı içermeyen, uçucu kül ilaveli ve yüksek fırın cürufu ilaveli betonlar S3, silis dumanı ilaveli betonlar S2 sınıfıdır.

2.5.2. Sert Beton Deneyleri

Sertleşmiş betona birim ağırlık, basınç, ultrases, test çekici, su emme ve kılcal su emme deneyleri yapılmıştır.

Birim hacim ağırlık ölçümleri kalıplara beton dökümünden 24 saat sonra yapıldı. Hava kompresörü ile beton numuneler kalıplarından çıkarıldı. Kalıbından çıkarılan numuneler havada tartıldı. Havada tartılan beton numune sonra su içerisinde tartıldı.

Betonun havadaki ağırlığından sudaki ağırlığı çıkarılarak hacmi bulundu. Betonun havadaki ağırlığı hacmine bölünerek birim hacim ağırlığı belirlendi.

Numunelerin basınç dayanımı için ELE marka hidrolik pres kullanıldı. Hidrolik presin yükleme hızı 4,5 kN/mm²/sn'dir. Beton numuneler basınç deneyi uygulanmadan 48 saat önce saklandıkları havuzdan çıkarıldı. Beton numuneler kuruması için 48 saat bekletildi. Bu süre sonunda basınç dayanımları TS 3114 ISO 4012'ye uygun olarak belirlendi.

Çalışmada belirtilen sürelerde beton numuneler üzerinde test çekici okumaları yapıldı. Her bir beton grupları için test çekici okuması yapılmadan önce test çekici kalibrasyon örsüyle kalibre edildi.

36 ay standart küre maruz betonlara kılcal su emme ve su emme deneyi uygulandı. Kılcal su emme deneyi sırasında beton numuneler sabit ağırlığa gelinceye kadar 70 °C'de bekletildi. Beton numuneler etüv kurusuna getirildikten sonra ısılarının çevre sıcaklığına düşmesi beklendi. Daha sonra beton numuneler metal çubuklar üzerine 3±1mm'lik kısmı suya dokunacak şekilde yerleştirildiler. Betonların belli zaman aralıklarında suya temas eden yüzeyleri bezle silindikten sonra ağırlıkları ölçüldü. Betonlardaki kılcal su emme miktarları yüzde olarak ve $\frac{Q}{A} = k\sqrt{t}$ bağıntısından k kılcal su emme katsayısı olarak hesaplandı. Formüldeki Q cinsinden emilen su miktarını (cm³), A suyun temas ettiği alanını (cm²) ve t süreyi (s) göstermektedir. Betonlardaki su emme deneyi TS 3624'e göre yapıldı.

2.5.3. Harç Numuneler Üzerinde Gerçekleştirilen Deneyler

Harç numuneler için birim hacim ağırlık ve eğilme dayanımı ölçümleri gerçekleştirildi. Ayrıca bu numuneler için taramalı elektron mikroskobunda mikro yapısal inceleme yapıldı.

4×4×16 cm harç numuneler kalıplarından çıkarıldıktan hemen sonra birim hacim ağırlıkları ölçüldü.

Eğilme deneyi TS EN 196-1'e göre yapıldı. Harç numunelerin üretiminde Tablo 2'de verilen D agregası kullanıldı. D agregasını kullanmanın nedeni harç numuneler için elde edilen bulguların beton numunelerle kıyaslamasını yapabilmektir. Harç numuneler hazırlanırken TS EN 196-1'de belirtilen sürelerde mikserde karıştırıldı. Karıştırma işleminden sonra sarsma tablasına yerleştirilen numune kabının yarısı hazırlanan harç ile dolduruldu. Kalıbına yerleştirilen numuneye sarsma tablasıyla 60 vuruş uygulandı. İlk

uygulanan 60 vuruştan sonra numune kabının geri kalan kısmı da harç ile doldurulup tekrar 60 vuruş daha uygulandı. Yerleştirme ve sıkılama işleminden sonra numunelerin üstü çelik mala ile düzeltildi. Kalıbın üstü cam plaka ile kapatıldı. Hazırlanan kalıpların üstü ıslak bezlerle örtülüp 24 saat bekletildi. 24 saat sonra kalıbindan çıkarılan numunelerin birim hacim ağırlıkları ölçüldükten sonra standart kür havuzuna yerleştirildi. Standart kür havuzunda 28 gün bekletildikten sonra uçucu kül, silis dumanı, yüksek fırını cürufu ilaveli ve mineral katkı içermeyen her bir harç numunesi grubundan üçer numuneye eğilme deneyi uygulandı. Geriye kalan numuneler 5°C, oda sıcaklığı ve 40°C'deki magnezyum sülfat çözeltisine konuldu. Kıyaslama yapmak amacıyla bir grup harç numune de standart kür havuzunda saklandı. Bekletilen harç numunelere belirlenen deney sürelerinde ELE marka test cihazı ile eğilme deneyi gerçekleştirildi.

Oda sıcaklığında, 5°C'de, 40°C'de %2'lik magnezyum sülfat çözeltisinde ve standart kür havuzunda bekletilen numunelerden 1×5×5 mm boyutlarında numuneler kesilerek çıkarıldı. Bu numuneler 105°C'de beş saat bekletildi. Numunelere vakum uygulanarak altın kaplandı. Altın kaplı numuneler taramalı elektron mikroskopunda incelendi

3. DENEYSEL SONUÇLAR

Deneysel çalışma beton ve harç numuneler üzerinde gerçekleştirildi.

3.1. Beton Numuneler

Tablo 12. Standart havuzda bekletilen mineral katkı içermeyen 15 cm küp beton numunelere ilişkin sonuçlar

Numune Grup No	Süre (ay)	Çökme	Birim Hacim Ağırlık (gr/cm ³)	Ultrasonik Test cihazı Okuması (mikrosaniye)	Test çekici Okuması	Basınç Dayanımı (MPa)
1	1	12	2,410	34	27,4	31,5
2	4	12	2,393	31,95	28,5	40,1
3	7	12	2,404	32,5	32	42,5
4	10	12	2,409	32,05	31	42,6
5	13	12	2,409	31,45	32	39,8
6	20	12	2,408	32,75	29	40,8
7	23	12	2,405	33,15	27	41,1

Tablo 13. Standart havuzda bekletilen uçucu kül ilaveli 15 cm küp beton numunelere ilişkin sonuçlar

Numune Grup No	Süre (ay)	Çökme	Birim Hacim Ağırlık (gr/cm ³)	Ultrasonik Test cihazı Okuması (mikrosaniye)	Test çekici Okuması	Basınç Dayanımı (MPa)
1	1	12	2,352	33,45	29,67	35,4
2	4	12	2,339	31,25	33	45,2
3	7	12	2,379	32,3	33	52,2
4	10	12	2,381	32,25	35	51,6
5	13	12	2,363	31,3	32,5	54,3
6	20	12	2,344	31,7	30,5	50,4
7	23	12	2,360	32,65	30	50,9

Tablo 14. Standart havuzda bekletilen silis dumanı ilaveli 15 cm küp beton numunelere ilişkin sonuçlar

Numune Grup No	Süre (ay)	Çökme	Birim Hacim Ağırlık (gr/cm ³)	Ultrasonik Test cihazı Okuması (mikrosaniye)	Test çekici Okuması	Basınç Dayanımı (MPa)
1	1	7	2,375	33,84	29,8	39,7
2	4	7	2,390	32,3	33	47,8
3	7	7	2,37	32,85	34	45,9
4	10	7	2,386	32,1	34,5	45,8
5	13	7	2,399	32,3	31	47,8
6	20	7	2,37	32,85	29	45,9
7	23	7	2,386	32,1	28	45,8

Tablo 15. Standart havuzda bekletilen yüksek fırın cürufu ilaveli 15 cm küp beton numunelere ilişkin sonuçlar

Numune Grup No	Süre (ay)	Çökme	Birim Hacim Ağırlık (gr/cm ³)	Ultrasonik Test cihazı Okuması (mikrosaniye)	Test çekici Okuması	Basınç Dayanımı (MPa)
1	1	12	2,409	32,32	31,33	43,3
2	4	12	2,414	31,15	34,5	53,2
3	7	12	2,409	31,4	37	59,7
4	10	12	2,418	31,25	34	55,5
5	13	12	2,411	31	32	55,2
6	20	12	2,412	31,1	30,5	59,0
7	23	12	2,403	31,45	29,5	57,6

Tablo 16. Sodyum sülfat çözeltisinde bekletilen mineral katkı ilavesiz 15 cm küp beton numunelere ilişkin sonuçlar

Numune Grup No	Süre (ay)	Çökme (cm)	Birim Hacim Ağırlık Ortalaması (gr/cm ³)	Ultrasonik Test cihazı Okuması Ortalaması (mikrosaniye)	Test çekici ortalaması	Basınç Dayanımı Ortalaması (MPa)
1	1	12	2,410	34	27,4	31,5
2	4	12	2,418	32,5	31	39,2
3	7	12	2,396	32,35	35	43,9
4	10	12	2,414	32,7	35	42,6
5	13	12	2,398	32,6	32,5	39,3
6	20	12	2,409	33,25	29,5	31,5
7	23	12	2,400	34,2	30	30,2

Tablo 17. Sodyum sülfat çözeltisinde bekletilen uçucu kül ilaveli 15 cm küp beton numunelere ilişkin sonuçlar

Numune Grup No	Süre (ay)	Çökme	Birim Hacim Ağırlık (gr/cm ³)	Ultrasonik Test cihazı Okuması (mikrosaniye)	Test çekici Okuması	Basınç Dayanımı (MPa)
1	1	12	2,352	33,45	29,67	35,4
2	4	12	2,381	31,5	33,5	48,8
3	7	12	2,388	32,15	34	52,1
4	10	12	2,384	32,25	33,5	53,4
5	13	12	2,327	30,8	33,5	48,5
6	20	12	2,371	31,8	32,5	50,4
7	23	12	2,387	32,6	29	52,8

Tablo 18. Sodyum sülfat çözeltisinde bekletilen silis dumanı ilaveli 15 cm küp beton numunelere ilişkin sonuçlar

Numune Grup No	Süre (ay)	Çökme (cm)	Birim Hacim Ağırlık Ortalaması (gr/cm ³)	Ultrasonik Test cihazı Okuması Ortalaması (mikrosaniye)	Test çekici ortalaması	Basınç Dayanımı Ortalaması (MPa)
1	1	7	2,375	33,84	29,8	39,7
2	4	7	2,375	32,25	34,5	48,4
3	7	7	2,382	32,15	34,5	49,9
4	10	7	2,382	32,8	34,5	51,6
5	13	7	2,378	32,15	33,5	45,8
6	20	7	2,386	31,75	31	52,8
7	23	7	2,367	33,25	30,5	52,5

Tablo 19. Sodyum sülfat çözeltisinde bekletilen yüksek fırın cürufu ilaveli 15 cm küp beton numunelere ilişkin sonuçlar

Numune Grup No	Süre (ay)	Çökme (cm)	Birim Hacim Ağırlık Ortalaması (gr/cm ³)	Ultrasonik Test cihazı Okuması Ortalaması (mikrosaniye)	Test çekici ortalaması	Basınç Dayanımı Ortalaması (MPa)
1	1	12	2,409	32,32	31,33	43,3
2	4	12	2,391	31,05	34,5	52,0
3	7	12	2,415	30,8	36,5	60,5
4	10	12	2,411	31,6	36,5	55,6
5	13	12	2,402	30,7	34	57,8
6	20	12	2,395	31,5	31	56,9
7	23	12	2,394	32,3	32,5	58,5

Tablo 20. Magnezyum sülfat çözeltisinde bekletilen mineral katkısız 15 cm küp beton numunelere ilişkin sonuçlar

Numune Grup No	Süre (ay)	Çökme	Birim Hacim Ağırlık (gr/cm ³)	Ultrasonik Test cihazı Okuması (mikrosaniye)	Test çekici Okuması	Basınç Dayanımı (MPa)
1	1	12	2,410	34	27,4	31,5
2	4	12	2,411	31,95	32	40,7
3	7	12	2,414	31,95	33	43,2
4	10	12	2,425	33,05	31,5	39,6
5	13	12	2,406	35,45	29,5	32,5
6	20	12	2,415	45,1	23,5	24,3
7	23	12	2,417	43,3	22	25,1

Tablo 21. Magnezyum sülfat çözeltisinde bekletilen uçucu kül ilaveli 15 cm küp beton numunelere ilişkin sonuçlar

Numune Grup No	Süre (ay)	Çökme	Birim Hacim Ağırlık (gr/cm ³)	Ultrasonik Test cihazı Okuması (mikrosaniye)	Test çekici Okuması	Basınç Dayanımı (MPa)
1	1	12	2,352	33,45	29,67	35,4
2	4	12	2,391	32,45	34,5	44,2
3	7	12	2,387	32,9	34	49,9
4	10	12	2,391	32,85	36	47,2
5	13	12	2,382	32,3	32	51,6
6	20	12	2,384	32,25	30	56,8
7	23	12	2,385	33,55	33,5	56,2

Tablo 22. Magnezyum sülfat çözeltisinde bekletilen silis dumanı ilaveli 15 cm küp beton numunelere ilişkin sonuçlar

Numune Grup No	Süre (ay)	Çökme	Birim Hacim Ağırlık (gr/cm ³)	Ultrasonik Test cihazı Okuması (mikrosaniye)	Test çekici Okuması	Basınç Dayanımı (MPa)
1	1	7	2,375	33,84	29,8	39,7
2	4	7	2,386	31,65	32,5	45,3
3	7	7	2,377	32,75	34,5	48,6
4	10	7	2,388	32,9	34,5	50,3
5	13	7	2,367	32,15	33,5	45,5
6	20	7	2,361	34,75	29,5	48,8
7	23	7	2,363	34,05	31	54,4

Tablo 23. Magnezyum sülfat çözeltisinde bekletilen yüksek firm çürufu ilaveli 15 cm küp beton numunelere ilişkin sonuçlar

Numune Grup No	Süre (ay)	Çökme	Birim Hacim Ağırlık (gr/cm ³)	Ultrasonik Test cihazı Okuması (mikrosaniye)	Test çekici Okuması	Basınç Dayanımı (MPa)
1	1	12	2,409	32,32	31,33	43,3
2	4	12	2,408	31,45	36	53,5
3	7	12	2,412	31,65	36	56,5
4	10	12	2,406	31,4	35	54,2
5	13	12	2,407	31,45	33	55,1
6	20	12	2,398	33,1	32	59,7
7	23	12	2,402	33,1	32,5	56,5

Tablo 24. Deniz suyunda bekletilen mineral katkı ilavesiz 15 cm küp beton numunelere ilişkin sonuçlar

Numune Grup No	Süre (ay)	Çökme	Birim Hacim Ağırlık (gr/cm ³)	Ultrasonik Test cihazı Okuması (mikrosaniye)	Test çekici Okuması	Basınç Dayanımı (MPa)
1	1	12	2,410	34	27,4	31,5
2	4	12	2,39	31,8	31,5	40,5
3	7	12	2,409	32,1	33,5	40,9
4	10	12	2,432	32,8	30	38,2
5	13	12	2,402	32,55	30,5	40,8
6	20	12	2,404	32,75	30,5	44,1
7	23	12	2,415	34,2	27	44,7

Tablo 25. Deniz suyunda bekletilen uçucu kül ilaveli 15 cm küp beton numunelere ilişkin sonuçlar

Numune Grup No	Süre (ay)	Çökme	Birim Hacim Ağırlık (gr/cm ³)	Ultrasonik Test cihazı Okuması (mikrosaniye)	Test çekici Okuması	Basınç Dayanımı (MPa)
1	1	12	2,352	33,45	29,67	35,4
2	4	12	2,349	32,1	34,5	46,1
3	7	12	2,376	32,75	34	52,9
4	10	12	2,371	32,35	34	52,0
5	13	12	2,393	32,15	31	49,8
6	20	12	2,393	32,75	29,5	46,9
7	23	12	2,389	33,35	30	50,1

Tablo 26. Deniz suyunda bekletilen silis dumanı ilaveli 15 cm küp beton numunelere ilişkin sonuçlar

Numune Grup No	Süre (ay)	Çökme	Birim Hacim Ağırlık (gr/cm ³)	Ultrasonik Test cihazı Okuması (mikrosaniye)	Test çekici Okuması	Basınç Dayanımı (MPa)
1	1	7	2,375	33,84	29,8	39,7
2	4	7	2,378	32,35	34	48,2
3	7	7	2,385	32,1	34	49,4
4	10	7	2,382	32,4	34,5	47,9
5	13	7	2,368	32,35	31	48,2
6	20	7	2,377	32,7	30,5	53,0
7	23	7	2,387	33,2	29,5	52,9

Tablo 27. Deniz suyunda bekletilen yüksek fırın cürufu ilaveli 15 cm küp beton numunelere ilişkin sonuçlar

Numune Grup No	Süre (ay)	Çökme	Birim Hacim Ağırlık (gr/cm ³)	Ultrasonik Test cihazı Okuması (mikrosaniye)	Test çekici Okuması	Basınç Dayanımı (MPa)
1	1	12	2,409	32,32	31,33	43,3
2	4	12	2,399	31,25	36	53,7
3	7	12	2,382	31,5	35,5	53,5
4	10	12	2,381	31,35	36,5	51,6
5	13	12	2,411	32,65	33	56,7
6	20	12	2,382	32,1	30,5	55,2
7	23	12	2,398	32,7	31,5	59,8

3.1.1. Numunelerin Basınç Dayanımları

Tablo 28. Standart kür havuzunda tutulan numunelerin basınç dayanımları

Süre (ay)	Basınç Dayanımları (MPa)			
	Mineral katkısız	Uçucu kül ilaveli	Silis dumanı ilaveli	Yüksek fırın cürufu ilaveli
1	31,5	35,4	39,7	43,3
4	40,1	45,2	47,8	53,2
7	42,5	52,2	45,9	59,7
10	42,6	51,6	45,8	55,5
13	39,8	54,3	47,8	55,2
20	40,8	50,4	45,9	59,0
23	41,1	50,9	45,8	57,6

Tablo 29. Sodyum sülfat çözeltisine maruz numunelerin basınç dayanımları

Süre (ay)	Basınç Dayanımları (MPa)			
	Mineral katkısız	Uçucu kül ilaveli	Silis dumanı ilaveli	Yüksek fırını cürufu ilaveli
1	31,5	35,4	39,7	43,3
4	39,2	48,8	48,4	52,0
7	43,9	52,1	49,9	60,5
10	42,6	53,4	51,6	55,6
13	39,3	48,5	45,8	57,8
20	31,5	50,4	52,8	56,9
23	30,2	52,8	52,5	58,5

Tablo 30. Magnezyum sülfat çözeltisine maruz numunelerin basınç dayanımları

Süre (ay)	Basınç Dayanımları (MPa)			
	Mineral katkısız	Uçucu kül ilaveli	Silis dumanı ilaveli	Yüksek fırını cürufu ilaveli
1	31,5	35,4	39,7	43,3
4	40,7	44,3	45,3	53,4
7	43,2	49,9	48,6	56,5
10	39,6	47,2	50,3	54,2
13	32,5	51,6	45,5	55,1
20	24,3	56,8	48,8	59,7
23	25,1	56,2	54,4	56,5

Tablo 31. Deniz suyuna maruz numunelerin basınç dayanımları

Süre (ay)	Basınç Dayanımları (MPa)			
	Mineral katkısız	Uçucu kül ilaveli	Silis dumanı ilaveli	Yüksek fırını cürufu ilaveli
1	31,5	35,4	39,7	43,3
4	40,5	46,1	48,2	53,7
7	40,9	52,9	49,4	53,5
10	38,2	52,0	47,9	51,6
13	40,8	49,8	48,2	56,7
20	44,1	46,9	53,0	55,2
23	44,7	50,1	52,9	59,8

Tablo 32. Mineral katkı içermeyen numunelerin basınç dayanımları

Süre (ay)	Basınç Dayanımları (MPa)			
	Standart kür	Sodyum sülfat çözeltisi	Magnezyum sülfat çözeltisi	Deniz suyu
1	31,5	31,5	31,5	31,5
4	40,1	39,2	40,7	40,5
7	42,5	43,9	43,2	40,9
10	42,6	42,6	39,6	38,2
13	39,8	39,3	32,5	40,8
20	40,8	31,5	24,3	44,1
23	41,1	30,2	25,1	44,7

3.1.2. Beton Numunelerin Ultrases Değerleri

Tablo 33. Standart kür gören numunelere ait ultrases ölçümleri

Süre (ay)	Beton grupları							
	Mineral katkısız		Uçucu kül ilaveli		Silis dumanı ilaveli		Yüksek firmı cürufu ilaveli	
	t (μs)	V (m/s)	t (μs)	V (m/s)	t (μs)	V (m/s)	t (μs)	V(m/s)
1	34	4411,8	33,45	4484,3	33,84	4432,6	32,32	4641,1
4	31,95	4694,8	31,25	4800,0	32,3	4644,0	31,15	4815,4
7	32,5	4615,4	32,3	4644,0	32,85	4566,2	31,4	4777,1
10	32,05	4680,2	32,25	4651,2	32,1	4672,9	31,25	4800,0
13	31,45	4769,5	31,3	4792,3	32,3	4644,0	31	4838,7
20	32,75	4580,2	31,7	4731,9	32,85	4566,2	31,1	4823,2
23	33,15	4524,9	32,65	4594,2	32,1	4672,9	31,45	4769,5

Yukarıdaki tablodaki t sesüstü dalganın gönderilmiş olduğu beton yüzeyinden alındığı yüzeye kadar mikrosaniye (μs) cinsinden geçen zamanı, V ise metre/saniye (m/s) cinsinden sesüstü dalga hızını göstermektedir.

Tablo 34. Sodyum sülfat çözeltisine maruz beton numunelere ait ultrases ölçümleri

Süre (ay)	Beton grupları							
	Mineral katkısız		Uçucu kül ilaveli		Silis dumanı ilaveli		Yüksek firmı cürufu ilaveli	
	t (μs)	V(m/s)	t (μs)	V(m/s)	t (μs)	V(m/s)	t (μs)	V(m/s)
1	34	4411,8	33,45	4484,3	33,84	4432,6	32,32	4641,1
4	32,5	4615,4	31,5	4761,9	32,25	4651,2	31,05	4830,9
7	32,35	4636,8	32,15	4665,6	32,15	4665,6	30,8	4870,1
10	32,7	4587,2	32,25	4651,2	32,8	4573,2	31,6	4746,8
13	32,6	4601,2	30,8	4870,1	32,15	4665,6	30,7	4886,0
20	33,25	4511,3	31,8	4717,0	31,75	4724,4	31,5	4761,9
23	34,2	4386,0	32,6	4601,2	33,25	4511,3	32,3	4644,0

Tablo 35. Magnezyum sülfat çözeltisine maruz beton numunelere ait ultrases ölçümleri

Süre (ay)	Beton grupları							
	Mineral katkısız		Uçucu kül ilaveli		Silis dumanı ilaveli		Yüksek fırını cürufu ilaveli	
	t (µs)	V(m/s)	t (µs)	V(m/s)	t (µs)	V(m/s)	t (µs)	V(m/s)
1	34	4411,8	33,45	4484,3	33,84	4432,6	32,32	4641,1
4	31,95	4694,8	32,45	4622,5	31,65	4739,3	31,45	4769,5
7	31,95	4694,8	32,9	4559,3	32,75	4580,2	31,65	4739,3
10	33,05	4538,6	32,85	4566,2	32,9	4559,3	31,4	4777,1
13	35,45	4231,3	32,3	4644,0	32,15	4665,6	31,45	4769,5
20	45,1	3325,9	32,25	4651,2	34,75	4316,5	33,1	4531,7
23	43,3	3464,2	33,55	4470,9	34,05	4405,3	33,1	4531,7

Tablo 36. Deniz suyuna maruz beton numunelere ait ultrases ölçümleri

Süre (ay)	Beton grupları							
	Mineral katkısız		Uçucu kül ilaveli		Silis dumanı ilaveli		Yüksek fırını cürufu ilaveli	
	t (µs)	V(m/s)	t (µs)	V(m/s)	t (µs)	V(m/s)	t (µs)	V(m/s)
1	34	4411,8	33,45	4484,3	33,84	4432,6	32,32	4641,1
4	31,8	4717,0	32,1	4672,9	32,35	4636,8	31,25	4800,0
7	32,1	4672,9	32,75	4580,2	32,1	4672,9	31,5	4761,9
10	32,8	4573,2	32,35	4636,8	32,4	4629,6	31,35	4784,7
13	32,55	4608,3	32,15	4665,6	32,35	4636,8	32,65	4594,2
20	32,75	4580,2	32,75	4580,2	32,7	4587,2	32,1	4672,9
23	34,2	4386,0	33,35	4497,8	33,2	4518,1	32,7	4587,2

3.1.3. Beton Numunelerin Yüzey Sertliği Değerleri

Tablo 37. Standart kür havuzunda tutulan numunelere ait beton test çekici ölçümleri

Süre (ay)	Beton gruplarına göre beton test çekici ölçümleri			
	Mineral katkısız	Uçucu kül ilaveli	Silis dumanı ilaveli	Yüksek fırını cürufu ilaveli
1	27,4	29,7	29,8	31,3
4	28,5	33	33	34,5
7	32	33	34	37
10	31	35	34,5	34
13	32	32,5	31	32
20	29	30,5	29	30,5
23	27	30	28	29,5

Tablo 38. Sodyum sülfat çözeltisine maruz numunelere ait beton test çekici ölçümleri

Süre (ay)	Beton gruplarına göre beton test çekici ölçümleri			
	Mineral katkısız	Uçucu kül ilaveli	Silis dumanı ilaveli	Yüksek fırını cürufu ilaveli
1	27,4	29,7	29,8	31,3
4	31	33,5	34,5	34,5
7	35	34	34,5	36,5
10	35	33,5	34,5	36,5
13	32,5	33,5	33,5	34
20	29,5	32,5	31	31
23	30	29	30,5	32,5

Tablo 39. Magnezyum sülfat çözeltisine maruz numunelere ait beton test çekici ölçümleri

Süre (ay)	Beton gruplarına göre beton test çekici ölçümleri			
	Mineral katkısız	Uçucu kül ilaveli	Silis dumanı ilaveli	Yüksek fırını cürufu ilaveli
1	27,4	29,7	29,8	31,3
4	32	34,5	32,5	36
7	33	34	34,5	36
10	31,5	36	34,5	35
13	29,5	32	33,5	33
20	23,5	30	29,5	32
23	22	33,5	31	32,5

Tablo 40. Deniz suyuna maruz numunelere ait beton test çekici ölçümleri

Süre (ay)	Beton gruplarına göre beton test çekici ölçümleri			
	Mineral katkısız	Uçucu kül ilaveli	Silis dumanı ilaveli	Yüksek fırını cürufu ilaveli
1	27,4	29,7	29,8	31,3
4	31,5	34,5	34	36
7	33,5	34	34	35,5
10	30	34	34,5	36,5
13	30,5	31	31	33
20	30,5	29,5	30,5	30,5
23	27	30	29,5	31,5

3.1.4. Beton Numunelerin Kılcal Su Emme ve Su Emme Değerleri

36 ay standart küre maruz beton numunelere uygulanan kılcal su emme deneyi sonucunda kılcal su emme değerleri Tablo 41’de görülmektedir. Tablo 42’deki her bir değer üç beton numunesinin ortalama değeridir.

Tablo 41. Standart küre maruz beton numunelerin kılcal su emme ve su emme değerleri (%)

Numune İsmi	Kılcal Su Emme (%)				Su emme (%)
	1. saat	2. saat	4. saat	24. saat	
Mineral katkısız numune	0,03	0,06	0,09	0,09	0,40
Uçucu kül ilaveli numune	0,16	0,22	0,31	0,34	0,78
Silis dumanı ilaveli numune	0,31	0,40	0,47	0,59	1,15
Yüksek fırın cürufu ilaveli numune	0,25	0,28	0,34	0,37	0,81

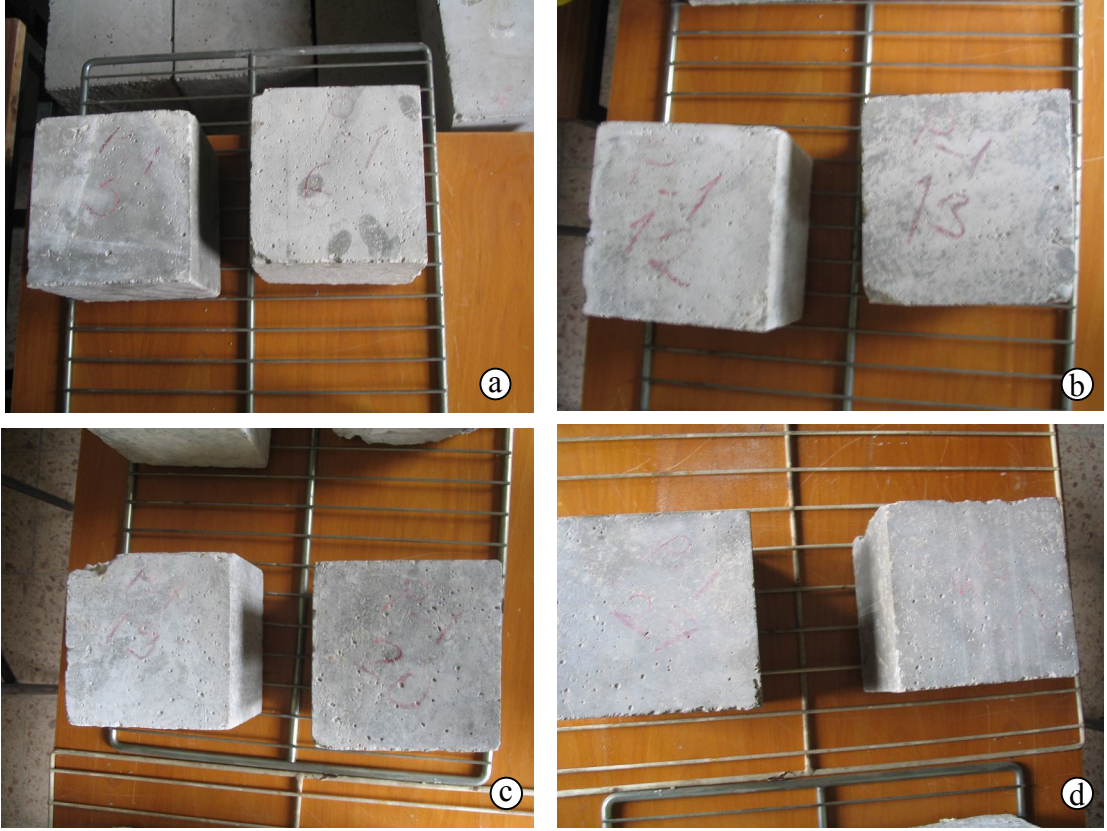
Tablo 42’de kılcal su emme katsayısına göre elde edilen değerler görülmektedir.

Kılcal su emme katsayıları $\frac{Q}{A} = k\sqrt{t}$ bağıntısına göre hesaplanmıştır. Bağıntıdaki Q kılcal su emme miktarını (cm^3), A suyun temas ettiği yüzey alanını (cm^2) ve t süreyi (s) göstermektedir. Tablodaki değerler 24 saat için hesaplanan kılcal su emme katsayılarını göstermektedir.

Tablo.42. Beton numunelerin kılcal su emme katsayıları

Numune İsmi	Kılcal Su Emme Katsayısı ($10^{-3} \text{cm/s}^{1/2}$)
Mineral katkısız numune	0,036
Uçucu kül ilaveli numune	0,131
Silis dumanı ilaveli numune	0,227
Yüksek fırın cürufu ilaveli numune	0,143

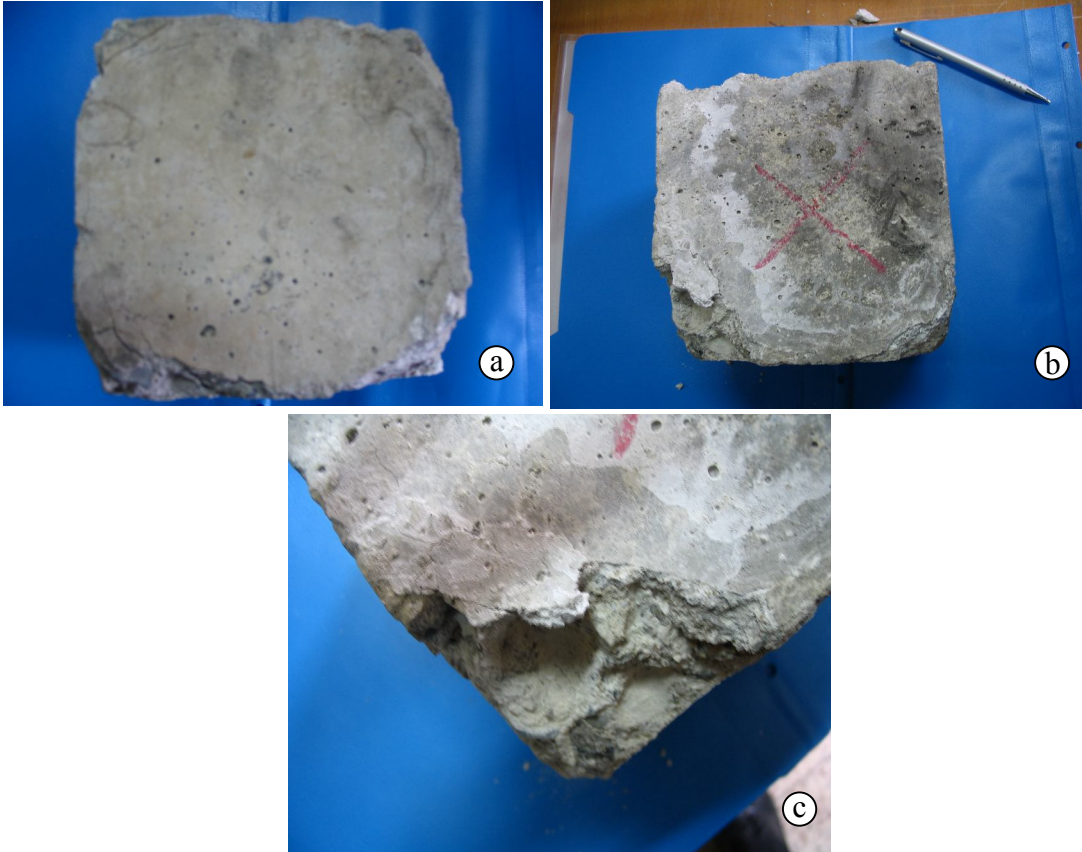
3.1.5. Sodyum Sülfat, Magnezyum Sülfat ve Deniz Suyuna Maruz Beton Numunelere Ait Görüntüler



Şekil 11. Katkı içermeyen 15 cm küp beton numunelerin 3 aylık görüntüleri. (a) Standart kür havuzu, (b) Sodyum Sülfat çözeltisi, (c) Magnezyum Sülfat çözeltisi, (d) Deniz suyu



Şekil 12. 13 ay sodyum sülfat çözeltisinde bekletilmiş mineral katkı içermeyen beton numune görüntüsü.



Şekil 13. 20 ay sodyum sülfat çözeltisinde bekletilmiş mineral katkı içermeyen beton numune görüntüsü. (a) (b) birbirinden farklı iki numunenin görünüşü, (c) beton köşe görüntüsü.



Şekil 14. 13 ay magnezyum sülfat çözeltisinde bekletilmiş mineral katkı içermeyen beton numune görüntüsü.



Şekil 15. 20 ay magnezyum sülfat çözeltisinde bekletilmiş mineral katkı içermeyen beton numune görüntüsü. (a) (b) birbirinden farklı iki numunenin görünüşü, (c) beton köşe görüntüsü.

3.2. Harç Numuneler

Harç numuneler üretiminden itibaren 1 ay süresince standart kür havuzunda tutuldu ve bu süreden sonra 5°C’de, 40°C’de ve oda sıcaklığında su ağırlığının %2’si oranında hazırlanan çözeltiliye maruz bırakıldı. Bir grup harç numune de oda sıcaklığında standart kür havuzunda bekletildi. Numunelerde meydana gelen değişiklikler gözlemlendi. Tüm numunelerin birim hacim ağırlıkları ve eğilmede çekme dayanımları belirlendi. Tablo 43’te verilen birim hacim ağırlıklar harç numunelerin kalıbından çıkarıldığı gün hesaplanan üç numunenin birim hacim ağırlıklarının ortalamasıdır.

3.2.1. Harç Numunelere İlişkin Birim Hacim Ağırlıkları

Tablo 43. Harç numunelerin birim hacim ağırlıkları

Ortam	Süre (ay)	Birim Hacim Ağırlık (gr/cm ³)			
		Mineral Katkısız	Uçucu Kül Katkılı	Silis Dumanı Katkılı	Yüksek Fırını Cürufu Katkılı
Oda sıcaklığında magnezyum sülfatlı	1	2,240	2,219	2,201	2,265
	4	2,247	2,224	2,186	2,261
	7	2,241	2,214	2,169	2,255
	10	2,248	2,230	2,195	2,255
	13	2,245	2,221	2,179	2,262
	21	2,246	2,220	2,181	2,257
40°C magnezyum sülfatlı	4	2,242	2,214	2,193	2,263
	7	2,258	2,213	2,189	2,245
	10	2,265	2,215	2,188	2,252
	13	2,248	2,225	2,190	2,266
	21	2,255	2,220	2,197	2,274
5°C magnezyum sülfatlı	4	2,254	2,224	2,181	2,262
	7	2,243	2,234	2,181	2,265
	10	2,246	2,225	2,187	2,269
	13	2,239	2,228	2,189	2,272
	21	2,244	2,190	2,178	2,278
Standart Kür	1	2,231	2,221	2,190	2,261
	4	2,228	2,226	2,181	2,266
	7	2,235	2,222	2,180	2,257
	10	2,214	2,213	2,189	2,270
	13	2,222	2,215	2,198	2,261
	21	2,182	2,202	2,186	2,262

3.2.2. Harç Numunelere İlişkin Eğilmede Çekme Dayanımları

Tablo 44. Magnezyum sülfat çözeltisine maruz numunelere ait eğilmede çekme dayanımları

Ortam	Süre (ay)	Ortalama Eğilme Dayanımı, MPa			
		Mineral Katkısız	Uçucu Kül Katkılı	Silis Dumanı Katkılı	Yüksek Fırını Cürufu Katkılı
Oda sıcaklığında magnezyum sülfatlı	1	6,3	6,1	5,7	8,7
	4	9,1	8,7	5,3	8,0
	7	8,2	8,6	5,8	8,1
	10	3,7	8,1	5,8	8,8
	13	0	8,5	7,8	10,2
	21	0	6,5	9,9	11,3
40°C magnezyum sülfatlı	4	9,1	10,9	6,3	11,6
	7	7,8	10,7	5,2	11,5
	10	6,6	8,9	5,9	11,8
	13	6,6	9,1	7,0	11,5
	21	6,7	6,9	8,9	12,4
5°C magnezyum sülfatlı	4	8,5	8,9	5,1	8,7
	7	7,6	8,3	6,9	7,6
	10	7,7	8,4	5,9	9,7
	13	7,9	9,1	7,7	9,8
	21	5,6	9,3	8,0	8,9
Standart Kür	1	6,2	6,7	5,2	6,5
	4	7,1	6,4	4,9	6,8
	7	6,9	6,3	5,6	6,8
	10	7,4	6,6	5,7	6,9
	13	7,4	6,4	5,5	5,5
	21	7,8	7,9	6,5	6,5

Tablo 44'te 1., 4., 7., 13. ve 21. ayda %2 magnezyum sülfat çözeltisine maruz harç numunelerde ölçülen eğilme dayanımları görülmektedir. Tablo 44'teki her bir eğilme dayanımı üç harç numunenin eğilme dayanımlarının ortalamasıdır. Harç numunelerde silis dumanı ilaveli numunelerin 1 aylık eğilmede çekme dayanımının en düşük olduğu görüldü. Kür süresi arttıkça silis dumanı ilaveli harç numunelerin eğilmede çekme dayanımında artış görüldü. Genellikle harç numunelerde çimento ağırlığının %10 oranına kadar silis dumanı ilavesi yapılmaktadır. Bu çalışmada normalin üstünde kullanılan %20 silis dumanı ilavesi numunelerin ilerleyen zamanlardaki eğilme dayanımlarında magnezyum sülfat çözeltisine rağmen az miktarda artış meydana getirdi. Oda sıcaklığında, 5°C'de ve 40°C'de

magnezyum sülfat çözeltisindeki silis dumanı ilaveli numunelerde gözle görülür bozulmalar oluştu.

Farklı sıcaklıkta magnezyum sülfat çözeltisine maruz numunelerin yüzeyinde ilk günlerde beyaz tabaka halinde brüsit ve alçıtaşı oluştuğu gözlemlendi. Oluşan bu tabakanın 40°C'deki numunelerde daha belirgin olduğu tespit edildi. Bunu sırasıyla oda sıcaklığındaki numuneler ve 5°C'deki numuneler takip etti. Yüksek ortam sıcaklığında numune yüzeyindeki reaksiyonların daha hızlı gerçekleştiği ve numune yüzeyinde alçıtaşı ve brüsit tabakasının diğer numunelere göre daha hızlı oluştuğu düşünülmektedir. 4 aylık eğilimde çekme dayanımlarının 40°C'deki numunelerde oda sıcaklığında ve 5°C'deki numunelere göre daha yüksek olduğu gözlemlendi. Bu durum sıcak ortamdaki numunelerde hidrasyonun daha çabuk gerçekleştiğini göstermektedir. Kimyasal reaksiyonlardaki hızlanma 40°C'de magnezyum sülfat çözeltisindeki numunelerin yüzeyindeki daha çabuk ve belirgin beyazlamanın nedeni olabilir.

Farklı sıcaklıkta bekletilen harç numunelerde gözle görülür ilk bozulmalar 5°C'de magnezyum sülfat çözeltisindeki numunelerde oldu. Bu kür havuzundaki numunelerin yüzeylerinde küçük parçacıkların kopması şeklinde malzeme kaybıyla meydana gelen bozulmalara rastlandı. 5°C'de magnezyum sülfat çözeltisine maruz numunelerin etrafındaki beyaz tabakanın daha az olmasının, bu numunelerin yüzeyinde küçük malzeme kopması şeklinde meydana gelen bozulmanın nedeni olduğu düşünülmektedir. 40°C'deki numunelerle 5°C'deki numuneler kıyaslandığında numune etrafındaki beyaz tabakanın koruyuculuk etkisi yaptığı görülmektedir. Bu beyaz tabaka küçük parçacıklar halinde harç numune yüzeyindeki dökülmeleri engellemiştir.

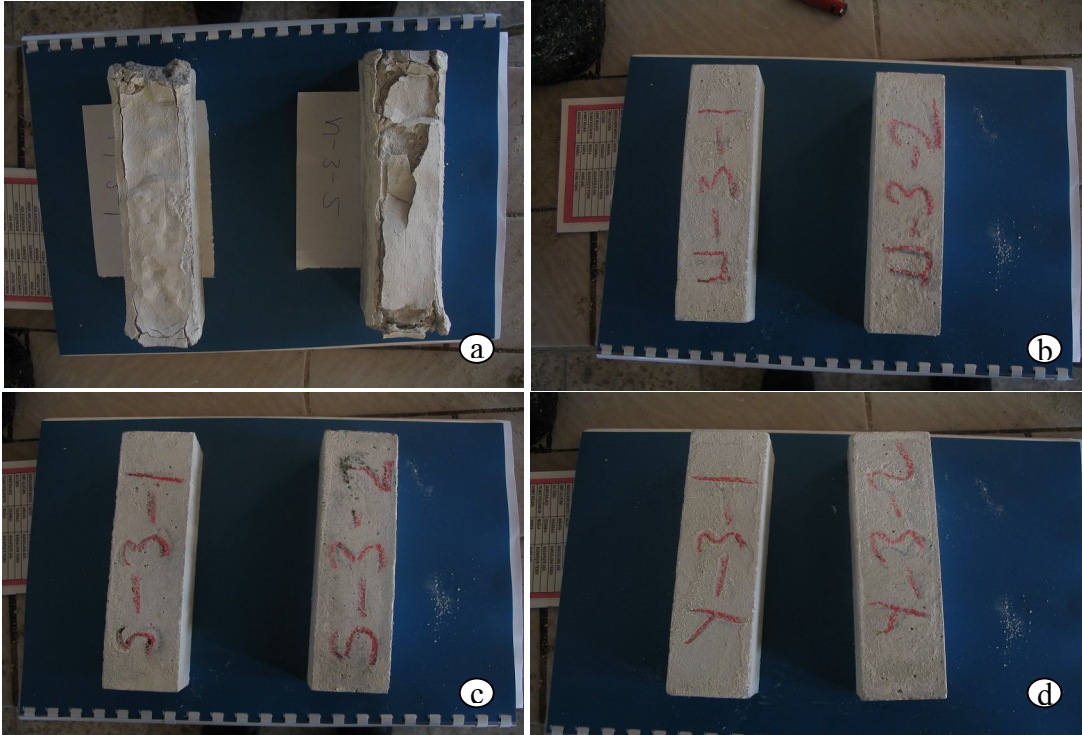
Oda sıcaklığında magnezyum sülfat çözeltisine maruz numunelerde 7. aydan sonra belirgin derin çatlaklar oluştu. Çatlak oluşumunu takiben numunelerde hızlı bozulma gözlemlendi. Bu numunelerin 13. ayda eğilimde çekme dayanımı sıfıra düştü. Eğilme dayanımı sıfıra düşen ilk numuneler oda sıcaklığındaki magnezyum sülfat çözeltisine maruz mineral katkı içermeyen numunelerdir.

5°C'de bekletilen harç numunelerde ilk bozulma mineral katkısız numunelerde görüldü. Bunu sırasıyla uçucu kül katkılı numuneler ve yüksek fırın cürufu katkılı numuneler takip etti. Silis dumanı katkılı numunelerde 23. aya kadar gözle görülür bir bozulma meydana gelmemiştir.

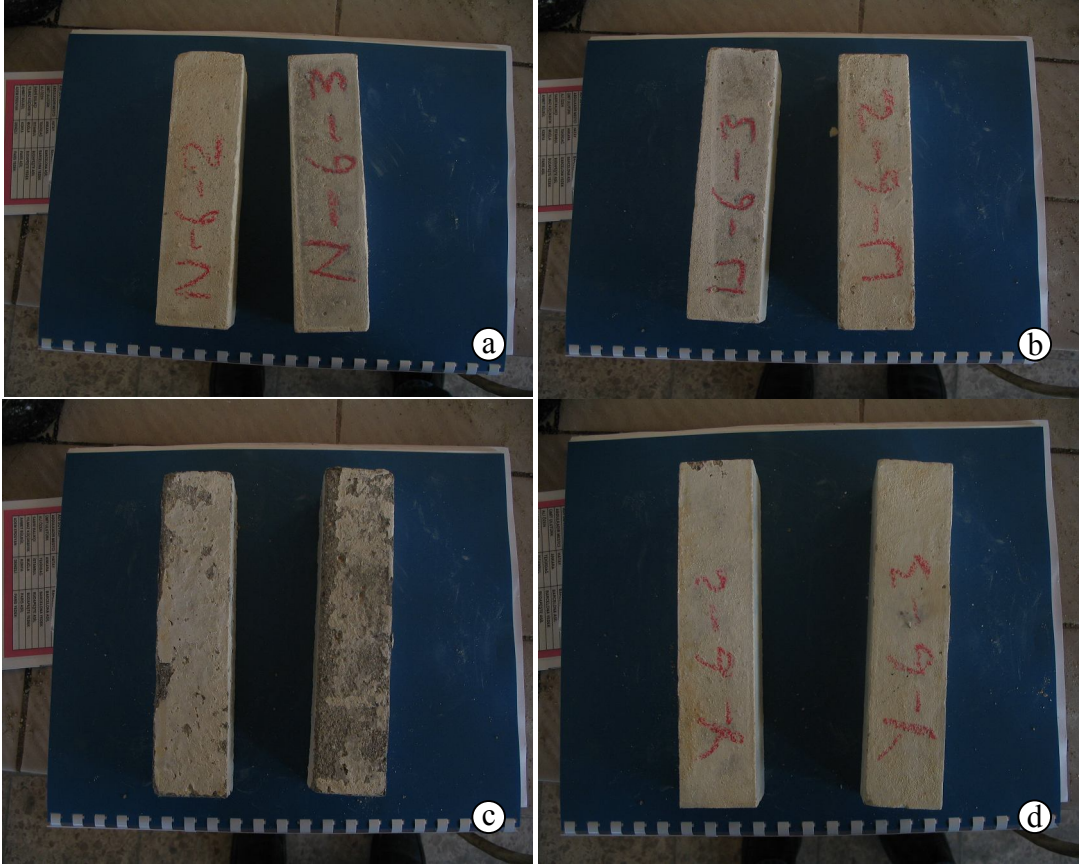
Mineral katkılı harç numunelerin eğilimde çekme dayanımlarına bakıldığında 1., 4., 7., 10. ve 13. aylardaki en düşük değer silis dumanı ilaveli harçlardadır. Ancak numune

görüntüleri incelendiğinde ise en az bozulmanın silis dumanı ilaveli harçlarda olduğu görülmektedir. Bu durum eğilmede çekme dayanımı yüksek numunelerin sülfatlı ortamlarda daha iyi performans göstereceği anlamına gelmediğini göstermektedir. Özellikle oda sıcaklığında uçucu kül ilaveli numunelerle silis dumanı ilaveli numuneler kıyaslandığında 4. aydaki uçucu kül katkılı harç numunelerin eğilmedeki çekme dayanımı daha yüksek iken 21. ayda uçucu kül katkılı numunelerin eğilme dayanımında belirgin bir azalma görülürken aynı aylardaki silis dumanı ilaveli numunelerin eğilmede çekme dayanımında artış görülmektedir. Eğilmede çekme dayanımlarındaki değişimler kamera görüntüleriyle belirlenen bozulmalarla paralellik göstermektedir. Numune yüzeyinde gözle görülür bozulma hangi numunede fazla olmuşsa o numunenin eğilmede çekme dayanımı da o kadar düşük olmaktadır. Numune yüzeyinde gözle görülür çatlak tespitinden sonra eğilmede çekme dayanımlarında çatlak oluşumu öncesine göre kayda değer düşmeler olmaktadır.

3.2.3. Farklı Sıcaklıklardaki Magnezyum Sülfatlı Çözeltideki Harç Numuneler



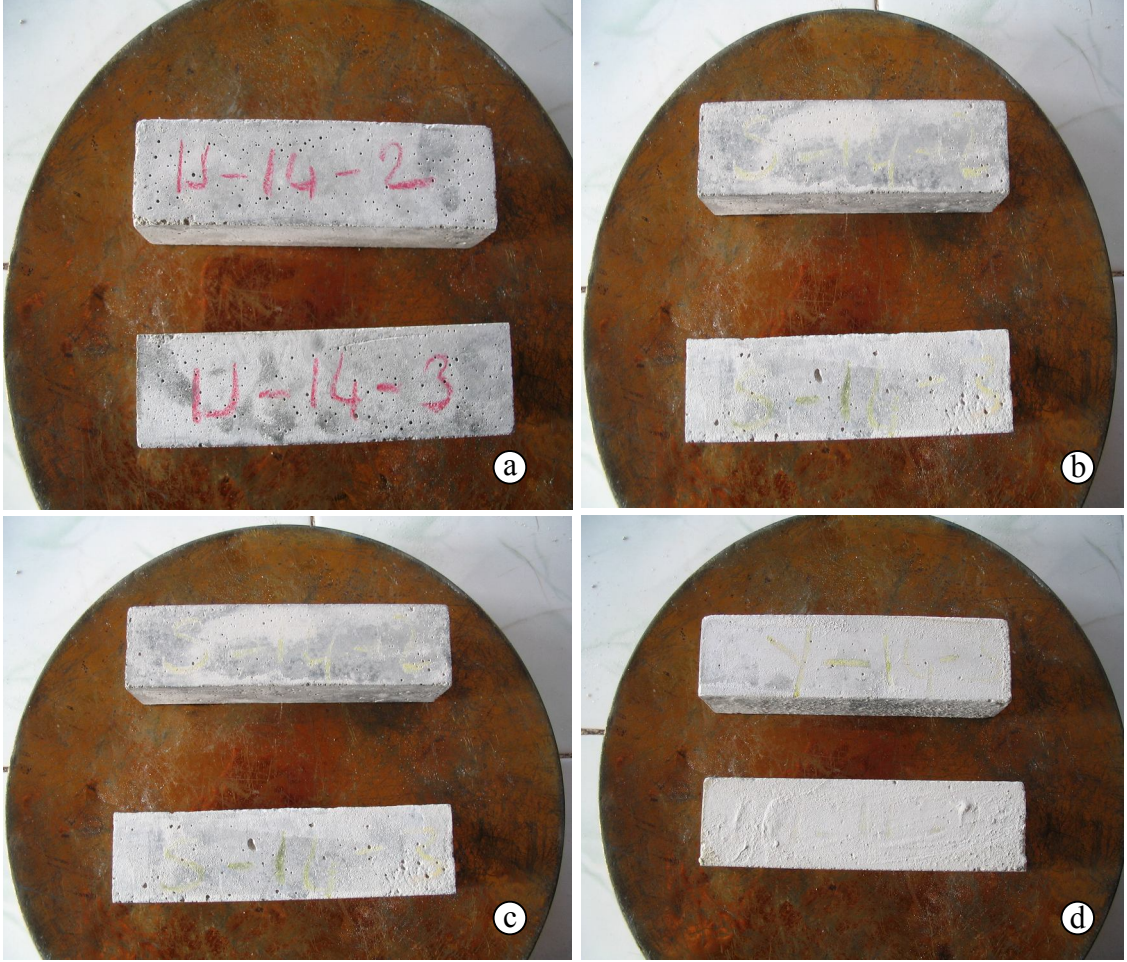
Şekil 16. 7 ay oda sıcaklığında magnezyum sülfat çözeltisinde bekletilmiş harç numune görüntüleri. (a) Mineral katkısız harç numuneler, (b) Uçucu kül katkılı harç numuneler, (c) Silis dumanı katkılı harç numuneler, (d) Yüksek fırın cürufu katkılı harç numuneler.



Şekil 17. 7 ay 40°C'deki magnezyum sülfat çözeltisinde bekletilmiş harç numune görüntüleri. (a) Mineral katkısız harç numuneler, (b) Uçucu kül katkılı harç numuneler, (c) Silis dumanı katkılı harç numuneler, (d) Yüksek fırın cürufu katkılı harç numuneler



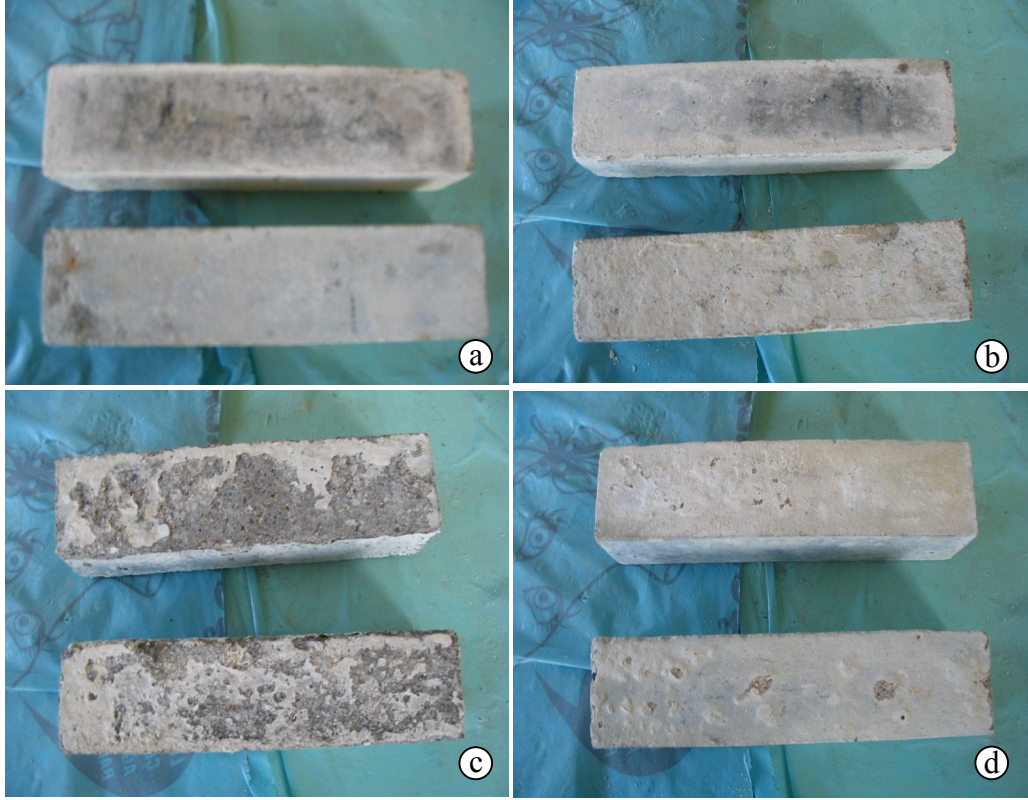
Şekil 18. 7 ay 5°C'deki magnezyum sülfat çözeltisinde bekletilmiş harç numune görüntüleri. (a) Mineral katkısız harç numuneler, (b) Uçucu kül katkılı harç numuneler, (c) Silis dumanı katkılı harç numuneler, (d) Yüksek fırın cürufu katkılı harç numuneler.



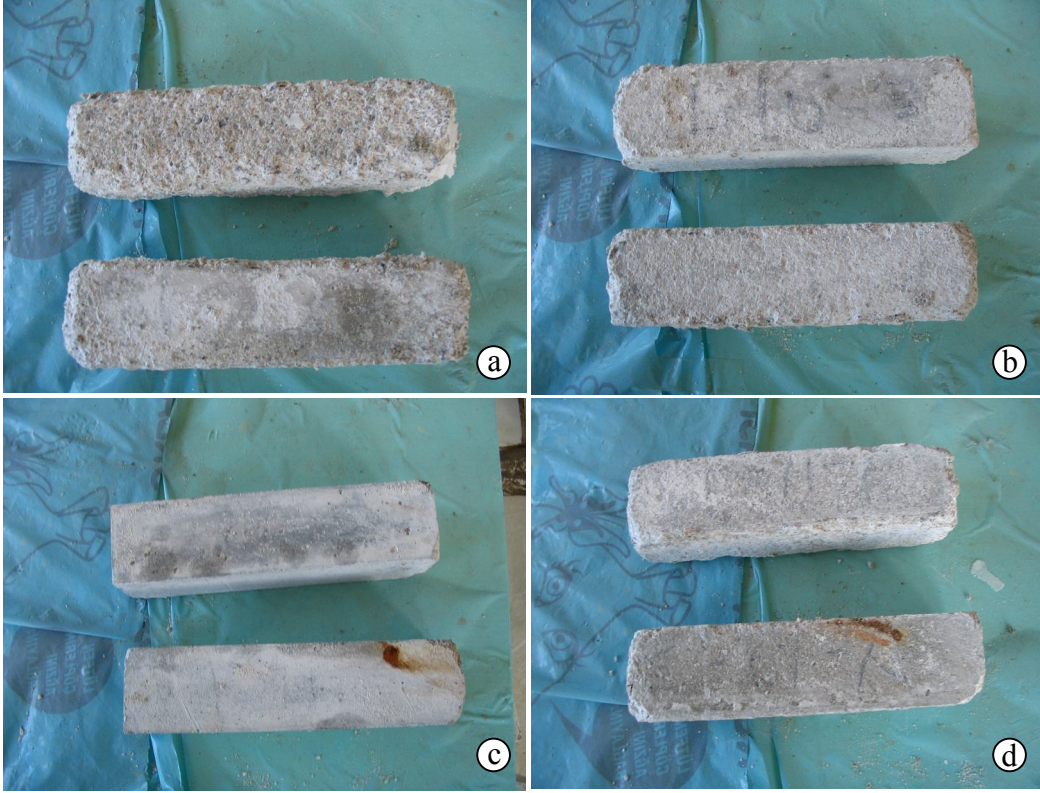
Şekil 19. 7 ay standart kür havuzunda bekletilmiş harç numune görüntüleri. (a) Mineral katkısız harç numuneler, (b) Uçucu kül katkılı harç numuneler, (c) Silis dumanı katkılı harç numuneler, (d) Yüksek fırın cürufu katkılı harç numuneler.



Şekil 20. 13 ay oda sıcaklığında magnezyum sülfat çözeltisinde bekletilmiş harç numune görüntüleri. (a) Mineral katkısız harç numuneler, (b) Uçucu kül katkılı harç numuneler, (c) Silis dumanı katkılı harç numuneler, (d) Yüksek fırın cürufu katkılı harç numuneler.



Şekil 21. 13 ay 40°C'deki magnezyum sülfat çözeltisinde bekletilmiş harç numune görüntüleri. (a) Mineral katkısız harç numuneler, (b) Uçucu kül katkılı harç numuneler, (c) Silis dumanı katkılı harç numuneler, (d) Yüksek fırın cürufu katkılı harç numuneler.



Şekil 22. 13 ay 5°C'deki magnezyum sülfat çözeltisinde bekletilmiş harç numune görüntüleri. (a) Mineral katksız harç numuneler, (b) Uçucu kül katkılı harç numuneler, (c) Silis dumanı katkılı harç numuneler, (d) Yüksek fırın cürufu katkılı harç numuneler.



Şekil 23. 18 ay oda sıcaklığında magnezyum sülfat çözeltisinde bekletilmiş harç numuneler

Şekil 23’de sol üsteki görüntüde mineral katkı içermeyen harç numunelerden 18 ay sonunda geriye kalan parçalar görülmektedir. Mineral katkı içermeyen harç numuneler harç özelliğini kaybedip çamurumsu bir yapıya dönüştü. Geriye kalan parçalar numunelerin dış yüzeylerinde kalan elle kolayca kırılabilen gevrek bir özelliğe sahip kabuk şeklindedir. Şekil 21’de sağ üst tarafta uçucu kül katkılı, sol alt tarafta silis dumanı katkılı, sol alt tarafta yüksek fırın cürufu katkılı harç numuneler görülmektedir. 23 aylık süre içerisinde oda sıcaklığında magnezyum sülfat çözeltisindeki numunelerde gözle görülebilen çatlak türü oluşumlara rastlanmadı.



Şekil 24. 18 ay 40°C’de magnezyum sülfat çözeltisinde bekletilmiş harç numune görüntüleri

Şekil 24’de sol üst taraftaki numuneler silis dumanı katkılı, sağ üst taraftaki numuneler yüksek fırın cürufu katkılı, sağ alt taraftaki numuneler mineral katkısız, sol alt taraftaki numuneler uçucu kül katkılı numunelerdir. 40°C’de magnezyum sülfat çözeltisindeki numunelerin dış yüzeyinde hızlı bir biçimde beyaz bir tabaka oluştu. Bu sıcaklıkta silis dumanı ilaveli numunelerin ilk 1 aylık sürelerinde yüzeydeki beyaz tabaka üzerinde çatlamlar meydana geldi. Bu çatlaklar sıcaklıktan dolayı %20 gibi yüksek miktarda silis dumanı kullanımının meydana getirdiği genişmeden kaynaklanmıştır. Şekil 26, Şekil 27 ve Şekil 28’deki taramalı elektron mikroskobu görüntüleri incelendiğinde 40°C’deki silis dumanı katkılı numunelerde oluşan çatlaklar diğer ortamlarda kür edilen silis dumanı katkılı numunelerdeki çatlaklardan daha belirgindi. 23 aylık süre sonunda 40°C’deki numunelerin yüzeyinde brüsit ve alçıtaşından oluşan beyaz tabakada noktasal kabarmalar biçiminde yüzeysel bozulmalar gözlemlendi.

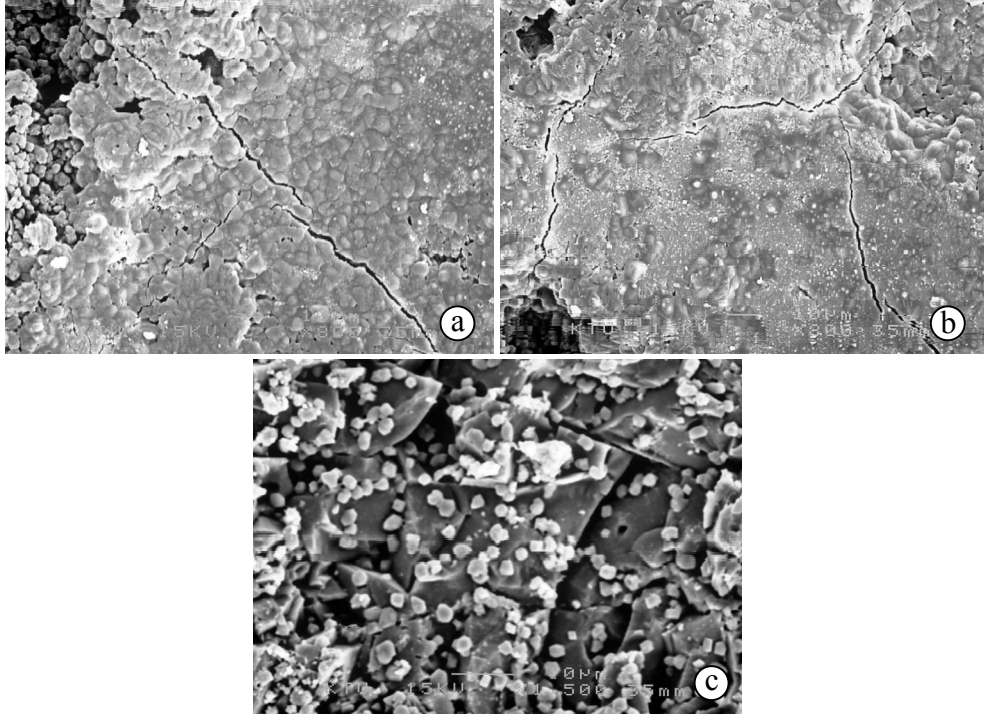


Şekil 25. 18 ay 5°C’de magnezyum sülfat çözeltisinde bekletilmiş harç numune görüntüleri

Şekil 25’te sol üst taraftaki iki numune mineral katkısız, sağ üst taraftaki iki numune uçucu kül katkılı, sol alt taraftaki iki numune silis dumanı katkılı, sağ alt taraftaki iki numune yüksek fırın cürufu katkılı numunelerdir. 5°C’de numunelerde ilk bozulma mineral katkısız numunelerde başladı. Bunu uçucu kül katkılı numuneler ve yüksek fırın cürufu katkılı numuneler takip etti. Silis dumanı katkılı numunelerde gözle görülür bir bozulma meydana gelmedi. Bu sıcaklıkta numunelerdeki bozulmalar oda sıcaklığındaki numunelerdeki bozulmalardan daha erken başlamasına rağmen bozulmanın seyri farklı oldu. Şekil 18-(a)’da görüldüğü gibi derin çatlaklar yerine yüzeyde malzeme kopması şeklinde bozulmalar gözlemlendi. Bahsedilen durum Şekil 20 (a) ile Şekil 22 (a) kıyaslandığında daha belirgin görülebilir.

3.2.4. Magnezyum Sülfat Çözeltisine Maruz Harç Numunelerin Mikro Yapısal İncelenmesi

3.2.4.1. 40°C'de Magnezyum Sülfat Çözeltisine Maruz Silis Dumanı Katkılı Harç Numuneler

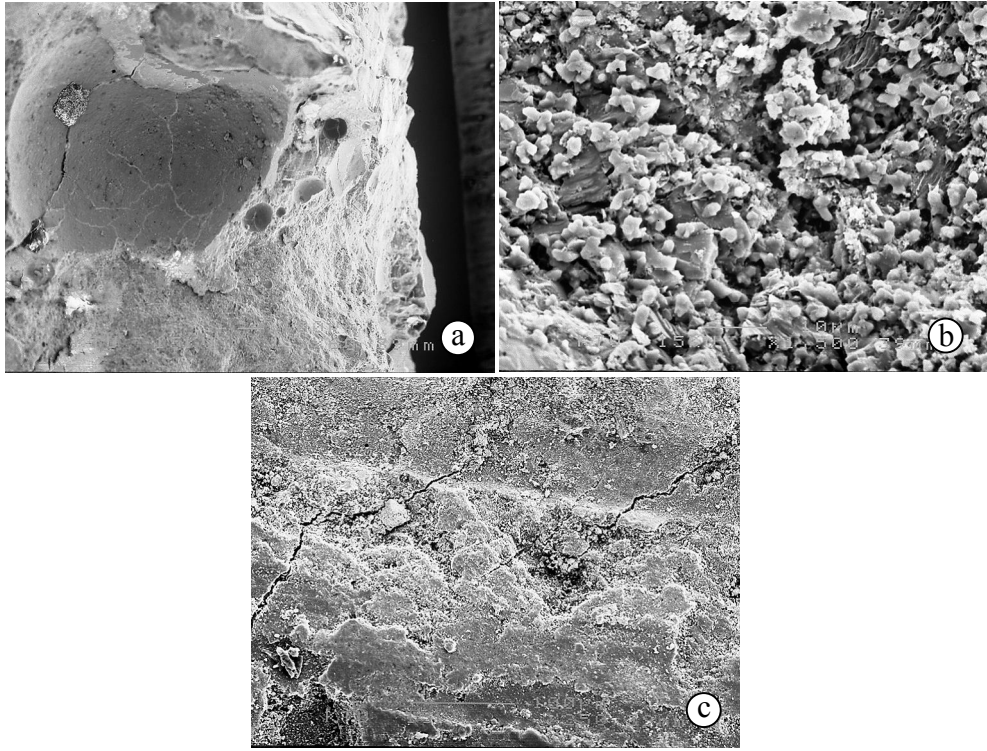


Şekil 26. Taramalı elektron mikroskobu görüntüleri. (SEM) (a) SEMx800, (b) SEMx800, (c) SEMx1500

Şekil 26 (a) ve Şekil 26 (b) görüntülerinde çatlaklar belirgin bir biçimde görülmektedir. Bu çatlakların iç kenar yüzeylerindeki beyazlama alçıtaşı oluşumunu göstermektedir. Çatlak içindeki beyazlama bu çatlaklara magnezyum sülfat çözeltisinin nüfuz ettiğinin kanıtıdır. Çatlak oluşumları Şekil 26 (a)'da sol üst köşedeki, Şekil 26 (b)'de sol alt köşedeki boşluklarda başladığı ve çimento hamuru içerisine doğru ilerlediği düşünülmektedir. Şekil 26 (b)'deki sağ üsteki çatlığa bakıldığında yine bir boşluktan başladığı ve sola doğru çimento hamuru içerisinde ilerlediği görülmektedir. Aynı numunelerin kamera görüntüleri incelendiğinde sadece dış yüzeyini kaplayan alçıtaşında kabarmalar ve patlamalar gözlemlendiği halde numunenin elektron mikroskobundaki görüntülerine bakıldığında magnezyum sülfat çözeltisinin numunenin iç kısımlarında da çatlak türünde bozulmalara neden olduğu anlaşılmaktadır. Bu numunelerde oluşan çatlaklar ilerleyerek diğer çatlaklarla ve boşluklarla birleşmektedirler. Şekil 26 (b)'de sağ ve soldaki iki çatlığa bakıldığında bu durum daha net olarak anlaşılmaktadır. Bu şekilde

çatlakların gelişmesi beton içerisine sülfat çözeltisinin daha çok nüfuz etmesine neden olacak ve belli bir süreden sonraki bozulmalarda ilk zamanlara göre daha hızlı ceryan edecektir. Özellikle mineral katkı içermeyen numunelerin kamera görüntüleri incelendiğinde numunelerin yüzeyinde ilk 7 aylık sürede fazla bir değişim meydana gelmediği görüldü de bu aydan sonra numune yüzeyinde belirgin çatlak oluşumunu takiben 3 ay gibi kısa bir sürede numune tamamıyla çamurumsu bir yapıya dönüşmüştür.

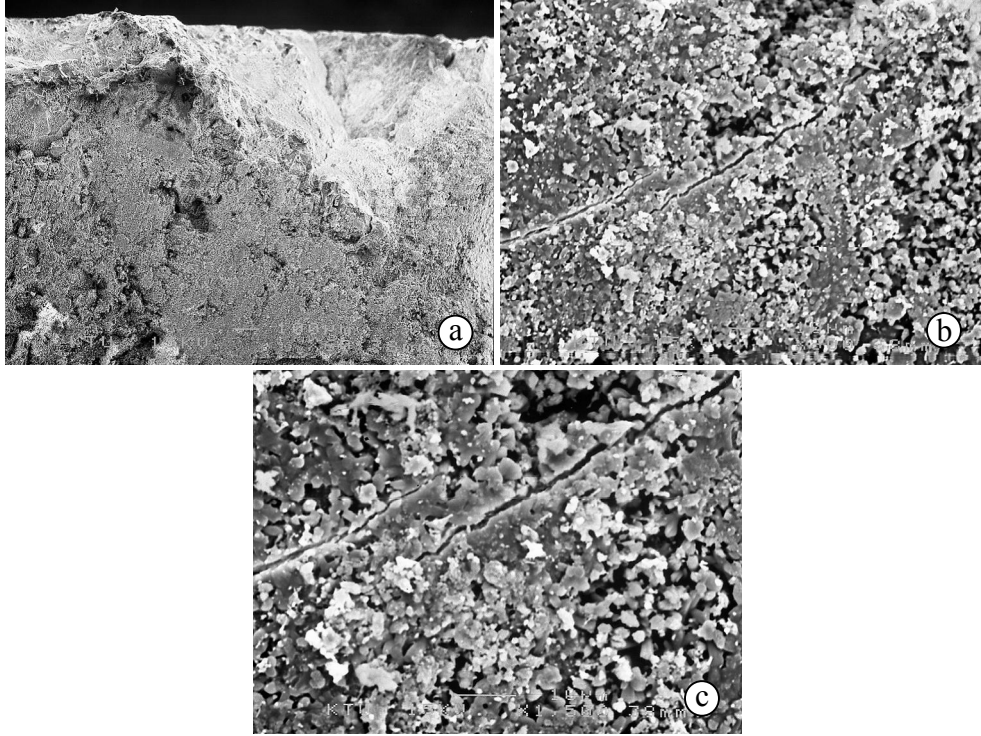
3.2.4.2. Oda Sıcaklığında Magnezyum Sülfat Çözeltisine Maruz Silis Dumamı Katkılı Harç Numuneler



Şekil 27. Taramalı elektron mikroskobu görüntüleri. (a) SEMx60, (b) SEMx1500, (c) SEMx250

Şekil 27 (a)'da oda sıcaklığında magnezyum sülfatlı çözeltideki numunenin kenarı görülmektedir. Bu görüntü 800 kat büyütülerek çekilen görüntülerden çok daha az büyütülerek çekilmesine rağmen oluşan çatlak oluşumları ve dış yüzeyde beton özelliğini yitirmiş beyaz tabaka görülmektedir. Şekil 27 (c)'de özellikle boşluk kenarlarındaki beyaz kısımlardan da bu bölgelerde de sülfat atağının varlığı anlaşılmaktadır. Alçıtaşı oluşumunun çok olduğu bölgelerde özellikle değişik boy ve kalınlıkta çatlak oluşumları da mevcuttur.

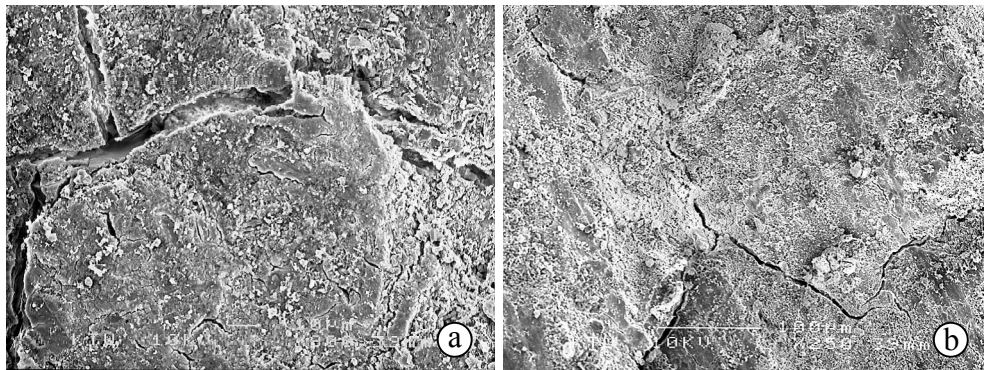
3.2.4.3. 5°C'deki Magnezyum Sülfat Çözeltisine Maruz Silis Dumanı Katkılı Harç Numuneler



Şekil 28. Taramalı elektron mikroskobu görüntüleri. (a) SEMx60, (b) SEMx800, (c) SEMx1500

Şekil 28'de Şekil 26 ve 27'deki benzer görüntülere rastlanmaktadır.

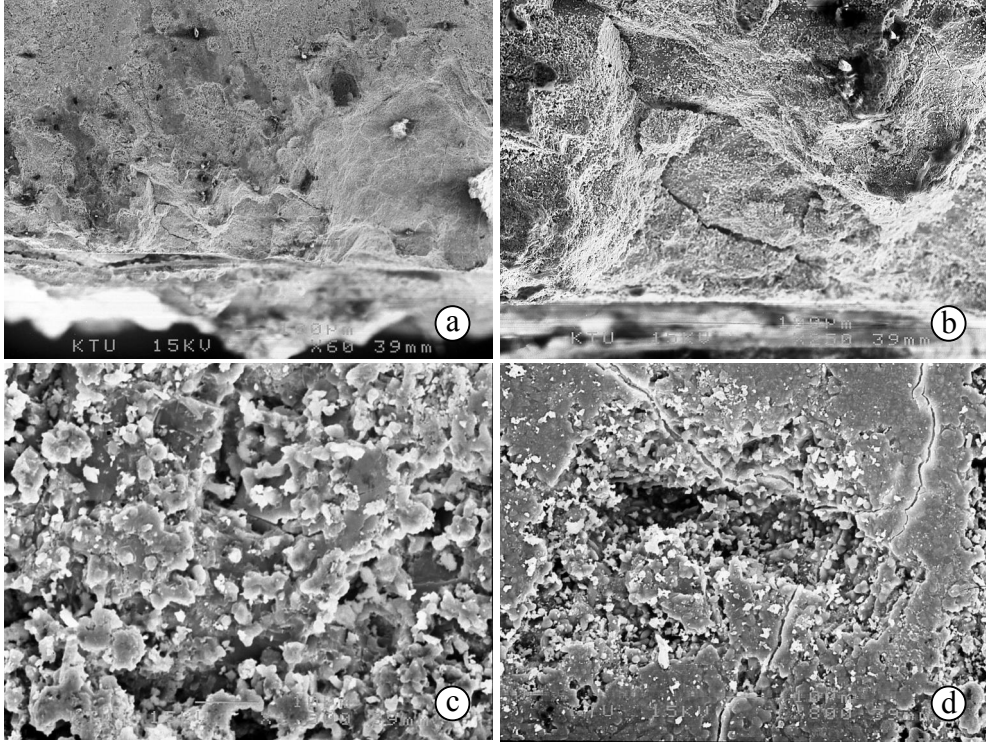
3.2.4.4. 40°C'de Magnezyum Sülfat Çözeltisine Maruz Uçucu Kül Katkılı Harç Numuneler



Şekil 29. Taramalı elektron mikroskobu görüntüleri. (a) SEMx800, (b) SEMx250

Şekil 29'de aynı çatlaktan çekilen iki görüntü görülmektedir. 800 kat büyütürük çekilen görüntüde çatlak içerisinde yeni madde oluşumu görülmektedir.

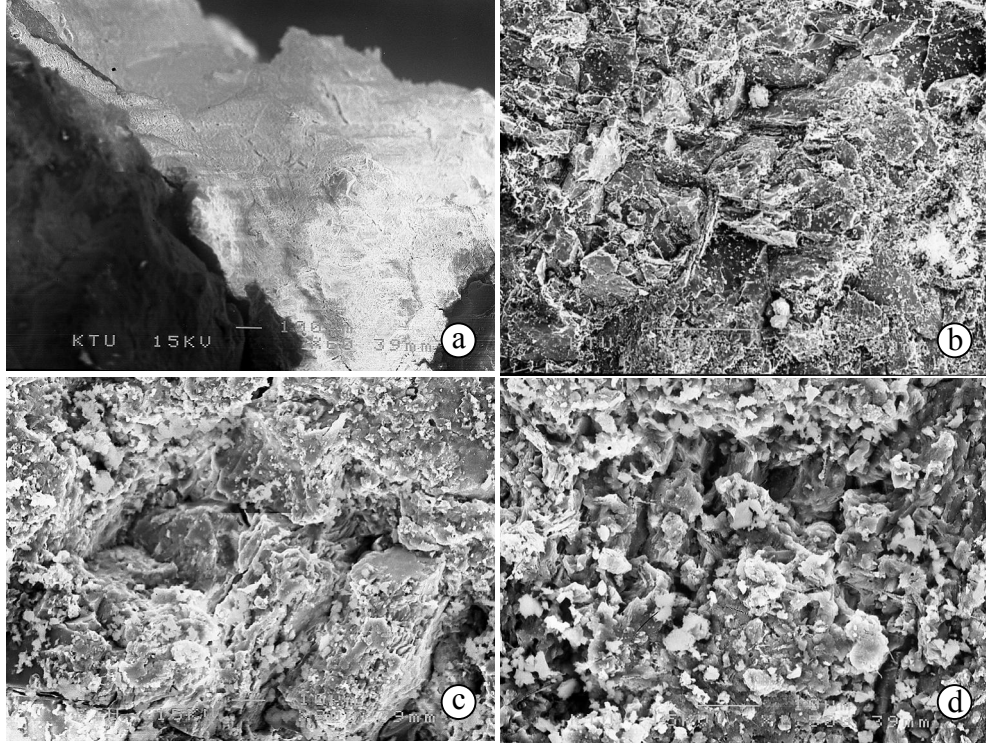
3.2.4.5. Oda Sıcaklığında Magnezyum Sülfat Çözeltisine Maruz Uçucu Kül Katkılı Harç Numuneler



Şekil 30. Taramalı elektron mikroskobu görüntüleri. (a) SEMx60, (b) SEMx250, (c) SEMx1500, (d) SEMx800

Şekil 30 (a) ve (b) görüntülerinin alt kısımlarında numunenin çözelti ile doğrudan temas ettiği kenar kısmı görülmektedir. Kenar kısmında ince bir beyaz tabaka görülmektedir. Şekil 30 (b)'nin alt kısmında oluşan beyaz tabaka ile beton yüzeyindeki ayrılma net olarak anlaşılmaktadır. Silis dumanı ilaveli numunelerde görüldüğü gibi uçucu kül ilaveli numunelerde de benzer çatlak oluşumlarına rastlanmaktadır.

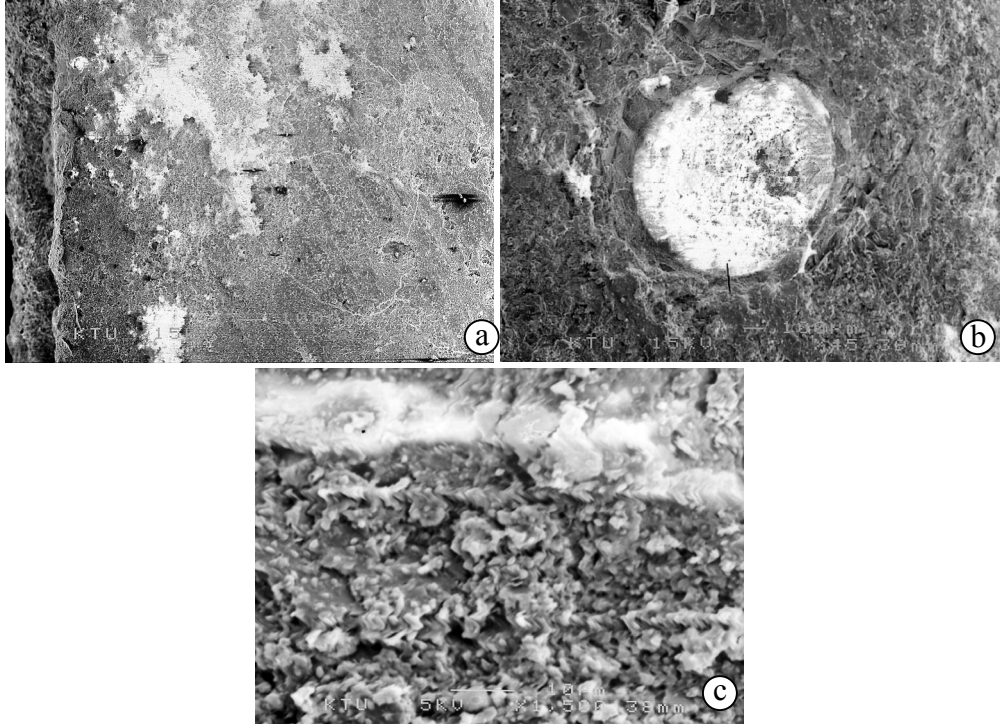
3.2.4.6. 5°C’de Magnezyum Sülfat Çözeltisine Maruz Uçucu Kül Katkılı Harç Numuneler



Şekil 31. Taramalı elektron mikroskobu görüntüleri. (a) SEMx60, (b) SEMx250, (c) SEMx800, (d) SEMx1500

Şekil 31’deki görüntülerde çatlaklar ve bu çatlaklar içinde oluşmuş kristal yapıları elemanlar görülmektedir.

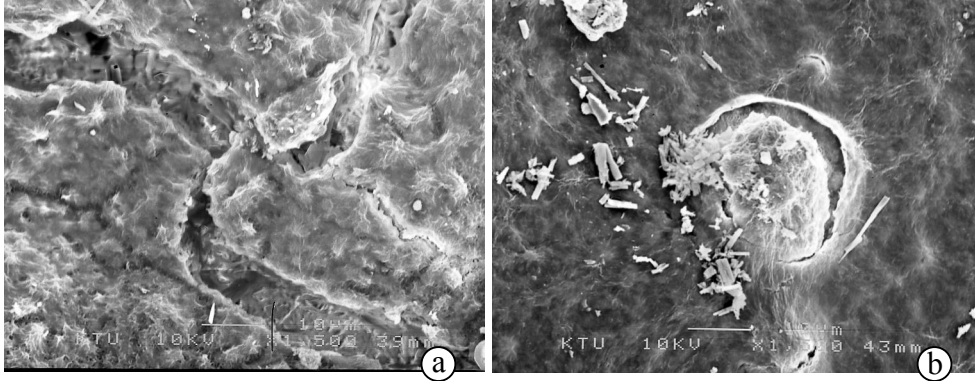
3.2.4.7. 40°C'de Magnezyum Sülfat Çözeltisine Maruz Mineral Katkı İçermeyen Harç Numuneler



Şekil 32. Taramalı elektron mikroskobu görüntüleri. (a) SEMx60, (b) SEMx45, (c) SEMx1500

Şekil 32 (a)'nın sol kenarı numunenin çözeltiyle doğrudan temas ettiği köşedir. Bu köşedeki beyaz tabaka ile numune yüzeyi arasında oluşan ayrılma görülmektedir. Magnezyum sülfat çözeltisindeki numunelerin gözlemlenmesi sırasında da numunelerin etrafında beyaz tabaka oluşmakta ilerleyen zamanda bu tabakada kopmalar meydana gelerek numuneden ayrılmalar gözlenmiştir. Şekil 32 (a) ve Şekil 32 (c)'de etraftan oldukça farklı beyaz renkli yeni oluşumlar görülmektedir. Çekilen görüntülerin incelendiğinde bu elemanın sonradan oluşmuş olduğu açıkça anlaşılmaktadır. Şekil 32 (b) görüntüsünde harç numune dökümü esnasında oluşan hava boşluğu içinde oluşmuş kristal yapıları elemanlar görülmektedir.

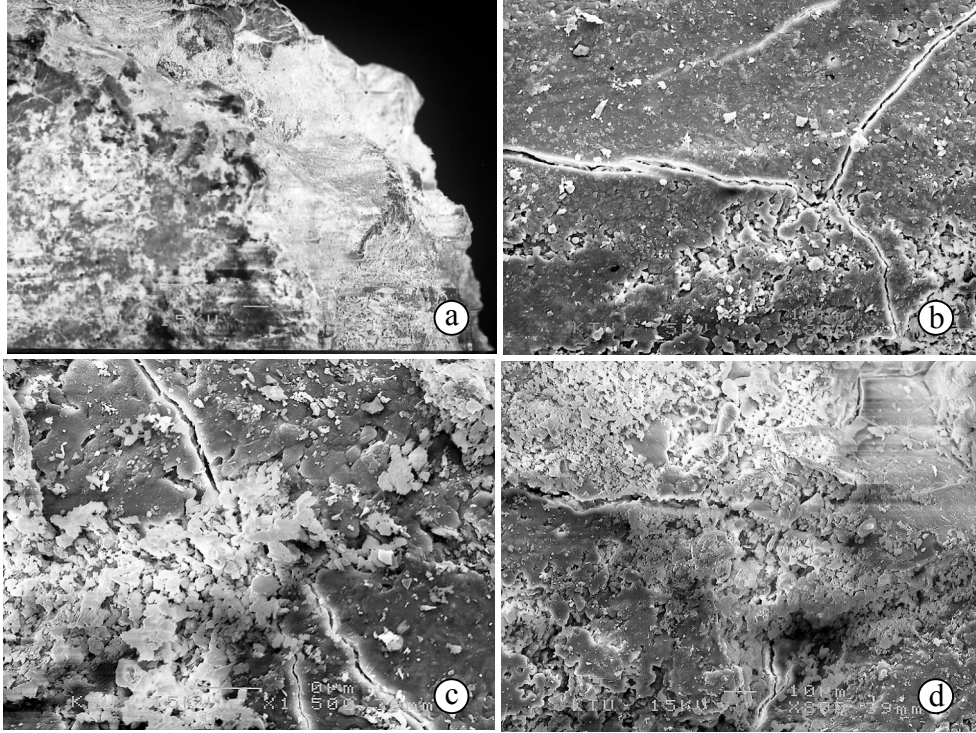
3.2.4.8. Oda Sıcaklığında Magnezyum Sülfat Çözeltisine Maruz Mineral Katkı İçermeyen Harç Numuneler



Şekil 33. Taramalı elektron mikroskobu görüntüleri. (a) SEMx1500, (b) SEMx1500

Şekil 33'teki numuneler Şekil 23'teki sol üstte görünen mineral katkı ilavesiz harç numunesinin bozulmasından sonra kalan kabuk şeklindeki parçalardan elde edildi. Bu parçalar harç numune özelliğini kaybetmiş gevrek parçalardır. Şekil 33 (a)'da çatlak oluşumu ve bu çatlağın içindedeki kristal yapı elemanları görülmektedir. Çatlağın sol üst kolunun orta kısmında ise fotoğraf çekimi sırasında kristal yapı elemandan kaynaklanan parlama görülmektedir. Şekil 33(b)'de hilal şeklinde oluşan çatlağın içinde açan çiçek şeklinde oluşumlar görülmektedir. Bu oluşumların harç numunede sonradan meydana geldiği şüphesizdir.

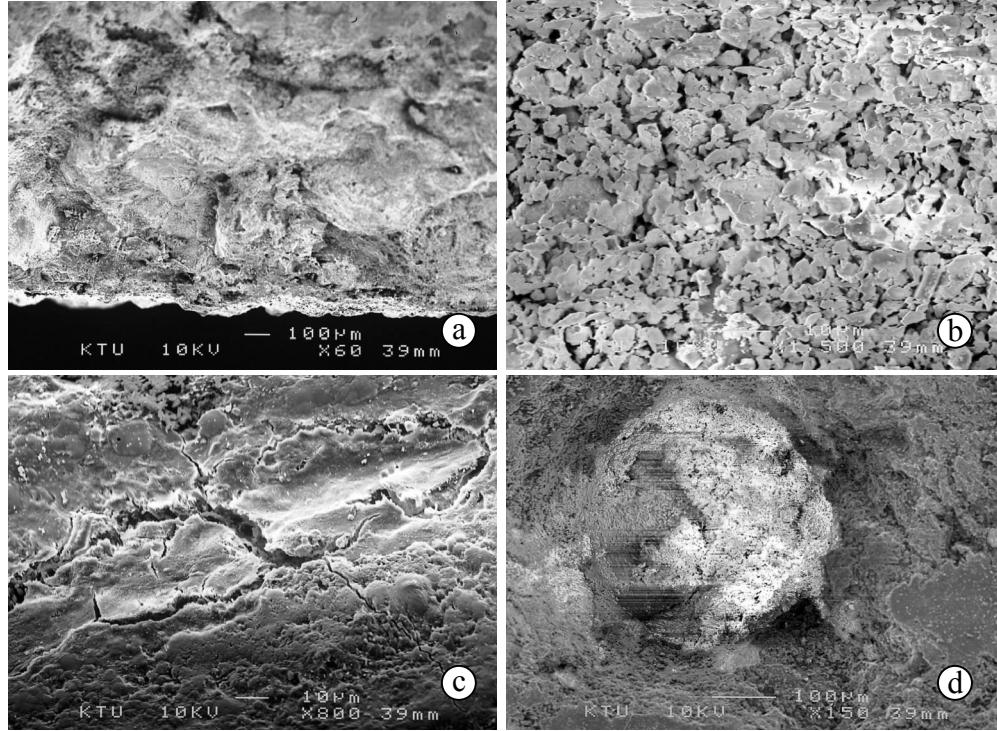
3.2.4.9. 5°C'de Magnezyum Sülfat Çözeltisine Maruz Mineral Katkı İçermeyen Harç Numuneler



Şekil 34. Taramalı elektron mikroskobu görüntüleri. (a) SEMx60, (b) SEMx800, (c) SEMx1500, (d) SEMx800

21 aylık süre sonunda magnezyum sülfat çözeltisinde mineral katkı içermeyen oda sıcaklığındaki ve 5°C'deki harç numunelerin en çok etkilendiği görüldü. Şekil 32 ve Şekil 33 incelendiğinde de en fazla değişik türde oluşumlara bu numunelerde rastlandığı görülmektedir. Şekil 32 (a)'da numune kenar görüntüsü görülmektedir. Bu numunelerin dış yüzeylerinde dökülme şeklinde malzeme kaybı oluştu. Numune kenarının alçıtaşı olduğu düşünülen beyaz tabakayla kaplı olduğu görülmektedir. Şekil 34 (c) ve Şekil 34 (d)'de çatlak oluşumu ve çatlaklarla bağlantılı boşluklarda yeni madde oluşumları görülmektedir. Sonradan oluştuğu düşünülen maddelerin bulunduğu yerlerde sıkça çatlak oluşumlarına rastlanmaktadır. Bu çatlakların yeni madde oluşumuyla ilgili olduğu söylenebilir.

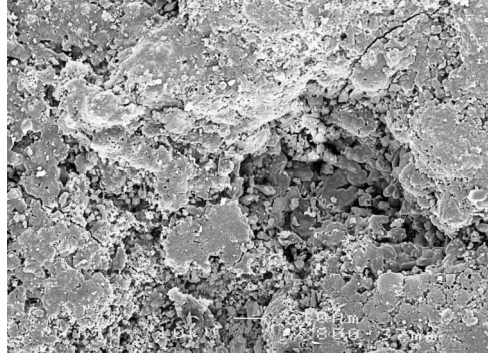
3.2.4.10. 40°C'de Magnezyum Sülfat Çözeltisine Maruz Yüksek Fırın Cürufu Katkılı Harç Numuneler



Şekil 35. Taramalı elektron mikroskobu görüntüleri. (a) SEMx60, (b) SEMx1500, (c) SEMx800, (d) SEMx150

Şekil 35 (a)'deki görüntüde oluşan çatlakın bu bölgede bir hacim artışı sonucu betonda meydana gelen patlama şeklinde oluşmuş olduğu düşünülmektedir. Çatlak incelendiğinde çatlakın etrafındaki kabarmalar net olarak görülmektedir. Şekil 35 (d)'de boşluk içerisinde kristal yapılı unsurlar görülmektedir. Şekil 35 (b)'deki görüntü Şekil 35 (d)'deki görüntünün büyütülmesinden elde edilmiştir.

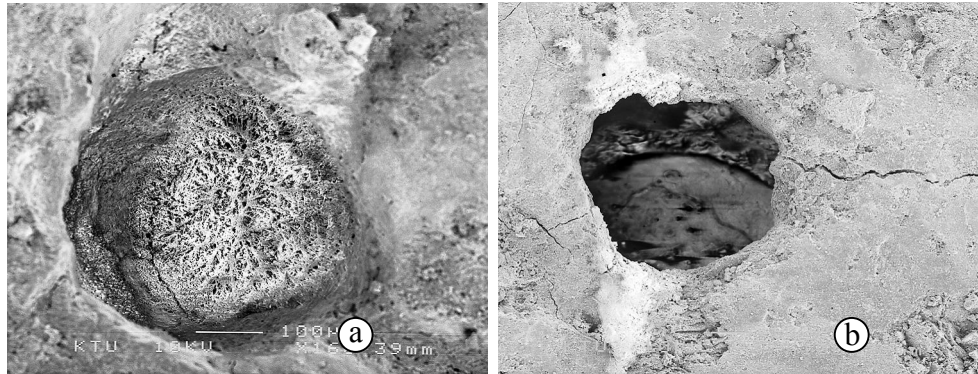
3.2.4.11. Oda Sıcaklığında Magnezyum Sülfat Çözeltisine Maruz Yüksek Fırın Cürufu Katkılı Harç Numuneler



Şekil 36. Taramalı elektron mikroskobu görüntüleri. SEMx800

Şekil 36'da beyaz renkte kendisini gösteren madde oluşumu ve çatlak oluşumu görülmektedir.

3.2.4.12. 5°C'de Magnezyum Sülfat Çözeltisine Maruz Yüksek Fırın Cürufu Katkılı Harç Numune



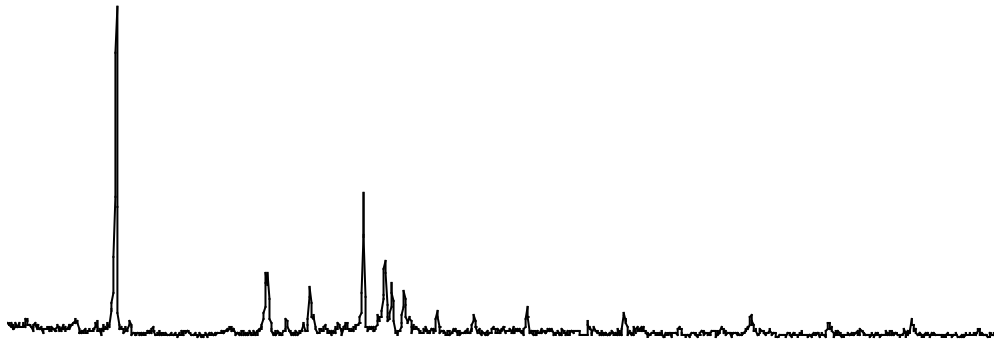
Şekil 37. Taramalı elektron mikroskobu görüntüleri. (a) SEMx160, (b) SEMx100

Şekil 37'de sonradan oluşmuş kristal yapıları görülmektedir. Bu unsurların oluştuğu bölgede çatlak meydana geldiği ve bu çatlak boşluk dışına doğru ilerlemiş olduğu görülmektedir.

3.2.5. Harç Numunelerde XRD ile Mineral Tespiti

3.2.5.1. Oda Sıcaklığında Magnezyum Sülfat Çözeltisine Maruz Mineral Katkısız Harç XRD Ölçüm Sonuçları

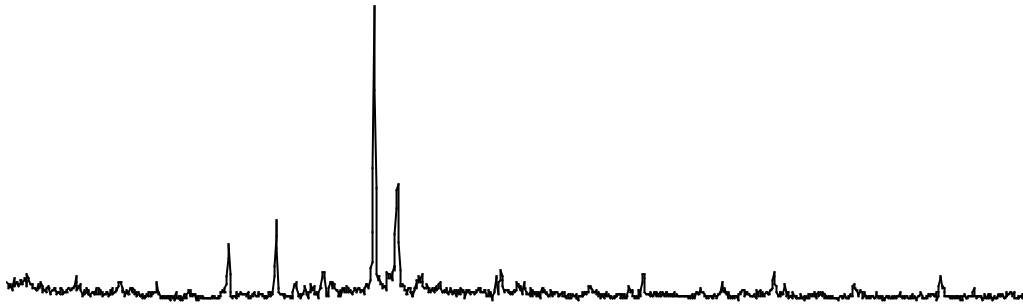
[1.MD] Scan Data								Peak Search Report
SCAN: 5.0/64.95/0.05/6(deg/m), Cu, I(cps)=2164, 06/13/07 03:20p								
PEAK: 11-pts/Parabolic Filter, Threshold=3.0, Cutoff=0.6%, BG=3/1.0, Peak-Top=Summit								
NOTE: Intensity = CPS, 2T(0)=0.0(deg), Wavelength to Compute d-Spacing = 1.54059Å (Cu/K-alpha1)								
#	2-Theta	d(Å)	BG	Height	H%	Area	A%	FWHM
1	6.175	14.3017	74	60	2.8	327	4.6	0.234
2	9.107	9.7023	58	74	3.5	498	7.1	0.285
3	11.578	7.6370	59	2105	100.0	7062	100.0	0.143
4	13.807	6.4086	31	49	2.3	227	3.2	0.197
5	15.852	5.5863	24	28	1.3	240	3.4	0.370
6	18.498	4.7927	36	46	2.2	333	4.7	0.308
7	20.713	4.2848	36	398	18.9	2392	33.9	0.256
8	21.922	4.0512	38	94	4.5	266	3.8	0.121
9	22.946	3.8726	43	55	2.6	249	3.5	0.191
10	23.349	3.8067	46	294	14.0	1433	20.3	0.207
11	24.252	3.6670	46	48	2.3	130	1.8	0.116
12	25.549	3.4837	56	48	2.3	150	2.1	0.134
13	26.598	3.3486	62	894	42.5	2972	42.1	0.141
14	27.896	3.1958	55	453	21.5	2975	42.1	0.279
15	28.311	3.1497	51	313	14.9	1333	18.9	0.181
16	29.059	3.0704	61	245	11.6	1188	16.8	0.206
17	31.060	2.8770	46	130	6.2	362	5.1	0.119
18	33.299	2.6885	41	121	5.7	427	6.0	0.150
19	34.462	2.6004	43	35	1.6	96	1.4	0.117
20	35.066	2.5570	46	36	1.7	215	3.0	0.252
21	36.521	2.4584	57	146	6.9	338	4.8	0.099
22	37.963	2.3682	41	25	1.2	116	1.6	0.195
23	39.273	2.2922	34	24	1.2	228	3.2	0.399
24	39.556	2.2765	31	25	1.2	228	3.2	0.380
25	40.236	2.2395	28	84	4.0	272	3.9	0.137
26	40.600	2.2203	28	52	2.5	289	4.1	0.237
27	42.411	2.1296	39	133	6.3	473	6.7	0.152
28	43.074	2.0983	36	42	2.0	496	7.0	0.502
29	43.540	2.0769	33	39	1.8	439	6.2	0.481
30	45.774	1.9806	28	46	2.2	161	2.3	0.148
31	48.334	1.8815	38	38	1.8	125	1.8	0.139
32	50.099	1.8193	40	116	5.5	585	8.3	0.214
33	50.716	1.7986	41	25	1.2	157	2.2	0.271
34	51.246	1.7812	23	41	1.9	338	4.8	0.352
35	52.695	1.7356	23	21	1.0	57	0.8	0.116
36	54.815	1.6734	25	79	3.7	480	6.8	0.259
37	55.248	1.6613	27	31	1.5	90	1.3	0.123
38	56.766	1.6204	26	34	1.6	160	2.3	0.202
39	58.570	1.5747	26	24	1.1	111	1.6	0.198
40	59.873	1.5435	24	112	5.3	553	7.8	0.211
41	63.907	1.4555	21	41	2.0	332	4.7	0.343



Şekil 38. X ışınları difraktogramı

3.2.5.2. 5°C'de Magnezyum Sülfat Çözeltisine Maruz Mineral Katkısız Harç XRD Ölçüm Sonuçları

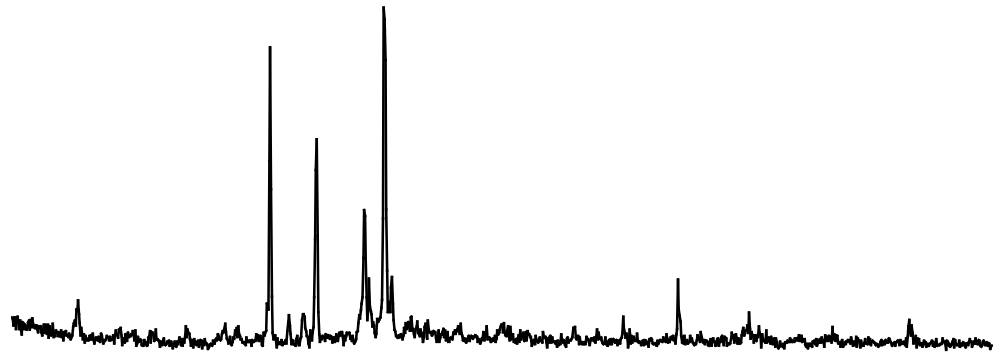
[3.MDI] Scan Data										Peak Search Report	
SCAN: 5.0/64.95/0.05/6(deg/m), Cu, I(cps)=1446, 06/13/07 03:09p											
PEAK: 11-pts/Parabolic Filter, Threshold=3.0, Cutoff=0.6%, BG=3/1.0, Peak-Top=Summit											
NOTE: Intensity = CPS, 2T(0)=0.0(deg), Wavelength to Compute d-Spacing = 1.54059Å (Cu/K-alpha1)											
#	2-Theta	d(Å)	BG	Height	H%	Area	A%	FWHM			
1	6.223	14.1917	77	63	4.6	420	10.6	0.283			
2	7.000	12.6183	66	36	2.7	72	1.8	0.084			
3	9.048	9.7656	47	75	5.5	424	10.7	0.241			
4	11.621	7.6087	42	60	4.4	360	9.1	0.254			
5	12.317	7.1804	41	29	2.1	120	3.0	0.176			
6	13.345	6.6295	29	23	1.7	151	3.8	0.273			
7	13.833	6.3964	28	68	5.0	270	6.8	0.168			
8	15.703	5.6388	21	35	2.6	217	5.5	0.261			
9	18.033	4.9151	29	251	18.4	862	21.8	0.146			
10	20.837	4.2595	29	369	27.0	1307	33.1	0.150			
11	21.972	4.0420	33	61	4.5	173	4.4	0.121			
12	23.614	3.7646	47	103	7.5	285	7.2	0.118			
13	24.028	3.7006	45	55	4.0	341	8.6	0.265			
14	26.611	3.3471	80	1366	100.0	3955	100.0	0.123			
15	27.400	3.2524	72	70	5.1	558	14.1	0.340			
16	27.974	3.1869	77	499	36.5	2331	58.9	0.199			
17	29.385	3.0370	54	84	6.1	538	13.6	0.273			
18	30.446	2.9336	53	49	3.6	200	5.1	0.175			
19	32.780	2.7299	43	27	2.0	138	3.5	0.216			
20	34.056	2.6304	42	110	8.0	510	12.9	0.198			
21	35.031	2.5694	46	48	3.5	227	5.7	0.200			
22	35.425	2.5319	46	54	4.0	124	3.1	0.098			
23	39.268	2.2924	28	50	3.7	425	10.7	0.361			
24	39.651	2.2712	26	28	2.1	602	15.2	0.905			
25	41.606	2.1689	29	49	3.6	226	5.7	0.196			
26	42.419	2.1292	35	101	7.4	377	9.5	0.159			
27	45.800	1.9795	32	36	2.6	128	3.2	0.153			
28	47.068	1.9292	32	64	4.7	204	5.2	0.134			
29	48.256	1.8844	34	28	2.0	96	2.4	0.146			
30	50.109	1.8190	35	107	7.9	621	15.7	0.246			
31	50.751	1.7975	23	65	4.8	365	9.2	0.237			
32	52.906	1.7292	22	24	1.7	280	7.1	0.499			
33	54.814	1.6734	24	60	4.4	483	12.2	0.342			
34	57.545	1.6003	23	21	1.5	76	1.9	0.154			
35	59.941	1.5420	38	90	6.6	272	6.9	0.128			
36	61.889	1.4980	23	49	3.6	161	4.1	0.141			
37	64.010	1.4534	23	25	1.8	262	6.6	0.445			



Şekil 39. X ışınları difraktogramı

3.2.5.3. 40°C'de Magnezyum Sülfat Çözeltisine Maruz Mineral Katkısız Harç XRD Ölçüm Sonuçları

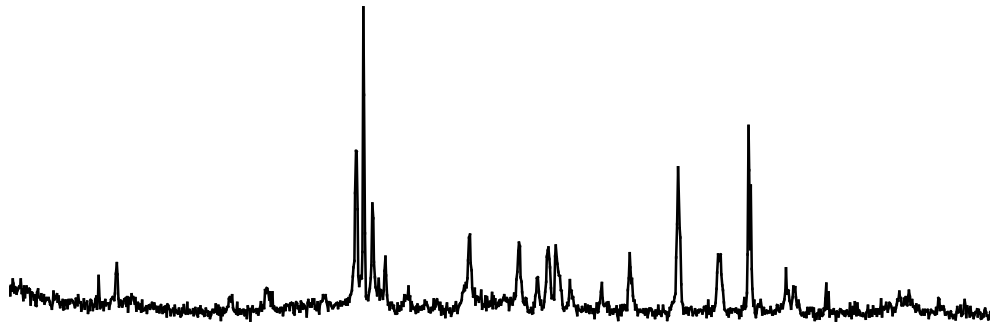
[4.MDI] Scan Data										Peak Search Report	
SCAN: 5.0/64.95/0.05/6(deg/m), Cu, I(cps)=852, 06/13/07 03:43p											
PEAK: 11-pts/Parabolic Filter, Threshold=3.0, Cutoff=0.6%, BG=3/1.0, Peak-Top=Summit											
NOTE: Intensity = CPS, 2T(0)=0.0(deg), Wavelength to Compute d-Spacing = 1.54059Å (Cu/K-alpha1)											
#	2-Theta	d(Å)	BG	Height	H%	Area	A%	FWHM			
1	9.038	9.7765	37	89	11.1	407	12.1	0.196			
2	11.582	7.6346	30	24	2.9	105	3.1	0.189			
3	15.675	5.6490	19	43	5.4	216	6.4	0.213			
4	17.601	5.0347	20	22	2.7	183	5.4	0.356			
5	18.034	4.9148	24	44	5.5	264	7.8	0.254			
6	18.836	4.7074	26	36	4.5	138	4.1	0.163			
7	20.800	4.2671	30	724	90.5	1951	57.7	0.114			
8	22.841	3.8903	28	64	8.0	280	8.3	0.185			
9	23.632	3.7617	30	496	61.9	1704	50.4	0.146			
10	26.563	3.3529	44	306	38.3	1612	47.7	0.224			
11	27.783	3.2085	52	800	100.0	3381	100.0	0.180			
12	28.241	3.1575	49	135	16.9	563	16.7	0.177			
13	29.438	3.0317	44	42	5.3	274	8.1	0.277			
14	30.456	2.9326	44	32	4.0	74	2.2	0.098			
15	32.433	2.7582	31	37	4.7	200	5.9	0.228			
16	35.080	2.5560	29	41	5.1	360	10.6	0.373			
17	35.330	2.5384	29	33	4.2	581	17.2	0.739			
18	36.102	2.4859	28	24	3.0	135	4.0	0.239			
19	36.551	2.4564	28	22	2.7	135	4.0	0.265			
20	39.414	2.2843	25	35	4.3	114	3.4	0.141			
21	40.871	2.2062	25	21	2.6	85	2.5	0.172			
22	45.775	1.9806	34	144	18.0	313	9.2	0.092			
23	49.747	1.8314	31	27	3.4	183	5.4	0.284			
24	50.079	1.8200	32	64	8.0	225	6.7	0.150			
25	51.153	1.7842	18	34	4.3	172	5.1	0.214			
26	53.291	1.7176	15	23	2.8	286	8.5	0.539			
27	55.233	1.6617	24	36	4.5	141	4.2	0.165			
28	59.899	1.5430	29	49	6.1	140	4.1	0.123			



Şekil 40. X ışınları difraktogramı

3.2.5.4. Numune Dış Yüzeyindeki Beyaz Maddeye Uygulanan XRD Ölçüm Sonuçları

[2.MD] Scan Data								Peak Search Report
SCAN: 5.0/64.95/0.05/6(deg/m), Cu, I(cps)=896, 06/13/07 03:31p								
PEAK: 11-pts/Parabolic Filter, Threshold=3.0, Cutoff=0.6%, BG=3/1.0, Peak-Top=Summit								
NOTE: Intensity = CPS, 2T(0)=0.0(deg), Wavelength to Compute d-Spacing = 1.54059Å (Cu/K-alpha1)								
#	2-Theta	d(Å)	BG	Height	H%	Area	A%	FWHM
1	5.685	15.5339	95	35	4.3	107	5.5	0.132
2	9.199	9.6056	58	28	3.5	119	6.0	0.181
3	11.545	7.6587	63	113	13.9	356	18.1	0.135
4	18.570	4.7742	39	47	5.8	208	10.5	0.189
5	20.700	4.2875	45	61	7.6	437	22.2	0.303
6	26.164	3.4032	78	414	51.1	1912	97.1	0.196
7	26.620	3.3459	87	809	100.0	1859	94.4	0.098
8	27.167	3.2798	87	257	31.8	966	49.0	0.160
9	27.946	3.1901	43	151	18.7	837	42.5	0.235
10	29.349	3.0407	47	63	7.8	347	17.6	0.233
11	31.103	2.8731	44	30	3.7	127	6.5	0.181
12	33.091	2.7049	58	198	24.5	1364	69.3	0.292
13	36.099	2.4861	58	176	21.8	944	47.9	0.228
14	37.236	2.4128	55	81	10.0	295	15.0	0.154
15	37.894	2.3724	52	168	20.8	1144	58.1	0.289
16	38.367	2.3442	59	167	20.7	1017	51.6	0.258
17	39.228	2.2947	53	75	9.3	228	11.6	0.129
18	41.144	2.1922	42	78	9.7	320	16.3	0.173
19	41.524	2.1730	41	25	3.1	103	5.3	0.173
20	42.857	2.1085	42	162	20.0	750	38.1	0.197
21	44.617	2.0293	33	23	2.9	54	2.7	0.099
22	44.915	2.0165	33	23	2.8	54	2.7	0.101
23	45.809	1.9792	37	409	50.5	1969	100.0	0.205
24	48.268	1.8840	43	157	19.4	1030	52.3	0.278
25	50.119	1.8186	43	519	64.1	1439	73.1	0.118
26	52.407	1.7445	36	126	15.5	721	36.6	0.244
27	52.872	1.7302	42	68	8.4	396	20.1	0.248
28	54.845	1.6726	33	85	10.5	163	8.3	0.082
29	59.306	1.5570	48	48	5.9	573	29.1	0.512
30	59.901	1.5429	43	55	6.8	572	29.1	0.442
31	61.719	1.5017	35	43	5.3	155	7.9	0.154
32	62.873	1.4769	27	25	3.1	131	6.6	0.222
33	63.295	1.4681	31	41	5.0	205	10.4	0.214



Şekil 41. X ışınları difraktogramı

3.3. Kür Havuzlarının pH, Sıcaklık ve mV Değerleri

Kür havuzlarına ilgili çözeltiler konulduktan sonra üç aylık bir dönem süresince havuzların pH değerleri, sıcaklıkları ve elektrik iletkenlik dirençleri ölçüldü. Bu ölçümler neticesinde hem beton numunelerin hem harç numunelerin konuldukları havuzların suları üç aylık periyotlarda değiştirildi.

Tablo 45. 4×4×16 cm harç numunelerin bulunduğu ortamdaki pH, sıcaklık ve mV değerleri

Tarih (Gün)	1 nolu havuz			2 nolu havuz			3 nolu havuz			4 nolu havuz		
	pH	°C	mV	pH	°C	mV	pH	°C	mV	pH	°C	mV
1	7,32	20,4	0,01	7,22	38,3	0,8	7,36	17,7	-0,01	7,81	19,8	-110
9	9,16	22,7	101	8,27	38	-0,59	8,75	4,9	-0,88	9,02	22,4	-107
24	8,77	20,9	0,94	7,92	38,6	-0,36	10,25	4,5	-185	8,94	20,3	-103
45	8,73	18,1	-100	7,85	38,5	-0,47	10,33	2,4	-187	8,76	17,4	-100
64	8,97	17,7	-119	7,74	38,9	0,38	11,15	2,5	-239	8,81	16,6	-104
84	8,85	20	-108	8,02	38,3	-0,57	11,07	4,2	-245	8,79	19,5	-103

Tablo 45'teki 1 nolu havuz oda sıcaklığındaki, 2 nolu havuz 40°C'deki, 3 nolu havuz 5°C'deki %2 magnezyum sülfat çözeltilisine sahip havuzları göstermektedir. Tablo 45'teki 4 nolu havuz standart kür havuzudur. Bu havuzların her birinde uçucu kül ilaveli, silis dumanı ilaveli, yüksek fırın cürufu ilaveli ve mineral katkı içermeyen harç numuneler bulunmaktadır.

1,2 ve 3 nolu havuzlarda 9 günlük pH değerlerinin 1. günlük pH değerlerine göre artmış olduğu görülmektedir. 1 ve 2 nolu havuzların 24 günlük pH değerlerinde 9 günlük değerlere göre azalma görülmektedir. 3 nolu havuzdaki pH değerinde ise artış meydana gelmiştir. Düşük sıcaklıktaki pH değerinin diğer sıcaklıklardakinden daha yüksek olduğu görülmektedir. pH değeri 12,5 olan ortamlarda beton bozulması az olmaktadır. pH değeri düştükçe betondaki bozulmalar artmaktadır. Tablo 45'teki oda sıcaklığındaki magnezyum sülfat çözeltilisinin pH değerinin 5°C'ye sahip magnezyum sülfat çözeltilisinden daha düşük olduğu görülmektedir. 5°C'deki magnezyum sülfat çözeltilisine maruz numunelerin, oda sıcaklığındaki numunelerden daha geç bozulmasının nedeni pH değerindeki fazlalıktan kaynaklanmış olabilir. Tablo 45'e bakıldığında en düşük pH değerinin 40°C'deki magnezyum sülfat çözeltilisine ait olduğu görülmektedir. pH değerindeki düşüklükten dolayı 40°C'deki numunelerin diğer ortamlardaki numunelerden daha erken bozulacağı

beklenebilir. Ancak farklı sıcaklıkta magnezyum sülfat çözeltisine maruz numunelerdeki bozulmalar incelendiğinde en geç bozulma 40°C'deki numunelerde başlamıştır. 21 ay süresince de en az bozulma 40°C'deki numunelerde tespit edilmiştir. Yüksek sıcaklıkta magnezyum sülfat çözeltisine maruz numunelerde reaksiyonların hızlı gelişmesi, numune çevresinde alçıtaşı ve brüsit oluşumunun diğer ortamdaki numunelere göre daha çabuk olmasının, pH değerindeki düşüklüğe rağmen bu koşullardaki numunelerin geç bozulmasının nedeni olduğu düşünülmektedir.

Tablo 46. 15 cm küp beton numunelerin bulunduğu havuzların üç aylık pH, sıcaklık ve mV değerleri

Tarih (Gün)	1 nolu havuz			2 nolu havuz			3 nolu havuz			4 nolu havuz		
	pH	°C	mV	pH	°C	mV	pH	°C	mV	pH	°C	mV
1	7,8	17,7	0,38	9,3	18	-134	7,37	18,1	-0,1	8,44	20	-0,79
9	9,2	20,5	-127	10,19	19,8	-172	9,14	19,8	-105	9,28	19,6	-115
24	9,86	18,5	-161	9,32	18,7	-127	9,09	18,5	-110	9,20	18,3	-120
45	9,08	15,8	-119	9,06	16,5	-119	8,74	16,2	-99	8,94	15,6	-115
64	10,28	14,4	-190	9,48	15,9	-145	9,18	15	-125	9,05	14,1	-118
84	9,14	14,9	-125	8,70	17	-0,98	8,79	15,7	-103	8,58	14,5	-0,91

Tablo 46'daki 1 nolu havuzda musluk suyu, 2 nolu havuzda sodyum sülfat çözeltisi, 3 nolu havuzda magnezyum sülfat çözeltisi ve 4 nolu havuzda Karadeniz deniz suyu bulunmaktadır. Tablo 46'daki 1.gün ölçümleri havuzlara ilgili çözelti konulduktan 15 dakika sonra yapılmıştır.

Beton numunelerin bulunduğu bütün havuzlarda su değişiminden 9 gün sonra yapılan ölçümlerde pH değerlerinde artış meydana geldiği görülmektedir. Bunun nedeni betonda kolay çözünebilir $\text{Ca}(\text{OH})_2$ bünyesinden ayrılan OH^- iyonlarının çözeltiliye geçmesi olarak değerlendirilebilir. Havuzların sıcaklıklarının da pH değerleri üzerinde etkili olduğu görülmektedir.

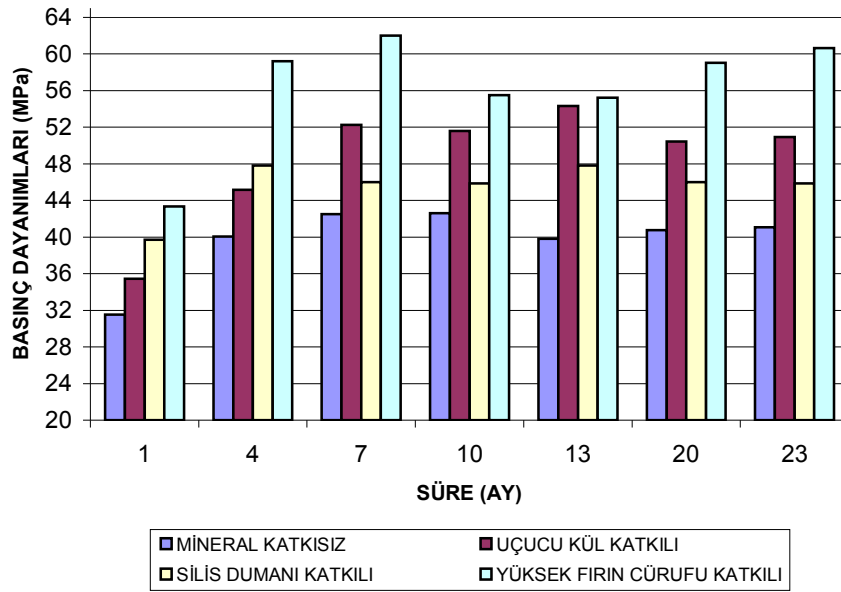
Yapılan bu tür laboratuvar çalışmalarında pH değerlerindeki değişimlerden dolayı belli zaman aralıklarında çözelti yenilenmektedir. Çözelti değiştirme süresi genellikle 1 aylık periyotlarda yapılmaktadır. Bu çalışmadaki pH ölçümlerinde 1 haftalık sürede pH değerlerinde en belirgin değişikliklerin meydana geldiği görülmektedir. Çalışmadaki ekonomiklik düşünüldüğünde, bir yıllık süreler için 1 aylık çözelti değiştirme periyotlarının, 1 yıldan daha uzun süreli çalışmalarda ise 1 aydan daha uzun çözelti değiştirme periyotlarının daha uygun olacağı düşünülmektedir.

4. SONUÇLARIN İRDELENMESİ VE YORUMU

4.1. Beton Numuneler

Grafiksel gösterimlerdeki dörtlü grup halindeki sütunların birincisi mineral katkı içermeyen, ikincisi %20 oranında uçucu kül ilaveli, üçüncüsü %10 oranında silis dumanı ilaveli ve dördüncüsü %20 oranında yüksek fırın cürufu ilaveli 15 cm küp beton numunelerin basınç dayanımlarını göstermektedir.

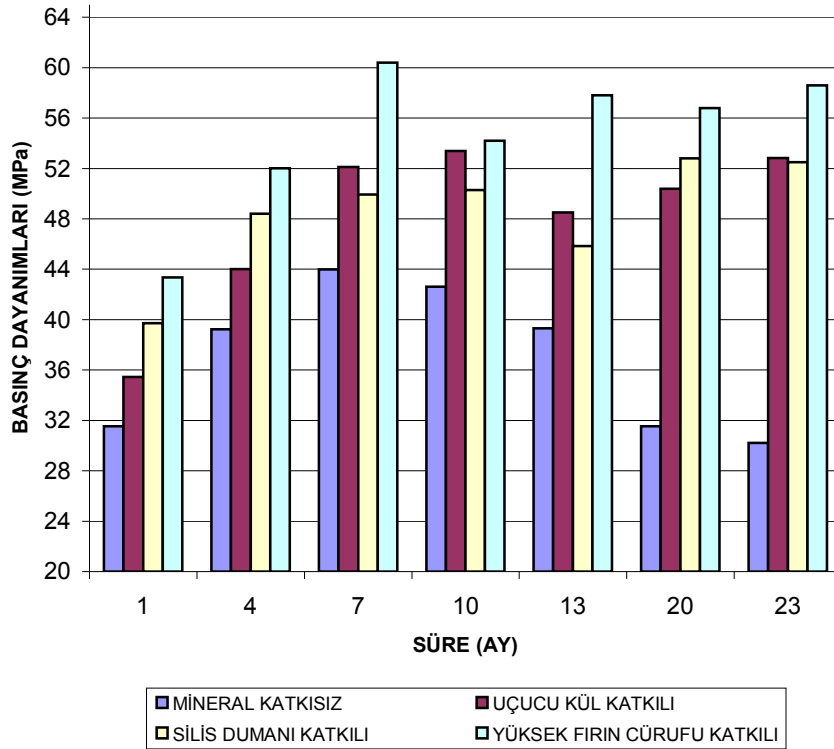
4.1.1. Basınç Dayanımı Ölçümlerinin Değerlendirilmesi



Şekil 42. Standart kür havuzundaki beton numunelere ait basınç dayanımı ölçümleri

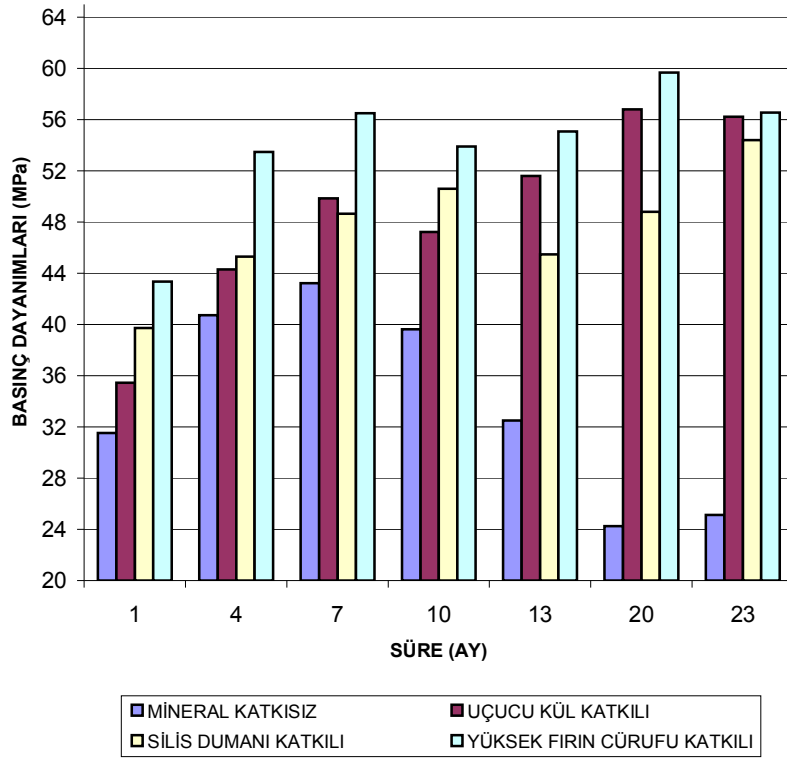
Şekil 42’de 1., 4., 7., 10., 13., 20. ve 23. aylarda standart kür görmüş beton numunelere uygulanan basınç deneyi sonuçları grafiksel olarak görülmektedir. Şekil 42’deki 1 aylık basınç dayanımları incelendiğinde %20 oranında yüksek fırın cürufu ilaveli beton numuneler en yüksek basınç dayanımını vermiştir. Bunu sırasıyla %10 oranında silis dumanı ilaveli, %20 oranında uçucu kül ilaveli ve mineral katkı içermeyen numunelerin basınç dayanımları takip etmiştir. İlk aydaki mineral katkı içermeyen numunelerin basınç

dayanımı uçucu kül ilaveli numunelerden %11, silis dumanı ilaveli numunelerden %20 ve yüksek fırın cürufu ilaveli numunelerden %27 oranında azdır. Tüm numunelerin 4. aydaki basınç dayanımlarında 1. aya göre yaklaşık %20 oranında artış meydana gelmiştir. %10 oranında silis dumanı ilaveli beton numunelerin basınç dayanımı 4. aydan sonra belirgin bir değişim göstermemiştir. Mineral katkı içermeyen ve yüksek fırın cürufu ilaveli betonların basınç dayanımlarında 4. aya göre 7. ayda yaklaşık %5 oranında artış meydana gelmiştir. Uçucu kül ilaveli betonların 7. aydaki basınç dayanımları ise 4. aydaki basınç dayanımına göre %15 oranında artmıştır. %10 oranında silis dumanı ilaveli beton numunelerin 1. ve 4. aydaki basınç dayanımları %20 oranında uçucu kül ilaveli betonların basınç dayanımından fazla iken 7. ay ve sonraki aylarda %20 oranında uçucu kül ilaveli betonların basınç dayanımı %10 oranında silis dumanı ilaveli betonların basınç dayanımından daha fazladır. Beton numunelerin 7. aydaki basınç dayanımları 1. aydaki basınç dayanımlarından mineral katkı içermeyen betonlarda %35, uçucu kül ilaveli betonlarda %47, silis dumanı ilaveli betonlarda %17 ve yüksek fırın cürufu ilaveli betonlarda %43 oranında fazladır. Tüm beton numunelerin 7. aydan sonraki basınç dayanımlarında belirgin bir değişiklik görülmemektedir.



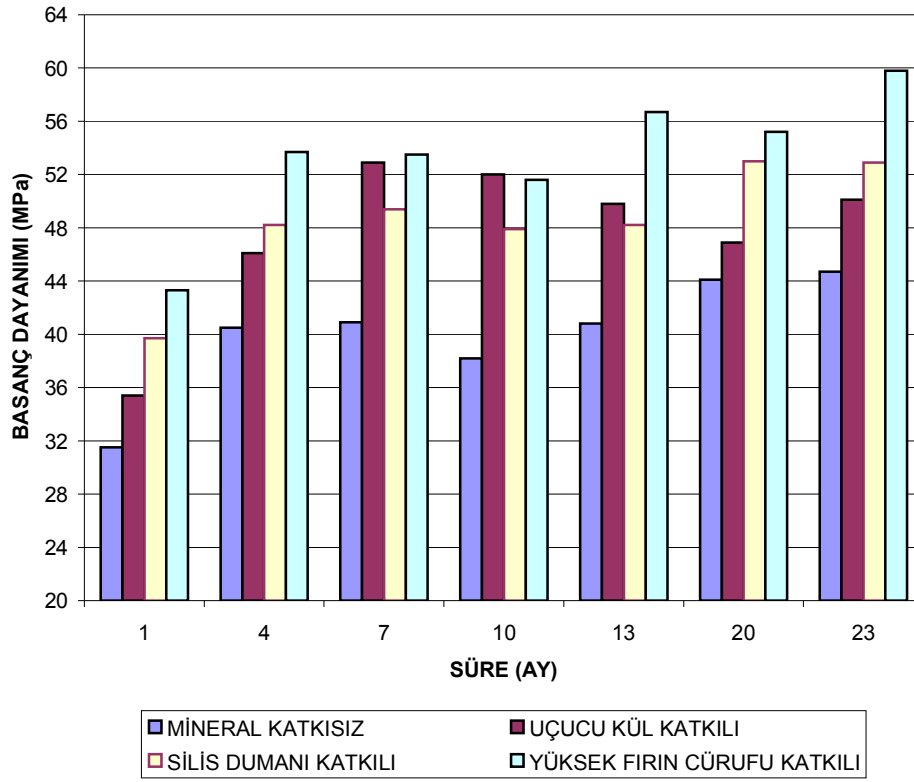
Şekil 43. Sodyum sülfat çözeltisine maruz beton numunelere ait basınç dayanımı ölçümleri

Şekil 43'te %2 sodyum sülfat çözeltisine maruz betonlara 4., 7., 10., 13., 20. ve 23. aylarda uygulanan basınç deneyi sonuçlarının grafiksel olarak değerlendirilmesi görülmektedir. Şekil 43'teki beton numunelerin 1. aydaki dayanımları bir aylık standart kür uygulanmasından sonra elde edilen değerlerdir. Sodyum sülfat çözeltisine maruz betonların dayanımlarında 1. aya göre 4. ayda ortalama %20 oranında artış meydana gelmiştir. Sodyum sülfat çözeltisine maruz beton numunelerin ilk yedi aylık basınç dayanımlarındaki değişimler standart kür havuzundaki numunelerle aynıdır. Bu durumdan 7 aylık süre içerisinde beton numunelerin basınç dayanımı üzerinde %2 konsantrasyona sahip sodyum sülfat çözeltisinin bir etkisi olmadığı anlaşılmaktadır. Sodyum sülfat çözeltisine maruz mineral katkılı beton numunelerin 7. aydan sonraki basınç dayanımları 7. aya göre paralel seyir göstermiştir. Sodyum sülfat çözeltisine maruz mineral katkı içermeyen beton numunelerin basınç dayanımında 7. aydan sonra azalma tespit edilmiştir. Mineral katkı içermeyen numunelerin basınç dayanımı 23. ayda 1. aydaki değerinin altına düşmüştür. Sodyum sülfat çözeltisine maruz betonların 23 aylık basınç dayanımlarındaki değişiminden mineral katkılı betonların mineral katkı içermeyen betonlara göre daha iyi performans gösterdikleri söylenebilir.



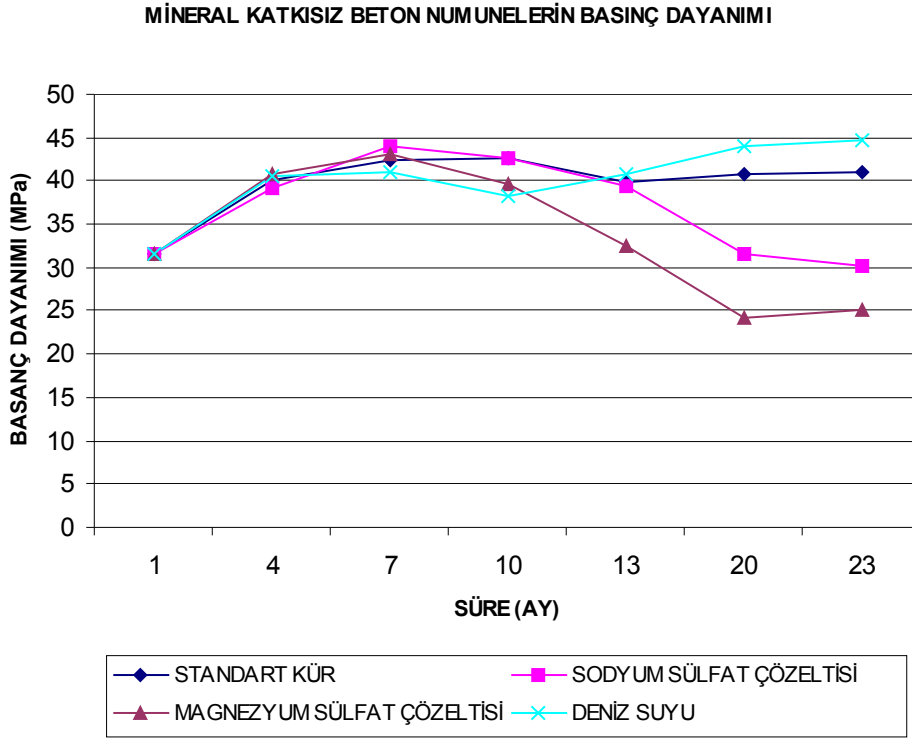
Şekil 44. Magnezyum sülfat çözeltisine maruz beton numunelere ait basınç dayanımı ölçümleri

Şekil 44'te %2 magnezyum sülfat çözeltisine maruz betonlara 4., 7., 10., 13., 20. ve 23. aylarda uygulanan basınç deneyi sonuçlarının grafiksel olarak değerlendirilmesi görülmektedir. Şekil 44'teki beton numunelerin 1. aydaki dayanımları bir aylık standart kür uygulanmasından sonra elde edilen değerlerdir. Magnezyum sülfat çözeltisine maruz beton numunelerin basınç dayanımları 7. aya kadar standart kür gören numunelerin basınç dayanımına benzer değişim göstermiştir. Magnezyum sülfat çözeltisine maruz mineral katkı içermeyen beton numunelerin basınç dayanımlarında 7. aydan sonra azalma görülmektedir. Magnezyum sülfat çözeltisine maruz mineral katkı içermeyen beton numunelerin basınç dayanımları 7. aya göre 23. ayda %42 oranında azalmıştır. Magnezyum sülfat çözeltisine maruz mineral katkı içermeyen numunelerin basınç dayanımındaki 23 ay sonundaki azalma sodyum sülfat çözeltisindeki aynı tip beton numunelerden daha fazla olmuştur. Aynı konsantrasyona sahip magnezyum sülfat çözeltisi sodyum sülfat çözeltisine göre beton numunelerde daha bozucu etkiye neden olmuştur. Mineral katkılı beton numunelerin basınç dayanımlarında 23 ay süresince magnezyum sülfat çözeltisinden kaynaklanan belirgin bir değişime rastlanmıştır. Mineral katkılı beton numuneler %2 magnezyum sülfat çözeltisinde 23 aylık sürede mineral katkı içermeyen numunelere göre daha iyi performans göstermişlerdir.



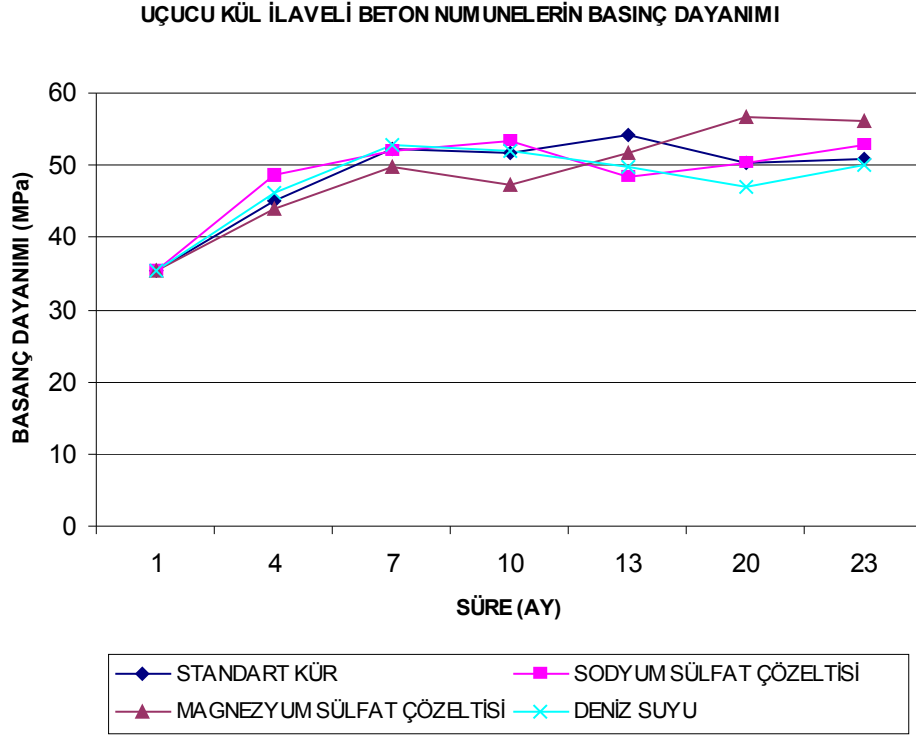
Şekil 45. Deniz suyuna maruz beton numunelere ait basınç dayanımı ölçümleri

Şekil 45'te deniz suyuna maruz betonlara 4., 7., 10., 13., 20. ve 23. aylarda uygulanan basınç deneyi sonuçlarının grafiksel olarak değerlendirilmesi görülmektedir. Şekil 45'teki beton numunelerin 1. aydaki dayanımları bir aylık standart kür uygulanmasından sonra elde edilen değerlerdir. Karadeniz suyuna maruz beton numunelerin basınç dayanımları standart küre maruz betonların basınç dayanımlarıyla oldukça yakın bir seyir izlediği görülmektedir. Karadeniz suyundaki sülfat ve klor iyonu konsantrasyonları oldukça düşüktür. Karadeniz suyu 23 aylık süre sonunda beton numunelerin basınç dayanımlarının üzerinde olumsuz etki oluşturmamıştır. Sonuç olarak Karadeniz suyu betonların basınç dayanımı üzerinde 23 aylık süre sonunda standart kür ile aynı derecede etkili olmuştur.



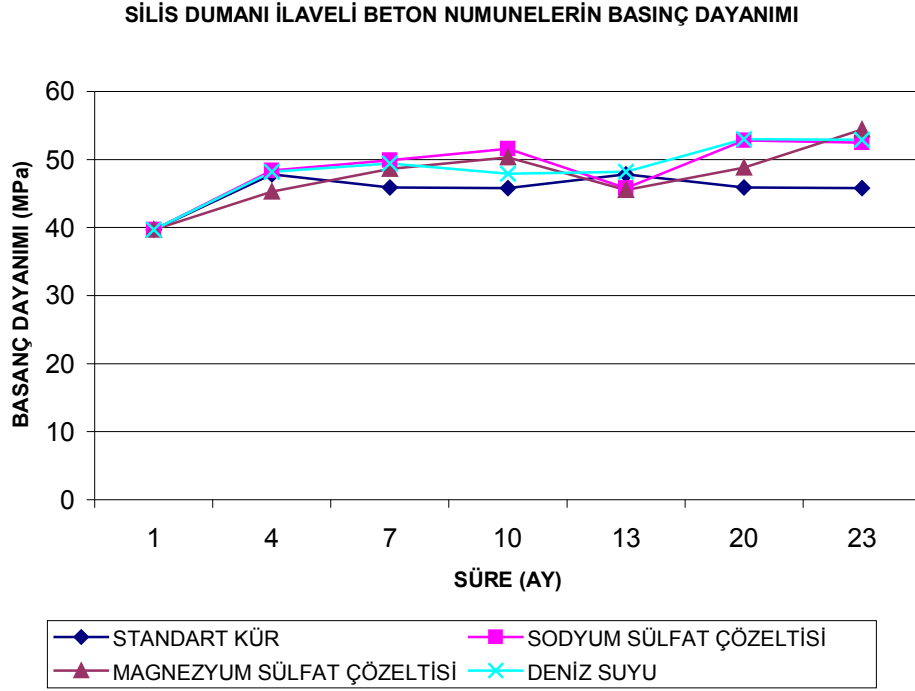
Şekil 46. Mineral katkı içermeyen beton numunelere ait basınç dayanımı ölçümleri

Şekil 46’da standart kür, sodyum sülfat çözeltisi, magnezyum sülfat çözeltisi ve deniz suyuna maruz mineral katkı içermeyen numunelerin basınç dayanımlarının grafiksel değişimi görülmektedir. Mineral katkısız beton numunelerin maruz kaldığı ortamlara bağlı olarak basınç dayanımları kıyaslandığı zaman en fazla azalmanın magnezyum sülfat çözeltisine maruz numunelerde olduğu görülmektedir. Bunu sodyum sülfat çözeltisindeki numuneler takip etmektedir. Sülfat çözeltisinin ilk yedi aylık süre sonunda beton numunelerin basınç dayanımı üzerindeki etkisinin ihmal edilebilir düzeyde olduğu görülmektedir. Sülfat çözeltisi 10. ay ve sonrasında betonların basınç dayanımları üzerinde etkili olmuştur. Özellikle 13. ay ve sonraki aylarda beton numunelerin basınç dayanımlarında hızlı azalmaya neden olmuştur. Şekil 46’daki Karadeniz suyu ve standart küre maruz mineral katkısız betonların basınç dayanım değişimlerine bakıldığında ise birbirlerine oldukça yakın olduğu görülmektedir. Beton numunelerin basınç dayanımlarındaki belirgin değişiklikler, yüzeylerinde çatlak oluştuğu dönemde olmaktadır.



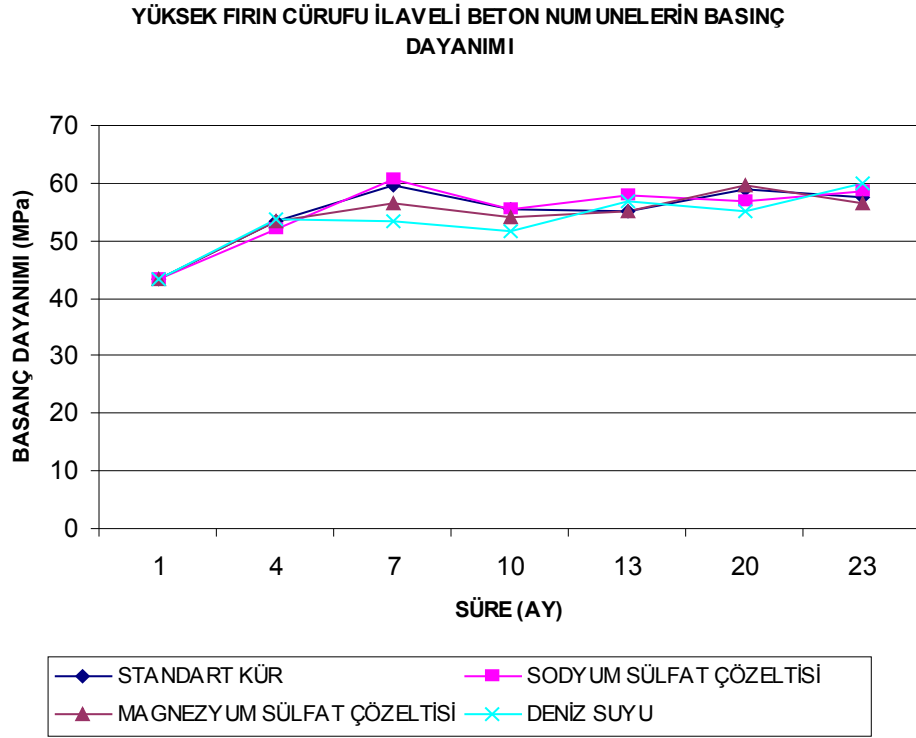
Şekil 47. Uçucu kül ilaveli beton numunelere ait basınç dayanımı ölçümleri

Şekil 47’de standart kür, sodyum sülfat çözeltisi, magnezyum sülfat çözeltisi ve deniz suyuna maruz uçucu kül ilaveli beton numunelerin basınç dayanımlarının grafiksel olarak değişimi görülmektedir. Şekil 47’de tüm numunelerin basınç dayanımlarında 7. aya kadar artış, 7. aydan sonra paralel seyir görülmektedir. Uçucu kül ilaveli beton numunelerin basınç dayanımlarında 23. ay süresinde sülfat atağından kaynaklanan bir azalma görülmemiştir.



Şekil 48. Silis dumanı ilaveli beton numunelerin basınç dayanımı ölçümleri

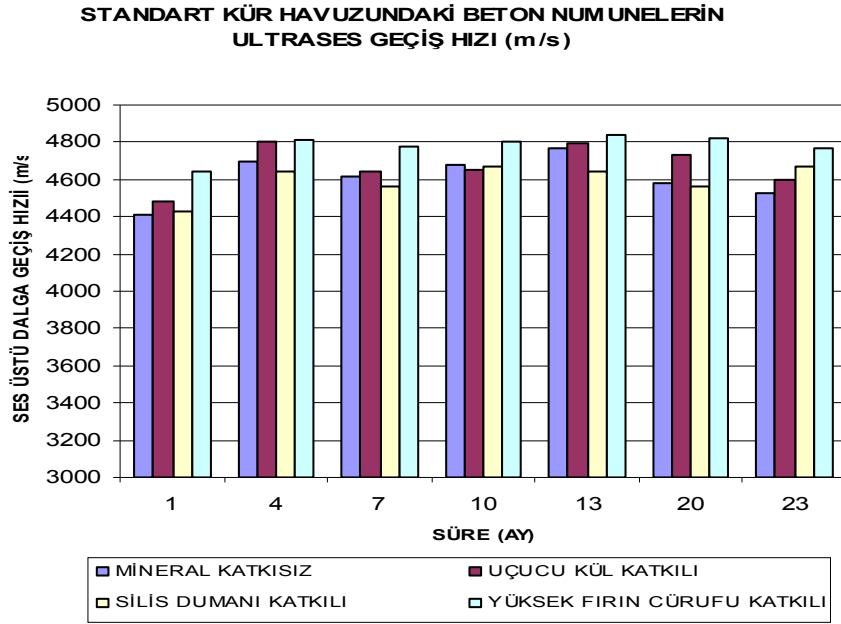
Şekil 48’de standart kür, sodyum sülfat çözeltisi, magnezyum sülfat çözeltisi ve deniz suyuna maruz silis dumanı ilaveli beton numunelerin basınç dayanımlarının grafiksel olarak değişimi görülmektedir. Şekil 48’de tüm numunelerin basınç dayanımlarında 7. aya kadar artış, 7. aydan sonra paralel seyir görülmektedir. Silis dumanı ilaveli beton numunelerin basınç dayanımlarında 23. ay süresinde sülfat atağından kaynaklanan bir azalma görülmemiştir.



Şekil 49. Yüksek fırın cürufu ilaveli betonların basınç dayanımı ölçümleri

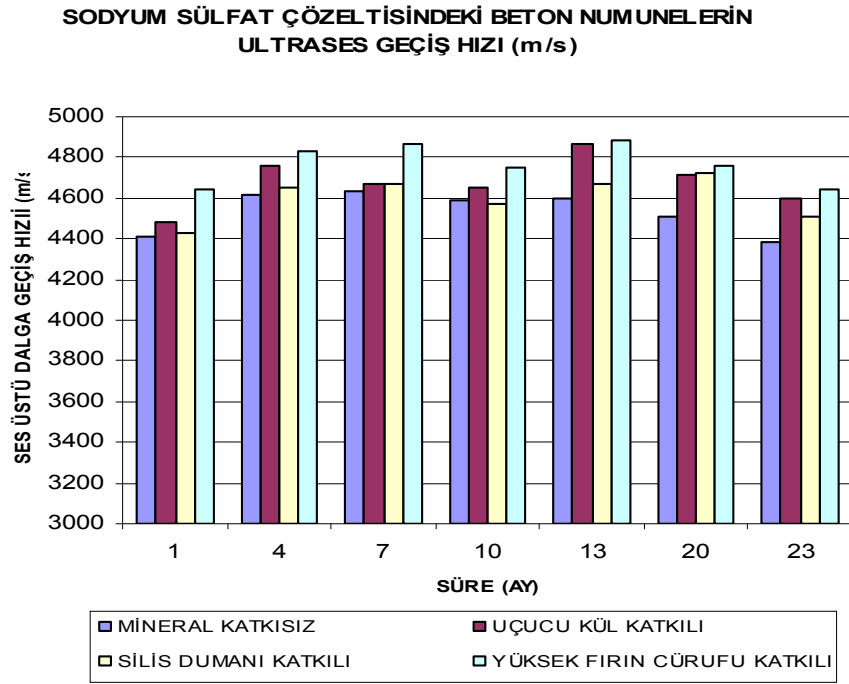
Şekil 49’da standart kür, sodyum sülfat çözeltisi, magnezyum sülfat çözeltisi ve deniz suyuna maruz yüksek fırın cürufu ilaveli beton numunelerin basınç dayanımlarının grafiksel olarak değişimi görülmektedir. Şekil 49’da tüm numunelerin basınç dayanımlarında 7. aya kadar artış, 7. aydan sonra paralel seyir görülmektedir. yüksek fırın cürufu ilaveli beton numunelerin basınç dayanımlarında 23. ay süresinde sülfat atağından kaynaklanan bir azalma görülmemiştir. Sülfat ortamındaki beton numunelerin basınç dayanımında belirgin azalmalar numune yüzeyinde çatlak türü bozulmalar görülmesinden ve bu çatlakların ilerlemesinden sonra meydana gelmektedir. Sülfat ortamındaki beton numunelerin basınç dayanımında azalma meydana gelmemesi bu betonların sülfattan etkilenmediğini göstermemektedir. Elektron mikroskobu görüntüleriyle basınç dayanımı değişimleri kıyaslandığında betonlarda basınç dayanımındaki azalma iç yapısal bozulmaların belli seviyelere ulaşmasından sonra olmaktadır.

4.1.2. Ultrases Ölçümlerinin Değerlendirilmesi



Şekil 50. Standart kür havuzunda tutulan beton numunelerin ultrases geçiş hızı (m/s)

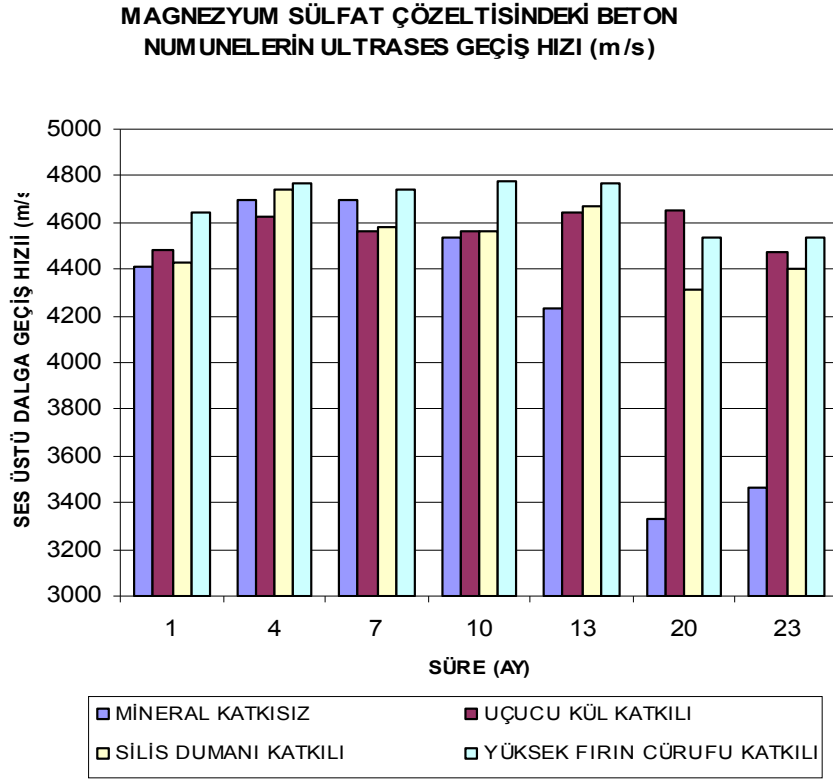
Şekil 50’de 1., 4., 7., 10., 13., 20. ve 23. aylarda standart kür havuzunda tutulan beton numunelerde tespit edilen ultrases geçiş hızlarının grafiksel olarak değerlendirilmesi görülmektedir. Standart kür havuzundaki numunelerin birinci aydaki en düşük ultrases geçiş hızı mineral katkı içermeyen numunelerdedir. Bunu sırasıyla silis dumanı ilaveli, uçucu kül ilaveli ve yüksek fırını cürufu ilaveli numuneler takip etmektedir. Şekil 50’deki tüm numunelerin ultrases geçiş hızlarının birbirine oldukça yakın olduğu görülmektedir. 1. aydaki en yüksek ultrases geçiş hızına sahip yüksek fırını cürufu ilaveli numunelerle en düşük geçiş hızına sahip mineral katkısız numuneler arasında %5’lik fark vardır. Numunelerin ultrases değerlerinde 1. aya göre 4. ayda yaklaşık %5’lik artış meydana gelmiştir. 4. aydan sonraki ultrases ölçümleri ise 4. aydaki değerlere oldukça yakındır. Şekil 50 ile Şekil 42 kıyaslandığında silis dumanı ilaveli numuneler hariç diğer tüm numunelerde basınç dayanımı fazla olan numunenin ultrases geçiş hızının da fazla olduğu görülmektedir.



Şekil 51. Sodyum sülfat çözeltisine maruz beton numunelerin ultrases geçiş hızları (m/s)

Şekil 51’de 4., 7., 10., 13., 20. ve 23. aylarda sodyum sülfat çözeltisine maruz beton numunelerde tespit edilen ultrases geçiş hızlarının grafiksel olarak değerlendirilmesi görülmektedir. Şekil 51’deki beton numunelerin 1. aydaki ultrases değerleri bir aylık standart kür uygulanmasından sonra elde edilen değerlerdir. Şekil 51’de sodyum sülfat çözeltisine maruz mineral katkı içermeyen numunelerin sesüstü geçiş hızlarının 7. aya kadar az miktarda arttığı görülmektedir. Bu numunelerin ultrases geçiş hızları 7. aydan 23. aya kadar sürekli olarak azalmıştır. Sodyum sülfat çözeltisindeki mineral katkı içermeyen beton numunelerde gözle görülür çatlaklar 10. aya doğru oluştu. Bu ilk çatlaklar Şekil 12’de görüldüğü gibi numune köşelerinde meydana geldi. Beton numunelerde ultrases ölçümleri kalıp görmüş iki yüzeyin ortasından yapıldı. Ultrases ölçümü yapılan yüzeylerde gözle görülür çatlak yoktu. Sodyum sülfat çözeltisindeki mineral katkı içermeyen beton numunelerin 10. aydan sonraki ultrases geçiş süresindeki azalma sesüstü dalgasının geçmiş olduğu iç bölgelerde de çatlak oluşumlarının başlamış olduğunun kanıtıdır. Çatlak oluşumu betonun daha boşluklu bir yapıya dönüştürmesinden dolayı sesüstü geçiş hızında azalmaya sebep olmaktadır. Beton numunelerin bozulmasıyla birlikte ultrases geçiş hızları da azalmaktadır. Sodyum sülfat çözeltisine maruz mineral katkılı beton numunelerin ultrases geçiş hızlarında 20. ve 23. aylarda azalma meydana geldiği görülmektedir. Bu durum Şekil

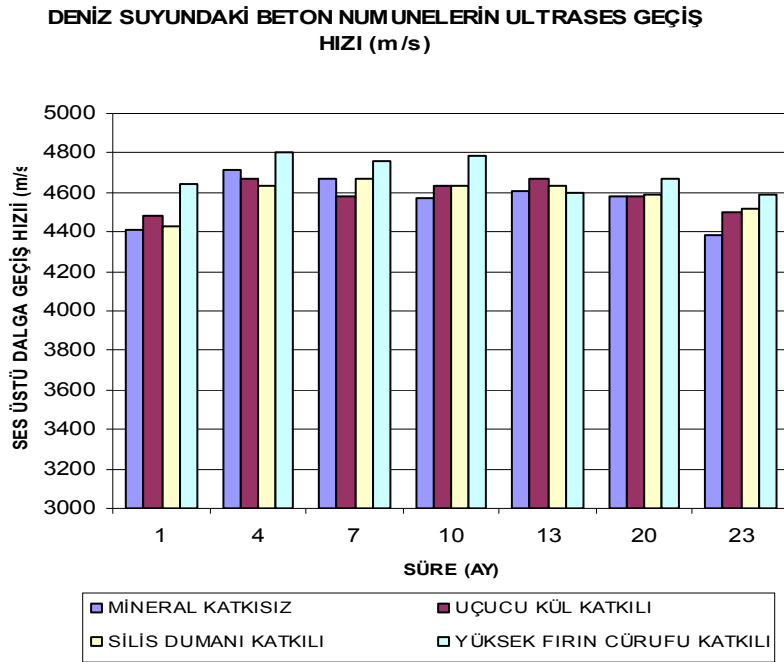
51'deki mineral katkı içermeyen numunelerin ultrases ölçümleriyle karşılaştırıldığında 23. ayda mineral katkılı betonlarında %2 konsantrasyona sahip sodyum sülfat çözeltisinden etkilenmeye başladıklarını göstermektedir.



Şekil 52. Magnezyum sülfat çözeltisine maruz beton numunelerin ultrases ölçümleri

Şekil 52'de 4., 7., 10., 13., 20. ve 23. aylarda magnezyum sülfat çözeltisine maruz beton numunelerde tespit edilen ultrases geçiş hızlarının grafiksel olarak değerlendirilmesi görülmektedir. Şekil 52'deki beton numunelerin 1. aydaki ultrases değerleri bir aylık standart kür uygulanmasından sonra elde edilen değerlerdir. Bu numunelerin ultrases değerleri 7. aya kadar standart kür havuzundaki ve sodyum sülfat çözeltisindeki numunelere benzer seyir göstermiştir. Magnezyum sülfat çözeltisindeki mineral katkısız numunelerin ultrases geçiş hızlarında 10. ayda az, 13. ayda ise belirgin bir azalma söz konusudur. Mineral katkısız beton numunelerin ultrases geçiş hızlarına bakıldığında 7. ay ile 10. ay değerleri arasında az bir azalma, 10. ile 13 ay değerleri arasında bir önceki ölçüme göre daha fazla bir azalma, bu aydan sonraki değerde ise oldukça fazla bir azalma görülmektedir. Bu durum betonun sülfat saldırısına maruz kaldığı ilk zamanlardaki bozulmasının yavaş seyrettiğini ancak belli bir zaman sonraki betondaki bozulmaların ilk günlerdeki bozulmalara kıyasla oldukça hızlı seyrettiğini göstermektedir. Magnezyum

sülfat çözeltisine maruz mineral katkılı beton numunelerin 13. aydan sonraki ultrases geçiş hızlarında azalma görülmektedir. Ultrases geçiş hızları değişimlerden magnezyum sülfat çözeltisine maruz mineral katkı içermeyen numunelerin 7. aydan sonra, mineral katkı içeren numunelerin ise 13. aydan sonra etkilenmeye başladıkları söylenebilir. Numune ultrases geçiş hızlarında ki azalmadan numune içindeki boşluk miktarının arttığı anlaşılmaktadır. Sodyum sülfat çözeltisindeki mineral katkısız betonlarda 23. aydaki ultrases geçiş hızlarında 7. aydaki değere göre %5'lik bir azalma görülmektedir. magnezyum sülfat çözeltisindeki mineral katkısız numunelerde ise 23. aydaki ultrases geçiş hızı 7. aydaki ultrases geçiş hızından %26 oranında azdır. Yukarıdaki oransal değişmeden de görüldüğü gibi magnezyum sülfat çözeltisindeki mineral katkı içermeyen beton numuneler sodyum sülfat çözeltisine maruz numunelere göre daha fazla bozulmuşlardır.

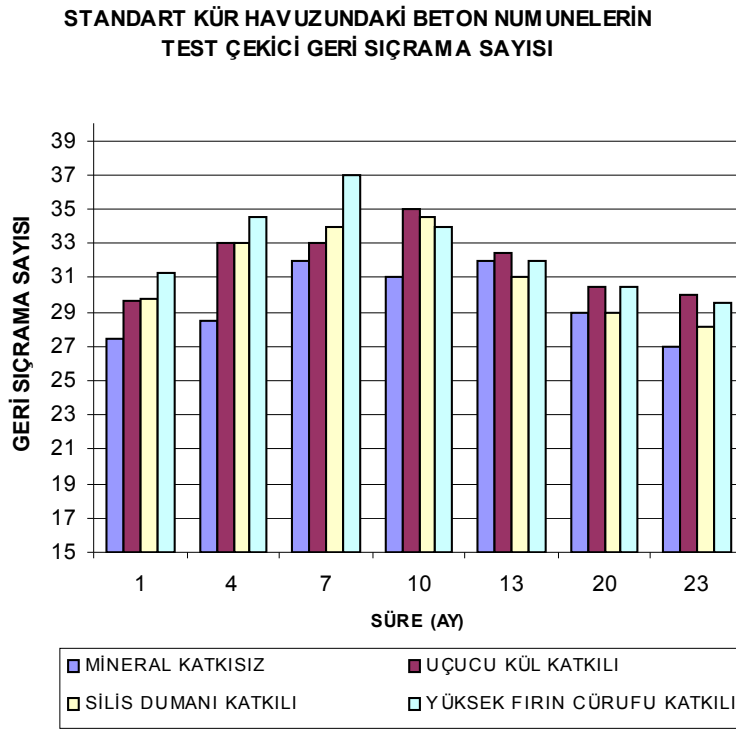


Şekil 53. Deniz suyuna maruz beton numunelerin ultrases geçiş hızları (m/s)

Şekil 53'te 4., 7., 10., 13., 20. ve 23. aylarda deniz suyuna maruz beton numunelerde tespit edilen ultrases geçiş hızlarının grafiksel değerlendirilmesi görülmektedir. Şekil 53'teki beton numunelerin 1. aydaki ultrases değerleri bir aylık standart kür uygulanmasından sonra elde edilen değerlerdir. Deniz suyuna maruz beton numunelerin ultrases geçiş hızları 1. aydaki ölçümlere göre 4. ayda az miktarda artmıştır. 4. aydan 20.

aya kadar ölçülen ultrases geçiş hızları birbirine oldukça yakındır. 23. aydaki ultrases geçiş hızlarında ise tüm numunelerde az miktarda azalma görülmektedir. 23. aydaki ultrases geçiş hızlarında azalma mineral katkı içermeyen numunelerde diğer numunelere göre daha fazladır. Bu durum mineral katkı içermeyen numunelerin deniz suyundan 20. aydan sonra etkilenmeye başladığını gösterebilir. Şekil 53'te mineral katkılı betonların deniz suyundan etkilenmeye başladığını gösterecek değişime rastlanmamaktadır.

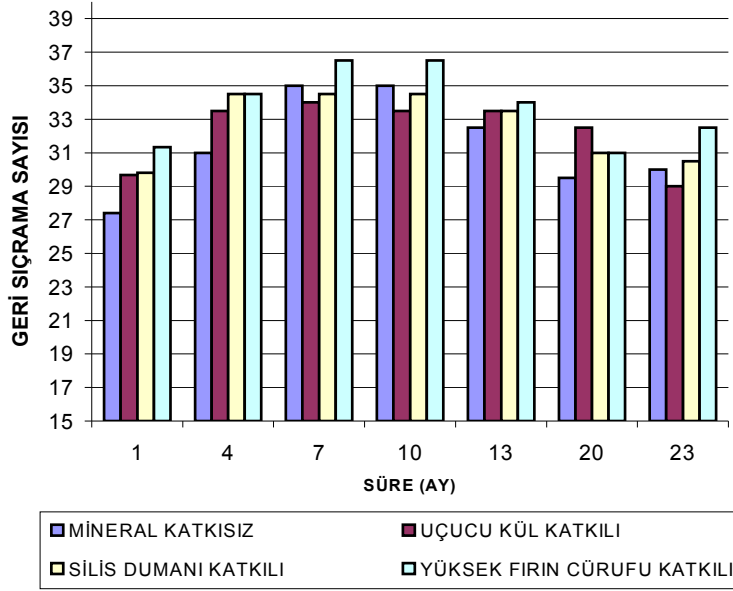
4.1.3. Beton Test Çekici Okumalarının Değerlendirilmesi



Şekil 54. Standart kür havuzunda tutulan beton numunelerin test çekici ölçümleri

Şekil 54'te 1., 4., 7., 10., 13., 20. ve 23. aylarda standart kür havuzunda tutulan beton numunelerde tespit edilen test çekici değerlerinin grafiksel olarak değerlendirilmesi görülmektedir. Şekil 54'te tüm beton gruplarının test çekici değerlerinde 7. aya kadar az miktarda artış, 7. aydan 23. aya kadar ki değerlerde ise az miktarda azalma görülmektedir. Şekil 54'teki bu değişime ölçüm yapılan zamandaki ortam ve numune neminin neden olduğu düşünülmektedir. Tüm numuneler üzerinde yapılan test çekici okumalarında yüksek basınç dayanımına sahip betonların test çekici değerlerinin de yüksek olduğu görülmektedir.

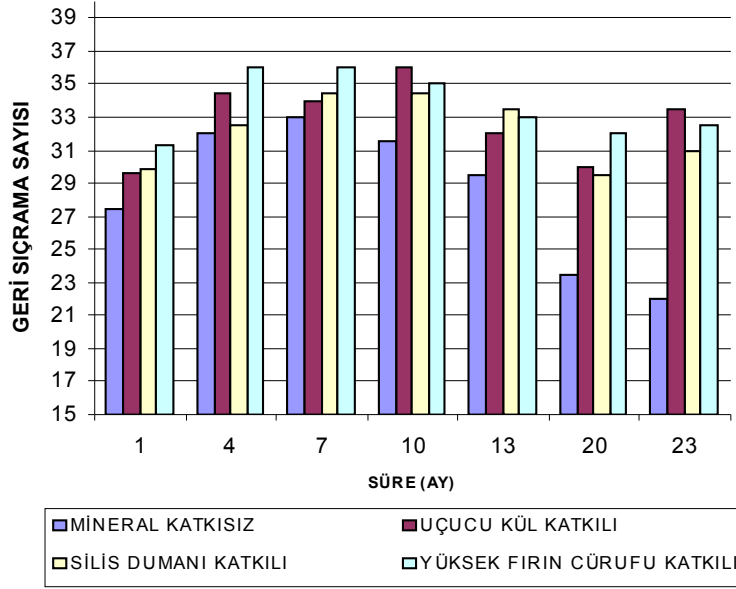
**SODYUM SÜLFAT ÇÖZELTİSİNDEKİ BETON
NUMUNELERİN TEST ÇEKİCİ GERİ SIÇRAMA SAYISI**



Şekil 55. Sodyum sülfat çözeltisine maruz beton numunelerin test çekici okumaları

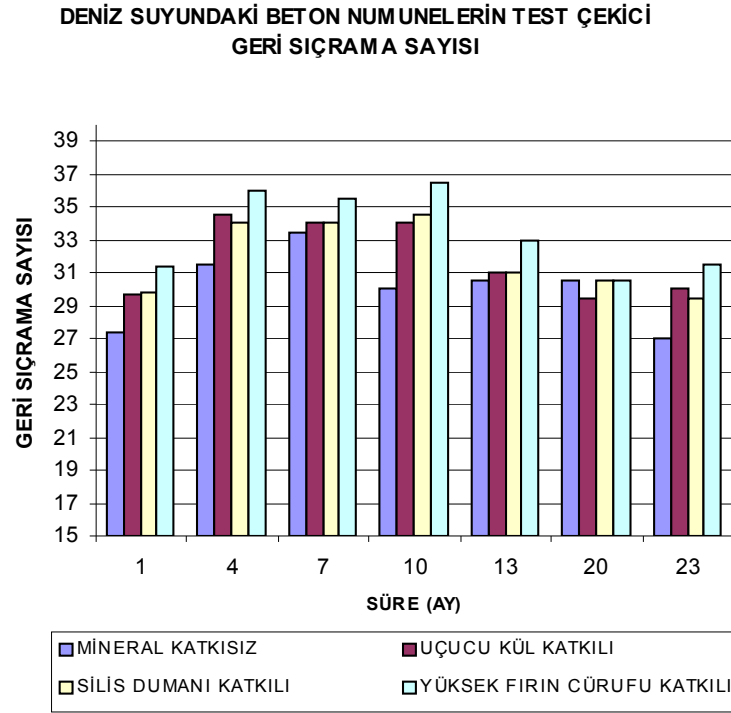
Şekil 55'te 4., 7., 10., 13., 20. ve 23. aylarda sodyum sülfat çözeltisine maruz beton numunelerde tespit edilen test çekici değerlerinin grafiksel olarak değerlendirilmesi görülmektedir. Şekil 55'teki beton numunelerin 1. aydaki test çekici okumaları bir aylık standart kür uygulanmasından sonra elde edilen değerlerdir. Sodyum sülfat çözeltisine maruz beton numunelerin test çekici değerleri standart kür havuzundaki numunelerin test çekici değerlerine benzemektedir. Şekil 55'teki test çekici değerlerine göre 23 aylık sürede %2 konsantrasyona sahip sodyum sülfat çözeltisinden dolayı beton yüzeylerinde bir yumuşamanın olmadığı görülmektedir.

**MAGNEZYUM SÜLFAT ÇÖZELTİSİNDEKİ BETON
NUMUNELERİN TEST ÇEKİCİ GERİ SIÇRAMA SAYISI**



Şekil 56. Magnezyum sülfat çözeltisine maruz beton numunelerin test çekici okumaları

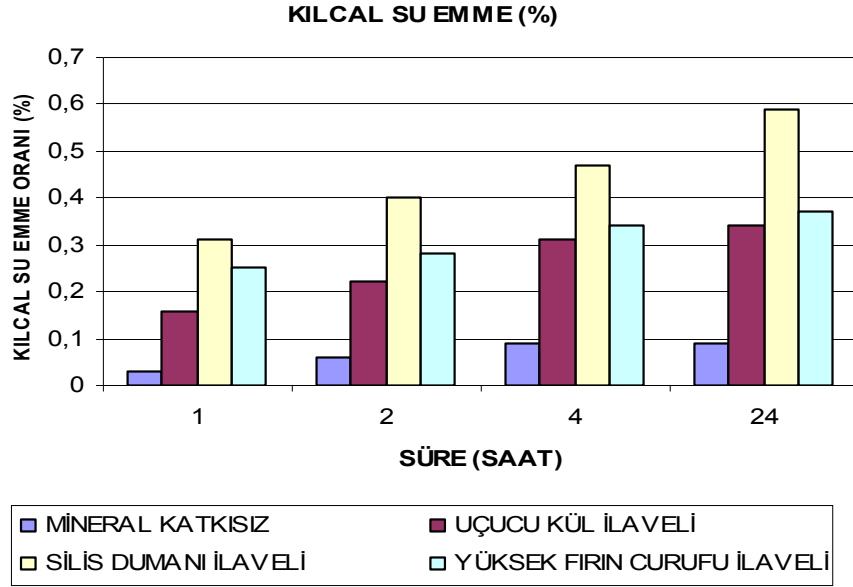
Şekil 56'da 4., 7., 10., 13., 20. ve 23. aylarda magnezyum sülfat çözeltisine maruz beton numunelerde tespit edilen test çekici değerlerinin grafiksel olarak değerlendirilmesi görülmektedir. Şekil 56'daki beton numunelerin 1. aydaki test çekici okumaları bir aylık standart kür uygulanmasından sonra elde edilen değerlerdir. Magnezyum sülfat çözeltisine maruz mineral katkıli betonların test çekici okumaları standart kür havuzu ve sodyum sülfat çözeltisindeki mineral katkıli numunelere benzer seyir göstermektedir. Magnezyum sülfat çözeltisine maruz mineral katkı içermeyen numunelerin test çekici okumalarında 7. aya kadar mineral katkıli numuneler gibi artış meydana gelmiştir. Bu numunelerin 7. aydan sonraki test çekici okumalarında belirgin bir azalma görülmektedir. Bu azalma magnezyum sülfat çözeltisindeki mineral katkıli betonların yüzeyinde yumuşama meydana geldiğini göstermektedir. Bu numunelerde 23. aydaki test çekici okuması 1. aydaki değerinde altına düşmüştür. Magnezyum sülfat atağında C-S-H yapısının M-S-H yapısına dönüşmesi beton yüzeyinde yumuşamaya neden olmaktadır.



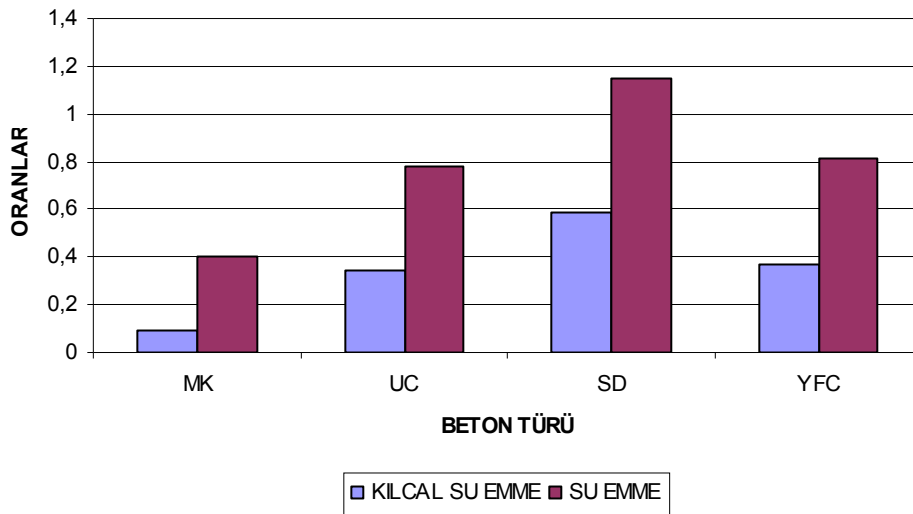
Şekil 57. Deniz suyuna maruz beton numunelerin test çekici okumaları

Şekil 57’de 4., 7., 10., 13., 20. ve 23. aylarda deniz suyuna maruz beton numunelerde tespit edilen test çekici değerlerinin grafiksel olarak değerlendirilmesi görülmektedir. Şekil 57’deki beton numunelerin 1. aydaki test çekici okumaları bir aylık standart kür uygulanmasından sonra elde edilen değerlerdir. Deniz suyuna maruz betonlardaki test çekici okumaları magnezyum sülfat çözeltilisindeki mineral katkısız numuneler hariç standart kür havuzundaki, sodyum sülfat ve magnezyum sülfat çözeltilisindeki numunelerle benzer seyir gösterdi. Deniz suyuna maruz numunelerin 7. aydan sonraki test çekici okumalarında az miktarda meydana gelen azalmanın deney gerçekleştirilen ortamın ve deney numunesinin neminden kaynaklandığı düşünülmektedir. Aynı değişim farklı ortamlardaki tüm numunelerde de görülmüştür.

4.1.4. Beton Numunelerin Kılcal Su Emme



Şekil 58. Beton numunelerin kılcal su emme değerleri



Şekil 59. Beton numunelerin kılcal su emme ile su emme oranları

Şekil 58’de mineral katkısız, uçucu kül ilaveli, silis dumanı ilaveli ve yüksek fırın cürufu ilaveli betonların 1., 2., 4. ve 24. saatlerdeki kılcal su emme oranları görülmektedir. Şekil 59’da ise beton numunelerin kılcal su emmeleri ile su emme değerleri aynı grafik üzerinde gösterilmiştir. Şekil 59’daki mineral katkısız betonlar MK, uçucu kül ilaveli betonlar UC, silis dumanı ilaveli betonlar SD ve yüksek fırın cürufu ilaveli betonlar YFC sembolleriyle gösterilmiştir. Şekil 58’deki beton numunelerin kılcal su emme oranlarından

mineral katkısız betonların kılcal su emme oranının en az olduğu görülmektedir. Bunu sırasıyla uçucu kül ilaveli, yüksek fırın cürufu ilaveli ve silis dumanı ilaveli numuneler takip etmektedir. Beton üretiminde kullanılan bağlayıcılardan çimentonun inceliği en az olanıydı. Bunu sırasıyla uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve silis dumanı izlemekteydi. Kılcal su emme oranındaki sıralama da kullanılan bağlayıcıların incelikleri ile benzerlik göstermektedir. En fazla inceliğe sahip silis dumanı ilaveli betonlarda en fazla kılcal su emmenin olduğu görülmektedir. Bunun nedeni fazla inceliğe sahip silis dumanının beton içerisinde birbirleriyle bağlantılı boşluk çaplarının daha az olmasına neden olması düşünülmektedir. Her bir betonun kılcal su emmeleriyle su emme değerleri kıyaslandığında mineral katkılı betonlarda su emme değeri kılcal su emmenin yaklaşık iki katı olduğu, mineral katkısızlarda ise 4,5 katı olduğu görülmektedir. Bu durumdan mineral katkısız betonlardaki boşlukların çapının daha büyük olduğu anlaşılmaktadır. Çünkü kılcallık olayında boşluk çapının küçük olması kılcallığı artırmaktadır. Tüm numunelerin kılcal su emme ve su emme değerlerinin birbirine oldukça yakın oldukları da görülmektedir. Magnezyum ve sodyum sülfat çözeltisinden kılcal su emme ve su emme değeri düşük olan mineral katkısız betonlar daha fazla etkilendiler. Daha yüksek basınç dayanımına sahip mineral katkı ilaveli betonlar magnezyum ve sodyum sülfat çözeltisinde daha iyi performans gösterdiler.

4.1.4. Sülfat Ortamındaki Beton Numunelerin Görüntülerinin İrdelenmesi

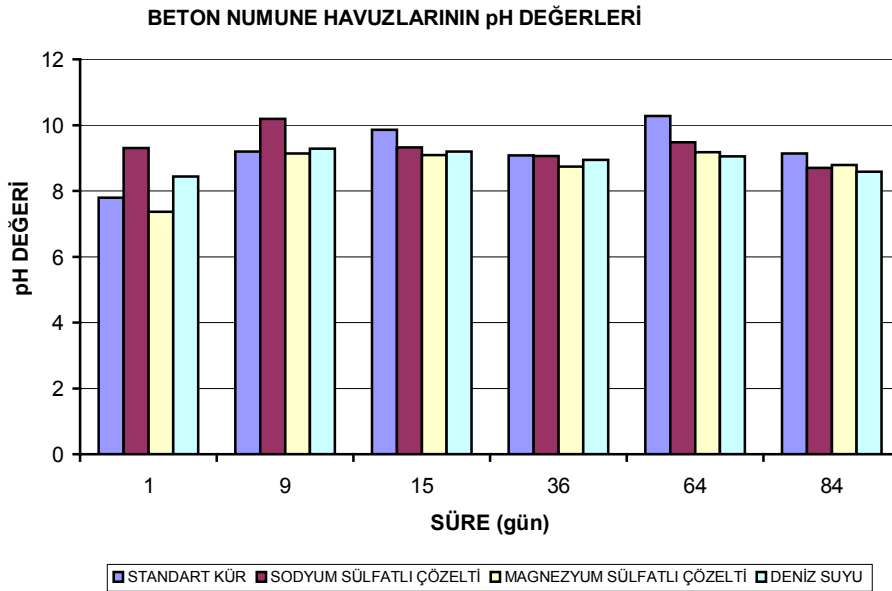
Şekil 12 ve Şekil 13'te sodyum sülfat çözeltisine maruz mineral katkı içermeyen 15 cm küp beton numuneler görülmektedir. Sodyum sülfat etkisinden dolayı beton numunelerde ilk belirtiler köşe noktalarında oluşan çatlaklardır. Beton köşelerinde oluşan çatlakların ilerlemesi numuneden beton parçalarının kopmasına neden olmuştur. 18. aydan sonra 15 cm küp numune ortalarında da çatlaklar oluşmaya başlamıştır. Çatlak oluşmayan beton yüzeylerinde yumuşama ile karşılaşılmamıştır.

Şekil 14 ve Şekil 15'te magnezyum sülfat çözeltisine maruz 15 cm küp mineral katkı içermeyen beton numuneler görülmektedir. Magnezyum sülfat etkisindeki beton numunelerin yüzeyinde belli bir süre sonunda beyaz tabaka oluşmuştur. Magnezyum sülfat atağı sonucunda beyaz tabaka oluşumundan sonra numune yüzeyinde yumuşama ve çatlaklar meydana gelmiştir. Numune yüzeyindeki yumuşama ve çatlakların ilerlemesi sonucu beton çamurumsu bir yapıya dönüşmüştür.

Betondaki sodyum sülfat ve magnezyum sülfat etkisi kıyaslanacak olursa magnezyum sülfat etkisine maruz beton yüzeyinde beyazlama, bunu takiben yüzey yumuşaması ve yüzey yumuşamasını takiben betonun çamurumsu yapıya dönüşerek beton yüzeyinden malzeme kaybı meydana gelmektedir. Sodyum sülfat atağında ise beton numunelerde yüzeyde yumuşama ve beyazlama olmadan çatlak oluşmaktadır. Bu oluşan çatlakların ilerlemesi sonucu betonda parça kopması şeklinde bozulmalara neden olmaktadır. Magnezyum sülfat ve sodyum sülfat çözeltisindeki beton numunelerde ilk çatlaklar numune kenarlarında meydana gelmiştir.

Magnezyum sülfat etkisindeki beton yüzeyindeki beyazlama ve yumuşama yüzünden sodyum sülfat atağına maruz betona göre gözle daha kolay ayırt edilebilir.

4.1.5. Beton Numune Havuzlarının pH Değerleri

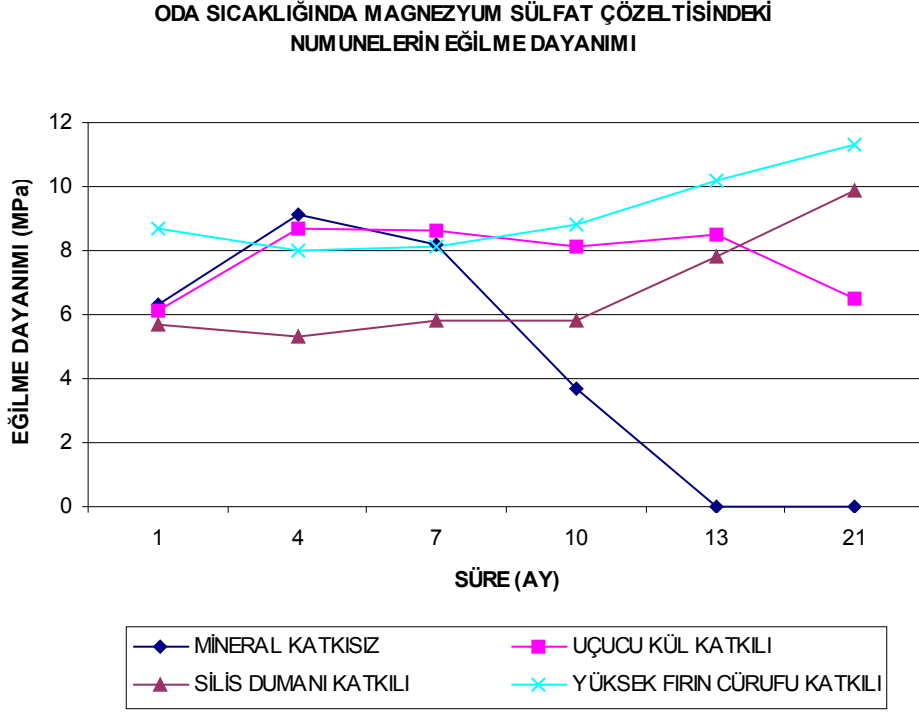


Şekil 60. Beton numune havuzlarının pH değerlerinin grafiksel gösterimi.

Şekil 60'da standart kür, sodyum sülfat çözeltisi, magnezyum sülfat çözeltisi ve deniz suyuna maruz beton numune havuzlarına ilgili çözelti ve su konduktan sonraki 1., 9., 15., 36., 64. ve 84. günlerinde ölçülen pH değerlerinin grafiksel değerlendirilmesi görülmektedir. Şekil 60'da havuzlarda ilk gün yapılan pH ölçümlerinde sodyum sülfat çözeltisinin pH değerinin en yüksek, magnezyum sülfat çözeltisinin pH değerinin ise en düşük olduğu görülmektedir. Sonraki günlerde ise düşük pH değerine sahip havuzların pH değerlerinde artış, yüksek değerdeki pH değerinde ise azalma gözlemlendi. Yapılan ölçümler sonucu havuz suyu sıcaklıklarının pH değeri üzerinde etkili olduğu görülmüştür.

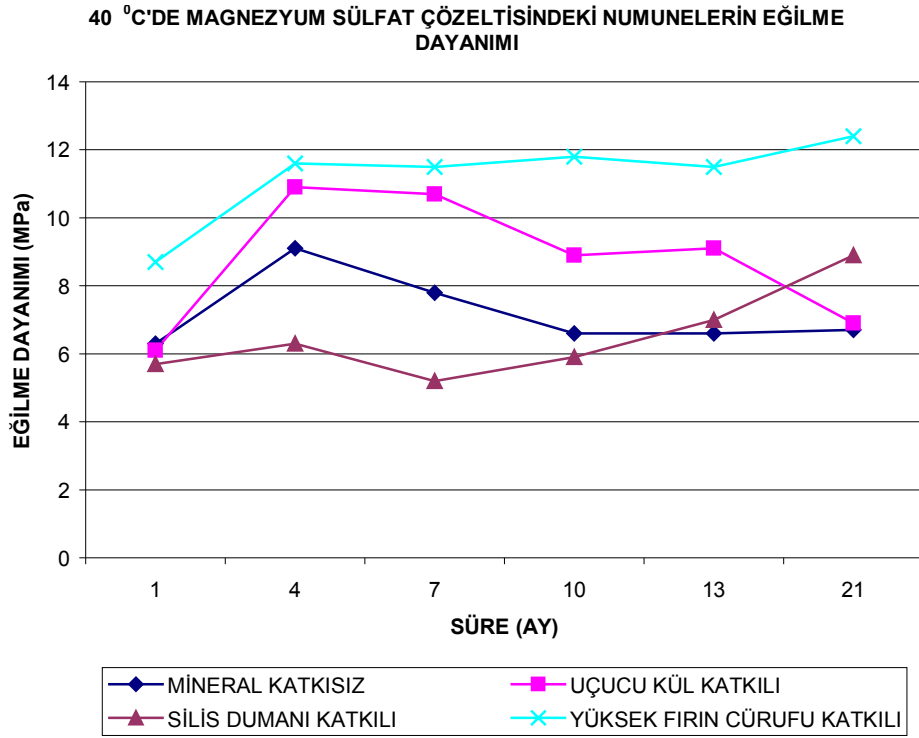
4.2. Harç Numuneler

4.2.1. Eğilmede Çekme Dayanımları



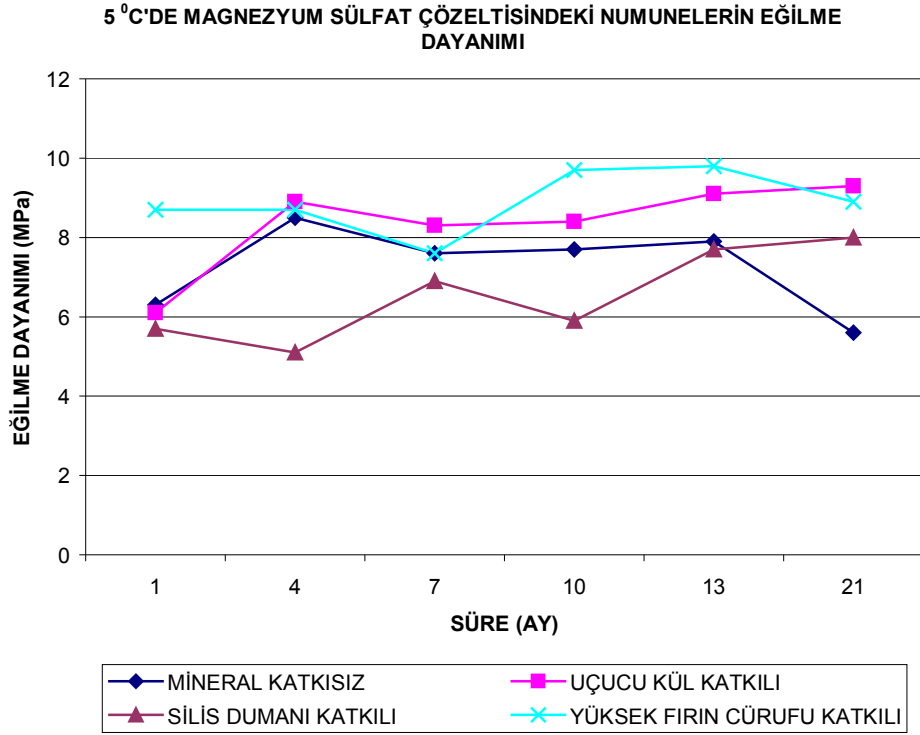
Şekil 61. Oda sıcaklığında magnezyum sülfat çözeltisine maruz numunelerin eğilmede çekme dayanımları

Yüksek fırın cürufu ilaveli harç numunelerinin ilk aydaki eğilmede çekme dayanımları en yüksektir. Silis dumanı ilaveli numunelerin eğilme dayanımı ise en düşüktür. 4. ay sonundaki ölçümlerde mineral katkısız, uçucu kül katkılı ve yüksek fırını cürufu ilaveli harç numunelerinin eğilmede çekme dayanımları birbirlerine oldukça yakındı. 7. aydaki ölçümlerden sonra mineral katkısız harçların eğilmede çekme dayanımları azalmaya başladığı ve 13. ayda sıfıra düştüğü gözlemlendi. 13. ay sonunda oda sıcaklığında magnezyum sülfat çözeltisindeki mineral katkısız harçlar tamamen harç özelliğini kaybederek çamurumsu bir yapıya dönüştüğü gözlemlenmiştir. Uçucu kül ilaveli harç numunelerinin eğilmede çekme dayanımlarında 7. aydan 21. aya kadar bir azalma meydana gelmiştir. Yüksek fırın cürufu ve silis dumanı ilave numunelerinin eğilmede çekme dayanımlarında 10 aya kadar paralel seyir gösterdiği on aydan sonra ise az miktarda artış olduğu görülmektedir. Bu numunelerinin eğilmede çekme dayanımlarındaki değişimin numunelerden kaynaklanmaktadır.



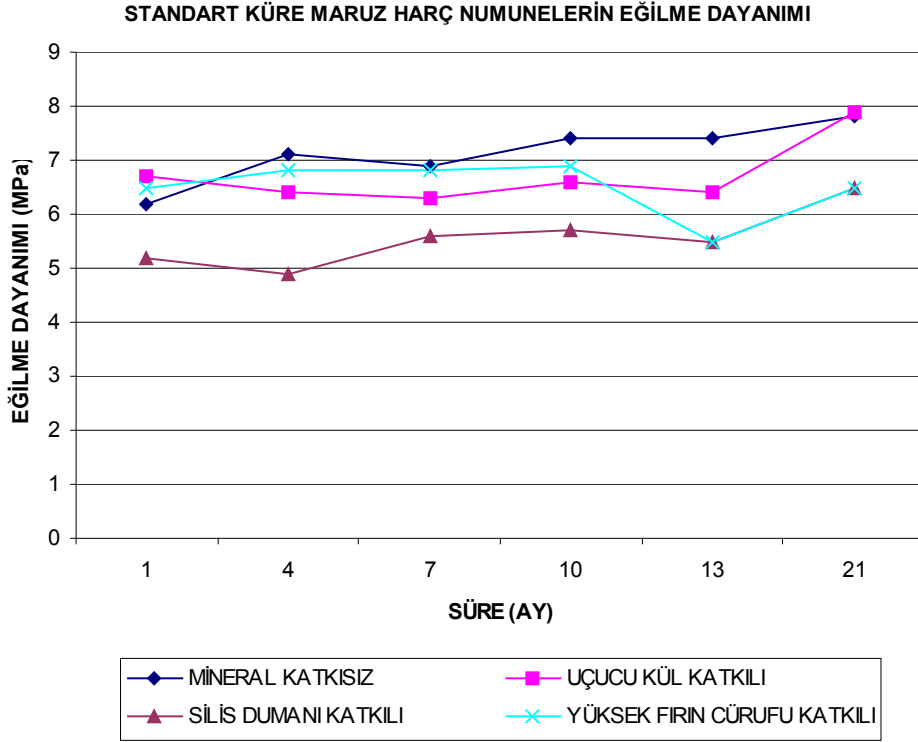
Şekil 62. 40°C’de magnezyum sülfat çözeltisine maruz numunelerin eğilme çekme dayanımları

40°C’de magnezyum sülfat çözeltisindeki harç numunelerde 4. aydaki eğilme çekme dayanımlarında standart kür havuzu, oda sıcaklığında ve 5°C’de magnezyum sülfat çözeltisindeki numunelere göre daha fazla oranda artış gözlemlendi. Ortam sıcaklığının fazla olması çimento hidratasyon hızını artırdığı ve böylece 40°C’deki numunelerin 4. aydaki eğilme çekme dayanımlarının diğer ortamlardaki numunelerden daha yüksek olmasına neden olduğu düşünülmektedir. Yüksek fırın cürufu ilaveli ve silis dumanı ilaveli harç numunelerin eğilme çekme dayanımları 21 aylık sürede 4. aydaki değerden fazla bir değişiklik göstermemektedir. Mineral katkı içermeyen ve uçucu kül ilaveli harç numunelerin eğilme çekme dayanımlarında ise 21 aylık sürede 4. aya göre azalma meydana gelmiştir.



Şekil 63. 5°C’de magnezyum sülfat çözeltisine maruz numunelerin eğilmede çekme dayanımları

5°C’de magnezyum sülfat çözeltisindeki mineral katkı içermeyen harç numunelerin eğilmede çekme dayanımında 1. aya göre 4. ayda belli bir miktarda artış görüldü. 4. aydan sonra ise eğilmede çekme dayanımı 21. aya kadar azalmıştır. 21. aydaki değer 1. aydaki değer altına düştüğü görülmektedir. Silis dumanı ve yüksek fırın cürufu ilaveli harç numunelerin eğilmede çekme dayanımları 21 aylık sürede 1. aydaki değere göre fazla bir değişim göstermedi.



Şekil 64. Standart kür havuzundaki numunelerin eğilmede çekme dayanımları

Standart kür havuzundaki numunelerin eğilmede çekme dayanımları 21 ay süresince 1. aydaki değere göre fazla bir değişim meydana gelmemiştir.

4.2.2. Elektron Mikroskobu Görüntülerinin İrdelenmesi

Elektron mikroskobu görüntülerinden 5°C, oda sıcaklığı ve 40°C'de %2 konsantrasyona sahip magnezyum sülfat çözeltisinin tüm harç numunelerde bozulmalara neden olduğu anlaşılmaktadır. Elektron mikroskobu görüntülerinde en belirgin rastlanan olay çatlak oluşumları ve çatlakların ilerlemeleridir. Çatlak oluşumlarına yeni madde oluştuğu anlaşılan yerlerde sıklıkla rastlanmaktadır. Yeni madde oluştuğu bölgelerdeki çatlakların çimento hamuru içerisinde ilerlemesi, diğer çatlak ve boşluklarla birleşmeleri elektron mikroskobu görüntülerinden anlaşılmaktadır. Bu şekildeki çatlak gelişiminin harç numunelerin geçirimsizliğini artırdığı şüphesizdir. Çatlakların iç kısımlarındaki alçıtaşı ve brüsit oluşumundan dolayı meydana gelen beyazlamadan da sülfat çözeltisinin numune iç kısımlarına nüfuz etmesinde bu çatlakların ne derecede etkili olduğunun kanıtıdır.

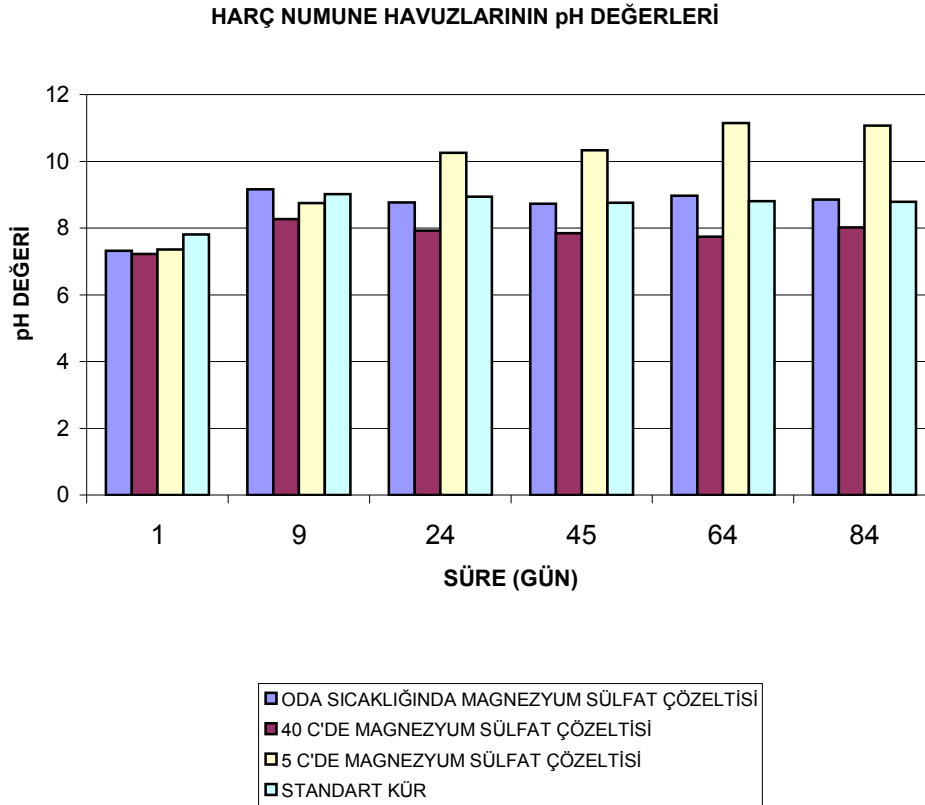
Elektron mikroskobu görüntülerinden fazla bozulmanın olduğu numunelerde yeni madde oluşumlarının da fazla olduğu görülmektedir. Bu yeni madde oluşumu bozulmaların hızlanmasına katkıda bulunmaktadır.

Harç numunelerde sülfat etkisinden oluştuğu anlaşılan çatlaklar, boşluk ve çatlaklarda oluşmuş kristal yapılar, numune kenarlarında beton özelliğini tamamen kaybetmesi ve alçıtaşı oluşumundan dolayı beyazlama tüm numunelerde görülen ortak oluşumlardır.

Elektron mikroskobu kenar görüntüleri incelendiğinde harç numunelerin çevresinde oluşan alçıtaşı ve brüsit tabakasının numune yüzeyinden küçük parçaların kopmasını engellediği anlaşılmaktadır.

Harç üretimi sırasında oluştuğu anlaşılan boşluklarda kristal yapılı madde oluşumlarına ve çatlaklara sıkça rastlanmaktadır. Bu boşluklardaki çatlak oluşmasına kristal yapılı maddelerin neden olduğu muhakkaktır.

4.2.3. Harç Numune Havuzlarının pH Değerleri



Şekil 65. Harç numune havuzlarının pH değerlerinin grafiksel gösterimi.

Şekil 65'te oda sıcaklığında, 5°C'de, 40°C'de magnezyum sülfat çözeltisine ve standart küre maruz harç numune havuzlarının çözelti konduktan sonraki 1., 9., 15., 36., 64. ve 84. günlerinde ölçülen pH değerlerinin grafiksel değerlendirilmesi görülmektedir. Şekil 65'te görüldüğü gibi ilk günkü harç numune havuzlarının pH değerleri birbirine

oldukça yakındır. Tüm havuzların 9 gün sonraki pH değerlerinde artış meydana gelmiştir. 5°C'deki magnezyum sülfat çözeltili havuzun pH değeri 84 gün boyunca sürekli artmıştır. Diğer havuzların pH değeri 9. güne göre fazla değişim göstermemiştir. Havuzların sıcaklığı azaldıkça pH değerinde artış meydana geldiği Şekil 65'ten anlaşılmaktadır. Ortamın pH değeri düşmesinin betonda daha bozucu etkilere neden olduğu bilinmektedir. Oda sıcaklığındaki magnezyum sülfat çözeltilisindeki numunelerin 5°C'deki numunelerden daha çabuk bozulmasının nedenlerinden biri bu olabilir. Bu düşünceye göre 40°C'deki numunelerin daha erken bozulması gerekmektedir. Ancak en geç bu numunelerde bozulma olmuştur. Sıcak ortamdaki numunelerde alçıtaşı ve brüsit tabakasının diğer sıcaklıktaki numunelere göre daha erken oluşması, ortam sıcaklığının fazla olmasından dolayı hidrasyon reaksiyonlarının daha çabuk gelişmesi bu numunelerdeki bozulmaları diğer ortamlara göre daha yavaşlatmıştır.

5. SONUÇLAR

Çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi iki başlık altında toplamak ve özetlemek mümkündür.

a) Beton numuneler üzerinde elde edilen sonuçlar:

1. Standart kür havuzunda tutulan numunelerin basınç dayanımları mineral katkı türünden bağımsız olarak 7 ay süresince artış gösterdiği ve bu dönemden sonra ciddi anlamda değişmediği gözlenmiştir. En yüksek dayanım yüksek fırın cürufu içeren numunelerde elde edilirken bunu sırasıyla ilk yaşlarda silis dumanı ilaveli betonlar, ileri yaşlarda uçucu kül içeren betonlar izlemiştir. Mineral katkı içermeyen betonlar deney süresinden bağımsız olarak en düşük dayanımı vermişlerdir.
2. Kılcal su emme deneyi sonucunda silis dumanı ilaveli betonların kılcal su emmesi en fazla olduğu görülmüştür. Bunu sırasıyla yüksek fırın cürufu ilaveli, uçucu kül ilaveli ve mineral katkı içermeyen numuneler takip etmiştir. Kılcal su emme ile su emeler kıyaslandığında mineral katkısız betonlardaki boşluk çaplarının mineral katkılılardan daha büyük olduğu düşünülmektedir.
3. Sodyum sülfat çözeltilisine maruz bırakılan mineral katkı içeren numunelerin basınç dayanımları yine mineral katkı türünden bağımsız olarak ilk 7 ay sürede artarken bundan sonraki dönemde önemli bir değişim göstermemişlerdir. Yüksek fırın cürufu içeren betonların basınç dayanımları uçucu kül ve silis dumanı içerenlere göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Diğer taraftan mineral katkı içermeyen numunelerin basınç dayanımları ilk 7 ay süre zarfında artarken bu süreden sonra belirgin bir azalma eğilimi göstermektedirler. Bu, mineral katkı içermeyen betonların özellikle 20 aylık bir süre itibarıyla sodyum sülfat çözeltilisinde ciddi anlamda hasar görmeye başladığını göstermektedir.
4. Magnezyum sülfat çözeltilisine maruz bırakılan numunelerin basınç dayanımlarında zamana bağlı olarak meydana gelen değişim sodyum sülfat çözeltilisine maruz bırakılan numunelerin basınç dayanımlarında meydana gelen değişime oldukça benzerdir. Burada gözlemlenen en önemli fark mineral katkı içermeyen numunelerde 13 aylık deney süresi sonrası oluşan dayanım kaybının daha ciddi olmasıdır.
5. Karadeniz suyuna maruz bırakılan numunelerin basınç dayanımları deney süresine bağlı olarak değişimi standart kür havuzunda tutulan numunelere benzer bir eğilim

göstermişlerdir. Deniz suyunun 23 aylık süre boyunca betonun basınç dayanımı üzerindeki etkisinin standart kür ile aynı mertebede olduğu görülmektedir.

6. Basınç dayanımı üzerindeki etkileri açısından sodyum ve magnezyum sülfat çözeltilerine maruz bırakılan beton numunelerin davranışları oldukça benzer olduğu ve bunun mineral katkı türünden bağımsız olduğu görülmektedir.
7. Standart kür havuzunda tutulan numunelerin ultrases geçiş hızlarında mineral katkı türünden bağımsız olarak deney süresince dikkate değer bir değişime uğramadığı görülmektedir. Benzer durum mineral katkı içermeyen numuneler içinde geçerlidir.
8. Sodyum sülfat çözeltilisine maruz mineral katkılı numunelerin ultrases geçiş hızları standart kür havuzundaki numunelerle benzer seyir göstermiştir. Benzer durum mineral katkısız beton numuneler içinde geçerlidir.
9. Magnezyum sülfat çözeltilisine maruz mineral katkılı numunelerin ultrases geçiş hızları standart küre maruz numunelerle benzer seyir göstermiştir. Magnezyum sülfat çözeltilisine maruz mineral katkısız betonların ultrases geçiş hızlarında 7. aydan sonra belirgin bir azalma görülmektedir. Magnezyum sülfat çözeltilisine maruz mineral katkısız numunelerin ultrases geçiş hızlarında sodyum sülfat çözeltilisine maruz mineral katkısız numunelere kıyasla belirgin bir azalma meydana gelmiştir. Bu durum magnezyum sülfat çözeltilisinin sodyum sülfat çözeltilisine nazaran bozucu etkisinin daha fazla olabileceğini göstermektedir.
10. Deniz suyuna maruz beton numunelerin ultrases geçiş hızları standart kür havuzundaki numunelerle benzer seyir göstermiştir.
11. Maruz bırakılan ortamdan bağımsız olarak beton numuneler üzerinde ölçülen beton çekici okumalarının 10 aylık deney süresince artış göstermiş olduğu ve bu dönemden sonra beton çekici okumalarında hafif bir azalış eğiliminin belirginleştiği gözlemlenmiştir. Magnezyum sülfat çözeltilisine maruz numunelerdeki azalma diğerlerine göre daha belirgindir. Bu, magnezyum sülfat çözeltilisine maruz numunelerin yüzeylerine yakın tabakanın zamanla yumuşaması ile ilgili olduğu söylenebilir.
12. Yapılan gözle muayenede magnezyum sülfat çözeltilisine maruz beton numunelerin yüzeyinde beyazımsı bir tabaka oluştuğu ve bu beyazımsı tabakanın zamanla yumuşadığı ve çamurumsu bir yapıya dönüştüğü tespit edilmiştir. Buna karşın sodyum sülfat çözeltilisine maruz bırakılan numune yüzeylerinde buna benzer oluşumlara

rastlanmamıştır ancak numune yüzeylerinde çatlak oluşumunu takiben parça kopması biçiminde beton numunelerde bir bozulma mekanizması gözlemlenmiştir.

b) Harç numuneler üzerinde elde edilen sonuçlar:

1. Bir aylık standart kür sonunda eğilmede çekme dayanımı yüksek fırın cürufu ilaveli numunelerde en yüksek olmuştur. Bunu sırasıyla mineral katkısız, uçucu kül ilaveli ve silis dumanı ilaveli numuneler izlemiştir. Mineral katkısız ile uçucu kül ilaveli numunelerin bir aylık eğilmede çekme dayanımları oldukça yakın bir eğilim göstermiştir.
2. Oda sıcaklığında magnezyum sülfat çözeltisine maruz mineral katkısız numunelerin eğilmede çekme dayanımları 7. aydan sonra belirgin bir azalma göstermiştir. Bu numunelerin eğilmede çekme dayanımları 13. ayda sıfıra düşmüştür. Magnezyum sülfat çözeltisine maruz uçucu kül ilaveli numunelerin eğilmede çekme dayanımlarında deney süresince kayda değer bir değişim gözlenmemiştir. Silis dumanı ve yüksek fırın cürufu ilaveli numunelerin eğilmede çekme dayanımları deney süresince hafif bir artış eğilimi içindedir.
3. 40°C'de magnezyum sülfat çözeltisine maruz mineral katkısız ve uçucu kül ilaveli harç numunelerin eğilmede çekme dayanımlarında 4. aya kadar artış, 4. aydan 21. aya kadar azalma görülmüştür. Silis dumanı ve yüksek fırın cürufu ilaveli harç numunelerin eğilmede çekme dayanımları deney süresince hafif bir artış eğilimi göstermişlerdir.
4. 5°C'de magnezyum sülfat çözeltisine maruz gerek mineral katkısız harç numunelerinin gerekse mineral katkı içeren numunelerin eğilmede çekme dayanımları deney süresince çok hafif bir artış göstermişlerdir.
5. Standart küre maruz harç numunelerin eğilmede çekme dayanımları deney süresince hafif bir artış eğilimi göstermiştir.
6. Mineral katkısız harç numuneler en fazla oda sıcaklığındaki magnezyum sülfat çözeltisinden etkilendiği görülmüştür. Bu ortamdaki numuneler ilk olarak çamurumsu yapıya dönüşerek harç özelliğini kaybettiler. Bunu 5°C'deki magnezyum sülfat çözeltisi ve 40°C'deki magnezyum sülfat çözeltisindeki numuneler takip etmiştir.
7. Ortamların pH değerlerinin harç numunelerin bozulmasında etkili olduğu görülmüştür. Ortam sıcaklığı düştükçe ortamın pH değerinde artış görülmüştür. Oda sıcaklığında magnezyum sülfat çözeltisindeki mineral katkısız harç numunelerin 5°C'deki mineral

katkısız harç numunelerden daha erken bozulmasının nedeninin pH değerindeki artış olduğu düşünülmektedir. Bu düşünceye göre en fazla bozulmanın 40°C'de tutulan numunelerde görülmesi gerekmektedir. Ancak 40°C'de magnezyum sülfat çözeltisindeki harç numunelerde ortam sıcaklığından dolayı çimento hamurundaki reaksiyonların hızlı gelişmesi ve numune çevresinde diğer ortamlara göre belirgin görülen brusit ve alçıtaşı oluşumunun bu numunelerin bozulmasını diğer ortamlara göre geciktirmiştir.

8. 5°C'de magnezyum sülfat çözeltisine maruz harç numunelerde gözle yapılan inceleme sonucu en fazla bozulma mineral katkısız numunelerde görülmüştür. Bu numuneleri sırasıyla uçucu kül ilaveli, yüksek fırın cürufu ilaveli numuneler takip etmiştir. Silis dumanı ilaveli numunelerde herhangi bir bozulmaya rastlanmamıştır.
9. Tüm ortamlarda ilk yaşlarda silis dumanı ilaveli harç numunelerde eğilmede çekme dayanımı en düşük kalmıştır. Ancak yapılan incelemelerde en az bozulma bu numunelerde elde edilmiştir. Bu durum eğilmede çekme dayanımı düşük olan harç numunelerin magnezyum sülfat ortamındaki performansının kötü olacağı anlamına gelmediğini göstermektedir.
10. Elektron mikroskobu görüntülerinde magnezyum sülfat çözeltisine maruz tüm numunelerde bozulmalar görülmektedir. Bu bozulmalar numune içerisinde yeni madde oluşumu ve çatlak gelişimi şeklinde görülmektedir. Numunelerdeki çatlak iç kısımlarda meydana gelen beyazlama magnezyum sülfat çözeltisinin nasıl nüfuz ettiğini göstermektedir. Genellikle numune içerisindeki boşluklarda yeni madde oluşumlarına rastlanmaktadır. Yeni madde oluşumunun tespit edildiği yerlerde çatlaklar görülmektedir. Elektron mikroskobu görüntülerinden çatlak oluşumu ve çatlak ilerlemesi hakkında fikir edinilebilmektedir.
11. Bu çalışmada XRD analizleri yeni madde oluşumlarının tespitinde, oluşan maddelerin birbirinden ayırt edilmesinde ve analizinde yeterli olmadığı görülmüştür.

6. ÖNERİLER

Sülfat etkisi harçlara göre betonlarda daha yavaş ilerleyen kimyasal bozulma mekanizmasıdır. Süreli çalışmalarda sülfat konsantrasyonunun yüksek tutulması daha uygun olacağı düşünülmektedir.

XRD metoduyla araştırılan minerallerin kırılma açıları birbirine çok yakın olduğundan malzeme tayininde kullanılması iyi sonuç vermemektedir.

Bu tür çalışmalarda genellikle 1 aylık sürelerde yapılan havuz sularının değişimi süreleri pH değerleri değişimleri dikkate alındığında bir haftalık sürelerde olması daha uygun olabilir. Ancak ekonomiklik düşünüldüğünde 1 yıllık süreli çalışmalarda 1 aylık daha uzun süreli çalışmalarda ise çözelti değişim periyodu daha fazla tutulabilir.

Çalışmadaki malzeme kimyasal analizlerinin çokluğu, yeni madde oluşumlarındaki çeşitlilik ve mikro yapısal araştırmalar gibi çok unsuru içermesinden dolayı kimya, fizik ve jeoloji gibi bilim dallarından da yüksek lisans seviyesinde bu çalışmanın içerisindeki unsurlardan araştırma konuları belirlenip daha kalabalık ekiple yürütülmesi uygun olur.

Kimyasal analizler ve mikroyapısal incelemeler için birlikte çalışılacak kişi ve kuruluşların imkanları belirlenirken bu alandaki benzer türden çalışmalarını muhakkak dikkatli şekilde incelenmelidir. Elde edilen sonuçların doğruluğu ve çalışmanın istenilen şekilde yürütülmesi açısından bu husus önem arz etmektedir.

7.KAYNAKLAR

- Abd El Aziz, M., Abd El Aleem, S., Heikal, M. ve Didamony, H., 2005. Hydration and Durability of Sulphate-Resisting and Slag Cement Blends in Caron's Lake Water, Cement and Concrete Research, 35 , 1592 -1600.
- Akman, M.S., 1992. Deniz Yapılarında Beton Teknolojisi, İTÜ Basımevi İstanbul.
- Aköz,F., 2002. Tarihi Yapıların Onarımında Kullanılacak Harç Üretimi, Yüksek Lisans Tezi, YTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü,
- Al-Amoudi, O.S.B., 2002. Attack on Plain and Blended Cement Exposed to Aggressive Sulfate Environments, Cement & Concrete Composites, 24, 305-316.
- Arslan,M., 2001. Beton, Atlas Yayın Dağıtım, İstanbul.
- Batic, O.R., Milanesi,C.A., Maiza, P.J. ve Marfil, S.A., 2000. Secondary Ettringite Formation in Concrete Subjected to Different Curing Contition, Cement and Concrete Research, 30, 1407-1412.
- Baradan, B., Yazıcı, H. ve Ün, H., 2002. Betonarme Yapılarda Kalıcılık (Durabilite), D.E.Ü. Mühendislik Yayınları, 1. Baskı, İzmir.
- Biczok, I., 1967. Concrete Corrosion Concrete Protection, Chemical Publishing.
- Bonen, D. ve Cohen, M.D., 1992. Magnesium Sulfate Attack on Portland Cement Paste: Microstructural Analysis, Cement and Concrete Research, 22, 169-180.
- Brown, P., ve Hooton, R.D., 2002. Ettringite and Thumasite Formation in Laboratory Concretes Prepared Using Sulfate-resisting Cements, Cement & Concrete Composites, 24, 61-370.
- Canpolat,F., Yılmaz K., Sümer, M. ve Uysal ,M., 2005. Zeolit Katkılı Çimentoların Özelliklerinin İncelenmesi, 6. Ulusal Beton Kongresi, , İstanbul, Bildiriler kitabı, 63-72.
- Casanova, I., Aguado, A. ve Agullo, L., 1997. Aggregate Expansivity Due to Sulfide Oxidation-II Physico-Chemical modeling of Sulfate Attack, Cement and Concrete Research, 27, 1627-1632.
- Cilason,N. ve Aksoy, N., 2000. Beton Yapı Hasarları Onarım ve Korunması ve Sıcak İklimlerde Beton, Lebib Yalkın Yayınları, İstanbul.
- Cohen,M.,D., 1991. Sulphate Attack On Concrete –Research Needs, Cement and Concrete Research, 88,1, 62-69.

- Collepari, M., 2003. A state-of-the Art on Delayed Ettringite Attack on Concrete, Cem.&Conc. Com., 25, 401-407.
- Collett, G., Crammond, N.J., Swamy, R.N. ve Sharp, J.H., 2004. The Role of Carbon Diokside in Formation of Thaumassite, Cement and Concrete Research, 24, 1599-1612.
- Crammond, N.J., 2003. The Thaumassite Form of Sulfate Attack in the UK, Cement & Concrete Composites, 25, 809-818.
- Diamond, S., 1996. Delayed Ettringite Formation, Cement & Concrete Composites, 18, 205-215.
- Diamond, S. ve Lee, R.J., 1999. Microstructural Alterations Associated With Sulfate Attack in Permeable Concretes, American Ceramic Society , 123-174.
- Divet, L. ve Randriambololona, R., 1998. Delayed Ettringite Formation: The Effect of Temperature and Basicity on The Interaction of Sulfate and C-S-H Phase, Cement and Concrete Research, 28, 357-363.
- Erdoğan, T.Y., , 2003. Beton, Metu Pres, Ankara.
- Ersoy, U., 2004. Betonarme Yapıların Deprem Davranışı İle İlgili Bir İrdeleme, Beton 2004 Kongresi, İstanbul, Bildiriler kitabı, 16-22.
- Ganjian, E. ve Pouya, S.H., 2005. Effect of Magnesium and Sulfate Ions on Durability of Silica Fume Blended Mixes Exposed to The Seawater Tidal Zone, Cement and Concrete Research, 15, 1332-1343.
- Göktepe, A.B., İnan, G., Ramyar, K. ve Sezer, A., 2006. İnteraction Between sulfate and Cloride Solution Attack of Concrete With and Without Fly Ash, Cement and Concrete Research, 4, 441-449.
- Henrichsen, A., 2005. Design of Concrete for High Pereformance Structures, 6. Ulusal Beton Kongresi, İstanbul, Bildiriler kitabı, 23-32.
- Hime, W.G., 1996. Clinker Sulfate: A Cause of Distress and a Need For Specification. Concrete for Environment Enhancement and Protection, E&FN Spon, London, 8, 387-395.
- Irassar, E.F., Gonzalez, M. ve Rahhal, V., 2000. Sulfate Resistance of Type V Cement with Limestone Filler and Natural Puzzolana, Cem.&Conc. Com., 22, 361-368.
- Lea, F.M., 1970. the Cemistry of cement and Concrete, Edward Arnold Ltd.
- Martin, B.L. ve Firlotte, C.A., 1995. Protecting Substructures in Marine Environments, Material Performance , 14, 26-29.

- Mehta,P.K., Schiessl,P. ve Raupach, M., 1992. Performance and Durability of Concrete System, The 9th International congress on the Chemisty of Cement, India, Bildiriler kitabı 571-605.
- Monterio, P.J.M. ve Kurtis,K.E., 2003. Time to Failure for Concrete Exposed to Severe Sulfate Attack, Cement and Concrete Reserch, 33, 987-993.
- Nehdi,M. ve Hayek, M., 2005. Behavior of Blended Cement Motars Exposed to Sulfate Solutions Cycling in Relative Humidity, Cement and Concrete Research, 735-742.
- Neville,A., 2004. The Confused World of Sulfate Attack On Concrete,Cement and Concrete Research, 34,1275-1296.
- Neville, A., 2003. Properties on concrete, Final Edition, Wiley, Newyork,
- Pavoine,A., Divet,L. ve Fenouillet, S., 2006. A concrete Performance Test for Delayed Ettringite Formation: Part I Optimisation, Cement and Concrete Research, 36, 2138-2143.
- Rasheeduzzafar, A., Abduljauwad, S.N. ve Maslehuddin, M., 1994. Machanizm of Magnesium-Sodium Sulfate Attack in Plain and Blended Cements, ASCE Mater Civil Engineering, 201-222.
- Santhanam, M., Cohen, M.D. ve Olek, J., 2001. Sulfate Attack Research- Whither Now?, Cement and Concrete Reserch, 31, 845-851.
- Santhanam,M., Cohen,M.D. ve Olek,J., 2003. Effect of Gypsum Formation on the Performance of Cement Mortars During External Sulfate Attack, Cement and Concrete Research, 32, 325-332.
- Skalny, J., Marchand, J. ve Odler, I., 2002. Sulfate Attack on Concrete, Spon Press, New York.
- Stark, J. ve Bollmann, K., 2002. Delayed Ettringite Formation in Concrete, www.itn.is/ncr/publications/doc-23-2.pdf.
- Taşdemir, M.A., Bayramov, F., İlki, A. ve Kocatürk, A.N., 2005. Çelik Tel Donatılı Çimento Esaslı kompozitler, 6. Uluslararası Beton Kongresi, İstanbul, Bildiriler Kitabı, 447-457
- Taylor, H.F.W., Famy, C. ve Scrivener, K.L., 2001. Delayed Ettringite Formation, Cement and Concrete Research, 31, 683-693.
- Thomas, M.D.A., Rogers, C.A. ve Bleszynski,R.F., 2003. Occurrences of Thaumasite in Laboratory and Field Concrete, Cement and Concrete Research, 25, 1045-1050.

- Thomas, M.D.A., Shehata, M.H., Shashiprakash, S.G., Hopkins, D.S. ve Cail, K., 1999. Use of Ternary Cementitious Systems Containing Silica Fume and Fly Ash in Concrete, Cement and Concrete Reserch, 29, 1207-1214.
- Tokyay, M. ve Erdoğan, K., 2007. Cürüflar ve Cürüflü Çimentolar, Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği Ar-Ge Enstitüsü, Ankara.
- Topçu,İ.B., 2006. Yapı Malzemeleri ve Beton , Şahvar Offset,Eskişehir.
- TS 3114 ISO 4012, 1998. Beton-Deney Numunelerinin Basınç Dayanımı Tayini, T.S.E, Ankara.
- TS 3530 EN 933-1, 1999. Agregaların Geometrik Özellikleri İçin Deneyler, T.S.E, Ankara.
- TS 706 EN 12620, 2003. Beton Agregaları, T.S.E, Ankara.
- TS EN 1008, 2003. Beton-Karma Suyu-Numune Alma, Deneyler ve Beton Endüstrisindeki İşlemlerden Geri kazanılan Su Dahil, Suyun Beton Karma Suyu Olarak Uygunluğunun Tayini Kuralları, T.S.E, Ankara.
- TS EN 1097-6, 2002. Agregaların Mekanik ve Fiziksel Özellikleri İçin Deneyler, T.S.E, Ankara.
- TS EN 196-1, 2002. Çimento Deney Metotları, T.S.E, Ankara.
- TS EN 197-1, 2002. Çimento, T.S.E, Ankara.
- TS EN 206-1, 2002. Beton, T.S.E, Ankara.
- TS 3624, 1981. Sertleşmiş Betonda Özgül Ağırlık, Su Emme ve Boşluk Oranı Tayin Metodu, T.S.E., Ankara.
- TS EN 480-5, 2008. Kimyasal Katkılar- Beton Harç ve Şerbet İçin Deney Metodları- Bölüm 5: Kılcal Su Emme Tayini, T.S.E., Ankara.
- Türker P., Erdoğan, B., Katnaş, F. ve Yeğınobalı,A., 2007. Türkiye'deki Uçucu Küllerin Sınıflandırılması ve Özellikleri, Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği Ar-Ge Enstitüsü, Ankara.
- Türker, F., Akos, F., Koral, S. ve Yüzer,N., 1997. Effect of magnesium sulfate Concantration on Sulfate resistance of Mortars With and Without Silica Fume, Cement and Concrete Research, 205-214.
- Türkmen, İ., 2002. Korozif Etkiler Altında Yüksek Fırın Cürufu ve silis Dumanı katkılı Yüksek Dayanımlı Betonların Mekanik Özellikleri ve Dayanıklılığı, Doktora tezi, A.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.

- Yang, R. ve Buenfeld, N.R., 2000. Microstructural İdentification of Thaumasite in Concrete by Backscattered Elektron İmaging at Low Vacuum, Cement and Concrete Research, 775-779.
- Yang, R. ve Lawrence, C.D., 1999. Delayed Ettringite Formation in Heat-Cured Portland Cement Mortars, Cement and Concrete Research, 29, 17-25.
- Yeğınobalı,A., 2007, Silis Dumanı ve Çimento ile Betonda Kullanımı, , Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği Ar-Ge Enstitüsü, Ankara.
- Yeğınobalı,A. ve Ertün,T., 2007. Çimentoda Yeni Standartlar ve Mineral Katkılar, Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği Ar-Ge Enstitüsü, Ankara.

ÖZGEÇMİŞ

1973 yılında Rize ilinin Çayeli ilçesinde doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini Rize'nin Fındıklı ilçesinde tamamladı. 1994 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi Sakarya Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümünde lisans eğitimini bölüm ikincisi olarak tamamladı. 1999 yılında Sakarya Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Yapı Anabilim dalında yüksek lisansını tamamladı. Yüksek lisans öğrenimi süresinde Net Holding Kosmos Turizm.Tic. A.Ş İstanbul'da ve Okman İnşaat Samsun Kültür Merkezi ve SSK Hastanesi inşaatında çalıştı. 1999-2000 yılları arasında Cumhurbaşkanlığı Muhafız Alayında İnşaat kısım komutanı olarak askerliğini tamamladı.2000-2001 yılları arasında Prokon Beşer İş Ortaklığı AŞ.'de Trabzon ili zorunlu kesintisiz ilköğretim okulu inşaatında kontrol mühendisi olarak çalıştı. 2001 yılında KTÜ Rize Meslek Yüksekokulunda öğretim görevlisi olarak göreve başladı. 2001 yılında KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Yapı Anabilim Dalında doktora öğrenimine başladı. Evli ve bir çocuk babasıdır. Orta derecede İngilizce bilmektedir.