

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**FARKLI MİNERAL BAĞLAYICI BİLEŞENLERİN BETONUN
KALICILIĞINA ETKİSİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Hasan KANDEMİR
(501091201)**

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yapı Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Hasan YILDIRIM

OCAK 2014

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 501091201 numaralı Yüksek Lisans / Doktora Öğrencisi **Hasan KANDEMİR**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**FARKLI MİNERAL BAĞLAYICI BİLEŞENLERİN BETONUN KALICILIĞINA ETKİSİ**” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Doç. Dr. Hasan YILDIRIM**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Abdurrahman GÜNER**
İstanbul Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Bekir Yılmaz PEKMEZCİ
İstanbul Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : 13 Aralık 2013
Savunma Tarihi : 21 Ocak 2014

Sevgili Aileme...

ÖNSÖZ

Gerçekleşmiş olan bu çalışmada, bana bilgi ve birikimini, maddi, manevi desteğini esirgemeyen değerli tez danışman hocam Yrd. Doç. Dr. Hasan YILDIRIM'a, İTÜ İnşaat Fakültesi Yapı Malzemesi Anabilim Dalı araştırma görevlilerinden Sayın Adil Orçun KAYA'ya ve Sayın Cengiz ŞENGÜL'e, tez çalışmasını beraber yürüttüğümüz değerli meslektaşım Kadir ÖZCAN'a, yakın dostum Melikşah DEMİR'e, çalışmalar sırasında yardımlarını eksik etmeyen tüm laboratuvar personeline teşekkürlerimi sunarım.

Bugünlere gelmemde en büyük hak sahibi olan, desteklerini biran olsun dahi esirgemeyen sevgili babam Cemalettin KANDEMİR'e, annem Sayın Hatice KANDEMİR'e, sevgili kardeşlerim Sevgi BİLGETEKİN'e, Derya ÇOBANOĞLU'na ve Erhan KANDEMİR'e teşekkür ederim.

Yapılan bu çalışmada elde edilen sonuçların, konuyla ilgili yapılacak diğer çalışmalara yardımcı olmasını dilerim.

Ocak 2014

Hasan KANDEMİR
(İnşaat Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
SİMGELER	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xv
ŞEKİL LİSTESİ.....	xvii
ÖZET.....	xix
SUMMARY	xxi
1.GİRİŞ	1
1.1. Betonun Oluşturan Malzemeler	2
1.1.1. Agregalar.....	2
1.1.2. Çimento	3
1.1.3. Su	3
1.1.4. Kimyasal katkılar	3
1.2. Puzolanlar.....	4
1.2.1. Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu	5
1.2.2. Uçucu kül	6
1.2.3. Silis dumanı.....	8
1.3. Betonun Kalıcılığı (Durabilitesi).....	10
1.3.1 Betonun geçirimsizlik özellikleri	11
1.3.1.1. Sülfatların betona etkisi.....	12
Magnezyum sülfat ($MgSO_4$) etkisi	15
1.3.1.2. Klorürlerin betona etkisi.....	17
2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	19
2.1. Deneyde Kullanılan Malzemeler	19
2.1.1. Agregalar.....	19
2.1.2. Çimento	21
2.1.3. Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu (Ö.G.Y.F.C.)	22
2.1.4. Uçucu kül	23
2.1.5. Kimyasal katkı	24
2.1.6 Magnezyum sülfat ($MgSO_4$).....	24
2.1.7. Betonun karma suyu.....	24
2.2. Üretilen Betonların Bileşimleri ve İsimlendirilmesi	24
2.3. Taze Beton Deneyleri.....	28
2.3.1. Çökme (Slump) deneyi	28
2.3.2. Birim hacim kütle deneyi	29
2.4. Sertleşmiş Beton Deneyleri.....	29
2.4.1. Basınç dayanımı	29
2.4.2. Hızlı klorür geçirimsizliği deneyi (ASTM 1202-10)	29
2.4.3. Ultra-ses hızı deneyi.....	30

2.4.4. Kılcal su emme deneyi	31
2.4.5. Üç Noktalı eğilme deneyi.....	32
3. DENEY SONUÇLARI.....	35
3.1. Taze Beton Deney Sonuçları	35
3.2. Sertleşmiş Beton Deney Sonuçları	37
3.2.1. Basınç deneyi sonuçları	37
3.2.2. Hızlı klorür geçirimliliği deney sonuçları	38
3.2.3. Kılcal su emme deneyi sonuçları	39
3.3. Sülfat Etkisinde Kalan Numunelere Uygulanan Deneylerin Sonuçları	40
3.3.1. Ultra-ses hızı deneyi sonuçları	40
3.3.2. Eğilme dayanımı deney sonuçları	41
3.3.3. Ağırlık değişimi.....	42
4. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ	45
4.1. Taze Beton Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi	45
4.2. Sertleşmiş Beton Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi	45
4.2.1. Basınç dayanımı deney sonuçlarının değerlendirilmesi	45
4.2.2. Hızlı klorür geçirimliliği deney sonuçlarının değerlendirilmesi	47
4.2.3. Kılcal su emme deneyi sonuçlarının değerlendirilmesi	48
4.3. Sülfat Etkisinde Kalan Numunelere Uygulanan Deneylerin Sonuçlarının Değerlendirilmesi	49
4.3.1. Ultra-ses hızı deneyi sonuçlarının değerlendirilmesi	49
4.3.2. Eğilme dayanımı deney sonuçlarının değerlendirilmesi	49
4.3.3. Ağırlık değişim sonuçlarının değerlendirilmesi	50
5. GENEL SONUÇLAR	53
5.1. Sülfat Etkisine Maruz Bırakılmadan Önceki Sonuçlar	53
5.2. Sülfat Etkisine Maruz Bırakıldıktan Sonraki Sonuçlar	53
KAYNAKLAR.....	55
EKLER.....	57
ÖZGEÇMİŞ	69

KISALTMALAR

Ö.G.Y.F.C.	: Öğütölmüş Granüle Yüksek Fırın Cürufu
UK	: Uçucu Kül
ASTM	: American Society for Testing and Materials
TS EN	: Türk Standartları European Norm
DEF	: Delayed Ettringite Formation
TSE	: Türk Standartları Enstitüsü

SİMGELER

Q	: Yük (elektriksel)
I₀	: Düzeneğe akım uygulandığı anda ölçülen akım
I_t	: Düzeneğe akım uygulanmasından t dakika sonra ölçülen akım
V	: Ultrases hızı
E_d	: Dinamik elastisite modülü
e	: Katsayı ($e = ((1 + \nu) \cdot (1 - 2 \cdot \nu)) / (1 - \nu)$, Poisson oranı $\nu \approx 0.2$, prizma için $e \approx 0.9$)
Δ	: Betonun birim hacim kütlesi
L	: Numune boyu
ℓ	: Üç-nokta eğme deneyinde alt mesnet açıklığı
t	: Zaman
ΔQ	: Numune kütlesindeki değişim
A	: Numunenin suya temas eden (kılcal su emen) yüzeyinin alanı
ρ	: Suyun yoğunluğu
k	: Kılcallık katsayısı
Q₀	: Numunenin ilk kütlesi
Q_n	: t _n zamanında numune kütlesi
Q_s	: Kılcal emilen suyun kütlesi
h	: Prizmanın kare kesitinin yüksekliği
σ_e	: Eğilme dayanımı
M	: Eğilme momenti
b	: Prizmanın kare kesitinin genişliği
P	: Eğilme deneyinde uygulanan kuvvet
K	: Kompasite
W	: Mukavemet momenti ($b \cdot h^2 / 6$)

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 1. 1: F ve C sınıfı kül örneklerinin kimyasal bileşimleri, kütlece %	7
Çizelge 1. 2: Uçucu kül kullanımının betonun teknik özelliklerine etkisi	8
Çizelge 1. 3: S ilis dumanı kullanımının betonun teknik özelliklerine etkisi	9
Çizelge 2. 1: Agregada dane büyüklüğü dağılımları	19
Çizelge 2. 2: Agregada dane yoğunlukları	19
Çizelge 2. 3: Çimentonun fiziksel özellikleri	21
Çizelge 2. 4: Çimentonun kimyasal özellikleri	21
Çizelge 2. 5: Çimentonun mekanik özellikleri	22
Çizelge 2. 6: Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufalarının fiziksel özellikleri	22
Çizelge 2. 7: Yüksek fırın cürufalarının kimyasal bileşimi, kütlece %	22
Çizelge 2. 8: K uçucu külünün kimyasal özellikleri	23
Çizelge 2. 9: K uçucu külünün fiziksel özellikleri	24
Çizelge 2. 10: Numunelerin kodlandırılması	25
Çizelge 2. 11: Üretilen betonların bileşimi (1 m ³ betona giren malzeme miktarları)	26
Çizelge 2. 12: Toplam yük ile klorür geçirimsizliği arasındaki ilişki (31)	30
Çizelge 3. 1: Taze beton çökme ve birim kütle sonuçları	35
Çizelge 3. 2: Deneyde kullanılan numunelerin hava içerikleri ve kompoziteleri	36
Çizelge 3. 3: İmal edilen numunelerin karışıma giren gerçek malzeme miktarları	36
Çizelge 3. 4: Basınç dayanımları	37
Çizelge 3. 5: Hızlı klorür geçirimsizliği deney sonuçları	38
Çizelge 3. 6: A250+50 beton numunelerinin kılcallık deneyi sonuçları	39
Çizelge 3. 7: Kılcallık katsayısı	39
Çizelge 3. 8: Ultra-ses hızı deney sonuçları, (km/s)	40
Çizelge 3. 9: Eğilme-çekme dayanımı	42
Çizelge 3. 10: Magnezyum sülfat etkisinde ağırlık değişim verileri	42
Çizelge 4. 1: Basınç dayanımlarının oranları (%)	45
Çizelge 4. 2: Kılcal su emme katsayısı ve klorür geçirimsizliğinin karşılaştırılması	48
Çizelge 4. 3: Magnezyum sülfat etkisi sonrasında eğilme ve basınç dayanımları	50
Çizelge Ek. 1: Numunelerin ultra-ses hızlarının zamanla değişimi	57
Çizelge Ek. 2 : Numunelerin ağırlık ölçümleri	58
Çizelge Ek. 3 : Magnezyum sülfat etkisi sonrasında numunelere ait eğilme ve basınç dayanımları	59
Çizelge Ek. 4 : Kılcal su emme deney verileri ve kılcallık katsayısı değerleri	60

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2. 1	: TSE 706 referans ve karışım agregası granülometrisi.....	20
Şekil 2. 2	: Deneyde kullanılan agregalar	20
Şekil 2. 3	: 70 mm·70 mm·280 mm numuneler ve isimleri	27
Şekil 2. 4	: Çökme (slump) deneyi.....	28
Şekil 2. 5	: Ultra-ses hızı deney düzeneği	30
Şekil 2. 6	: Üç noktalı eğilme deneyi	32
Şekil 3. 1	: Basınç dayanımları.....	37
Şekil 3. 2	: Hızlı klorür geçirimsizliği deney sonucu	38
Şekil 3. 3	: Kılcallık katsayısı belirlenen q- $\sqrt{t}$ grafiği	40
Şekil 3. 4	: Ultra-ses hızı deney sonuçları.....	41
Şekil 3. 5	: Magnezyum sülfat etkisinde ağırlık değişim yüzdeleri	43
Şekil 4. 1	: Basınç dayanımlarının değişimi.....	46
Şekil 4. 2	: Basınç dayanımlarının değişimi.....	47
Şekil 4. 3	: Hızlı klorür geçirimsizliği değerleri ve ASTM 1202-10'a göre klorür geçirimsizlik seviyeleri.....	48
Şekil 4. 4	: Beton numunelere ait kılcallık katsayılarının karşılaştırması	49
Şekil 4. 5	: Magnezyum sülfat etkisinden önce ve sonra A200+120 numune	51
Şekil 4. 6	: Magnezyum sülfat etkisinden önce ve sonra B200+100 numune	51
Şekil Ek. 1	: R001 numunesine ait kılcallık katsayısı belirlenen q- $\sqrt{t}$ grafiği	61
Şekil Ek. 2	: A250+50 numunesine ait kılcallık katsayısı belirlenen q- $\sqrt{t}$ grafiği.....	61
Şekil Ek. 3	: A200+100 numunesine ait kılcallık katsayısı belirlenen q- $\sqrt{t}$ grafiği...	62
Şekil Ek. 4	: B250+50 numunesine ait kılcallık katsayısı belirlenen q- $\sqrt{t}$ grafiği.....	62
Şekil Ek. 5	: B200+100 numunesine ait kılcallık katsayısı belirlenen q- $\sqrt{t}$ grafiği...	63
Şekil Ek. 6	: C250+90 numunesine ait kılcallık katsayısı belirlenen q- $\sqrt{t}$ grafiği	63
Şekil Ek. 7	: K250+70 numunesine ait kılcallık katsayısı belirlenen q- $\sqrt{t}$ grafiği.....	64
Şekil Ek. 8	: K250+90 numunesine ait kılcallık katsayısı belirlenen q- $\sqrt{t}$ grafiği.....	64
Şekil Ek. 9	: R001 Numunesine ait magnezyum sülfat etkisinden önceki ve sonraki görüntüler	65
Şekil Ek. 10	: A250+50 Numunesine ait magnezyum sülfat etkisinden önceki ve sonraki görüntüler	65
Şekil Ek. 11	: A200+120 Numunesine ait magnezyum sülfat etkisinden önceki ve sonraki görüntüler.....	66
Şekil Ek. 12	: B200+100 Numunesine ait magnezyum sülfat etkisinden önceki ve sonraki görüntüler.....	66
Şekil Ek. 13	: B250+50 Numunesine ait magnezyum sülfat etkisinden önceki ve sonraki görüntüler.....	67
Şekil Ek. 14	: C250+90 Numunesine ait magnezyum sülfat etkisinden önceki ve sonraki görüntüler.....	67
Şekil Ek. 15	: K250+70 Numunesine ait magnezyum sülfat etkisinden önceki ve sonraki görüntüler.....	68
Şekil Ek. 16	: K250+90 Numunesine ait magnezyum sülfat etkisinden önceki ve sonraki görüntüler.....	68

FARKLI MİNERAL BAĞLAYICI BİLEŞENLERİNİN BETONUN KALICILIĞINA (DURABİLİTESİNE) ETKİSİ

ÖZET

Bu çalışmada farklı türden ve farklı dozajlarda kullanılan mineral bağlayıcı bileşenlerin betonun dayanımına ve kalıcılığına (durabilitesine) olan etkisi incelendi. Ülkemizde betonda çimento ile beraber kullanılan farklı kaynaklardan temin edilmiş öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu (Ö.G.Y.F.C.) ve uçucu kül (UK) ile betonlar üretildi. Deneylerde 2 farklı kaynaktan temin edilen öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu (Ö.G.Y.F.C.), başka bir kaynaktan temin edilmiş öğütülmüş fırın cürufu ve tek kaynaktan temin edilen tek tip uçucu kül (UK), farklı miktarlarda kullanılarak, farklı özellikte numuneler elde edildi. Aynı zamanda çimento da farklı dozajlarda kullanıldı.

Üretilen beton numune sınıfları C30/37 olup tüm numunelerde Su/Bağlayıcı oranı birbirine oldukça yaklaşık veya aynı tutuldu. Çökme ile ölçülen kıvam seviyesi aynı yapıldı. Üretilen numune karışımlarından, sülfat etkisi deneyleri için 3'er 70 mm·70 mm·280 mm boyutlarında prizmalar üretildi. Ayrıca basınç dayanımı deneyi için 6 adet, hızlı klorür geçirimsizliği deneyi için 1 adet ve kılcal su emme deneyi için 1 adet olmak üzere toplam 8 adet 100 mm çapında 200 mm yüksekliğinde silindir beton numuneleri üretildi.

Numuneler $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, kirece doymuş su içerisinde bekletilerek kür işlemi yapıldı. 7. ve 28. günlerde basınç dayanımları tespit edildi. 90 günün sonunda kılcallık deneyleri ve ASTM C 1202 standardına uygun olarak hızlı klorür geçirimsizliği deneyleri yapıldı. Prizmalar ise 28 günlük kür işleminden sonra sülfat etkisi için magnezyum sülfat (MgSO_4) çözeltisinde bekletildi. Ultra-ses hızı ölçümleri, ağırlık değişim ölçümleri belirli periyotlarda yapıldı. Fakat ultra-ses hızları kararlı bir artış veya azalış göstermedi ve deneysel çalışma süresi içerisinde yoruma elverişli sonuç elde edilemedi. Bunun yanında ağırlık değişimi çalışmanın amacına yönelik yorumlar yapılmasına elverişli eğilimler gösterdi.

Hızlı klorür geçirimsizliği deney sonuçları öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufunun (Ö.G.Y.F.C.) ve uçucu külün (UK) betonun geçirimsizliğini azalttığını gösterdi. Fakat buna rağmen magnezyum sülfat etkisi sonunda öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufunun (Ö.G.Y.F.C.) kullanıldığı numunelerde basınç dayanımlarındaki artışın azaldığı, hatta bir beton numunesinde basınç dayanımının düştüğü tespit edildi. Ö.G.Y.F.C. kullanılan A200+120 ve B200+100 numunelerinde bağıl ağırlık değişimlerinde azalma görüldü. Uçucu külün betonun geçirimsizliğini azalttığı basınç dayanımını arttırdığı gözlemlendi. Uçucu külün kullanıldığı beton numunelerde sülfat etkisine maruz kaldıktan sonra da basınç dayanımı artışı devam etti. Genel anlamda, bu çalışmadan elde edilen sonuçlar uçucu külün de betonun kalıcılığını (durabilitesini) iyileştirdiğini göstermektedir.

THE EFFECT OF DIFFERENT MINERAL BINDER CONSTITUENTS ON DURABILITY OF CONCRETE

SUMMARY

There is no doubt that construction has one the biggest ratio in cost and sourcing in the world. Unproductive usage of natural sources leads the ecological and environmental troubles. That clarifies how important of the durability in construction for sustainable development.

As designed with characteristic codes of the construction, prepared with required quality control process and cured carefully, concrete needs minimum repair during period of service. Various internal and external effects make concrete service period shortening.

The physical effects such as onshore and offshore wave actions, freezing-thawing, wetting-drying cycles and chemical effects for example acids, chloride, sulphate effects, carbonation, corrosion of rebars, alkali silica reaction can occur that period of service of concrete. People will usually face the concrete durability problems, if they do not required and adequate precautions. Baccuse unanticipaped durability problems, there are a lot of buildings that face out of service in our country and other countries.

In concrete high imperviousness leads high durability. Moisture is needed for activate alkali aggregate reaction, rebars corrosion and carbonation as a chemical. Decreasing the imperviousness will make cocrete less durable.

After the 19. and early 20. century studies, people got important knowledge about concrete technology and cement industry that leads people to build more complex construction buildings. A lot of advanced level researchs are made in the areas of chemical, mineralogical and mechanic for concrete. These researchs can be gathered in three different main title which are making cement types more various, using industrial sewage more in cement or concrete production and leading concrete to have different characteristic behaviour with chemical extenders. Fly ash, ground granulated blast-furnace slag, silica fume and natural pozzolan which are industrial sewage, known as mineral additives also.

Using binding materials such as silica fume, fly ash, ground granulated blast furnace slag with new generation plasticisers known as super and hiper plasticisers make concrete more durable. These mentioned additives decrease grain desintegration, effect workablity positively, increase setting duration in new poured concrete. Besides these chemical compounds are so useful for concrete bleeding that, anyone can easily see the positive result. In additon people can see positive effects on hydration heat. Concrete which contain those compounds gets its durability later, on the other hand those materials make concrete durability level higher. They decrease the water permeability and alkali aggregate reaction as well as yielding, increase the

freezing-thawing resistance and sulphate resistance as well as plastic shrinkage. One of the most important point is allow people to pour concrete in high temperature.

In this research, different mineral constituents, in different dosages, effects on the strength and durability of concrete was investigated. In Turkey, cement and ground granulated blast furnace slag (G.G.B.S.) and fly ash (FA) of different sources are used in concrete production usually in combination with CEM I. In this work, G.G.B.S. from three different sources and only one type of FA were used in various dosages to obtain different concretes as partial replacement of CEM I.

The concrete strength class was set at C30/37 and the same Water/Binder ratio was used. Consistency, as measured by slump, was set at $155 \text{ mm} \pm 5 \text{ mm}$. Three $70 \text{ mm} \times 70 \text{ mm} \times 280 \text{ mm}$ prism specimens were prepared for the sulphate effect test for each concrete. In addition, a total of 8 cylindrical specimens of 100 mm diameter and 200 mm height were produced, 6 for compressive strength test, one for rapid chloride permeability, one for capillary water absorption tests.

All specimens were kept in tanks under water at $20^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ prior to tests and testing conditions. The strength tests were performed at seventh and twenty eighth days. The rapid chloride penetration and capillary water absorption tests were performed at the age of 90 days in compliance with ASTM C 1202. The prisms were immersed in magnesium sulphate (MgSO_4) solution after 28-day water curing. The prisms were tested for ultrasonic pulse velocity and weight changes, periodically. The pulse velocities did not follow any trend parallel to the expected sulphate attack. On the other hand, the weight changes gave indications of sulphate action.

It is seen how ground granulated blast-furnace slag (G.G.B.S.) and fly ash (FA) effect on concrete 28 day strength before the concrete samples are subjected to sulphate effect. Results shows that samples that contain mineral binder compounds has higher chloride permeability speed than the samples that does not any binder materials. This research reveals that sample which involve B slag (B slag has bigger specific surface) in has less capillary absorption coefficient than the sample which does not involve B slag.

After concrete samples are exposed to sulphate effect, the tests show fly ash make a positive effect on concrete compression strength about 20-26 percent. It is recorded that concrete compression strength increase 7 percent at witness sample, 8 percent increasing at the C250+90 sample that involve ground granulated hearth cinder. On the other hand, at A250+50 sample that contain ground granulated blast-furnace slag, about 6 percent increase has been recorded. In addition tests show that there is 1 percent increase at both A200+120 and B250+50 samples. Test results on B200+100 samples show that there is 22 percent decrease. According to weight changes tests, there is more destruction at B200+100 and A200+120 samples.

This research aims the determine the effects of mineral binder constituents on compression strength and capillary chloride permeability. After the samples are exposed to magnesium, the weight changes and compression strength tests reveal that fly ash makes a positive contribution on concrete durability. But some durability tests which processed on concrete samples, which contain ground granulated blast-furnace slag, show that the increase ratio are quite less than the other ones. Even the test on B200+100 sample, that involve ground granulated blast-furnace slag too, results show durability of the concrete sample decreased. The mineral compounds such as silica fume, fly ash, ground granulated blast-furnace slag and natural

pozzolan affects the durability of concrete samples that have magnesium sulphate in. Mr. Omar search shows that, silica fume and ground granulated blast-furnace slag affect in a positive way concrete durability on the concrete sample, which is exposed to sulphate effect. On the other hand those mineral constituents affect in a negative way concrete durability on concrete sample, which is exposed to magnesium effect. In brief, it is clear that FA improved the durability of concrete.

1.GİRİŞ

Yapı malzemesi olarak beton günümüzde oldukça büyük öneme sahiptir. Beton, agrega denilen kum, çakıl, mıcır gibi mineral malzemeler ile onları yapıştıran çimento ve suyun karıştırılmasından meydana gelmektedir. Çimento, beton içerisinde bağlayıcı malzeme olarak kullanılmakta olup, tarihte çeşitli gelişimler gösteren puzolanlardan sonra gelinen son noktadır.

İnşaat teknolojisinin en büyük sorunu bağlayıcı madde olmuştur. Doğal taş, kerpiç ve tuğla duvarların ilk bağlayıcı harcı çamurdur. Fakat çamuru bağlayıcı olarak nitelemek elbette doğru değildir. Akabinde alçı ve kireç kullanılmış, su içerisinde priz aşamasında su etkisiyle erimeyen bağlayıcı madde arayışları ilk olarak camlaşmış silis içeren toprakların kireçle karıştırılması ile kısmen elde edilmiştir. Eski Mısır'da ve Roma İmparatorluğunda tuğlanın, öğütülerek kirece karıştırılmaları sonucu horasan denilen harç elde edilmiştir. Bu karışım, Osmanlılar tarafından da kullanılmıştır. Avrupa'da ise Romalılar, Napoli civarındaki Puzzoli kasabasının camlaşmış volkan toprağını kullanmışlardır. Çimentonun keşfinin ardından, zaman içerisinde priz, hidrasyon ısı, sünme, rötire v.b. olaylar açıklanarak günümüz beton teknolojisine ve betonarme yapılara ulaşıldı.

19. yüzyıl ve 20. yüzyıl başlarındaki çalışmalardan sonra çimento endüstrisinde ve beton teknolojisinde büyük gelişmeler sağlandı ve kimyasal, mineralojik ve mekanik yönden çimento ve beton alanında ileri düzeyde bilimsel araştırmalar yapıldı.

Bu endüstri dalındaki gelişmeler üç ana grupta toplanabilir: Çimento türlerini artırmak, endüstriyel atıkları çimento ve/veya beton üretiminde değerlendirmek, kimyasal katkılarla betonlara belirli özellikler kazandırmak. Bu çalışmalarda ekonominin sağlanması, beton dayanım ve dayanıklılığının yükseltilmesi daima yönlendirici faktörler oldu.

Ülkemizde endüstriyel atıklardan uçucu kül, yüksek fırın cürufu, silis dumanı ve diğer doğal puzolanlar, mineral katkı maddesi olarak bilinirler. Harç ve beton üretiminde genellikle ikincil bağlayıcı madde olarak portland çimentosunun bir kısmı

yerine veya ilave olarak bazen de çimentoya önceden karıştırılarak “katkılı çimento” şeklinde kullanılmışlardır (Ekinci, 1995).

Betonda kullanılan mineral bileşenler, portland çimentosuna benzer mineralojik ve kimyasal bileşimler ile fiziksel özelliklere sahip olmalarına rağmen büyük çoğunluğu kendi başlarına bağlayıcı özellik göstermezler. Bu maddeler puzolanik aktiviteleri nedeniyle hidrasyon ürünlerinin oluşumunda, kireçle birleşip, etkinlik göstererek bağlayıcı hamur yapısını değiştirirler. Böylece betonun çeşitli özellikleri iyileştirilirken, puzolanik aktivitesi yüksek olan mineral bileşenler, boşluk yapısını iyileştirerek daha yoğun bir bağlayıcı hamurun oluşmasını, agrega-hamur ara yüzeyindeki aderansın artmasını sağlamakta ve yüksek mukavemetlere erişilmesi mümkün olabilmektedir (Özturan, 1991; Sevim, 2003).

Zaman içerisindeki bu gelişmeler ile birlikte teknik olarak ulaşılan yararlı noktaların yanı sıra doğal kaynakların korunması, çevre kirliliğinin önlenmesi, ekonomi açısından da faydalar sağlayacaktır.

Bu yüksek lisans tez çalışmasında, ülkemizde üretilen 2 farklı kaynaktan temin edilen öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu (Ö.G.Y.F.C) başka bir kaynaktan temin edilen öğütülmüş fırın cürufu ve farklı bir kaynaktan temin edilen uçucu kül (UK) beton içerisinde çimento ile birlikte farklı dozajlarda kullanılarak numuneler imal edilmiştir. Elde edilen bu numuneler üzerinde mekanik ve fiziksel deneyler uygulanmış, özellikle betonun kalıcılığına (durabilitesine) olan katkısı irdelenmiştir.

1.1. Betonu Oluşturan Malzemeler

1.1.1. Agregalar

Çeşitli boyutlarda sert tanelerden oluşan mineral esaslı kum, çakıl veya kırma taş gibi âtıl malzemelere agrega denir [1].

Agregalar betonun teknik özelliklerine önemli derecede katkı sağlar. Çimento hamurunun zamanla göstereceği büzülmeden dolayı oluşacak hacim değişikliği sonucunda meydana gelen çatlaklar daha az olmaktadır. Ayrıca beton yapımında kullanılan agregalar, genellikle sert ve dayanımı oldukça yüksektir. Bu nedenle agrega dayanımının yüksek olması beton dayanımının daha yüksek olmasını da sağlar. Bu tür agregalar betonun aşınmaya karşı veya çevreden gelebilecek dış etkilere karşı betonun direncini artırır [2].

Beton yapımında kullanılacak olan agregaların çeşitli özelliklere sahip olması istenmektedir. Agregaların sahip olduğu gradasyon, maksimum tane büyüklüğü, tane şekli, yüzey dokusu, su emmesi, birim ağırlık, tane yoğunluğu, agregadaki yabancı ve zararlı maddelerin türü ve miktarı, aşınmaya karşı dayanıklılık, dona dayanıklılık, dayanım, ısısal özellikler ve elastiklik modülü gibi özellikler üretilen betonun özelliklerini etkilemektedir [2].

1.1.2. Çimento

Killi ve kalkerli malzemelerin uygun oranlarda karıştırılması ve yaklaşık 1400-1500 °C sıcaklıkta pişirilmesi sonucu katı parçacıklar halinde elde edilen klinkerin, uygun oranda alçı taşı ile birlikte öğütülmesi sonucu elde edilen hidrolik bağlayıcı özellik gösteren maddelere çimento adı verilmektedir [1].

Çimento hamuru, beton içerisinde yer alan agrega tanelerinin yüzeyini kaplamakta, aralarındaki boşlukları doldurmakta ve taneleri bağlayarak oluşan kompozitnin katı davranmasını sağlamaktadır [2].

Çimentonun özellikleri ve beton içerisindeki miktarı taze betonun özelliklerini ve sertleşmiş betonun dayanımı ile birlikte dayanıklılığını da önemli ölçüde etkilemektedir [2].

1.1.3. Su

Beton imalatı sırasında kullanılacak olan suyun içerisindeki yabancı madde türü ve miktarı oldukça önemlidir. Özellikle karma suyu olarak kullanılacak suyun içerisinde istenmeyen miktarda yabancı maddenin yer alması hidratasyonu ve kimyasal reaksiyonların hızını etkilemektedir.

Karışımındaki suyun görevi agrega yüzeylerinin ıslanması ve çimentoyla birleşmesini sağlamak, çimentonun hidratasyonunun gerçekleşmesini sağlamaktır. Ayrıca kullanılan suyun miktarı da betonun dayanımını ve dayanıklılığını etkilemektedir.

1.1.4. Kimyasal katkılar

Betonun taze ve/veya sertleşmiş haldeki özelliklerini değiştirmek için karıştırma işlemi sırasında betona, çimento kütlesinin %5'ini geçmemek üzere eklenen maddelere “kimyasal katkı” denilmektedir. Kimyasal katkılar; su azaltıcılar (akışkanlaştırıcılar), priz geciktiriciler, priz hızlandırıcılar ve hava sürükleyiciler

olarak özetlenebilir. Kimyasal katkıları betonun işlenebilirliğini arttırmak, su miktarını azaltmak gibi betonun birçok özelliğini etkilemektedir. Kimyasal katkıları karışım suyu içerisinde betona ilave edildikleri gibi doğrudan doğruya karışımına da ilave edilebilmektedirler.

1.2. Puzolanlar

Puzolanlar, kendi başlarına bağlayıcılık özelliği olmayan veya çok az bağlayıcılık özelliği gösterebilen, fakat ince daneli durumda olduklarında ve sulu ortamda kalsiyum hidroksit ile birleştirildiklerinde hidrolik bağlayıcılık özelliğine sahip olan silisli veya silisli ve alüminli malzemeler olarak tanımlanır [3, 4].

Romalılar, bağlayıcı hamur üretiminde kullandıkları volkanik küllü toprağa “pulvis puteolanus” adını vermişlerdir. Sonraları, bu malzeme “pozzolana” olarak adlandırılmış ve zamanla “puzolan” ismiyle anılmaya başlanmıştır. Pozzolana ya da puzolan adı, Vezüv yanardağının eteklerindeki Pozzuoli kasabasının isminden türetilmiştir [2].

Puzolanlar elde edildiği yöntemlere göre doğal ve yapay olmak üzere iki gruba ayrılırlar. Doğada bulunan volkanik küller, volkanik tüfler, volkanik camlar, ısı işlem görmüş killer ve şeyller, ve diatomlu topraklar bu grup içerisinde yer alırlar. Yapay puzolan olarak gruplandırılan puzolanlar ise endüstriyel yan ürünleridir. Bunlar; uçucu kül, silis dumanı yapay puzolanlardır [2]. Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu gizli bağlayıcı olarak anılmaktadır [5].

Kaynağı ne olursa olsun puzolanın ana bileşeni amorf yapıya kireçle etkileşime girebilen silistir. İyi nitelikli puzolan %40-90 arasında reaktif SiO_2 içerir. Al_2O_3 oranı doğal puzolanda genellikle %20, suni puzolanda ise %30 civarında olur. Doğal puzolan ve uçucu külde bulunan alkaliler (K_2O , Na_2O) silis dumanının aksine dikkate değer miktarlarda bulunurlar. Bunlardan başka doğal puzolanlar değişik miktarlarda su içerir.

Almanya'nın Ren bölgesinde çıkartılan doğal puzolanlara “tras” adı verilmektedir. Çok üstün özelliklere sahip bu puzolan ülkemizde de Orta Anadolu Bölgesinde bulunmaktadır. Yapay puzolanlara örnek olarak pişmiş kil, uçucu kül, öğütülmüş tuğla ve yağlı kireç karışımı olan Horasan, yüksek fırın cürufu (granüle edilmemiş, hızlı soğutulmamış), silis dumanı verilebilir [6].

1.2.1. Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu

Demir-çelik üretiminde kullanılan yüksek fırınlarda, demir oksit (maden filizi, peletler, sinter), akıcılık düzenleyiciler (kalker, dolomit), ve yakıt (kok) kullanılır. Fırından iki ürün elde edilir: fırının alt kısmında toplanan ergimiş demir ve ergimiş demir üzerinde yüzen sıvı yüksek fırın cürufu. Yüksek fırın cürufunun kompozisyonu yüksek fırına beslenen maden filizi, akıcı taş ve koktaki safsızlıklara bağlıdır. Genelde yüksek fırın cürufunun %95'i veya daha fazlası silika, kalsiyum, alüminyum, magnezyum ve oksijenden oluşur [7]. Endüstriyel bir atık olarak oluşan yüksek fırın cürufu depolanmasının zor olması nedeni ile beton sektöründe kullanılması ekonomik sürdürülebilirlik ve çevrenin korunması bakımından önem taşır.

Ergimiş 1 ton cürufa soğutma hücrelerinde uygun özelliklere sahip 5 ton su püskürtülüp granüle edilerek hızlı soğutulursa “gizli bağlayıcı” özellik kazanır. Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu betonda kullanıldığında, çimento hamurunda daha ince ve süreksiz boşluk oluştuğu, agrega-çimento ara yüzündeki boşlukların azaldığı, betonun kalıcılığının (durabilitesinin) arttığı gözlenmiştir [8].

Dünyada maliyet ve kaynak kullanımının en büyük paya sahip sektörü kuşkusuz inşaatır ve doğal kaynakların verimsiz kullanımı, çevresel ve ekolojik sorunlara yol açmaktadır. Bu durum sektörde sürdürülebilir gelişmenin sağlanmasında kalıcılığın önemini göstermektedir [9].

Cürufun uygun miktarlarda çimento ikamesi olarak kullanıldığında kütle betonlarında sıcaklığın kontrol edilmesi için etkili bir araç olduğu gözlenmiştir. Her durumda, cürufu çimentonun ilavesi, ilk zamanlarda çimentonun neden olduğu erken ısı üretimini azaltır. Beton bünyesinde yüksek sıcaklık gelişiminin betonda çatlakların oluşması ve hacimsel kararlılığı üzerinde önemli etkileri vardır [10].

Sertleşmiş betonda geçirimsizlik ve su emme özelliği, boşluk yapısının bir göstergesidir. Bu nedenle kimyasal ve fiziksel olaylara karşı kalıcılığı etkileyen en önemli özelliklerin başında geçirimsizlik özelliği gelir. Su geçirimsizliği, çözünebilen zararlı iyonların beton içerisine taşınması ve kimyasal tepkimelerde suyun bizzat yer alması nedeniyle, betonun ileri yıllarda uğrayabileceği hasarın bir göstergesidir [2].

1.2.2. Uçucu kül

Modern termik santrallerde toz kömürün yanması sırasında, kömür yüksek sıcaklıktaki fırınların içerisinde geçerken yüksek sıcaklıktan dolayı uçucu madde ve karbon yanar, kil kuvars ve feldspat gibi mineral atıkların çoğu ise ergir. Ergimiş madde hızlı bir şekilde küresel cam parçaları olarak katılaşıp düşük sıcaklıktaki alanlara transfer edilir. Minerallerin bazıları taban külü şeklinde birikir, ama ince parçacıkların çoğu baca gazıyla uçar ve bunlara uçucu kül adı verilir. Bu küller siklonlarda, elektrostatik çöktürme ve filtreleme yöntemleriyle gazdan ayrılır [11].

Silisli ve alüminli amorf yapıya sahip oldukları ve çok ince taneli olarak elde edildikleri için uçucu küller de ince öğütülmüş doğal puzolanlar gibi puzolanik özellik göstermektedirler. Kalsiyum hidroksitle sulu ortamda birleştiklerinde, hidrolik bağlayıcılığa sahip olmaktadır. Bundan dolayı hem portland-puzolan tipi çimento üretiminde, hem de beton katkı maddesi olarak doğrudan kullanılmaktadırlar [2].

İçermiş oldukları SiO_2 , Al_2O_3 ve Fe_2O_3 miktarlarına göre ASTM C 618 standardında uçucu küller F ve C sınıfı olarak ikiye ayrılmaktadır. F sınıfı uçucu küller, antrasit ve bitümlü kömürün yakılmasından, C sınıfı uçucu küller ise linyitin yakılmasından elde edilmektedir. Antrasit ve bitümlü kömürün linyite oranla daha az kalsiyum içermesi, uçucu küller arasında farklı bağlayıcı ve puzolanik özelliklere neden olan bu sınıflandırmayı doğurmuştur. C sınıfı uçucu küller, puzolanik özelliklerinin yanında bağlayıcı özelliklere de sahiptir. F sınıfı uçucu küller ise su ile yalnız başına karıştırıldıklarında nadiren bağlayıcı özellik gösterir [12].

Uçucu küllerin sınıflandırılmasının yapılabilmesi için kimyasal özellikleri incelenir. C sınıfı uçucu küllerde aktif bileşik, kalsiyum alümin silikatlı camdır. F sınıfı uçucu küllerde ise aktif bileşik silisli camdır. SiO_2 , Al_2O_3 ve Fe_2O_3 olmak üzere üç ana bileşenin toplamı F sınıfı uçucu küllerde %70 ve üzerinde, C sınıfı uçucu küllerde %50 ve üzerindedir. Bu bileşimlerin C sınıfı küllerde %50 oranında kalmasının nedeni, C sınıfı küllerin %10 ve üzerinde CaO içermesidir. CaO oranı %10'un üzerinde olan küller yüksek kireçli, %10'un altında CaO içeren küller ise düşük kireçli uçucu kül olarak adlandırılmaktadır [12]. Çizelge 1.1'de C ve F sınıfı uçucu küllerin kimyasal bileşimlerine örnek verilmiştir [13].

Çizelge 1. 1: F ve C sınıfı kül örneklerinin kimyasal bileşimleri, kütlece %

Kimyasal Bileşim	F sınıfı Uçucu Kül (kütlece %)	C sınıfı Uçucu Kül (kütlece %)
SiO ₂	43,4	32,5
Al ₂ O ₃	18,5	21,9
Fe ₂ O ₃	26,9	5,1
S+A+F	88,8	59,5
CaO	4,3	27,4
MgO	0,9	4,8
SO ₃	1,2	2,8
Toplam Alkaliler (Na ₂ O Eşdeğer)	0,6	1,1
Kızdırma Kaybı	3,2	1,2
Rutubet	0,2	0,8

TS EN 450’de uçucu küllerin kimyasal özellikleri belirtilmiştir. Uçucu küllerde klorür (Cl) muhtevası kütlece % 0,10’dan, kükürt trioksit (SO₃) muhtevası kütlece %3’dan, serbest kalsiyum oksit (CaO) muhtevası kütlece %1’den daha büyük olmamalıdır. Bu bileşimlerin dışında yanmamış karbon kalıntısını sınırlamak amacıyla, bir kızdırma kaybı değeri tanımlanmıştır. Buna göre kızdırma kaybı %5-7’den daha büyük olmamalıdır [14].

Uçucu külün taze betonda işlenebilmeyi arttırmak, taze betonda terlemeyi azaltmak, betonun hidrasyon ısını azaltmak, sertleşmiş betonun su geçirimsizliğini azaltmak, sertleşmiş betonun sülfatlara dayanıklılığını arttırmak maliyetini düşürmek gibi iyileştirici etkileri vardır. Ancak betonun prizini geciktirmesi, betonun ilk günlerdeki dayanım kazanma hızını azaltması, betonun kür süresini uzatması gibi istenmeyen etkileri de söz konusudur.

Geleneksel betonda yapılan araştırmalarda uçucu kül kullanımının betonun teknik özelliklerine etkisi Çizelge 1.2’de gösterilmiştir [15].

Çizelge 1. 2: Uçucu kül kullanımının betonun teknik özelliklerine etkisi

Betonun Özelliği	Etkisi
Taze betonun su ihtiyacını	Azaltır
Taze betonda tane ayrışmasını	Azaltır
Taze betonun işlenebilirliğini	Arttırır
Taze betonun priz süresini	Uzatır
Taze betonda kuma ve terlemeyi	Azaltır
Taze betonun hidrasyon ısını	Azaltır
Sertleşmiş betonun erken dayanımlarını	Azaltır
Betonun 90 gün ve daha sonraki dayanımını	Arttırır
Sertleşmiş betonun su geçirgenliğini	Azaltır
Sertleşmiş betonun donma-çözülme direncini	Azaltır
Alkali agrega reaksiyonunu	Azaltır
Sülfat direncini	Arttırır
Sıcak havada beton dökümünü	Kolaylaştırır

1.2.3. Silis dumanı

Silikon metalinin veya silikonlu metal alaşımların üretiminde, yüksek saflıktaki kuvars, elektrik fırınlarında yaklaşık 2000 °C sıcaklıkta kömür yardımıyla indirgenmeye tabi tutulmaktadır. Üretim işlemi sonucunda büyük bir çoğunluğu SiO olan gazlar çıkmaktadır. Gaz halindeki SiO, fırının düşük sıcaklıktaki üst bölgelerinde havayla temas eder ve çok çabuk yoğunlaşarak amorf yapıya sahip SiO₂ durumuna dönüşür.

Silikon metalinin veya silikonlu metal alaşımların üretimi esnasında ortaya çıkan gazın hızlı soğutularak yoğunlaştırılması sonucunda elde edilen ve %85~%98 kadar silis içeren amorf yapıya sahip çok ince katı parçacıklardan oluşan malzemeye “yoğunlaştırılmış silis dumanı” veya kısaca “silis dumanı” adı verilmektedir. Bu malzeme “mikrosilis”, “silis tozu” veya “silika fume” gibi isimlerle de anılmaktadır.

Silis dumanı, çok ince amorf yapılı olması ve yüksek oranda SiO_2 içeriğinden dolayı mükemmel bir puzolanik malzemedir. Diğer puzolanik malzemeler gibi, kalsiyum hidroksitle sulu ortamda birleştirildiği takdirde hidrolik bağlayıcılık göstermektedir.

Silis dumanının beton üzerindeki etkileri Çizelge 1.3’de gösterilmiştir [15].

Çizelge 1. 3: Silis dumanı kullanımının betonun teknik özelliklerine etkisi

Betonun Özelliği	Etkisi
Akma sınırı ve viskoziteyi	Arttırır
Terlemeyi	Azaltır
Ayrışmayı	Azaltır
Plastik büzülmeyi	Arttırır
Priz süresini	Arttırır
Hidratasyon ısisını	Azaltır
Basınç dayanımını	Arttırır
Aderansı	Arttırır
Sünmeyi	Azaltır
Geçirgenliği	Azaltır
Asit ve sülfat direncini	Arttırır
Alkali silika reaksiyonunu	Azaltır
Donma dayanımını	Arttırır
Kılcal su emmeyi	Azaltır

Silis dumanı, portland klinkeriyle ve küçük bir miktarda alçıyla birlikte öğütülerek “silis dumanlı çimento” üretiminde kullanılabilir. Ancak, asıl kullanım şekli beton katkı maddesidir.

Genellikle beton karışımında yer alan çimento miktarı yaklaşık %10 kadar azaltılmakta ve onun yerine silis dumanı ilave edilmektedir. Çok ince taneli olması ve yüksek miktarda amorf SiO_2 içermesi nedeniyle gerek erken yaşlarda ve gerekse nihai olarak oldukça yüksek (> 100 MPa) dayanımlı betonların elde edilmesinde kullanılmaktadır. Silis dumanının çok ince tanelerden oluşması, taze betonun

işlenebilirliğini azaltmakta ve su ihtiyacını arttırmaktadır. Bu nedenle, yüksek dayanımlı beton üretimi için katkı maddesi olarak silis dumanı kullanıldığında ayrıca su-azaltıcı katkıların katkıların da birlikte kullanılmasına ihtiyaç duyulmaktadır (2).

1.3. Betonun Kalıcılığı (Durabilitesi)

Yapı malzemelerinin ve yapıların işlevlerini faydalı hizmet ömürleri boyunca bozulmadan yerine getirmelerine durabilite, dayanıklılık veya kalıcılık adı verilir [15]. Yapıların uzun ömürlü olması sadece doğru taşıyıcı sistemin seçimi, projelendirilmesi ve imal edilmesine bağlı değildir. Aynı zamanda, yapının kabul edilebilir bir süre içerisinde özelliklerini korumasını, yeterince uzun ömürlü olmasını sağlayacak önlemler alınmalı ve en az toplam maliyet gerektirecek şekilde yaşlanması yavaşlatılmalıdır [16].

Beton, kullanılacağı yapısal sistemin koşullarına göre tasarlanmış ve gerekli nitelik denetim süreçlerine uyularak hazırlanmış, yerleştirilmiş ve bakım uygulanmışsa, hizmet süresi boyunca en az onarımla görevini yerine getirir. Ancak çeşitli dış ve iç etkiler altında betonun performansının düştüğü durumlar olabilir.

Söz konusu zararlı kimyasal ve fiziksel etkiler, örnek olarak, kıyı veya açık deniz yapılarındaki dalga hareketi, donma-çözülme ve ıslanma-kuruma gibi fiziksel nedenlerden ileri gelebileceği gibi asit, klorür, sülfat etkisi, karbonatlaşma, betonun içerisindeki çeliğin korozyonu ve alkali silika reaksiyonu gibi kimyasal nedenlerle de oluşabilmektedir. Her türlü beton yapıda kullanılan beton için üretim sırasında ve kullanımda, ortam koşullarının gerektirdiği önlemlerin alınmaması durumunda kalıcılık (durabilite) sorunuyla karşılaşılır [16]. Öngörülme-yen kalıcılık sorunlarından dolayı hizmet dışı kalma tehlikesinde olan bu ve buna benzeyen birçok yapı gerek ülkemizde gerekse gelişmiş birçok ülkede mevcuttur. Bu yapıların yıkılarak yerine yenilerinin yapılması veya onarılması gerekmektedir. Gelişmiş ülkelerdeki, inşaat faaliyetlerinin %40'ını tamir ve bakım işlerinin oluşturduğu düşünüldüğünde konunun önemi daha iyi anlaşılmaktadır [17]. Avrupa'da özellikle 2. Dünya savaşı-ndan sonra yapılan çok sayıda sanat yapısı, ABD'de çok sayıda köprü önemli kalıcılık sorunları yaşamış ve yaşamaktadır. Ülkemizde ise özellikle Marmara depreminden sonra göçen birçok binada donatıların korozyon nedeniyle neredeyse sadece izlerinin kaldığı gözlenmiştir.

Betonun boşluksuz ve geçirimsiz olması kalıcılık yönünden yararlıdır. Başka bir ifadeyle kalıcılık ve geçirimlilik birbiriyle yakından ilgili olan iki özelliktir. Beton ne kadar boşluksuz olursa geçirimliliği de buna bağlı olarak düşük olur; bu da betonarme yapılarda, beton içerisindeki çeliğin faydalı hizmet süresi boyunca beklenen işlevlerini yerine getirmesini sağlar. Çimentodan çok daha ince olan silis dumanı, uçucu kül ve öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu gibi malzemelerin süper ve hiper akışkanlaştırıcı olarak bilinen yeni nesil akışkanlaştırıcılarla birlikte kullanılması daha dayanıklı betonlar üretilmesine olanak sağlamıştır. Ultra incelikteki malzemeler ve süper akışkanlaştırıcı kimyasal katkıların birlikte kullanılması betondaki su/çimento oranının düşürülmesine imkan vermektedir. Betonun kalıcılığını (durabilitesini) ve dayanımını arttıran kireç içeriği görece düşük malzemelerin bu olumlu etkilerinin görülebilmesi için uygun başlangıç bakım koşullarına titizlikle uyulması gerekmektedir [16, 18].

1.3.1 Betonun geçirimlilik özellikleri

Sertleşmiş betonun geçirimliliği ve su emme özelliği boşluk yapısının bir göstergesi olduğundan, betonun dayanımı genelde kimyasal ve fiziksel zararlı etkilere karşı dayanıklılığına paralel değişmektedir. Su, çözünebilen zararlı iyonları beton içerisine taşıdığı ve kimyasal hasarın kaynağı olduğu için geçirimlilik genellikle olası hasar oranının bir göstergesidir [2, 19-21]. Geçirimliliği yüksek olan betonlarda su ve zararlı maddeler beton içerisine kolayca sızacağı için geçirimlilik hem betonun hem de beton içerisine gömülü çeliğin hasar görmesine veya birden fazla hasarın birlikte oluşmasına neden olur [22]. Doğal taş, harç, beton, pişmiş toprak ürünleri gibi yapı malzemelerinde boşluklar, doğrudan veya dolaylı olarak araştırılır. Doğrudan araştırmada, malzemeden ince kesit alınarak mikroskop altında inceleme yapılır, boşlukların boyutu, boşluk oranı ölçülür, boşluk şekilleri ve sürekliliği araştırılır. Dolaylı araştırmada ise geçirimlilik, kapiler su emme, gaz veya su buharı adsorbsiyonu gibi deneyler ile boşluk karakteri hakkında fikir edinilmeye çalışılır [23]. Sertleşmiş betonun su emmesinde, önce büyük boyutlu boşluklar, daha sonra da küçük boyutlu kapiler boşluklar su ile dolu duruma gelmektedirler. Beton geçirimliliği beton içerisinden su akışını gösterdiği için, geçirimlilik ve su emme farklı özelliklerdir. Ancak su emme, betonun geçirimliliğini de yansıtan önemli bir özelliktir [2].

Betonun mikro yapısal özellikleri doğrudan dayanıklılığını etkilemektedir. Betonun dayanımı haricinde geçirimsizlik, betonun potansiyel kalıcılığının (durabilitesinin) en iyi göstergesidir. Çünkü beton geçirgen ise içine zararlı maddeler nüfuz edebilir. Zararlı maddeler betonarme çeliğinin korozyonunu meydana getiren sülfat tesiri, karbonatlaşma ve klorürün nüfuzuna neden olmaktadır. Uygun çimento tipi ve içeriği, düşük su-çimento oranı, taze betonun uygun sıkıştırılması ve bakımı, betonun geçirimsizliğine katkısı olan etkenler arasında yer almaktadır [24].

Betonda, yüksek kalıcılık (durabilite) elde edebilmek için, yüksek derecede geçirimsizlik gerekmektedir. Nem, alkali-agrega reaksiyonunu aktif hale getirmede, betonarme çeliğinin korozyonunu başlatmada ve karbonatlaşma için kimyasal olarak gereklidir. Betonun geçirgenliğinin azaltılması, betonun kalıcılığını iyileştirmektedir.

Geçirimsizliği etkileyen faktörler içerisinde en etkin olanı, betonun karma suyu miktarıdır ve buna bağlı olarak su/çimento oranıdır. Bu konuda harçlarla yapılan bir çalışmada su/çimento oranı azaldıkça kompozite ve birim ağırlığın arttığı, 0,50 değeri için maksimumdan geçerek 0,35 değerinde tekrar azaldığı görülmüştür. Kılcal su emme ve geçirimsizlik katsayılarının ise su/çimento oranı azaldıkça azaldığı, 0,50 değeri için minimumdan geçerek 0,35 değerinde tekrar arttığı görülmüştür. Teorik olarak su/çimento oranı azaldıkça harç bünyesindeki boşlukların azalması, dolayısıyla kompozitesinin ve birim ağırlığının artması, kılcallığın ve geçirimsizliğin azalması beklenir. Rose, yaptığı çalışmalarda yaklaşık 0,25 değeri için sıfır geçirimsizlik değerine ulaşmıştır [25].

1.3.1.1. Sülfatların betona etkisi

Sülfatlar çimentonun bazı bileşenleri ile reaksiyona girerek betonun zamanla bozulmasına neden olur. Bu etki sülfat iyonlarının, sertleşmiş betondaki alüminli ve kalsiyumlu bileşenlerle kimyasal reaksiyona girmesi etrenjit ve alçı taşı oluşturması ile gerçekleşir. Reaksiyon ürünleri betonda iç basınç ve genleşme oluşturarak çatlaklara ve dağılmaya yol açar, agrega-çimento hamuru bağının etkilenmesiyle betonun mukavemeti düşer. Sülfat etkisine uğramış betonun karakteristik görünümü, özellikle köşe ve kenarlardan başlayarak tüm kütleyle yayılan beyaz lekeler, çatlaklar ve dökülmelerdir [26]. Betonun kolayca ufalanabildiği ve yumuşadığı görülür. Etkilenme koşulları (SO_4^{2-} içeriği, ortam koşulları), betonun geçirimsizliği (zararlı

madde taşınımı), betonun yapısı (çimentonun oksit bileşimi) ve suyun varlığı sülfat etkisinin gelişimini doğrudan etkileyen parametrelerdir.

Katı haldeki tuzların betona etkisi olmamasına rağmen, sulu ortamda çözelti halindeki tuzlar, hidrate olmuş çimento hamuruyla etkileşime girerler. Bunlardan özellikle yaygın olanları toprakta ve yer altı suyunda bulunan sodyum potasyum, magnezyum ve kalsiyum sülfatlarıdır. Kalsiyum sülfatın çözünürlüğünün düşük olması nedeniyle, yüksek sülfat içerikli yer altı suları kalsiyum sülfat kadar diğer sülfatları da içerir. Gerçekte bu durumun önemi diğer sülfatların yalnızca $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ile değil çimentonun hidratasyonunun çeşitli ürünleriyle reaksiyon vermesindendir [27].

Yer altı suyunda genellikle karbonik asit, magnezyum tuzları ve sülfatlar bulunabilir. Bu nedenle yer altı suları beton için oldukça tehlikelidir. Özellikle jips yatakları civarında kapalı havza yer altı sularında fazla miktarda çözünmüş sülfat tuzları bulunur. Bataklık sularında bulunan sülfat ve sülfür bileşenleri de hasara sebep olabilirler. Bu sülfatlar genellikle doğal kaynaklıdır fakat gübrelerden ve endüstriyel atıklardan da oluşabilir [27, 28].

Sülfat iyonları topraktan ya da zemin suyundan beton içine girebilir. Bazı tür çalılık dışında, bitki, ağaç yetişmeyen, yüzeyinde beyaz lekeler, tuz birikintileri görülen çorak topraklarda, sülfat etkisinden şüphe edilmelidir. Bu tip zeminlerde yapılacak inşaatlarda, zemin etüdünün yanı sıra, yeraltı suyu ve topraktan örnek alınarak betona zarar verebilecek maddelerin varlığı araştırılmalıdır. Özellikle deniz yapılarında, deniz suyundaki sülfatlar, ıslanma-kuruma bölgesinde buharlaşma nedeniyle beton içerisinde sülfat yoğunluğunun artmasına yol açabilirler. Bir diğer kaynak çimentodur. Çimentonun C_3A bileşeninin ani prizini önlemek için üretim aşmasında çimentoya az miktarda alçıtaşı (kalsiyum sülfat) katılır. Zamana bağlı genleşmeyi ve betonun mukavemetinin etkilenmesini önlemek için çimento standartları katılan alçıtaşının oluşturacağı SO_3 miktarını çimento ağırlığının %3'ü ile sınırlamıştır.

Prefabrik yapı elemanı üretiminde, dayanımın hızlı gelişmesi amacıyla betona buhar kürü sıkça uygulanır. Ancak uygulanan yüksek sıcaklıklarda (70-80 °C) alçıtaşının çözünürlüğünün düşmesiyle C_3A ile erken yaşlarda reaksiyona girememesi ve bu reaksiyonun beton sertleştikten sonra, zamanla nem varlığında gerçekleşmesi halinde gecikmiş etrenjit oluşumu (DEF) adı verilen ve betonda sülfat etkisinin bir diğer türü

olan problem ortaya çıkabilmektedir. Sülfat etkisiyle genleşen tuz sertleşmiş betonu çatlatıp, parçalamaktadır. Ancak burada oluşan etrenjit normal hidrasyon sonucu oluşan etrenjit ile karıştırılmamalıdır. Beton taze iken, kristalleşen tuzun genleşmesine izin verecek ortam mevcuttur. Hidrasyon ısısından dahi oluşabilecek 60-70 °C kür sıcaklıklarının bile DEF'e yol açabildiği bilinmektedir. Bu sıcaklıklarda etrenjitin ($C_3A.3CaSO_4.31H_2O$) normalde hidrasyonun ilk dakikalarında görülen oluşumu engellenir. Etrenjit oluşumunun stabilitesinin bozulması, çimentodaki alkali oksit içeriğine de bağlıdır. Bu nedenle, yüksek alkalili çimentolarda bu sıcaklık dereceleri daha düşüktür. Yıllar sonra nem etkisinde kalan elemanlarda etrenjit yeniden oluşur, ancak bu sefer ortam katı olduğundan betonda hasar oluşturur. Ayrıca, buhar kürü görmeyen sadece iç sıcaklığı artan (kütle betonu, köprü ayakları, gökdelen temelleri, v.b.) veya dıştan ısınan (beton bacaların dış çeperlerinde, sıcak iklimlerde kullanılan selülozik lifli çatı örtü malzemelerinde, beton yol kaplamalarında, v.b.) beton ve betonarme yapı elemanlarında da DEF kaynaklı hasarlar oluşabilmektedir.

Temel olarak sülfat etkisi sonucu ortaya çıkan reaksiyon ürünleri; alçıtaşı, etrenjit ve tomasit oluşumu olarak sıralanabilir. Tomasit, etrenjit kristaline çok benzeyen bir kafes yapısına sahip olmasına karşın Al_2O_3 içermemekte, bu bileşen yerine SiO_2 bulunmaktadır. Genleştirici etkisi etrenjite kıyasla daha az olup, yaklaşık %45'i kadardır. Tomasit normal ortam koşullarında ender görülen bir sülfat etkisi ürünüdür. Özellikle kalker katkılı çimentolarla üretilen ve soğuk iklim koşullarına maruz kalan betonarme yapılarda tomasit oluşumuyla hasarlar ortaya çıkmıştır. Kuzey Avrupa ve İngiltere'de sülfat içeren zeminlerde inşa edilmiş pek çok köprü ayağında, Çin'de soğuk iklimin hüküm sürdüğü pek çok baraj yapısında tomasit kaynaklı hasarlar rapor edilmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar ve saha bulguları çimentoda kalker kullanım oranının %10 ile sınırlandırılmasına dikkat çekmektedir.

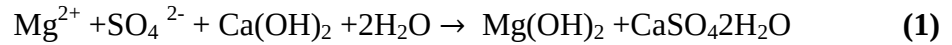
Diğer birçok dayanıklılık probleminde olduğu gibi, sülfat etkisinde de önlem olarak, üretilen betonun mümkün olduğunca yoğun ve geçirimsiz olması, çimento dozajının çok düşük olmaması ve düşük su/çimento oranına sahip olması gerekir. Sülfat etkisinin şiddeti arttıkça geçirimsizliği artırmanın yanı sıra, C_3A oranı düşük çimento kullanmak ve/veya puzolanik katkılı beton üretmek gibi ek önlemler alınması zorunludur. ASTM standartları C_3A içeriği $\leq$ %8 olan çimentoları sülfata orta seviyede dayanıklı, $\leq$ %5 olan çimentoları ise sülfata yüksek seviyede dayanıklı

olarak tanımlamaktadır. Normal Portland Çimentolarında C₃A oranı %8-11 arasında değiştiğinden, bu tip çimentoları sülfat etkisinde kalan yapılarda kullanmak doğru değildir.

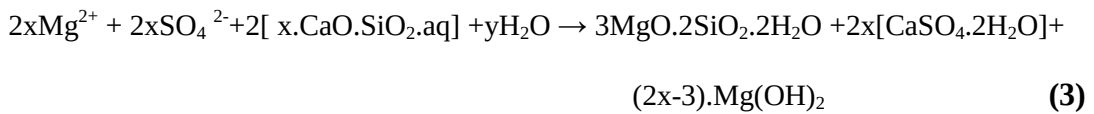
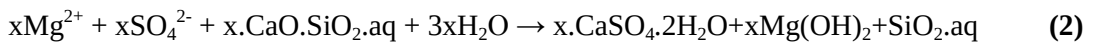
Puzolanların, düzgün kür edilmiş betonda geçirimsizliği arttırmalarının yanı sıra, betonun içindeki Ca(OH)₂'i bağlayarak sülfatlarla reaksiyona girecek öğelerden birini azaltmaları yararlı olmaktadır. Ancak kullanılacak puzolan rastgele seçilmemelidir. Örneğin, C sınıfı uçucu külün bazı durumlarda sülfat dayanıklılığını arttırmak yerine azaltabildiği dikkate alınmalıdır. Çok şiddetli etki durumunda, Ca(OH)₂ ve C-S-H'nin da sülfat hassasiyetini de dikkate alarak, iki önlemin C₃A miktarını düşürmek ve puzolan kullanmak bir arada uygulanması önerilir.

Magnezyum sülfat (MgSO₄) 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. (1) nolu ifadedeki kalsiyum sülfat ise çözünebilen bir üründür. Magnezyum sülfat etkisine 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 Ca²⁺ iyonu C-S-H jellerinden sağlanmaya başlar. C-S-H jelinde dekalsifikasyonun başlaması C-S-H jellerinin amorf hidrit silikaya (SiO₂.aq) veya zayıf kristal yapıya sahip magnezyum silikat hidrata (M₃S₂H₂) ya da her iki ürüne birden dönüştürür. Bu ürünler yanında reaksiyon ilave alçıtaşı, brusit ve magnezyum silika hidrat oluşturur (Skalny vd., 2002).



(2) ve (3) 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 0,01g/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 silikat 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 ($S'=SO_4^{2-}$) 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 başarımlar göstermektedir (Al-Amoudi, 2002). Santhanam, Cohen ve Olek (2001) magnezyum sülfat etkisinde üretilen betonda optimum miktarda kullanılan katkının betonun geçirimsizliğini azaltacağını ve bu şekilde betonun magnezyum sülfat etkisine karşı direncinin artacağını belirtmektedir.

Biczok (1967) çalışmasında magnezyum sülfat konsantrasyonunun, oluşan ürünlerin miktarını etkilediğini belirtmektedir (Santhanam vd., 2001). Düşük magnezyum sülfat konsantrasyonunda ($<4000 \text{ ppm SO}_4^{2-}$) daha çok etrenjit oluşurken, orta magnezyum sülfat konsantrasyonunda ($4000-7500 \text{ ppm SO}_4^{2-}$) etrenjit ve alçıtaşı birlikte oluşmakta ve yüksek konsantrasyonda ($>7500 \text{ ppm SO}_4^{2-}$) magnezyumun neden olduğu bozulmanın etkin olduğu görülmektedir.

1.3.1.2. Klorürlerin betona etkisi

Betonun kalıcılığını etkileyen en önemli maddelerden biride betona çeşitli yollardan nüfuz eden klorür iyonlarıdır. Klorür beton bünyesine CO_2 gibi difüzyon yoluyla girebileceği gibi başka yollardan da girebilir. Bunlar arasında, yüksek miktarda klorür içeren agregaların kullanılması, CaCl_2 içeren priz hızlandırıcı ya da su azaltıcı kimyasal katkı maddelerinin kullanılması, klorür içeren mineral katkıların kullanılması, deniz suyunun karma suyu olarak beton üretiminde kullanılması sayılabilir. Ayrıca, çimentoda hatta içme suyunda bile 250 ppm 'ye varan miktarlarda klorür iyonu bulunabilir. Ancak en yaygın görülen durum çevrede bulunan klorürlerin beton içerisine taşınmasıdır. Klorürlerin beton içerisine taşınımı kapiler emme, suyla birlikte ilerleme ve difüzyon süreçleriyle gerçekleşir. Islanma-kuruma bu süreçlerin gelişimini büyük oranda hızlandırır ve betonda oluşan klorür etkisini artırır. Betonun klorür geçirimliliğinin yüksek olması beton içerisine klorür iyonlarının daha kolay girebilmesini ve böylece beton içerisindeki donatıya daha kolay ulaşabilmesini sağlar. Klorür iyonları, korozyon esnasında donatı yüzeyinde oluşan ve koruyucu nitelikteki oksit tabakası ile reaksiyona girerek, demir klorür bileşiminde suda çözünebilen gayet boşluklu bir yapıya dönüşürler [29]. Bu sebeple beton içerisinde yer alan klorür iyonu miktarının belirli bir eşik değeri aşmaması gerekmektedir ($0,6 - 1,2 \text{ kg Cl}^-/\text{m}^3$) [2].

Betonun klorür geçirimliliğinin azaltılması için bir dizi etkene dikkat edilmesi gerekir. Betonun su/çimento oranı klorür geçirimliliğinin kontrolü için çok önemli bir etken olmasına rağmen bağlayıcı tipinin su/çimento oranı kadar ya da ondan daha çok önemli olabileceği kaynaklarla da sabittir. Böylece klorür penetrasyonuna karşı betonun direnci üzerindeki öğütülmüş yüksek fırın cürufunun üstün etkisi, hem laboratuvar deneyleriyle hem de 100 yıldan fazla bir süreyi aşan geniş saha deneyimlerinden belirlenmiştir (Bijen, 1998). Silis dumanı, uçucu kül ve pirinç

kabuğu külü gibi hem doğal hem de endüstriyel puzolanik malzemelerin faydalı etkisi kanıtlanmıştır (Gjörv, 1983; Berry and Malhotra, 1986; Malhotra et al., 1987; FIP, 1998; Malhotra and Ramezaniapour, 1994; Gjörv et al., 1998a).

2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

2.1. Deneyde Kullanılan Malzemeler

2.1.1. Agregalar

Çalışmalar için üretilen beton numunelerin tümünde Şile Ergören yöresine ait doğal kum, Gebze bölgesine ait kırma kum, kırmataş I ve kırmataş II olmak üzere 4 tip agrega kullanıldı. Agreganın en büyük dane büyüklüğü 22 mm'dir. Deneylerde kullanılan agregaların granülometri deneyi sonuçları Çizelge 2.1'de ve dane yoğunlukları Çizelge 2.2'de gösterilmektedir.

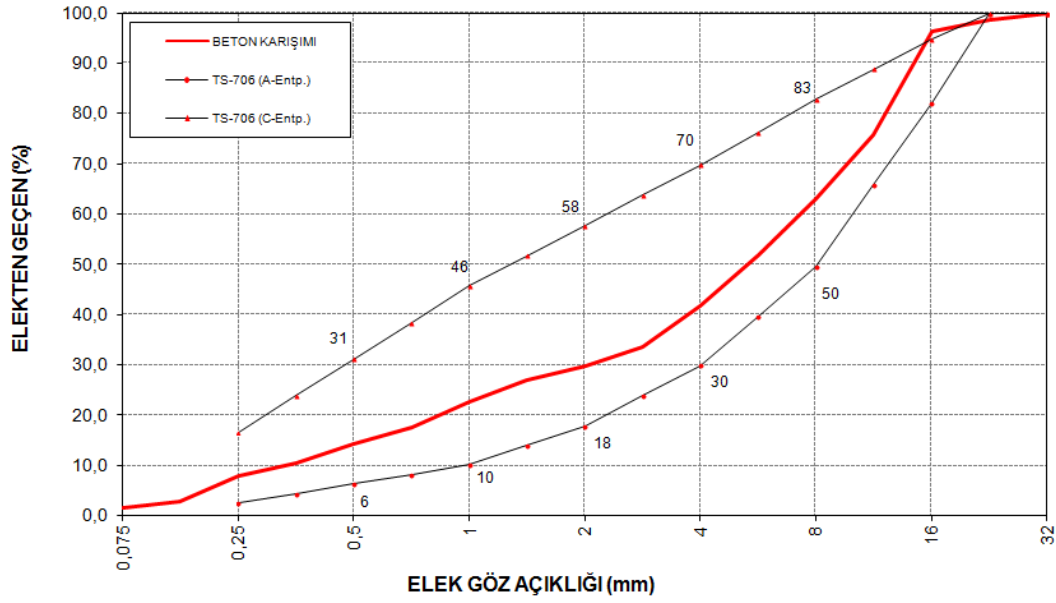
Çizelge 2. 1: Agrega dane büyüklüğü dağılımları

	Elekten Geçen (%)								
Elek Göz Açıklığı	32	16	8	4	2	1	0,5	0,25	0,074
Doğal kum	100	100	100	99	97	89	57	29	2
Kırma kum	100	100	100	84	47	27	16	11	4
Kırmataş I	100	100	64	5	0	0	0	0	1,4
Kırmataş II	100	87	3	1	0	0	0	0	1
KARIŞIM	100	97	67	47	34	26	16	9	1,6

Çizelge 2. 2: Agrega dane yoğunlukları

Agrega Türü	Dane Yoğunluğu (kg/m ³)
Doğal kum	2580
Kırma kum	2630
Kırmataş I	2700
Kırmataş II	2710

Agrega karışımının granülometrisi Şekil 2.1’de görülmektedir. Deneyde kullanılan malzeme örnekleri Şekil 2.2’de görülmektedir.



Şekil 2. 1: TSE 706 referans ve karışım agreg granülometrisi



Şekil 2. 2: Deneyde kullanılan agregalar

2.1.2. Çimento

Çalışmalarda çimento olarak Nuh Çimentonun Hereke fabrikasında üretilen CEM I 42,5 R çimentosu kullanıldı. Çimentoya ait fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikler Çizelge 2.3, Çizelge 2.4, Çizelge 2.5’de ayrıntılarıyla verildi.

Çizelge 2. 3: Çimentonun fiziksel özellikleri

Özgül Yüzey (Blaine) m²/kg	334,2	
Tane yoğunluğu (Mg/m³)	3,15	
Normal kıvam suyu (Su/Çimento, kütlece %)	27,8	
Hacim Sabitliği (mm)	1	
Priz Süreleri (Vicat, dakika)	başlangıcı	187
	sonu	229

Çizelge 2. 4: Çimentonun kimyasal özellikleri

Kimyasal Bileşim	Kütlece %
SiO ₂	20,17
Al ₂ O ₃	4,58
Fe ₂ O ₃	3,56
CaO	64,09
MgO	1,20
SO ₃	2,76
Çözünmeyen Kalıntı	0,52
Kızdırma Kaybı	2,51
Serbest CaO	1,15
Toplam Alkali Na ₂ O+0,658 K ₂ O	0,60
Cl ⁻	0,008

Çizelge 2. 5: Çimentonun standard mekanik özellikleri

Gün	Basınç Dayanımı (N/mm ²)
2	26,7
7	46,7
28	61,1

2.1.3. Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu (Ö.G.Y.F.C.)

Yapılan bu çalışmada 2 farklı kaynaktan temin edilen öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu (Ö.G.Y.F.C.) ve başka bir kaynaktan temin edilmiş öğütülmüş fırın cürufu kullanıldı. Bu farklı kaynaklar A, B, C olarak isimlendirilmiştir. Cürufların fiziksel özellikleri ve kimyasal bileşimleri Çizelge 2.6 ve Çizelge 2.7’de verildi.

Çizelge 2. 6: Öğütülmüş granüle yüksek fırın cüruflarının fiziksel özellikleri

	A	B	C
Tane yoğunluğu (Mg/m ³)	2,88	2,80	-
BLAINE (m ² /kg)	419,9	526,5	-

Çizelge 2. 7: Yüksek fırın cüruflarının kimyasal bileşimi, kütlece %

	A	B	C
SiO ₂	37,92	39,9	19,1
Al ₂ O ₃	9,35	12,8	7,86
Fe ₂ O ₃	0,84	1,2	-
FeO	-	-	31,58
Klorür (Cl ⁻)	0,10	0,01	0,22
(CaO+MgO)/SiO ₂	1,19	1,0	-
CaO+MgO+SiO ₂	83,15	80,4	-
CaO	36,85	32,8	23,86
MgO	8,38	7,6	6,87
Sülfat (SO ₃)	1,83	0,1	-
S ⁼ (Kükürt)	0,65	0,7	0,06

2.1.4. Uçucu kül

Deneyde tek kaynaktan temin edilen uçucu kül kullanıldı. Çalışmada uçucu küllü numuneler K ile adlandırıldı. Uçucu küle ait kimyasal ve fiziksel özellikler Çizelge 2.8 ve Çizelge 2.9’da bulunmaktadır. Uçucu külün SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 içerikleri göz önüne alındığında ASTM C 618’e göre C sınıfı kabul edilmektedir.

Çizelge 2. 8: K uçucu külünün kimyasal özellikleri

Kimyasal Bileşim	Kimyasal Bileşim	C Sınıfı Uçucu Küller için	F Sınıfı Uçucu Küller için
Tanımı	kütlece %	TS EN 450 ve ASTM C 618	TS EN 450 ve ASTM C 618
SiO_2	50,21	-	
Al_2O_3	14,74	-	
Fe_2O_3	9,85	-	
S+A+F	74,80	>50 ASTM C 618	>70 ASTM C 618
CaO	13,03	> 10 (Yüksek Kireçli) ASTM C 618	<10 (Düşük Kireçli) ASTM C 618
MgO	1,09	-	-
SO_3	3,27	<3 TS EN 450	<3 TS EN 450
K_2O	2,36	-	-
Na_2O	3,12	-	-
TiO_2	0,72	-	-
P_2O_5	0,54	-	-
Mn_2O_3	0,10	-	-
Cl^-	0,0186	<0,1 TS EN 450	<0,1 TS EN 450
Kızdırma Kaybı	0,75	<5 TS EN 450	<5 TS EN 450
Serbest CaO	0,79	<1 TS EN 450	<1 TS EN 450

Kullanılan uçucu küldə SO_3 miktarı biraz fazla olmakla beraber C sınıfı uçucu küller için belirtilen standartlara uygun, yüksek kireçli uçucu kül olarak kabul edilebilir.

Çizelge 2. 9: K uçucu külünün fiziksel özellikleri

Tane yoğunluğu (Mg/m³)		2,10
priz süresi (dakika)	Başlangıcı	225
	Sonu	305
Hacim Sabitliği (Le Chatelier) Toplam (mm)		1
İncelik	Özgöl Yüzey (Blaine) m²/kg	267
	200 µm elek üstünde kalan (kütlece %)	4,1
	90 µm elek üstünde kalan (kütlece %)	17,8
	45 µm elek üstünde kalan (kütlece %)	32,8

2.1.5. Kimyasal katkı

Üretilen betonlarda naftalin formaldehit esaslı yüksek oranda su azaltıcı (süper akışkanlaştırıcı) kullanıldı. Toplam bağlayıcı kütlelerinin %1,2'si kadar ilave edildi. Kullanılan kimyasal katkının yoğunluğu 1,21 Mg/m³ olarak tespit edildi.

2.1.6 Magnezyum sülfat (MgSO₄)

Çözeltide kütlece %10 oranında saf magnezyum sülfat (MgSO₄) kullanıldı. Çözelti 15 her günde bir yenilendi.

2.1.7. Betonun karma suyu

Beton karışım suyu olarak şehir şebeke suyu kullanıldı.

2.2. Üretilen Betonların Bileşimleri ve İsimlendirilmesi

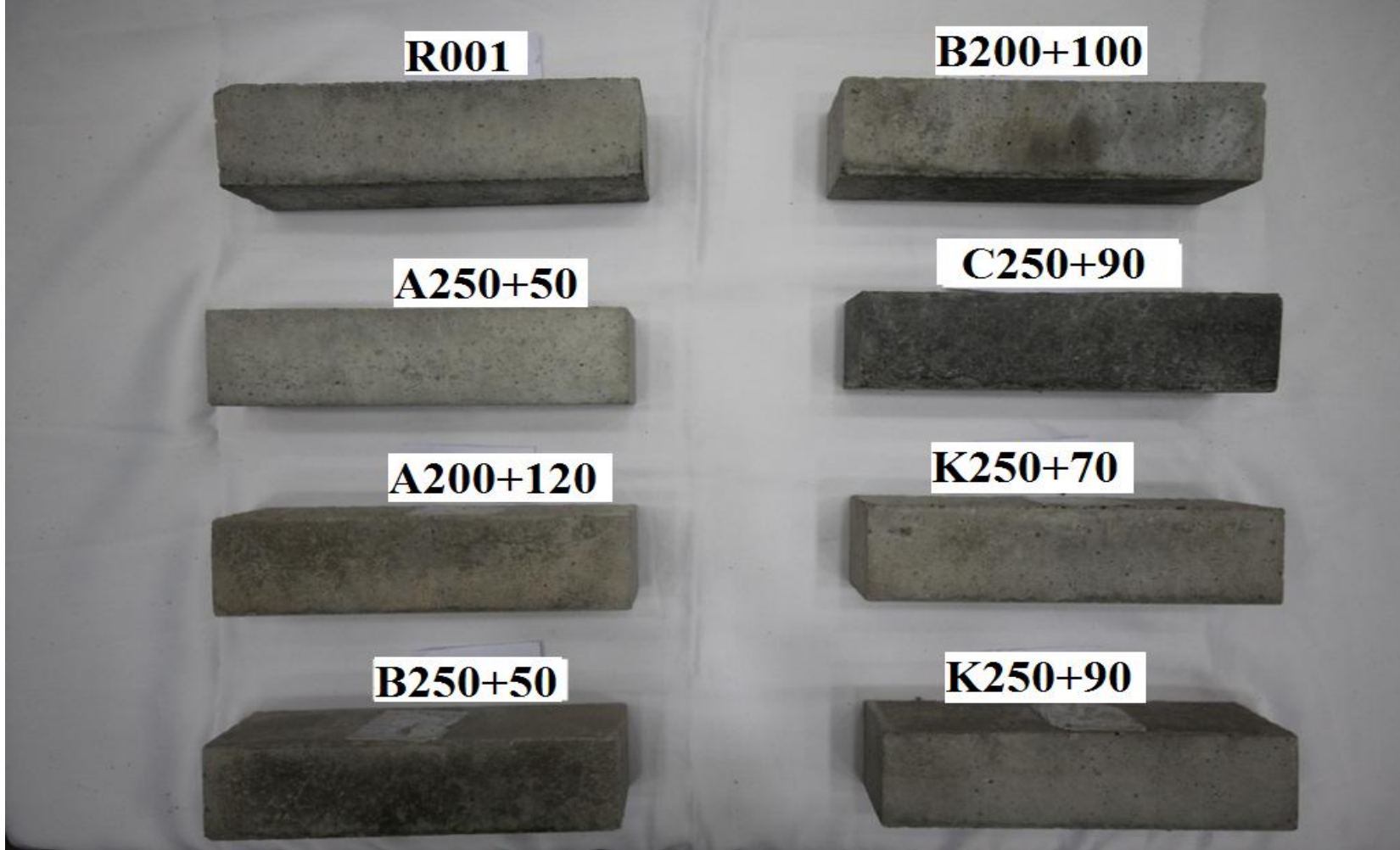
Bu çalışma esnasında 1 adet şahit, 7 adet farklı dozajda ve farklı türlerde cüruf ve uçucu kül içeren numune olmak üzere toplam 8 ayrı bağlayıcılı beton üretildi. İmal edilen numunelerin içerisindeki bağlayıcı oranlarına ve kullanılan mineral bağlayıcı bileşeni kaynağına göre kodlandı. Kodlama sistemi Çizelge 2.10'da ve deneyde üretilen numuneler Şekil 2.3'de görülmektedir. Üretilen betonların 1 m³'üne giren malzeme miktarları da Çizelge 2.11'de görülmektedir.

Çizelge 2. 10: Betonun adlandırılması

Betonun Adı	Mineralin Kaynağı	Bağlayıcı		
		Çimento (kg)	Uçucu Kül (kg)	Ö.G.Y.F. Cürufu (kg)
R001	-	300	0	0
A250+50	A	250	0	50
A200+120	A	200	0	120
B250+50	B	250	0	50
B200+100	B	200	0	100
C250+90	C	250	0	90
K250+70	K	250	70	0
K250+90	K	250	90	0

Çizelge 2. 11: Üretilen betonların bileşimi (1 m³ betona giren malzeme miktarları)

Numune Kodu	Bağlayıcı			TOPLAM	Su	Su/Bağlayıcı	Kum (kg)		Kırmataş 1, (kg)	Kırmataş 2, (kg)	Hava hac. %	Katkı	
	Çimento	Kül	Cüruf				Doğal	Kırma				Bağlayıcı küt. %	kg
R001	300	0	0	300	166,7	0,56	374	591	470	491	1,8	1,2	3,6
A250+50	250	0	50	300	162,8	0,53	373	590	469	490	1,8	1,2	3,6
A200+120	200	0	120	320	154,9	0,52	347	559	478	499	1,5	1,2	3,8
B250+50	250	0	50	300	166,7	0,53	373	590	469	490	1,8	1,2	3,6
B200+100	200	0	100	300	166,7	0,53	373	589	468	490	1,8	1,2	3,6
C250+90	250	0	90	340	162,4	0,48	325	534	491	512	1,8	1,2	4,1
K250+70	250	70	0	320	158,7	0,52	345	555	475	495	1,8	1,2	3,8
K250+90	250	90	0	340	155,3	0,51	319	524	482	503	1,8	1,2	4,1



Şekil 2. 3: 70 mm·70 mm·280 mm numuneler ve isimleri

2.3. Taze Beton Deneyleri

2.3.1. Çökme (Slump) deneyi

Bu çalışmada üretilen beton karışımlarının kıvamları çökme (slump) deneyi ile belirlendi. Çökme deneyi için üst çapı 100 mm, alt çapı 200 mm ve yüksekliği 300 mm olan bir kesik koni, Abrams konisi kullanıldı. Koni, düz ve su emmeyen bir yüzeye oturtularak üç eşit yükseklikte tabakalar halinde taze betonla dolduruldu. Her tabaka, çapı 16 mm olan özel yerleştirme çubuğu ile 25 kez şişlenerek sıkıştırıldı. Kalıp tamamen doldurularak üzeri mala ile düzeltildi. Daha sonra kalıp bekletilmeden kulplarından tutularak yavaşça ve sarsmadan kaldırıldığında taze betonun kendi ağırlığı etkisiyle yaptığı çökme gözlemlendi. Numunede yıkılma olmaksızın, koni çıkartıldıktan sonra betonun çökme miktarı, karışım kıvamının ölçüsü olarak değerlendirildi [30]. Şekil 2.4'de çökme miktarı ölçülen numune görülmektedir. Üretilen her karışımın çökme değeri ölçüldü ve çökme miktarları 140 mm ile 160 mm arasında tutuldu.



Şekil 2. 4: Çökme (slump) deneyi

2.3.2. Birim hacim kütle deneyi

Numunelerin imalatı sırasında karıştırma işlemi tamamlandıktan sonra hacmi ve kütlesi belirli olan kalıp içerisine yerleştirilerek toplam kütlesi tartılarak ölçüldü. Toplam kütleden kalıp kütlesi çıkarılarak betonun kütlesi bulundu ve kap hacmine bölünerek karışımların birim kütleleri hesaplandı.

2.4. Sertleşmiş Beton Deneyleri

2.4.1. Basınç dayanımı

Bu çalışmada basınç dayanımları TS EN 12390-3 standardına göre , 100 mm çapında 200 mm yüksekliğinde silindir numuneler üzerinde belirlendi.

2.4.2. Hızlı klorür geçirimsliliği deneyi (ASTM 1202-10)

ASTM 1202-10 standardına göre yapılan hızlı klorür geçirimsliliği deneyi için, 100 mm çapında, 200 mm yüksekliğindeki silindir numuneler kullanıldı. 90 gün olan kür süresi dolduğunda, numunelerin üst ve alt kısımlarından 20'şer mm kesildikten sonra 3 eşit parçaya kesilerek kalınlıkları 50 mm, çapları 100 mm olan üç adet silindir elde edilmiş oldu. Kesim işleminin ardından numunelerin etrafı elektrik akımının geçmesini önlemek amacıyla sikaflex-PRO 3 WF Poliüretan mastik ile kaplandı. Daha sonra vakum haznesine konulan numuneler 3 saat süre ile 1 mm Hg'den daha düşük basıncın altında bekletildikten sonra haznenin içerisine mevcut basınç değişmeden saf su dolduruldu ve 1 saat süre ile bu şekilde vakum işlemine devam edildi. Vakumlama işleminin ardından numuneler 18±2 saat süre ile saf suda bekletildi. Deney için hücrelere yerleştirilen numunelerin etraflarına, çözeltilerin sızmasının engellenmesi için çabuk kuruyan silikon sürüldü. Silikonun kurummasının ardından hücrelerin birine %3'lük NaCl çözeltisi, diğerine 0,3N NaOH çözeltisi dolduruldu ve 60 voltluk gerilim uygulandı. Düzeneğe akım verilmesi ile birlikte ilk ölçüm yapıldı ve 6 saat süre ile her 30 dakikada bir devreden geçen akım ölçüldü. Ölçülen akım şiddeti (amper) değerlerinden geçen elektrik yükü coulomb cinsinden elde edildi [31].

Elde Edilen akım değerleri standartta yer alan aşağıdaki formüle (2.1) yerleştirilerek devreden geçen toplam elektrik yükü hesaplandı.

$$Q= 900 (I_0 + 2I_{30} ++I_{360}) \quad (2.1)$$

Bulunan toplam yük değerleri ile Çizelge 2.12’de yer alan değerlerle karşılaştırılarak betonun klorür geçirimliliği değerlendirildi.

Çizelge 2. 12: Toplam yük ile klorür geçirimliliği arasındaki ilişki [31]

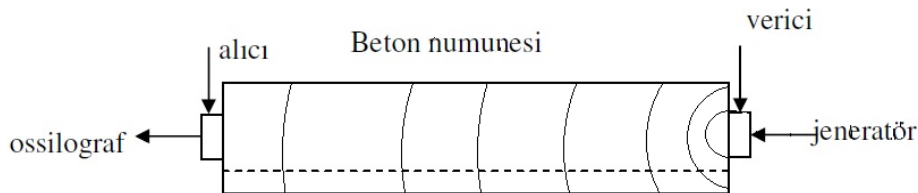
Geçen Akım (Coulomb)	Klorür Geçirimliliği
> 4000	Yüksek
2000- 4000	Orta
1000-2000	Düşük
100-1000	Çok Düşük
<100	İhmal Edilebilir

2.4.3. Ultra-ses hızı deneyi

Tahribatsız sertleşmiş beton deneylerinden biri olan ultrases hızı deneyi ile betonun elastisite modülü ve beton içindeki boşluk yapısı hakkında bilgi edinilir. Bu çalışmada üretilen 70 mm·70 mm·280 mm boyutlarındaki prizma biçimli beton numunesinin bir ucuna ultra-ses üreten prob, diğer ucuna da bu sesleri alan prob ile beton arayüzüne, boşluksuz bir ortam oluşturmak için gres sürülerek yerleştirilir (Şekil 2.5).

Prob tarafından oluşturulan dalgalar bir ossilografa nakledilerek sesin A dan B’ye ulaşması için geçen t_1 süresi mikro saniye cinsinden ölçülür. Sesin geçiş hızı;

$$V = \frac{L}{t_1} \quad (2.2)$$



Şekil 2. 5: Ultra-ses hızı deney düzeneği

Prizmatik çubuk halinde dinamik elastisite modülü ;

$$E_d = e \cdot V^2 \cdot \Delta \quad (2.3)$$

Ölçülen ultrases hızı malzemenin cinsine ve bünyesine bağlı olarak değişmektedir. Özellikle ses dalgalarının yoluna bir boşluk çıktığında dalga boşluğun etrafından dolaşır. Boşluk geçiş süresini artırır, süre uzar ve geçiş hızı düşer. Beton ve doğal taş gibi malzemelerde ses hızının çok düşük olması o malzemenin çok boşluklu olduğunu gösterir.

Cismin yapısında bir değişiklik olmadıkça, cisme bir gerilmenin etkimesi veya etkimemesi halinde çatlak miktarı değişmediği sürece ölçülen ses hızları birbirinden farklı değildir. Gerilmenin etkisiyle, çatlakların gelişmesiyle meydana gelen yapı değişikliği ses hızının düşmesine sebep olur.

2.4.4. Kılcal su emme deneyi

Su beton ile temas ettiği yüzeyden, beton içerisinde bulunan kılcal boşluklar yardımıyla beton içerisinde ilerler bu olaya “kılcal su emme” denir. Bu olay betonun kalıcılığını (durabilitesini) etkileyen önemli faktörlerdendir. Kılcal su emme özelliğinin tespiti için kılcal su emme deneyi yapılır. Bu deneyde sertleşmiş numune 70 °C etüvde 24 saat kurutulur. Bu işlemten sonra numunenin su ile temas edecek yüzeyine komşu yan yüzeyleri, ıslanmayı engellemek için, parafin mum ile kaplanır. Bu işlemten sonra numunenin kuru ağırlığı belirlenir. Deneyin hazırlık aşamaları geçildikten sonra, deneye başlarken, numunelerin su ile temas edecek yüzeyleri alta gelecek şekilde, içi belirli yükseklikte su ile dolu kaba yerleştirilir ve belirli zaman aralıkları ile numunenin ağırlığı ölçülür. Numune geçen süre zarfında su emeceğinden, ağırlığı emdiği su kadar artar. Yapılan çalışmalarda beton numunesi tarafında emilen suyun hacmi ile geçen sürenin karekökünün doğru orantılı olduğu tespit edilmiş ve bu orana “*kılcallık katsayısı*” denmiştir.

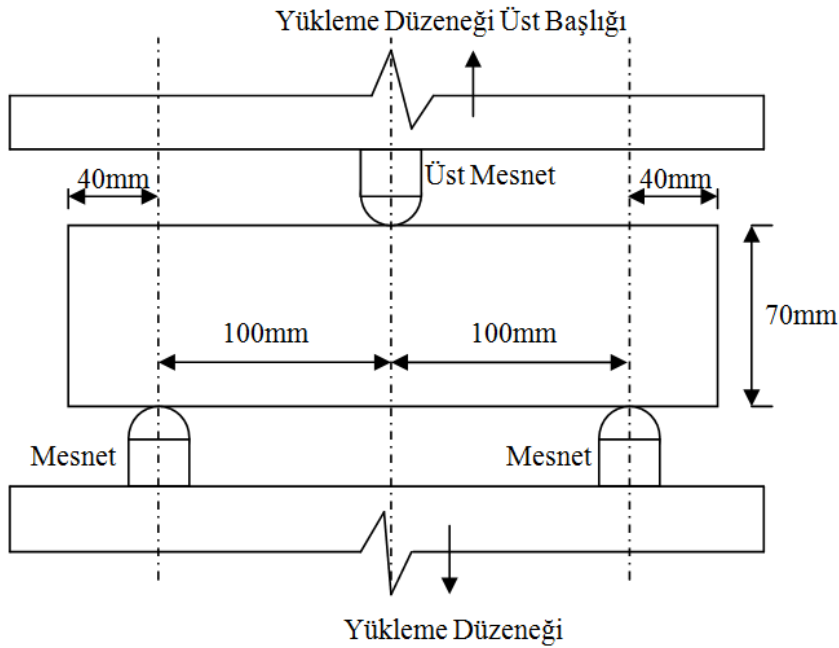
$$\frac{Q_s / \rho}{A} = k \times \sqrt{t} \quad (2.4)$$

2.4.5. Üç Noktalı eğilme deneyi

Bu çalışmada betonun eğilme dayanımı kare prizma biçimindeki kiriş numuneleri, Şekil 2.6’da görüldüğü gibi orta noktasından yüklenerek belirlenmektedir.

Bu çalışmada eğilme deneyi, magnezyum sülfat çözeltisinde bekletilen 70·70·280 mm boyutlarında beton prizmalar üzerinde uygulandı.

Mesnetler test cihazı sabit alt başlığına istenilen (280 mm - 80 mm = 200 mm) aralıkta yerleştirildikten sonra numune mesnetlerin üzerine oturtuldu. Mesnetlerin birbirlerine paralel olması, prizmatik numunenin her iki mesnete de tam oturması sağlandı. Silindirik yüzeyli bir metal üst mesnet numunenin üst yüzeyindeki mesnet çizgisi üzerine yerleştirildi. Söz konusu üç mesnet çizgisinin birbirine paralel olması sağlandı.



Şekil 2. 6: Üç noktalı eğilme deneyi

Cihazın yükleme başlığı ile üst yükleme mesnedi arasında bu mesnedin numune eksenine dik düzlem içerisinde dönerek numuneye mesnet doğrusu boyunca tam temas etmesi sağlandı. Yükleme hızı ayarlandıktan sonra başlık indirilerek üst mesnede değdirildi. Maksimum yükte numune kırıldığından deneye son verildi. Numunenin kırılma çizgisindeki genişlik ve yüksekliği kumpas ile 0,1 mm doğrulukla ölçüldü.

Elde edilen eğmede kırılma yüklerinden itibaren, doğrusal elastik davranış varsayımına dayalı mukavemet momentini esas alan **(2.5)** formülü kullanılarak eğilmede-çekme dayanımı hesaplandı.

$$\sigma_e = \frac{M}{W} = 1,5 \frac{P \cdot L}{b \cdot h^2} \quad (2.5)$$

3. DENEY SONUÇLARI

3.1. Taze Beton Deney Sonuçları

Taze beton üzerinde çökme ve birim kütle deneyleri yapıldı. Çökme deneyleri TS EN 12350-2'e göre yapılmış olup birim kütle deney sonuçları ile Çizelge 3.1'de verildi.

Çizelge 3. 1: Taze beton çökme ve birim kütle sonuçları

Beton Kodu	Çökme (cm)	Birim Kütle (Mg/m ³)
R001	16,0	2,396
A250+50	16,0	2,363
A200+120	15,0	2,407
B250+50	15,0	2,350
B200+100	15,0	2,381
C250+90	16,0	2,394
K250+70	15,0	2,369
K250+90	16,0	2,375

Taze beton kompasitesi 1 m³ betondaki katı malzemelerin (agrega ve çimento) kapladığı mutlak hacimlerin toplamıdır. 1 m³ betonda çimento, kum, iri agrega, su ve hava boşluğunun kapladığı mutlak hacimler sırası ile c, u, v, e ve h ise,

$$c + u + v + e + h = 1 \quad (3.1)$$

yazılabilir.

Kompasite K ise,

$$K = c + u + v = 1 - (e + h) \quad (3.2)$$

Birimi m³/m³ (m³Katılar/m³Beton) olarak verilir.

Taze beton deneylerinden elde edilen birim hacim kütle değerlerinden hesaplanan hava miktarları ve kompasiteleri Çizelge 3.2’de, gerçek bileşimleri Çizelge 3.3’te görülmektedir.

Çizelge 3. 2: Deneyde kullanılan numunelerin hava içerikleri ve kompasiteleri

Beton Kodu	Hava (%)	Kompasite (m ³ /m ³)
R001	1,8	0,821
A250+50	1,8	0,821
A200+120	1,5	0,821
B250+50	1,8	0,820
B200+100	1,8	0,821
C250+90	1,8	0,820
K250+70	1,8	0,814
K250+90	1,8	0,806

Çizelge 3. 3: İmal edilen numunelerin karışıma giren gerçek malzeme miktarları

Beton Kodu	Çimento (kg)	Ö.Y.F. Cürufu (kg)	Uçucu Kül (kg)	Su (kg)	Kum (kg)	Kırma Kum (kg)	KT I (kg)	KT II (kg)	Katkı (kg)	S/Ç	S/B
R001	300	-	-	166,7	374	591	470	491	3,6	0,56	0,56
A250+50	250	50	-	162,8	373	590	469	490	3,6	0,65	0,54
A200+120	200	120	-	154,9	347	559	478	499	3,8	0,77	0,48
B250+50	250	50	-	166,7	373	590	469	490	3,6	0,67	0,56
B200+100	200	100	-	166,7	373	589	468	490	3,6	0,83	0,56
C250+90	250	90	-	162,4	325	534	491	512	4,1	0,65	0,48
K250+70	250	-	70	158,7	345	555	475	495	3,8	0,63	0,50
K250+90	250	-	90	155,3	319	524	482	503	4,1	0,62	0,46

3.2. Sertleşmiş Beton Deney Sonuçları

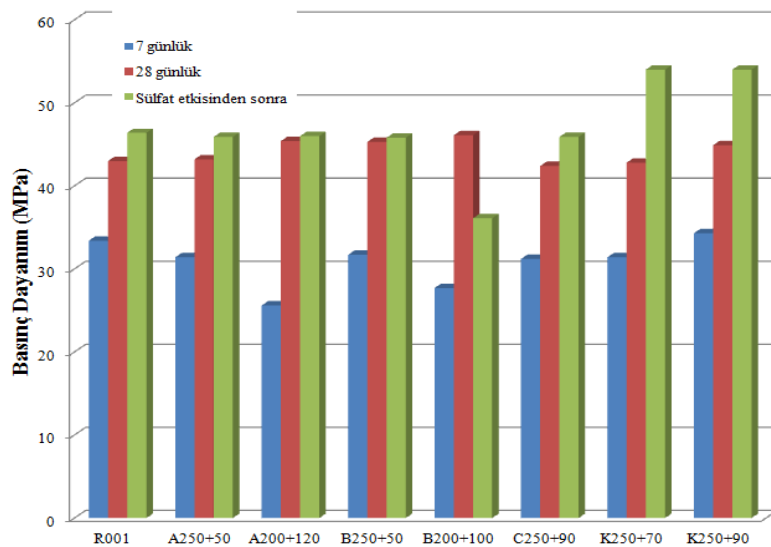
3.2.1. Basınç deneyi sonuçları

Basınç dayanımları üretimden sonra $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta kirece doygun suda saklanmış 100 mm çapında 200 mm yüksekliğindeki silindir numuneler üzerinde 7nci ve 28nci günlerde belirlendi. Sülfat etkisine maruz bırakılan numunelerin basınç dayanımları Çizelge 3.4’de verildi.

Çizelge 3. 4: Basınç dayanımları

Beton Kodu	7 günlük (N/mm ²)	28 günlük (N/mm ²)	Sülfat Etkisinden Sonra (N/mm ²)
R001	33,4	43,0	46,4
A250+50	31,4	43,2	45,9
A200+120	25,6	45,4	46,0
B250+50	31,7	45,3	45,8
B200+100	27,7	46,1	36,1
C250+90	31,2	42,4	45,9
K250+70	31,4	42,8	54,0
K250+90	34,3	44,9	54,0

Ayrıca beton numunelerine ait 7 günlük 28 günlük ve magnezyum sülfat çözeltisinde bekletildikten sonra ölçülen basınç dayanım sonuçları grafik olarak Şekil 3.1’de görülmektedir.



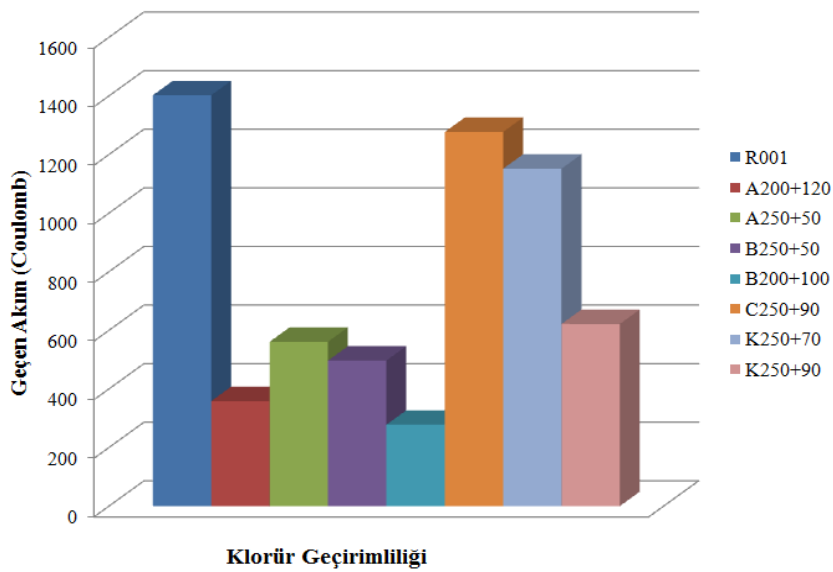
Şekil 3. 1: Basınç dayanımları

3.2.2. Hızlı klorür geçirirliğı deney sonuçları

ASTM 1202-10 standardına göre hızlı klorür geçirirliğı deneyi, üretilen 100 mm çapında 200 mm yüksekliğindeki silindir numunelerin kesilmesiyle elde edilen yüksekliği 50 mm, çapları 100 mm olan üç adet silindir parça üzerinde uygulandı. Deney süresi boyunca beton numunesinden geçen elektrik akım şiddeti (amper=coulomb/saniye) yarım saatte bir kaydedildi. Deney sonunda, kaydedilen veriler yardımıyla numuneden geçen akım miktarı coulomb cinsinden hesaplandı (Çizelge 3.5, Şekil 3.2).

Çizelge 3. 5: Hızlı klorür geçirirliğı deney sonuçları

Beton Kodu	Geçen Akım (C)
R001	1402,1
A250+50	358,2
A200+120	560,6
B250+50	496,4
B200+100	277,6
C250+90	1276,8
K250+70	1151,4
K250+90	621,5



Şekil 3. 2: Hızlı klorür geçirirliğı deney sonucu

3.2.3. Kılcal su emme deneyi sonuçları

Kılcal su emme deneyinde numunelerin ağırlıkları başlangıç anında, 4., 16., 25., 36., 49. ve 64. dakikalarda numunelerin yüzeylerindeki su havlu ile kurutularak 0.1 g hassasiyetli 13 kg kapasiteli terazide ölçüldü. Denklem (3.3) den q değeri hesaplandı (Çizelge 3.6). Örnek olarak da A250+50 numunesine ait q değerleri hesaplanarak yazıldı. Düşey eksene q değerleri, yatay eksene zamanın karekökü ($\sqrt{t}$) yerleştirilerek q- $\sqrt{t}$ grafiğinin doğrusal bölümleri çizildi. Şekil 3.3'te örnek olarak A250+50 numunesine ait kılcal su emme grafiğinin bu doğrusal bölümü görülmektedir. k kılcallık katsayıları q- $\sqrt{t}$ ilişkisinin doğrusal eğilim gösterdiği 4 dakika ile 64 dakika aralığındaki verilerden hesaplandı (Çizelge 3.7).

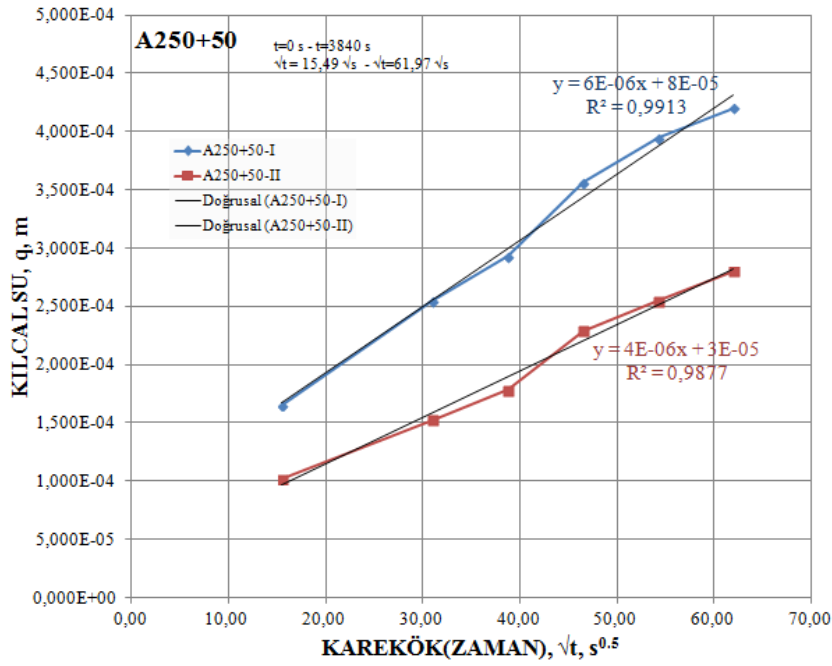
$$q = (\Delta Q/A)/\rho \quad (3.3)$$

Çizelge 3. 6: A250+50 beton numunelerinin kılcallık deneyi sonuçları, (Kesit alanı, $A = 7,85E-03 \text{ m}^2$)

Zaman (s)	$\Delta Q/\rho$, Emilen su (m^3)	$q=(\Delta Q/\rho)/A$ (m^3/m^2)
0	0,00E+00	0,00E+00
240	1,30E-06	1,66E-04
960	2,00E-06	2,55E-04
1500	2,30E-06	2,93E-04
2160	2,80E-06	3,57E-04
2940	3,10E-06	3,95E-04
3840	3,30E-06	4,20E-04
86400	5,07E-05	6,46E-03

Çizelge 3. 7: Kılcallık katsayısı

Beton Kodu	Kılcallık Katsayısı, k, ($\text{m}/\sqrt{\text{s}}$)
R001	4,93E-06
A250+50	4,84E-06
A200+120	5,22E-06
B250+50	5,14E-06
B200+100	4,77E-06
C250+90	6,76E-06
K250+70	8,25E-06
K250+90	7,94E-06



Şekil 3. 3: Kılcallık katsayısı belirlenen $q-\sqrt{t}$ grafiği

3.3. Sülfat Etkisinde Kalan Numunelere Uygulanan Deneylerin Sonuçları

3.3.1. Ultra-ses hızı deneyi sonuçları

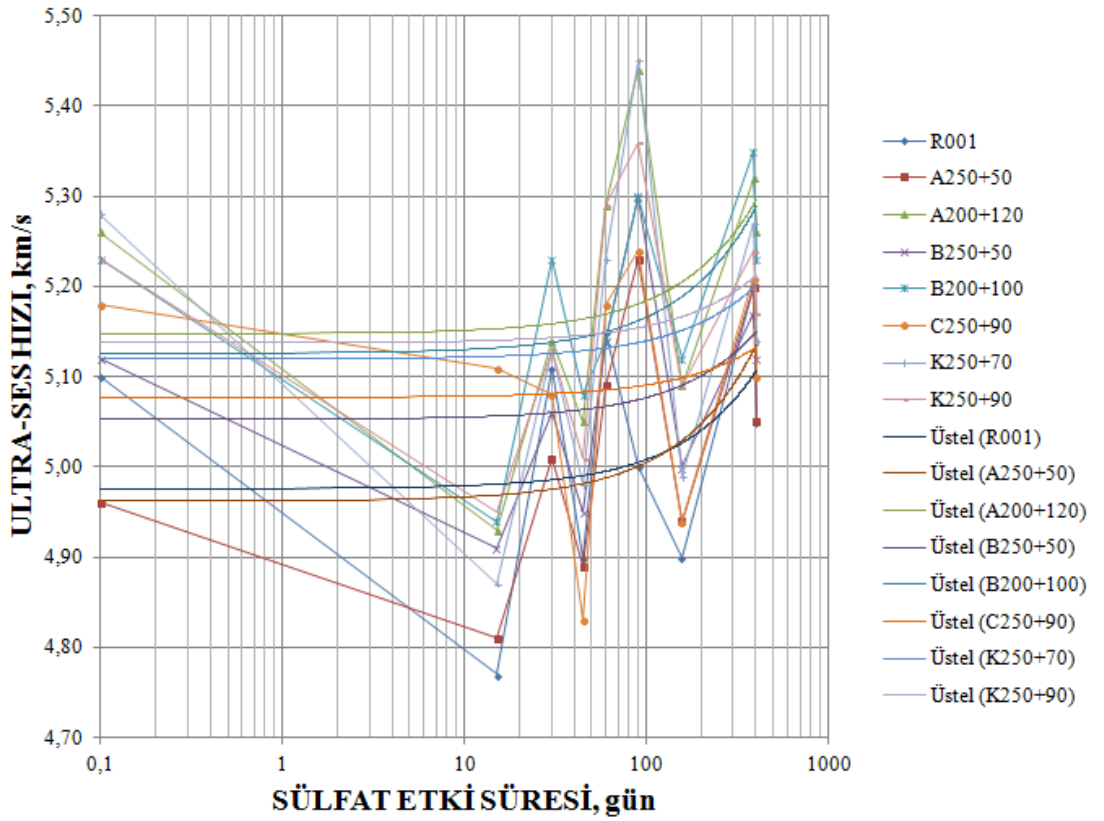
Bu deneyde elde edilen veriler Çizelge 3.8’de görülmektedir.

Çizelge 3. 8: Ultra-ses hızı deney sonuçları, (km/s)

Beton Kodu	Gün								
	İlk ölçüm	15 gün	30 gün	45 gün	60 gün	90 gün	156 gün	387 gün	402 gün
R001	5,10	4,77	5,11	4,90	5,15	5,00	4,90	5,20	5,05
A250+50	4,96	4,81	5,01	4,89	5,09	5,23	4,94	5,20	5,05
A200+120	5,26	4,93	5,14	5,05	5,29	5,44	5,09	5,32	5,26
B250+50	5,12	4,91	5,06	4,95	5,14	5,30	5,00	5,17	5,12
B200+100	5,23	4,94	5,23	5,08	5,14	5,30	5,12	5,35	5,23
C250+90	5,18	5,11	5,08	4,83	5,18	5,24	4,94	5,21	5,10
K250+70	5,28	4,87	5,13	4,98	5,23	5,45	4,99	5,27	5,14
K250+90	5,23	4,95	5,13	5,01	5,29	5,36	5,09	5,24	5,17

Magnezyum sülfat ($MgSO_4$) çözeltisinde bekletilen numuneler belirli süreler sonunda çözelti havuzundan çıkartılarak 24 saat kurumaya bırakıldıktan sonra ultra-ses hızları ölçüldü.

Ultra-ses hızı grafiği Şekil 3.4’de zamanla ortalama bir artış olduğu görülmektedir. Bu eğilim numunelerin iç kısımlarındaki boşluklarının oluşan tuzlarla dolmasından kaynaklanmakta, oluşabilecek hasara işaret etmekte, ancak hasar numune yüzeylerinden başladığı için oluşumu hakkında bir fikir vermemektedir.



Şekil 3. 4: Ultra-ses hızı deney sonuçları

3.3.2. Eğilme dayanımı deney sonuçları

Bu çalışmada magnezyum sülfat ($MgSO_4$) çözeltisinde bekletilen 70 mm·70 mm·280 mm kare prizma beton numuneler magnezyum sülfat çözeltisinde bekletildikten sonra eğilme dayanımının belirlendi. Her karışıma ait 3 numunenin ölçümlerinin ortalamaları alındı. Eğilme deneyi sonunda elde edilen maksimum yük değerlerinin ortalamasından maksimum eğilme momenti (M) hesaplandı. Beton numunelerine ait eğilme-çekme dayanımları denklem (2.6) uygulanarak hesaplandı (Çizelge 3.9).

Çizelge 3. 9: Eğilme-çekme dayanımı

Beton Kodu	$\sigma_e=M/W$ (N/mm²)
R001	10,80
A250+50	11,35
A200+120	8,13
B250+50	11,02
B200+100	9,09
C250+90	12,71
K250+70	10,78
K250+90	11,70

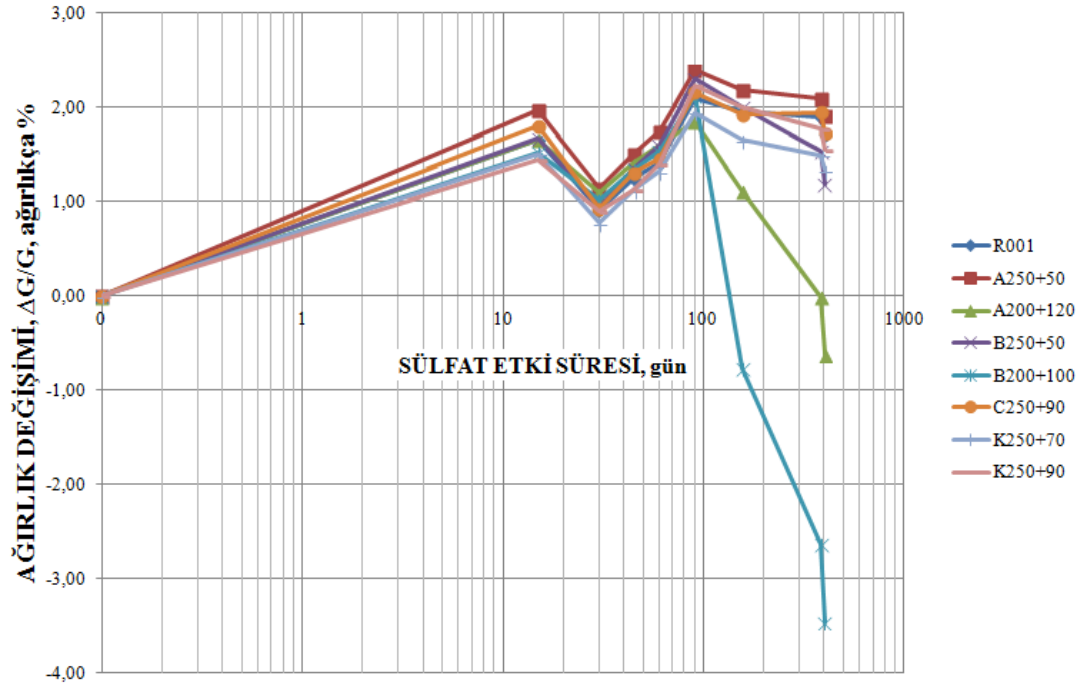
3.3.3. Ağırlık değişimi

Magnezyum sülfat (MgSO₄) çözeltisinde bekletilen numuneler belirli süreler sonunda ağırlıkları 0,1 g doğrulukla ölçülerek, başlangıçtaki kuru ağırlıkları üzerinden ağırlık değişimleri % cinsinden hesaplandı.

Ağırlık ölçümleri yapılmadan önce numuneler havuzlardan çıkartılarak laboratuvar ortamı koşullarında kurumaya bırakıldı. Şahit ve magnezyum sülfat etkisine maruz bırakılan numunelerde ağırlık değişim yüzdeleri Çizelge 3.10’da ve Şekil 3.5’te verildi.

Çizelge 3. 10: Magnezyum sülfat etkisinde ağırlık değişim verileri

Beton Kodu	Ağırlık değişimi %								
	0	15	30	45	60	90	156	387	402
R001	0,00	1,66	0,91	1,24	1,41	2,10	1,96	1,89	1,71
A250+50	0,00	1,97	1,14	1,51	1,74	2,39	2,19	2,09	1,92
A200+120	0,00	1,66	1,09	1,41	1,60	1,85	1,11	-0,01	-0,62
B250+50	0,00	1,67	0,94	1,35	1,60	2,30	2,00	1,53	1,18
B200+100	0,00	1,52	1,02	1,34	1,54	2,12	-0,77	-2,63	-3,46
C250+90	0,00	1,80	0,93	1,30	1,46	2,16	1,93	1,95	1,73
K250+70	0,00	1,51	0,77	1,12	1,32	1,95	1,65	1,49	1,33
K250+90	0,00	1,44	0,90	1,13	1,39	2,23	2,00	1,78	1,55



Şekil 3. 5 : Magnezyum sülfat etkisinde ağırlık değişim yüzdeleri

4. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

4.1. Taze Beton Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Araştırma kapsamında elde edilen çökme değerlerinin 150-160 mm arasında kalması sağlandı.

4.2. Sertleşmiş Beton Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

4.2.1. Basınç dayanımı deney sonuçlarının değerlendirilmesi

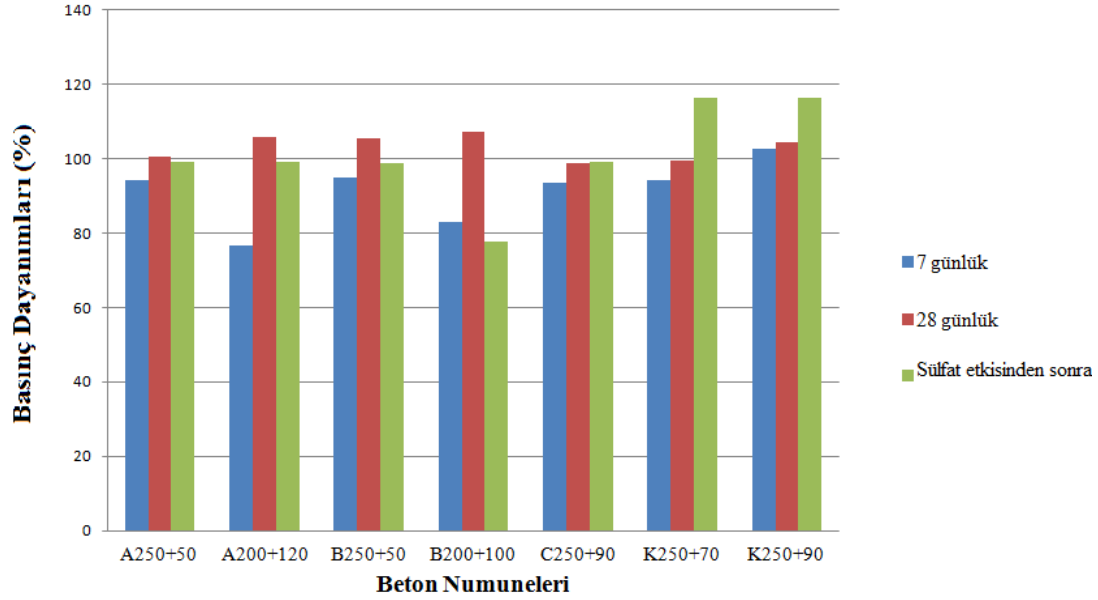
Çizelge 3.4'te bulunan sonuçlardan Çizelge 4.1'de ve Şekil 4.1'de verilen mineral bağlayıcı bileşenli numune basınç dayanımlarının şahit numunenin basınç dayanımlarına oranları hesaplandı.

Çizelge 4. 1: Basınç dayanımlarının oranları (%)

Beton Kodu	7 günlük	28 günlük	MgSO ₄ 'te bekletildikten sonra
R001	100	100	100
A250+50	94	100	99
A200+120	77	106	99
B250+50	95	105	99
B200+100	83	107	78
C250+90	93	99	99
K250+70	94	100	116
K250+90	103	104	116

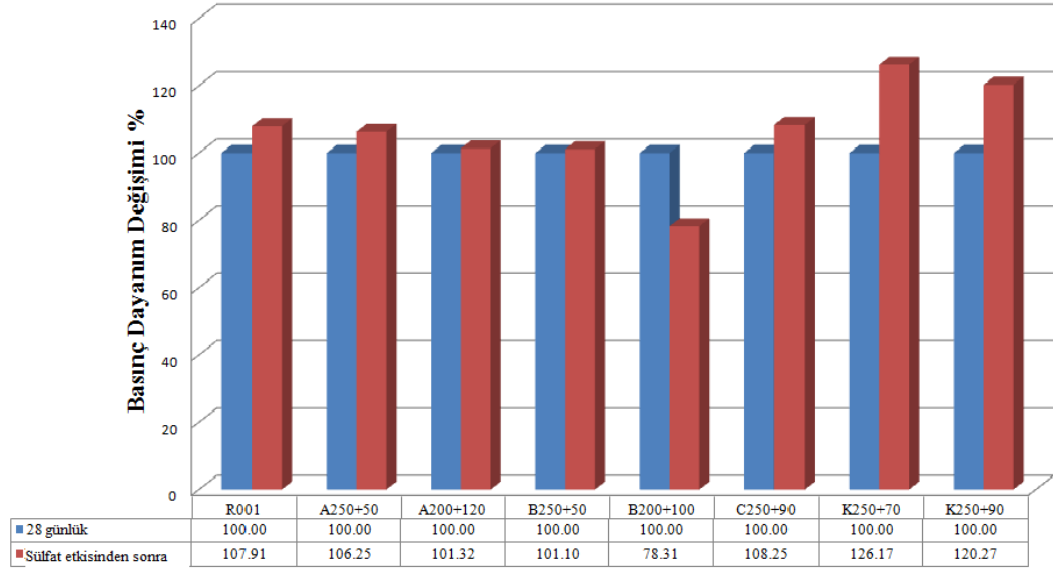
Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu ve uçucu kül içeren numunelerin 300 dozajlı (R001) şahit numuneyle aynı ve hatta daha yüksek 28 günlük dayanımlara eriştiği görüldü. Fakat magnezyum sülfat (MgSO₄) çözeltisinde bekletildikten sonra A, B Ö.G.Y.F. ve C Ö.G.F. cürufu numunelerin basınç dayanımlarında şahit numuneye göre azalma söz konusudur. Ancak bu durum K uçucu külünün kullanıldığı

numunelerde tam tersi bir görünüm izlemekte ve magnezyum sülfat ($MgSO_4$) çözeltisinde bekletildikten sonra yapılan ölçümlerde dahi artış eğilimi görülmektedir.



Şekil 4. 1: Basınç dayanımlarının değişimi

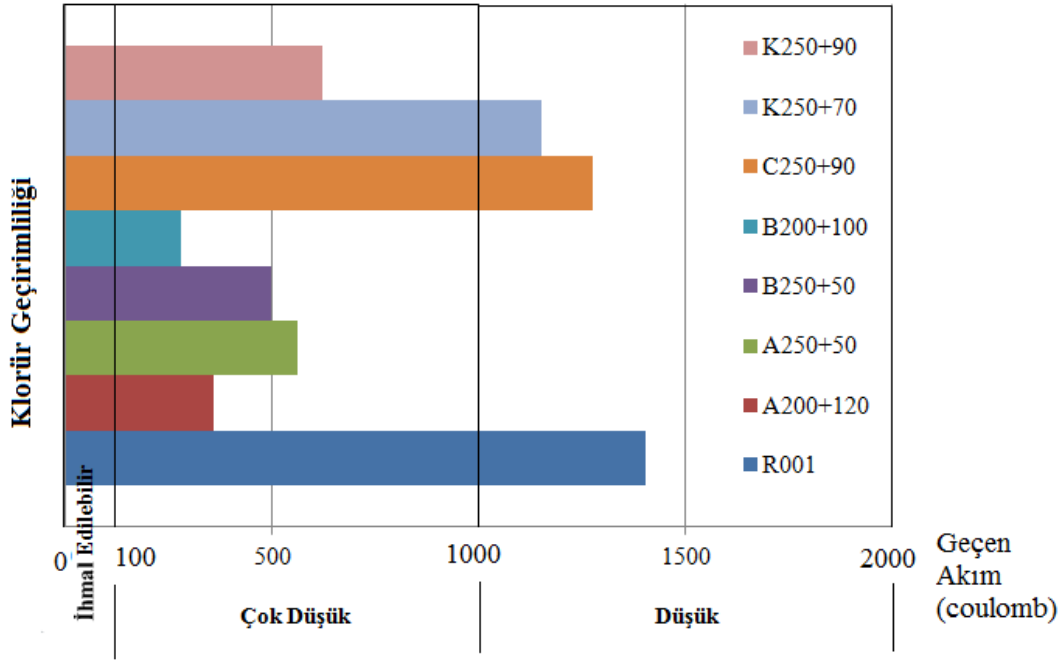
Ayrıca Şekil 4.2’de 28 günlük basınç dayanımı %100 olduğu farz edilerek sülfat etkisine maruz bırakıldıktan sonra A200+120 ve B250+50 numunelerinde dayanım artışı oldukça küçük oldu. Burada bu iki numune için sülfat etkisinin hasar oluşturduğu söylenebilir. B200+100 numunesinde de basınç dayanımının magnezyum sülfat çözeltisinden olumsuz etkilendiği ve basınç dayanımının sülfat etkisi sonunda düştüğü gözlemlendi. B kaynağından temin edilen Ö.G.Y.F. cürufunun diğerlerine göre sülfat etkisine karşı direnç gösteremediği söylenebilir. İlave olarak toplam bağlayıcı miktarının yanında çimento dozajının da sülfat etkisinde etkili olduğu gözlemlendi.



Şekil 4. 2 : Basınç dayanımlarının değişimi

4.2.2. Hızlı klorür geçirirliliği deney sonuçlarının değerlendirilmesi

Çalışmada elde edilen Çizelge 3.5'teki hızlı klorür deney sonuçları, ASTM 1202-10'da verilen toplam yük ile ifade edilen klorür geçirirliliği arasındaki ilişki ile kıyaslama yapıldı. Bu kıyaslama sonucunda üretilen R001, C250+90, K250+70 karışımlarının klorür geçirirliliği düşük seviyede kaldı. A200+120, A250+50, B250+50, B200+100, K250+90 karışımlarında ise klorür geçirirliliği çok düşük seviyesinde kaldı. Şekil 4.3'te bu durum gösterildi. Bünyesinde bağlayıcı olarak daha fazla uçucu kül ihtiva eden A200+120, B200+100 numunelerinin klorür geçirirliliği diğer numunelere göre oldukça düşük çıktı. Mineral bağlayıcı bileşeni içermeyen 300 dozajlı R001 şahit numunenin klorür geçirirlilik değerleri Çizelge 3.5'te ve Şekil 4.3'te görüldüğü gibi diğer mineral katkı içeren numunelere oranla oldukça yüksektir. Bu da uçucu kül, Ö.G.Y.F. cürufu gibi mineral katkıların beton geçirirliliğini azaltıcı yönde katkı sağladığını göstermektedir.



Şekil 4. 3: Hızlı klorür geçirirliği değeri ve ASTM 1202-10'a göre klorür geçirirliğik seviyeleri

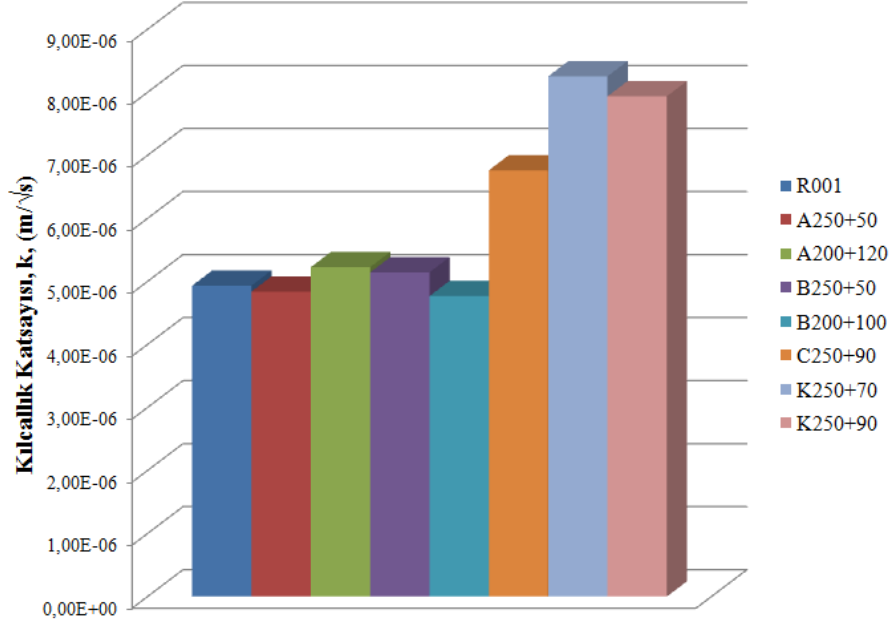
4.2.3. Kılcal su emme deneyi sonuçlarının değeriendirilmesi

Elde edilen Çizelge 4.2'deki veriler ışığında numunelerin hepsi için geçirirliğik ve kılcallık katsayısı arasında anlamlı düzeyde bir ilişkililik bulunmamaktadır.

Çizelge 4. 2: Kılcal su emme katsayısı ve klorür geçirirliğiliğinin karşılaştırılması

Beton Kodu	Kılcallık Katsayısı, k , (m/ $\sqrt{s}$)	Geçen Akım (C)
R001	4,93E-06	1402,1
A250+50	4,84E-06	358,2
A200+120	5,22E-06	560,6
B250+50	5,14E-06	496,4
B200+100	4,77E-06	277,6
C250+90	6,76E-06	1276,8
K250+70	8,25E-06	1151,4
K250+90	7,94E-06	621,5

Fakat B200+100 numunesi için anlamlı (significant) bir ilişkililik bulunduğu söylenebilir. Her iki deney sonucunda da B200+100 numunesi en düşük değerleri vermiştir. Şekil 4.3’de bu durum görülmektedir.



Şekil 4. 4: Beton numunelere ait kılcallık katsayılarının karşılaştırması

4.3. Sülfat Etkisinde Kalan Numunelere Uygulanan Deneylerin Sonuçlarının Değerlendirilmesi

4.3.1. Ultra-ses hızı deneyi sonuçlarının değerlendirilmesi

Çizelge 3.8’de ultra-ses hızları zamanla oluşabilecek hasara işaret eden bir ortalama artış eğilimi sergilemekle birlikte yüzeydeki hasarı temsil eden bir değişim göstermemektedir (Şekil 3.4).

4.3.2. Eğilme dayanımı deney sonuçlarının değerlendirilmesi

Magnezyum sülfat etkisine maruz bırakıldıktan sonra eğilme deneyi yapılan numunelerin deney sonuçları Çizelge 3.9’da verildi. Bu veriler ile basınç dayanımları Çizelge 4.3’te kıyaslandı. B200+100 numunesinin sülfat etkisi sonrasında maruz bırakıldığı basınç ve eğilme dayanımları görüldüğü üzere azalmaktadır. Fakat A200+120 numunesinde basınç dayanımı, kontrol numunesine göre bir değişim göstermemiştir. Ancak eğilme dayanımı düşüktür. Bu durum numunenin sadece

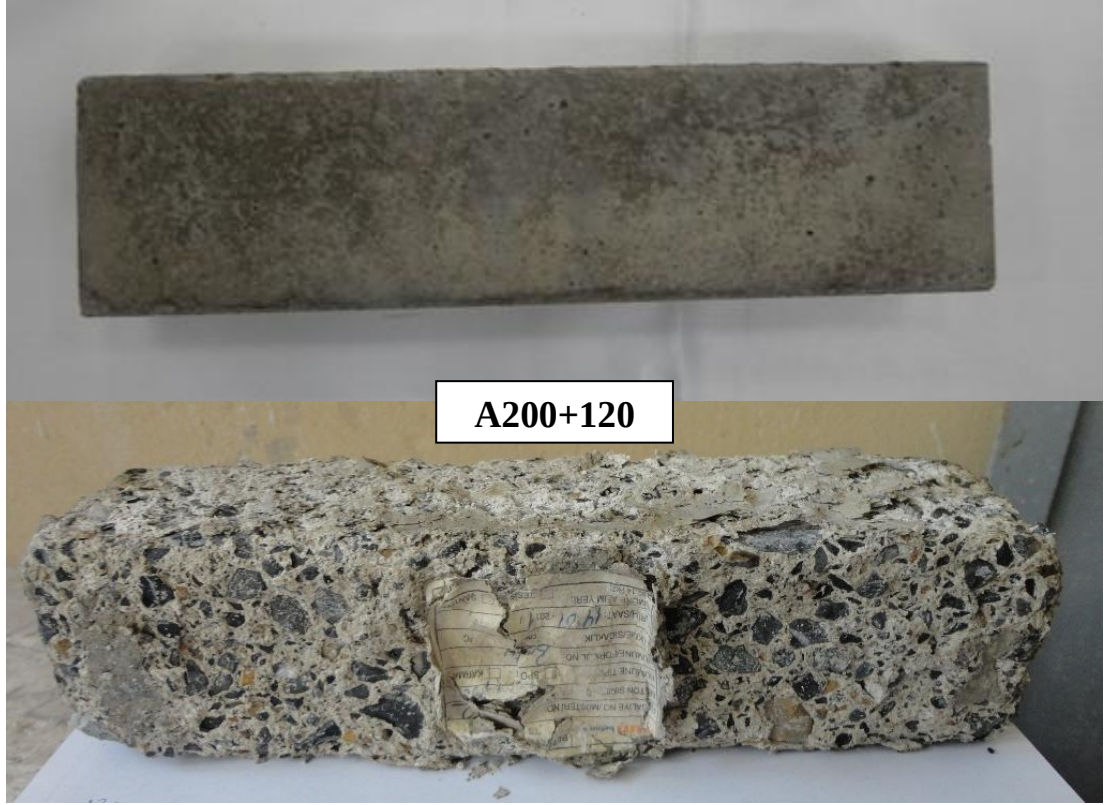
yüzeyinden hasar görmesi olgusuyla açıklanabilir. Bu sonucu ağırlık değişimi de desteklemektedir (Şekil 3.5).

Çizelge 4. 3: Magnezyum sülfat etkisi sonrasında eğilme ve basınç dayanımları

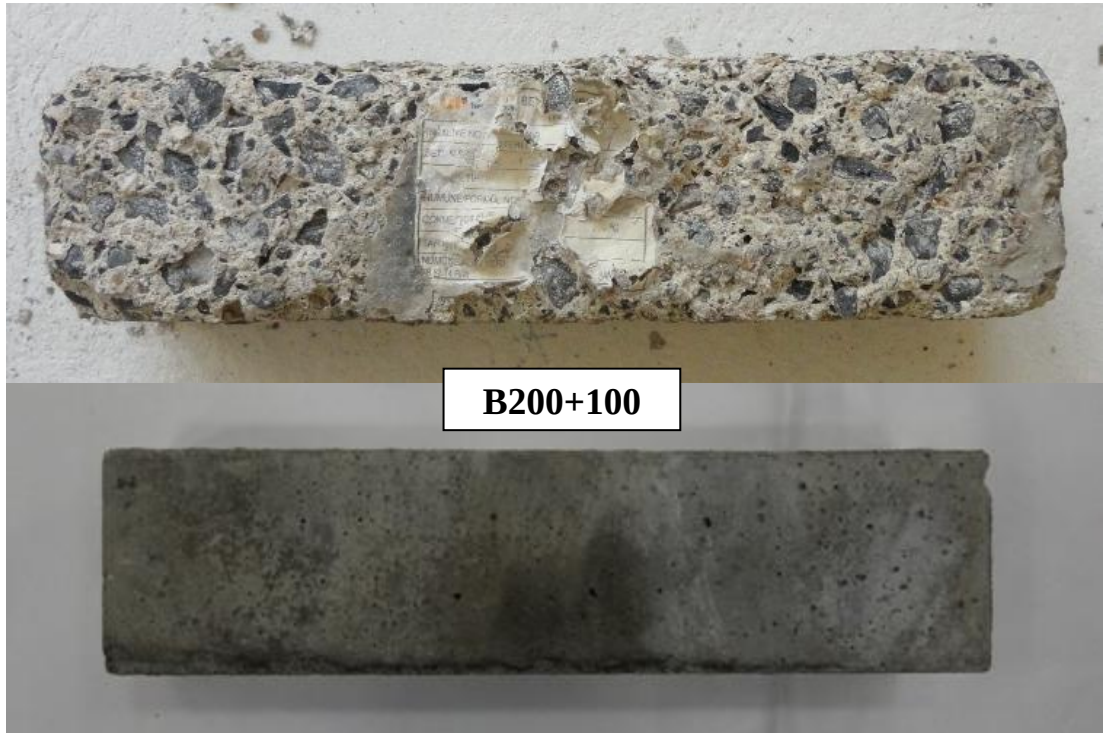
Beton Kodu	Eğilme-Çekme Dayanımı (N/mm²)	Basınç Dayanımı (N/mm²)
R001	10,80	46,37
A250+50	11,13	45,90
A200+120	7,32	45,96
B250+50	10,40	45,82
B200+100	8,42	36,08
C250+90	11,56	45,93
K250+70	9,63	53,99
K250+90	10,26	54,01

4.3.3. Ağırlık değişim sonuçlarının değerlendirilmesi

Çizelge 3.10’da gösterilmiş Şekil 3.5’de de çizgeleştirilmiş sonuçlarda, ayrıca Şekil 4.4’te ve Şekil 4.5’te magnezyum sülfat etkisine maruz bırakılmadan önce ve maruz bırakıldıktan sonraki fotoğraflar karşılaştırıldığında ağırlık kayıpları görülmektedir. Fotoğraflarda B200+100 ve A200+120 numunelerinde gerçekleşen tahribat görülmektedir. Burada toplam bağlayıcı malzeme içerisinde diğer numunelere göre daha az çimento içeren numunelerde tahribat daha fazladır. Diğer numunelere ait fotoğraflar Ek’tedir.



Şekil 4. 5: Magnezyum sülfat etkisinden önce ve sonra A200+120 numune



Şekil 4. 6: Magnezyum sülfat etkisinden önce ve sonra B200+100 numune

5. GENEL SONUÇLAR

Bu çalışmada, beton içerisinde bağlayıcı madde olarak çimentonun yanında kullanılan uçucu kül (UK), öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu (Ö.G.Y.F.C.) gibi farklı mineral bağlayıcı bileşenlerinin betonun kalıcılık (durabilite) özelliklerine etkileri araştırıldı. Bu kapsamda farklı Ö.G.Y.F.C. ve UK oranlarında üretilen 8 adet beton karışımı üzerinde basınç dayanımları, hızlı klorür geçirimsizlikleri, kılcal su emme katsayıları belirlendi ve sülfat etkisine bırakılarak ultra-ses hızı, eğilme-çekme dayanımı ve ağırlık değişim ölçümleri yapıldı. Yapılan tüm çalışmalar sonunda elde edilen sonuçlar aşağıda özetlendi.

5.1. Sülfat Etkisine Maruz Bırakılmadan Önceki Sonuçlar

- Basınç dayanım deneylerinden elde edilen 28 günlük dayanım sonuçlarından Ö.G.Y.F. cürufunun ve uçucu külün beton mukavemetine olan etkisi görüldü.
- Mineral bağlayıcı bileşeni kullanılan numunelerde hızlı klorür geçirimsizliğinin, mineral bağlayıcı bileşen kullanılmayan şahit numuneye göre az olması mineral bağlayıcı bileşenlerin beton geçirimsizliğini azalttığını göstermektedir.
- Bu çalışmada, kılcal su emme sonuçları incelendiğinde, özgül yüzeyi büyük olan B cürufunun kullanıldığı numunelerde kılcal su emme katsayısı (k) küçük, özgül yüzeyi daha düşük olan uçucu külün kullanıldığı karışımlarda yüksektir.

5.2. Sülfat Etkisine Maruz Bırakıldıktan Sonraki Sonuçlar

- Sülfat çözeltisinde bekletilen uçucu küllü betonların dayanımlarında %20-26 artış oldu. Şahit betonda %7, öğütülmüş fırın cürufunun kullanıldığı C250+90 da %8 artış olduğu, öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufunun kullanıldığı A250+50 da %6, A200+120 ve B250+50'de dayanımda %1'lik artışlar olurken B200+100 numunelerinde %22'lik düşüş olduğu tespit edildi.

- Sülfat etkisi altındaki numunelerde yapılan ağırlık değişim deneylerinde elde edilen sonuçlara göre B200+100 ve A200+120 numunelerinde tahribatın daha fazla olduğu görüldü. Ağırlık kaybı bu iki numunede diğer numunelere göre daha fazladır.

Bu çalışmada mineral kökenli bağlayıcı bileşenlerinin uygun bakım koşullarında betonların basınç dayanımlarına ve kılcal ve hızlı klorür geirimsiliklerine etkileri belirlendi. Numunelerin magnezyum sülfat etkisine maruz bırakıldıktan sonra yapılan basınç dayanımı ve ağırlık değişimleri uçucu külün betonun kalıcılığını (durabilitesini) arttırdığını göstermektedir. Fakat .G.Y.F. cüruflu numunelerin bazılarında basınç dayanım artışlarının az olduğu ve .G.Y.F. cürufunun kullanıldığı B200+100 numunesinde basınç dayanımında azalma olduğu görüldü (Bölüm 1, Al-Amoudi, 2002).

KAYNAKLAR

- [1] **Yalçın, H. ve Gürü, M.**, (2006), *Çimento ve Beton*, Palme Yayıncılık, Ankara.
- [2] **Erdoğan, T. Y.**, (2003), *Beton, 1. Baskı*, Metu Press, Ankara.
- [3] **ASTM C 125**, (1994), Standard terminology relating to concrete and concrete aggregates, *Annual Book of ASTM Standards*.
- [4] **ASTM C 618**, (1994), Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use as mineral admixture in portland cement concrete, *Annual Book of ASTM Standards*.
- [5] **Taylor, H. F. W.**, (1964) *The Chemistry of Cements*, Volume 1 and Volume 2. Academic Press. London and New York.
- [6] **Yılmaz, K.**, (1988), *Yapı Malzemesi Ve Beton Teknolojisi*, İ.T.Ü. Sakarya Mühendislik Fakültesi Matbaası, Sakarya.
- [7] **ACI 233.R-95**, (2000), Ground Granulated Blast-Furnace Slag as a Cementitious Constituent in Concrete Reported by ACI Committee 233, American Concrete Institute, Detroit, Michigan.
- [8] **Neville, A. M.**, (1990), *Properties of Concrete Third Edition*, Longman Scientific and Technical, New York.
- [9] **Arioğlu, E.**, (1989), Prefabrikasyon Endüstrisinde Beton Kalitesinin ve Denetiminin Mevcut Durumu, 1. Ulusal Beton Kongresi, 24-25-26 Mayıs 1989, İstanbul, 215-226
- [10] **Neville, A. M. ve Brooks, J.J.**, (2001), *Concrete Technology, Revised Edition*, Pearson Education Limited.
- [11] **Paulo J. M. Monteiro, P. Kumar Mehta**, (2005), *Concrete: Microstructure, Properties and Materials*, McGraw-Hill Companies.
- [12] **ACI Committee**, (1987), Use of Fly Ash in Concrete, *ACI Materials Journal*, 84, 381-409
- [13] **Hodson, V.**, (1990), *Concrete Admixtures*, New York
- [14] **TS EN 450**, (1998), Uçucu Kül, Betonda Kullanılan Tarifler, Özellikler ve Kalite Kontrolü, *Türk Standardları Enstitüsü*, Ankara
- [15] **Şimşek, O.**, (2007), *Beton ve Beton Teknolojisi, 2. Baskı*, Seçkin Yayıncılık, Ankara, Türkiye
- [16] **Baradan, B., Yazıcı, H., Ün, H.**, (2010), *Beton ve Betonarme Yapılarda Kalıcılık (Durabilite)*, Türkiye Hazır Beton Birliği Yayınları, İstanbul.
- [17] **Mather, B.**, 2004, Concrete Durability, **26**, 3-4.
- [18] **Url-1** <<http://www.penetron.com>>, Erişim Tarihi (15.09.2013).

- [19] **Tasdemir, C.**, (2003), Combined effects of mineral admixtures and curing conditions on the sorptivity coefficient of concrete, *Cement and Concrete Research*, **33**, 1637–1642
- [20] **Li, Z. ve Chau, C. K.**, (2000), “New Water Permeability Test Scheme for Concrete”, *ACI Materials Journal*, January -February 2000, Title no:97M-12: 1-7.
- [21] **Oh, B. H., Cha, S. W., Jang, B. S. ve Jang, S. Y.**, (2002), “Development of High-Performance Concrete Having High Resistance to Chloride Penetration”, *Nuclear Engineering and Design* 212: 221-231
- [22] **Khan, M. I. ve Lynsdale, C. J.**, (2002), “Strength, Permeability and Carbonation of High-Performance Concrete”, *Cement and Concrete Research* 32:123-131.
- [23] **Chia, K. S. ve Zhang, M. H.**, (2002), “Water Permeability and Chloride Permeability of High-Strength Lightweight Aggregate Concrete”, *Cement and Concrete Research*, 32: 639-645.
- [24] **Kocataşkın, F.**, (1975), *Yapı Malzemesi Bilimi- Özellikler ve Deneyler*, Düzeltmiş Dördüncü Baskı, Arpaz Matbaacılık, İstanbul.
- [25] **Hooton, R. D.**, (1993), Influence of Silica Fume Replacement of Cement on Physical Properties and Resistance to Sulfate Attack, Freezing and Thawing and Alkali-Silica reactivity. *ACI Material Journal*, Vol. 92, No. 2, pp. 143-151.
- [26] **Sümer, M.**, (1994), Harçlarda kılcal ve basınçlı su altındaki geçirimsizliğin su/çimento oranı ile değişimi, *Teknik Dergi T.M.M.O.B.*, Cilt 5, Sayı1
- [27] **9. CEB (Comité Euro-International du Béton)**, 1992, *Durable Concrete Structures*, Lausanne: Thomas Telford Ltd.
- [28] **Neville, A. M.**, (1996), *Properties of concrete*, J. Wiley, New York
- [29] **Akkaya, Y.**, (1994), Zararlı bir ortamda betonun uğradığı hasarın hasar mekanizması ile incelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul
- [30] **Carino, N. C.**, (1999), Nondestructive Techniques to Investigate Corrosion Status in Concrete Structures, *Journal of Performance of Constructed Facilities*, August, 96-106
- [31] **ASTM C 1202**, (2010), Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete’s ability to Resist Chloride Ion Penetration, ASTM, U.S.A.

EKLER

Çizelge Ek. 1: Numunelerin ultra-ses hızlarının zamanla değişimi

Numune Kodu	Ultra-ses hızları (km/s)								
	ilk ölçüm	15 gün	30 gün	45 gün	60 gün	90 gün	156 gün	387 gün	402 gün
R001_A	5,16	4,76	5,01	4,93	5,16	5,12	4,9	5,19	5,06
R001_B	5,03	4,81	5,03	4,89	5,14	4,9	4,9	5,24	5,08
R001_C	5,12	4,75	5,31	4,9	5,17	4,98	4,9	5,18	5,01
R001	5,1	4,77	5,12	4,9	5,15	5	4,9	5,2	5,05
A250+50_A	5,03	4,69	5	4,89	5,01	5,2	4,9	5,19	5,05
A250+50_B	4,95	4,85	5,03	4,9	5,16	5,26	4,97	5,21	5,03
A250+50_C	4,91	4,89	5,01	4,87	5,12	5,22	4,95	5,2	5,08
A250+50	4,96	4,81	5,01	4,89	5,09	5,23	4,94	5,2	5,05
A200+120_A	5,13	4,95	5,18	5,07	5,28	5,51	5,05	5,29	5,26
A200+120_B	5,34	4,86	5,17	5	5,29	5,38	5,15	5,31	5,27
A200+120_C	5,3	4,97	5,08	5,08	5,3	5,44	5,06	5,35	5,25
A200+120	5,26	4,93	5,14	5,05	5,29	5,44	5,09	5,32	5,26
B250+50_A	5,17	4,86	5,05	4,99	5,11	5,31	4,99	5,21	5,14
B250+50_B	5,13	4,84	5,04	4,98	5,19	5,27	4,96	5,14	5,09
B250+50_C	5,07	5,03	5,1	4,89	5,11	5,3	5,05	5,16	5,12
B250+50	5,12	4,91	5,06	4,95	5,14	5,3	5	5,17	5,12
B200+100_A	5,21	4,86	5,26	5,08	5,05	5,43	5,08	5,37	5,23
B200+100_B	5,25	4,93	5,22	5,1	5,05	5,21	5,13	5,35	5,24
B200+100_C	5,21	5,05	5,2	5,06	5,31	5,26	5,16	5,31	5,21
B200+100	5,23	4,95	5,23	5,08	5,14	5,3	5,12	5,35	5,23
C250+90_A	5,14	5,6	5,07	4,8	5,21	5,24	4,91	5,15	5,08
C250+90_B	5,23	5,01	5,07	4,89	5,19	5,32	5,04	5,31	5,12
C250+90_C	5,17	4,79	5,09	4,8	5,13	5,15	4,89	5,17	5,09
C250+90	5,18	5,13	5,08	4,83	5,18	5,24	4,94	5,21	5,1
K250+70_A	5,19	4,78	5,08	5,01	5,25	5,52	4,99	5,26	5,13
K250+70_B	5,33	4,98	5,22	4,88	5,16	5,44	4,98	5,25	5,15
K250+70_C	5,32	4,86	5,08	5,05	5,27	5,41	5,01	5,28	5,16
K250+70	5,28	4,87	5,13	4,98	5,23	5,45	4,99	5,27	5,14
K250+90_A	5,18	4,89	5,11	5,03	5,28	5,53	5,16	5,2	5,18
K250+90_B	5,31	5	5,12	5,06	5,31	5,29	5,08	5,24	5,19
K250+90_C	5,19	4,96	5,17	4,95	5,27	5,26	5,05	5,27	5,16
K250+90	5,23	4,95	5,13	5,01	5,29	5,36	5,09	5,24	5,17

Çizelge Ek. 2 : Numunelerin ağırlık ölçümleri

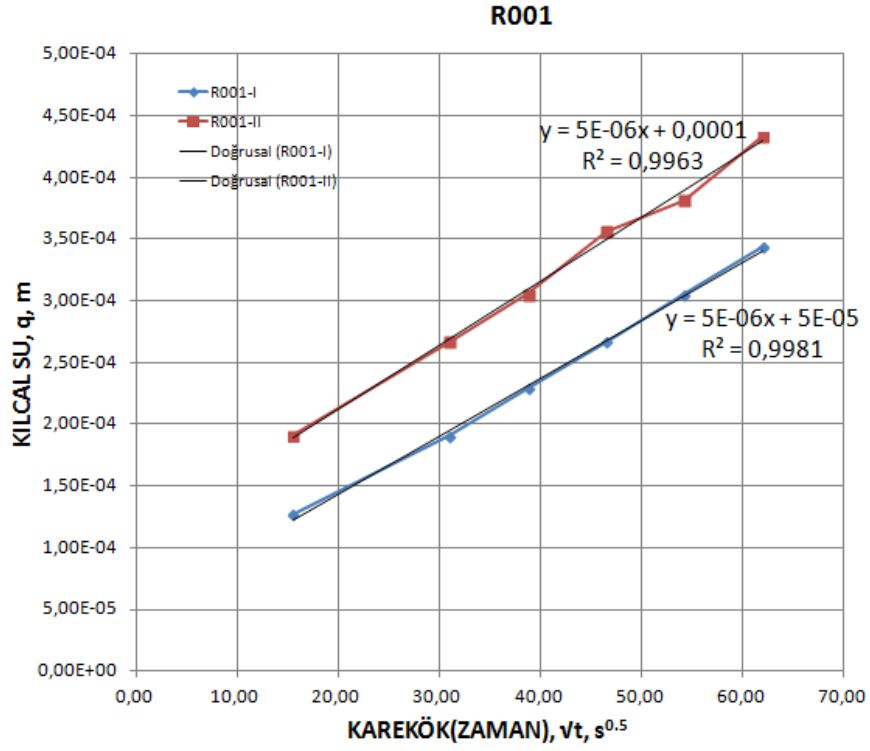
Numune Kodu	Numune Ağırlığı (g)								
	ilk ölçüm	15 gün	30 gün	45 gün	60 gün	90 gün	156 gün	387 gün	402 gün
R001_A	3298,3	3355,4	3329,5	3341,2	3347,1	3370	3364,4	3360,8	3354,2
R001_B	3305,6	3360,9	3333,3	3345	3350	3372,2	3365	3360,8	3356,2
R001_C	3313,8	3366,2	3345	3354,1	3360,1	3383,5	3382,4	3383,4	3377,2
R001	3305,9	3360,8	3335,9	3346,8	3352,4	3375,2	3370,6	3368,3	3362,5
A250+50_A	3243	3300,8	3276	3288,7	3294	3316	3307,4	3306	3299,6
A250+50_B	3190,6	3266,2	3235,9	3246,6	3256,5	3275,5	3270,6	3271,2	3265
A250+50_C	3213,5	3270,2	3245	3257,3	3264	3286	3280,4	3271,6	3268
A250+50	3215,7	3279,1	3252,3	3264,2	3271,5	3292,5	3286,1	3282,9	3277,5
A200+120_A	3267	3324,6	3306,7	3316,8	3322,9	3312,2	3317,6	3273	3246
A200+120_B	3299,9	3352	3331,7	3343,6	3349,5	3368,5	3321,4	3284	3272,2
A200+120_C	3300,4	3354,6	3336,4	3345,7	3353	3369,2	3337,4	3309,2	3287,8
A200+120	3289,1	3343,7	3324,9	3335,4	3341,8	3350	3325,5	3288,7	3268,7
B250+50_A	3229,9	3281	3259,7	3272,5	3279,2	3302,3	3290,3	3272,6	3263,4
B250+50_B	3209	3265,1	3240,9	3253,4	3264,2	3285,4	3272	3263	3246,4
B250+50_C	3268,1	3322,6	3298	3311,7	3318,6	3342,1	3338,6	3319,6	3311,6
B250+50	3235,7	3289,6	3266,2	3279,2	3287,3	3309,9	3300,3	3285,1	3273,8
B200+100_A	3261,5	3305,2	3291,7	3300,5	3307,4	3324,9	3198,6	3121,2	3096,2
B200+100_B	3294,8	3348,4	3329,4	3341	3347,7	3366,6	3305,2	3238,4	3213
B200+100_C	3251,1	3302,5	3286,1	3297	3303,3	3324,2	3227,8	3189,4	3159
B200+100	3269,1	3318,7	3302,4	3312,8	3319,5	3338,6	3243,9	3183	3156,1
C250+90_A	3377,7	3443,4	3413,9	3425,2	3430,3	3455,5	3446,6	3446,6	3439,2
C250+90_B	3348,9	3405,1	3375,2	3388,2	3394,5	3416,3	3410,8	3414,6	3405,4
C250+90_C	3333,1	3392,3	3363,9	3377	3382,2	3405,2	3396,4	3394,8	3389
C250+90	3353,2	3413,6	3384,3	3396,8	3402,3	3425,7	3417,9	3418,7	3411,2
K250+70_A	3298,3	3325,6	3299,3	3311,8	3317	3338,3	3315,2	3300	3293,6
K250+70_B	3305,6	3372,1	3350,4	3360,4	3367,5	3386,8	3383,6	3385,4	3383
K250+70_C	3323,8	3380,3	3354,4	3366,7	3374,1	3395,8	3392,4	3390,2	3383
K250+70	3309,2	3359,3	3334,7	3346,3	3352,9	3373,6	3363,7	3358,5	3353,2
K250+90_A	3316	3359,9	3342,5	3350,4	3358,4	3376,6	3380,2	3378,2	3371,4
K250+90_B	3327,5	3373,8	3356,3	3360	3371,9	3390,6	3388,6	3384,4	3377
K250+90_C	3242,4	3294,4	3275,9	3287,2	3293,3	3338,9	3315,2	3299	3291
K250+90	3295,3	3342,7	3324,9	3332,5	3341,2	3368,7	3361,3	3353,9	3346,5

Çizelge Ek. 3 : Magnezyum sülfat etkisi sonrasında numunelere ait eğilme ve basınç dayanımları

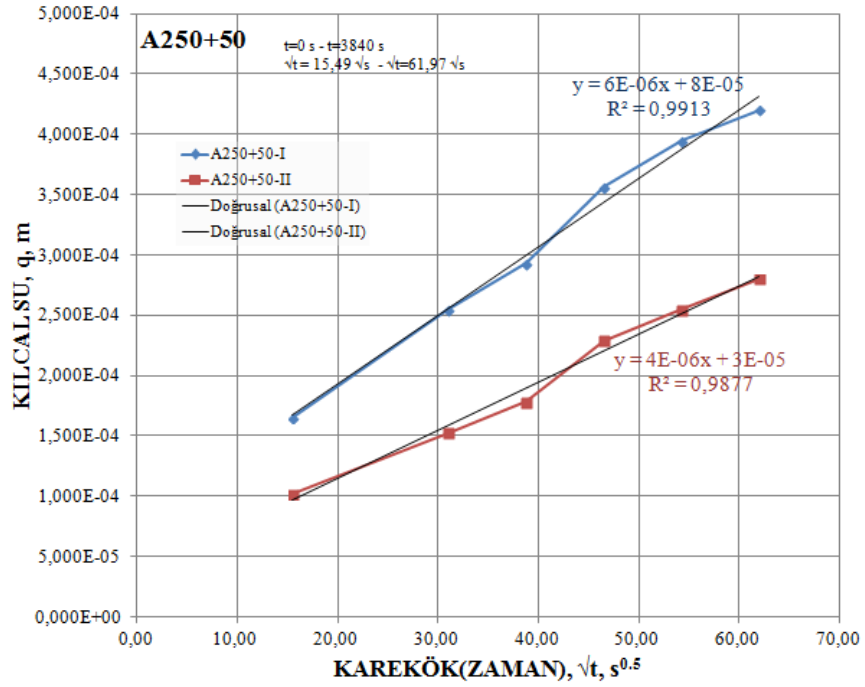
Numune Kodu	Mineral Bileşenin Kaynağı	Bağlayıcı			Eğilme Dayanımı (N/mm ²)	Basınç Dayanımı (N/mm ²)	
		Çimento	Uçucu Kül	Ö.G.Y.F. Cürufu		I	II
R001_A	-	300	0	0	11,0	40,9	45,3
R001_B	-	300	0	0	10,3	47,5	50,0
R001_C	-	300	0	0	11,1	47,6	46,9
R001	-	300	0	0	10,8	46,4	
A250+50_A	A	250	0	50	11,1	48,3	47,8
A250+50_B	A	250	0	50	11,8	35,4	39,0
A250+50_C	A	250	0	50	10,5	55,6	49,3
A250+50	A	250	0	50	11,1	45,9	
A200+120_B	A	200	0	120	7,8	52,5	44,3
A200+120_C	A	200	0	120	7,8	39,1	48,0
A200+120	A	200	0	120	7,8	46,0	
B250+50_A	B	250	0	50	10,6	42,5	40,3
B250+50_B	B	250	0	50	9,9	46,9	49,0
B250+50_C	B	250	0	50	10,8	46,9	49,3
B250+50	B	250	0	50	10,4	45,8	
B200+100_A	B	200	0	100	7,6	30,1	37,6
B200+100_B	B	200	0	100	9,0	41,2	38,8
B200+100_C	B	200	0	100	8,7	26,2	42,6
B200+100	B	200	0	100	8,4	36,1	
C250+90_A	C	250	0	90	12,1	49,2	48,6
C250+90_B	C	250	0	90	10,7	44,8	46,1
C250+90_C	C	250	0	90	11,9	45,1	41,8
C250+90	C	250	0	90	11,6	45,9	
K250+70_A	K	250	70	0	9,1	48,9	61,2
K250+70_B	K	250	70	0	9,8	52,4	53,3
K250+70_C	K	250	70	0	10,0	54,9	53,2
K250+70	K	250	70	0	9,6	54,0	
K250+90_A	K	250	90	0	10,7	52,3	55,7
K250+90_B	K	250	90	0	10,3	56,8	51,4
K250+90_C	K	250	90	0	9,9	52,7	55,1
K250+90	K	250	90	0	10,3	54,0	

Çizelge Ek. 4 : Kılcal su emme deney verileri ve k kılcallık katsayısı değerleri

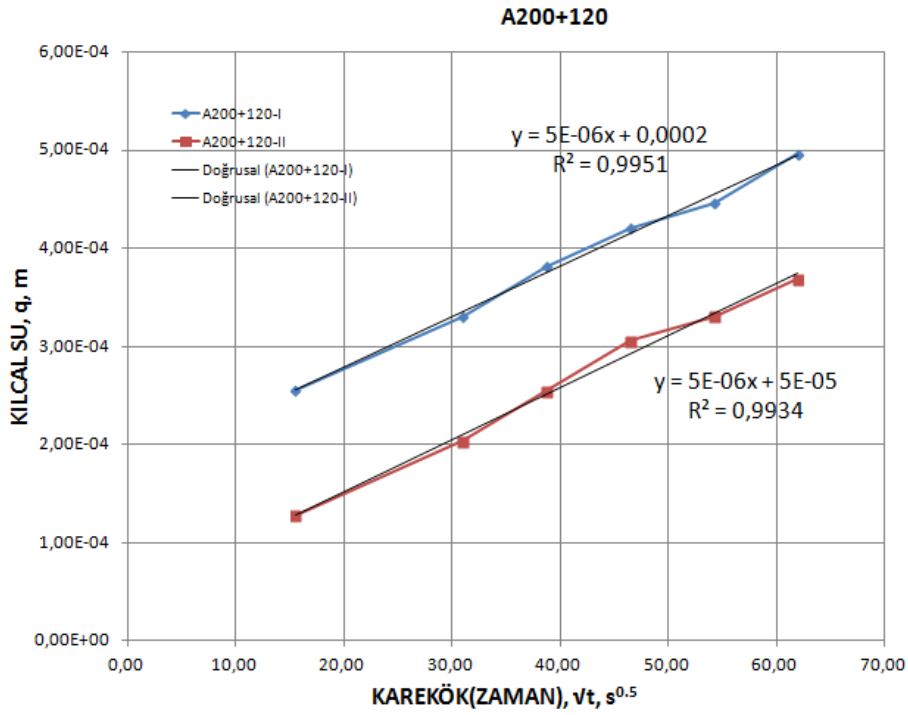
Süre, t, min	0	4	16	25	36	49	64	1440	Numunelerin Kılcallık Katsayıları, k, m/√s	Ortalama Kılcallık Katsayıları, k, m/√s
Süre, t, s	0	240	960	1500	2160	2940	3840	86400		
√t, √s	0	15,49	30,98	38,73	46,48	54,22	61,97	293,94		
Kılcal emilen su hacmi, m ³ /m ²									4,70E-06	4,93E-06
R001-I	0,00E+00	1,27E-04	1,91E-04	2,29E-04	2,67E-04	3,06E-04	3,44E-04	5,79E-03		
R001-II	0,00E+00	1,91E-04	2,67E-04	3,06E-04	3,57E-04	3,82E-04	4,33E-04	6,06E-03	5,17E-06	4,84E-06
A250+50-I	0,00E+00	1,66E-04	2,55E-04	2,93E-04	3,57E-04	3,95E-04	4,20E-04	6,46E-03	5,68E-06	
A250+50-II	0,00E+00	1,02E-04	1,53E-04	1,78E-04	2,29E-04	2,55E-04	2,80E-04	5,87E-03	3,99E-06	5,22E-06
A200+120-I	0,00E+00	2,55E-04	3,31E-04	3,82E-04	4,20E-04	4,46E-04	4,97E-04	6,05E-03	5,14E-06	
A200+120-II	0,00E+00	1,27E-04	2,04E-04	2,55E-04	3,06E-04	3,31E-04	3,69E-04	5,69E-03	5,31E-06	5,14E-06
B250+50-I	0,00E+00	1,53E-04	2,42E-04	2,93E-04	3,57E-04	3,95E-04	4,33E-04	6,51E-03	6,20E-06	
B250+50-II	0,00E+00	1,27E-04	1,66E-04	2,29E-04	2,67E-04	2,80E-04	3,06E-04	6,01E-03	4,09E-06	4,77E-06
B200+100-I	0,00E+00	1,40E-04	2,16E-04	2,55E-04	3,44E-04	3,69E-04	3,95E-04	5,84E-03	5,85E-06	
B200+100-II	0,00E+00	1,02E-04	1,53E-04	1,78E-04	2,29E-04	2,42E-04	2,67E-04	5,12E-03	3,69E-06	6,76E-06
C250+90-I	0,00E+00	1,78E-04	3,18E-04	3,95E-04	4,58E-04	5,09E-04	5,47E-04	7,32E-03	8,10E-06	
C250+90-II	0,00E+00	1,27E-04	2,04E-04	2,55E-04	3,06E-04	3,44E-04	3,69E-04	6,34E-03	5,42E-06	8,25E-06
K250+70-I	0,00E+00	2,04E-04	3,31E-04	4,46E-04	5,09E-04	6,11E-04	6,62E-04	6,32E-03	1,03E-05	
K250+70-II	0,00E+00	2,16E-04	2,93E-04	3,57E-04	4,07E-04	4,58E-04	4,97E-04	5,51E-03	6,25E-06	7,94E-06
K250+90-I	0,00E+00	2,93E-04	4,07E-04	4,84E-04	5,35E-04	5,86E-04	6,49E-04	6,00E-03	7,66E-06	
K250+90-II	0,00E+00	2,55E-04	2,42E-04	4,07E-04	4,58E-04	5,35E-04	5,98E-04	5,70E-03	8,22E-06	



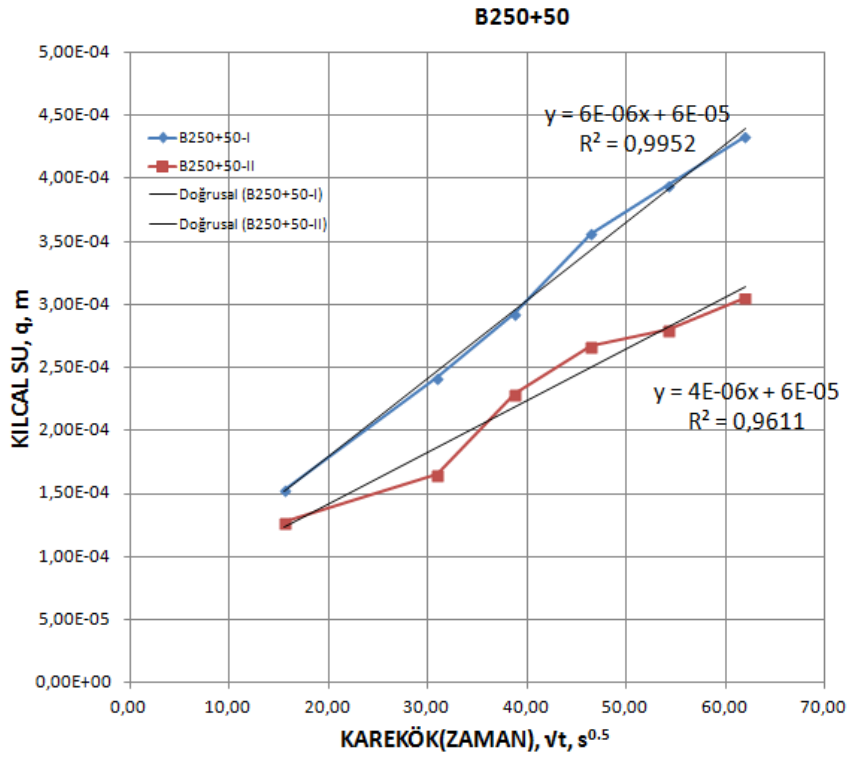
Şekil Ek. 1: R001 numunesine ait kılcallık katsayısı belirlenen $q-\sqrt{t}$ grafiği



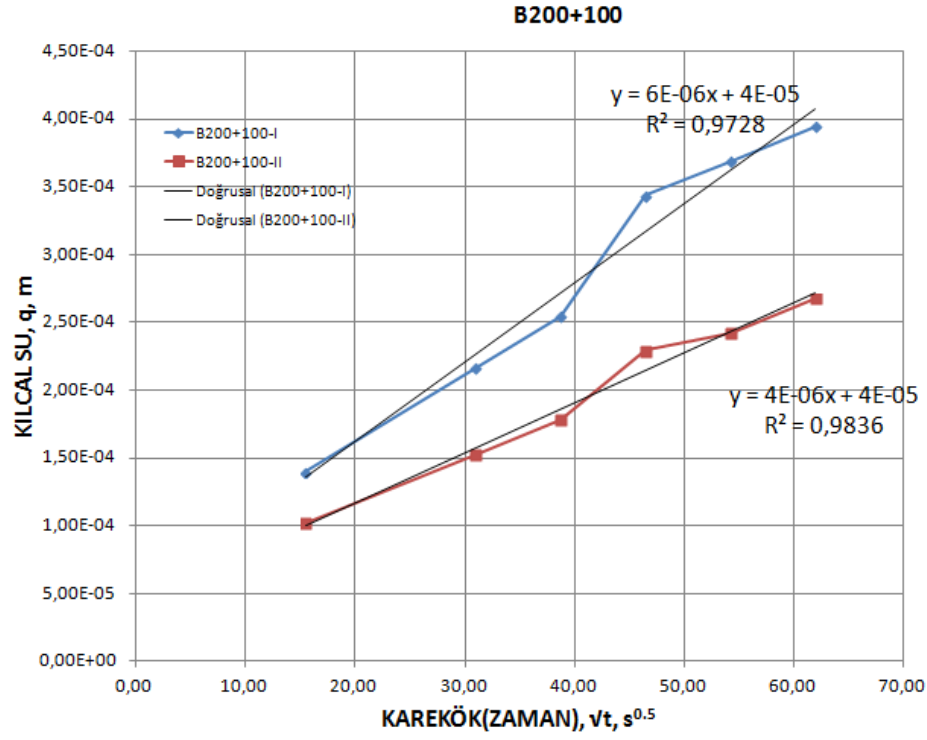
Şekil Ek. 2: A250+50 numunesine ait kılcallık katsayısı belirlenen $q-\sqrt{t}$ grafiği



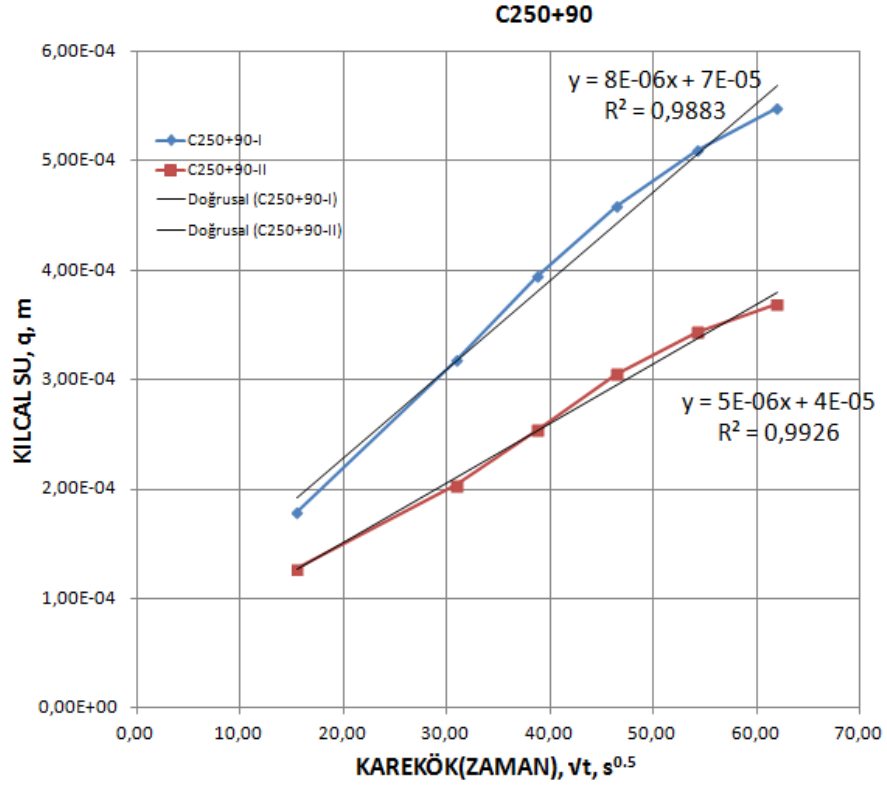
Şekil Ek. 3: A200+100 numunesine ait kılcallık katsayısı belirlenen $q-\sqrt{t}$ grafiği



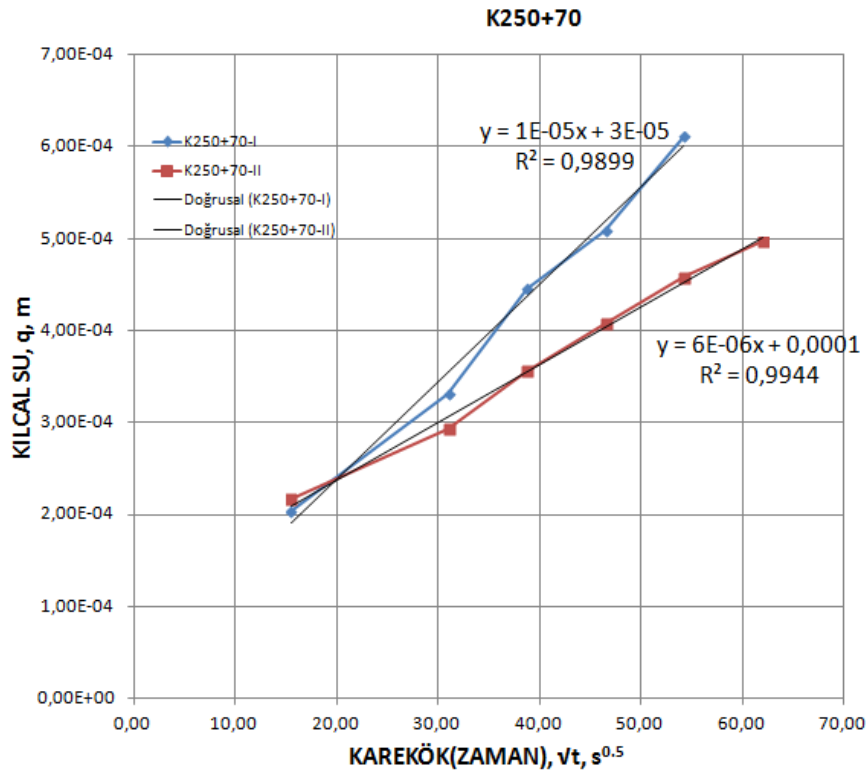
Şekil Ek. 4: B250+50 numunesine ait kılcallık katsayısı belirlenen $q-\sqrt{t}$ grafiği



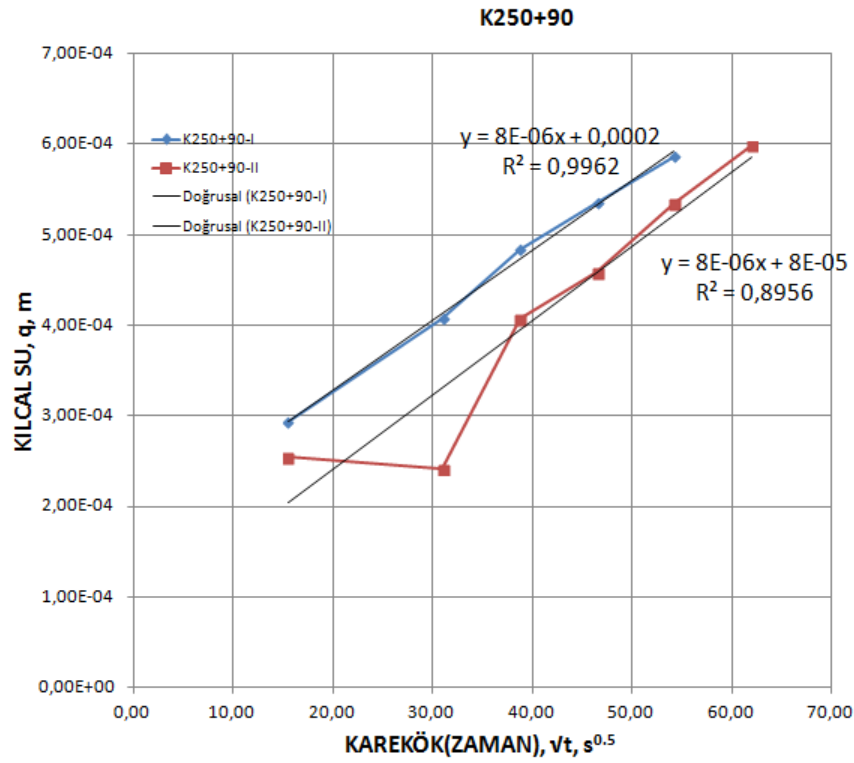
Şekil Ek. 5: B200+100 numunesine ait kılcallık katsayısı belirlenen $q-\sqrt{t}$ grafiği



Şekil Ek. 6: C250+90 numunesine ait kılcallık katsayısı belirlenen $q-\sqrt{t}$ grafiği



Şekil Ek. 7: K250+70 numunesine ait kılcallık katsayısı belirlenen $q-\sqrt{t}$ grafiği



Şekil Ek. 8: K250+90 numunesine ait kılcallık katsayısı belirlenen $q-\sqrt{t}$ grafiği



Şekil Ek. 9: R001 Numunesine ait magnezyum sülfat etkisinden önceki ve sonraki görüntüler



Şekil Ek. 10 : A250+50 Numunesine ait magnezyum sülfat etkisinden önceki ve sonraki görüntüler



Şekil Ek. 11: A200+120 Numunesine ait magnezyum sülfat etkisinden önceki ve sonraki görüntüler



Şekil Ek. 12: B200+100 Numunesine ait magnezyum sülfat etkisinden önceki ve sonraki görüntüler



Şekil Ek. 13: B250+50 Numunesine ait magnezyum sülfat etkisinden önceki ve sonraki görüntüler



Şekil Ek. 14 : C250+90 Numunesine ait magnezyum sülfat etkisinden önceki ve sonraki görüntüler

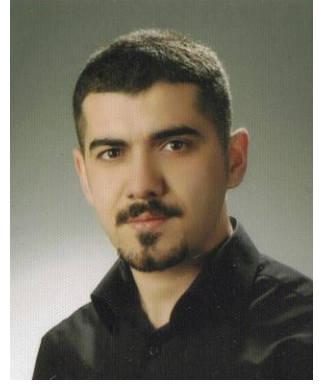


Şekil Ek. 15: K250+70 Numunesine ait magnezyum sülfat etkisinden önceki ve sonraki görüntüler



Şekil Ek. 16: K250+90 Numunesine ait magnezyum sülfat etkisinden önceki ve sonraki görüntüler

ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad: Hasan KANDEMİR

Doğum Yeri ve Tarihi: Bünyan / KAYSERİ

18.04.1985

Adres: Mimarsinan Mah. Gerede Cad. Karasu Sok. No:10/6 Kocasinan/KAYSERİ

E-Posta: hsn_kandemir@hotmail.com

Lisans: Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği

Mesleki Deneyim :

TAŞYAPI- FourWinds Residence Şantiyesi (2 yıl 6ay)

ENKA- Umman Uluslararası Havaalanı Şantiyesi (9ay)